



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΗΤΡΑ Γ. ΖΕΡΒΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΣΤΑΥΡΟΥ-ΒΡΑΣΝΩΝ ΜΕ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΓΕΩΛΟΓΙΑ',
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ'

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2018





ΔΗΜΗΤΡΑ Γ. ΖΕΡΒΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΣΤΑΥΡΟΥ-ΒΡΑΣΝΩΝ ΜΕ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών 'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία', Κατεύθυνση
'Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 19/11/2018

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αν. Καθηγητής Βουδούρης Κων/νος, Επιβλέπων

Αν. Καθηγητής Βαργεμέζης Γεώργιος, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Καθηγητής Τσούρλος Παναγιώτης, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.



ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΣΤΑΥΡΟΥ-ΒΡΑΣΝΩΝ ΜΕ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ
ΜΕΘΟΔΟΥΣ. – *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*

© Dimitra G. Zerva, Geologist, 2018

All rights reserved.

INVESTIGATION OF SEAWATER INTRUSION ZONE IN COASTAL AREA
STAVROS-VRASNA USING HYDROGEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL
METHODS – *Master Thesis*

Citation:

Ζέρβα Γ. Δ., 2018. – Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Zerva G. D., 2018. – Investigation of seawater intrusion zone in coastal area Stavros-Vrasna using hydrogeological and geophysical methods. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki.

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.

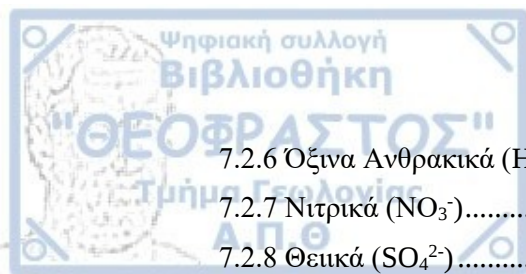
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Στον γιο μου



ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	5
1.2 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	5
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	7
2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	7
2.2 ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	7
2.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	8
2.4 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	11
2.5 ΚΛΙΜΑ	11
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	13
3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ	13
3.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ.....	15
4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	16
4.1 ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ.....	16
4.2 ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	17
5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ	18
5.1 ΠΑΡΑΚΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ	18
5.1.1 Πιεζομετρία	20
5.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	20
6. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	22
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	22
6.2 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ	23
7. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	26
7.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	26
7.1.1 Ενεργός Οξύτητα (pH)	26
7.1.2 Θερμοκρασία (T C°).....	27
7.1.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (E.C.)	27
7.1.3 Ολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.)	27
7.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	30
7.2.1 Ασβέστιο (Ca ⁺).....	31
7.2.2 Μαγνήσιο (Mg ⁺).....	31
7.2.3 Νάτριο (Na ⁺).....	31
7.2.4 Κάλιο (K ⁺)	32
7.2.5 Χλώριο (Cl ⁻)	32



7.2.6 Όξινα Ανθρακικά (HCO_3^-)	33
7.2.7 Νιτρικά (NO_3^-).....	33
7.2.8 Θειικά (SO_4^{2-}).....	34
7.3 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ	36
7.4 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ.....	37
7.4.1 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	38
7.4.2 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$	39
7.4.3 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$	39
7.4.4 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	40
7.4.5 Na^+/Cl^-	41
7.4.6 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+)$	42
7.4.7 Na^+/K^+	43
7.5. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	44
8. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ.....	47
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	47
8.2 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	47
8.2.1 Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.....	47
8.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	50
8.3.1 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση	50
8.3.2 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	51
8.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	55
9.3.4 ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	55
8.4 ΕΙΔΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ.....	56
8.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	56
8.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΑΥΡΟΥ – Ν. ΒΡΑΣΝΩΝ.....	57
8.6.1 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής Σταυρού	58
8.6.1.1 Αποτελέσματα και ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών της περιοχής Σταυρού	59
8.6.1.2 Ερμηνεία τομογραφιών ηλεκτρικής αντίστασης περιοχής Σταυρού	60
8.6.2 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής Ν. Βρασνών	64
8.6.2.1 Αποτελέσματα και ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών της περιοχής Ν. Βρασνών.....	65
8.6.2.2 Ερμηνεία τομογραφιών ηλεκτρικής αντίστασης περιοχής Ν. Βρασνών	66
9. ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	72
10. ΥΔΡΟΛΙΘΟΓΕΩΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	76
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή φέρει τον τίτλο *«Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους»* και εκπονήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Αντικείμενο της έρευνας αυτής είναι η ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων του παράκτιου υδροφορέα της περιοχής Βρασνών-Σταυρού και η διερεύνηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της υφαλμύρισης τόσο με υδροχημικές όσο και με γεωφυσικές μεθόδους.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την εξεταστική επιτροπή του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας που απαρτιζόταν από τους Επίκουρους Καθηγητές κ. Μαρίνο Β. και κ. Καντηράνη Ν., τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωστόπουλο Δ. και τον Καθηγητή κ. Τσούρλο Π. που με έκριναν ικανή και άξια να επιλεγώ και να συμμετέχω στο μεταπτυχιακό της Εφαρμοσμένης Γεωλογίας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή Υδρογεωλογίας κ. Κωνσταντίνο Βουδούρη τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για την παρότρυνσή του να εργαστώ ως γεωλόγος στο Δήμο Βόλβης και την εμπιστοσύνη που έδειξε στις δυνατότητές μου.

Ευχαριστώ θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γεωφυσικής κ. Γεώργιο Βαργεμέζη τόσο για την πραγματοποίηση των γεωφυσικών μετρήσεων όσο και την βοήθεια, την υποστήριξη και τις συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγητή Γεωφυσικής κ. Παναγιώτη Τσούρλο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την συμμετοχή του στην διπλωματική μου.

Ευχαριστώ πολύ τους συναδέλφους και φίλους Ηλία Φίκο, Άγγελο Αλμπάνη, Εύη Αμανατίδου, Πολυξένη Παπαμιχαήλ, Κων/νο Ντίκικο, Ράνια Πατσία και Αγγελική Μέλφου που με βοήθησαν στην πραγματοποίηση των ηλεκτρικών τομογραφιών. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τις υποψήφιες διδάκτορες Γιούλη Βενετσιάνου και Κων/να Πυργάκη για τη βοήθειά τους στις υδροχημικές αναλύσεις.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω σε όλους τους διδάσκοντες και συμφοιτητές μου που για 1,5 χρόνο ήταν πάντα δίπλα μου, με στηρίζαν και με γέμισαν όμορφες στιγμές.

Επίσης μέσα από την καρδιά μου ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο “Κάκαμα” Ίτσιο που με συντρόφευε στις δειγματοληψίες και με ζήλο με βοήθησε, όπως επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους συναδέλφους που συνεργάστηκα αυτούς τους 8 μήνες που δούλευα στον Δήμο Βόλβης και ιδιαίτερα τον Δήμαρχο Βόλβης κ. Διαμαντή Λιάμα και τον Πρόεδρο της κοινότητας του Σταυρού κ. Χρήστο Γκολιδάκη.

Ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για την στήριξη και συμπαράσταση τον συνάδελφο και φίλο Ιωάννη Κουβάτση, όπως και το φίλη και δασκαλό μου στο Adobe Illustrator Ιωάννη Πασχάλη.

Στον πατέρα μου Γιώργο, στη μητέρα μου Αναστασία και τον αδελφό μου Νίκο χρωστάω πολλά ευχαριστώ για την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Εύχομαι οι κόποι τους και κυρίως της μητέρας μου να μην πάνε χαμένοι.

Το ‘ευχαριστώ’ είναι πολύ μικρή λέξη μπροστά σε όλα όσα χρωστάω στον γιό μου Νικόλαο Βογδόνο. Με έχει στηρίξει, με έχει εμπνεύσει, ήταν κάθε στιγμή δίπλα μου με περίσσεια δύναμη και παλικάριά. Ότι έχω καταφέρει το χρωστάω σε αυτόν.

Είθε να φανώ αντάξια του μεγαλείου του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υπό έρευνα περιοχή των Βρασνών-Σταυρού βρίσκεται ανατολικά του Νομού Θεσσαλονίκης στην περιοχή της ανατολικής Χαλκιδικής και καταλαμβάνει έκταση 11.27 km². Πρόκειται για μια περιοχή που τα τελευταία χρόνια λόγω των νέων υποδομών και των προσπαθειών της τοπικής αυτοδιοίκησης παρουσιάζει συνεχή τουριστική ανάπτυξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι υδρευτικές ανάγκες να αυξάνονται συνεχώς χρόνο με τον χρόνο.

Στόχος λοιπόν της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η διερεύνηση της πιθανής ζώνης υφαλμύρισης στην παράκτια περιοχή των Σταυρού-Βρασνών.

Για την υλοποίηση του στόχου επιλέχθηκε η δειγματοληψία υπόγειων νερών να γίνει κατά την ξηρή περίοδο (Σεπτέμβριος 2017) διότι κατά την θερινή περίοδο γίνεται η απόληψη των μεγαλύτερων ποσοτήτων των υδατικών αποθεμάτων και επιπλέον η ανατροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα είναι περιορισμένη, οπότε η οποιαδήποτε ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων, θα μπορούσε να ανιχνευθεί πιο εύκολα.

Για τους παραπάνω λόγους μετρήθηκαν in situ το pH, η θερμοκρασία, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και τα ολικά διαλυμένα στερεά σε 17 γεωτρήσεις ύδρευσης και άρδευσης. Χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε 11 από τα δείγματα που λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις. Η επιλογή των δειγμάτων έγινε με κριτήριο να καλυφθεί ομοιογενώς η περιοχή. Χημική ανάλυση έγινε για τα κύρια ιόντα (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} και Cl^-) και υπολογίστηκαν οι ιοντικοί λόγοι Mg/Ca , Cl/HCO_3 , Na/Cl , $(Ca+Mg)/(Na+K)$, Na/K , SO_4/Cl και Na/Ca . Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 γεωφυσικές διασκοπήσεις για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους.

Τα αποτελέσματα της έρευνας κατέδειξαν 3 διαφορετικούς πετρογραφικούς τύπους υδροφορέων. Το μεγαλύτερο ποσοστό του πορώδους υδροφορέα μπορεί να χαρακτηριστεί υπό πίεση. Επιπλέον παρατηρήθηκε αυξημένες συγκεντρώσεις Na^+ και NO_3^- . Στην περιοχή των Βρασνών είναι ευδιάκριτη η ζώνη της υφαλμύρισης χωρίς όμως να επηρεάζονται οι γεωτρήσεις ύδρευσης. Η προσοχή εφιστάται στην περιοχή του Σταυρού και συγκεκριμένα στη γεώτρηση W_St1, καθώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων την καθιστούν μελλοντικά ζώνη υψηλού κινδύνου στην υφαλμύριση.

ABSTRACT

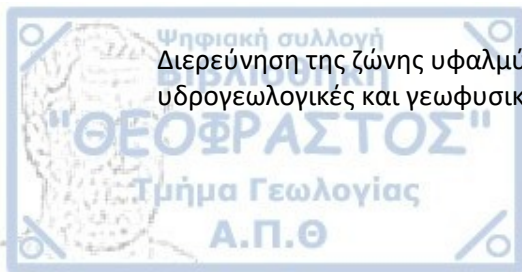
The study area is located in the eastern of Thessaloniki in the area of east Chalkidiki and covers 11.27 km². The last years, this region is in great development due to its new infrastructures and the effort of the local authority. This results in increasing water demands every single year.

The aim of this Master Thesis is the investigation of seawater intrusion in the coastal area of Stavros –Vrasna.

For the implementation of the aim, sampling took place during the dry season (September 2017) because during the summer the larger quantity of underground water is extracted, moreover the recharge of aquifers is limited. So any kind of degradation in groundwater quality would be detected.

For the above mentioned reasons, pH, temperature, electrical conductivity and total dissolved solids have been measured in 17 drinking and irrigation wells. Chemical analysis was performed at 11 of the samples. Samples were selected to homogeneously cover our study area. Chemical analysis has been conducted for the major ions (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} and Cl^-) and ionic ratios Mg/Ca , Cl/HCO_3 , Na/Cl , $(Ca+Mg)/(Na+K)$, Na/K , SO_4/Cl and Na/Ca have been calculated. Moreover geophysical survey by the application of geoelectrical tomography method has been conducted. Six (6) geoelectrical tomographies were measured in order to determine the electrical resistivity of underground.

The results show 3 different lithological types of aquifers. The bigger part of the aquifer is porous and most part of it is confined. Furthermore, the concentration of Na^+ and NO_3^- is increased. In the area of Vrasna a salinity zone is distinct but the drinking wells were not affected. The attention should be paid in the area of Stavros and more specific at well W_St1 as the results show that it could be in potential risk for future seawater intrusion.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Σε πολλές παράκτιες τουριστικές περιοχές οι υδρευτικές ανάγκες μεταβάλλονται σημαντικά κατά τους θερινούς μήνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι καθοριστικής σημασίας η γνώση του υδρογεωλογικού μοντέλου και τα χαρακτηριστικά των παράκτιων υδροφόρων ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί η προστασία τους και να καθοριστούν οι συνθήκες αειφόρου διαχείρισης των υπόγειων υδάτων.

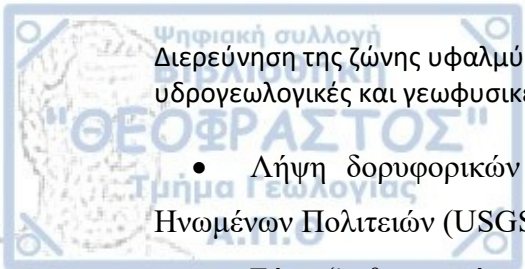
Η περιοχή των Βρασνών-Σταυρού τα τελευταία χρόνια, λόγω σταθερής ανάπτυξης, παρουσιάζει συνεχή τουριστική άνοδο κατά τους θερινούς μήνες. Παρότι δεν αντιμετωπίζει άμεσα κάποιο πρόβλημα, απαραίτητο είναι να υπάρχει η γνώση προς αποφυγή οποιοδήποτε μελλοντικού προβλήματος, καθώς στην εν λόγω περιοχή δεν έχει πραγματοποιηθεί συστηματική έρευνα των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του υπόγειου υδροφορέα.

Στόχος λοιπόν της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων του παράκτιου υδροφορέα της περιοχής Βρασνών-Σταυρού και η διερεύνηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου της υφαλμύρισης, τόσο με υδροχημικές όσο και με γεωφυσικές μεθόδους.

1.2 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση του προαναφερθέντος στόχου πραγματοποιήθηκαν οι κάτωθι εργασίες:

- Αναζήτηση βιβλιογραφίας προγενέστερων μελετών και ερευνητικών προγραμμάτων που σχετίζονται με το θέμα της διατριβής.
- Αναζήτηση σε ιδιωτικές και δημόσιες υπηρεσίες, βροχομετρικών στοιχείων, λιθολογικών τομών και φακέλων υδρογεωτρήσεων.
- Ψηφιοποίηση χαρτών (φύλλο Σταυρός 1:50.000 ΙΓΜΕ) με τη χρήση του προγράμματος ArcGIS (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών) σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Λήψη δορυφορικών εικόνων DEM από την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS).

- Σύνταξη θεματικών χαρτών με χρήση του προγράμματος ArcGIS.
- Λήψη δημογραφικών στοιχείων από την Ελληνική Στατιστική υπηρεσία.
- Λήψη τουριστικών στοιχείων από την τοπική ένωση ενοικιαζόμενων δωματίων για την εκτίμηση των υδατικών αναγκών.
- Απογραφή γεωτρήσεων (δημόσιες, ιδιωτικές, υδρευτικές και αρδευτικές).
- Δειγματοληψία υπόγειων υδάτων για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών παραμέτρων.
- Πραγματοποίηση γεωφυσικών διασκοπήσεων.
- Χρήση των λογισμικών ArcGIS, Ms Office, DC2PRO, AquaChem, Adobe Illustrator, Global Mapper, Google Earth και Matlab.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

2.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη Βόρειο Ελλάδα και ανήκει στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. Πιο συγκεκριμένα ανήκει στον Δήμο Βόλβης του Νομού Θεσσαλονίκης. Οι συντεταγμένες τις περιοχής μελέτης σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87 είναι: βόρεια 4507392,5, νότια 4500518,8, ανατολικά 475394,3 και δυτικά 471549,3. Έχει έκταση 11.27 km² και περίμετρο 20.15 km. Το μέγιστο μήκος της περιοχής είναι 7.6 km με διεύθυνση προσανατολισμού ΒΒΑ-ΝΝΔ, ενώ το μέγιστο πλάτος 2.75 km με διεύθυνση προσανατολισμού ΒΔ-ΝΑ και με μήκος ακτογραμμής 7.37 km. Ορειοθετείται βόρεια από την οροσειρά των Κερδυλλίων, νότια από το Στρατωνικό όρος, δυτικά με τον Ρήχιο ποταμό και τα Μακεδονικά Τέμπε και ανατολικά με τον Στρυμονικό Κόλπο.

Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι ο Ρήχιος ποταμός, ο οποίος πηγάζει από την ανατολική πλευρά της λίμνης Βόλβης και διασχίζοντας τα στενά της Ρεντίνας καταλήγει στον Στρυμονικό Κόλπο όπου εκβάλλουν ουσιαστικά τα υπερχειλίζοντα νερά της λίμνης, αποτελεί δε τη διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στις ακραίες θέσεις των βουνών Χολομώντα και Κερδυλλίων.

2.2 ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Δήμος Βόλβης μετά την συνένωση που προέκυψε από το πρόγραμμα «Καλλικράτης» αποτελείται από τις δημοτικές ενότητες Ρεντίνας, Αγίου Γεωργίου, Απολλωνίας, Αρέθουσας, Εγνατίας και Μαδύτου. Η περιοχή μελέτης ανήκει στην κοινότητα Βρασνών και στην κοινότητα Σταυρού και Άνω Σταυρού, οι οποίες με την σειρά τους ανήκουν στις δημοτικές ενότητες του Αγ. Γεωργίου και Ρεντίνας, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος ο πληθυσμός των περιοχών αυτών κατανέμεται ως εξής (Πίνακας 2.1):

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Πίνακας 2.1: Κατανομή Πληθυσμού ανα δημοτική ενότητα (Πηγή ΕΣΥΕ).

Δημοτικές Κοινότητες	Πληθυσμός 1991	Πληθυσμός 2001	Πληθυσμός 2011
Βρασνών	1.613	2.275	2.556
Σταυρού	2.641	3.495	3.672
Άνω Σταυρού	860	1.255	796
Σύνολο	5.114	7.025	7.024

Σύμφωνα όμως τις τοπικές Ενώσεις Ενοικιαζόμενων Δωματίων για το έτος 2017 στον πληθυσμό τόσο των μόνιμων κατοίκων όσο και των επισκεπτών κατά την θερινή περίοδο υπάρχει η εξής διαφοροποίηση (Πίνακας 2.2):

Πίνακας 2.2: Κατανομή Πληθυσμού ανά περιοχή 2017 (Πηγή Ε.Ε.Δ.).

Περιοχή	Μόνιμοι κάτοικοι	Επισκέπτες (τουρίστες)
Σταυρός	4.450	7.050
Βρασνά	2830	11,170
Σύνολο	7.780	18.220

Συνεπώς ο μόνιμος πληθυσμός παρουσίασε αύξηση της τάξεως του 10% μέσα σε 6 χρόνια και σύμφωνα πάλι με τις ίδιες πηγές ο αριθμός των επισκεπτών κατά τα τελευταία χρόνια είναι αυξανόμενος κατά 3.000 άτομα ανά τουριστική περίοδο.

Στην αύξηση της προσέλευσης τουριστών συνετέλεσε η κατασκευή της προέκτασης της Εγνατίας Οδού, καθώς η περιοχή έγινε εύκολα προσβάσιμη και με πιο ασφαλές οδικό δίκτυο. Επιπλέον οι εντατικοποιημένες προσπάθειες από πλευράς του Δήμου ώστε η περιοχή να γίνεται πόλος έλξης κατά τη θερινή περίοδο με την αδελφοποίηση με Δήμους της Σερβίας έχουν ευοδοθεί, όπως επίσης και η προώθηση του αθλητικού τουρισμού εκμεταλλευόμενοι την ορεινή περιοχή Σουγλιάνι του Στρατωνικού όρους.

2.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής εξαρτώνται και διαμορφώνονται από τρεις κύριους παράγοντες: το είδος των πετρωμάτων, την τεκτονική εξέλιξη της περιοχής καθώς και το κλίμα. Οι παράγοντες αυτοί ελέγχουν ποικίλες διεργασίες όπως τη διαβρωσιμότητα, τη διαμόρφωση αναγλύφου, το ετήσιο ύψος των

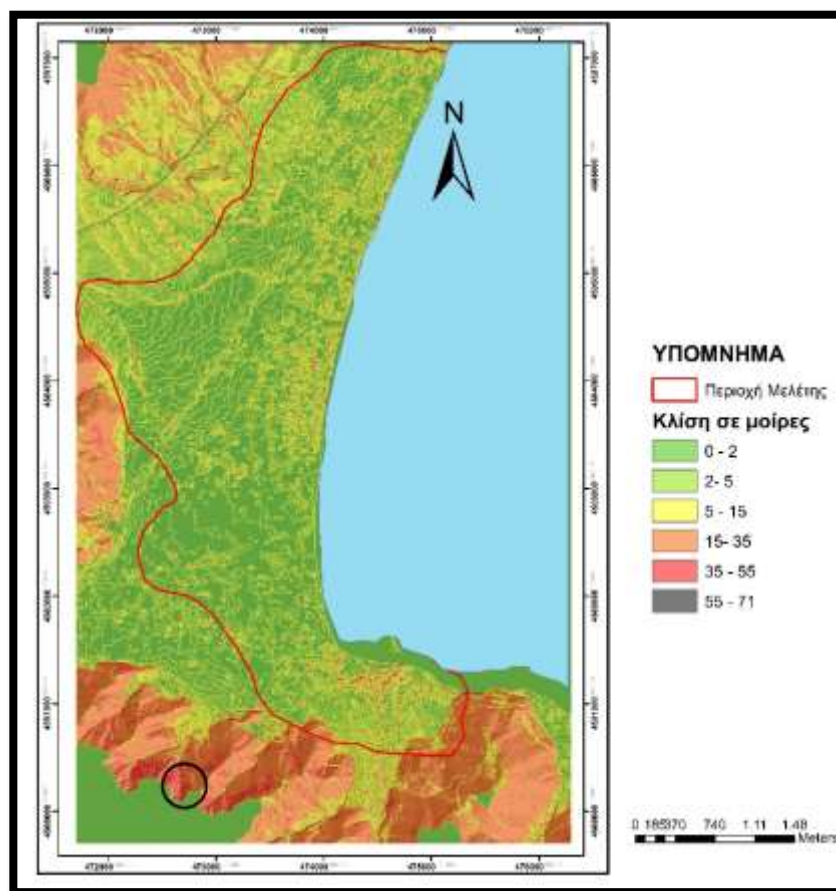
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

κατακρημνισμάτων, τη στερεοπαροχή των υδατορεμμάτων κ.α. Ο υπολογισμός των μορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής (υψόμετρο, ανάγλυφο και κλίσεις εδάφους) πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος ArcGIS.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Demek (1972) η περιοχή μελέτης μπορεί να χαρακτηριστεί επίπεδη με μία μέση κλίση 5.8% (Πίνακας 2.3). Οι μεγαλύτερες κλίσεις (15° - 35°) βρίσκονται νότια της περιοχής μελέτης. Περιμετρικά και συγκεκριμένα ΝΝΔ, Δ και ΒΒΔ το ανάγλυφο μπορεί να χαρακτηριστεί απότομο ως απόκρημνο (Σχήμα 2.1).

Πίνακας 2.3: Κατανομή των κλίσεων της περιοχής και χαρακτηρισμός κατά Demek (1972).

Κλίση (%)	Κλίση (°)	Έκταση (km ²)	Έκταση (%)	Χαρακτηρισμός
0-5	0-2	18.97	55.36%	Επίπεδο
5-17	2-5	3.42	9.97%	Ελαφρά κεκλιμένο
17-33	5-15	6.35	18.54%	Ισχυρά κεκλιμένο
33-50	15-25	5.03	14.69%	Απότομο
50-70	35-55	0.49	1.43%	Απόκρημνο



Σχήμα 2.1: Χάρτης κατανομής κλίσεων στην περιοχή Βρασνών-Σταυρού.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

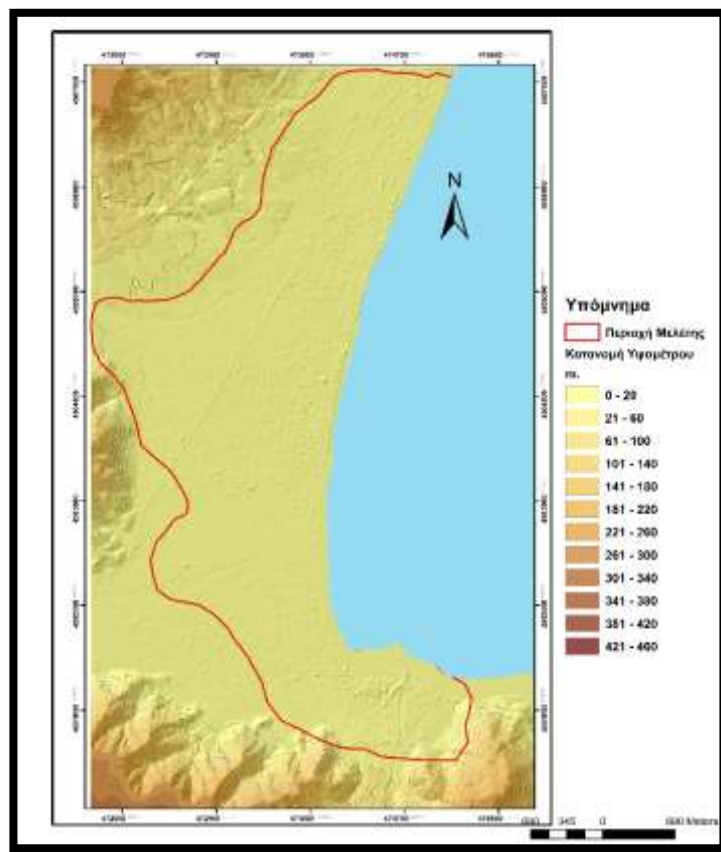
Στην περιοχή μελέτης το μέγιστο υψόμετρο είναι 60 m ενώ το ελάχιστο όπως αναμένεται είναι 0 m καθόσον πρόκειται για παράκτια ζώνη (Πίνακας 2.4). Περιμετρικά τα υψόμετρα αυξάνονται εκτός από την περιοχή των Μακεδονικών Τεμπών με το μεγαλύτερο υψόμετρο να εντοπίζεται ΝΝΔ όπως και στις κλίσεις και να φθάνει τα 460 m (Σχήμα 2.2). Σύμφωνα, με την ταξινόμηση του Dikau (1989), η περιοχή χαρακτηρίζεται ως πεδινή και το μεγαλύτερο ποσοστό της, σχεδόν 80%, είναι κάτω των 20 m (Πίνακας 2.5).

Πίνακας 2.4: Πίνακας κατανομής επιφάνειας σύμφωνα με το υψόμετρο.

Ισοϋψείς (m)	Επιφάνεια (Km ²)	Ποσοστό (%)
0	1.13	79.49%
20	0.26	18.29%
40	0.03	2.11%
60	0.0016	0.11%
Σύνολο	1.4216	100.00%

Πίνακας 2.5: Ταξινόμηση του ανάγλυφου σύμφωνα με το υψόμετρο(Dikau 1989).

Τύπος ανάγλυφου	Υψόμετρο	Επιφάνεια (%)
Πεδινή περιοχή	<150	100%
Λοφώδης περιοχή	150-600	0
Υψηλοί λόφοι-ημιορεινές περιοχές	600-900	0
Ορεινές περιοχές	>900	0



Σχήμα 2.2: Χάρτης κατανομής υψομέτρων περιοχής Βρασνών-Σταυρού.

