



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΝΤΩΝΑ ΜΑΡΙΑ - ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ
ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΣΩΖΟΠΟΛΗΣ
ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

Θεσσαλονίκη 2017



ΝΤΩΝΑ ΜΑΡΙΑ - ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ
ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΣΩΖΟΠΟΛΗΣ
ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ»**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος
Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»

Κατεύθυνση Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Επιβλέπων: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ

Μέλος: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ

Μέλος: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΘΕΟΔΩΣΙΟΥ, Αν. Καθηγητής ΑΠΘ



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

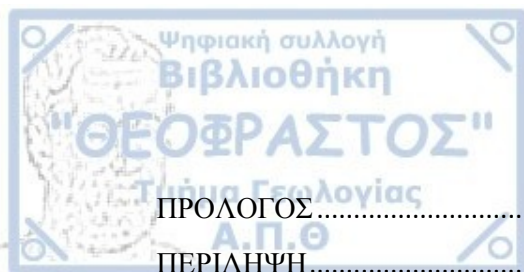
© Μαρία-Μαργαρίτα Ντόνα, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΠΑΡΑΚΤΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ ΣΩΖΟΠΟΛΗΣ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ

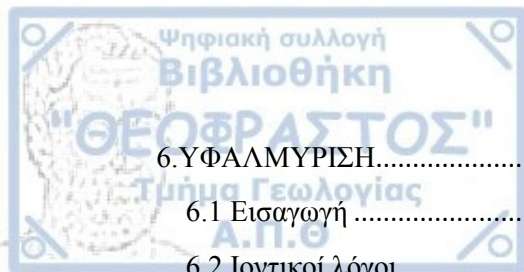
Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Στόχος.....	10
1.2 Εργασίες που υλοποιήθηκαν.....	10
2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ- ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ- ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	12
2.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής.....	12
2.2 Πληθυσμιακά στοιχεία και χρήσεις γης.....	13
2.3 Μορφολογία της περιοχής	15
2.4 Κλίμα	16
2.5 Υδρογραφικό δίκτυο.....	16
3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ	19
4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ.....	24
4.1 Υδρολιθολογία.....	24
4.2 Πιεζομετρία	25
5. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	28
5.1 Εισαγωγή	28
5.2 Υδροχημικές αναλύσεις.....	28
5.3 Υδροχημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού	31
5.3.1 Συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical conductivity -EC)	31
5.3.2 Θερμοκρασία (Temperature T).....	32
5.3.3 Ενεργός οξύτητα (pH)	33
5.3.4 Ιόντα Ασβεστίου (Calcium Ca^{2+}).....	35
5.3.5 Ιόντα Μαγνησίου (Magnesium Mg^{2+})	36
5.3.6 Ιόντα Νατρίου (Sodium Na^{+})	37
5.3.7 Ιόντα Καλίου (Potassium K^{+}).....	39
5.3.8 Ιόντα Χλωρίου (Chloride Cl^{-}).....	40
5.3.9 Όξινα ανθρακικά ιόντα (Bicarbonate HCO_3^{-})	41
5.3.10 Θειικά ιόντα (Sulphate SO_4^{2-}).....	42
5.3.11 Νιτρικά ιόντα (Nitrate NO_3^{-}).....	43
5.4 Υδροχημικά διαγράμματα	44



6. ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ.....	47
6.1 Εισαγωγή	47
6.2 Ιοντικοί λόγοι.....	48
6.2.1 Ιοντικός λόγος Na/Cl	49
6.2.2 Ιοντικός λόγος SO ₄ /Cl	49
6.2.3 Ιοντικός λόγος Mg/Mg+Ca.....	51
6.2.4 Ιοντικός λόγος Cl/HCO ₃	51
6.3 Δείκτης υφαλμύρισης SWIM Index.....	52
6.4 Γεωφυσικές διασκοπήσεις	53
7. ΜΕΤΡΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ.....	58
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	59
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61
10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	65



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η επιλογή να συνεχίσω τις σπουδές μου στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης ήταν πλήρως συνειδητή. Επέλεξα να προσθέσω στη ζωή μου ακόμα έναν κύκλο σπουδών, με την παρούσα εργασία να σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του. Η διατριβή ειδίκευσης μου αποτελεί ένα κομμάτι προσωπικής ευχαρίστησης. Κάθε φορά που διαβάζω αυτές τις σελίδες μου έρχονται εικόνες στο μυαλό από τις εργασίες υπαίθρου. Η χαρά της απογραφής μιας γεώτρησης, η κούραση, το διάβασμα και οι χημικές αναλύσεις στο εργαστήριο του τομέα αποτελούν πλέον μια γλυκιά ανάμνηση.

Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους για τις γνώσεις και τη βοήθεια που μου πρόσφεραν αυτόν τον 1,5 χρόνο στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών της Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή, κύριο Κωνσταντίνο Βουδούρη για τις γνώσεις που μου πρόσφερε και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εισαχθώ στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα του τμήματος. Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., κύριο Γεώργιο Βαργεμέζι για τις γνώσεις που μου πρόσφερε και για τη βοήθεια του στην εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής ειδίκευσης. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Νεραντζή Καζάκη. Η συμβολή του στα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά χρόνια της ζωής μου ήταν καθοριστική καθώς με τη στήριξη του ως γνώστης της επιστήμης της γεωλογίας αλλά πάνω από όλα ως άνθρωπος με βοήθησε να ωριμάσω περισσότερο, να πιστεύω στον εαυτό μου και να τολμώ. Ακόμα, ευχαριστώ την μεταπτυχιακή συμφοιτήτριά μου Ελισάβετ Γαβριηλίδου για την άριστη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια των σπουδών μας αλλά και στη συγγραφή δυο συνεδριακών εργασιών σχετικές με τις περιοχές μελέτης μας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Απόστολο Τζηρίνη (Γεωλόγο) για την παραχώρηση στοιχείων της περιοχής έρευνας και για τις χρήσιμες συμβουλές του ως συνάδελφος. Επίσης, ευχαριστώ τον Ηλία Φίκο (μέλος Ε.Δ.Ι.Π. στο Α.Π.Θ.) και τον Ματθαίο Μπάννενμπεργκ (μεταπτυχιακό φοιτητή του Τμήματος Γεωλογίας) για τη βοήθεια τους στις μετρήσεις γεωφυσικών διασκοπήσεων. Ακόμα, ευχαριστώ τη



Δέσποινα Ευσταθιάδου (μεταπτυχιακή φοιτήτρια του Τμήματος Γεωλογίας) και τη γεωλόγο Παναγιώτα Παπαδοπούλου για τη βοήθεια τους στις εργασίες υπαίθρου.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη θεία μου Κατερίνα για την αγάπη, την κατανόηση και όλα όσα μου έχει προσφέρει στη ζωή μου.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης έχει ως στόχο τη διερεύνηση της υφαλμύρισης του παράκτιου τμήματος της Σωζόπολης στη Βόρεια Ελλάδα. Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει έκταση 43 km² και βρίσκεται στο ΝΔ τμήμα της χερσονήσου της Χαλκιδικής. Τα τελευταία χρόνια έχει πραγματοποιηθεί πλήθος εργασιών και μελετών για την περιοχή της Χαλκιδικής λόγω του υδρογεωλογικού και γεωθερμικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει. Οι παράκτιες ζώνες της Χαλκιδικής και συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης παρουσιάζουν έντονη τουριστική δραστηριότητα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω της μικρής απόστασης από το κέντρο της Θεσσαλονίκης. Ωστόσο, ασκούνται και άλλες πιέσεις στην περιοχή οι οποίες οφείλονται στη γεωργική δραστηριότητα λόγω της ανεξέλεγκτης χρήσης λιπασμάτων και της μη ορθολογικής διαχείρισης του υπόγειου νερού.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που καλύπτουν την περιοχή είναι ιζήματα Νεογενούς- Τεταρτογενούς ηλικίας. Κυρίως γίνεται αναφορά στην ψαμμιτομαργαϊκή σειρά και στη σειρά ερυθρών αργίλων. Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως εύκρατο Μεσογειακό και το υψόμετρο είναι ομαλό. Η περιοχή έρευνας αποτελεί το παράκτιο τμήμα της λεκάνης απορροής του ρέματος Τσιγανό.

Τμήμα της διατριβής ειδίκευσης αποτελεί και η υδροχημική έρευνα από την οποία προέκυψαν οι πιέσεις που ασκούνται στην περιοχή. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού ως απόρροια των υπεραντλήσεων, η χρήση λιπασμάτων πλούσιων κυρίως σε ενώσεις αζώτου και τα γεωθερμικά ρευστά συντάσσουν το χημισμό των δειγμάτων που λήφθηκαν μεταξύ των περιοχών Καλλικράτειας - Σωζόπολης. Επίσης, από τη μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού σε 52 γεωτρήσεις προέκυψαν οι πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής για την εαρινή και θερινή περίοδο του έτους 2016. Στη συνέχεια, η εφαρμογή των γεωφυσικών διασκοπήσεων κάθετα στην ακτογραμμή ενίσχυσε τα αποτελέσματα της υδροχημικής έρευνας καθώς στην τομογραφία ηλεκτρικής αντίστασης απεικονίζεται η πλευρική διείσδυση του θαλασσινού νερού.



ABSTRACT

The aim of this Master thesis is the investigation of seawater intrusion in the coastal aquifer of Sozopoli in Northern Greece. The site is located in the southwestern part of the peninsula of Halkidiki and covers an area of 43 km². The recent years a lot of studies have been carried out for the Halkidiki region. This place has intense tourist activity during the summer season because of the short distance from the center of Thessaloniki. Additionally, there are more pressures in the area due to agricultural activity on account of the uncontrolled use of fertilizers and the non-rational management of groundwater.

Sedimentary formations occupy the majority of the study area and comprise of Neogene and Quaternary sediments. Neogene sediments comprise sandstone marl and red clay series. The climate is characterized as moderate Mediterranean and the height as smooth. The study area covers the coastal part of the drainage basin of Tsigano stream.

Hydrochemical research constitutes part of the Master thesis and has led to the pressure being exerted on the area. The intrusion of seawater as a result of over-pumping, the use of fertilizers rich mainly in nitrogen compounds and geothermal fluids characterize the chemistry of the samples taken between the areas of Kallikratia-Sozopoli. Also, the piezometric maps have been constructed from the groundwater level measurements to 52 wells within survey area during spring and summer periods of 2016. Subsequently, the geoelectrical measurements, perpendicularly to the coastline, reinforce the hydrochemical research as the electrical resistivity tomographies (ERTs) depict the lateral intrusion of seawater.



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος

Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στον κλάδο Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας. Ο τίτλος της Διατριβής Ειδίκευσης είναι: «Διερεύνηση της υφαλμύρισης του παράκτιου τμήματος της Σωζόπολης στη Βόρεια Ελλάδα ».

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη λεκάνη απορροής της Χαλκιδικής και αποτελεί μια παράκτια περιοχή με οικιστική, τουριστική και γεωργική δραστηριότητα. Το κλίμα στη Χαλκιδική είναι εύκρατο Μεσογειακό και σε συνδυασμό με τις ανάγκες των κατοίκων οδηγεί στην υπεράντληση των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων. Η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση του υπόγειου νερού επιφέρει αρνητικές συνέπειες τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο. Η ποιότητα του υπόγειου νερού υποβαθμίζεται και η άντληση του νερού στις γεωργικές εκτάσεις συνεχώς αυξάνεται.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την εξέταση του υδρογεωλογικού συστήματος της περιοχής. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι φυσικοχημικές ιδιότητες και η στάθμη των υπόγειων υδάτων για τη διερεύνηση της υφαλμύρισης στο παράκτιο τμήμα και στη συνέχεια για την πληρέστερη μελέτη της υδρογεωλογικής δομής υλοποιήθηκαν δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες (ERTs).

1.2 Εργασίες που υλοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση της παρούσας Διατριβής Ειδίκευσης πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:

- Συλλογή και μελέτη ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας – εργασιών με κύριο αντικείμενο την υφαλμύριση παράκτιων περιοχών.
- Συλλογή λιθολογικών τομών από προϋπάρχουσες γεωτρήσεις, υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων.



- Σύνταξη θεματικών χαρτών με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών/GIS.
- Εργασία υπαίθρου:
 1. Απογραφή υδρογεωτρήσεων και αποτύπωση σε χάρτη.
 2. Μέτρηση της υδροστατικής στάθμης στην ευρύτερη περιοχή έρευνας την εαρινή και χειμερινή περίοδο του ίδιου υδρολογικού έτους (2016).
 3. Δειγματοληψίες και χημικές αναλύσεις του υπόγειου νερού κατά τη χειμερινή περίοδο του 2016 καθώς και επί τόπου μέτρηση βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων.
 4. Εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων με τη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας.

Για την επεξεργασία και παρουσίαση των παραπάνω δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά ArcGIS ver.10.1, Aquachem ver. 3.7, Microsoft Office ver. 2010, Global Mapper ver.16 , Google Earth και Strater 3.

2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ- ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ- ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα, στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και εντοπίζεται κατά μήκος του ΝΔ τμήματος της Χαλκιδικής (Σχήμα 2.1). Ανήκει στο 10^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας και περιλαμβάνει το παράκτιο τμήμα από την περιοχή της Καλλικράτειας έως τη Σωζόπολη (τμήμα της λεκάνης της Καλαμαριάς). Η εξεταζόμενη περιοχή έχει έκταση 43km², ωστόσο για την καλύτερη διατύπωση της κατάστασης του υπόγειου υδατικού συστήματος εξετάστηκε και αναλύθηκε το τμήμα της ενδοχώρας που περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής της περιοχής έρευνας. Έτσι, η συνολικά εξεταζόμενη περιοχή, βάσει της έκτασης που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής του ρέματος Τσιγανό της περιοχής, καλύπτει επιφάνεια 58 km².



Σχήμα 2.1 Δορυφορική εικόνα της Χερσονήσου Χαλκιδικής. Η περιοχή έρευνας επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα. (Google Earth).

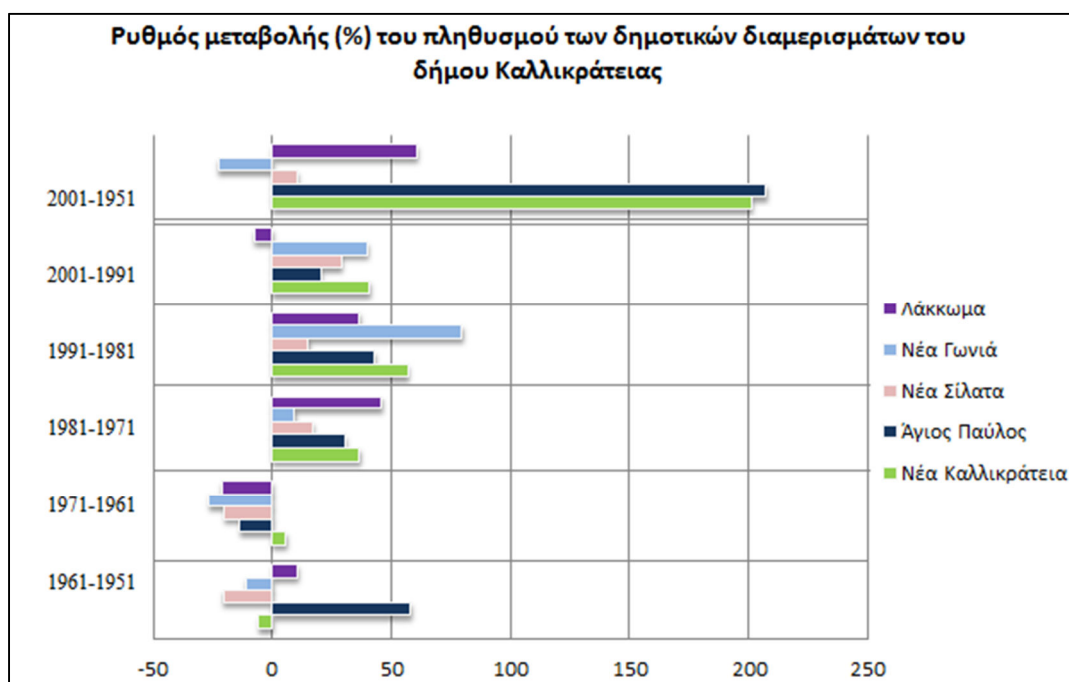
Ο Δήμος Καλλικράτειας βρίσκεται σε απόσταση 40km από το πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης και συνορεύει με τους δήμους Τρίγλιας, Επανομής και Μίκρας. Αποτελείται από τα Δημοτικά διαμερίσματα της Νέας Καλλικράτειας, των Νέων Σιλάτων, της Νέας Γωνιάς (που αποτελούν το ΒΔ όριο της εξεταζόμενης περιοχής), του Αγίου Παύλου και του Λακκόματος. Ο οικισμός της Σωζόπολης ανήκει στο Δημοτικό διαμέρισμα των Νέων Σιλάτων, ενώ όλα τα δημοτικά διαμερίσματα του Δήμου εντάσσονται στη Λεκάνη Καλαμαριάς.

Στους παραλιακούς οικισμούς παρατηρείται αύξηση των υδρευτικών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες λόγω τουριστικών δραστηριοτήτων. Αντίστοιχα, τα δημοτικά διαμερίσματα με μεγάλες αγροτικές εκτάσεις αντλούν σημαντικό όγκο υπόγειου νερού κατά την ίδια περίοδο. Η άντληση του υπόγειου νερού αυξάνεται συνεχώς για την κάλυψη των υδρευτικών, τουριστικών και αρδευτικών αναγκών με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου υδατικού συστήματος. Στον πίνακα 2.1 αποτυπώνεται η ετήσια κατανάλωση νερού σε m^3 στο Δήμο Καλλικράτειας, σύμφωνα με την απογραφή του 2001.

Εντός της περιοχής του Δήμου Καλλικράτειας υπάρχουν συνολικά 41 δημοτικές υδρευτικές γεωτρήσεις, οι οποίες δεν επαρκούν για να καλύψουν τις ανάγκες για νερό κατά τη θερινή περίοδο. Αυτό έχει ως αντίκτυπο τη λειτουργία ιδιωτικών υδρευτικών δικτύων. Επιπλέον, τα τελευταία 30 χρόνια στην περιοχή έχει καταγραφεί μεγάλη οικοδομική ανάπτυξη παραθεριστικών κατοικιών με πολλά ιδιωτικά δίκτυα ύδρευσης κάποια εκ των οποίων δεν έχουν αποτυπωθεί. Στον πίνακα 2.2 αποτυπώνεται ο ρυθμός μεταβολής (%) του πληθυσμού του δήμου Καλλικράτειας και στο σχήμα 2.2 παρατηρείται η μεταβολή του πληθυσμού ανά δημοτικό διαμέρισμα μεταξύ των ετών 1951 - 2001.

Πίνακας 2.1 Ετήσια κατανάλωση νερού σε m^3 στο Δήμο Καλλικράτειας, σύμφωνα με την απογραφή του 2001 (Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης ΥΔ10).