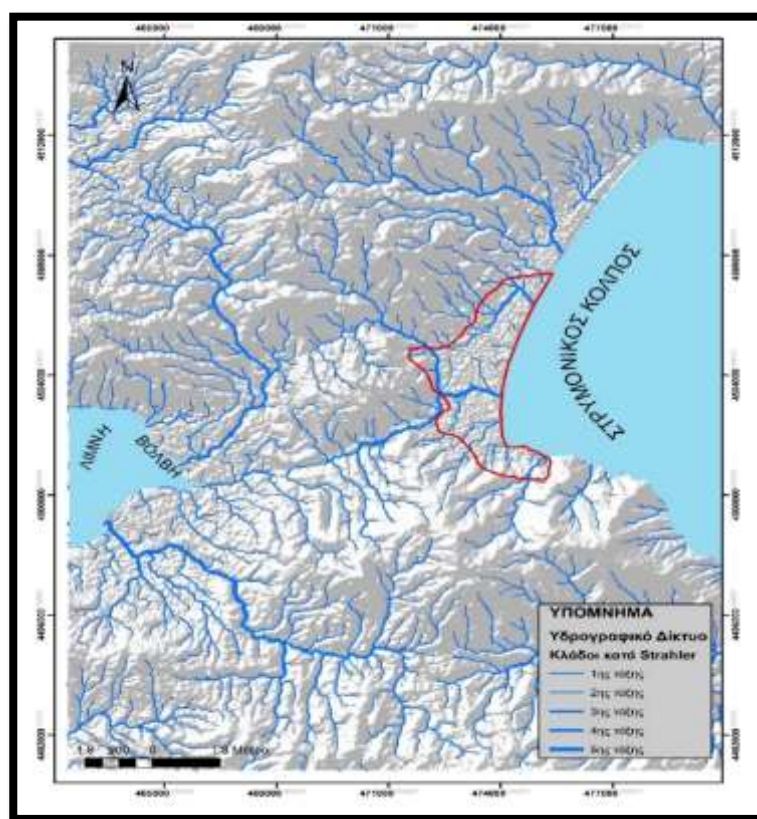
Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

2.4 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί δενδριτικής μορφής γεγονός που διακρίνει τις λιθολογικά ομοιογενείς περιοχές. Ο κύριος ποταμός της περιοχής είναι ο Ρήχιος που διασχίζει τα Μακεδονικά Τέμπη και εκβάλλει στον Στρυμονικό κόλπο.

Για την ποσοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε η αρίθμηση κατά Strahler (1952), σύμφωνα με την οποία κάθε ρέμα στο οποίο δεν εισέρχονται επιφανειακά ύδατα από κανένα άλλο κλάδο αυτό το ρέμα αποτελεί κλάδο 1^{ης} τάξης. Κατά τη σύνδεση δύο κλάδων 1^{ης} τάξης προκύπτει η δημιουργία κλάδου 2^{ης} τάξης κ.ο.κ. (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της ευρύτερης Περιοχής έρευνας.

2.5 ΚΛΙΜΑ

Σύμφωνα με την κατάταξη κατά Köppen το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακού τύπου υγρό υποτροπικό (Cfa). Αυτό σημαίνει ότι διακρίνεται από μια παρατεταμένη θερινή περίοδο με υψηλές θερμοκρασίες, ήπιους χειμώνες και υψηλά ποσοστά υγρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Στοιχεία για τις μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις και θερμοκρασίες της περιοχής ελήφθησαν από την Ελληνικός Χρυσός Ο.Ε. από τους τέσσερις σταθμούς ιδιοκτησίας της που βρίσκονται στο Μαντέμ Λάκκος, Στρατώνι, Ολυμπιάδα και Σκουριές. Υπολογίστηκαν οι μέσες ετήσιες τιμές για τα έτη 2007-2016. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα Σχήματα 2.4 και 2.5.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης 2007-2016.



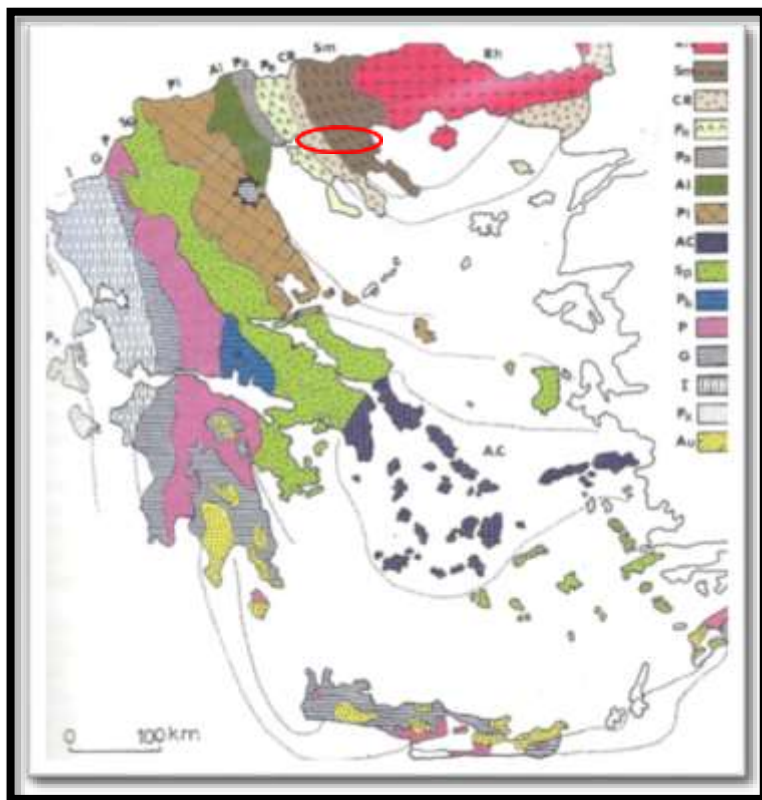
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα μέσης ετήσιας θερμοκρασίας 2007-2016.

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μικροκλίματος παίζει η λίμνη Βόλβη, ως ρυθμιστικός παράγοντας των ποσοστών υγρασίας, αλλά και των ακραίων θερμοκρασιακών τιμών με αποτέλεσμα οι περίοδοι καύσωνα και παγετών να είναι περιορισμένης έντασης και διάρκειας.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Γεωτεκτονικά η περιοχή των Βρασνών-Σταυρού ανήκει στην Σερβομακεδονική μάζα (εικόνα 3.1) και βρίσκεται στο ανατολικό περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης η οποία αποτελεί ένα ενεργό τεκτονικό βύθισμα που σύμφωνα με την διδακτορική διατριβή του Ψιλοβίκου (1977) σχηματίστηκε κατά το Κάτω-Μέσο Μειόκαινο.



Σχήμα 3.1: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας (Mountrakis et al., 1983).
 Sm=Σερβομακεδονική.

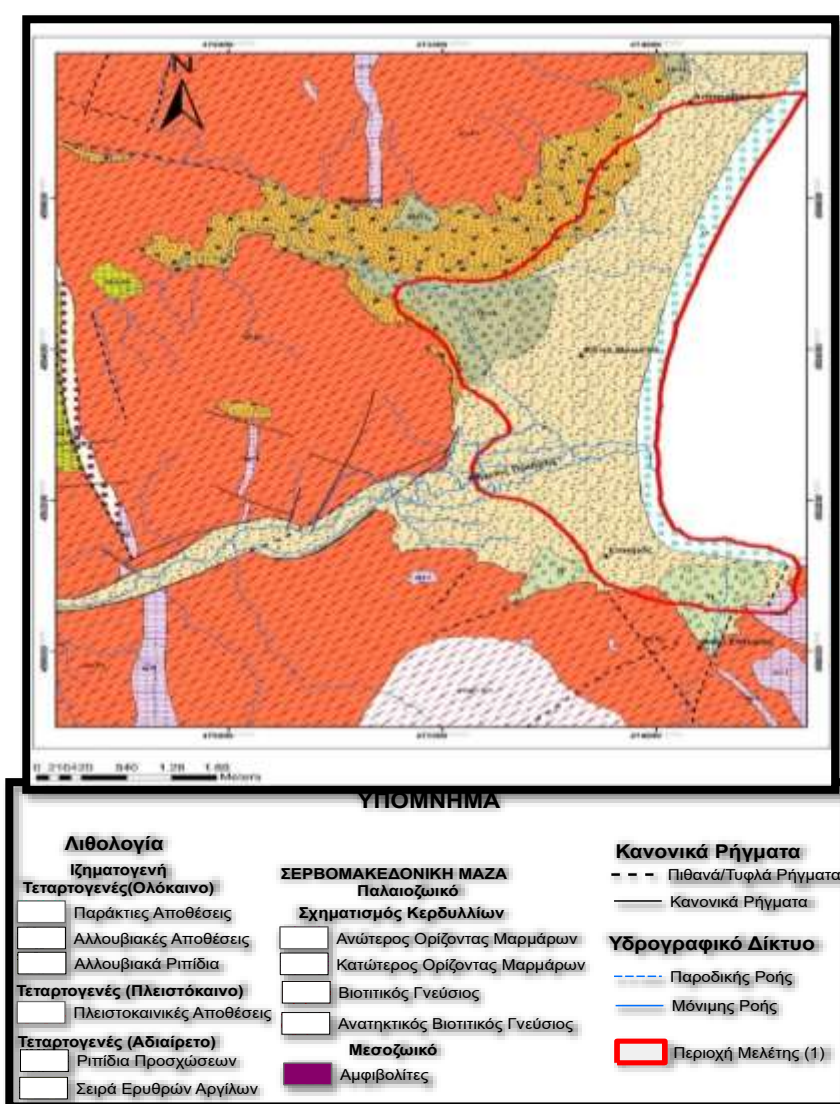
Σχεδόν εξ ολοκλήρου η περιοχή μελέτης αποτελείται από Τεταρτογενή ιζήματα τα οποία αποτέθηκαν πάνω στο κρυσταλλοσχιτώδες υπόβαθρο της Σερβομακεδονικής μάζας. Εξάιρεση ένα μικρό τμήμα νότια της περιοχής που εμφανίζεται ο ανώτερος ορίζοντας μαρμάρων και ο βιοτιτικός γνεύσιος. Οι σχηματισμοί που περιβάλλουν την περιοχή συνίστανται μόνο από την ενότητα των Κερδυλλίων και πιο συγκεκριμένα (Σχήμα 3.2):

- Ανώτερος Ορίζοντας Μαρμάρων με ενστρώσεις βιοτιτικού γνευσίου, κεροστιλβικού σχιστόλιθου και αμφιβολιτών.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Κατώτερος Ορίζοντας Μαρμάρων με ενστρώσεις βιοτιτικού γνευσίου, κεροστιλβικού γνευσίου και αμφιβολιτών.
- Βιοτιτικοί Γνεύσιοι πλούσιοι σε ανορθίτη (Ca-πλαγιόκλαστα 25-35%) με άφθονες παρείσακτες κοίτες και φλέβες και τοπικά μάζες πηγματοειδών και σχιστωδών απλιτικών γρανιτών.
- Ανατηκτικοί Βιοτιτικοί Γνεύσιοι.
- Νεογενή (Σειρά Ερυθρών Αργίλων).
- Τεταρτογενή ιζήματα: παράκτιες αποθέσεις: αναχώματα ακτών, θίνες, αλλουβιακά ριπίδια, αλλουβιακές Αποθέσεις, πλειστοκαινικές αποθέσεις, ριπίδια προσχώσεων.



Σχήμα 3.2: Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής Βρασνών-Σταυρού.

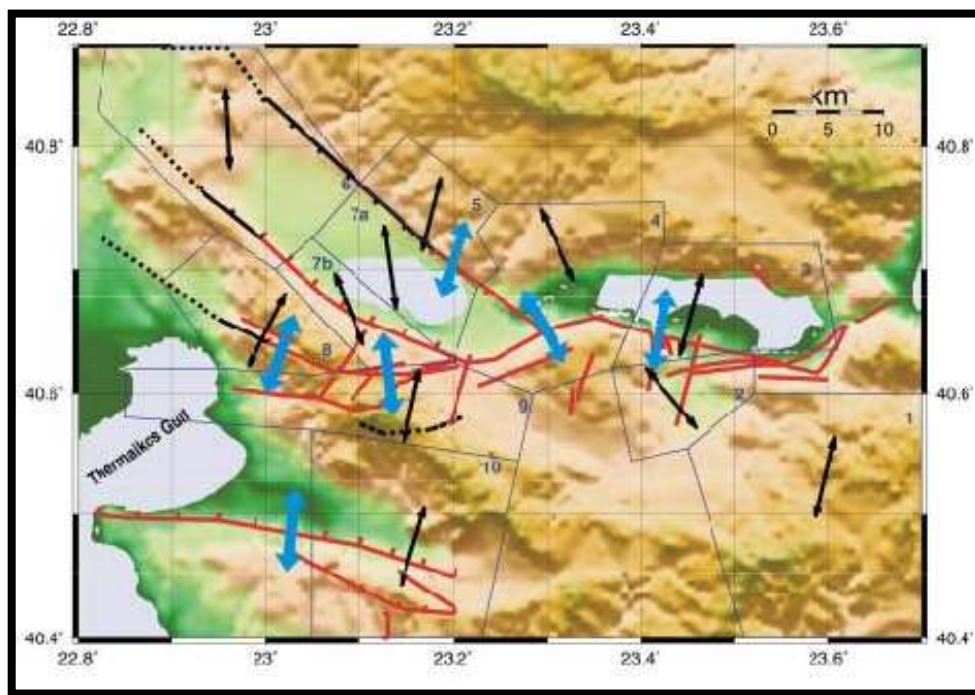
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

3.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Ο σχηματισμός της Μυγδονίας λεκάνης, όπως ήδη προαναφέρθηκε, είναι αποτέλεσμα μιας έντονης και συνεχούς εφελκυστικής τάσης η οποία ξεκίνησε από το Μειόκαινο και συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Ο εφελκυσμός αυτός είχε ως συνέπεια την δημιουργία κανονικών ρηγμάτων μεγάλης γωνίας κλίσης.

Τα ρήγματα αυτά δραστηριοποιήθηκαν κατά το Μειόκαινο ενώ κάποια από αυτά παραμένουν ως και σήμερα ενεργά. Ανάλογα με τον προσανατολισμό τους χωρίζονται σε τρεις ομάδες:

- 1) ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ τα οποία έχουν κλάδους με αποκλίνουσες διευθύνσεις ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΑΒΑ-ΔΝΔ,
- 2) ρήγματα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, και
- 3) Ρήγματα με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (σχήμα 3.3, Βαμβακάρης, 2004).



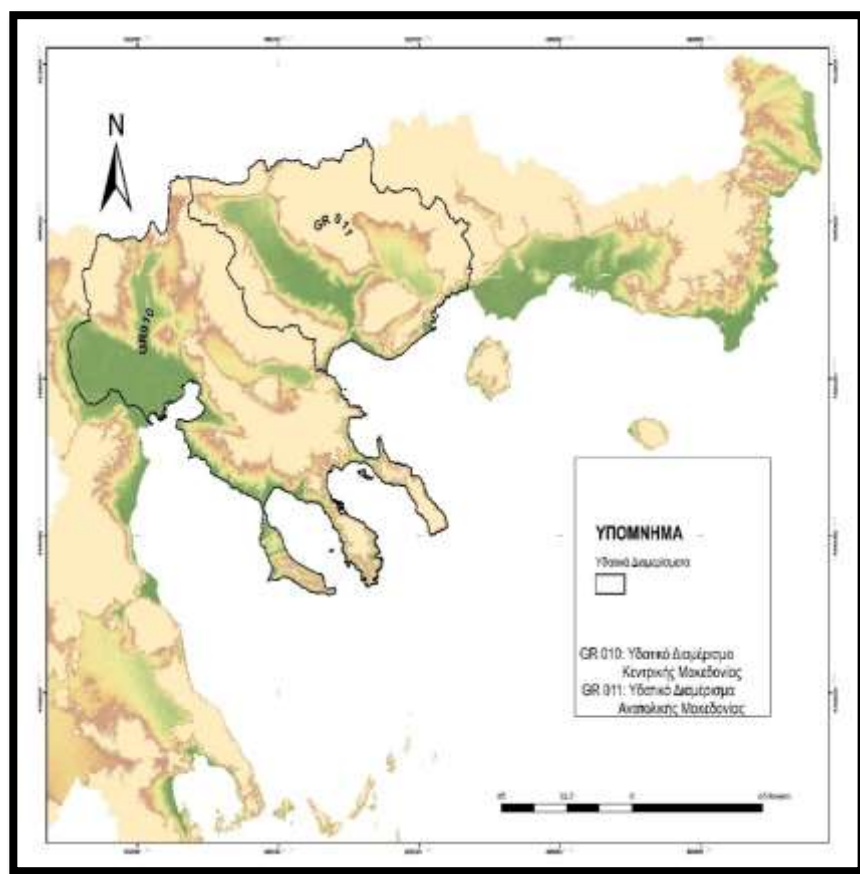
Σχήμα 3.3: Μορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης με τα σημαντικότερα ρήγματα. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα κύρια ρήγματα (Tranos et al., 2003), με μαύρες συνεχείς γραμμές οι προεκτάσεις των κυρίων ρηγμάτων και με μαύρες στικτές, οι πιθανές προεκτάσεις αυτών (Τρανός, 1998).

4. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1 ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με την, από 16 Ιουλίου 2010, Απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων (ΦΕΚ 1383/8/2-9-10 και ΦΕΚ 1572/Β/28-9-10 που διορθώνει το Παράρτημα ΙΙ του προηγούμενου ΦΕΚ), Ο ελλαδικός χώρος διαχωρίστηκε σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα (Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών). Τα όρια των υδατικών διαμερισμάτων συμπίπτουν τοπολογικά, με τα χερσαία σύνορα και την ακτογραμμή της χώρας.

Σύμφωνα λοιπόν με τα ανωτέρω η περιοχή μελέτης ανήκει σε δύο διαφορετικά διαμερίσματα: η περιοχή των Βρασνών ανήκει στο 11^ο υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Μακεδονίας, ενώ η περιοχή του Σταυρού ανήκει στο 10^ο υδατικό διαμέρισμα της Κεντρικής Μακεδονίας (σχήμα 4.1).



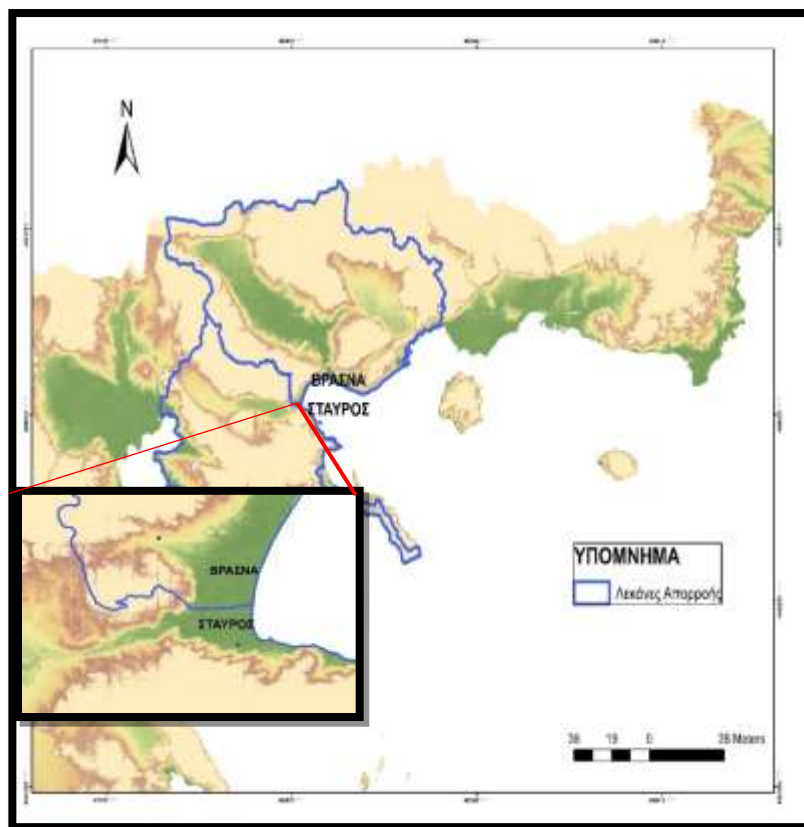
Σχήμα 4.1: Χάρτης Υδατικών Διαμερισμάτων περιοχής έρευνας.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

4.2 ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Αντιστοίχως η περιοχή μελέτης χωρίζεται και σε δύο λεκάνες απορροής (Σχήμα 4.2). Τα Βρασνά ανήκουν στην λεκάνη απορροής του Στρυμόνα της οποίας η συνολική έκταση ανέρχεται σε 17.150 km². Το κύριο τμήμα της λεκάνης αναπτύσσεται εκτός των ελληνικών συνόρων (FYROM, Βουλγαρία), και καταλαμβάνει έκταση 10.364 km², ενώ το ελληνικό τμήμα της λεκάνης του ποταμού ανέρχεται σε 6.759 km² που αντιστοιχεί στο 39,45%, της συνολικής του έκτασης. Το τεκτονικό βύθισμα του ποταμού Στρυμόνα αποτελεί το όριο μεταξύ των γεωτεκτονικών ζωνών της Περιοδοπικής και της Σερβομακεδονικής μάζας. Κύριοι φυσικοί υδάτινοι όγκοι εκτός από τον ποταμό Στρυμόνα, είναι ο παραπόταμός του Αγγίτης και η λίμνη Κερκίνη.

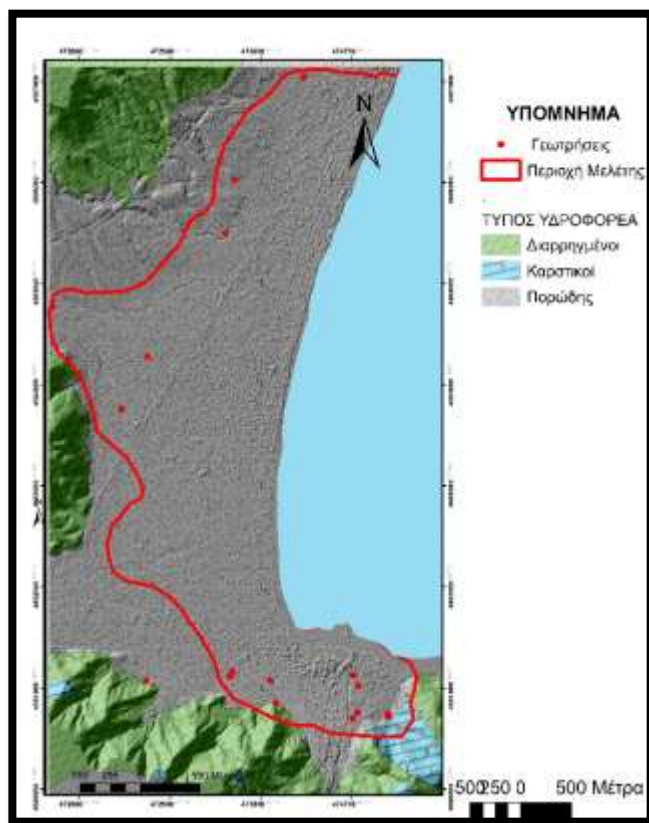
Η περιοχή του Σταυρού ανήκει στη λεκάνη απορροής της Χαλκιδικής εκτάσεως 5.546 km². Με διεύθυνση από Ανατολή προς Δύση η λεκάνη καταλαμβάνεται από τη Σερβομακεδονική μάζα, τη Περιοδοπική ζώνη και τη ζώνη της Παιονίας. Κύριοι φυσικοί υδάτινοι όγκοι είναι οι ποταμοί Χαβρίας, Ανθεμούντας, Ρήχιος, και οι λίμνες Κορώνεια (Λαγκαδά) και Βόλβη.



Σχήμα 4.2: Χάρτης Λεκανών Απορροής της περιοχής έρευνας.

5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Οι ποσότητες νερού που αντλούνται στην υπό μελέτη περιοχή προέρχονται κύρια από τον παράκτιο υδροφορέα που όπως προαναφέρθηκε δομείται επί το πλείστον από Τεταρτογενείς σχηματισμούς. Η τροφοδοσία του γίνεται τόσο πλευρικά από τους παροδικούς χειμάρρους που αναπτύσσονται εντός των κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων, όσο και από την κατείσδυση των κατακρημνισμάτων, καθόσον ο παράκτιος υδροφορέας είναι πορώδης (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Παράκτιος υδροφορέας περιοχής έρευνας.

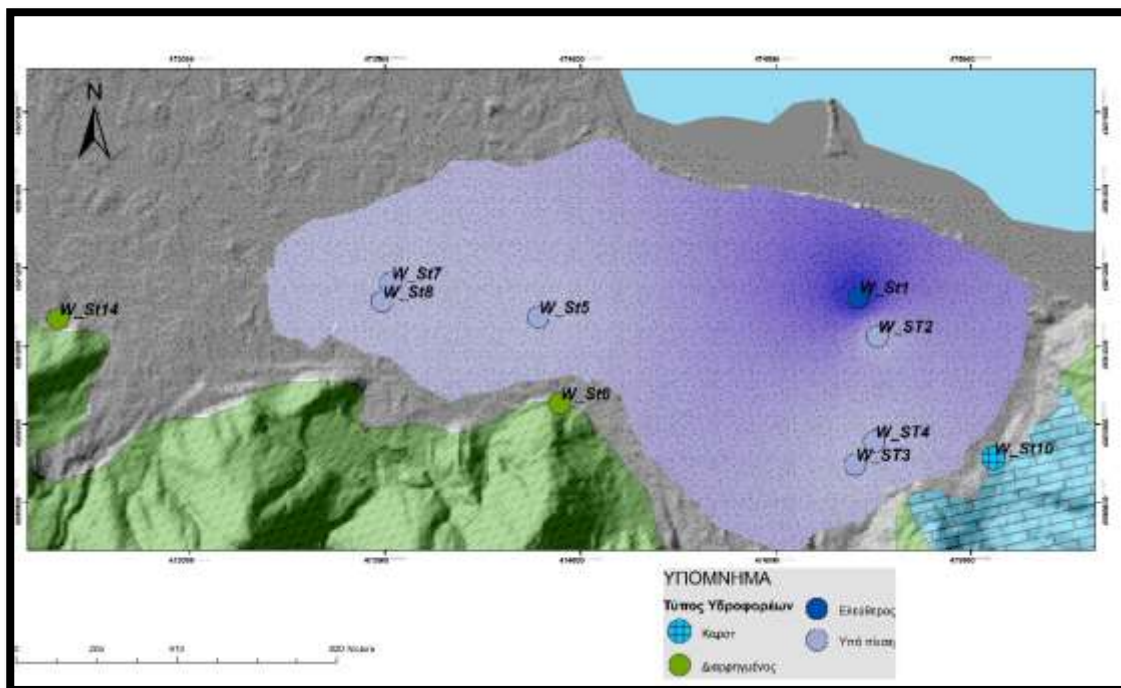
5.1 ΠΑΡΑΚΤΙΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑΣ

Από τις διαθέσιμες λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων ύδρευσης αφενός διακρίθηκαν και οι τρεις πετρογραφικοί τύποι υδροφορέων στην περιοχή και αφετέρου επεξεργαστήκαν τα δεδομένα τους και προέκυψαν οι αντίστοιχες υδρολιθολογικές τομές σε διάφορες θέσεις:

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- **Πορώδης:** αναπτύσσεται στους Τεταρτογενείς χαλαρούς σχηματισμούς. Από τα διαθέσιμα στοιχεία που έχουμε για την περιοχή του Σταυρού προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος του υδροφορέα είναι υπό πίεση και το πάχος του υδροφορέα όπου πραγματοποιείται η άντληση κυμαίνεται από 15 ως 60 m περίπου, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας εντοπίζεται στην περιοχή της γεώτρησης W_St1 με πάχος περίπου 50 m (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή ελεύθερου και υπό πίεση πορώδη υδροφορέα Σταυρού.

Λιθολογικά συνίσταται από αργίλους, άμμους, χαλίκια, κροκάλες, ογκόλιθους που είτε εμφανίζονται αναμεμειγμένα μεταξύ τους είτε σε ομοιογενείς ενστρώσεις.

- **Καρστικός:** αναπτύσσεται στον κατώτερο ορίζοντα μαρμάρων των Κερδυλλίων λόγω του δευτερογενούς πορώδους του που δημιουργήθηκε από την καρστικοποίηση. Ο υδροφορέας βάσει του χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. εμφανίζεται ρηγματωμένος, ενώ από τα διαθέσιμα στοιχεία προκύπτει ότι η υδροφορία εκτείνεται από τα 12-72 m βάθος και υπόκειται ενός αδιαπέρατου στρώματος πάχους 12 m περίπου.

- **Διαρρηγμένος:** αναπτύσσεται στους βιοτιτικούς γενευσίους των Κερδυλλίων όπου η έντονη τεκτονική δραστηριότητα δημιούργησε ζώνες ασυνεχειών (ρήγματα, διακλάσεις κλπ.) και τελικά δευτερογενές πορώδες και η υδροφορία του ξεκινάει από τα 10 περίπου μέτρα και εκτείνεται (βάσει της γεώτρησης) ως τα 60 m.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

5.1.1 Πιεζομετρία

Η στάθμη των υπογείων υδάτων είναι μια σημαντική παράμετρος που μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων, την τροφοδοσία των υδροφόρων συστημάτων, αλλά και τον βαθμό τρωτότητάς τους καθώς μια υψηλή στάθμη σε συνδυασμό με υπερκείμενα περατά στρώματα καθιστά ευάλωτο το σύστημα στην εξωτερική ρύπανση.

Εν προκειμένω, δεν κατέστη δυνατή η καταγραφή της στάθμης στο σύνολο των γεωτρήσεων, καθώς είτε ήταν αδύνατη η χρήση σταθμήμετρου είτε οι γεωτρήσεις ήταν σε συνεχή λειτουργία. Έτσι δεν έγινε δυνατή η διαμόρφωση ενός δικτύου μετρήσεων, αρκετά πυκνό που να καθιστά τη δημιουργία ενός πιεζομετρικού χάρτη αξιόπιστη.

5.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

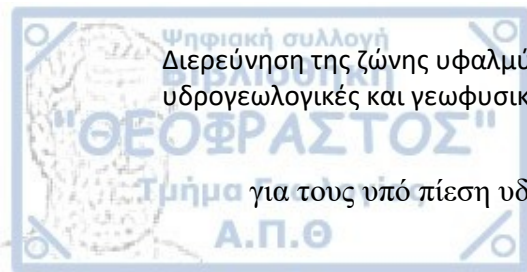
Οι υδραυλικές παράμετροι μπορεί να προσδιοριστούν είτε άμεσα με την πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων είτε έμμεσα με την χρήση εμπειρικών τύπων. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας καθώς παρέχουν πληροφορίες για την υδροδυναμική των υδροφόρων στρωμάτων και κατ' επέκταση τον τρόπο διαχείρισης και ορθολογικής εκμετάλλευσής τους.

Οι κυριότερες υδραυλικές παράμετροι είναι :

- **Υδραυλική αγωγιμότητα K** (hydraulic conductivity) που εκφράζει την ευκολία με την οποία κινείται το νερό μέσα σε έναν γεωλογικό σχηματισμό. Πολύ μικρές τιμές υδροπερατότητας $k \leq 10^{-9}$ m/s δηλώνουν πρακτικά στεγανούς σχηματισμούς, ενώ τιμές υδροπερατότητας $k \leq 10^{-1}$ m/sec σχετίζονται με πολύ υδροπερατούς σχηματισμούς.

- **Ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας T** (Transmissivity) επιτρέπει να εκτιμήσουμε προσεγγιστικά τη δυνατότητα απόληψης νερού από έναν υδροφορέα (μέτρο δυναμικότητας). Ορίζεται ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) με το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D).

- **Ειδική ικανότητα (Specific capacity)** ορίζει το πηλίκο της παροχής Q της γεώτρησης προς την αντίστοιχη πτώση στάθμης δ . Όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμαστικών αντλήσεων η μεταβιβαστικότητα μπορεί να υπολογισθεί μέσω της ειδικής ικανότητας ως εξής:



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

για τους υπό πίεση υδροφορείς : $T = 1.6 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)$

για τους ελεύθερους υδροφορείς: $T = 1.2 \left(\frac{\rho}{\delta} \right)$

Στον πίνακα 5.1 παρατίθενται οι αντίστοιχες υδραυλικές παράμετροι της περιοχής του Σταυρού. Για την περιοχή των Βρασνών δεν ήταν δυνατή η σύνταξη αντίστοιχου πίνακα λόγω της μη ύπαρξης δυνατότητας προσδιορισμού του υδροφορέα σε ελεύθερο ή υπό πίεση.

Πίνακας 5.1: Υδραυλικές παράμετροι περιοχής Σταυρού.

Γεώτρηση	Μεταβιβαστικότητα $T(m^2/d)$	Υδραυλική Αγωγιμότητα $K (m/s)$	Ειδική Ικανότητα $Sc (m^2/d)$
W_St 1	135.53	$3.27 \cdot 10^{-05}$	112.94
W_ST 2	100.00	$6.36 \cdot 10^{-05}$	62.50
W_St 3	61.44	$1.39 \cdot 10^{-05}$	38.40
W_St 4	94.29	$3.52 \cdot 10^{-05}$	58.93
W_St 5	69.82	$1.52 \cdot 10^{-05}$	43.64
W_St7	116.87	$6.26 \cdot 10^{-05}$	73.04
W_St 8	105.93	$3.95 \cdot 10^{-05}$	66.21

6. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης (salinization) ή αλλιώς θαλάσσιας διείσδυσης (seawater intrusion) είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένο και αφορά τους παράκτιους υδροφορείς που υπόκεινται σε εκμετάλλευση.

Οι λόγοι εμφάνισης του φαινομένου είναι πολλοί και πολλές φορές αλληλεπένδετοι μεταξύ τους. Η κλιματική αλλαγή (Ferguson et al., 2012, White et al., 2005) που έχει σαν αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η υπεράντληση λόγω των αυξημένων αρδευτικών αναγκών σε καλλιεργούμενες περιοχές, η αύξηση του μόνιμου πληθυσμού σε παράκτιες περιοχές (Neumann et al., 2015, Small et al., 2003), η προσέλευση τουριστών (Garcia et al., 2003), μέχρι και η επίδραση της τοπογραφίας και της τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφορέων έχουν οδηγήσει σε πληθώρα ερευνών και διαφορετικών προσεγγίσεων.

Θεωρείται αναγκαίο η χαρτογράφηση των παράκτιων υδροφορέων κάθε χώρας και η χωρική αποτύπωση του φαινομένου ώστε να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων του φαινομένου που να οδηγεί στην διαχρονική παρακολούθησή του.

Στον ελληνικό χώρο έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια σημαντικές έρευνες για την διερεύνηση και καταγραφή του φαινομένου. Mandilaras et al., 2007, Lambrakis, N., 2006, Hamdan et al., 2010, Kazakis et al., 2016, Papatheodorou et al., 2007, Petalas et al., 1999, Galazoulas et al., 2015, Voudouris et al., 2007, Alexakis et al., 2015, είναι μερικές από τις εργασίες που έχουν δημοσιευτεί και οδήγησαν, πέραν των γενικών συμπερασμάτων από τους Δασκαλάκη και Βουδούρης (2007) στη δημιουργία του χάρτη υφαλμύρισης για την Ελλάδα (Σχήμα 6.1).

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης εκτός από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες (υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων) μπορεί να οφείλεται και σε φυσικά αίτια όπως:

- Η διάλυση των πετρωμάτων που είναι πλούσια σε άλατα.
- Η έντονη τεκτονική στις περιπτώσεις των καρστικών πετρωμάτων με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσω ρηγμάτων και διακλάσεων.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Ο εγκλωβισμός παλαιών υφάλμυρων φάσεων εντός των γεωλογικών σχηματισμών.
- Οι καθοδικές κινήσεις της ξηράς λόγω τεκτονικής δραστηριότητας.

Όσον αφορά τον μεσογειακό χώρο η αλατότητα των βροχοπτώσεων στη Μεσόγειο θάλασσα λόγω των αερομεταφερόμενων σταγονιδίων έχει σημαντικές επιπτώσεις στον χημισμό των υπόγειων υδάτων των νησιών (Dazy et al., 1997).

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης μπορεί να προκληθεί (ή σε συνδυασμό με τις υπεραντλήσεις να ενταθεί ακόμα περισσότερο), από τεχνικά έργα που ουσιαστικά αποτελούν μέσο πρόσβασης του θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφορέα όπως για παράδειγμα κανάλια που έχουν διανοιχθεί στο επίπεδο της θάλασσας ή παλιές εγκαταλελειμμένες γεωτρήσεις (Todd, D., 1959).



Σχήμα 6.1: Χάρτης υφαλμύρισης της Ελλάδας (Daskalaki and Voudouris, 2007).

6.2 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ

Λόγω της φυσικής προς την θάλασσα κλίσης που έχουν οι παράκτιες πεδιάδες οι παράκτιοι υπόγειοι υδροφορείς εκφορτίζουν φυσιολογικά στη θάλασσα. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης παρατηρείται όταν οι απολήψιμες ποσότητες νερού από έναν υπόγειο υδροφορέα είναι μεγαλύτερες από την ικανότητα ασφαλούς απόδοσης του υδροφορέα (Βουδούρης, 2009).

Το νερό των παράκτιων υδροφορέων και το νερό της θάλασσας έχουν διαφορετική πυκνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ορίου μεταξύ

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

του υπόγειου και του θαλασσινού νερού που ονομάζεται διεπιφάνεια επαφής. Το σχήμα και η θέση της επιφάνειας αυτής εξαρτάται ουσιαστικά από τον όγκο νερού που εκφορτίζεται από τον υπόγειο υδροφορέα μέσα στη θάλασσα (Fetter, 2001). Η διεπιφάνεια αυτή αποτελεί μια ζώνη μετάβασης σημαντικού πλάτους, που δημιουργείται από τον μηχανισμό της διάχυσης.

Σύμφωνα με τον Fetter (1973) διακρίνονται δύο είδη θαλάσσιας διείσδυσης: η παθητική και η ενεργητική.

Η παθητική διείσδυση συμβαίνει όταν παρά το γεγονός ότι έχει αρχίσει να εισέρχεται το θαλάσσιο μέτωπο προς την ενδοχώρα, η εκφόρτιση του υδροφορέα προς τη θάλασσα είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει αναστροφή του υδραυλικού φορτίου. Σε αυτή τη περίπτωση η διεπιφάνεια μετατοπίζεται αργά προς την ενδοχώρα μέχρι που να βρει μια νέα θέση ισορροπίας που να ανταποκρίνεται στις νέες συνθήκες εκφόρτισης. Παθητική θαλάσσια διείσδυση συμβαίνει σε πάρα πολλές παράκτιες περιοχές της γης. Η δράση της όμως είναι τόσο αργή που μπορεί να χρειαστούν και εκατοντάδες χρόνια για να υπάρξει μια αξιόλογη μετατόπιση μετώπου.

Η ενεργητική θαλάσσια διείσδυση συμβαίνει όταν λόγω της υπεράντλησης δημιουργείται ένας βαθύς κώνος πτώσης στάθμης και η διεπιφάνεια μετακινείται προς την ενδοχώρα πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με την παθητική διείσδυση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της υδραυλικής κλίσης και δημιουργία αρνητικού υδραυλικού φορτίου.

Σύμφωνα με τους Ghyben-Herzberg στους ελεύθερους παράκτιους υδροφορείς το βάθος στο οποίο το υπόγειο νερό πρέπει να εκτείνεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας είναι περίπου 40 φορές το ύψος που έχει ο υδροφόρος ορίζοντας πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Σχήμα 6.2)

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

Όπου: z = το βάθος της θάλασσας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας.

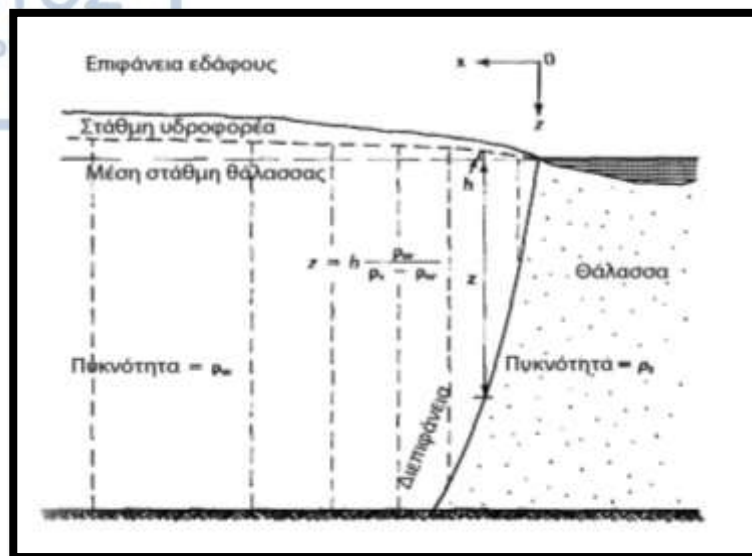
h = το υψόμετρο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

ρ_w = η πυκνότητα του γλυκού νερού (1.00 g/cm³).

ρ_s = η μέση πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1.025 g/cm³).

Έτσι λοιπόν προκύπτει η σχέση των Ghyben-Herzberg ότι $z = 40h$.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 6.2: Σχέση φορτίου γλυκών υδάτων και βάθους θαλάσσιας διείσδυσης (από Fetter, 2001 τροποποιημένο).

7. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η χημική σύσταση των υδάτων που αποθηκεύονται στους υπόγειους υδροφορείς εξαρτάται από πλήθος παραγόντων με κυριότερους το είδος των πετρωμάτων από τα οποία συνίσταται ο εκάστοτε ταμιευτήρας, αλλά και από τους σχηματισμούς από τους οποίους διέρχεται το υπόγειο νερό μέχρι την αποθήκευσή του, τον χρόνο παραμονής μέσα στον υδροφορέα και φυσικά τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις.

Ανάλογα με την χημική του σύσταση του νερό ενός υδροφορέα μπορεί να χαρακτηριστεί κατάλληλο για ύδρευση, άρδευση ή εντελώς ακατάλληλο.

7.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

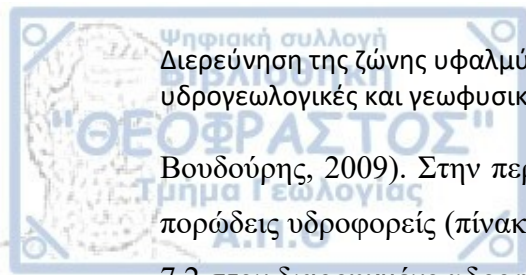
Οι φυσικοχημικές παράμετροι της ενεργούς οξύτητας (pH), Θερμοκρασίας, Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (E.C) και Ολικών διαλυμένων Στερεών (T.D.S.) πραγματοποιήθηκαν σε δεκαεπτά (17) γεωτρήσεις εκ των οποίων: οι δεκατέσσερις (14) ήταν ύδρευσης και οι τρεις (3) ήταν άρδευσης. Επιπλέον η μία γεώτρηση είναι ανορυγμένη μέσα σε καρστικό υδροφορέα, μία σε διαρρηγμένο και οι υπόλοιπες δεκαπέντε σε πορώδεις υδροφορείς.

Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιήθηκαν φιάλες πολυαιθυλενίου του 1,5 λίτρου οι οποίες αφού ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό στο εργαστήριο, η διαδικασία επαναλήφθηκε και στην ύπαιθρο όπου η κάθε φιάλη ξεπλύθηκε με το νερό της γεώτρησης όπου συλλέχθηκε το δείγμα της.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιήθηκε το φορητό αγωγιμόμετρο του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

7.1.1 Ενεργός Οξύτητα (pH)

Πρόκειται για τη συγκέντρωση ιόντων H_3O^+ που περιέχεται στο νερό. Εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τους σχηματισμούς του ταμιευτήρα και την ηλικία του νερού. Νερό αλκαλικών πετρωμάτων όπως και νερό είναι αλκαλικό ($pH > 7$), ενώ νερό που φιλοξενείται σε ασβεστολιθικά πετρώματα και αλλουβιακές αποθέσεις όπως επίσης και με την αύξηση της ηλικίας του νερού το pH γίνεται πιο όξινο ($pH < 7$) λόγω της αύξησης του CO_2 συνέπεια της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης (Σούλιος, 2006,



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Βουδούρης, 2009). Στην περιοχή μελέτης το pH κυμαίνεται από 6.7 έως 7.55 στους πορώδεις υδροφορείς (πίνακας 7.2), 7.55 στον καρστικό υδροφορέα (πίνακας 7.3) και 7.2 στον διαρρηγμένο υδροφορέα (Πίνακας 7.4).

7.1.2 Θερμοκρασία (T C°)

Η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία των πετρωμάτων του ταμιευτήρα αλλά και από το βάθος απόληψης (Βουδούρης, 2009). Γενικά η θερμοκρασία του υπόγειου νερού κυμαίνεται από 10 έως 20° C. Στην περιοχή μελέτης η θερμοκρασία κυμαίνεται από 15,3 έως 22° C στους πορώδεις υδροφορείς (πίνακας 7.2), 16.6 στον καρστικό υδροφορέα (πίνακας 7.3) και 17.8 στον διαρρηγμένο (πίνακας 7. 4).

7.1.3 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (E.C.)

Με την ηλεκτρική αγωγιμότητα περιγράφεται η ευκολία με την οποία ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε ένα μέσο. Στο νερό η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από την συγκέντρωση των ιόντων και κατ' επέκταση των ολικών διαλυμένων στερεών (T.D.S.) και την θερμοκρασία του νερού. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των ιόντων και η θερμοκρασία του νερού τόσο αυξάνεται και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των γλυκών υδάτων (στους υπό πίεση υδροφορείς) κυμαίνεται από 600-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Petalas and Diamantis, 1995), ενώ τιμές μεγαλύτερες των 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αποτελούν ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης (Petalas, 1997).

Στους πορώδεις υδροφορείς η E.C. κυμαίνεται από 502 έως 1061 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (πίνακας 7.2) στον καρστικό υδροφορέα 734 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (πίνακας 7.3), ενώ στον διαρρηγμένο 374 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (πίνακας 7.4). Η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1.

7.1.3 Ολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.)

Τα ολικά διαλυμένα στερεά εκφράζουν την ολική συγκέντρωση νιτρικών, θεικών, ανθρακικών, αμμωνιακών και χλωριούχων αλάτων στο νερό. Η ποσότητα καθώς και το είδος των αλάτων που θα συγκεντρωθούν εξαρτάται από το είδος των πετρωμάτων μέσα από τα οποία διέρχεται, του ταμιευτήρα, τον χρόνο παραμονής κ.α. (Βουδούρης, 2009). Οι συνήθεις τιμές για τους γρανιτικούς σχηματισμούς είναι 200-300 mg/L, ενώ στους ιζηματογενείς 1000-1200 mg/L (Σούλιος, 2006). Στον πίνακα 7.1 παρατίθεται η ταξινόμηση των υδάτων κατά τους Davis and De Wiest (1996) ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ολικά διαλυμένα στερεά.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Πίνακας 7.1: Ταξινόμηση υδάτων κατά τους Davis and De Wiest (1996)

Ολικά Διαλυμένα Στερεά (mg/L)	Τύπος νερού
0-1.000	Γλυκό (fresh)
1.000-10.000	Υφάλμυρο (brackish)
10.000-100.000	Αλμυρό (salt or saline)
>100.000	Υπεράλμυρο (brine)

Σε όλη την περιοχή μελέτης το νερό των υπόγειων υδροφορέων χαρακτηρίζεται ως γλυκό με τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών να είναι <1.000 mg/L (Πίνακας 7.2 έως 7.4). Η χωρική κατανομή των ολικών διαλυμένων στερεών της περιοχής απεικονίζεται στο σχήμα 7.2.

Πίνακας 7.2 : Φυσικοχημικές παράμετροι πορώδους υδροφορέα Σεπτέμβριος 2017.

Πορώδης Υδροφορέας					
α/α	Γεώτρηση	pH	T	E.C.	T.D.S.
1	W_St 1	7.14	17.2	958	614
2	W_ST 2	7.04	15.3	502	322
3	W_St 3	7.15	17.9	619	396
4	W_St 4	7.41	17.2	674	432
6	W_St 8	7.55	18.2	625	400
8	W-St 11	7.18	19.8	1061	680
9	W_St 12	7	19.5	801	514
10	W_ST 13	6.7	17.4	604	385
11	W_Vr1	6.93	22.2	601	384
12	W_Vr2	7.22	19.9	699	447
13	W_Vr3	7.28	20	572	366
14	W_Vr4	7.3	20	610	390
15	W_Vr5	7.04	16.3	628	402
16	W_Vr6	7.36	19.5	520	333
17	W_Vr7	7.2	19	558	358

Πίνακας 7.3 : Φυσικοχημικές παράμετροι Καρστικού Υδροφορέα Σεπτέμβριος 2017.

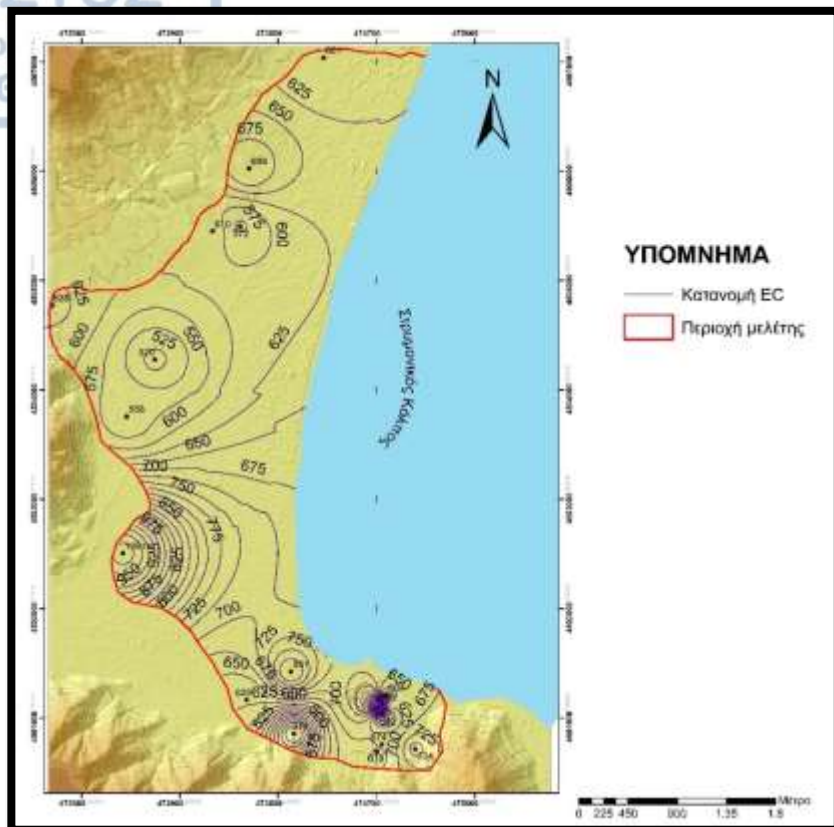
Καρστικός Υδροφορέας					
α/α	Γεώτρηση	pH	T	E.C.	T.D.S.
1	W_St 10	7.31	16.6	734	469

Πίνακας 7. 4: Φυσικοχημικές παράμετροι Διαρρηγμένου Υδροφορέα Σεπτέμβριος 2017.

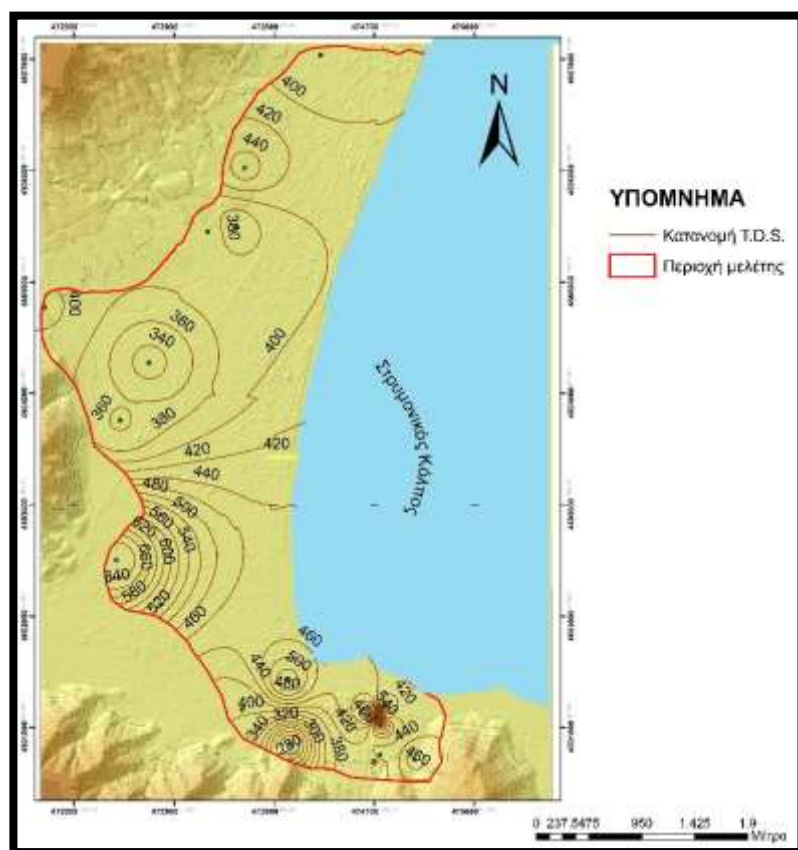
Διαρρηγμένος Υδροφορέας					
α/α	Γεώτρηση	pH	T	E.C.	T.D.S.
1	W_St 6	7.2	17.8	374	240

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεω
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υπαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.1: Χάρτης κατανομής Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας ($\mu\text{S}/\text{cm}$) της περιοχής Βρασνών – Σταυρού.



Σχήμα 7.2: Χάρτης κατανομής Ολικών Διαλυμένων Στερεών (TDS) της περιοχής Βρασνών – Σταυρού.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

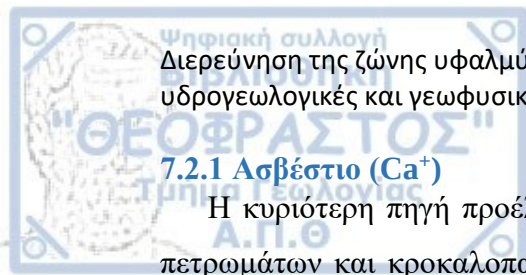
Χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για όλα τα κύρια ιόντα σε έντεκα (11) γεωτρήσεις εκ των οποίων οι δέκα ήταν ύδρευσης και η μια άρδευσης. Οι συγκεντρώσεις των HCO_3^- , Mg^{2+} και Ca^{2+} έγιναν με τιτλοδότηση ενώ οι συγκεντρώσεις NO_3^- , SO_4^{2-} και Cl^- πραγματοποιήθηκαν με το φασματοφωτόμετρο HACH DR2000 του εργαστηρίου Τεχνικής και Περιβαλλοντικής Υδρογεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Οι αναλύσεις των Na^+ και K^+ πραγματοποιήθηκαν με φλογοφωτόμετρο JENWAY pfp7 του εργαστηρίου Γεωχημείας του Τμήματος Γεωλογίας του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών αφού διηθήκαν με ηθμό 0.45.

Τα αποτελέσματα ταξινομήθηκαν ανάλογα με τον τύπο υδροφορέα και παρατίθενται στον πίνακα 7.6.

Σύμφωνα με τους Apello C. και Postma (2006) οι συγκεντρώσεις των κύριων στοιχείων των οποίων η πηγή προέλευσης είναι φυσική και δεν έχουν επηρεαστεί από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις παρατίθενται στον πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Εύρος τιμών των συγκεντρώσεων μη ρυπασμένων υδάτων και πηγές προέλευσης των στοιχείων κατά Apello C. Και Postma (2006).