Δημοτικό Διαμέρισμα	Μόνιμος Πληθυσμός	Θερινός Πληθυσμός	Ετήσια Κατανάλωση σε m^3
ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΕΙΑΣ	10.881	110.000	2.700.000



Σχήμα 2.2 Ρυθμός μεταβολής (%) του πληθυσμού στα δημοτικά διαμερίσματα του δήμου Καλλικράτειας από το έτος 1951 έως 2001. (Πηγή: ΕΣΥΕ)

Πίνακας 2.2 Ρυθμός μεταβολής (%) του πληθυσμού του δήμου Καλλικράτειας (Πηγή: ΕΣΥΕ)

ΔΗΜΟΣ	1961-1951	1971-1961	1981-1971	1991-1981	2001-1991	2001-1951
ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΕΙΑ	-2,78	-10,45	31,10	46,10	21,83	103,16

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα και καλύπτεται κυρίως από αροτραίες καλλιέργειες (σιτάρι, κριθάρι, βαμβάκι), αμπελώνες, λαχανοκομικές καλλιέργειες (λάχανα, τομάτες) και δενδρώδεις καλλιέργειες (ελιά). Η υποβάθμιση του υπόγειου νερού λόγω των αγροτικών δραστηριοτήτων οφείλεται στο συνδυασμό της άντλησης νερού και του φαινομένου της νιτρορύπανσης λόγω της αλόγιστης χρήσης λιπασμάτων. Στον πίνακα 2.3 αποτυπώνεται η αύξηση κατανάλωσης νερού για τις ανάγκες της φυτικής παραγωγής κατά την περίοδο των ετών 1995-1999.

Πίνακας 2.3 Κατανάλωση νερού στη φυτική παραγωγή (Πηγή: Σχέδιο Διαχείρισης ΥΔ10).

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ (m ³) ΣΤΗ ΦΥΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΔΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ 1995 - 1999					
ΔΗΜΟΣ	1995	1996	1997	1998	1999
ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΕΙΑΣ	1.284.012	2.764.575	2.267.654	3.116.652	2.308.057

Επιπλέον, μια ακόμα πίεση που οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού είναι ο τουρισμός (Voudouris et al., 2006). Τα τελευταία χρόνια ο ρυθμός αύξησης του τουρισμού λόγω της μικρής απόστασης της περιοχής έρευνας ως παραθεριστικό θέρετρο από την πόλη της Θεσσαλονίκης και η μη ορθολογική διαχείριση του υπόγειου νερού για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδροφορέων. Συνεπώς, η ανεξέλεγκτη κατανάλωση των υπόγειων υδάτινων πόρων σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για νερό ευνοούν το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

2.3 Μορφολογία της περιοχής

Το ανάγλυφο της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται ως ομαλό με μικρές έως μέτριες κλίσεις ενώ η κοιλάδα διαρρέεται από πλήθος μικρών χείμαρρων. Το δεδομένο αυτό ευνοεί την κατείσδυση του βρόχινου νερού ωστόσο η παρουσία

αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή έρευνας δεν ευνοεί τον εμπλουτισμό των υδροφορέων. Η ακτογραμμή της περιοχής έχει μήκος 8 km² και εκτείνεται από την Νέα Καλλικράτεια μέχρι τη Σωζόπολη.

2.4 Κλίμα

Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή έρευνας χαρακτηρίζουν το εύκρατο Μεσογειακό κλίμα. Η επιφανειακή απορροή της υδρολογικής λεκάνης προέρχεται αποκλειστικά από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και ο εμπλουτισμός των υδροφορέων ευνοείται κατά τους βροχερούς χειμερινούς μήνες. Ωστόσο, αρνητική συνθήκη για την ανανέωση των υπόγειων υδάτων αποτελεί ο συνδυασμός των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών με τις υψηλές τιμές εξατμισοδιαπνοής κατά τους άνυδρους καλοκαιρινούς μήνες.

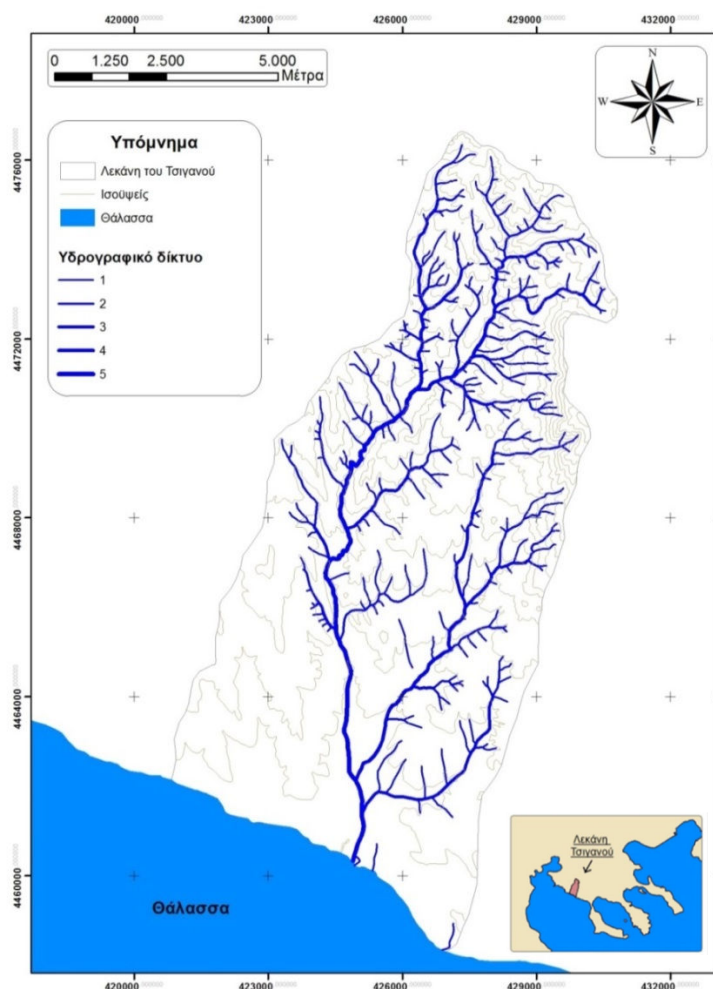
Το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται με τιμές από 4°C για τους χειμερινούς μήνες έως 29°C κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η μέση θερμοκρασία από τα έτη 1985 έως 2015 είναι 15,5 °C (Μετεωρολογικός Σταθμός Μίκρας). Η μέση ετήσια σχετική υγρασία υπολογίζεται στο 70% γεγονός που χαρακτηρίζει τους ήπιους υγρούς χειμώνες του εύκρατου μεσογειακού κλίματος που επικρατούν στην περιοχή έρευνας. Οι μήνες που χαρακτηρίζονται από τις μικρότερες βροχοπτώσεις είναι ο Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος. Συγκεκριμένα η ελάχιστη μέση τιμή βροχόπτωσης τα τελευταία 31 έτη παρατηρείται κατά τον Αύγουστο με 18,4 mm. Αντίστοιχα, οι πλέον βροχεροί μήνες είναι ο Νοέμβριος και ο Δεκέμβριος με μέση τιμή βροχόπτωσης 49,5 mm. Ο μέσος όρος των βροχοπτώσεων κατά τα έτη 1985-2015 είναι 437,6 mm ενώ ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής είναι 93%.

2.5 Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδατικό δυναμικό της λεκάνης Καλαμαριάς αποδίδεται στο Θερμαϊκό κόλπο δια μέσου πολλαπλών υπολεκανών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υποπαράλληλα υδατορέματα. Το ρέμα που αποτελεί το κύριο ποτάμιο υδατικό

σύστημα της περιοχής έρευνας ονομάζεται Τσιγανό και χαρακτηρίζεται ως φυσικό επιφανειακό υδατικό σύστημα μήκους 12,24 km. Το υδρογραφικό δίκτυο κρίνεται ως μέτρια αναπτυγμένο δενδριτικής μορφής. Στο σχήμα 2.3 απεικονίζεται το υδρογραφικό δίκτυο του ρέματος Τσιγανό ενώ το εμβαδόν της λεκάνης υπολογίστηκε σε 94,65 km². Από την ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler (1952) οι κλάδοι αριθμούνται μέχρι 5^{ης} τάξης. Στον πίνακα 2.4 αποτυπώνονται τα στοιχεία του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής έρευνας.

Σύμφωνα με τον 1^ο νόμο του Horton η μέση τιμή του συντελεστή διακλάδωσης (R_b) έχει εύρος τιμών 3-5 για τα φυσικά αναπτυσσόμενα δίκτυα. Στην λεκάνη της περιοχής μελέτης η μέση τιμή του συντελεστή διακλάδωσης ισούται με 4,07 (σχέση 2.1) υποδηλώνοντας ένα μέσο λόγο διακλάδωσης.



Σχήμα 2.3 Υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης Τσιγανού.

Πίνακας 2.4 Στοιχεία του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής έρευνας.

u	N _u	R _b	Συνολικό Μήκος Κλάδων (km)	$\overline{L}_u$ (km)	R _L	Ιδανικό μήκος (km)	Απόκλιση από το ιδανικό μήκος (%)
1	251	4,33	84,1	0,34		0,34	0
2	58	3,63	39,8	0,69	2,03	0,85	22,1
3	16	5,33	25,0	1,56	2,26	2,16	12,8
4	3	3	9,9	3,31	2,12	5,44	7,2
5	1		12,2	12,2	3,69	13,71	0,8

Όπου u: η τάξη των κλάδων, N_u : το πλήθος των κλάδων της εκάστοτε τάξης, R_b : ο συντελεστής διακλάδωσης (σχέση 2.1), R_L: ο λόγος μήκους κλάδων (σχέση 2.3), $\overline{R}_L$: ο μέσος λόγος μήκους κλάδων που υπολογίστηκε 2,52 και $\overline{L}_u$: το μέσο μήκος των κλάδων της τάξης u (σχέση 2.2).

Οι τιμές απόκλισης υπολογίστηκαν βάσει του 2^{ου} νόμου του Horton. Οι θετικές τιμές απόκλισης από το ιδανικό μήκος δείχνουν ότι το υδρογραφικό δίκτυο βρίσκεται σε στάδιο ομαλής αποστράγγισης. Ωστόσο, οι αρνητικές τιμές απόκλισης συνήθως οφείλονται στις νεοτεκτονικές δράσεις και ευνοούν την αλλαγή του αναγλύφου.

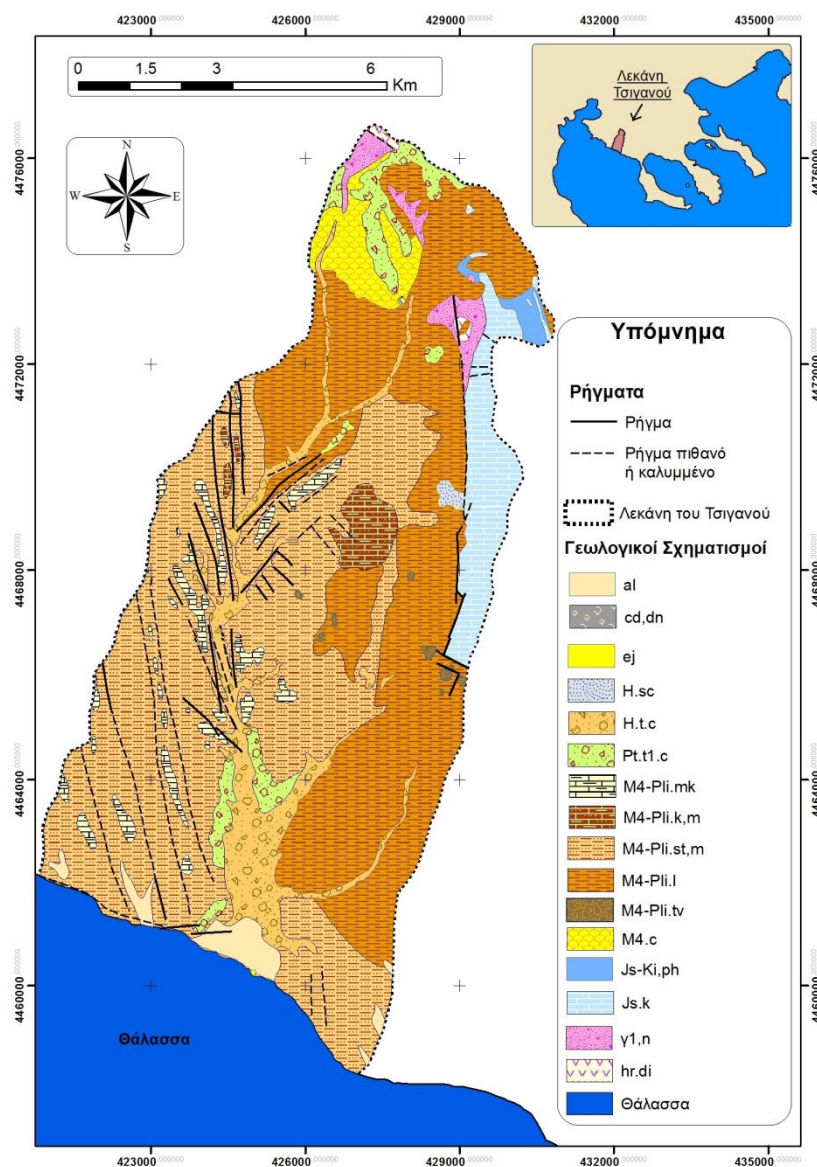
$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (2.1)$$

$$\overline{L}_u = \overline{L}_1 \cdot \overline{R}_L^{(u-1)} \quad (2.2)$$

$$R_L = \frac{\overline{L}_u}{\overline{L}_{u-1}} \quad (2.3)$$

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην υποζώνη Παιονίας (Μουντράκης, 2010). Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται επιφανειακά στη λεκάνη του ρέματος Τσιγανό είναι Ολοκαινικής, Πλειστοκαινικής, Νεογενούς και Μεσοζωϊκής ηλικίας. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης και αντίστοιχα στον πίνακα 3.1 η περιγραφή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής. Στα σχήματα 3.2 έως 3.6 απεικονίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αφορούν την περιοχή έρευνας.



Σχήμα 3.1 Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Φύλλο του ΙΓΜΕ 1:50.000 Βασιλικών). Η επεξήγηση του υπομνήματος βρίσκεται στον Πίνακα 3.1.

Ο σχηματισμός της Τρίγλιας συντελείται από στρώματα ερυθροστρωμάτων αποτελούμενα από αδρόκκοκη-λεπτόκκοκη χαλαζιακή κυρίως άμμο και ποικίλες αναλογίες ιλύος αργίλου, ερυθρού καστανέρυθρου χρώματος και διάσπαρτες κροκάλες χαλαζία, πηγματίτη και γενέσιου. Τα ιζήματα του σχηματισμού αυτού παρουσιάζουν γενικά μαζώδη δομή με παρεμβολές φακών κροκαλοπαγών, κροκαλοπαγών-άμμων και ιλυοαργιλλούχων άμμων. Σε πολλές θέσεις παρατηρούνται παρεμβολές λεπτών φακών κονδυλώδους μάργας και αργίλων. Οι φακοί κροκαλοπαγών, άμμων και ψαμμιτών δηλώνουν περιόδους απόθεσης ποταμο-χειμάρρειων υλικών ενώ οι λεπτοί φακοί αργίλων και κονδυλώδους μάργας οφείλονται σε εφήμερα λιμναία ελώδη μικροπεριβάλλοντα (Γ. Συρίδης 1990).

Πίνακας 3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

Ηλικία	Πέτρωμα/Σχηματισμός	Κωδικός	Έκταση (km ²)	Περίμετρος (km)
Ολόκαινο	Αλλουβιακές αποθέσεις	al	1,65	13,46
	Παράκτιες αποθέσεις	cd,dn	0,03	4,18
	Αλλουβιακά ριπίδια	ej	0,01	0,35
	Πλευρικά κορήματα	H.sc	0,20	1,93
	Κατώτερη αναβαθμίδα του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων	H.t.c	6,78	68,34
Πλειστόκαινο	Ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων	Pt.tl.c	3,37	31,77
Νεογενές	Ασβεστόλιθοι γλυκών υδάτων	M4-Pli.mk	2,52	42,24
	Ασβεστόλιθοι γλυκών υδάτων και σκληρές μάργες	M4-Pli.k,m	1,62	9,13
	Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά	M4-Pli.st,m	38,1	131,81
	Σειρά ερυθρών αργίλων	M4-Pli.l	30,53	99,23
	Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι	M4-Pli.tv	0,16	4,38
	Βασική σειρά κροκαλοπαγών	M4.c	2,52	16,78
Μεσοζωϊκό	Στρώματα Πρινοχωρίου	Js-ki,ph	0,61	7,39
	Ασβεστόλιθοι	Js.k	4,79	22,23
	Γρανодиόριτης	γl,n	1,55	15,45
	Διοψιδικοί κερατίτες	hr.di	0,20	3,67



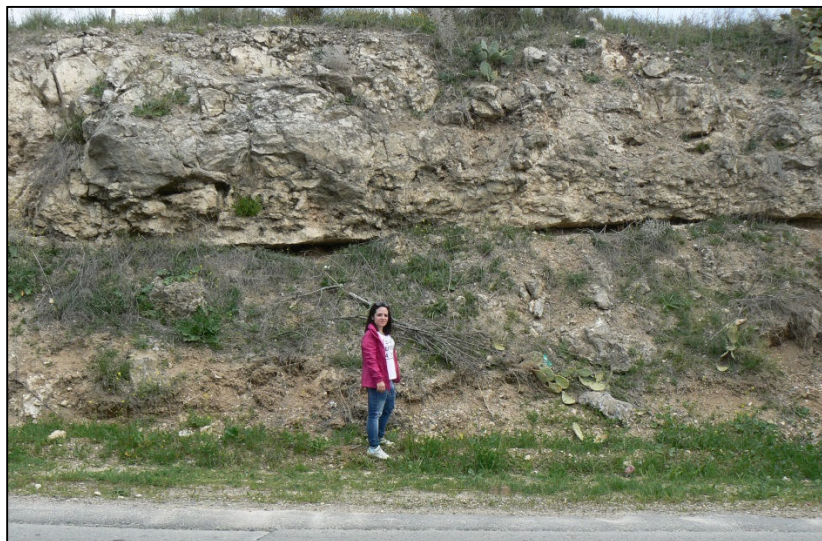
Σχήμα 3.2 Σφηνοειδής στρώση τραβερτινοειδών ασβεστόλιθων στη σειρά ερυθρών αργίλων. Παρουσιάζονται με μορφή καλύμματος λόγω της διάβρωσης του ανώτερου στρώματος των ερυθρών αργίλων.



Σχήμα 3.3 Εναλλαγές στρώσεων της σειράς ερυθρών αργίλων.



Σχήμα 3.4 Ασβεστόλιθοι του όρους Κατσίκια (πάνω). Τεφροί- γαλαζωποί αποσαθρωμένοι παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι του όρους Κατσίκια (κάτω).



Σχήμα 3.5 Ασβεστόλιθοι γλυκών υδάτων γαλαζότεφροι κυρίως μαργαϊκοί, συνιστούν τον ανώτερο ορίζοντα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς.



Σχήμα 3.6 Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά με εναλλαγές στρωμάτων αργίλου και αργιλούχας μάργας (πάνω), τμήμα του στρώματος αργιλούχας μάργας της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς (κάτω).