Στοιχεία	mg/L	Πηγή Προέλευσης
Na^+	2.3-46	Άστριοι, ζεόλιθοι, ατμόσφαιρα ιοντοανταλλαγή, αλίτης
K^+	0.4-7.82	Άστριοι, Μαρμαρυγίες
Mg^{2+}	1.2-48.6	Δολομίτης, Σερπεντίνης, Πυρόξενος, αμφιβολίτης, ολιβίνης, μαρμαρυγίες
Ca^{2+}	2-200.4	Ανθρακικά, γύψος, άστριοι, πυρόξενος, αμφίβολος
Cl^-	1.77-71	Αλίτης, ατμόσφαιρα
HCO_3^-	<305	Ανθρακικά, οργανική ύλη
SO_4^{2-}	0.96-480	Ατμόσφαιρα, γύψος, σουλφίδια
NO_3^-	0.06-12.4	Ατμόσφαιρα, οργανική ύλη
Si	0.5-28.1	Πυριτικές ενώσεις
Fe^{2+}	<9.5	Πυριτικές ενώσεις, σιδηρίτης, υδροξείδια, σουλφίδια
PO_4	<1.9	Οργανική ύλη, φωσφορικές ενώσεις



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

7.2.1 Ασβέστιο (Ca^{+})

Η κυριότερη πηγή προέλευσης του ασβεστίου είναι η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων και κροκαλοπαγή με ασβεστιτικό συνδετικό υλικό ή σχηματισμοί των οποίων η ορυκτολογική τους σύσταση είναι πλούσια σε αλκαλικά πλαγιόκλαστα (ανορθίτη). Η συνήθης συγκέντρωση του Ca^{2+} στα υπόγεια νερά είναι μεταξύ 10-100 mg/L (Καλλέργης, 2000).

Στην περιοχή μελέτης οι τιμές του Ca^{2+} κυμαίνονται από 32-93.2 mg/L. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στη γεώτρηση W_St10 η οποία βρίσκεται εντός των καρστικοποιημένων μαρμάρων, ενώ ο εμπλουτισμός των υπολοίπων οφείλεται στα προϊόντα αποσάθρωσης του βιοτιτικού γνεύσιου ο οποίος είναι πλούσιος σε ανορθίτη (Ca-άστριος).

7.2.2 Μαγνήσιο (Mg^{+})

Πηγή μαγνησίου στο υπόγειο νερό είναι τα πετρώματα όπου η ορυκτολογική τους σύσταση περιλαμβάνει μαγνησιούχα ορυκτά όπως αμφίβολοι, πυρόξενοι, Mg-Ολιβίνης, δολομίτης, μαγνησίτης (Καλλέργης, 2000). Οι συγκεντρώσεις ιόντων Mg^{2+} είναι συνήθως <50 mg/L, ενώ το θαλασσινό περιέχει πάνω από 1000 mg/L (Καλλέργης, 2000).

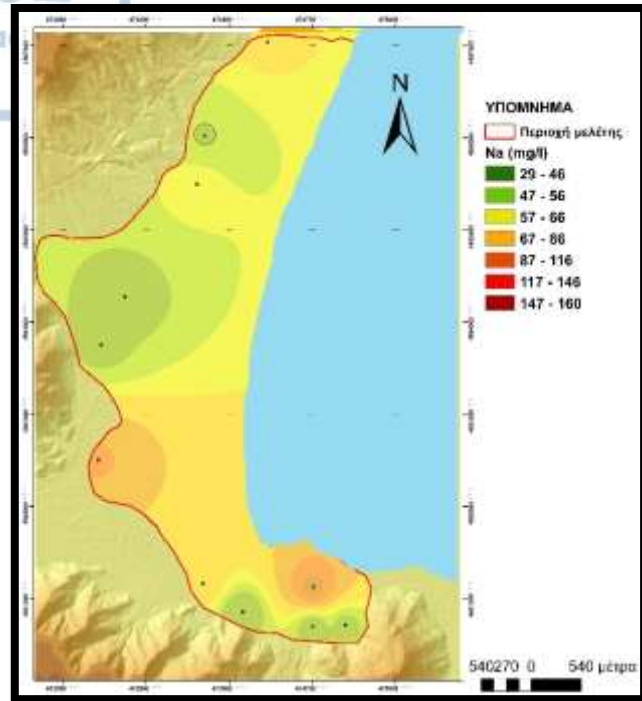
Στην περιοχή μελέτης οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 4.9-27.3 mg/L. Η συγκέντρωση του Mg^{2+} οφείλεται στην αποσάθρωση του γνευσίου που είναι πλούσιος σε βιοτίτη [$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$].

7.2.3 Νάτριο (Na^{+})

Η συγκέντρωση νατρίου στο υπόγειο νερό εξαρτάται από την παρουσία όξινων πλαγιοκλάστων (αλβίτης $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), τον αλίτη (NaCl) (Βουδούρης, 2009), αλλά και λόγω ρύπανσης από αστικά απόβλητα (Moujabber et al., 2006).

Στην περιοχή μελέτης οι συγκεντρώσεις νατρίου κυμαίνονται από 28.9-159.4 mg/L (σχήμα 7.3). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στη γεώτρηση W_St1 δημιουργώντας έτσι την υποψία για θαλάσσια διείσδυση. Επιπλέον οι γεωτρήσεις W_St 8, W-St 11, W_Vr1, W_Vr3 έχουν αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις που πιθανόν να οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.3: Χάρτης χωρικής κατανομής ιόντων Na^+ .

7.2.4 Κάλιο (K^+)

Η προέλευση του καλίου στα υπόγεια νερά μπορεί να είναι ορυκτά όπως οι Κ-άστριοι, ο συλβίνης (KCl) και οι μαρμαρυγίες (βιοτίτης, μοσχοβίτης). Η παρουσία του όμως μπορεί να σχετίζεται και με ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως χρήση καλιούχων λιπασμάτων (Βουδούρης, 2009). Οι συνήθεις τιμές του K^+ είναι $<10 \text{ mg/L}$ (Καλλέργης, 2000).

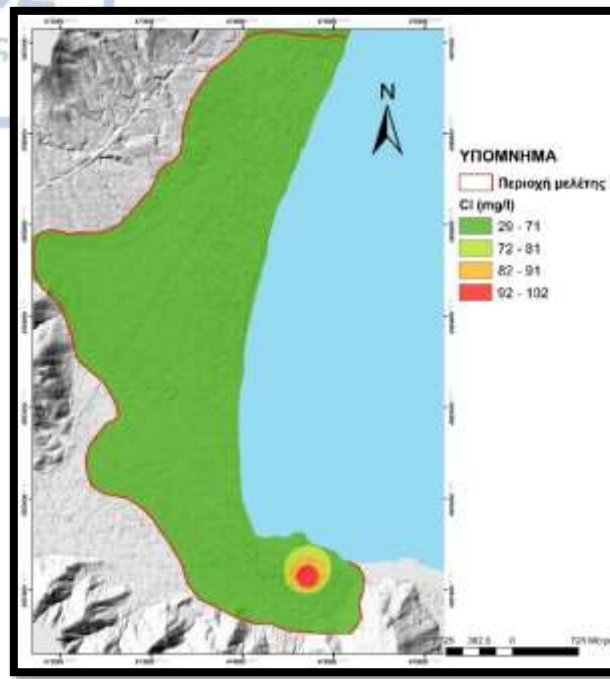
Στην περιοχή μελέτης η συγκέντρωση του καλίου κυμαίνεται από 3.2 έως 6.3 mg/L . Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στη γεώτρηση W_St1 που όμως είναι εντός των φυσιολογικών ορίων.

7.2.5 Χλώριο (Cl^-)

Κύρια πηγή προέλευσης του χλωρίου είναι οι εβαπορίτες θαλάσσιας προέλευσης, ορυκτά όπως ο αλίτης (NaCl) (Apello and Postman, 2005) και οι θερμές πηγές (Βουδούρης, 2009). Από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις μπορεί να προέρχεται από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφορείς όπου σύμφωνα με τον Βουδούρη (2005) όριο ένδειξης υφαλμύρισης αποτελεί η συγκέντρωση των 100 mg/L .

Στην περιοχή μελέτης οι τιμές του χλωρίου κυμαίνονται από 102.5 έως 5.1 mg/L (Σχήμα 7.4). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται και πάλι στη γεώτρηση W_St1, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες γεωτρήσεις οι τιμές είναι σημαντικά πιο χαμηλές από το όριο των 100 mg/L .

Διερεύνηση της ζώνης υπαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.4: Χάρτης κατανομής Cl⁻.

7.2.6 Όξινα Ανθρακικά (HCO₃⁻)

Κύρια πηγή προέλευσης των όξινων ανθρακικών ιόντων είναι η διάλυση των ανθρακικών πετρωμάτων. Επίσης να είναι προϊόν της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης στα εδάφη (Βουδούρης, 2009). Οι συνήθεις συγκεντρώσεις είναι <500 mg/L (Καλλέργης, 2000).

Στην περιοχή μελέτης οι τιμές τους κυμαίνονται από 186 έως 407 mg/L. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στη γεώτρηση W_St11 που ίσως να σχετίζονται με τις χαμηλές συγκεντρώσεις νιτρικών όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

7.2.7 Νιτρικά (NO₃⁻)

Νιτρικά ιόντα φυσικής προέλευσης μπορεί να περιέχονται στο υπόγειο νερό ως τελικό προϊόν της αποσύνθεσης οργανικών αζωτούχων ενώσεων όπως πρωτεΐνη ζωικής και φυτικής προέλευσης και υποπροϊόντων κτηνοτροφικής καλλιέργειας (Βουδούρης, 2009). Η κύρια όμως προέλευσή του είναι προϊόν ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως διάθεση αζωτούχων λιπασμάτων, επιφανειακή απόθεση αστικών λυμάτων, χρήση λυμάτων για άρδευση (Suthar et al., 2009, Spalding and Exner, 1993). Οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων στα υπόγεια νερά, που δεν είναι επηρεασμένα από νιτρορύπανση, δεν ξεπερνούν τα 10 mg/L (Καλλέργης, 2000).

Αν και η τοξικότητα των νιτρικών έχει τεκμηριωθεί σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 50 mg/L η Κρατική Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των Η.Π.Α. έχει ορίσει ως όριο τα 44 mg/L (Spalding et al., 1993) καθώς η υπέρβαση του ορίου αυτού ενέχει κίνδυνο για την ζωή και την υγεία των νεογνών.

Διερεύνηση της ζώνης υπαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Στην περιοχή μελέτης οι τιμές των νιτρικών κυμαίνονται από 13.9 έως 40.9 mg/L, οι οποίες αν και δεν ξεπερνούν το όριο της οδηγίας (<50 mg/L) είναι υψηλότερες των φυσιολογικών ορίων. Για την περιοχή του Σταυρού λόγω των μη εκτεταμένων καλλιεργήσιμων εκτάσεων οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι πιο πιθανό να οφείλονται στον επηρεασμό των υπόγειων υδάτων από την παρουσία απορροφητικών βόθρων ή την επιφανειακή διάθεση αστικών λυμάτων. Στην περιοχή των Βρασνών οι γεωτρήσεις βρίσκονται εντός καλλιεργήσιμης περιοχής (επι τω πλείστον ελαιώνες), συνεπώς οι, συγκριτικά με την περιοχή του Σταυρού, πιο αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών είναι πιθανό να οφείλονται στη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων.

7.2.8 Θειικά (SO_4^{2-})

Η κύρια προέλευση των θεικών ανιόντων είναι η οξείδωση θειούχων ορυκτών όπως, ο γαληνίτης (PbS), σφαλερίτης (ZnS), σιδηροπυρίτης (FeS_2) κ.α., η διαλυτοποίηση του γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) και του ανυδρίτη (CaSO_4). Επίσης η παρουσία του μπορεί να αποτελείσμα της χρήσης λιπασμάτων. Στην περιοχή μελέτης οι τιμές των θεικών κυμαίνονται από 19.3 έως 80 mg/L και είναι εντός των φυσιολογικών ορίων. Οι συγκεντρώσεις τους οφείλονται στην παρουσία αρκετών φλεβών θειούχων ορυκτών.

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων Σεπτέμβριος 2017.

Πορώδης Υδροφορέας								
Γεώτρηση	NO_3	SO_4	HCO_3	Ca	Mg	Na	K	Cl
W_St 1	16.1	62.7	249.0	38.0	4.9	159.4	6.3	102.5
W_St 3	24.3	31.3	246.0	84.0	4.9	34.2	4.5	18.8
W_St 8	13.9	28.0	223.0	44.0	12.9	78.1	3.2	58.0
W-St 11	16.9	80.0	407.0	45.7	27.3	120.1	4.9	8.4
W_Vr1	24.5	59.7	243.0	50.8	7.8	69.6	4.6	5.1
W_Vr2	26.0	37.0	319.0	89.6	12.7	44.9	5.3	22.8
W_Vr3	22.0	27.0	230.0	32.0	16.6	59.9	3.3	16.0
W_Vr6	34.5	31.0	253.0	56.0	23.0	37.5	3.5	18.8
W_Vr7	40.9	39.0	250.0	60.8	22.2	40.7	3.8	22.8
Διαρρηγμένος Υδροφορέας								
Γεώτρηση	NO_3	SO_4	HCO_3	Ca	Mg	Na	K	Cl
W_St 6	22.0	19.3	186.0	55.2	6.6	28.9	3.3	17.0
Καρστικός Υδροφορέας								
Γεώτρηση	NO_3	SO_4	HCO_3	Ca	Mg	Na	K	Cl
W_St 10	26.5	33.0	330	93.2	7.8	40.7	4.3	23.1

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Με την οδηγία 2006/118/EK (ΦΕΚ 2075B/25-09-2009), ορίστηκαν τα Πρότυπα Ποιότητας των υπόγειων υδάτων και Ανώτερες Αποδεκτές Τιμές (ΑΑΤ) για τους ρύπους, τις ομάδες ρύπων και τους δείκτες ρύπανσης.

Ως «Ανώτερες Αποδεκτές Τιμές» (ΑΑΤ) ορίζονται οι ανώτερες τιμές συγκεντρώσεων ορισμένων ρύπων στα υπόγεια ύδατα λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές τιμές υποβάθρου, τη χρήση των νερών και την επίδραση σε επιφανειακά και χερσαία οικοσυστήματα.

Με βάση την Υ.Α.1811/ΦΕΚ.3322/30-12-2011 προσδιορίζονται σε εθνικό επίπεδο τα ποιοτικά πρότυπα και οι ανώτερες αποδεκτές τιμές (ΑΑΤ) για τη συγκέντρωση συγκεκριμένων ρύπων, ομάδων ρύπων ή δεικτών ρύπανσης σε υπόγεια ύδατα (πίνακας 7 και 8), σε εφαρμογή της παραγράφου 2 του Άρθρου 3 της ΚΥΑ 39626/2208/ Ε130/2009 κοινής υπουργικής απόφασης (Β' 2075).

Πίνακας 7.7: Ποιοτικά Πρότυπα Υπόγειων υδάτων.

Ρύπος	Ποιοτικά Πρότυπα
Νιτρικά άλατα	50 mg/L
Δραστικές ουσίες φυτοφαρμάκων (συμπεριλαμβάνονται αντίστοιχοι μεταβολίτες, προϊόντα αποικοδόμησης και αντιδράσεων)	0.1 μg/l 0.5 μg/l (συνολικό)

Πίνακας 7.8: Ανώτερες Αποδεκτές Τιμές Ρύπων Υπόγειων Υδάτων.

Παράμετρος	Ανώτερη Αποδεκτή Τιμή
pH	6,50 – 9,50
Αγωγιμότητα	2500 μS/cm
Αρσενικό	10 μg/Lt
Κάδμιο	5 μg/Lt
Μόλυβδος	25 μg/Lt
Υδράργυρος	1,0 μg/Lt
Νικέλιο	20,0 μg/Lt
Ολικό χρώμιο	50,0 μg/Lt
Αργίλιο	200,0 μg/Lt
Αμμώνιο	0,50 mg/Lt
Νιτρώδη	0,50 mg/Lt
Αμμώνιο	0,50 mg/Lt
Χλωριούχα ιόντα	250 mg/Lt
Θειικά ιόντα	250 mg/Lt
Άθροισμα Τριχλωροαιθυλενίου και Τετραχλωροαιθυλενίου	10 mg/Lt

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

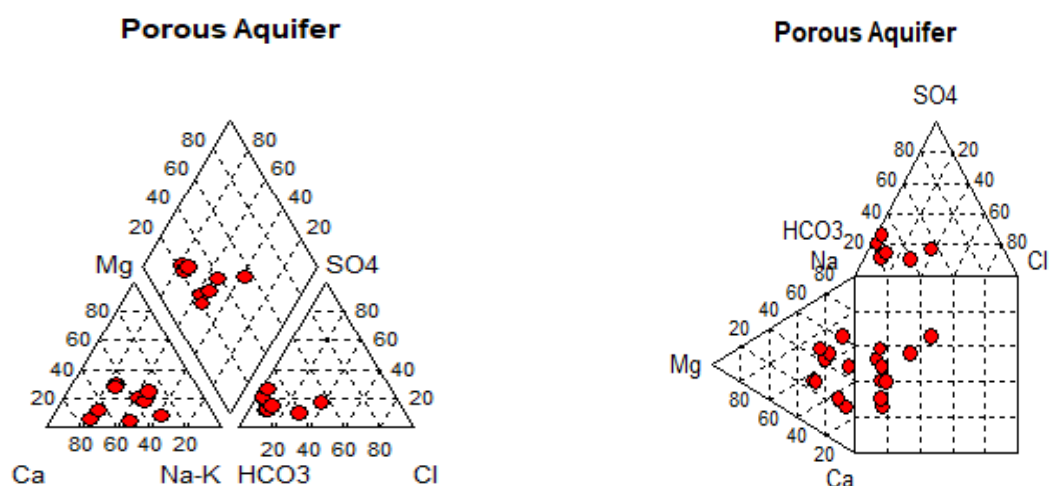
7.3 ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Η χημική σύσταση των υπόγειων υδάτων που δεν έχουν επηρεαστεί από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις περιέχει $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ and $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. Ο κυρίαρχος χημικός τύπος των ελληνικών υπόγειων υδάτων είναι $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ (Daskalaki and Voudouris, 1997).

Η υδροχημική ταξινόμηση έγινε ξεχωριστά για τον κάθε τύπο υδροφορέα και έτσι προέκυψαν τρία διαφορετικά διαγράμματα Piper και τρία Durov.

Στον πορώδη υδροφορέα η κατανομή των κατιόντων και των ανιόντων είναι $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ και $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4 > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ αντίστοιχα.

Με χρήση του προγράμματος AquaChem και των υδροχημικών διαγραμμάτων Piper και Durov διακρίθηκαν πέντε διαφορετικοί υδροχημικοί τύποι Na-Ca-HCO-Cl, Ca-Na-HCO, Ca-Na-HCO-SO, Na-Ca-Mg-HCO, Ca-Mg-Na-HCO (σχήμα 7.5).

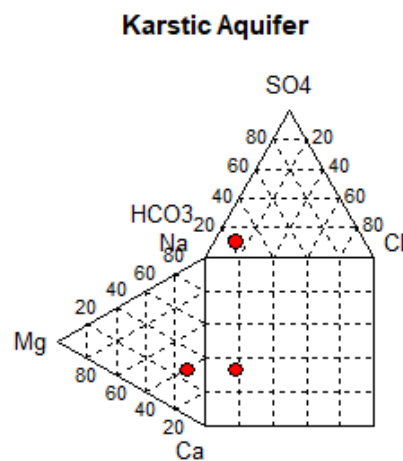
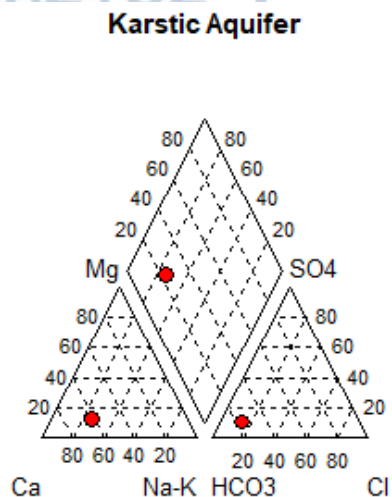


Σχήμα 7.5: Υδροχημικά διαγράμματα πορώδους υδροφορέα Piper (αριστερά) και Durov (δεξιά).

Στον καρστικό υδροφορέα η κατανομή των κατιόντων και των ανιόντων είναι $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ και $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4 > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ αντίστοιχα.

Με χρήση του προγράμματος AquaChem και των υδροχημικών διαγραμμάτων Piper και Durov διακρίθηκε ο υδροχημικός τύπος Ca-Na-HCO₃ (σχήμα 7.6).

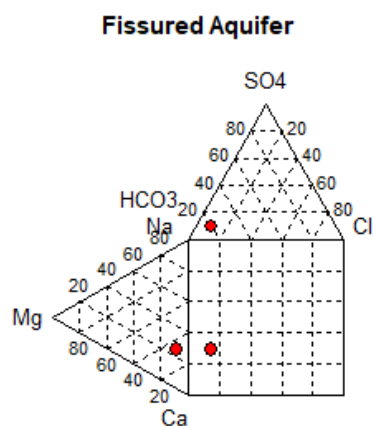
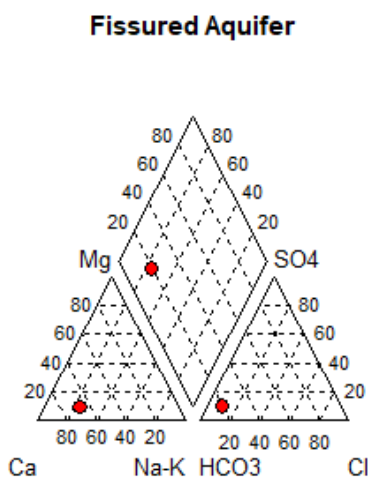
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.6: Υδροχημικά διαγράμματα καρστικού υδροφορέα Piper (αριστερά) και Durov (δεξιά).

Στον διαρρηγμένο υδροφορέα η κατανομή των κατιόντων και των ανιόντων είναι $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ και $\text{HCO}_3 > \text{NO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ αντίστοιχα.

Με χρήση του προγράμματος AquaChem και των υδροχημικών διαγραμμάτων Piper και Durov διακρίθηκε ο υδροχημικός τύπος Ca-Na-HCO_3 (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7: Υδροχημικά διαγράμματα διαρρηγμένου υδροφορέα Piper (αριστερά) και Durov (δεξιά).

7.4 ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ

Οι ιοντικοί λόγοι μπορούν να προσφέρουν σημαντικές ενδείξεις για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων. Κάθε ιοντικός λόγος διαθέτει ένα εύρος τιμών που μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για τα πετρώματα του υδροφορέα ή το είδος των πετρωμάτων από τα οποία διέρχεται το

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

υπόγειο νερό, την επιβάρυνση λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, τον βαθμό ανανέωσής του. Οι ιοντικοί λόγοι εκφράζονται σε meq/l (Πίνακας 7.9).

7.4.1 Mg^{2+}/Ca^{2+}

Ο ιοντικός αυτός λόγος μας δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού του πετρογραφικού τύπου του υδροφορέα

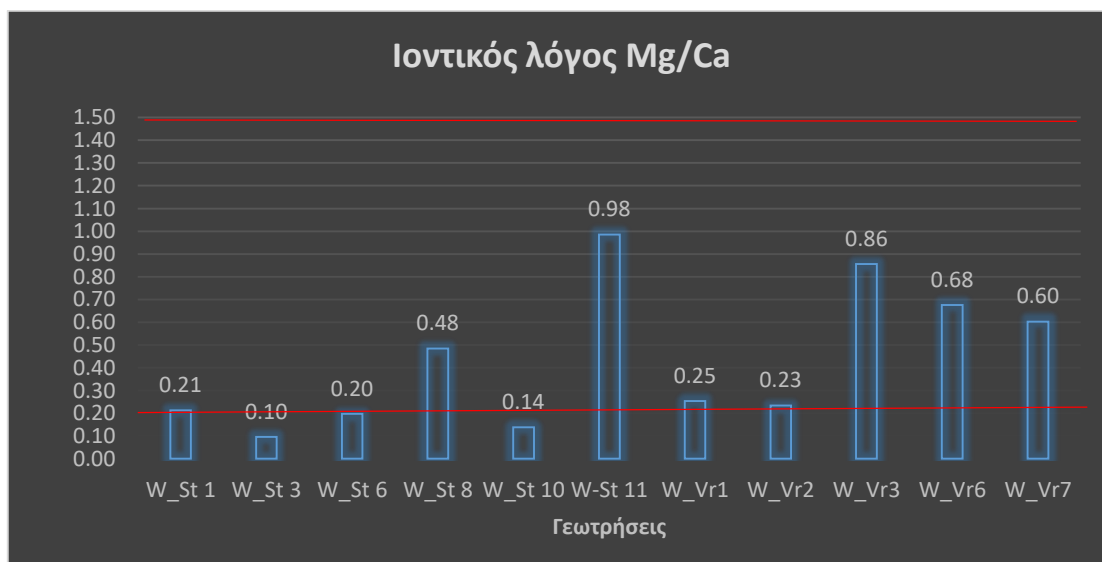
$Mg^{2+}/Ca^{2+}=0.5-0.7$ ασβεστολιθικά πετρώματα (ιζηματογενή και μεταμορφωμένα)

$Mg^{2+}/Ca^{2+}=0.7-0.9$ δολομιτικά πετρώματα

$Mg^{2+}/Ca^{2+}>0.9$ σχηματισμοί πλούσιοι σε Mg^{2+} . Στους οφιολιθικούς σχηματισμούς οι τιμές συνήθως είναι μεγαλύτερες της μονάδας (Σούλιος, 2006).

Ο λόγος Mg^{2+}/Ca^{2+} στο θαλασσινό νερό λαμβάνει τιμές 4.5-5.2 (Bear et al., 1999). Σε παράκτιους καρστικούς υδροφορείς η τιμή του λόγου τείνει προς τις δύο μονάδες, ενώ σε γλυκά νερά ο λόγος κυμαίνεται 0.2-1.5 (Βουδούρης, 2009). Σύμφωνα με τους Somay and Gemici 2008 οι τιμές άνω της μονάδας ($Mg^{2+}/Ca^{2+}>1$) θεωρούνται ένδειξη υφαλμύρισης, ενώ οι τιμές κάτω της μονάδας ($Mg^{2+}/Ca^{2+} <1$) ανήκουν σε νερά που δεν έχουν επηρεαστεί.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.8 όλες οι γεωτρήσεις βρίσκονται εντός του εύρους των γλυκών νερών με εξαίρεση τις γεωτρήσεις W_St3 και W_St10 που οι τιμές τους είναι <0.2 .



Σχήμα 7.8: Διάγραμμα ιοντικού λόγου Mg^{2+}/Ca^{2+} .

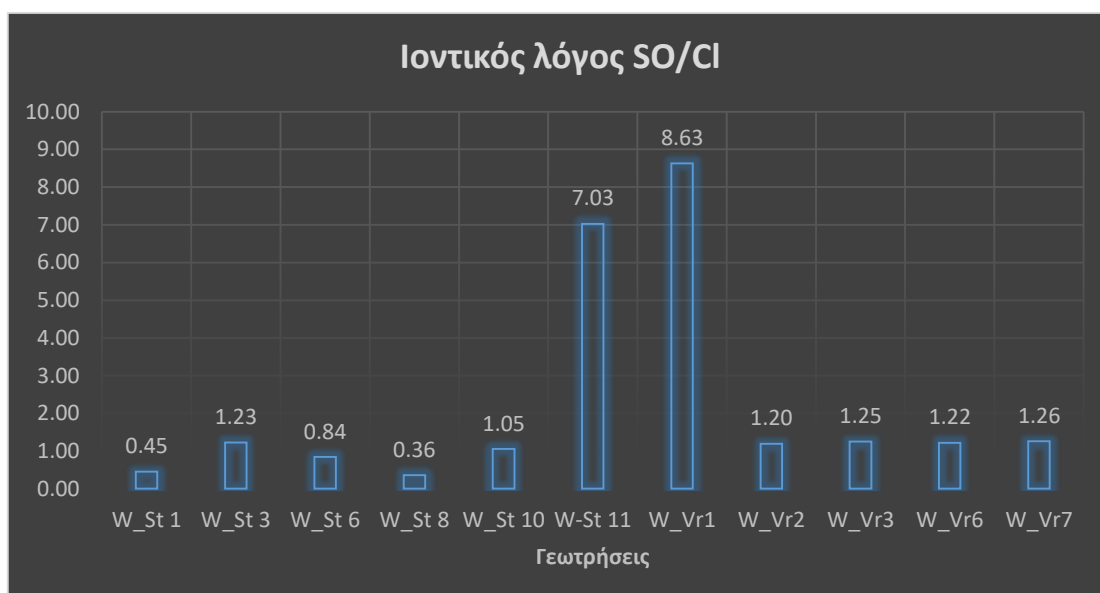
Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

7.4.2 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$

Όταν ο λόγος $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.05-0.1 είναι ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ στην περίπτωση που υπερβαίνει το εύρος αυτό σημαίνει ρύπανση ανθρωπογενούς δραστηριότητας και πιο πιθανό από σηπτικές δεξαμενές (Lee and Song, 2006).

Οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 0.36 έως 8.63. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.9 στις περισσότερες γεωτρήσεις ο λόγος είναι περίπου στη μονάδα. Εξαίρεση αποτελούν οι γεωτρήσεις W_St11 και W_Vr1 με τους υψηλότερους ιοντικούς λόγους γεγονός που τις καθιστά ύποπτες ανθρωπογενούς ρύπανσης. Επιπλέον τα νερά του υπόγειου υδροφορέα χαρακτηρίζονται χλωροθειούχα ως θειοχλωρούχα με εξαίρεση τις γεωτρήσεις W_St11 και W_Vr1 όπου χαρακτηρίζονται θειούχα.



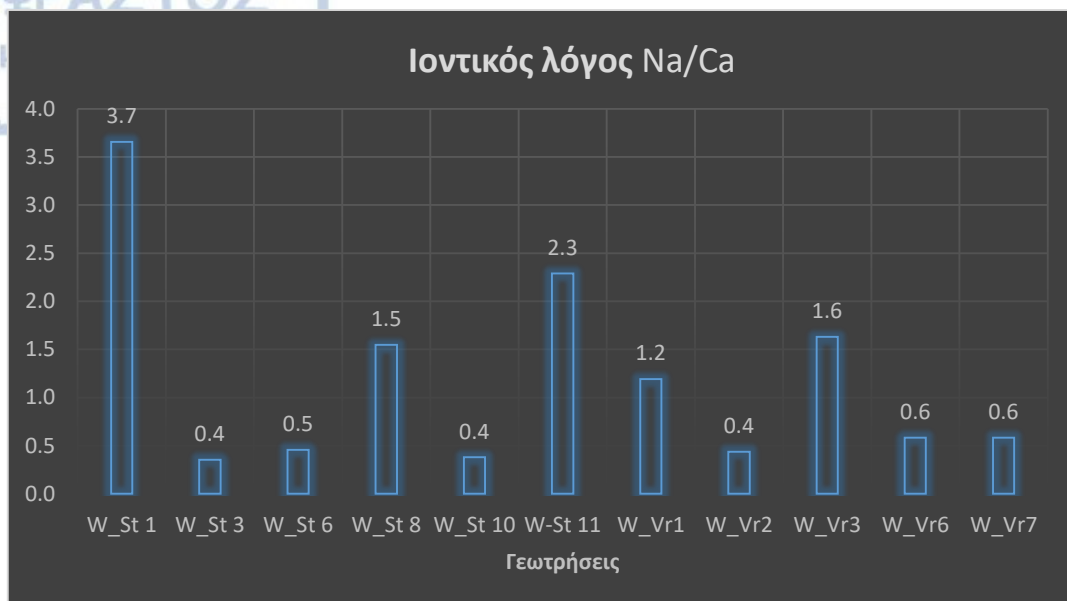
Σχήμα 7.9: Διάγραμμα ιοντικού λόγου $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$.

7.4.3 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$

Ο λόγος $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 22.5, ενώ στα γλυκά νερά 1.7 συνεπώς εάν οι τιμές είναι $\ll 22.5$ τότε ο εμπλουτισμός με Ca είναι αποτέλεσμα ιοντοανταλλαγής με Na που συμβαίνει κατά τη διάρκεια της μείξης θαλασσινού – γλυκού νερού (Mtoni et al., 2013), ενώ δεν αποκλείεται ο εμπλουτισμός αυτός να είναι αποτέλεσμα αποσάθρωσης Ca-πλαγιοκλάστων (ανορθίτης).

Ο ιοντικός λόγος $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ σε όλες τις γεωτρήσεις είναι < 1.7 . Εξαίρεση την γεώτρηση W_St1 και W_St11 όπου όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος από το όριο των 1.7 τόσο πιο πιθανό είναι είτε να υφίσταται το φαινόμενο της υφαλμύρισης είτε να υπάρχει εμπλουτισμός από την αποσάθρωση του ανορθίτη στον οποίο είναι πλούσιος ο βιοτιτικός γνεύσιος που περιβάλλει τον παράκτιο υδροφορέα (Σχήμα 7.10).

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

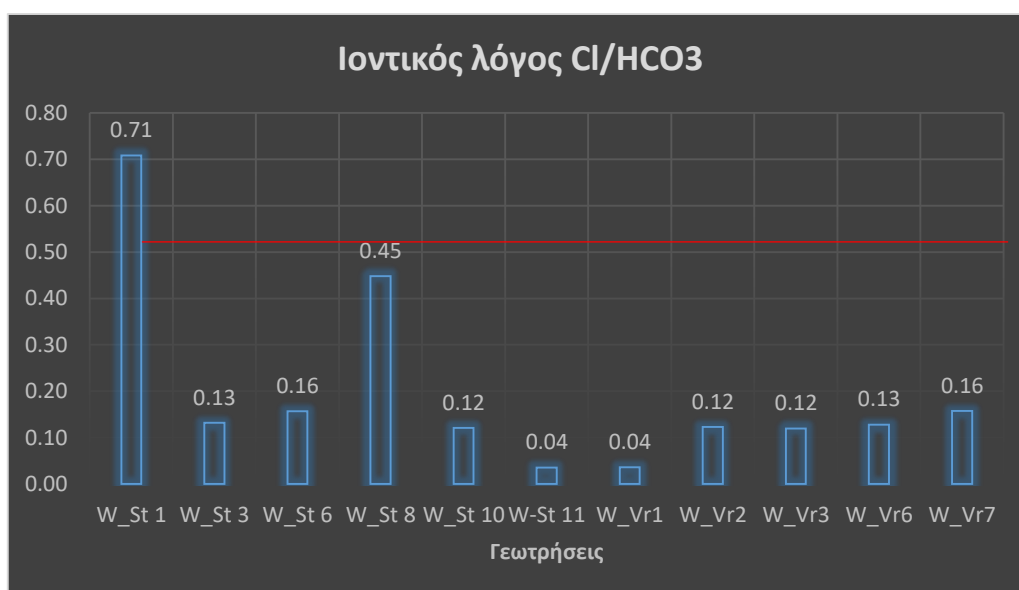


Σχήμα 7.10: Διάγραμμα ιοντικού λόγου $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$.

7.4.4 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$

Άλλος ένας σημαντικός δείκτης υφαλμύρισης είναι $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$. Σύμφωνα λοιπόν με τους Mtoni et al. (2013) όταν ο λόγος είναι >6.6 τα νερά είναι πολύ επηρεασμένα από τη θαλάσσια διείσδυση, όταν οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 0.5– 6.6 είναι ελαφρώς επηρεασμένα ενώ για τιμές <0.5 το νερό χαρακτηρίζεται ως μη επηρεασμένο.

Οι τιμές του λόγου κυμαίνονται σχεδόν σε όλες τις γεωτρήσεις <0.5 . Εξάιρεση και πάλι η γεώτρηση W_St1 που η τιμή του λόγου τη καθιστά ελαφρώς επηρεασμένη από το φαινόμενο της υφαλμύρισης (σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ιοντικού λόγου $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

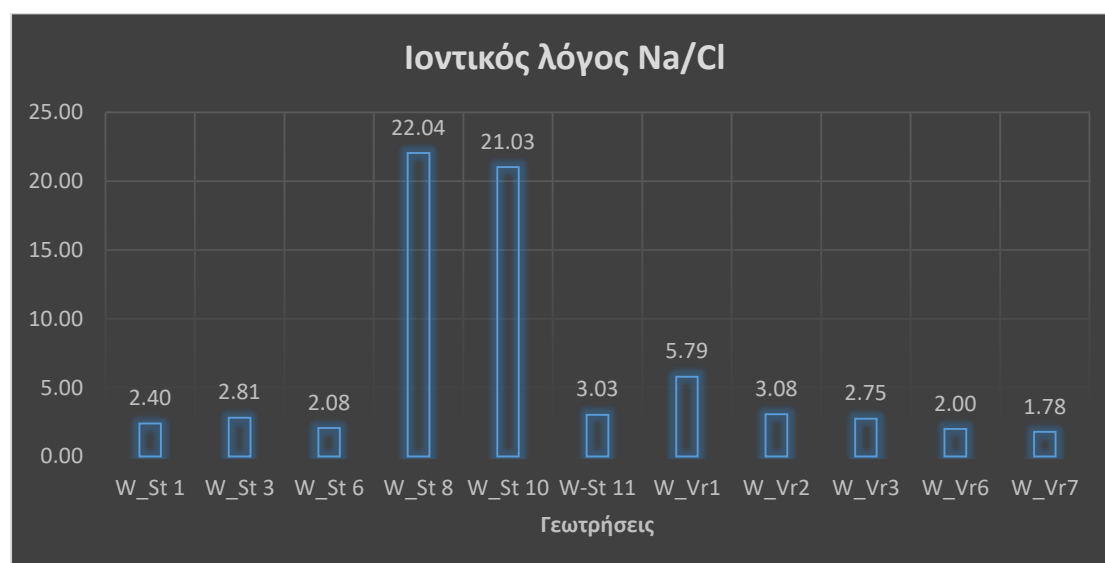
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

7.4.5 Na^+/Cl^-

Ο ιοντικός λόγος $\text{Na}^+/\text{Cl}^- \approx 0.86 \pm 10\%$ παραμένει σταθερός τόσο στο νερό της βροχής, όσο και στο θαλασσινό νερό (Βουδούρης, 2009).

Τιμές του ιοντικού λόγου $\text{Na}^+/\text{Cl}^- > 1$ μπορεί να είναι ένδειξη παρουσίας υδροφορέων αλκαλικών πυριγενών ή μεταμορφωμένων πετρωμάτων ή αποσάθρωσης Na-αστρίων (Βουδούρης 2009), ενώ μπορεί να είναι και ένδειξη ρύπανσης από αστικά απόβλητα (Bear et al., 1999, Moujabber et al., 2006, Vengosh et al., 1999). Δηλ. τιμές του λόγου $\text{Na}/\text{Cl} > 1$ σε χαμηλές τιμές αλατότητας υποδηλώνει ότι το μετεωρικό NaCl δεν είναι μόνη κύρια πηγή προέλευσης νατρίου.

Τιμές $\text{Na}^+/\text{Cl}^- < 1$ είναι ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης (Βουδούρης, 2009, Bear et al., 1999, Vengosh et al., 1999) μπορεί όμως να σχετίζεται και με ιοντοανταλλαγή Na^+ σε αργιλικά (Βουδούρης, 2009). Με εξαίρεση τις γεωτρήσεις W_St8 και W_St10 οι υπόλοιπες γεωτρήσεις έχουν μια μέση τιμή του λόγου 2.86 meq/L (Σχήμα 7.12).



Σχήμα 7.12: Διάγραμμα ιοντικού λόγου Na^+/Cl^- .

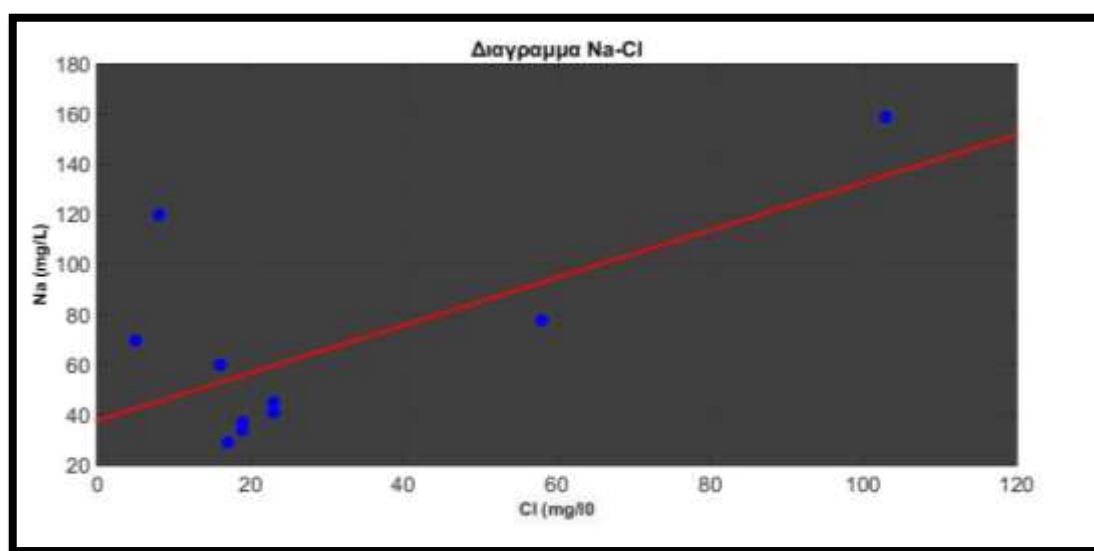
Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα του ιοντικού λόγου Na^+/Cl^- (σχήμα 7.12) οι συγκεντρώσεις του Na^+ είναι μεγαλύτερες από αυτές του Cl^- (τιμές του λόγου > 1). Σύμφωνα με τον Hounslow (1995) αυτό είναι ένδειξη ότι η προέλευση του Na^+ είναι είτε ο αλβίτης (Na-πλαγιόκλαστο), είτε αποτέλεσμα ιοντοανταλλαγής με Na-μοντμοριλλονίτη (προϊόν αποσάθρωσης Na-ορυκτών όπως ο αλβίτης). Σύμφωνα με τον χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (φύλλο Σταυρός) μπορεί ο βιοτιτικός γενεύσιος της περιοχής να είναι πλούσιος σε ανορθίτη όμως υπάρχουν άφθονες κοίτες και φλέβες απλιτών και

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

πηγματιτικών σωμάτων, όπου ο αλβίτης ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) συμμετέχει στην κύρια ορυκτολογική τους σύσταση. Συνεπώς μπορεί οι συγκεντρώσεις του Na^+ όλων των δειγμάτων να οφείλονται στην ιοντοανταλλαγή όμως ο πολύ μεγάλος ιοντικός λόγος Na^+/Cl^- των γεωτρήσεων W_St8 και W_St10 θα πρέπει να ελεγχθούν για τυχόν ρύπανση από αστικά απόβλητα.

Από το διάγραμμα συσχέτισης Na^+-Cl^- (Σχήμα 7.13) προκύπτει ότι η συσχέτιση δεν είναι στατιστικά σημαντική (συντελεστής γραμμικής είναι 0,65), που αντικατοπτρίζει τις διαφορετικές διεργασίες που καθορίζουν τη συγκέντρωση των παραπάνω ιόντων.



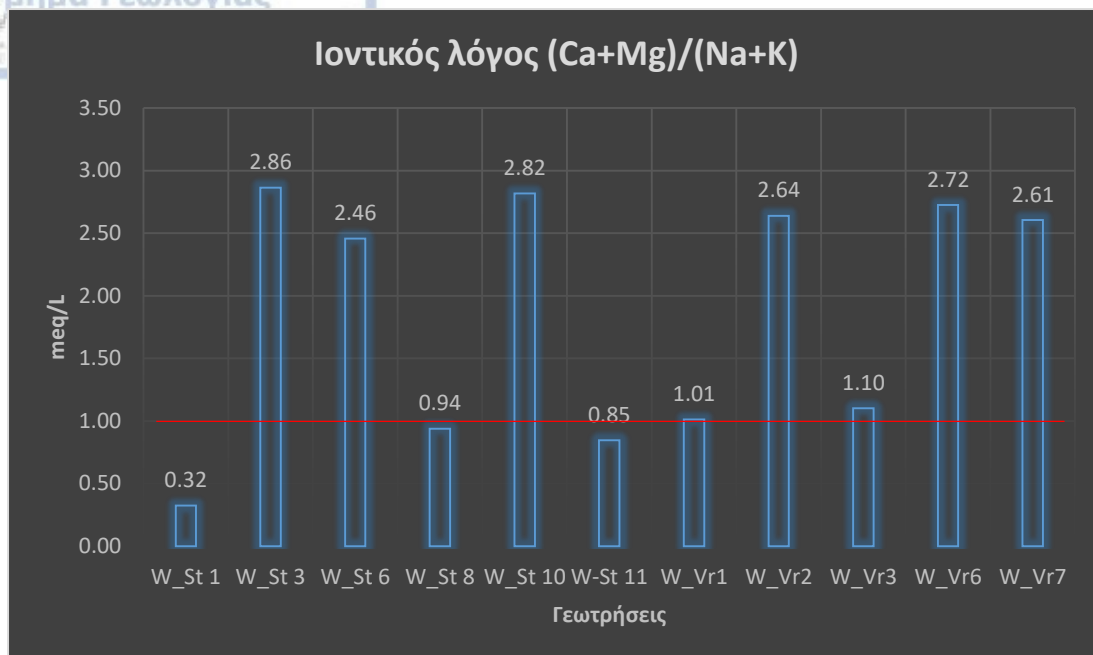
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα συσχέτισης Na^+-Cl^-

7.4.6 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+)$

Όταν οι τιμές $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+)>1$ αποτελούν ένδειξη ότι ο υδροφορέας βρίσκεται σε περιοχή εμπλουτισμού, ενώ όταν $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^++\text{K}^+)<1$ δείχνει ότι βρισκόμαστε σε περιοχή εκφόρτισης του υδροφορέα.

Από το Σχήμα 7.14 προκύπτει ότι οι γεωτρήσεις W_St1, W_St8 και W_St11 βρίσκονται σε σημείο εκφόρτισης ενώ για όλες τις υπόλοιπες γεωτρήσεις ότι βρίσκονται σε σημείο εμπλουτισμού.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.14: Διάγραμμα ιοντικού λόγου $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(Na^{+}+K^{+})$.

7.4.7 Na^{+}/K^{+}

Ο ιοντικός λόγος μπορεί να μας δώσει πληροφορίες με τα αν το νερό είναι βρόχινο, θαλασσινό ή αν υπάρχει περιοχή εμπλουτισμού (Σούλιος, 2006).

$Na^{+}/K^{+} = 47$, θαλασσινό νερό

$Na^{+}/K^{+} = 10$, βρόχινο νερό

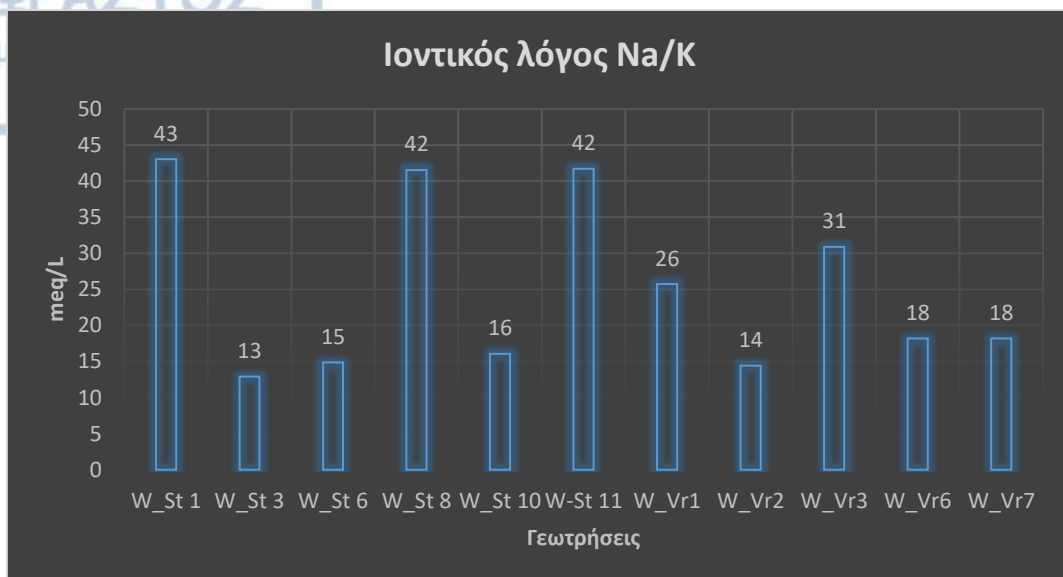
$Na^{+}/K^{+} = 15-25$, νερό σε περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων

$Na^{+}/K^{+} = 50-70$, νερό σε κατάντη τμήμα του υδροφορέα σε σχέση με την διεύθυνση ροής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ιοντικού λόγου (Σχήμα 7.15) οι γεωτρήσεις W_St6, W_St10, W_Vr6&7 βρίσκονται σε περιοχή εμπλουτισμού, όπως έδειξε και ο ιοντικός λόγος $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(Na^{+}+K^{+})$.

Επιπλέον, το κάλιο απομακρύνεται πολύ πιο εύκολα από το υπόγειο νερό λόγω της απορρόφησής του από το ριζικό σύστημα των φυτών αλλά και μέσω της ιοντοανταλλαγής από ιόντα της αργίλου (Hounslow, 1995).

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 7.15: Διάγραμμα ιοντικού λόγου Na^+/K^+ .

Πίνακας 7.9: Ιοντικοί λόγοι χημικών στοιχείων της περιοχής Βρασνών-Σταυρού.

Πορώδης Υδροφορέας							
Γεώτρηση	Mg/Ca	Cl/HCO ₃	Na/Cl	(Ca+Mg)/ (Na+K)	Na/K	SO ₄ /Cl	Na/Ca
W_St 1	0.21	0.71	2.40	0.32	43	0.45	3.7
W_St 3	0.10	0.13	2.81	2.86	13	1.23	0.4
W_St 8	0.48	0.45	22.04	0.94	42	0.36	1.5
W-St 11	0.98	0.04	3.03	0.85	42	7.03	2.3
W_Vr1	0.25	0.04	5.79	1.01	26	8.63	1.2
W_Vr2	0.23	0.12	3.08	2.64	14	1.20	0.4
W_Vr3	0.86	0.12	2.75	1.10	31	1.25	1.6
W_Vr6	0.68	0.13	2.00	2.72	18	1.22	0.6
W_Vr7	0.60	0.16	1.78	2.61	18	1.26	0.6
Διαρρηγμένος Υδροφορέας							
Γεώτρηση	Mg/Ca	Cl/HCO ₃	Na/Cl	(Ca+Mg)/ (Na+K)	Na/K	SO ₄ /Cl	Na/Ca
W_St 6	0.20	0.16	2.08	2.46	15	0.84	0.5
Καρστικός Υδροφορέας							
Γεώτρηση	Mg/Ca	Cl/HCO ₃	Na/Cl	(Ca+Mg)/ (Na+K)	Na/K	SO ₄ /Cl	Na/Ca
W_St 10	0.14	0.12	21.03	2.82	16	1.05	0.4

7.5. ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στην περιοχή Βρασνών- Σταυρού οι μελέτες που έχουν εκπονηθεί είναι αποσπασματικές και δεν περιλαμβάνουν όλες τις γεωτρήσεις της παρούσας εργασίας

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

και επιπλέον έγιναν στο τέλος της υγρής περιόδου. Συνεπώς δεν μπορεί να γίνει επακριβώς σύγκριση των υδροχημικών αναλύσεων στο σύνολο του παράκτιου υδροφορέα παρά μόνο σε επιμέρους γεωτρήσεις.

Την περίοδο 2005-2006 πραγματοποιήθηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε. το έργο «Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπόγειων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας (κ.ε. 7.3.2.1)». Στον Πίνακα 7.10 καταγράφονται τα αποτελέσματα που αφορούσαν την Υδρογεωλογική Μελέτη των Υδατικών Διαμερισμάτων Κεντρικής και Ανατολικής Μακεδονίας που αντιστοιχούν στις γεωτρήσεις της παρούσας μελέτης.

Πίνακα 7.10: Μετρήσεις Ι.Γ.Μ.Ε. 2005-2006

α/α	Γεώτρηση	pH	E.C.	Cl	SO ₄	NO ₃	Ημ/νια λήψης
1	W_St 1	8.78	654	44	-	-	6 ^{ος} /2005
2	W_St 3	7.82	498	28.4	-	-	7 ^{ος} /2005
3	W_St 10	8.02	571	26.5	-	-	2 ^{ος} /2006
4	W_Vr1	7.53	539	29.9	82	5	6 ^{ος} /2005
5	W_Vr2	7.13	693	35	30	5	6 ^{ος} /2005
6	W_Vr3	7.38	809	22.5	46	5	6 ^{ος} /2005
7	W_Vr4	7.51	916	17.3	15	5	6 ^{ος} /2005
8	W_Vr5	7.04	780	29.5	39	18.9	6 ^{ος} /2005
9	W_Vr6	7.47	527	25.7	29	11	6 ^{ος} /2005
10	W_Vr7	8.31	563	17.3	50	5	6 ^{ος} /2005

Κατ' εφαρμογή του Ν.3199/2003 και του ΠΔ 51/2007, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της οδηγίας 60/2000/ΕΚ, η Γενική Γραμματεία Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής αλλαγής προχώρησε στην κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Υδατικών Διαμερισμάτων της χώρας. Το Σχέδιο Διαχείρισης του Υ.Δ. Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (GR11) χρησιμοποίησε τις προγενέστερες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε κατά το 2005-2006 στην περιοχή των Βρασνών, ενώ το Σχέδιο Διαχείρισης του Υ.Δ. Κεντρικής Μακεδονίας (GR10) δεν πραγματοποίησε καμία μέτρηση στην περιοχή του Σταυρού.

Τέλος, σύμφωνα με το «Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας» που ολοκληρώθηκε 2014 «Φαινόμενα υφαλμύρισης καταγράφονται κατά θέσεις σχεδόν σε όλη την παράκτια ζώνη με εξαίρεση την Ανατολική Χαλκιδική.»



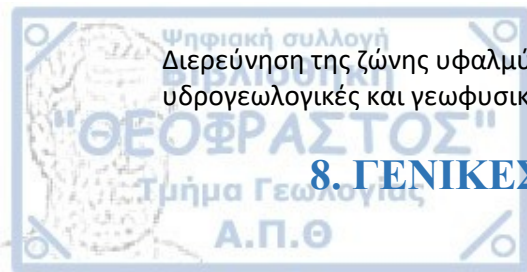
Σχήμα 7.16: Σύγκριση μεταβολής συγκέντρωσης χλωριόντων (mg/L) για τα έτη 2005-2017.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.16 οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων στην περιοχή των Βρασνών παρουσιάζει αισθητή μείωση. Στην περιοχή του Σταυρού δεν υπάρχουν στοιχεία για όλες τις γεωτρήσεις για το έτος 2005, αισθητή είναι όμως η αύξηση της συγκέντρωσης στη γεώτρηση W_St1 από 44 σε 102 mg/L.



Σχήμα 7.17: Σύγκριση μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα έτη 2005-2017.

Στο Σχήμα 7.17 η σύγκριση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τα έτη 2005 και 2017 δείχνει μια αυξητική τάση. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στη γεώτρηση W_St1, όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα από 654 αυξήθηκε σε 980 µS/cm.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Μία από τις βασικές φυσικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών που σχετίζεται με το υπόγειο νερό είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση και για τον λόγο αυτό οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι έχουν ευρεία εφαρμογή στην υδρογεωλογική έρευνα (Van Dam, 1976, Vargemezis et al., 2010).