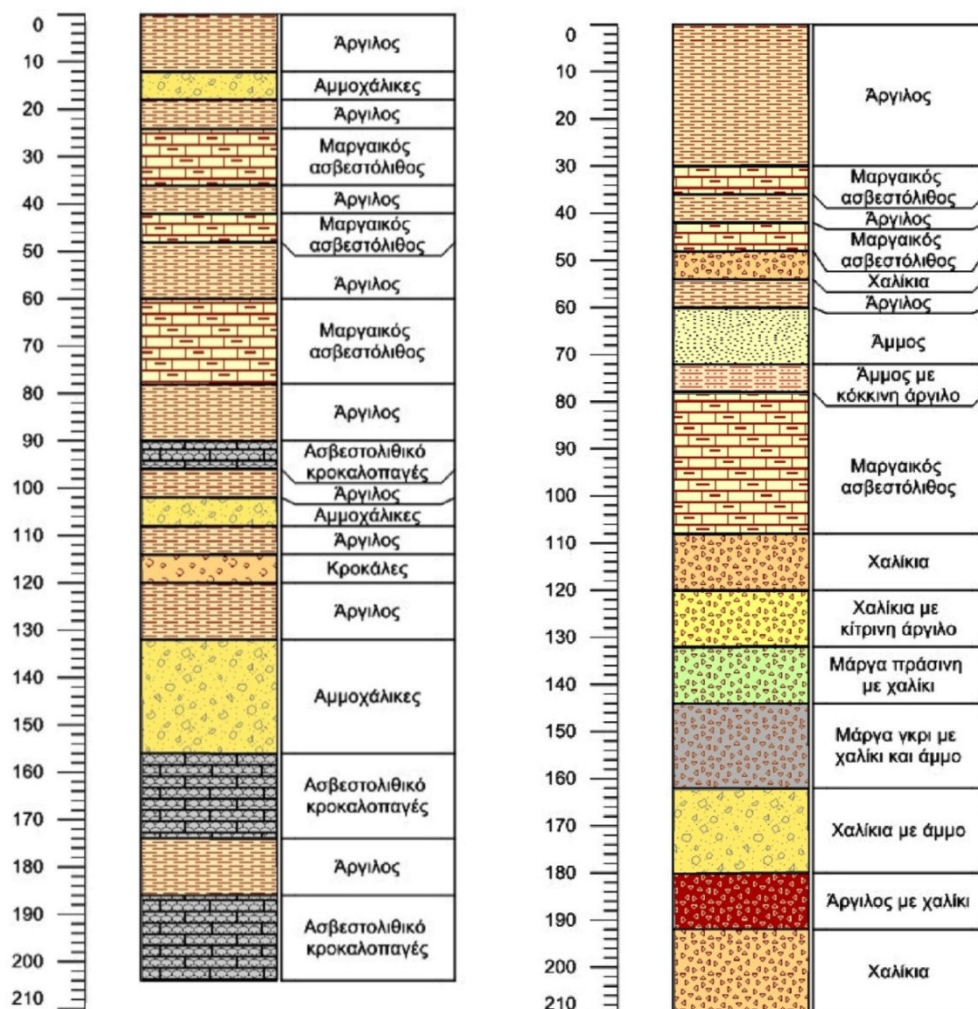
4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

4.1 Υδρολιθολογία

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής από υδρολιθολογικής άποψης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1. Η παράκτια περιοχή χαρακτηρίζεται από το κοκκώδες υδροφόρο σύστημα Επανομής – Μουδανιών, ωστόσο προς την ενδοχώρα απαντώνται και άλλα είδη υδροφορέων (Βεράνης & Χατζηκυριακού, 2010). Καρστικοί υδροφορείς εντοπίζονται ΒΑ του υδρογραφικού δικτύου του ρέματος Τσιγανό στους Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους και αντίστοιχα ο υδροφορέας διαρρηγμένων πετρωμάτων στο γρανοδιορίτη ΒΔ του υδροκρίτη του ρέματος. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές λιθολογικές τομές από δυο γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας. Το πάχος των επάλληλων υδροφορέων κυμαίνεται από 26 έως 150 m, με τις μεγαλύτερες τιμές να υπολογίζονται στην παράκτια ζώνη. Στην παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εξετάστηκε μόνο ο πορώδης τύπος υδροφορέα λόγω του πλαισίου θεματολογίας της εργασίας.

Πίνακας 4.1 Κατανομή υδρολιθολογικών ενοτήτων του ρέματος Τσιγανό.

Υδρολιθολογική ενότητα	Πέτρωμα/Σχηματισμός
Πορώδης υδροφορέας	Ολοκαινικές και Πλειστοκαινικές αποθέσεις, Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, Σειρά ερυθρών αργίλων
Καρστικός υδροφορέας	Ασβεστόλιθοι γλυκών υδάτων, Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι, Στρώματα Πρινοχωρίου
Υδροφορέας διαρρηγμένων πετρωμάτων	Γρανοδιορίτης



Σχήμα 4.1 Λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων M50 (αριστερά) και M56 (δεξιά).

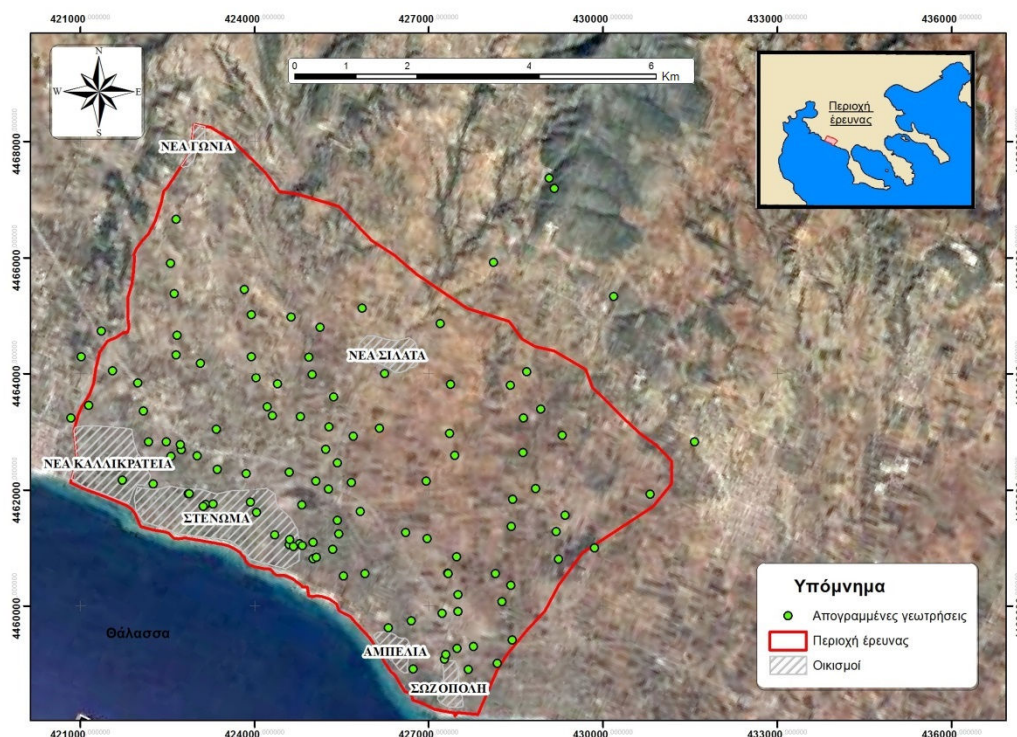
4.2 Πιεζομετρία

Το βάθος του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με τη γεωλογία της εκάστοτε περιοχής αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την προστασία του από τους εξωτερικούς παράγοντες. Οι μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού με το πέρασμα των υδρολογικών ετών μπορούν να επιφέρουν μεταβολές στο χημισμό των υπόγειων υδροφορέων (Bellot et al., 2007). Γι' αυτό το λόγο, κρίνεται απαραίτητη η συστηματική παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού. Συγκεκριμένα, στον ελλαδικό χώρο οι παράκτιες περιοχές πλήττονται σε μεγαλύτερο ποσοστό καθώς παρατηρείται ανύψωση της διεπιφάνειας του γλυκού και θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Το φαινόμενο αυτό της υφαλμύρισης στις παράκτιες περιοχές

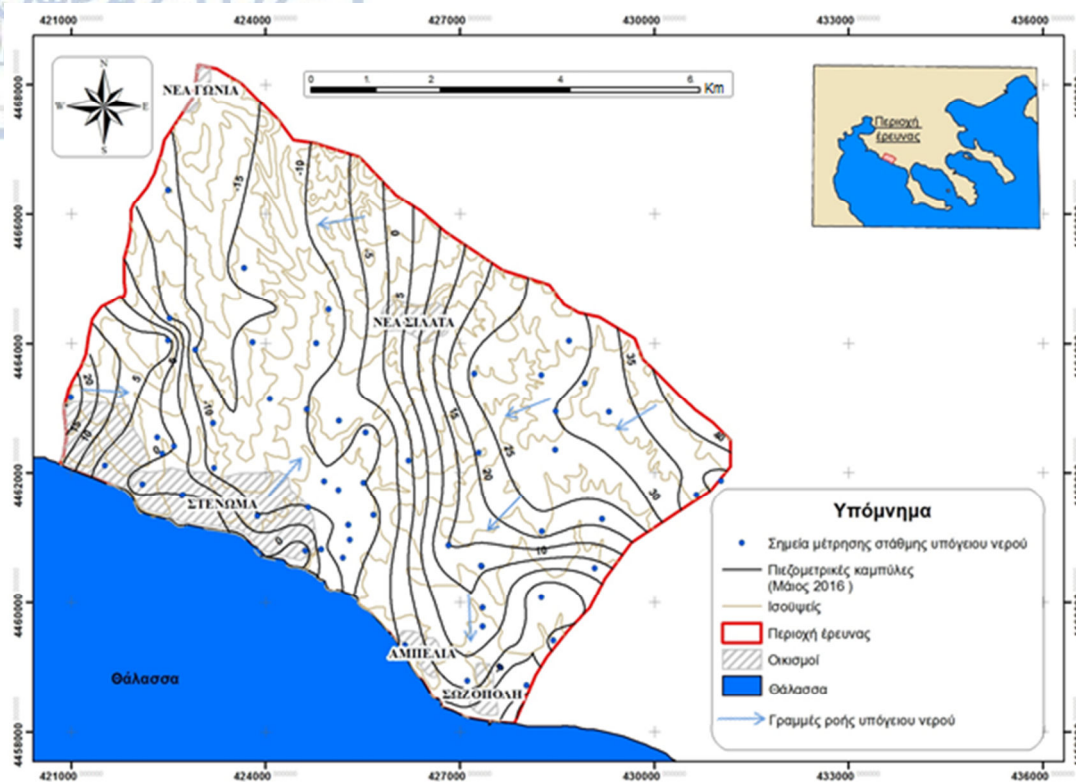
ευνοείται από την αλόγιστη χρήση του υπογείου νερού για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς (Stamatis and Voudouris, 2003).

Για τον προσδιορισμό των πιεζομετρικών συνθηκών (σχήματα 4.2 και 4.3) στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού από την επιφάνεια του εδάφους σε 52 γεωτρήσεις, κατά την ξηρή και υγρή περίοδο του ίδιου υδρολογικού έτους (2016). Συνολικά, οι γεωτρήσεις που απογράφηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου είναι περισσότερες, ωστόσο σε πολλές γεωτρήσεις δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στάθμης καθώς είτε ήταν σφραγισμένες είτε ήταν αδύνατη η πρόσβαση σε αυτές. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι γεωτρήσεις που απογράφηκαν κατά τη διάρκεια των εργασιών υπαίθρου.

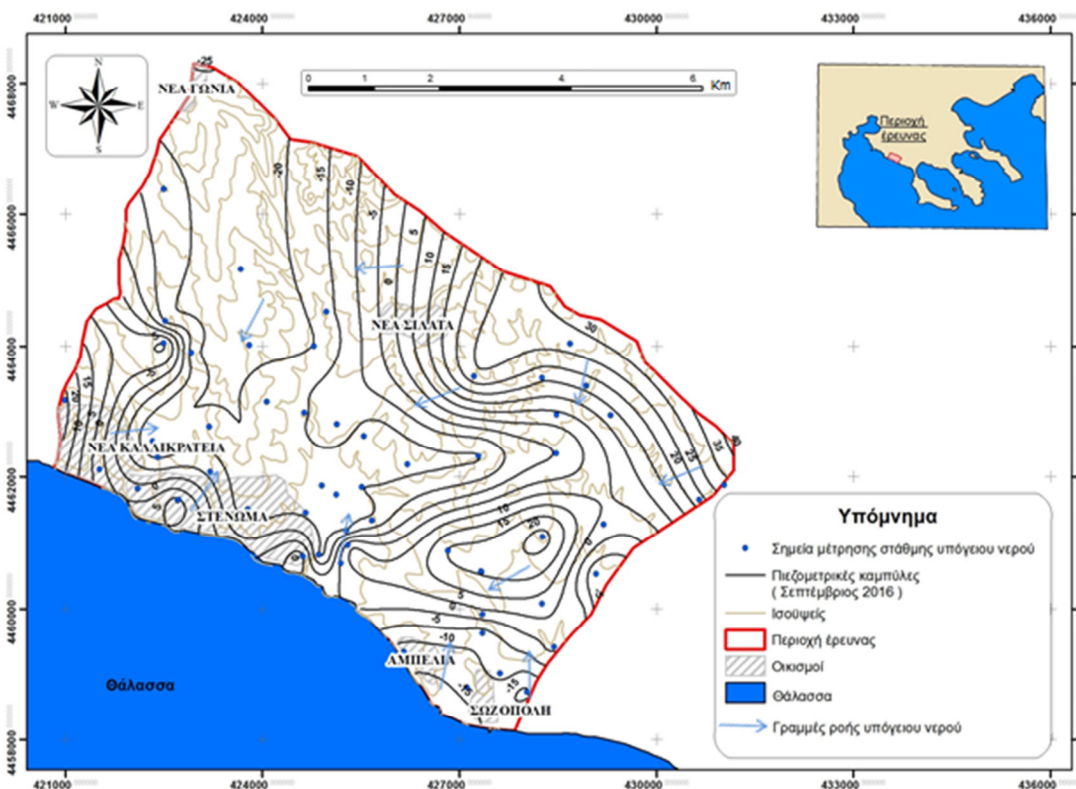
Στους χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών παρατηρείται η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στις αυξημένες ανάγκες για νερό κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η πτώση της στάθμης του υδροφόρου κατά την εαρινή περίοδο αποτελεί ευνοϊκή συνθήκη για τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα καθώς μεταβάλλεται η διεπιφάνεια μεταξύ του γλυκού και θαλασσινού νερού (Kazakis et al., 2013).



Σχήμα 4.2 Απογραμμένες γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 4.3 Ισοπιεζομετρικές καμπύλες στην περιοχή έρευνας την περίοδο Απριλίου-Μαΐου 2016.



Σχήμα 4.4 Ισοπιεζομετρικές καμπύλες στην περιοχή έρευνας την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2016.

5. ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Ο χημισμός του υπόγειου νερού εξαρτάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους συναντάται, το χρόνο παραμονής του στον υδροφορέα και από εξωτερικούς ανθρωπογενείς παράγοντες. Συνεπώς, η ανάλυση της ποιότητας του υπόγειου νερού είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων αλλά και για την προστασία του. Η βέλτιστη αντιμετώπιση των φαινομένων που υποβαθμίζουν την ποιότητα του υπόγειου νερού μπορεί να επιτευχθεί αρχικά με την εξέταση των χαρακτηριστικών των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων και των πιέσεων που εμφανίζονται στην εκάστοτε περιοχή.

5.2 Υδροχημικές αναλύσεις

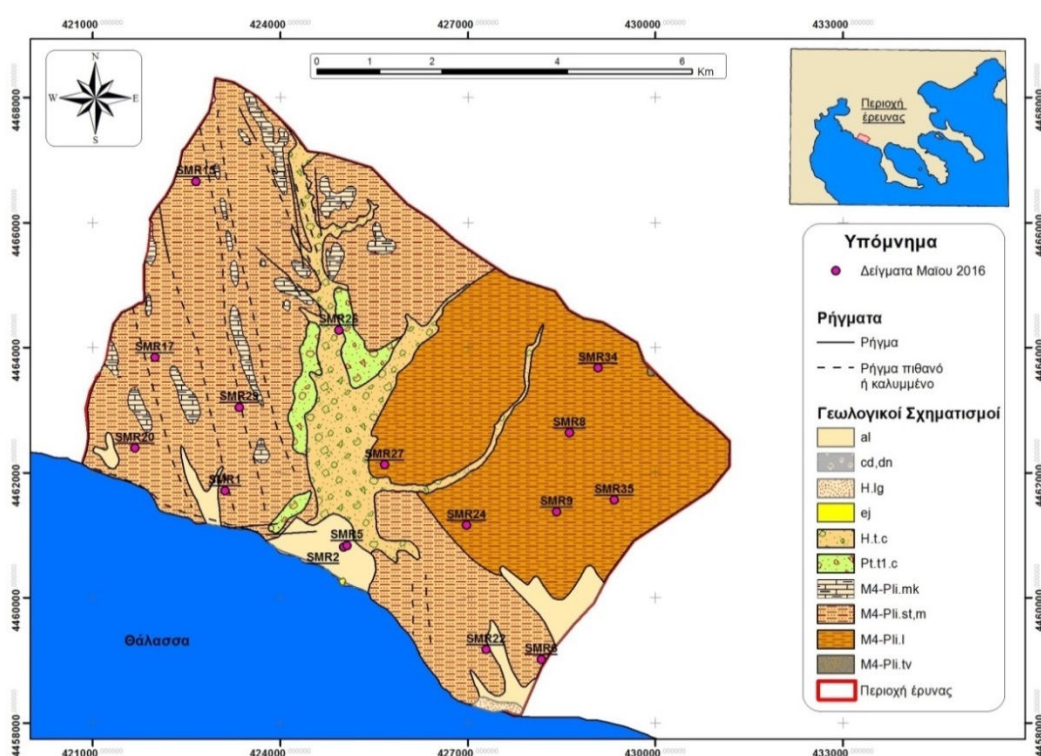
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία κατά την περίοδο του Μαΐου 2016. Συνολικά, λήφθηκαν 16 δείγματα, οι θέσεις των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1. Τα σημεία δειγματοληψίας επιλέχτηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατόν καλύτερα η περιοχή έρευνας σύμφωνα με το πλήθος και το εύρος των γεωτρήσεων που απογράφηκαν.

Η μέτρηση του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) των δειγμάτων έγινε επιτόπου ηλεκτρομετρικά με φορητό αγωγιμόμετρο τύπου JENWAY κατά την περίοδο του Μαΐου 2016. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1α.

Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων νερού διεξήχθησαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ και στο ΕΘΙΑΓΕ. Τα ιόντα του ασβεστίου (Ca^{2+}) και των όξινων ανθρακικών (HCO_3^-) μετρήθηκαν με τη μέθοδο της τιτλοδότησης της HACH, ενώ ο προσδιορισμός των ιόντων του μαγνησίου (Mg^{2+}) πραγματοποιήθηκε μέσω της ολικής σκληρότητας. Τα θειικά ιόντα (SO_4^{2-}), τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-) και τα χλωριόντα (Cl^-) μετρήθηκαν με τη χρήση φασματοφωτόμετρου. Τα ιόντα του καλίου (K^+) και του νατρίου (Na^+) μετρήθηκαν με φλογοφωτόμετρο.

Για τον έλεγχο των χημικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το σφάλμα ισοζυγίου ιόντων, το οποίο υπολογίστηκε σε όλα τα δείγματα <5% (σχέση 5.1) με τις συγκεντρώσεις των ιόντων εκφρασμένες σε meq/L. Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των κύριων ιόντων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1β .

$$\text{Σφάλμα ισοζυγίου ιόντων (\%)} = \frac{\Sigma_{\text{κατιόντων}} - \Sigma_{\text{ανιόντων}}}{\Sigma_{\text{κατιόντων}} + \Sigma_{\text{ανιόντων}}} \cdot 100 \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.1 Θέσεις δειγματοληψίας στην περιοχή έρευνας (Μάιος 2016).

Πίνακας 5.1α Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των κύριων ιόντων για την περίοδο Μαΐου 2016.

Δείγματα	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)
SMR1	7,32	1972	21,3
SMR2	7,03	2100	19,3
SMR5	7,03	4280	19,8
SMR6	6,91	1284	21,1
SMR8	6,78	1567	20,9
SMR9	6,53	1816	21,1
SMR15	6,88	1472	25,1
SMR17	7,35	828	22,3
SMR20	7,11	1270	18,8
SMR22	7,26	1396	20,5
SMR24	7,01	1235	21,5
SMR26	7,09	1212	22,5
SMR27	6,97	1374	23,6
SMR29	7,22	814	26,2
SMR34	6,63	1660	22,6
SMR35	6,6	1740	21,2

Πίνακας 5.1β Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των κύριων ιόντων για την περίοδο Μαΐου 2016.

Δείγματα	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	Cl (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)
SMR1	47	106	287	404	100	80	204	1,3
SMR2	84	110	293	394	149	83	158	2,6
SMR5	29	66	937	306	306	127	277	9,4
SMR6	17	58	114	436	142	30	96	5,9
SMR8	58	43	143	448	172	24	93	9,2
SMR9	22	51	192	570	216	18	116	9,9
SMR15	4	79	121	578	94	50	181	3,9
SMR17	12	30	39	380	72	45	51	2,1
SMR20	69	21	131	376	126	49	53	1,7
SMR22	96	44	119	431	89	65	116	2,6
SMR24	24	52	114	394	112	33	105	6,5
SMR26	9	67	82	495	108	52	86	3
SMR27	15	57	85	533	131	40	106	4,3
SMR29	8	38	40	351	75	33	56	1,9
SMR34	26	38	115	656	180	23	106	12,8
SMR35	24	37	139	619	202	1	106	11,8

5.3 Υδροχημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού

5.3.1 Συντελεστής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical conductivity -EC)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα φανερώνει τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων σε διαλυμένα άλατα. Η παραμετρική τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για υδρευτική χρήση βάσει της Οδηγίας 98/83/EK αντιστοιχεί σε 2500 $\mu\text{S/cm}$.

Στην περιοχή έρευνας η ηλεκτρική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 814 έως 4280 $\mu\text{S/cm}$ κατά την περίοδο του Μαΐου (Πίνακας 5.2). Στο σχήμα 5.2 απεικονίζεται η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την περίοδο του Μαΐου 2016. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στο παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας και σχετίζονται με την παρουσία αλάτων λόγω της διείσδυσης της θάλασσας στον παράκτιο υδροφόρο ορίζοντα. Η μέγιστη τιμή EC για το μήνα Μάιο αντιστοιχεί στο δείγμα SMR5, το οποίο απέχει 284m από την ακτογραμμή. Υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζουν και τα δείγματα SMR1 και SMR2 τα οποία εντοπίζονται εξίσου κοντά στην παράκτια ζώνη. Στη ΒΑ πλευρά της περιοχής έρευνας οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας κυμαίνονται μεταξύ 1400-1800 $\mu\text{S/cm}$. Οι τιμές αυτές πιθανόν να οφείλονται στην παρουσία του γεωθερμικού πεδίου, το οποίο αναπτύσσεται μεταξύ των τεκτονικών κεράτων Κατσίκια και Ύψωμα (Βεράνης & Χατζηκυριακού, 2010), ανάντη της περιοχής έρευνας.

Πίνακας 5.2 Στατιστικά στοιχεία του συντελεστή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) από τα δείγματα των χημικών αναλύσεων στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Παράμετρος	EC ($\mu\text{S/cm}$)
Μέγιστο	4280
Ελάχιστο	814
Μέση τιμή	1626,3
Τυπική Απόκλιση	794,7



Σχήμα 5.2 Χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.3.2 Θερμοκρασία (Temperature T)

Η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων καθορίζεται από τα πετρώματα στα οποία αποθηκεύεται είτε κινείται το νερό, από το βάθος και τις μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα (Βουδούρης 2009).

Τα στατιστικά στοιχεία της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 και η κατανομή της παραμέτρου στο σχήμα 5.3 για την περίοδο του Μαΐου 2016. Η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας για τη περίοδο του Μαΐου 2016 είναι 26,2°C ενώ η ελάχιστη υπολογίστηκε στους 18,8°C με μέση τιμή 21,7°C και τυπική απόκλιση 2,2. Στα δείγματα SMR29 και SMR15 παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες.

Πίνακας 5.3 Στατιστικά στοιχεία της θερμοκρασίας (T) σε °C από τα δείγματα των χημικών αναλύσεων στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	26,2
Ελάχιστο	18,8
Μέση τιμή	21,7
Τυπική απόκλιση	2,2



Σχήμα 5.3 Χωρική κατανομή της θερμοκρασίας (T) σε °C την περίοδο του Μαΐου 2016.

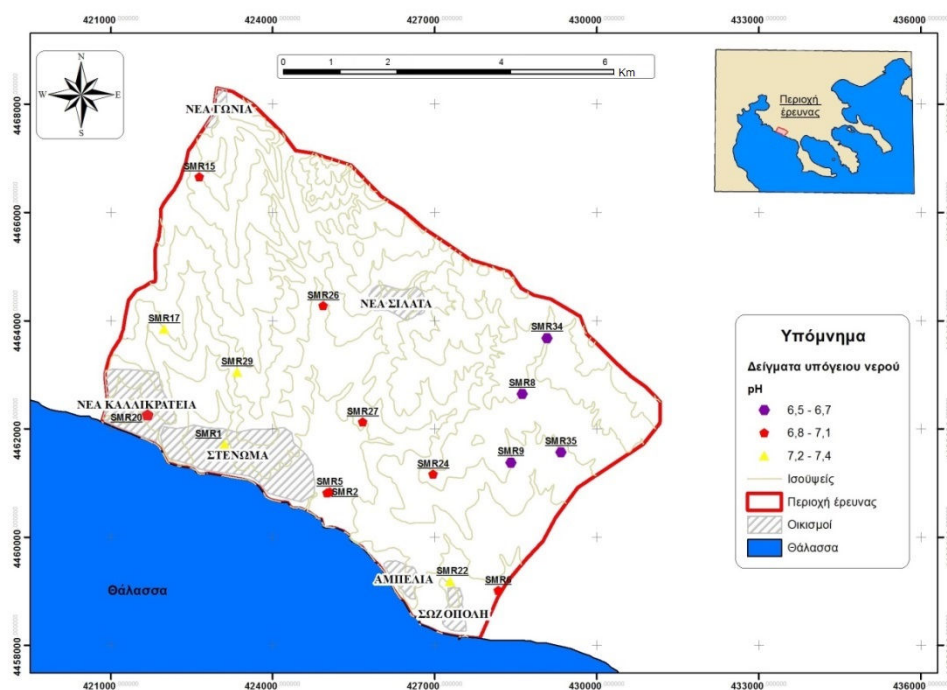
5.3.3 Ενεργός οξύτητα (pH)

Όταν το pH είναι ίσο με 7 το διάλυμα χαρακτηρίζεται ως ουδέτερο. Για τιμές pH μεγαλύτερες του 7 ($\text{pH} > 7$) το υδατικό διάλυμα είναι αλκαλικό και για τιμές pH μικρότερες του 7 ($\text{pH} < 7$) η υδάτινη μάζα χαρακτηρίζεται ως όξινη. Οι τιμές της ενεργούς οξύτητας καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα πετρώματα στα οποία φιλοξενείται το υπόγειο νερό. Επίσης, οι τιμές pH για τα ύδατα βροχής κυμαίνονται κοντά στο 6 ($\text{pH} \approx 6$) και για τα ύδατα ποταμών στο 7 ($\text{pH} \approx 7$) αντίστοιχα.

Το pH της περιοχής έρευνας κυμαίνεται από 6,5 μέχρι 7,4 και χαρακτηρίζεται από όξινο έως βασικό. Οι όξινες τιμές εντοπίζονται προς την ενδοχώρα στα δείγματα SMR8, SMR9, SMR34 και SMR35 γεγονός που σχετίζεται με τη παρουσία γεωθερμικών ρευστών κοντά στην περιοχή. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στο παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας στα δείγματα SMR1, SMR17, SMR22 και SMR29. Η μέση τιμή του pH είναι 7 για την περίοδο του Μαΐου. Τα στατιστικά στοιχεία του pH και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 στο σχήμα 5.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.4 Στατιστικά στοιχεία του pH στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	7,4
Ελάχιστο	6,5
Μέση τιμή	7
Τυπική απόκλιση	0,3



Σχήμα 5.4 Θεματικός χάρτης της κατανομής του pH την περίοδο του Μαΐου 2016.

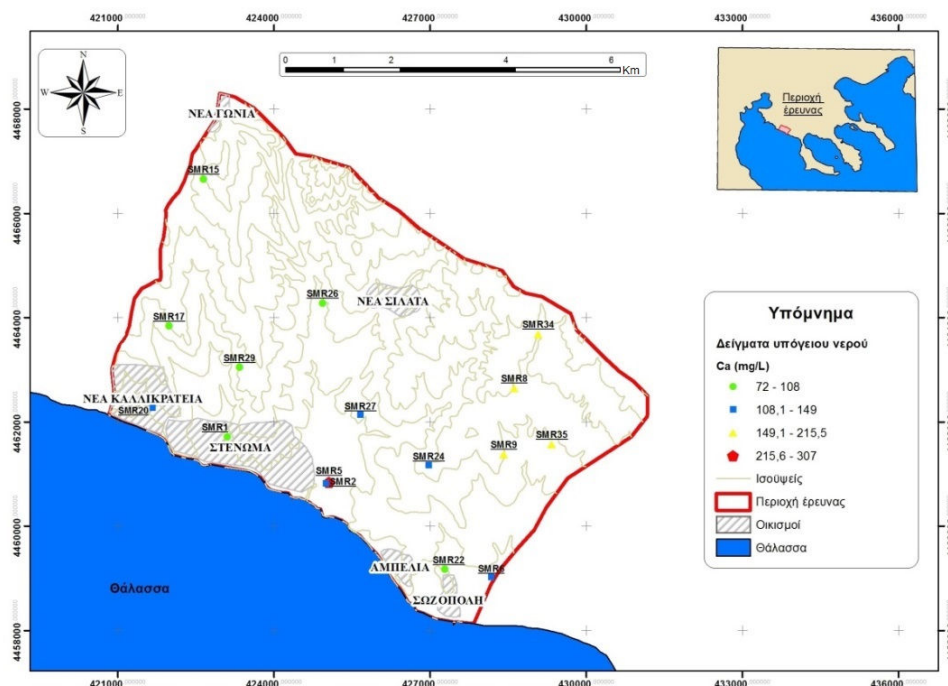
5.3.4 Ιόντα Ασβεστίου (Ca^{2+})

Το ασβέστιο προέρχεται κυρίως από τα ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα και τα μάρμαρα. Επίσης, υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου παρατηρούνται συχνά σε παράκτιες περιοχές λόγω του φαινομένου της υφαλμύρισης (Βουδούρης, 2015) ενώ γενικά οι συγκεντρώσεις του Ca^{2+} στα υπόγεια νερά κυμαίνονται μεταξύ 10 έως 100 mg/l.

Στην περιοχή έρευνας η μέγιστη τιμή των ιόντων Ca^{2+} δεν ξεπερνά τα 306 mg/l ενώ η ελάχιστη τιμή υπολογίστηκε στα 72 mg/l. Τα στατιστικά στοιχεία των ιόντων ασβεστίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5. Η μέγιστη τιμή του ασβεστίου αντιστοιχεί στο δείγμα SMR5 και οφείλεται στη διείσδυση του θαλασσινού νερού στο παράκτιο τμήμα Καλλικράτειας-Σωζόπολης. Επίσης, το δείγμα SMR2 βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή αλλά εμφανίζει μικρότερη περιεκτικότητα σε ιόντα ασβεστίου σε σχέση με το δείγμα SMR5. Οι υψηλές τιμές ασβεστίου των δειγμάτων SMR8, SMR9, SMR34 και SMR35 του υπόγειου νερού οφείλονται στη γεωλογία της περιοχής έρευνας. Η παρουσία του ασβεστόλιθου Ιουρασικής ηλικίας και η κατανομή της πιεζομετρίας όπως αποτυπώνονται στα σχήματα 3.1 και 4.3 έχουν ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων σε ιόντα ασβεστίου. Η κατανομή των ιόντων ασβεστίου παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5.

Πίνακας 5.5 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων Ca^{2+} στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	306
Ελάχιστο	72
Μέση τιμή	142,2
Τυπική απόκλιση	62



Σχήμα 5.5 Θεματικός χάρτης της κατανομής των ιόντων ασβεστίου (Ca^{2+}) την περίοδο του Μαΐου 2016.

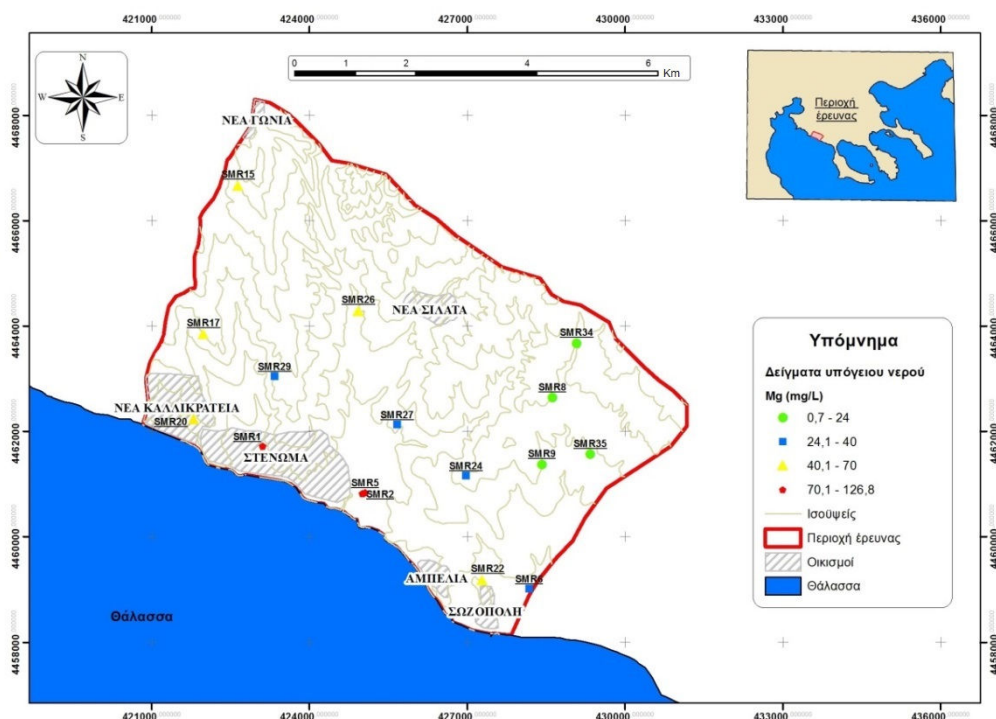
5.3.5 Ιόντα Μαγνησίου (Magnesium Mg^{2+})

Οι υψηλές συγκεντρώσεις των ιόντων μαγνησίου στο υπόγειο νερό οφείλονται στην παρουσία ανθρακικών πετρωμάτων πλούσιων σε δολομίτη και μεταμορφωμένων πετρωμάτων που περιέχουν ολιβίνη. Επίσης, η παρουσία των ιόντων μαγνησίου μπορεί να σχετίζεται και με την υφαλμύριση παράκτιων υδροφόρων συστημάτων.

Στην περιοχή έρευνας το Mg^{2+} κυμαίνεται μεταξύ 0,7 έως 127 mg/l με μέση τιμή 47 mg/l. Οι υψηλές τιμές εντοπίζονται στα δείγματα SMR1, SMR2 και SMR5 του υπόγειου νερού που βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή. Τα στατιστικά στοιχεία των ιόντων μαγνησίου και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6 στο σχήμα 5.6 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων Mg^{2+} στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	127
Ελάχιστο	0,7
Μέση τιμή	46,9
Τυπική απόκλιση	29,7



Σχήμα 5.6 Θεματικός χάρτης της κατανομής των ιόντων μαγνησίου (Mg^{2+}) την περίοδο του Μαΐου 2016.

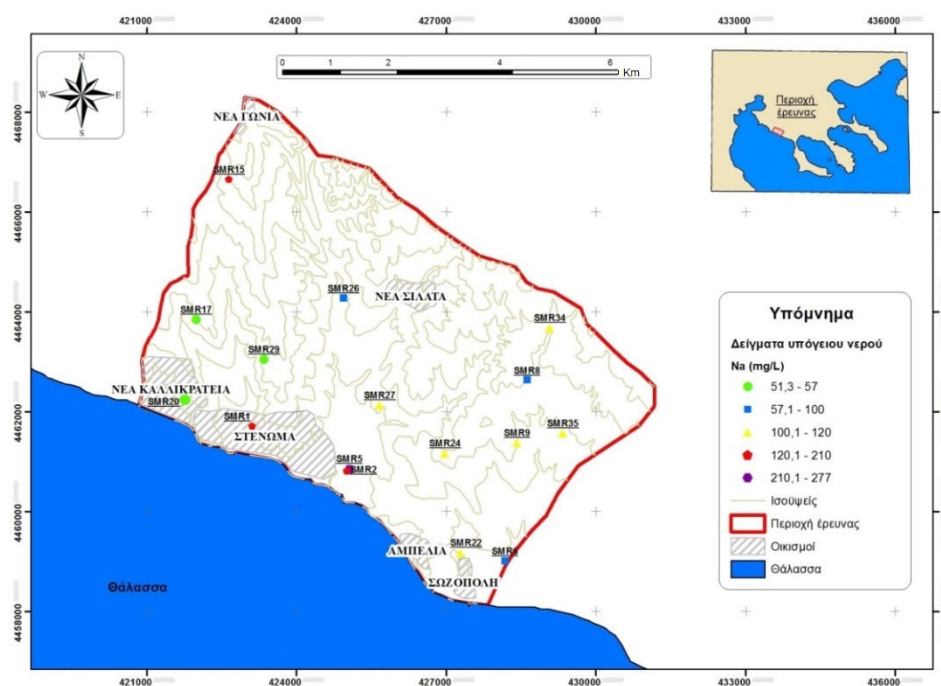
5.3.6 Ιόντα Νατρίου (Sodium Na^{+})

Οι τιμές του νατρίου κυμαίνονται από 277 έως 51 mg/l με μέση τιμή 119,4 mg/l. Η παραμετρική τιμή των ιόντων νατρίου βάσει της Οδηγίας 98/83/ΕΚ είναι 200 mg/l. Ωστόσο, δυο δείγματα νερού ξεπερνούν το αποδεκτό όριο και αποκλίνουν από τα υπόλοιπα. Συγκεκριμένα, τα δείγματα SMR1 και SMR5 ξεπερνούν την

παραμετρική τιμή υποδηλώνοντας την υποβάθμιση του υδροφόρου λόγω του φαινομένου της υφαλμύρισης. Η συγκέντρωση του νατρίου στα υπόγεια νερά έχει αποδεκτή τιμή τα 20 mg/l. Τα δείγματα SMR17 και SMR20 παρουσιάζουν τις μικρότερες συγκεντρώσεις Na^+ με τιμές 51 και 53 mg/l αντίστοιχα. Τα στατιστικά στοιχεία των ιόντων νατρίου και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7 στο σχήμα 5.7 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.7 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων Na^+ στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	277
Ελάχιστο	51
Μέση τιμή	119,4
Τυπική απόκλιση	59,9



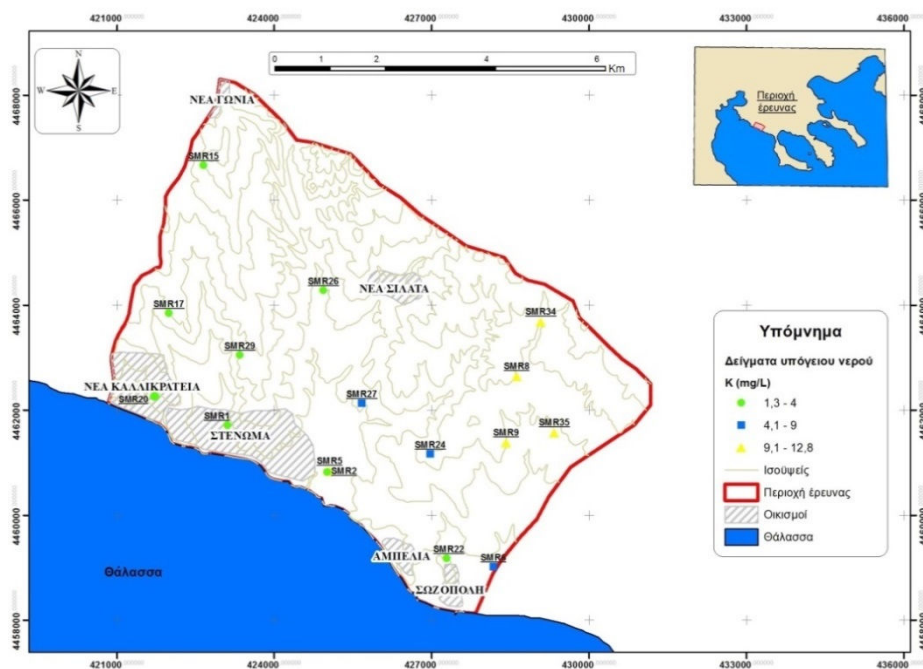
Σχήμα 5.7 Θεματικός χάρτης της κατανομής των ιόντων νατρίου (Na^+) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.3.7 Ιόντα Καλίου (Potassium K^+)

Στην περιοχή έρευνας οι συγκεντρώσεις του καλίου κυμαίνονται από 1 έως 13 mg/l με μέση τιμή 5,6 mg/l. Τα δείγματα SMR8, SMR9, SMR34 και SMR35 έχουν τις υψηλότερες τιμές ιόντων καλίου. Πιθανόν οι τιμές αυτές να σχετίζονται με το γεωθερμικό πεδίο ΒΑ της περιοχής έρευνας. Επιπλέον, η παρουσία των ιόντων καλίου στα υπόγεια ύδατα επηρεάζεται και από τη χρήση καλιούχων λιπασμάτων σε περιοχές με γεωργική δραστηριότητα. Η θεωρία αυτή επιβεβαιώθηκε από την εξέταση της εν λόγω περιοχής. Συνήθως οι τιμές του K^+ στα υπόγεια νερά δεν ξεπερνούν τα 10 mg/l. Τα στατιστικά στοιχεία των ιόντων καλίου και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8 και στο σχήμα 5.8 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων K^+ στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	13
Ελάχιστο	1
Μέση τιμή	5,6
Τυπική απόκλιση	3,9



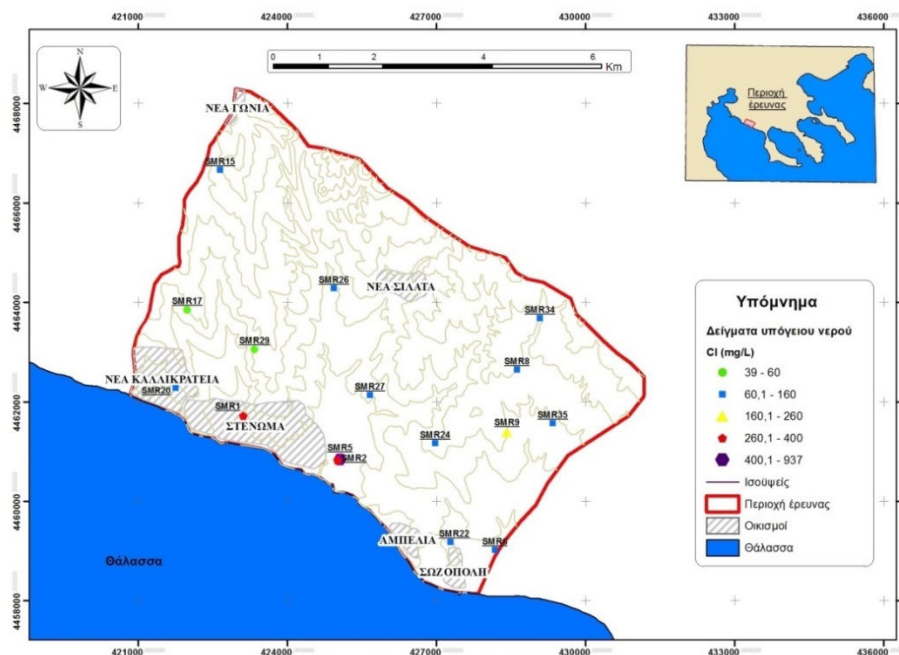
Σχήμα 5.8 Θεματικός χάρτης της κατανομής των ιόντων καλίου (K^+) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.3.8 Ιόντα Χλωρίου (Chloride Cl^-)

Οι τιμές του χλωρίου κυμαίνονται από 39 έως 937 mg/l με μέση τιμή 184,4 mg/l. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου στα δείγματα SMR1, SMR2 και SMR5 ξεπερνούν τη μέγιστη αποδεκτή τιμή των 250 mg/l για το πόσιμο νερό. Η συγκέντρωση του Cl^- αποτελεί ιδανικό ιχνηθέτη για την εξακρίβωση της θαλάσσιας διείσδυσης με όριο τα 100 mg/l (Βουδούρης 2009). Τα παραπάνω δείγματα όπως έχει ήδη αναφερθεί παρουσιάζουν και τις αντίστοιχες υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ολικών διαλυμένων στερεών. Τα στατιστικά στοιχεία των ιόντων χλωρίου και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9 στο σχήμα 5.9 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.9 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων Cl^- στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	937
Ελάχιστο	39
Μέση τιμή	184,4
Τυπική απόκλιση	209,4



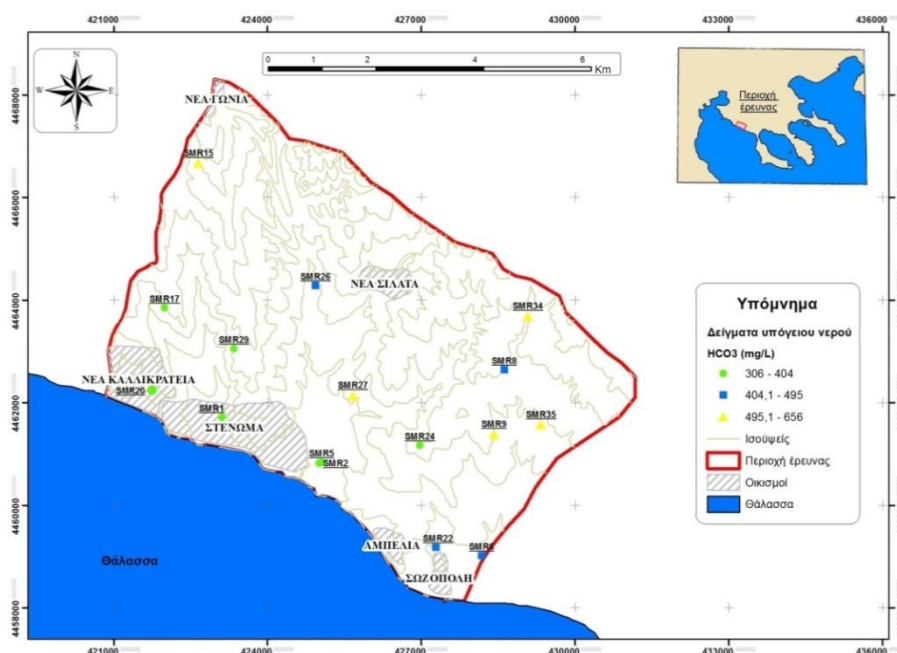
Σχήμα 5.9 Θεματικός χάρτης της κατανομής των ιόντων χλωρίου (Cl^-) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.3.9 Όξινα ανθρακικά ιόντα (Bicarbonate HCO_3^-)

Στην περιοχή έρευνας οι τιμές των όξινων ανθρακικών ιόντων κυμαίνονται από 306 έως 656 mg/l με μέση τιμή 460,7 mg/l. Υψηλές συγκεντρώσεις σε HCO_3^- παρουσιάζουν τα δείγματα SMR9, SMR34 και SMR35 λόγω της διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων στο ΒΑ όριο της περιοχής. Ωστόσο, υψηλή συγκέντρωση παρουσιάζει και το δείγμα SMR15 στο ΔΒΔ άκρο της περιοχής γεγονός που ίσως να σχετίζεται με τις χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων στο ίδιο δείγμα όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο (5.3.11). Τα στατιστικά στοιχεία των όξινων ανθρακικών ιόντων και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10 στο σχήμα 5.10 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.10 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων HCO_3^- στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	656
Ελάχιστο	306
Μέση τιμή	460,7
Τυπική απόκλιση	103,3



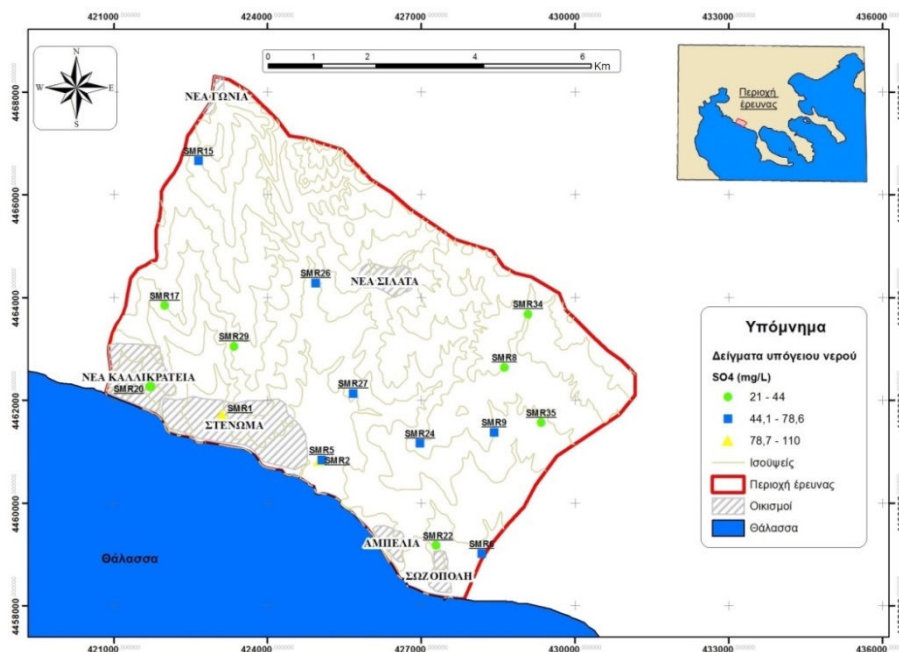
Σχήμα 5.10 Θεματικός χάρτης της κατανομής των οξυανθρακικών ιόντων (HCO_3^-) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.3.10 Θειικά ιόντα (Sulphate SO_4^{2-})

Οι τιμές των θεικών ιόντων στην περιοχή έρευνας κυμαίνονται από 21 έως 110 mg/l με μέση τιμή 56 mg/l. Τα δείγματα SMR1 και SMR2 έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις θεικών ιόντων. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στη γεωλογία της περιοχής (ψαμμιτομαργαϊκή σειρά), στην πιθανή χρήση θεικών λιπασμάτων προς την ενδοχώρα ή ακόμη και στον συνδυασμό αυτών των δυο παραμέτρων. Στη γεώτρηση από όπου λήφθηκε το δείγμα SMR15 ήταν αισθητή, λόγω της δυσάρεστης οσμής, η παρουσία του υδρόθειου (H_2S). Τα στατιστικά στοιχεία των θεικών ιόντων και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.11 στο σχήμα 5.11 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.11 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων SO_4^{2-} στην περιοχή έρευνας.

Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	110
Ελάχιστο	21
Μέση τιμή	56
Τυπική απόκλιση	24,7



Σχήμα 5.11 Θεματικός χάρτης της κατανομής των θεικών ιόντων (SO_4^{2-}) την περίοδο του Μαΐου 2016.

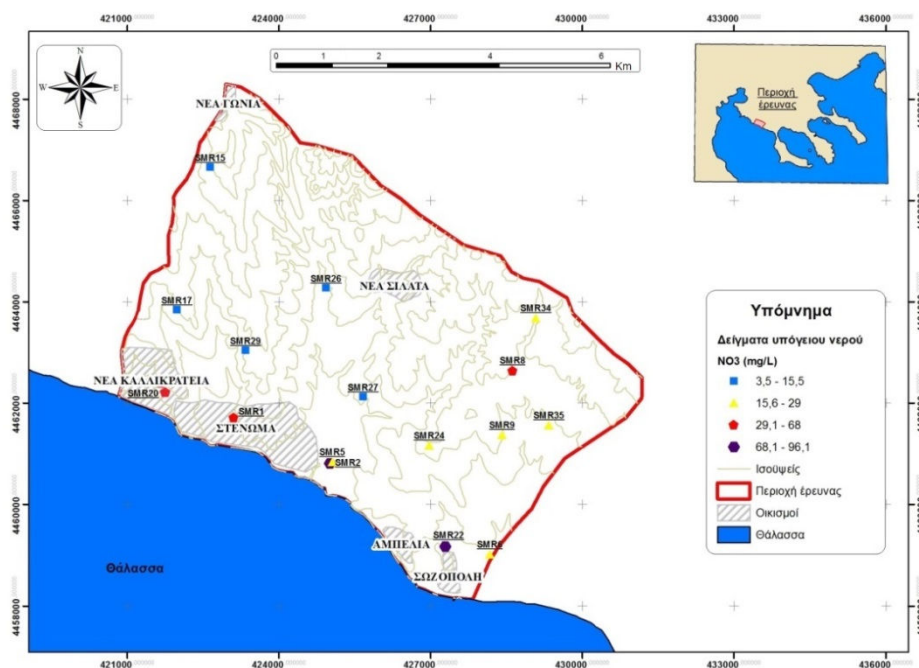
5.3.11 Νιτρικά ιόντα (Nitrate NO_3^-)

Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στα δείγματα που συλλέχθηκαν από την περιοχή έρευνας κυμαίνονται από 4 έως 96 mg/l με μέση τιμή 33,9 mg/l. Η παραμετρική τιμή των νιτρικών ιόντων για το πόσιμο νερό βάσει της Οδηγίας 98/83/EK είναι 50 mg/l. Τα δείγματα που ξεπερνούν την παραμετρική τιμή είναι τα SMR1, SMR2, SMR8, SMR20 και SMR22. Οι υψηλές συγκεντρώσεις NO_3^- σχετίζονται με την έντονη γεωργική δραστηριότητα στο ΒΑ άκρο της περιοχής έρευνας (Ντώνα et al., 2017). Τα στατιστικά στοιχεία των νιτρικών ιόντων και η κατανομή της παραμέτρου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12 στο σχήμα 5.12 αντίστοιχα.

Η ανεξέλεγκτη χρήση λιπασμάτων πλούσιων σε αζωτούχες ενώσεις συμβάλει στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδροφορέων. Γενικά, τα νιτρικά ιόντα εισέρχονται στα βαθύτερα υδροφόρα στρώματα μέσω της κατείσδυσης του νερού της βροχής και των επιφανειακών υδάτων. Έτσι λοιπόν τα δείγματα SMR2, SMR8 και SMR20 οφείλουν την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων NO_3^- στη χρήση λιπασμάτων δίπλα στις αντίστοιχες γεωτρήσεις. Ενώ στο δείγμα SMR22 η περιεκτικότητα του σε NO_3^- επηρεάζεται από τη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων στις ανάντη περιοχές καθώς τα νιτρικά ιόντα εμπλουτίζουν το υπόγειο νερό και ακολουθούν την πορεία του πιεζομετρικού φορτίου (Stamatis et al., 2011). Ωστόσο, το δείγμα SMR15 στο ΔΒΔ άκρο της περιοχής παρουσιάζει χαμηλή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων λόγω της παρουσίας του ως αναγωγικής ουσίας. Συνεπώς, λόγω της παρουσίας του υδρόθειου ευνοείται η αναγωγή των νιτρικών ιόντων και έτσι η συγκέντρωση αυτών είναι μικρότερη από την αναμενόμενη.

Πίνακας 5.12 Στατιστικά στοιχεία των ιόντων NO_3^- στην περιοχή έρευνας.