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των γεωηλεκτρικών μεθόδων με κύριους στόχους:

- Την χαρτογράφηση των υδροφόρων σχηματισμών και
- Τον εντοπισμό πιθανών ζωνών υφαλμύρισης.

8.2 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει τους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm (σχέση 8.1) μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση R σε ομογενές και ισότροπο μέσο ή οποία όμως δε λαμβάνει υπόψη της διαστάσεις του μέσου. Έτσι εισάγεται ο όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (σχέση 8.2) με μονάδα μέτρησης Ohmm

$$V = \frac{R}{I} \quad (\text{σχέση 8.1})$$

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (\text{σχέση 8.2})$$

όπου S = εμβαδόν διατομής αγωγού (m^2) και

L = μήκος αγωγού (m)

Η γη όμως, πόσο μάλλον ο ανώτερος φλοιός, δεν είναι ούτε ισότροπος, ούτε ομοιογενής.

8.2.1 Παράγοντες επηρεασμού της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη γίνεται με τρεις τρόπους:

A) Ηλεκτρολυτική Αγωγιμότητα

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών που είναι διαλυμένα μέσα στο νερό και πληροί τους πόρους των γεωλογικών σχηματισμών.

B) Ηλεκτρονική Αγωγιμότητα

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην κρυσταλλική δομή πετρωμάτων και ορυκτών (κυρίως μεταλλικών).

Γ) Διηλεκτρική «Αγωγιμότητα»

Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί κυκλική κίνηση στα ιόντα της κρυσταλλικής δομής κάποιων μονωτών. Η κίνηση αυτή προκαλεί δευτερεύον εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα είναι ο κύριος παράγοντας διάδοσης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Από αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτή η πολυποικιλότητα των παραγόντων που επηρεάζουν και το μεγάλο εύρος τιμών που αντιστοιχούν στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση κάθε σχηματισμού:

- υδρολογικές-υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής,
- η χημική σύσταση του νερού,
- οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του υπεδάφους,
- η τεκτονική (ρήγματα, διαρρήξεις, διακλάσεις),
- η λιθολογία (παρουσία βραχωδών-εδαφικών σχηματισμών, πορώδεις) της περιοχής,
- γεωλογική ηλικία των σχηματισμών.

Ο εμπειρικός τύπος γνωστός ως Νόμος του Archie (σχέση 8.3) καθιστά σαφέστατη τη συσχέτιση, μεταξύ της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και του πορώδους ενός σχηματισμού:

$$\rho = \alpha * \rho_v * \varphi^{-m} \quad (\text{σχέση 8.3})$$

όπου:

ρ_v = η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων

φ = το πορώδες σχηματισμού

α, m = σταθερές

Είναι εμφανές ότι από τον νόμο του Archie η ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται τόσο από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού (πορώδες) όσο και από τα χαρακτηριστικά του νερού (αγωγιμότητα).

Ομοίως και η μαθηματική σχέση 8.4 που συνδέει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση με την θερμοκρασία:

$$\rho_s = \frac{\rho_{18}}{1 + a_s (\theta - 18^\circ)} \quad (\text{σχέση 8.4})$$

όπου:

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

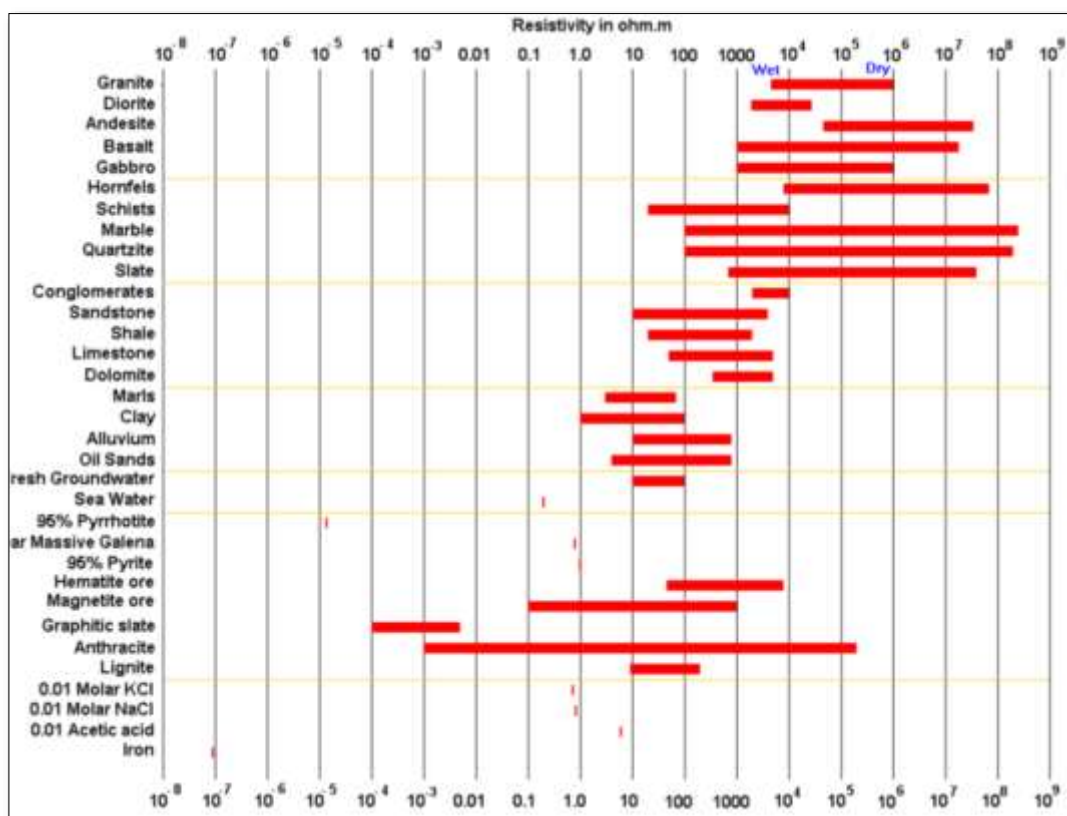
ρ_0 =ειδική αντίσταση σε Θ °C

ρ_{18} =ειδική αντίσταση σε 18 °C

α_θ =θερμικός συντελεστής ειδ. αντίστασης (περ. 0,025/°C)

Όπως φαίνεται και εδώ η σχέση είναι αντιστρόφως ανάλογη καθώς και η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και η άνοδος της θερμοκρασίας συνδέονται με την κίνηση των ηλεκτρονίων. Συνεπώς ένα μέσο που είναι καλός αγωγός της θερμότητας θα είναι και καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και κατ' επέκταση θα έχει και πολύ χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.1 η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του χαλαζίτη κυμαίνεται πάνω από 10^8 Ohm.m όταν πρόκειται για άρρηκτο βράχο και κατά συνέπεια πρακτικά μηδενικό πορώδες άρα χωρίς υδροφορία ενώ έως 100 Ohmm όταν είναι διαρρηγμένα και κατ' επέκταση υδροφόρα.



Σχήμα 8.1: τιμές ειδικής αντίστασης σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. (Keller and Frischknecht, 1966; Daniels and Alberty, 1966; Telford et al., 1990)

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης είναι μία από τις μεθόδους των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων κατά την οποία δημιουργείται τεχνητό ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο έδαφος.

Κατά την μέθοδο αυτή εισάγεται μέσω δυο ηλεκτροδίων ρεύμα που παράγεται με τεχνητό τρόπο και μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο άλλων ηλεκτροδίων που επίσης τοποθετούνται μέσα στο έδαφος.

8.3.1 Φαινόμενη Ειδική Αντίσταση

Η ηλεκτρική αντίσταση ως φυσικό μέγεθος, όπως προαναφέρθηκε, δεν λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις των σχηματισμών και την πολυπλοκότητα της δομής του φλοιού της γης αντίστοιχα και μπορούν να υπολογιστούν μόνο σε ομογενές και ισότροπο μέσο.

Ο λόγος V/I που είναι η αντίσταση R δεν λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις των αγωγών. Η σχέση $\rho = R \cdot K$ υπολογίζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση που παίρνει υπόψη τις διαστάσεις και μας δίνει την αντίσταση του αγωγού με μοναδιαία διατομή και μήκους ενός μέτρου. Όταν όμως το ρεύμα διαδίδεται σε πολλά γεωλογικά στρώματα η τιμή που υπολογίζουμε δεν αντιστοιχεί σε καμία από τις τιμές που έχει το κάθε ένα διαφορετικό στρώμα, αλλά μας δίνει μία 'ισοδύναμη' με αυτή που θα μετρούσαμε αν είχαμε ΕΝΑ ομογενές και ισότροπο μέσο. Αυτή η τιμή είναι η φαινόμενη αντίσταση που υπολογίζουμε αρχικά με την σχέση αυτή.

Λόγω λοιπόν της ανισοτροπίας αυτής η αντίσταση μεταβάλλεται τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα. Για το λόγο αυτό εισήχθη ένα μέγεθος *μη φυσικώς υπαρκτό*, αυτό της **φαινόμενης ειδικής αντίστασης (ρ_a)** η οποία εξαρτάται από την μεταξύ των ηλεκτροδίων απόσταση και διάταξη και που ονομάζεται **γεωμετρικός παράγοντας (K)** (Παπαζάχος, 1996) (σχέση 8.5).

$$\rho_a = R \cdot K \quad (\text{σχέση 8.5})$$

Μεγάλα εύρη τιμών φαινόμενης ειδικής αντίστασης αντιστοιχούν σε διαφορετικούς σχηματισμούς (Kura et al., 2014, Vargemezis and Fikos, 2010, Dahlin and Owen, 1998) και έτσι δίνεται η δυνατότητα έμμεσου προσδιορισμού της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους η εγκυρότητα της οποίας όμως διασφαλίζεται μόνο με ταυτόχρονη χρήση της γνώσης της γεωλογίας της περιοχής και επιπρόσθετων πληροφοριών που προκύπτουν από λιθοστρωματογραφικές τομές.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8.3.2 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων όπου η καθεμία καθορίζεται από διαφορετικό **γεωμετρικό παράγοντα (K)**, αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια εισαγωγής ρεύματος A (+) και B(-) όπου σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα ροής ρεύματος μέσα στη γη και δύο ηλεκτρόδια μέτρησης δυναμικού M και N. Τα ηλεκτρόδια παρατάσσονται σε ευθεία γραμμή. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι οι εξής:

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N βρίσκονται ανάμεσα των ηλεκτροδίων ρεύματος A,B και οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι ίσες με a και με γεωμετρικό παράγοντα:

$$K = 2\pi a$$

Οπότε η φαινόμενη αντίσταση η εξίσωση είναι:

$$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

Διάταξη Schlumberger: Η διάταξη των ηλεκτροδίων είναι σχεδόν ίδια με αυτή της Wenner αλλά τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τοποθετημένα σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού. Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι ίση $2L$, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι $2a$ και ισχύει $L \gg a$. Ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης είναι:

$$K = \frac{\pi L^2}{2a}$$

και η φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_a = \left(\frac{\pi L^2}{2a} * \frac{\Delta V}{I} \right)$$

Διάταξη Διπόλου - Διπόλου: Στην διάταξη Διπόλου-Διπόλου τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι πολύ απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Η απόσταση μεταξύ των δύο ζεύγων ηλεκτροδίων είναι ίση με a , ενώ η απόσταση μεταξύ τους ισούται με na . Ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης είναι:

$$K = \pi n(n+1)(n+2)a$$

και φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V}{I}$$

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Διάταξη Πόλου - Διπόλου: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται ανάμεσα των ηλεκτροδίων ρεύματος, αλλά ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος βρίσκεται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από τα άλλα τρία. Έτσι για παράδειγμα εάν ηλεκτρόδιο ρεύματος B είναι το πιο απομακρυσμένο, οι αποστάσεις του B από τα ηλεκτρόδια M και N θεωρούνται άπειρες. Αν η απόσταση MN ισούται με a και η απόσταση AM με na , τότε ο γεωμετρικός παράγοντας είναι:

$$K=2\pi n(n+1)a$$

Και συνεπώς η φαινόμενη ειδική αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)a \frac{\Delta V}{I}$$

Διάταξη Πόλου-Πόλου: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος, για παράδειγμα το B, τοποθετείται σε άπειρη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια όπως επίσης και ένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, για παράδειγμα το N. Με αυτό τον τρόπο οι αποστάσεις AN, BM, BN θεωρούνται άπειρες. Αν $AM=a$, ο γεωμετρικός παράγοντας γίνεται $K=\frac{1}{a}$, δηλαδή ίδιος με αυτόν της διάταξης Wenner. Συνεπώς τόσο ο γεωμετρικός παράγοντας όσο και η φαινόμενη ειδική αντίσταση και η φαινόμενη αντίσταση δίνονται από τις ίδιες σχέσεις:

$$K=2\pi a$$

$$\rho_a = 2\pi a \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

Στο σημείο αυτό σκόπιμο θα ήταν να αναφέρουμε την διάταξη **Multiple Gradient** καθώς έγινε χρήση της στην παρούσα εργασία. Όπως και στις περισσότερες από τις προηγούμενες διατάξεις έτσι και εδώ τα ηλεκτρόδια του δυναμικού βρίσκονται ενδιάμεσα από αυτά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του δυναμικού είναι a ενώ η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος είναι $(s+2)a$. Ο συντελεστής απόστασης s είναι ένας ακέραιος αριθμός και καθορίζει τον μέγιστο αριθμό μετρήσεων δυναμικού για ρεύμα ορισμένης εντάσεως. Η σχετική απόσταση του διπόλου του δυναμικού από το πλησιέστερο ηλεκτρόδιο ρεύματος καθορίζεται από τον παράγοντα n , ενώ ο συντελεστής μεσοδιαστήματος m ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του μεσοδιαστήματος του διπόλου του δυναμικού και του μεσοδιαστήματος των ηλεκτροδίων ρεύματος. Ο γεωμετρικός παράγοντας της διάταξης είναι (Dahlin and Zhou B, 2006, Aizebeokhai and Oyeyemi, 2014):

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

$$K = \frac{2\pi a n(n+1)(s+2-n)(s+1-n)}{(s+2)(s-2n+1)}$$

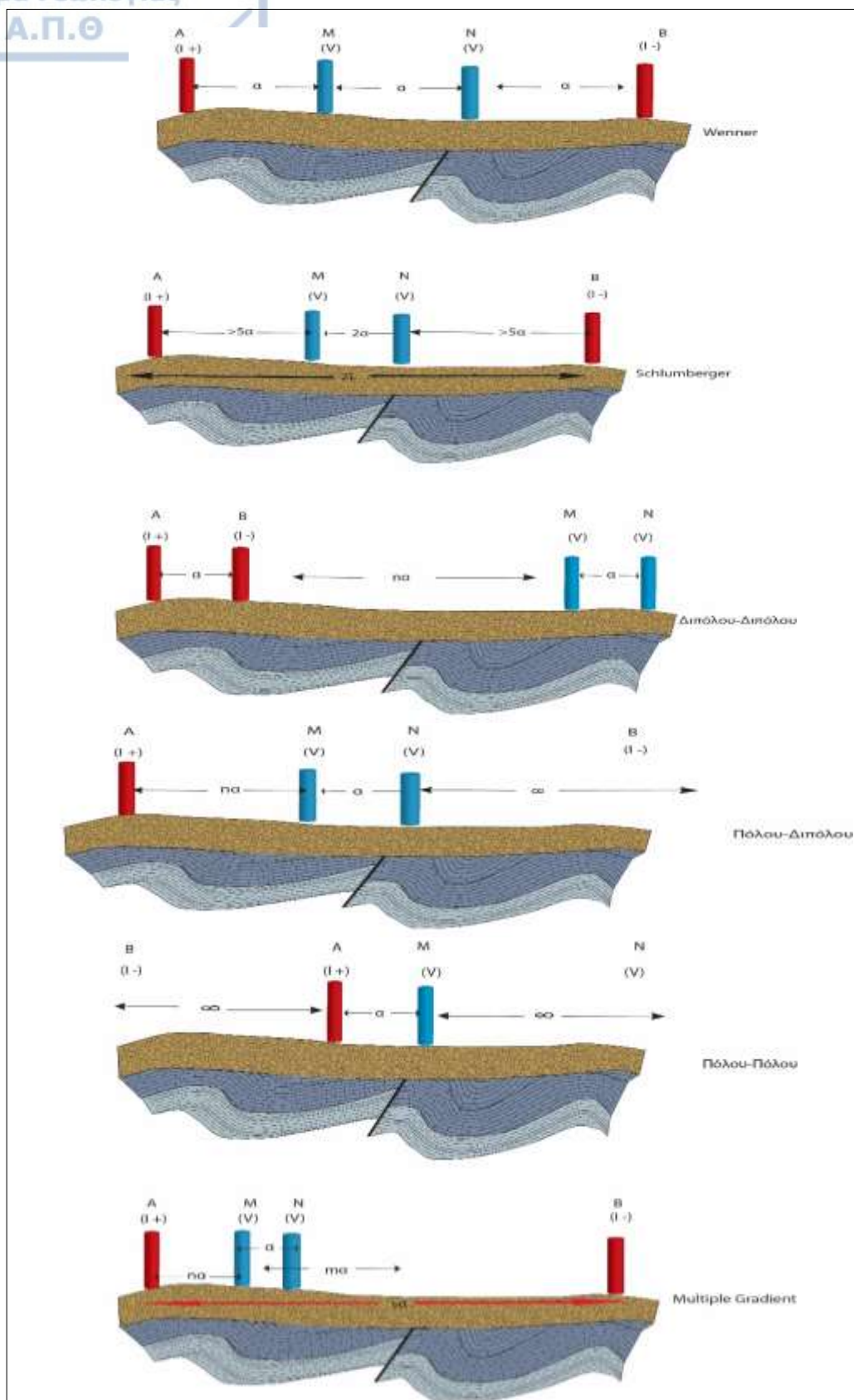
Και αντιστοίχως η φαινόμενη ειδική αντίσταση:

$$\rho_a = \frac{2\pi a n(n+1)(s+2-n)(s+1-n)}{(s+2)(s-2n+1)} \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

Η διάταξη Multiple Gradient μπορεί να θεωρηθεί ένας συνδυασμός των διατάξεων Πόλου – Διπόλου και Schlumberger: όταν το δίπολο του δυναμικού βρίσκεται στη μέση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του ρεύματος τότε η διάταξη αντικατοπτρίζει τη διάταξη Schlumberger, ενώ όταν το δίπολο του δυναμικού βρίσκεται πλησίον ενός εκ των δύο ηλεκτροδίων ρεύματος τότε συμπεριφέρεται ως διάταξη Πόλου – Διπόλου.

Στο σχήμα 8.2 παρατίθεται σχηματική απεικόνιση των προαναφερθέντων διατάξεων αυτών.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 8.2: Σχηματική αναπαράσταση διατάξεων ηλεκτροδίων.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η επιλογή της εκάστοτε διάταξης εξαρτάται κατά πολύ από το αντικείμενο μελέτης, τους στόχους που θέλουν να επιτευχθούν, τη τοπική γεωλογία, της ευαισθησία της κάθε διάταξης στις πλευρικές ή/και τις κατακόρυφες με το βάθος μεταβολές της αντίστασης του υπεδάφους. Άλλοι παράγοντες που συνυπολογίζονται είναι το βάθος το οποίο χρειάζεται να φτάσει η διασκόπηση, η ισχύς του σήματος, η παρεμβολή θορύβων και φυσικά η ευκολία με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η κάθε διάταξη από πρακτική άποψη (διαθέσιμος χρόνος, διαθέσιμο εργατικό δυναμικό).

9.3.4 ΒΑΘΟΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Το βάθος της διασκόπησης στο οποίο μια γεωφυσική έρευνα θέλει να προσεγγίσει αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων.

Ο καθορισμός ενός ακριβούς βάθους διασκόπησης δεν είναι δυνατός για δυο κύριους λόγους :

A) οι θεωρητικές τιμές που μπορούν να υπολογιστούν για το βάθος διασκόπησης αφορούν ομοιογενή γη πράγμα που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

B) οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης που λαμβάνονται είναι το αποτέλεσμα μιας μεταβλητής συνεισφοράς από ποικίλα βάθη, συνεπώς δεν υπάρχει κάποια μέτρηση που να αντιστοιχεί σε κάποιο συγκεκριμένο βάθος.

Η θεωρητική προσέγγιση του βάθους διασκόπησης προτάθηκε από τους Roy and Apparao (1970). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή το βάθος το οποίο μπορεί να προσεγγίσει μια διάταξη ορίζεται συνοπτικά στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Βάθος Διασκόπησης Διατάξεων κατά Roy and Apparao (1970).

Διάταξη	Βάθος Διασκόπησης (κατά Roy and Apparao 1970)
Wenner	0,11 L
Schlumberger	0.125 L
Διπόλου – Διπόλου	0.195 L
Πόλου – Διπόλου	-
Πόλου - Πόλου	0.35 L

Όπου L είναι η μέγιστη διάταξη των ηλεκτροδίων (συνολικό μήκος διάταξης).

Το 1977 ο Edwards συγκρίνοντας τα αποτελέσματα εμπειρικών μεθόδων με αυτά των Roy and Apparao έκρινε πως το βάθος μιας διασκόπησης μπορεί πιο αποτελεσματικά να υπολογιστεί συνοπτικά από τον πίνακα 8.2.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Πίνακας 8.2: Βάθος Διασκόπησης Διατάξεων κατά Edwards (1977).

Διάταξη	Βάθος Διασκόπησης (κατά Edwards 1977)
Wenner	0.17 L
Schlumberger	0.195 L
Διπόλου – Διπόλου	0.25 L
Πόλου – Διπόλου	0.52 L
Πόλου - Πόλου	-

Όπου και εδώ L είναι η μέγιστη διάταξη των ηλεκτροδίων (συνολικό μήκος διάταξης).

Εν κατακλείδι, ανεξάρτητα ποια μέθοδο επιλεγθεί θα πρέπει να σημειωθεί πως οι διατάξεις Πόλου-Πόλου και Πόλου-Διπόλου μπορούν να προσεγγίσουν τα μεγαλύτερα βάθη διασκόπησης που όπως δεν μπορούν να καταγράψουν με λεπτομέρεια τις μεταβολές της αντίστασης με το βάθος. Αντιθέτως οι διατάξεις Wenner, Schlumberger και Διπόλου-Διπόλου έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα και ικανοποιητικό βάθος διασκόπησης.

8.4 ΕΙΔΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ

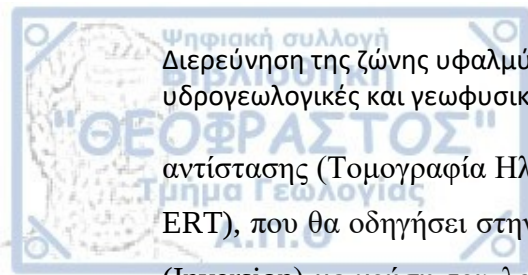
Η λήψη των μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης γίνεται συνήθως με τρεις μεθόδους:

- Βυθοσκόπηση (Sounding): όπου πραγματοποιείται μέτρηση της κατακόρυφης (με το βάθος) μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρώντας ότι η στρωματογραφία του υπεδάφους είναι οριζόντια.
- Όδευση (Profiling): όπου γίνεται μέτρηση της πλευρικής μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- Δισδιάστατη Διασκόπηση: που πρόκειται για συνδυασμό των δυο προηγούμενων μεθόδων. Με την μέθοδο αυτή κατέστη δυνατή η δημιουργία Ηλεκτρικών Τομογραφιών (Electrical Tomography) όπου εν προκειμένω χρησιμοποιήθηκε.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δισδιάστατης διασκόπησης προκειμένου να αποτυπωθούν τόσο οι πλευρικές όσο και οι κατακόρυφες μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης.

8.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Για να μπορέσουν να ερμηνευτούν το πλήθος των αντιστάσεων που λαμβάνονται και να παραχθεί η τελική δισδιάστατη απεικόνιση των μετρήσεων της ηλεκτρικής



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

αντίστασης (Τομογραφία Ηλεκτρικής Αντίστασης-Electrical Resistivity Tomography-ERT), που θα οδηγήσει στην ερμηνεία, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αντιστροφής (Inversion) με χρήση του λογισμικού DC_2DPRO (Kim, 2009). Στόχος της μεθόδου είναι η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης του οποίου η κατανομή των τιμών της αντίστασης στη περιοχή μελέτης θα ανταποκρίνονται στις μετρήσεις της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που λήφθηκαν κατά την έρευνα.

Με τη λύση του προβλήματος της αντιστροφής επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός της κατανομής των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης με τα αντίστοιχα πάχη των στρωμάτων και τα οποία θα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις ληφθείσες από το πεδίο μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης .

Για είναι όμως εφικτή η επίλυση του προβλήματος της αντιστροφής θα πρέπει πρωτίστως να γίνει η επίλυση του ευθέως προβλήματος όπου υπολογίζεται η διαφορά δυναμικού που θα παίρναμε στην επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση ενός μοντέλου του οποίου η κατανομή της αντίστασης είναι γνωστή όπως και η ένταση του ρεύματος που διοχετεύεται στο έδαφος (Tsourlos, 1995). Εφόσον υπολογισθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, τότε με πολλαπλασιασμό του γεωμετρικού παράγοντα της εκάστοτε διάταξης, προκύπτει η φαινόμενη ειδική αντίσταση.

8.6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΑΥΡΟΥ – Ν. ΒΡΑΣΝΩΝ

Ο Σταυρός και τα Νέα Βρασνά είναι περιοχές συνεχώς αναπτυσσόμενες και οι μόνιμοι κάτοικοι ασχολούνται κυρίως με τον τουρισμό και τις όποιες επιχειρηματικές δραστηριότητες συνεπάγονται από αυτόν. Η κατασκευή της προέκτασης της Εγνατίας οδού αποτέλεσε κομβικό σημείο καθώς η βελτίωση της προσβασιμότητας και της ασφάλειας του οδικού δικτύου επέφερε την αύξηση της επισκεψιμότητας. Επιπλέον οι προσπάθειες του Δήμου Βόλβης για προώθηση της περιοχής ως τουριστικό προορισμό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της προσέλευσης επισκεπτών και από χώρες των Βαλκανίων.

Η εποχιακή αύξηση του πληθυσμού, αποτέλεσμα της αύξησης του τουρισμού, έχει ως συνέπεια την αύξηση των υδρευτικών αναγκών. Ο έλεγχος της ποιότητας των αποθεμάτων λόγω υπεράντλησης, οι επί τόπου μετρήσεις καθώς και οι προγενέστερες υδροχημικές αναλύσεις της Δημόσιας Επιχείρησης Ύδρευσης Βόλβης που κατέδειξαν σε τρεις γεωτρήσεις την συγκέντρωση μαγγανίου και σιδήρου πάνω από τα επιτρεπτά όρια, οδήγησαν στην περαιτέρω μελέτη της περιοχής αυτής.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8.6.1 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής Σταυρού

Ο Σταυρός όπως έχει προαναφερθεί βρίσκεται στον ανατολικό περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης. Ανατολικά βρέχεται από τον Στρυμωνικό κόλπο από τη δυτική ως τη νότια πλευρά του περικλείεται από το όρος Στρατονικό και συγκεκριμένα από τα βουνά με την τοπική ονομασία Σουγλιάνι. Χαρακτηριστικό όριο της περιοχής είναι ο Ρήχιος ποταμός και τα Μακεδονικά Τέμπη όπου διαχωρίζουν το δυτικό όριο της περιοχής με την βόρεια πλευρά όπου βρίσκεται η οροσειρά του Βερτίσκου και τα Βρασνά. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 8.3 ο Σταυρός έχει οικοδομηθεί πάνω στα Ολοκαινικά αλλουβιακά ριπίδια και τις αλλουβιακές αποθέσεις που μεταβαίνουν στις παράκτιες αποθέσεις. Η οροσειρά του Χολομώντα, στο σημείο που περιβάλλει τον Σταυρό, αποτελείται από τους Παλαιοζωικούς βιοτιτικούς γνευσίους και τα μάρμαρα των Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής μάζας που συνιστούν κατά τύπους το υπόβαθρο της περιοχής.