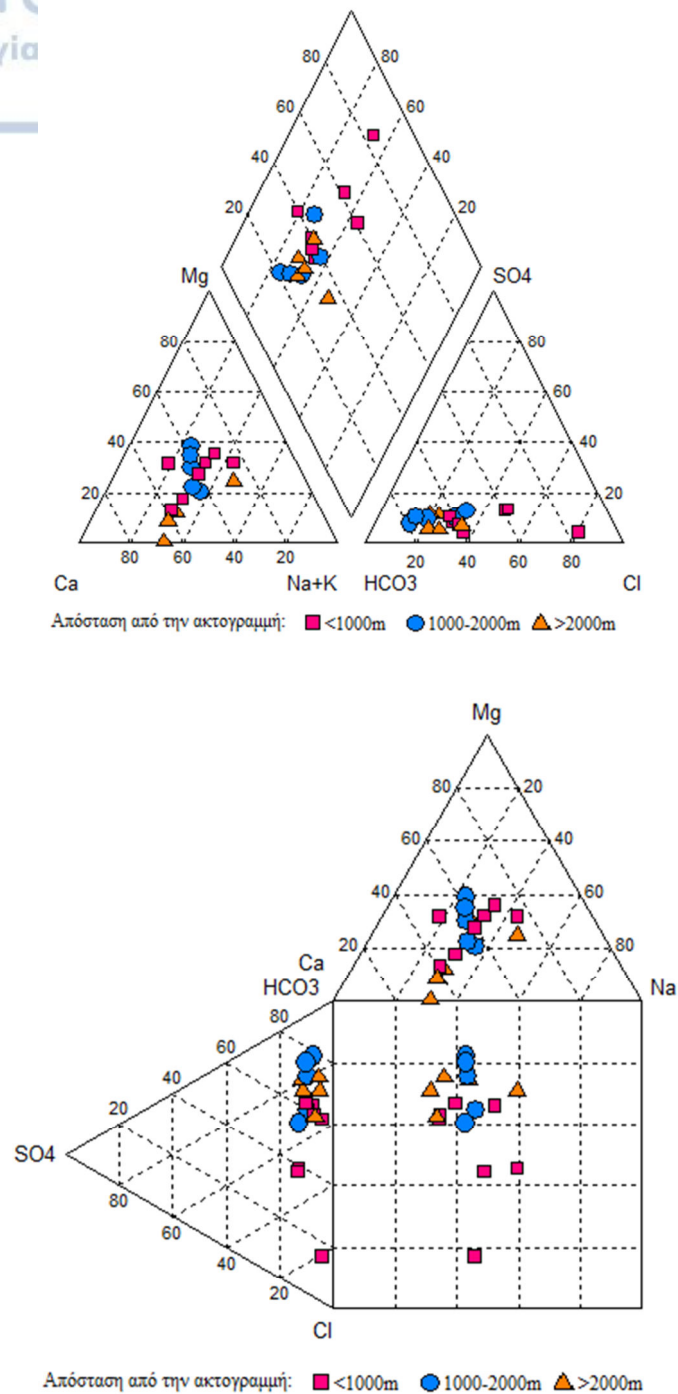
Περίοδος	Μάιος 2016
Μέγιστο	96
Ελάχιστο	4
Μέση τιμή	33,9
Τυπική απόκλιση	28,3



Σχήμα 5.12 Θεματικός χάρτης της κατανομής των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) την περίοδο του Μαΐου 2016.

5.4 Υδροχημικά διαγράμματα

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των υδροχημικών αναλύσεων έγινε σε διαγράμματα Piper και Durov (Σχήμα 5.13). Η ταξινόμηση των δειγμάτων έγινε βάσει την απόσταση τους από την ακτογραμμή. Συγκεκριμένα, τα δείγματα χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες όπου η πρώτη αντιστοιχεί στα δείγματα που απέχουν από τη θάλασσα λιγότερο από 1000m, η δεύτερη κατηγορία περιέχει τα δείγματα που απέχουν 1000-2000m και στην τελευταία κατηγορία εντάσσονται τα δείγματα που βρίσκονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 2000m από την ακτογραμμή. Από την κατανομή των δειγμάτων στα διαγράμματα Piper (Pirper, 1944) και Durov παρατηρείται ότι τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζονται ως Ca-Mg-HCO_3 (κατά το 83% των δειγμάτων) και Na-K-Cl-SO_4 (κατά το 17% των δειγμάτων) τύπου νερά.

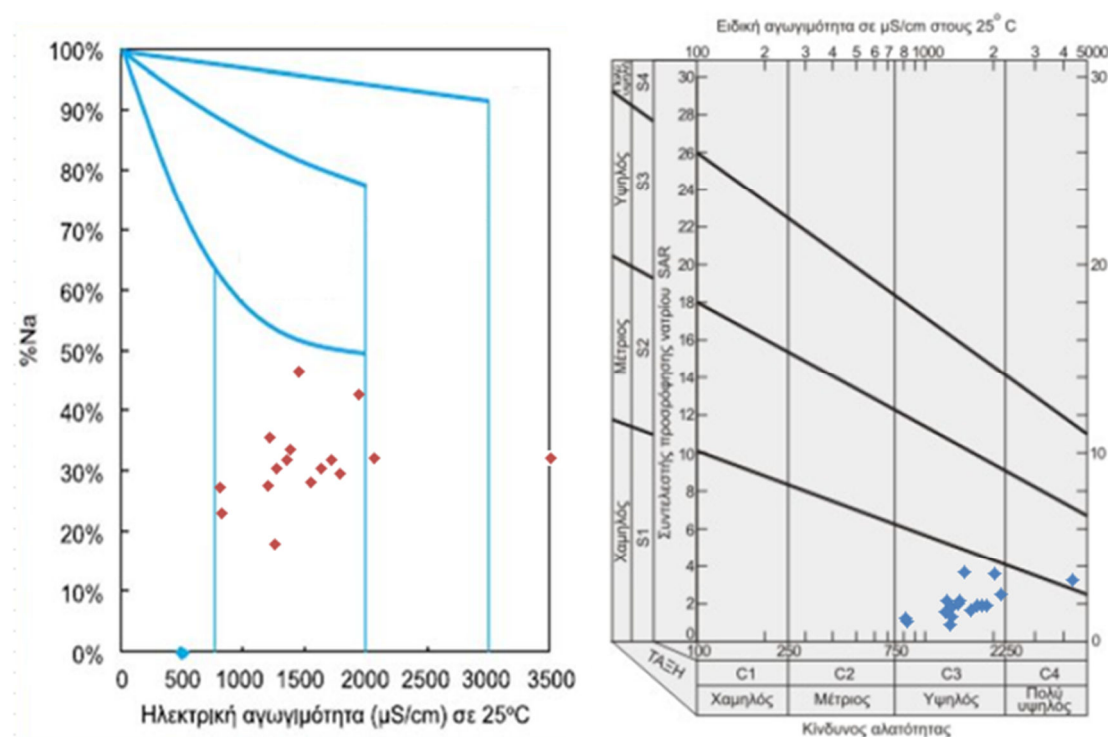


Σχήμα 5.13 Διαγράμματα Piper (πάνω) και Durov (κάτω) για τα δείγματα υπόγειου νερού κατά την περίοδο Μαΐου 2016.

Πολλές από τις γεωτρήσεις που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο και αντλούν νερό από τους βαθύτερους υδροφορείς επηρεάζονται από το φαινόμενο της υφαλμύρισης λόγω των χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας, όπου παρουσιάζονται “γλώσσες” υφαλμύρισης. Γενικά η καμπύλη της διεπιφάνειας μεταξύ του υπόγειου

και θαλασσινού νερού παρουσιάζει έντονες μεταβολές κατά μήκος της παράκτιας περιοχής μεταξύ Καλλικράτειας-Σωζόπολης. Συνδυάζοντας τα παραπάνω δεδομένα, είναι λογικό να μην επηρεάζονται στον ίδιο βαθμό όλες οι γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στην παράκτια ζώνη.

Σύμφωνα με το διάγραμμα S.A.R. (Σχήμα 5.14) η πλειονότητα των δειγμάτων χαρακτηρίζεται από μέτρια έως πολύ μέτρια ποιότητα νερού για άρδευση. Το δείγμα SMR5 αποκλίνει από τα υπόλοιπα και η ποιότητα του νερού χαρακτηρίζεται από πολύ μέτρια μέχρι κακή. Επιπλέον, ο βαθμός αλκαλίωσης των δειγμάτων νερού απεικονίζεται στο διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 5.14) όπου τα αποτελέσματα της κατάταξης των δειγμάτων είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα της κατάταξης του διαγράμματος S.A.R.. Η ποιότητα των δειγμάτων νερού χαρακτηρίζεται από καλή μέχρι αποδεκτή. Το δείγμα SMR2 χαρακτηρίζεται από αμφίβολης ποιότητας νερό έως ακατάλληλο, ενώ το δείγμα SMR5 κατατάσσεται εκτός του διαγράμματος ως ακατάλληλο.



Σχήμα 5.14 Διαγράμματα Wilcox (αριστερά) και S.A.R. (δεξιά).

6.ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ

6.1 Εισαγωγή

Η υφαλμύριση αποτελεί μια συνηθισμένη κατάσταση στις παράκτιες περιοχές του ελληνικού χώρου (Mimikou, 2005). Σε παγκόσμια κλίμακα, το φαινόμενο αυτό αποτελεί μια από τις κύριες αιτίες ρύπανσης των υπόγειων υδάτων κοντά σε παράκτιες περιοχές. Η περιοχή του Θερμαϊκού κόλπου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα του φαινομένου (Voudouris et al., 2006; Pavlou et al., 2013; Καζάκης, 2013). Η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες (π.χ. μεταβολή της στάθμης της θάλασσας), σε ανθρωπογενείς παράγοντες (π.χ. υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων) ή στον συνδυασμό αυτών.

Η εμφάνιση και η επέκταση της ζώνης του φαινομένου ευνοείται από την ανεξέλεγκτη άντληση των υπόγειων υδροφορέων. Η φυσική επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων γίνεται με αργούς ρυθμούς σε σύγκριση με την ανάγκη για άντληση σε περιοχές με γεωργική και τουριστική δραστηριότητα κατά τους άνυδρους μήνες. Το αρνητικό ισοζύγιο που δημιουργείται με το πέρασμα των ετών οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων ενώ η ακριβής έκταση του προβλήματος στην εκάστοτε περιοχή παραμένει άγνωστη λόγω της έλλειψης στοιχείων. Το πρόβλημα αυτό ενισχύεται και από την απουσία ποσοτικοποιημένων μεθόδων πρόβλεψης των παράκτιων μεταβολών. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις το φαινόμενο αναγνωρίζεται εκ του αποτελέσματος του. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η ολοκληρωμένη στρατηγική διαχείρισης των υπόγειων υδάτων ώστε να αποφευχθούν οι ακραίες περιπτώσεις υποβάθμισης των υπόγειων υδροφορέων (Bonet, 2004).

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας στηρίζονται στον υπολογισμό των ιοντικών λόγων από τα δείγματα του υπόγειου νερού των γεωτρήσεων και την κατανομή του δείκτη υφαλμύρισης (SWIM Index) στην περιοχή έρευνας ενώ με την εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων επιτυγχάνεται η ανίχνευση του μετώπου υφαλμύρισης (Vargemezis and Fikos, 2010; Panagopoulos et al., 2014; Kazakis et al., 2016).

Ο λόγος της περιεκτικότητας των ιόντων στο νερό δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την προέλευση των υδάτων, το χρόνο παραμονής τους στα εκάστοτε πετρώματα, τον βαθμό ανανέωσης και τη μίξη του με το θαλασσινό νερό (Σούλιος, 1986; Βουδούρης, 2009). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η ανάλυση των λόγων Na/Cl , SO_4/Cl , $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Ca})$ και Cl/HCO_3 για τον προσδιορισμό της προέλευσης των ιόντων και της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή έρευνας (El Moujabber et al., 2006). Στους πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι τιμές των ιοντικών λόγων και τα στατιστικά τους για την περίοδο του Μαΐου 2016, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1 Τιμές των ιοντικών λόγων στην περιοχή έρευνας την περίοδο Μαΐου 2016.

Δείγματα	Na/Cl (meq/L)	SO_4/Cl (meq/L)	$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Ca})$ (meq/L)	Cl/HCO_3 (meq/L)
SMR1	1,10	0,27	0,57	1,22
SMR2	0,83	0,28	0,48	1,28
SMR5	0,46	0,1	0,41	5,27
SMR6	1,29	0,37	0,26	0,45
SMR8	1,00	0,22	0,19	0,55
SMR9	0,93	0,19	0,12	0,58
SMR15	2,31	0,48	0,47	0,36
SMR17	2,05	0,57	0,51	0,18
SMR20	0,63	0,12	0,39	0,60
SMR22	1,50	0,27	0,55	0,48
SMR24	1,42	0,34	0,32	0,50
SMR26	1,61	0,60	0,44	0,29
SMR27	1,93	0,50	0,33	0,27
SMR29	2,20	0,71	0,42	0,19
SMR35	1,18	0,20	0,01	0,39
SMR34	1,42	0,24	0,17	0,30

Πίνακας 6.2 Στατιστικά στοιχεία των ιοντικών λόγων στην περιοχή έρευνας.

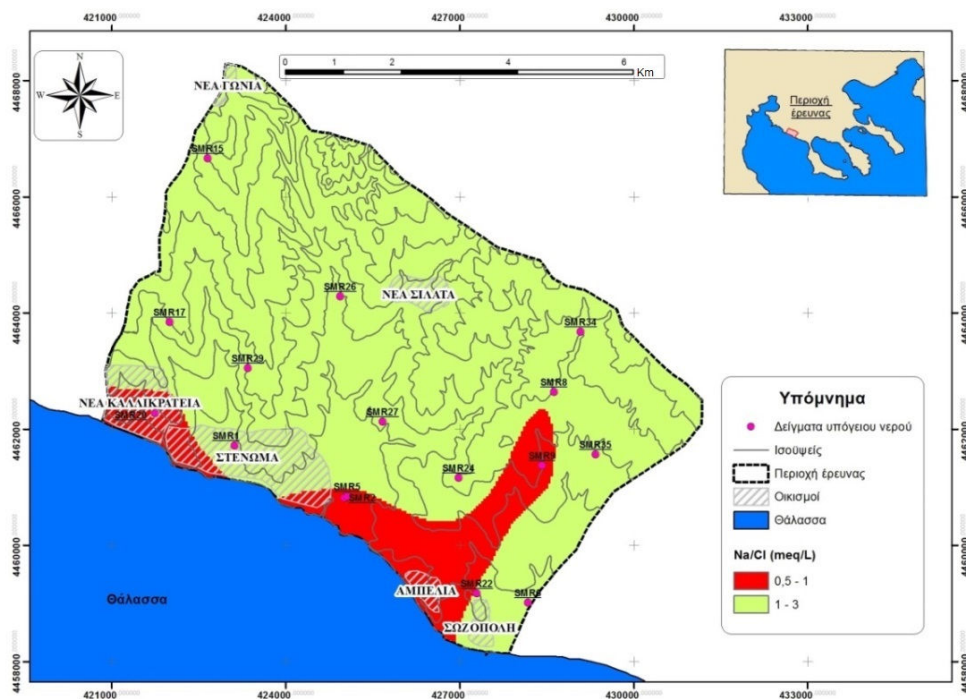
	Na/Cl (meq/L)	SO ₄ /Cl (meq/L)	Mg/(Mg+Ca) (meq/L)	Cl/HCO ₃ (meq/L)
Μέγιστο	2,3	0,7	0,6	5,3
Ελάχιστο	0,5	0,1	0,0	0,2
Μέση τιμή	1,3	0,3	0,4	0,8
Τυπική απόκλιση	0,6	0,2	0,2	1,2

6.2.1 Ιοντικός λόγος Na/Cl

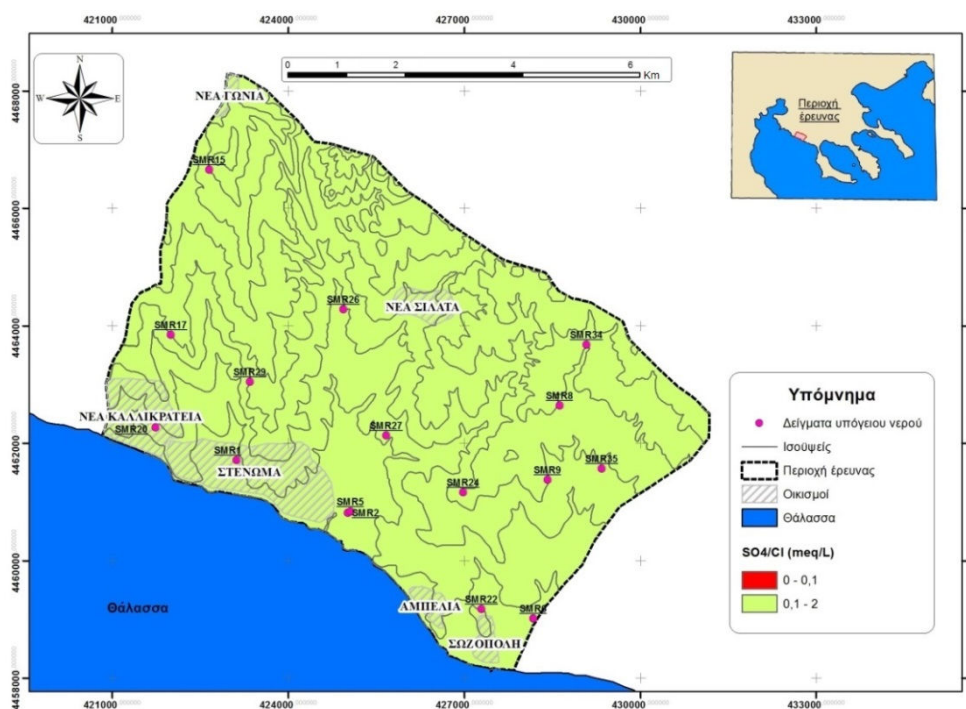
Ο ιοντικός λόγος Na/Cl σχετίζεται με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού και γενικά με την παρουσία θαλάσσιων αλάτων στο υπόγειο νερό (Vengosh et al., 1999). Στο σχήμα 6.1 παρατηρείται θαλάσσια διείσδυση στην παράκτια ζώνη της περιοχής έρευνας όπου η τιμή του ιοντικού λόγου Na/Cl είναι μικρότερη της μονάδας (1). Συγκεκριμένα, οι τιμές του λόγου Na/Cl είναι μικρότερες της μονάδας (<1) στο δυτικό άκρο της Καλλικράτειας και μεταξύ των περιοχών Στένωμα και Αμπέλια. Το δείγμα SMR9 της γεώτρησης MR76 παρουσιάζει υψηλή τιμή αγωγιμότητας, χλωρίου και νατρίου ενώ ο εξεταζόμενος ιοντικός λόγος έχει τιμή 0,93 meq/L. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι υψηλές τιμές αυτών των ιόντων πιθανόν να οφείλονται στην παρουσία γεωθερμικών ρευστών και όχι στη θαλάσσια διείσδυση.

6.2.2 Ιοντικός λόγος SO₄/Cl

Ο ιοντικός λόγος SO₄/Cl σχετίζεται με την ύπαρξη υπολειμματικών αλάτων στους υδροφορείς. Στο σχήμα 6.2 αποτυπώνεται η κατανομή του ιοντικού λόγου με τιμές μεγαλύτερες του 0,1 meq/L (Aris et al., 2012). Τα δείγματα νερού σε όλη την περιοχή έρευνας χαρακτηρίζονται ως χλωριούχα καθώς οι τιμές του ιοντικού λόγου κυμαίνονται μεταξύ 1,4 έως 19,2 meq/L.



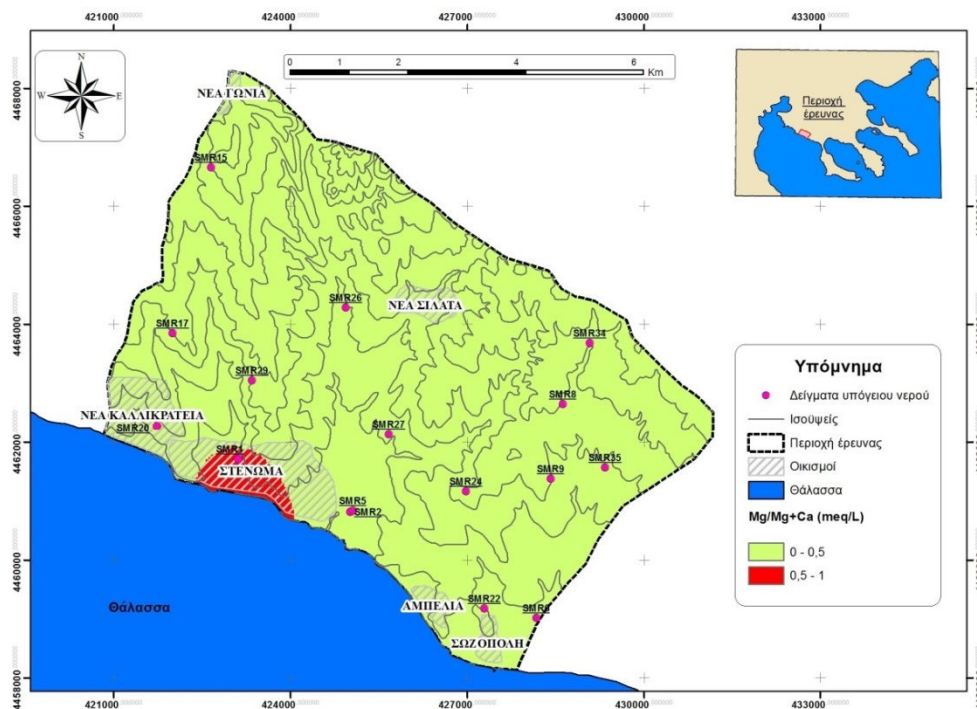
Σχήμα 6.1 Χωρική κατανομή του λόγου Na/Cl για την περίοδο του Μαΐου.



Σχήμα 6.2 Χωρική κατανομή του λόγου SO₄/CL για την περίοδο του Μαΐου.

6.2.3 Ιοντικός λόγος $Mg/Mg+Ca$

Ο ιοντικός λόγος $Mg/Mg+Ca$ σχετίζεται με την παρουσία θαλασσινού νερού στους υδροφορείς (Hounslow, 1995). Στο σχήμα 6.3 αποτυπώνεται η κατανομή του ιοντικού λόγου με τιμές μικρότερες του 0,5 meq/L ενώ ένα δείγμα αποκλίνει εκ των υπολοίπων. Τα δείγματα νερού σε όλη την περιοχή έρευνας χαρακτηρίζονται από τιμές μικρότερες του 0,5 meq/L ενώ το δείγμα SMR1 έχει τιμή 0,57 meq/L. Γενικά, η τιμή αυτή δεν αποκλίνει ακραία σε σχέση με τις τιμές των υπολοίπων δειγμάτων ωστόσο υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση.

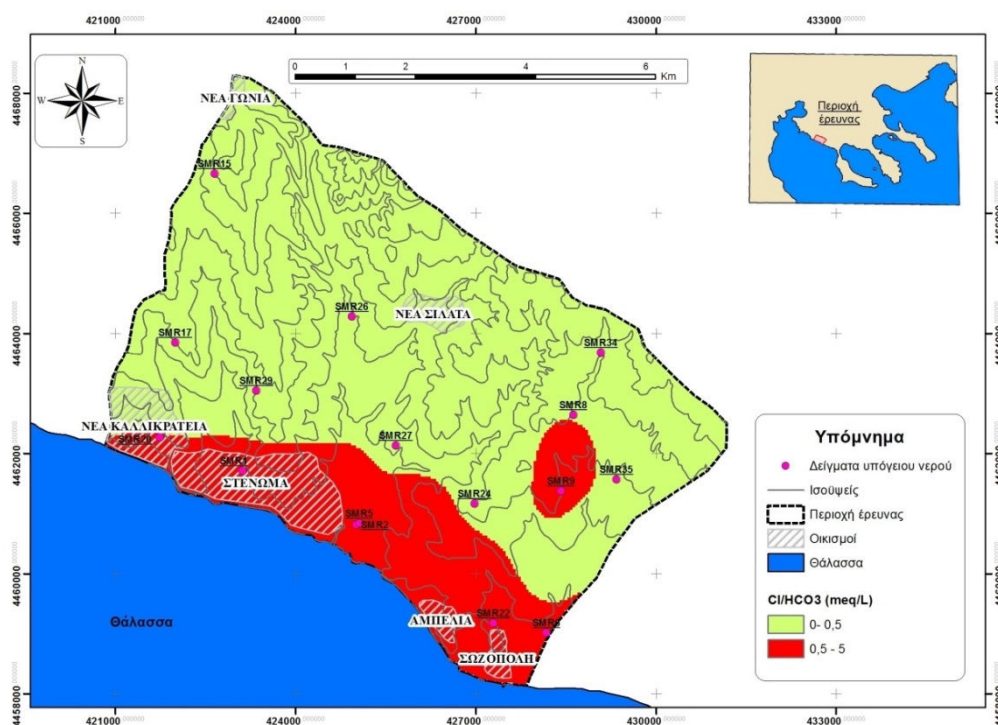


Σχήμα 6.3 Χωρική κατανομή του λόγου $Mg/Mg+Ca$ για την περίοδο του Μαΐου.

6.2.4 Ιοντικός λόγος Cl/HCO_3

Η επίδραση της θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφορείς γλυκών υδάτων μπορεί να προσδιοριστεί από τον υπολογισμό του ιοντικού λόγου Cl/HCO_3 (Mtoni et al., 2013). Για τιμές μικρότερες του 0,5 meq/L το δείγμα του υπόγειου νερού χαρακτηρίζεται ως ανεπηρέαστο από το θαλασσινό νερό. Ελαφρώς

επηρεασμένο χαρακτηρίζεται το νερό εάν ο αναφερόμενος ιοντικός λόγος αντιστοιχεί σε τιμές μεταξύ 0,5-6,6 meq/L ενώ τιμές μεγαλύτερες του 6,6 meq/L αντιστοιχούν σε υπόγεια νερά έντονα επηρεασμένα από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, ο ιοντικός λόγος Cl/HCO_3 κυμαίνεται μεταξύ 0,2 έως 5,3 meq/L. Στο σχήμα 6.4 αποτυπώνεται με κόκκινο χρώμα η κατανομή του ιοντικού λόγου με τιμές μεγαλύτερες του 0,5 meq/L.

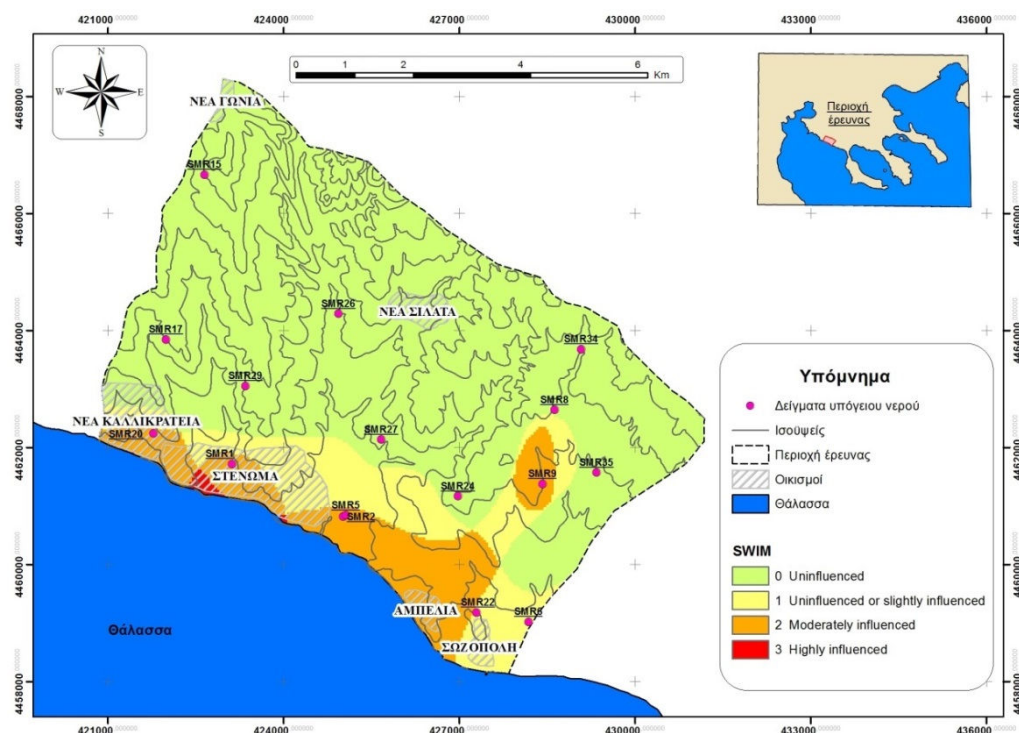


Σχήμα 6.4 Χωρική κατανομή του λόγου Cl/HCO_3 για την περίοδο του Μαΐου.

6.3 Δείκτης υφαλμύρισης SWIM Index

Για την αποτύπωση της κατανομής της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης υφαλμύρισης SWIM Index. Ο συνδυασμός των ιοντικών λόγων που υπολογίστηκαν είναι Na/Cl , SO_4/Cl , $Mg/Mg+Ca$ και Cl/HCO_3 και σχετίζονται με την παρουσία υφάλμυρων υδάτων. Τα αποτελέσματα των ιοντικών λόγων χωρίστηκαν σε 2 κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα αποτελέσματα του εκάστοτε ιοντικού λόγου τα οποία προδίδουν την παρουσία του φαινομένου της υφαλμύρισης (1) ενώ στη δεύτερη κατηγορία ταξινομούνται τα δείγματα που

αντιστοιχούν στις ανεπηρέαστες ζώνες (0). Στη συνέχεια, τα τέσσερα επίπεδα πληροφοριών των ιοντικών λόγων αθροίστηκαν παρέχοντας τον τελικό χάρτη κατανομής της θαλάσσιας διείσδυσης (Σχήμα 6.5). Το εύρος των τιμών του δείκτη υφαλμύρισης κυμαίνεται μεταξύ 0-3, με τη μέγιστη τιμή να εντοπίζεται στην παράκτια ζώνη με μικρή έκταση στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 6.5 Αποτύπωση της θαλάσσιας διείσδυσης (SWIM) βάσει της αθροιστικής κατανομής ιοντικών λόγων.

6.4 Γεωφυσικές διασκοπήσεις

Στις εργασίες υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας για την παρούσα διατριβή ειδίκευσης περιλαμβάνεται και η εφαρμογή γεωφυσικών διασκοπήσεων με τη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται άμεσα από το πορώδες των σχηματισμών και την αγωγιμότητα του νερού των υπόγειων υδροφορέων (Archie, 1969). Οι γεωφυσικές μέθοδοι είναι μη καταστροφικές, έχουν χαμηλό κόστος και μπορούν να δώσουν άμεσα τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στα υπόγεια

ύδατα διαμορφώνου χαμηλές αντιστάσεις στον υδροφορέα ενώ, η ελάττωση του πορώδους των πετρωμάτων προκαλεί υψηλές τιμές αντιστάσεων. Σκοπός της εφαρμογής των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπισης είναι ο εντοπισμός του μετώπου της υφαλμύρισης και των υφάλμυρων στρωμάτων στην παράκτια ζώνη της περιοχής έρευνας (Κεσόγλου, 2011; El Said et al., 2016; Gavrilidou, E.).

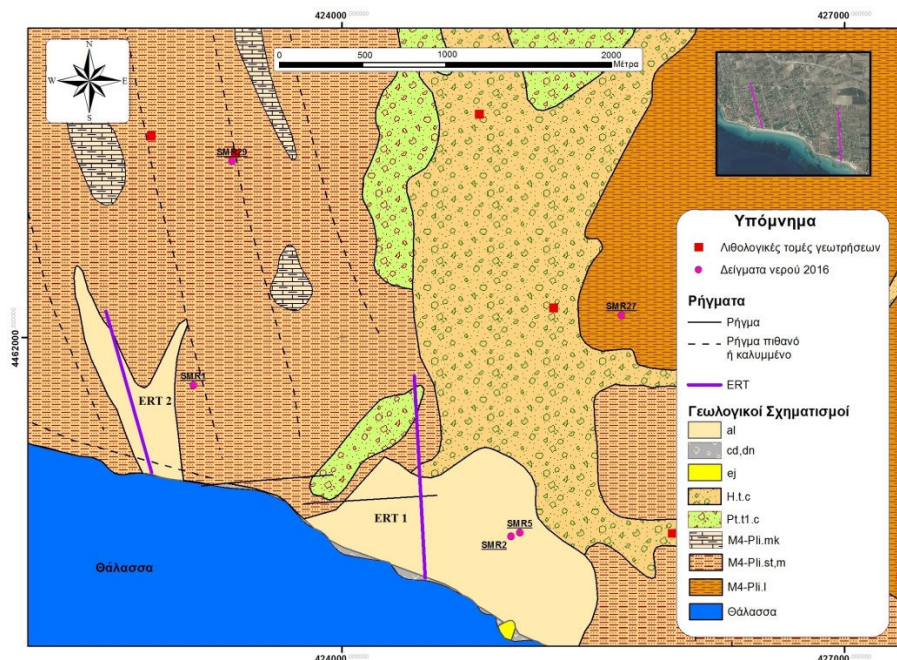
Στα πλαίσια της διατριβής ειδίκευσης πραγματοποιήθηκαν δύο δισδιάστατες ηλεκτρικές τομογραφίες τον Οκτώβριο του 2016. Για τον προσδιορισμό της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης εφαρμόστηκε η διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου και Wenner-Schlumberger. Το μήκος των ηλεκτρικών τομογραφιών ήταν 1000m με 21 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 50m ώστε να αποτυπωθεί η γεωηλεκτρική δομή της περιοχής. Οι ηλεκτρικές τομογραφίες εφαρμόστηκαν με διεύθυνση NNA-BBD κάθετα στην ακτογραμμή (Σχήμα 6.6). Το άνοιγμα της κάθε τομογραφίας φτάνει τα 1000m και το βάθος τα 200m. Η γεωλογία της περιοχής αλλά και το φαινόμενο της υφαλμύρισης καθιστούν τη διάταξη διπόλου-διπόλου πιο αποτελεσματική καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις πλευρικές μεταβολές.

Η ηλεκτρική αντίσταση της άμμου και των κροκάλων κυμαίνεται μεταξύ 20-50 Ωm , ενώ της αργίλου 1-10 Ωm . Οι μεγάλες αντιστάσεις υπολογίζεται ότι προδίδουν την παρουσία της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και του μαργαϊκού ασβεστόλιθου της περιοχής έρευνας. Επιπλέον, οι αντιστάσεις της τάξης 1-15 Ωm παραπέμπουν στη διείδυση του θαλασσινού νερού. Συγκεκριμένα, στη δισδιάστατη ηλεκτρική τομογραφία ERT1 (Σχήμα 6.7) με διάταξη διπόλου-διπόλου είναι εμφανής η παρουσία ενός ρήγματος περίπου στα 550m της τομής όπως επιβεβαιώνεται και από το γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Φύλλο Βασιλικά, κλίμακα 1:50.000). Επίσης, οι μικρές αντιστάσεις θα μπορούσαν να αποδοθούν σε μια διακριτή διείδυση του θαλασσινού νερού αλλά και στη παρουσία αργιλικού υλικού βάσει των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχή όπως απεικονίζονται στη λιθολογική τομή της γεώτρησης MR93 (Σχήμα 6.8) κοντά στο σημείο όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

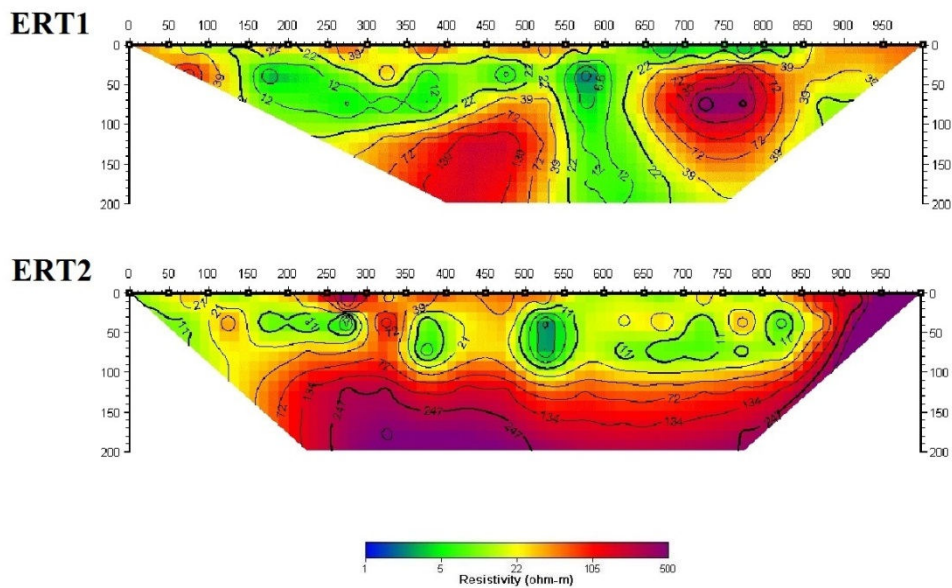
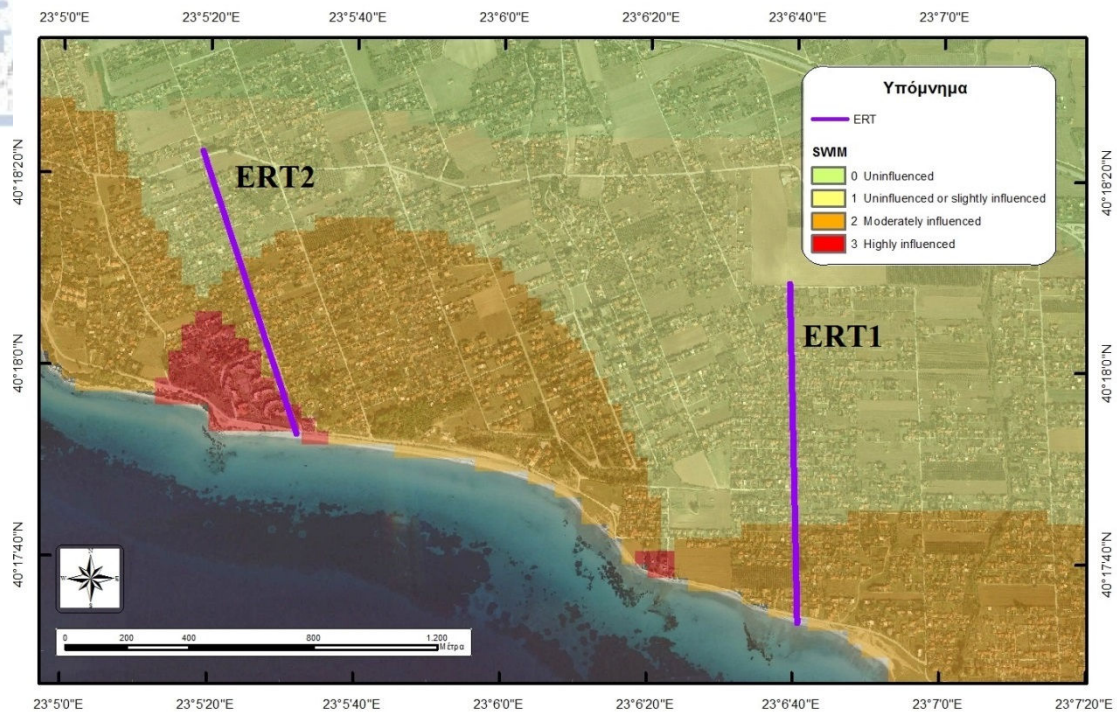
Με υψηλές αντιστάσεις απεικονίζονται οι ημιπερατοί σχηματισμοί μικρής υδροφορίας. Σύμφωνα με τις καμπύλες ίσων τιμών της ειδικής αντίστασης στην ERT2 (Σχήμα 6.7), οι οποίες προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο διπόλου-διπόλου, παρατηρείται η παρουσία ρήγματος στα 120m κατά μήκος της ψευδοτομής. Η

γεωλογική δομή είναι ίδια με αυτή της ERT1. Η ψαμμιτομαργαϊκή σειρά και το φαινόμενο της υφαλμύρισης μπορούν να αποδοθούν ως αιτίες της παρουσίας χαμηλών φαινομενικών αντιστάσεων χωρίς ωστόσο να είναι διακριτό το ποσοστό επιρροής της κάθε παραμέτρου. Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από χαμηλές αντιστάσεις. Στην ERT2 μεταξύ 900-1000m της ψευδοτομής παρατηρείται αύξηση της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, γεγονός που οφείλεται στη μείωση του πάχους των αλλουβιακών σχηματισμών προς την ενδοχώρα.