Πιθανά ρήγματα έχουν χαρτογραφηθεί και αποτυπώνονται στην χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. διευθύνσεως ΑΒΑ-ΝΝΑ, ΝΑ-ΒΔ, ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ – ΝΔ και έχουν διαμορφώσει τη σημερινή μορφοτεκτονική εικόνα.

Τα διαθέσιμα στοιχεία από τις λιθολογικές τομές των υδρογεωτρήσεων δείχνουν ότι οι μεν αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από πιο λεπτόκοκκο υλικό: άργιλοι, άμμοι και χαλίκια ενώ τα αλλουβιακά ριπίδια κυριαρχούν πιο αδρόκοκκα υλικά άμμοι, χαλίκια, κροκάλες και ογκόλιθοι.



Σχήμα 8.3: Χάρτης Σταυρού (bi.gn: βιοτιτικός γνεύσιος, mr=μάρμαρα, ej=αλλουβιακά ριπίδια, al=αλλουβιακές αποθέσεις, Ω=παράκτιες αποθέσεις).

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

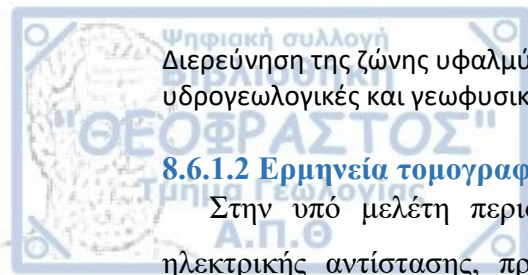
8.6.1.1 Αποτελέσματα και ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών της περιοχής Σταυρού

Στην περιοχή του Σταυρού πραγματοποιήθηκε μια τομογραφία με διεύθυνση BBA-NNΔ στον Άνω Σταυρό και με κωδική ονομασία St1 και δύο τομογραφίες οι οποίες διασταυρώνονται μεταξύ τους βορειότερα του Άνω Σταυρού με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΑ-ΝΔ με κωδικές ονομασίες St2 και St3 αντίστοιχα. Σε κάθε μία από τις τομογραφίες χρησιμοποιήθηκαν 21 ηλεκτρόδια των οποίων οι συντεταγμένες παρατίθενται στον πίνακα 8.3

Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Dipole-Dipole και η Multiple Gradient. Στο σύνολο των γεωφυσικών δεδομένων που ελήφθησαν στην κάθε τομογραφία της περιοχής πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της αντιστροφής και για τις δύο διατάξεις.

Πίνακας 8.3: Συντεταγμένες θέσεων ηλεκτροδίων για την περιοχή Σταυρός

ST1			ST2			ST3		
A/A	X	Y	A/A	X	Y	A/A	X	Y
101	474771.58	4501334.95	201	472848.07	4501288.30	301	473687.46	4501462.02
102	474748.28	4501292.18	202	472897.60	4501286.23	302	473656.67	4501433.48
103	474730.91	4501255.61	203	472947.69	4501278.50	304	473597.78	4501368.87
104	474705.52	4501195.97	204	472972.58	4501242.44	305	473575.01	4501335.64
105	474691.6	4501153.28	205	473024.09	4501227.61	306	473560.93	4501297.84
106	474681.38	4501106.36	206	473069.28	4501216.01	307	473549.72	4501259.81
107	474674.45	4501056.43	207	473118.69	4501205.29	308	473541.64	4501220.65
108	474670.06	4501008.27	208	473166.39	4501191.02	309	473537.19	4501180.26
109	474667.6	4500957.33	209	473216.06	4501181.07	310	473528.00	4501141.55
110	474667.00	4500904.83	210	473265.39	4501169.90	311	473506.57	4501105.44
111	474659.23	4500859.51	211	473314.39	4501162.85	312	473495.17	4501063.34
112	474666.58	4500811.23	212	473366.30	4501146.52	313	473483.11	4501025.54
113	474678.01	4500766.69	213	473409.53	4501133.45	314	473474.38	4500985.04
114	474663.77	4500721.38	214	473456.89	4501124.61	315	473462.97	4500948.13
115	474660.9	4500671.56	215	473500.73	4501121.78	316	473453.41	4500908.30
116	474646.49	4500621.69	216	473554.12	4501117.96	317	473432.70	4500873.69
117	474636.2	4500571.46	217	473604.56	4501114.72	318	473397.50	4500844.43
118	474611.86	4500528.01	218	473650.58	4501110.25	319	473381.96	4500806.62
119	474602.12	4500480.22	219	473793.13	4501099.86	320	473360.41	4500773.47
120	474593.19	4500435.18				321	473340.77	4500738.91
121	474601.36	4500385.57						



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

8.6.1.2 Ερμηνεία τομογραφιών ηλεκτρικής αντίστασης περιοχής Σταυρού

Στην υπό μελέτη περιοχή πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο τρεις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, προκειμένου να μελετηθεί η διείσδυση των θαλάσσιων υδάτων στους παράκτιους υδροφορείς. Οι διατάξεις που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ήταν η Dipole-Dipole και η Multiple Gradient. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε ανα 50m για τις ST1 και ST2 με συνολικό μήκος 1000 m για την κάθε τομογραφία ενώ για την ST3 έγινε ανά 40 m με συνολικό μήκος 800 μέτρων.

Όπως προαναφέρθηκε για κάθε γεωλογικό σχηματισμό ανήκει ένα μεγάλο εύρος τιμών ηλεκτρικής αντίστασης και κάθε τιμή αντίστασης μπορεί να αντιπροσωπεύει διαφορετικούς σχηματισμούς ανάλογα το γεωτεκτονικό και υδρογεωλογικό καθεστώς στο οποίο βρίσκονται. Για το λόγο αυτό για την ερμηνεία των ηλεκτρικών τομογραφιών γίνεται χρήση τόσο των γεωλογικών χαρτών της περιοχής όσο και των πληροφοριών που προκύπτουν από λιθολογικές τομές γεωτρήσεων.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί ότι τα πάχη των σχηματισμών είναι προσεγγιστικά καθώς η ακρίβεια των μετρήσεων καθορίζεται από την διακριτική ικανότητα των διατάξεων και από την μεταξύ των ηλεκτροδίων απόσταση. Το βάθος διασκόπησης φθάνει τα 200 περίπου μέτρα πράγμα που μας επιτρέπει να διακρίνουμε και τους σχηματισμούς του υποβάθρου.

Κατά την μελέτη των ηλεκτρικών τομογραφιών που παρήχθησαν διαπιστώθηκε ότι η Multiple Gradient ερμηνεύει καλύτερα την γεωλογία για την ST1 και ST3 ενώ για την ST2 χρησιμοποιήθηκε η Dipole-Dipole. Ερμηνεύοντας γεωλογικά τις τρεις ηλεκτρικές τομογραφίες της περιοχής του Σταυρού παρατηρούμε τα εξής:

- Η ST1 έχει διεύθυνση BBA-NNΔ σχεδόν κάθετα στην ακτογραμμή και απέχει από αυτή περίπου 110 m (σχήμα 8.4).

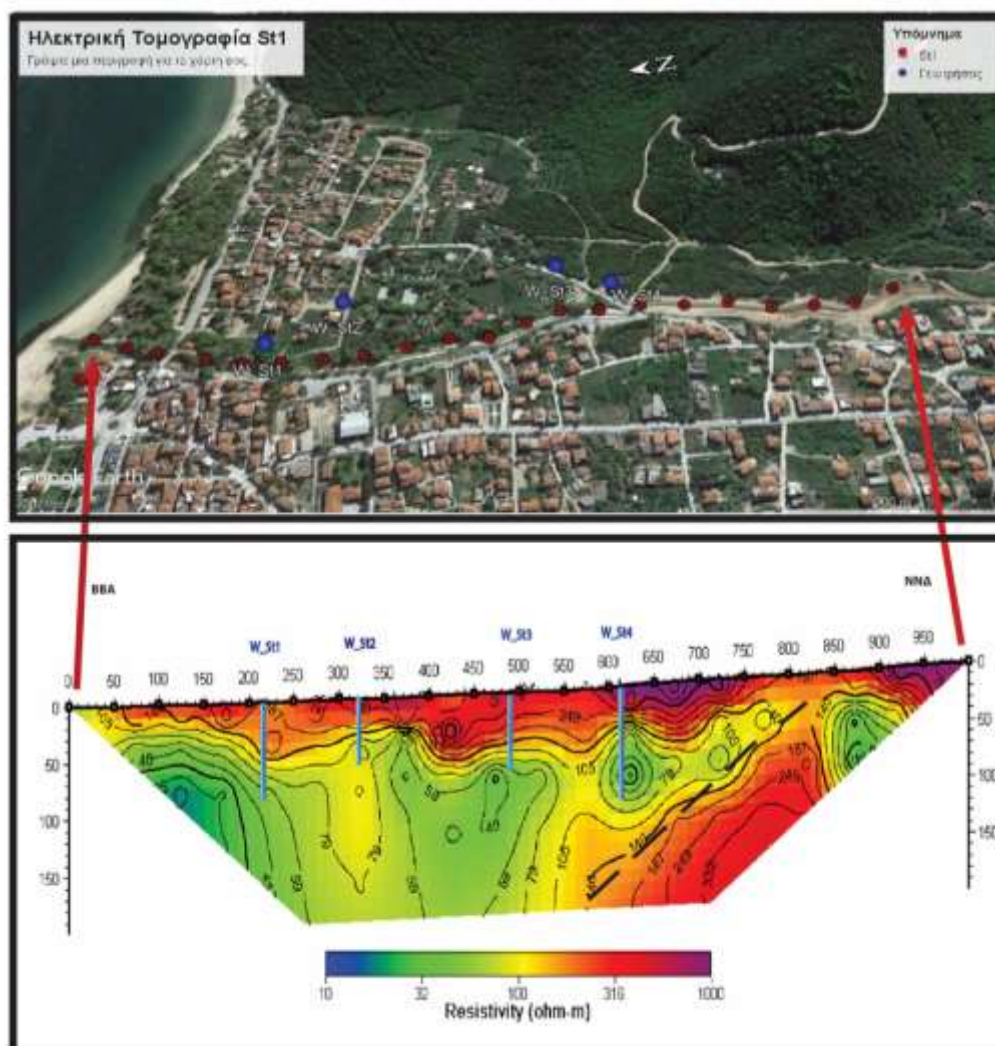
Από τα 60 m έως τα 1000 μ. της τομογραφίας και σε ένα μέγιστο βάθος 50 m έχουμε ένα εύρος αντιστάσεων από 150 έως 1100 Ohm.m που αντιστοιχούν στην ακόρεστη ζώνη άμμων και κροκαλών (150-450 Ohm.m), ενώ οι υψηλότερες αντιστάσεις αντιπροσωπεύουν ογκόλιθους του υποβάθρου. Η απουσία αργιλικών υλικών έχει ως αποτέλεσμα την απουσία δυνατότητας συγκράτησης της υγρασίας και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν κατά την ξηρή περίοδο του φθινοπώρου έχει ως αποτέλεσμα την εκδήλωση των υψηλών αυτών αντιστάσεων.

Η μετάβαση από τις χαμηλές αντιστάσεις (<120 Ohm.m) των πρώτων 60 μέτρων στις υψηλότερες αντιπροσωπεύουν την μετάβαση από τις παράκτιες αποθέσεις (αναχώματα ακτών, θίνες κλπ.) στις αλλουβιακές αποθέσεις.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Από το βάθος των 50 μέτρων παρατηρείται η μετάβαση στην κορεσμένη ζώνη των σχηματισμών με χαρακτηριστική την πτώση των αντιστάσεων της τάξεως των 60-80 Ohm.m. Ο σχηματισμός του υποβάθρου εντοπίζεται στα 700 m της τομογραφίας. Η απότομη μεταβολή των αντιστάσεων αποτελεί έντονη ένδειξη περί ύπαρξης ρήγματος ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης. Η σταδιακή άνοδος των αντιστάσεων αντιστοιχεί στον μανδύα αποσάθρωσης του υποβάθρου.

Σημαντικό για την παρούσα μελέτη είναι το γεγονός ότι οι πολύ χαμηλές αντιστάσεις (κάτω από 20 Ohm.m) στα πρώτα 100-200 m της τομογραφίας και στο βάθος των 90 περίπου μέτρων. Η έντονη αυτή διαφοροποίηση εύλογα αφήνει την υποψία μιας πιθανής έναρξης της διείσδυσης θαλάσσιων υδάτων στον παράκτιο υδροφορέα.

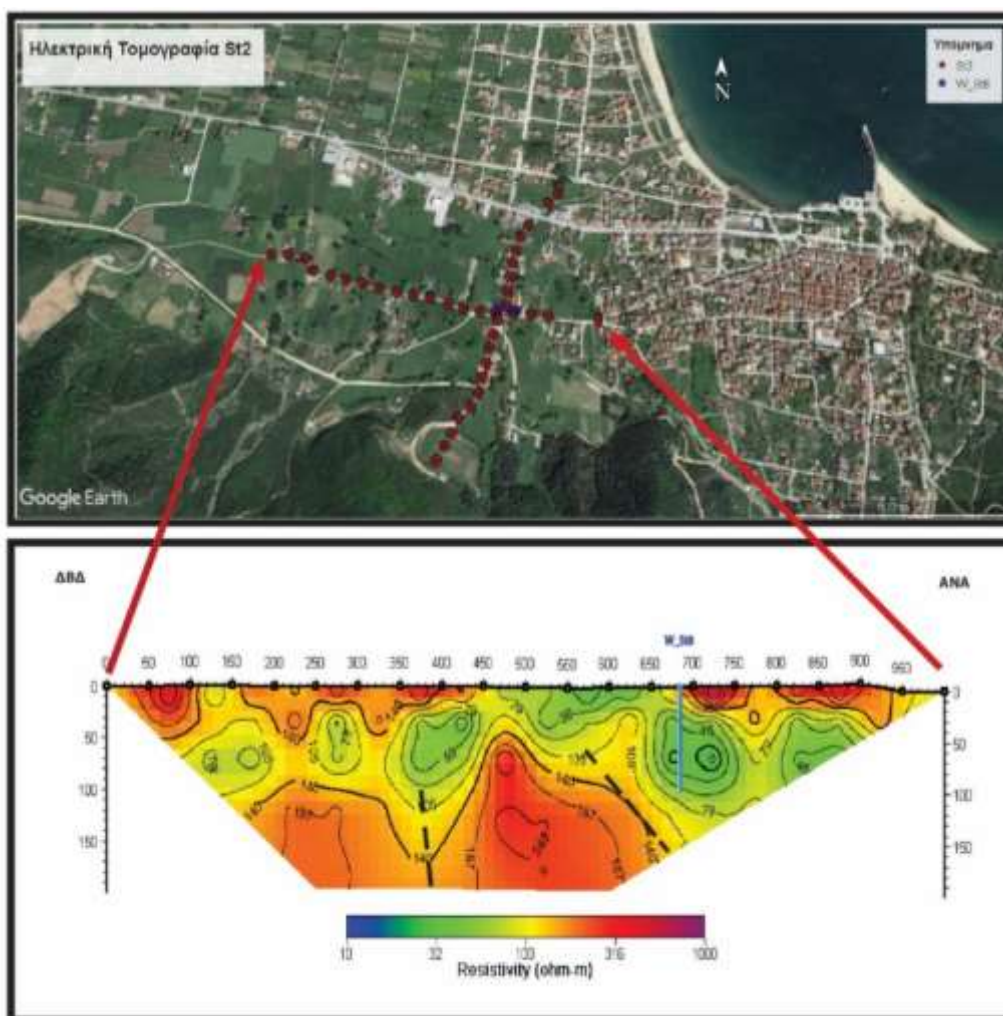


Σχήμα 8.4: Επάνω εικόνα: θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: διδιάσταση απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας St1.

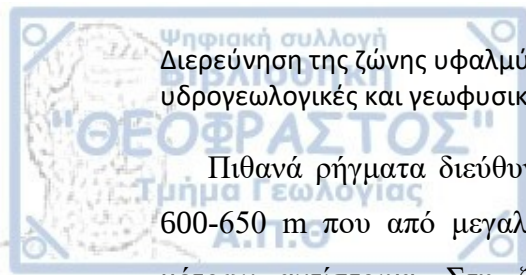
Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Η ST2 έχει διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ, πραγματοποιήθηκε πλαγίως της ακτογραμμής και η απόσταση από αυτή κυμαίνεται 1350 m στο ΔΒΔ άκρο ως 650 m στο ΑΝΑ άκρο (σχήμα 8.5).

Καθ' όλο το μήκος της τομογραφίας και σε ένα μέγιστο βάθος 50 περίπου μέτρων διακρίνεται μια ακόρεστη ζώνη με απότομες πλευρικές μεταβολές των αντιστάσεων από 400 ως 50 Ohm.m. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται στην μεταβολή της λιθολογίας από πιο αδρόκοκκο υλικό (άμμους, χαλίκια) σε πιο λεπτόκοκκο υλικό (άμμους, αργίλους). Σε βάθη μεγαλύτερα των 50 m οι αντιστάσεις μειώνονται (με εξαίρεση τα 200-250 m και 450-600 περίπου μέτρα) και είναι μικρότερες των 100 Ohm.m εξ αιτίας και της αύξησης του λεπτόκοκκου αργιλικού υλικού αλλά και της υδροφορίας. Αντιστάσεις άνω των 150 Ohm.m αντιστοιχούν στο υπόβαθρο του γενεσίου με εξαίρεση τα 420 m όπου φθάνει μέχρι το βάθος των 50 m.



Σχήμα 8.5: Επάνω εικόνα: θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: δισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας St2.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Πιθανά ρήγματα διεύθυνσης BBA-NNΔ διακρίνονται στα 400 m αλλά και στα 600-650 m που από μεγαλύτερα βάθη φθάνουν μέχρι το βάθος των 100 και 40 μέτρων αντίστοιχα. Στη ζώνη του κάθε ρήγματος εκτείνεται και ο μανδύας αποσάθρωσης του γνευσιακού υπόβαθρου. Από το βάθος των 100 μέτρων οι

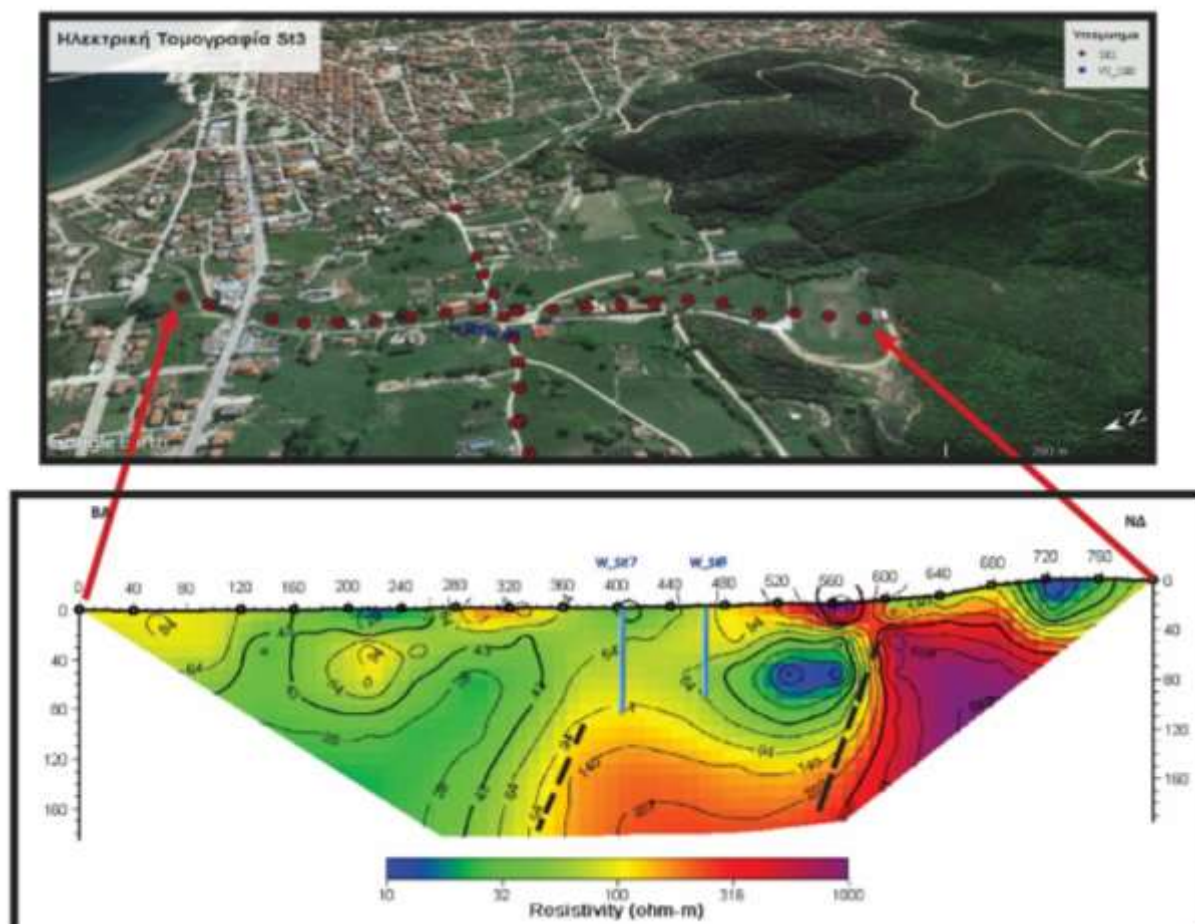
- Η ST3 έχει διεύθυνση BA-NA και η αρχή της απέχει περίπου 500 m από την ακτογραμμή (Σχήμα 8.6).

Χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής αυτής τομογραφίας σε σύγκριση με τις προηγούμενες είναι οι εναλλαγές και επικράτηση αντιστάσεων χαμηλότερων των 100 Ohm.m (άμμοι, χαλίκια με παρουσία αργιλικού υλικού) και η απότομη μετάβασή τους σε αντιστάσεις άνω των 500 Ohm.m (γνευσιακό υπόβαθρο). Κάτω από το βάθος των 40 m και από τα 0 m της τομογραφίας έως τα 500 περίπου μέτρα, η μείωση της αντίστασης δείχνει την υδροφορία των άμμων και χαλίκων. Οι πολύ χαμηλές τιμές (μικρότερες των 10 Ohm.m) που εντοπίζονται 500–550 m με βάθος 40-80 m και 710-740 m στην επιφάνεια του εδάφους, ανήκουν σε αργιλικούς φακούς.

Επιπλέον παρατηρείται μία ζώνη χαμηλών αντιστάσεων (24–20 Ohm.m) που εκτείνεται από τα 200 μέτρα της τομογραφίας σε βάθος 120 m έως τα 320 m όπου το βάθος μειώνεται στα 40 περίπου μέτρα που πιθανόν να αντιστοιχούν στην επικράτηση αμμοαργιλώδους υλικού.

Ευδιάκριτα είναι δύο ρήγματα ΒΔ-NA διεύθυνσης που φθάνουν σχεδόν μέχρι την επιφάνεια. Το πρώτο εντοπίζεται στα 320 περίπου μέτρα όπου το γνευσιακό υπόβαθρο ανέρχεται μέχρι τα 80 περίπου μέτρα βάθος και τα τεταρτογενή ιζήματα έρχονται σε επαφή με τον μανδύα αποσάθρωσής τους. Το δεύτερο ρήγμα εντοπίζεται στα 600 περίπου μέτρα Νοτιοδυτικά από την αρχή της τομογραφίας και μέχρι την επιφάνεια και φέρνει σε απ' ευθείας επαφή τα τεταρτογενή ιζήματα με τους Παλαιοζωικούς βιοτιτικούς γνευσίους του υποβάθρου όπου επικρατούν αντιστάσεις από 500 έως 1150 Ohm.m. Στα 540 m της τομογραφίας οι αντιστάσεις των 1000 Ohm.m φανερώνουν την παρουσία ογκόλιθων του υποβάθρου.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 8.6: Επάνω εικόνα με τις θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: δισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας St2.

8.6.2 Γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής Ν. Βρασνών

Τα Νέα Βρασνά βρίσκονται και αυτά στο ανατολικό περιθώριο της Μυγδονίας λεκάνης και οροθετούνται βόρεια από την οροσειρά των Κερδυλλίων, δυτικά από τα στενά των Μακεδονικών Τεμπών, νότια δεν υπάρχουν σαφή όρια που να τα διαχωρίζουν από τον Σταυρό ενώ ανατολικά διαβρέχεται από τον Στρυμωνικό κόλπο. Η οροσειρά των Κερδυλλίων, αποτελείται από τους Παλαιοζωικούς βιοτικούς γνευσίους των Κερδυλλίων της Σερβομακεδονικής μάζας που συνιστούν το υπόβαθρο της περιοχής. Τα Νέα Βρασνά έχουν οικοδομηθεί επί τω πλείστον πάνω στις Ολοκαινικές αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις και λιγότερο πάνω στις Πλειστοκαινικές αποθέσεις που αποτελούνται από συγκολλημένα πλευρικά κορήματα κυρίως ερυθρού χρώματος και τεμαχισμένους κώνους κορημάτων (σχήμα 8.7).

Από τις διαθέσιμες λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων, οι οποίες όμως δεν μπόρεσαν να συσχετιστούν με τις υφιστάμενες υδρογεωτρήσεις, διαπιστώθηκε ότι

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής, επικρατούν άμμοι και χαλίκια με αργιλικές ενστρώσεις.



Σχήμα 8.7: Χάρτης Βρασνών (Ω: παράκτιες αποθέσεις, al: αλλουβιακές αποθέσεις, Qsc2: αλλουβιακές προσχώσεις, pt: πλειστοκαινικές αποθέσεις, bi.gn: βιοτιτικός γνεύσιος).

8.6.2.1 Αποτελέσματα και ερμηνεία ηλεκτρικών τομογραφιών της περιοχής Ν. Βρασνών

Στην περιοχή των Νέων Βρασνών πραγματοποιήθηκαν τρεις τομογραφίες κάθετα στην ακτογραμμή. Οι δύο εξ αυτών είχαν διεύθυνση ΒΑ–ΝΔ και η τελευταία είχε διεύθυνση Α–Δ. Σε κάθε μία από τις τομογραφίες χρησιμοποιήθηκαν 21 ηλεκτρόδια των οποίων οι συντεταγμένες παρατίθενται στον πίνακα 8.4.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

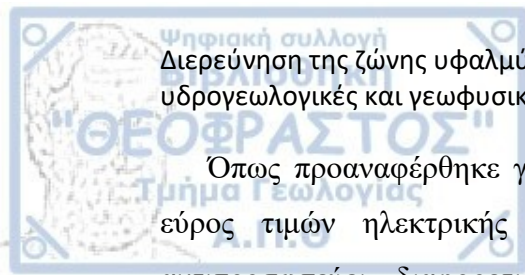
Πίνακας 8.4: Συντεταγμένες θέσεων ηλεκτροδίων για την περιοχή Βρασνών

VR1			VR2			VR3		
A/A	X	Y	A/A	X	Y	A/A	X	Y
101	474689.99	4506612.44	201	474325.76	4505527.19	301	473739.87	4503312.76
102	474698.97	4506609.57	202	474336.22	4505523.2	302	473745.67	4503309.7
103	474708.12	4506606.7	203	474343.16	4505519.48	303	473757.85	4503307.97
104	474717.91	4506604.82	204	474352.18	4505514.73	304	473767.46	4503311.56
105	474727.81	4506602.81	205	474361.07	4505510.92	305	473777.15	4503312.4
106	474736.8	4506600.5	206	474370.47	4505505.78	306	473786.72	4503314.16
107	474746.88	4506595.91	207	474378.51	4505501.08	307	473796.71	4503316.31
108	474755.94	4506593.75	208	474388.21	4505497.28	308	473806.62	4503316.84
109	474765.13	4506590.85	209	474396.75	4505493.78	309	473816.24	4503317.67
110	474775.02	4506587.16	210	474405.39	4505489.25	310	473826.7	4503318.35
111	474785.15	4506583.33	211	474413.9	4505484.27	311	473836.9	4503319.56
112	474793.03	4506581.27	212	474423.84	4505481.45	312	473847.5	4503320.36
113	474802.51	4506580.21	213	474432.72	4505477.08	313	473857.42	4503321.02
114	474813.44	4506573.48	214	474440.84	4505473.08	314	473867.47	4503321.52
115	474823.49	4506569	215	474450.13	4505468.7	315	473878.03	4503319.3
116	474832.65	4506568.77	216	474458.92	4505464.65	316	473888.18	4503320.47
117	474842.3	4506567.28	217	474469.3	4505460.83	317	473896.79	4503320.44
118	474851.48	4506564.05	218	474478.27	4505456.48	318	473906.64	4503319.45
119	474861.58	4506561.63	219	474487.7	4505451.33	319	473916.41	4503318.49
120	474869.52	4506559.71	220	474496.33	4505447.76	320	473926.26	4503316.89
121	474879.37	4506557.65	221	474505.27	4505443.87	321	473935.91	4503313.92
122	474888.28	4506550.85	222	474515.72	4505440.62	322	473945.85	4503312.38
123	474897.55	4506545.87	223	474523.4	4505437.46	323	473955.17	4503311.83
124	474906.07	4506541.75	224	474527.97	4505435.8	324	473966.37	4503309.57

Οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Dipole-Dipole και Multiple Gradient. Στο σύνολο των γεωφυσικών δεδομένων που λήφθηκαν στην κάθε τομογραφία της περιοχής πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της αντιστροφής και για τις δύο διατάξεις.