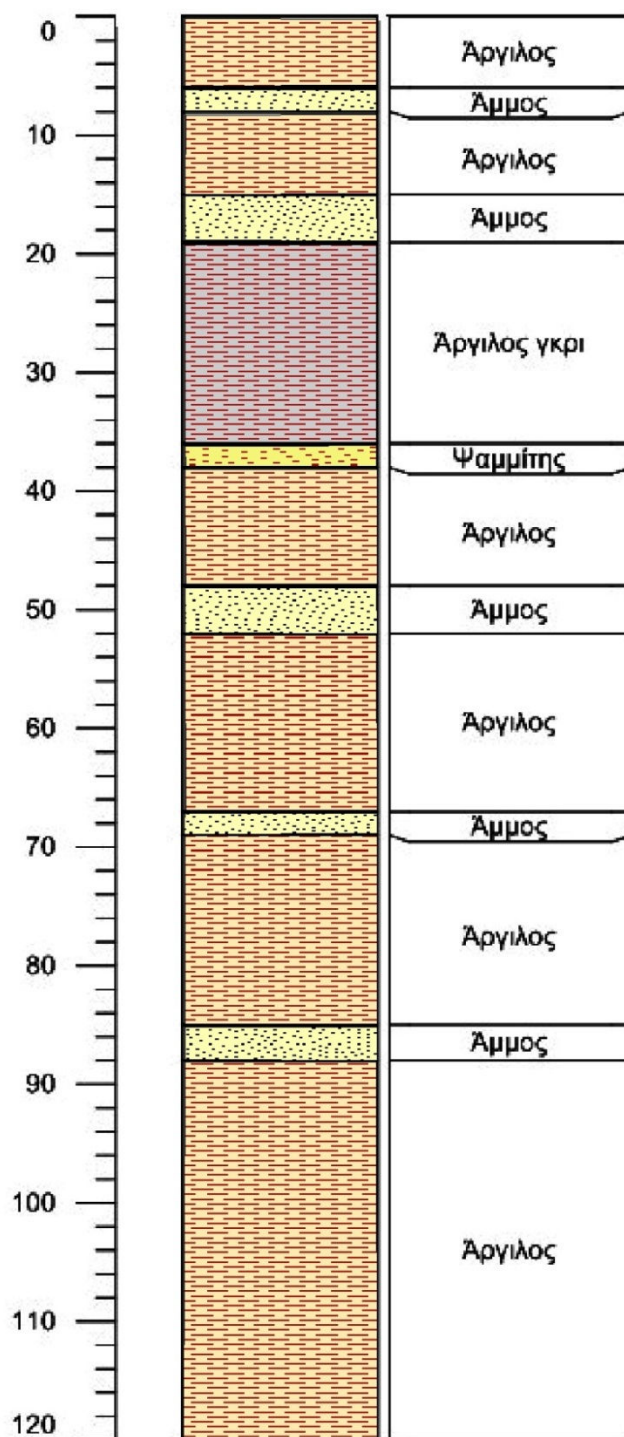
Η ερμηνεία των γεωηλεκτρικών τομών βάσει των γεωλογικών πληροφοριών της περιοχής έδειξε την παρουσία γεωλογικών σχηματισμών με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Υδροφορείς με υφάλμυρο νερό απεικονίζονται κατά μήκος των τομών ενώ εμφανής είναι και η παρουσία ρηγμάτων στην παράκτια ζώνη της περιοχής.



Σχήμα 6.6 Απεικόνιση των θέσεων των γεωηλεκτρικών τομογραφιών (ERT).



Σχήμα 6.7 Γεωηλεκτρική δομή στις τομογραφίες ERT1 και ERT2 με το δείκτη SWIM index.



Σχήμα 6.8 Λιθολογική τομή της περιοχής (γεώτρηση MR93).

7. ΜΕΤΡΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Η ολοκληρωμένη στρατηγική διαχείρισης των υπόγειων υδάτων αποτελεί βασικό κριτήριο για την προστασία των παράκτιων περιοχών από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Τα τελευταία χρόνια, η αλλαγή των κλιματικών συνθηκών και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για νερό έχουν ως επίπτωση την ενίσχυση της υφαλμύριση στους παράκτιους υδροφορείς. Ο ρυθμός άντλησης υπερβαίνει το ρυθμό φυσικού εμπλουτισμού με αποτέλεσμα τη δημιουργία ελλειμματικού ισοζυγίου. Σε αυτή την περίπτωση η διάνοιξη νέων γεωτρήσεων στην παράκτια ζώνη της περιοχής έρευνας πρέπει να αποφευχθεί. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα μπορεί να μειωθεί με τη συνδυασμένη διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων ή/και την εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων ορεινών περιοχών. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η ακριβής εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών της περιοχής έρευνας και κατ' επέκταση η τιμολόγηση των λίτρων αρδευόμενου νερού που αποκλίνουν αυτών.

Η υφαλμύριση ως μη αναστρέψιμο φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί ύστερα από αναλυτική επιστημονική έρευνα. Η πρόληψη βασίζεται στους τακτικούς ελέγχους της ποιότητας των υπόγειων υδάτων και της πιεζομετρίας στην ευρύτερη περιοχή. Η ενδοσκόπηση και ανάλυση του προβλήματος μπορεί να δώσει λύσεις για την αντιμετώπιση του. Η πληροφόρηση των πολιτών για τη βέλτιστη χρήση του νερού και για μεθόδους μικροάρδευσης (π.χ. τεχνικές ψεκασμού, άρδευση με σταγόνες) πρέπει να υποστηρίζεται από τον εκάστοτε δήμο ή περιφέρεια καθώς η αντιμετώπιση του φαινομένου μπορεί να επέλθει μόνο από τον συνδυασμό των οικονομικών, κοινωνικών και πολιτικών παραγόντων.

Επίσης, η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω των ελεγχόμενων αντλήσεων και του επιφανειακού τεχνητού εμπλουτισμού μπορούν να επιφέρουν θετικά αποτελέσματα στην βεβαρημένη από θαλασσινό νερό παράκτια περιοχή. Όσον αφορά την αφαλάτωση συνήθως απορρίπτεται ως τεχνική αντιμετώπισης καθώς είναι δαπανηρή.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των ηλεκτρικών διασκοπήσεων και τον συνδυασμό τους με τα χημικά, λιθολογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής συνοψίζονται ως εξής:

- Οι μετρήσεις της υδροστατικής στάθμης κατά την εαρινή και χειμερινή περίοδο του ίδιου υδρολογικού έτους (2016) αποτυπώθηκαν στους χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών, όπου παρατηρείται πτώση στάθμης του υπόγειου νερού από 1 έως 13 μέτρα. Η μεταβολή της στάθμης οφείλεται στην υπεράντληση του υπόγειου νερού για την κάλυψη τουριστικών, αγροτικών και οικιστικών αναγκών.
- Το βάθος του υπόγειου νερού ανέρχεται σε 3-10 m από την επιφάνεια. Το μέγιστο βάθος στάθμης που μετρήθηκε κατά την εαρινή περίοδο φτάνει τα 120 m. Η μέτρηση αντιστοιχεί σε αρδευτική γεώτρηση (δείγμα SMR15) η οποία απέχει 4,7 Km από την ακτογραμμή.
- Οι συγκεντρώσεις των ιόντων Cl^- στα δείγματα κυμαίνονται μεταξύ 39-937 mg/L, με μέση τιμή 184,4 mg/L. Το δείγμα υπόγειου νερού με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χλώριο απέχει 200 m από την ακτογραμμή και προέρχεται από υδρευτική γεώτρηση.
- Από την κατανομή των δειγμάτων στα διαγράμματα Piper και Durov παρατηρείται ότι τα υπόγεια νερά της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζονται ως Ca-Mg- HCO_3 (κατά το 83% των δειγμάτων) και Na-K-Cl- SO_4 (κατά το 17% των δειγμάτων) τύπου νερά.
- Σύμφωνα με τον δείκτη υφαλμύρισης SWIM Index, η υφαλμύριση παρατηρείται κατά μήκος της παράκτιας ζώνης και προς την ενδοχώρα κατά τόπους σε απόσταση που κυμαίνεται μεταξύ 0-800 m από την ακτογραμμή.

- Η γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους στο παράκτιο τμήμα ανέδειξε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διείσδυσης του θαλασσινού νερού με τις χαμηλές ηλεκτρικές αντιστάσεις που διακρίνονται στην ακτογραμμή, αλλά και έως 1 χιλιόμετρο προς την ενδοχώρα.

Για την προστασία του υπόγειου νερού και την αειφόρο ανάπτυξη της περιοχής προτείνονται τα παρακάτω:

- Μείωση των απολήψιμων όγκων νερού στην παράκτια περιοχή ώστε να εμποδιστεί η περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού.
- Αντικατάσταση των καλλιεργειών που χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού και αζωτούχων λιπασμάτων για την αποφυγή της περαιτέρω υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδροφορέων.
- Βελτίωση των δημοτικών υδρευτικών δικτύων (ποιοτικά και οικονομικά) ώστε οι κάτοικοι να αποφεύγουν την διάνοιξη ιδιωτικών. Το μεγαλύτερο μέρος των ιδιωτικών υδρευτικών δικτύων δεν έχουν απογραφεί με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η παρακολούθηση των μεταβολών του υδροφόρου ορίζοντα με την πάροδο του χρόνου.
- Κάλυψη μέρους των αρδευτικών αναγκών με την κατασκευή μικροφραγμάτων στις ορεινές περιοχές, καθώς οι πορώδεις υδροφορείς υφίστανται υπερεκμετάλλευση με αποτέλεσμα την ποιοτική υποβάθμισή τους.
- Παρακολούθηση (monitoring) της στάθμης της ποιότητας του υπόγειου νερού σε επιλεγμένες γεωτρήσεις.
- Ενημέρωση των πολιτών μέσω δημοτικών φορέων για την κατανόηση της έκτασης του προβλήματος της υφαλμύρισης. Οργάνωση ημερίδων για την ευαισθητοποίηση των κατοίκων.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

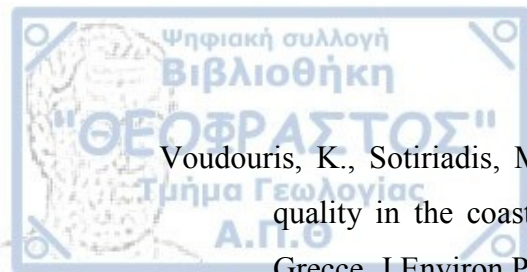
Ελληνική

- Βεράνης, Ν. & Χατζηκύρκου, Α., 2010. Υδρογεωλογική μελέτη: Υδροφόρα συστήματα Επανομής-Μουδανίων, Κασσάνδρας, Ορμύλιας και Σιθωνίας του υδατικού διαμερίσματος κεντρικής Μακεδονίας (Υ.Δ. αν.09,10,11 δυτ.). Ι.Γ.Μ.Ε. τεύχος 2Β, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ., 2009. Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.
- Βουδούρης, Κ., 2015. Εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειου νερού. Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.
- Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ): Τοπογραφικοί χάρτες, Φύλλο Βασιλικά (κλίμακα 1:50.000, Αθήνα, 1970) και Φύλλο Πολύγυρος (κλίμακα 1:50.000, Αθήνα, 1982).
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος 1:50.000, Φύλλο Βασιλικά .
- Καζάκης, Ν., 2013. Εκτίμηση της διακινδύνευσης της εξωτερικής ρύπανσης των υπόγειων νερών: Εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- Κεσόγλου, Ο., 2011. Εντοπισμός υφάλμυρων υδροφόρων στρωμάτων με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων: Εφαρμογή στην περιοχή του Αγγελοχωρίου, Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.
- Μουντράκης, Δ., 2010. Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Ντώνα, Μ., Γαβριηλίδου Ε., Καζάκης Ν., Βουδούρης, Κ., 2017. Ποιότητα του υπόγειου νερού στον παράκτιο υδροφορέα Καλλικράτειας - Φλογητών (Χαλκιδική). 6^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, 5-7 Μαΐου 2017, Θεσσαλονίκη.
- Σούλιος, Γ., 1986. Γενική Υδρογεωλογία Τόμοι 1 και 2. University Studio Press.
- Συρίδης, Γ., 1990. Λιθοστρωματογραφική, Βιοστρωματογραφική και Παλιογεωγραφική μελέτη των νεογενών-Τεταρτογενών ιζηματογενών σχηματισμών της χερσονήσου Χαλκιδικής. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Ξενόγλωσση

- Aris, A. Z., Praveena, S. M., Abdullah and M. H., 2012. The influence of seawater on the chemical composition of groundwater in a small island: the example of Manukan Island, East Malaysia. *Journal of Coastal Research*, 28(1), 64–75. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Bellot, J., Bonet, A., Pena, J. and Sanchez, J.R., 2007. Human Impacts on Land Cover and Water Balances in a Coastal Mediterranean County. *Environ Manage* (2007), 39:412–422.
- Bonet, A., 2004. Secondary succession on semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: Insights for conservation and restoration of degraded lands, *Journal of Arid Environments*, 56(2): 213-233.
- El Moujabber, M., Bou Samra, B., Darwish, T. and Atallah, T., 2006. Comparison of different indicators for Contamination by Seawater Intrusion on the Lebanese Coast. *Water Resour. Manag.* 20, 161-180.
- El Said, Al S., El Qady, G. and El Kenawy ali, A., 2016. Ground water exploration and mapping the seawater intrusion at Matruh area, North Coast, Egypt. *International Conference on Water Resources and the Arid Environments (ICWRAE 7)*: 286-296.
- Gavriilidou, E., Ntona, M., Kazakis, N., Vargemezis, G. and Voudouris, K., 2017. 11th International Hydrogeological Congress of Greece, 4-6 October 2017, Athens. vol.2, pp. 221-231.
- Hounslow, A.W., 1995. *Water Quality data analysis and interpretation*. CRC Lewis, New York.
- Kazakis, N., 2013. Estimation of groundwater balance and safe yield of porous aquifer in the Anthemountas basin and Peraia's coastal area. 10th International Hydrogeological Congress of Greece, Thessaloniki. vol. 1, pp. 305-314.
- Kazakis, N., Pavlou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K.S., Soulios, G., Pliakas, F. and Tsokas, G., 2016. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece. *Science of the Total Environment*, 543:373-387.
- Mimikou, M.A., 2005. 'Water resources in Greece: present and future', *Global NEST International Journal*, 7(3): 252-257.

- Mtoni, Y., Mjemah, I.C., Bakundukize, C., Van Camp, M., Martens, K. and Walraevens K., 2013. Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania. *Environ. Earth Sci.* 70 (3), 1091-1111.
- Panagopoulos, G., Manoutsoglou, E., Steiakakis, M., Candansayar, E. and Schafmeister, M., 2014. Salt Water Intrusion Imaging at Tybaki (Greece).
- Pavlou, A., Soulios, G., Dimopoulos, G., Tsokas, G., Mattas, C., Kazakis, N. and Voudouris, K., 2013. Groundwater quality of the coastal aquifers in the eastern part of Thermaikos gulf from Aggelochori to Kallikrateia. *Proceedings of the 13th International Congress, Chania, Sept. 2013. Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. XLVII, no2, pp.761-770.
- Piper, A.M., 1944. A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans. Am. Geophys. Union* 25: 914–923.
- Stamatis, G. and Voudouris, K., 2003. 'Marine and human activity influences on the groundwater quality of southern Korinthos area (Greece)', *Hydrological Processes*, 17(12): 2327-2345
- Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A. and Zagana, E., 2011. Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece). *Environ Earth Sci* (2011) 64:1081–1105.
- Vargemezis, G. and Fikos, I., 2010. Large Scale Vertical Electrical Soundings survey in Anthemountas river basin for evaluating hydraulic communication between sub basin aquifers. *Proceedings of the 12th International Congress, Patras, May, 2010. Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. XXXVIII: 1953–1961.
- Vengosh, A., Spivack, A.J., Artzi, Y. and Ayalon, A., 1999. Geochemical and boron, strontinum and oxygen isotopic constraints on the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean coast of Israel. *Water Resources Research*, 35: 1877-1894.
- Voudouris, K., Baltas, E., Vasalakis, A. and Diamantopoulou, P., 2006. Pressures on water resources and their impacts on coastal aquifers: case studies from Greek islands'. *WSEAS (World Scientific and Engineering Academy and Society). Transactions on Environment and Development. Issue II, Vol. 2:* 1427-1434.



Voudouris, K., Sotiriadis, M., Pavlou, A. and Hatziliontos, C., 2006. Groundwater quality in the coastal aquifer system of eastern Thermaikos Gulf, Northern Greece. J.Environ.Prot.Ecol.7 (2), 269-279.



Σχήμα Π.1 Μέτρηση της στάθμης του υπόγειου νερού στη γεώτρηση MR42.



Σχήμα Π.2 Μέτρηση φυσικοχημικών παραμέτρων στο δείγμα SMR8, της γεώτρησης MR78.



Σχήμα Π.3 Μετρήσεις γεωηλεκτρικής τομογραφίας ERT2.