8.6.2.2 Ερμηνεία τομογραφιών ηλεκτρικής αντίστασης περιοχής Ν. Βρασνών

Στην περιοχή των Νέων Βρασνών πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο τρεις μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, προκειμένου να μελετηθεί η διείσδυση των θαλάσσιων υδάτων στους παράκτιους υδροφορείς. Οι διατάξεις που επιλέχθηκαν και σε αυτή την περίπτωση ήταν η Dipole-Dipole και η Multiple Gradient. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε ανά 10 m και στις τρεις τομογραφίες με μήκος 230 m για την κάθε μία.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Όπως προαναφέρθηκε για κάθε γεωλογικό σχηματισμό αντιστοιχεί ένα μεγάλο εύρος τιμών ηλεκτρικής αντίστασης και κάθε τιμή αντίστασης μπορεί να αντιπροσωπεύει διαφορετικούς σχηματισμούς ανάλογα το γεωτεκτονικό και υδρολογικό καθεστώς στο οποίο βρίσκονται. Λόγω της αδυναμίας συσχέτισης των lithολογικών τομών των γεωτρήσεων με τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, η εξαγωγή συμπερασμάτων στηρίχθηκε στην γεωλογική πληροφορία που αποτυπώνεται στο φύλλο Σταυρός του Ι.Γ.Μ.Ε. και από τις αντιστάσεις των σχηματισμών που αντλήθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθεί ότι τα πάχη των σχηματισμών είναι προσεγγιστικά καθώς η ακρίβεια των μετρήσεων καθορίζεται από τη διακριτική ικανότητα των διατάξεων και από την μεταξύ των ηλεκτροδίων απόσταση. Το βάθος διασκόπησης φθάνει τα 70 περίπου μέτρα.

Κατά την μελέτη των ηλεκτρικών τομογραφιών που παρήχθησαν διαπιστώθηκε ότι η Multiple Gradient και η Dipole-Dipole παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα, εντούτοις χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της Dipole-Dipole για την τομογραφία Vr1 και τα αποτελέσματα της Multiple Gradient για τις τομογραφίες Vr2 και Vr3.

Ερμηνεύοντας γεωλογικά τις τρεις ηλεκτρικές τομογραφίες της περιοχής των Βρασνών παρατηρούμε τα εξής:

- Η VR1 έχει διεύθυνση προσανατολισμού ΒΔ-ΝΑ με το νοτιοανατολικό της άκρο να απέχει μόλις λιγότερο από 70 m από την θάλασσα ενώ το βορειοδυτικό της άκρο απέχει περίπου 630 m από την πλησιέστερη γεώτρηση (σχήμα 8.8). Όπως φαίνεται και από το σχήμα 8.7 το μεγαλύτερο μέρος της τομογραφίας πραγματοποιήθηκε εντός των παράκτιων αποθέσεων, ενώ μόλις τα πρώτα περίπου 25 m έγιναν εντός των αλλουβιακών αποθέσεων.

Οι αντιστάσεις έχουν μικρό εύρος τιμών σε όλη τη τομογραφία με μικρότερη αντίσταση 2 Ohm.m και μεγαλύτερη 124 Ohm.m.

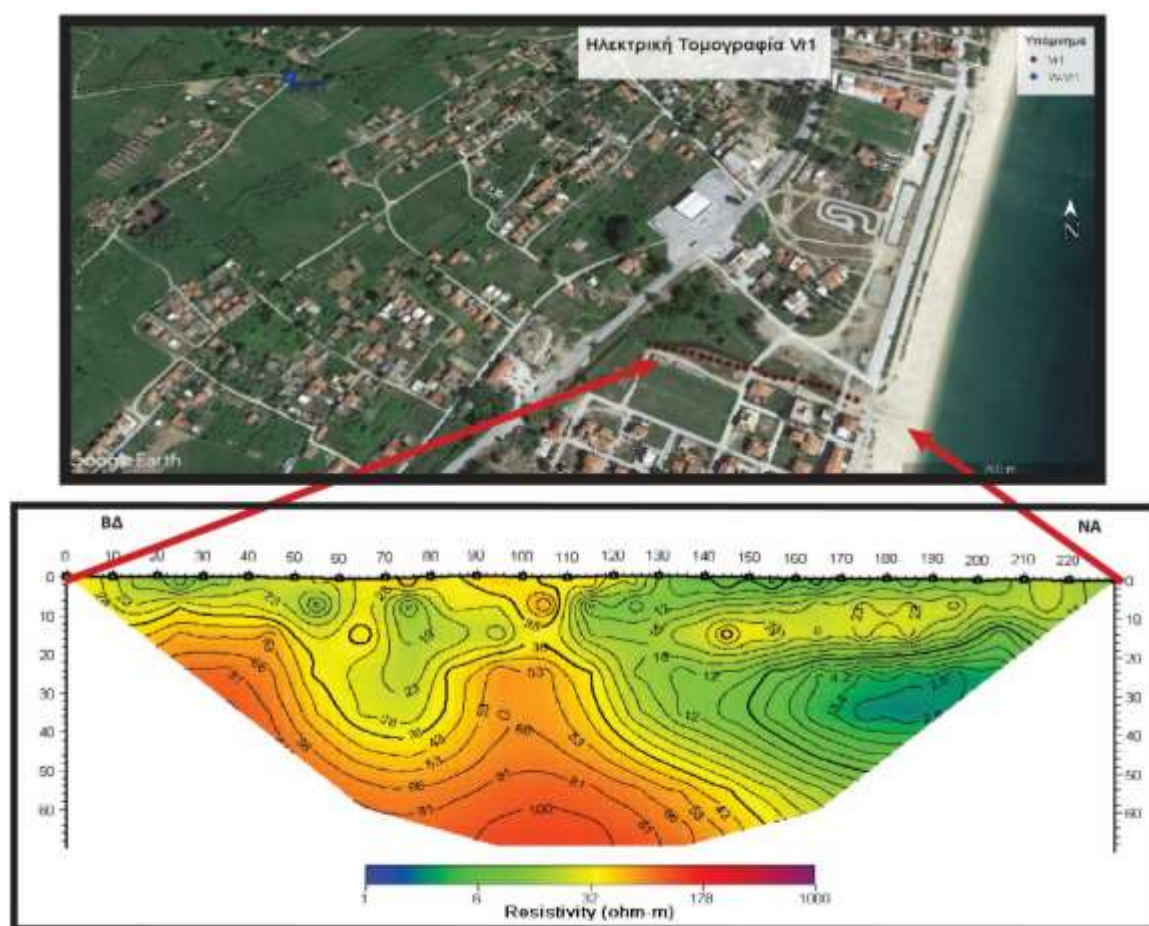
Στο Νοτιοανατολικό άκρο (230 m) και σε βάθος 60 περίπου μέτρων μέχρι τα 110 περίπου μέτρα κατά μήκος της τομογραφίας ως σε 7 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους υπάρχει μια ζώνη χαμηλών αντιστάσεων 2-15 Ohm.m Ένας «φακός» μεγαλύτερων αντιστάσεων βρίσκεται 80-90 μέτρα από την ακτή και σε βάθος 10-20 m αντιστοιχεί στην επικράτηση πιο αδρόκοκκου υλικού. Είναι ευδιάκριτο το μέτωπο της υφαλμύρισης με αντιστάσεις που αντιστοιχούν σε άμμους των παράκτιων

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

αποθέσεων και στη διείσδυση θαλάσσιων υδάτων πράγμα φυσιολογικό και αναμενόμενο που σταματάει όμως στα 150 περίπου μέτρα της τομογραφίας.

Στα τελευταία περίπου 10 m της τομογραφίας η άνοδος των αντιστάσεων 32 Ohm.m αντιστοιχεί στις ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις όπου οι εναλλαγές χαλικιών, άμμων και πιθανόν αργιλικών υλικών έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και κατά συνέπεια την αύξηση των αντιστάσεων.

Οι αντιστάσεις μεγαλύτερες των 50 Ohm.m που εντοπίζονται από τα 14 ως 150 m της τομογραφίας σε κυμαινόμενα βάθη από 10 ως 70 m πιθανόν να αντιστοιχούν στις πλειστοκαινικές αποθέσεις, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο βαθμό διαγένεσης και μικρότερο πορώδες.



Σχήμα 8.8: Επάνω εικόνα: θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: δισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας Vr1.

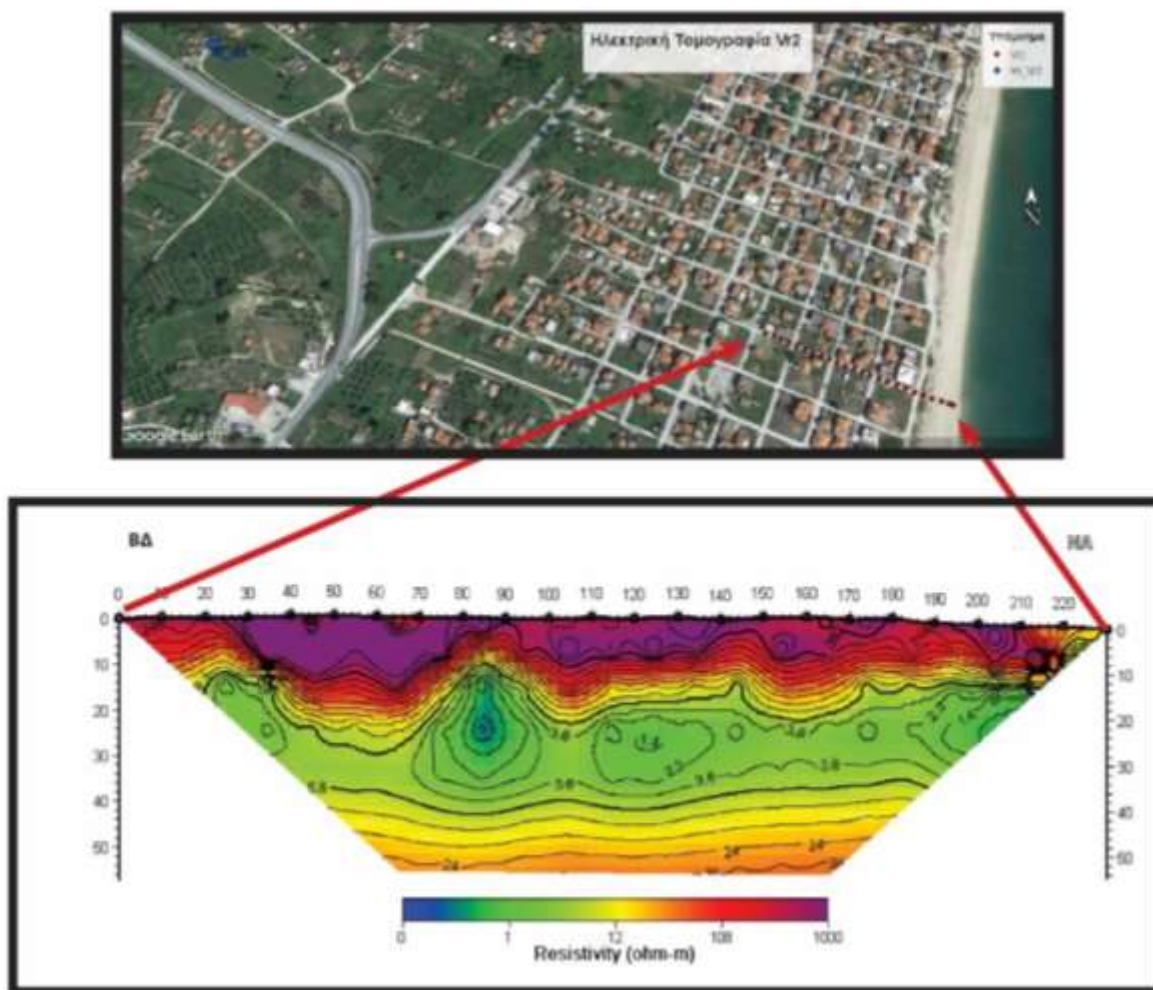
- Η VR2 έχει διεύθυνση προσανατολισμού ΒΔ-ΝΑ με το νοτιοανατολικό της άκρο να απέχει μόλις λιγότερο από 5 m από την θάλασσα ενώ το βορειοδυτικό της άκρο απέχει περίπου 930 m από την πλησιέστερη γεώτρηση (σχήμα 8.9).

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Οι υψηλές αντιστάσεις που εμφανίζονται κατά τα 15 πρώτα μέτρα βάθους της τομογραφίας οφείλονται στο γεγονός ότι μέρος των ηλεκτροδίων τοποθετήθηκαν σε τεχνητές κατασκευές και σε περιβάλλον αυξημένου θορύβου.

Καθ' όλο το μήκος της τομογραφίας και από τα 15 έως περίπου τα 35 μέτρα βάθος οι αντιστάσεις κυμαίνονται από 0.3 έως 5 Ohm.m και η θαλάσσια διείσδυση είναι εμφανής καθώς οι πόροι του αμμώδους υλικού των παράκτιων αποθέσεων είναι κορεσμένοι με θαλασσινό νερό.

Από το βάθος των 35 m και μέχρι τα 60 m οι αντιστάσεις προοδευτικά ανεβαίνουν φθάνοντας τα 40 Ohm.m γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί είτε ως αύξηση του ποσοστού του αδρόκοκκου υλικού (αλλουβιακές αποθέσεις με άμμους και χαλίκια), είτε μεγαλύτερος βαθμός διαγένεσης των κατώτερων στρωμάτων (πλειστοκαινικές αποθέσεις) χωρίς να αποκλείεται και η ταυτόχρονη παρουσία υφάλμυρων νερών.



Σχήμα 8.9: Επάνω εικόνα με τις θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: δισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας Vr2.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

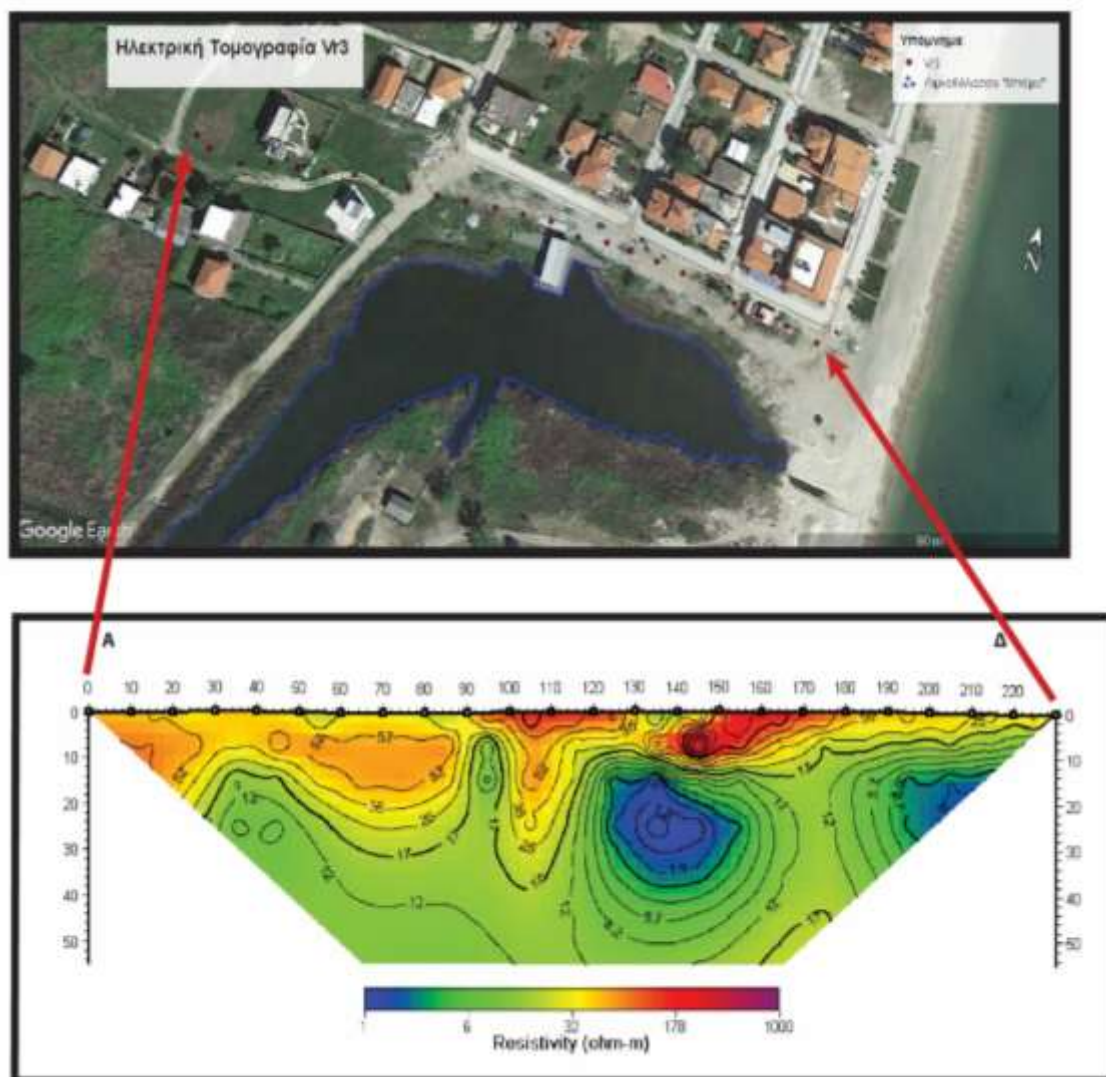
- Η VR3 έχει διεύθυνση προσανατολισμού Α-Δ με το ανατολικό της άκρο να απέχει λιγότερο από 30 m από την ακτή ενώ η απόσταση από την πλησιέστερη γεώτρηση είναι περίπου 1400 m Τα πρώτα 90 m της τομογραφίας είναι μέσα στα Ολοκαινικές αλλουβιακές προσχώσεις ενώ τα υπόλοιπα 150 περίπου μέτρα μέσα στις παράκτιες αποθέσεις (σχήμα 8.10).

Από τα 0 έως τα 90 μέτρα της τομογραφίας και μέχρι το βάθος των 25 m περίπου οι αντιστάσεις των 25-70 Ohm.m αντιστοιχούν σε αλλουβιακές αποθέσεις (προφανώς λεπτόκοκκο υλικό, άμμοι άργιλοι), ενώ οι ακόμα χαμηλότερες αντιστάσεις 35-25 Ohm.m από τα 180-230 m της τομογραφίας αντιστοιχούν στις άμμους των παράκτιων αποθέσεων.

Οι υψηλότερες αντιστάσεις είναι μικρότερες των 70 Ohm.m και εντοπίζονται από την αρχή της τομογραφίας ως τα 180 m και σε μέγιστο βάθος 50 m, αντιστάσεις που υποδηλώνουν τις επιφανειακές ακόρεστες άμμους των παράκτιων αποθέσεων. Οι αντιστάσεις 125 Ohm.m στα 100–120 m και σε βάθος 5 περίπου μέτρων καθώς οι αντιστάσεις 200-650 Ohm.m στα 140–160 m της τομογραφίας με μέγιστο βάθος 10 m αποδίδονται στις επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις παρακείμενης επιχείρησης.

Σε όλο το μήκος της τομογραφίας και σε βάθος που στην αρχή της τομογραφίας ξεκινάει από τα 25 περίπου μέτρα και μεταβαλλόμενο φθάνει στο τέλος της τομογραφίας ως την επιφάνεια επικρατούν αντιστάσεις μικρότερες των 22 Ohm.m, ενώ χαρακτηριστικές είναι οι αντιστάσεις κάτω των 2 Ohmm τόσο στα 130-150 m της τομογραφίας όσο και στο τέλος της. Πρόκειται για το μέτωπο υφαλμύρισης όπου: i) οι υψηλότερες αντιστάσεις είναι επηρεασμένες από τα γλυκά νερά της λιμνοθάλασσας «Μπάρα», ii) οι χαμηλές αντιστάσεις στα 130-150 m να οφείλονται στην παρουσία αργλικού φακού και iii) οι χαμηλές αντιστάσεις στο τέλος της τομογραφίας δείχνουν την αρχή της θαλάσσιας διείσδυσης.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

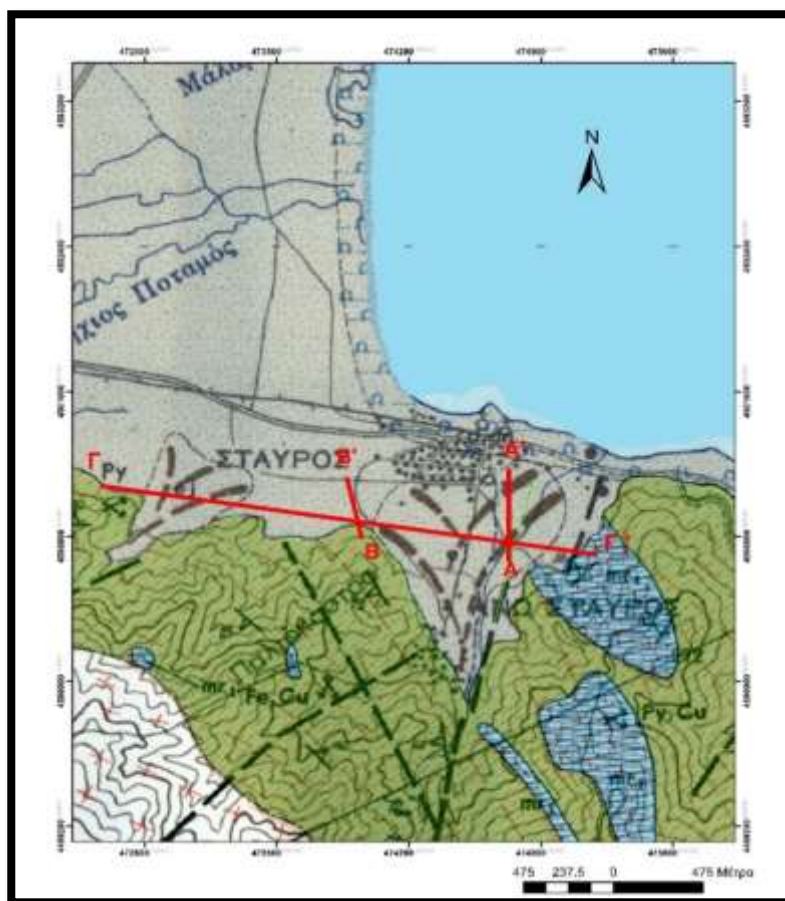


Σχήμα 8.10: Επάνω εικόνα: θέσεις των ηλεκτροδίων και των γεωτρήσεων. Κάτω εικόνα: δισδιάστατη απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας Vt3.

9. ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η δημιουργία του υδρολιθολογικού μοντέλου των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων αποτελεί απαραίτητο εργαλείο που, παρά την προσεγγιστική του ακρίβεια, βοηθά στην κατανόηση και λύση πολλών προβλημάτων, στον εντοπισμό υποψήφιων θέσεων για ανόρυξη γεωτρήσεων αλλά και στην πρόληψη και προστασία των υπόγειων υδάτων.

Στο Σχήμα 9.1 απεικονίζονται οι θέσεις των υδρολιθολογικών τομών που σχεδιάστηκαν για την περιοχή του Σταυρού με χρήση του προγράμματος Adobe Illustrator. Για τον σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αντλήθηκαν τόσο από την λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων, όσο και από τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε και τις δισδιάστατες απεικονίσεις της γεωφυσικής διασκόπησης (Σχήμα 10.2 έως 10.4).

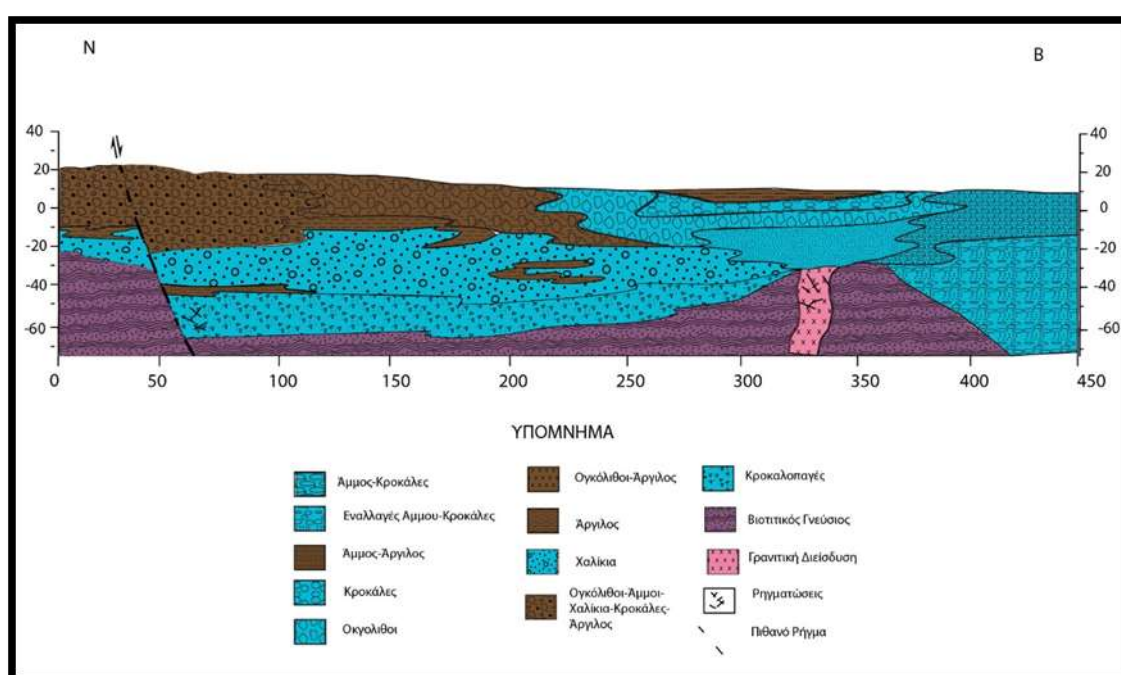


Σχήμα 9.1 : Θέσεις υδρολιθολογικών τομών περιοχής Σταυρού.

Από το Σχήμα 9.2 διακρίνεται ο πορώδης υδροφορέας με πάχος που κυμαίνεται από 35 έως 80 περίπου μέτρα. Στα 30 περίπου μέτρα της τομής η γεωφυσική έρευνα

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

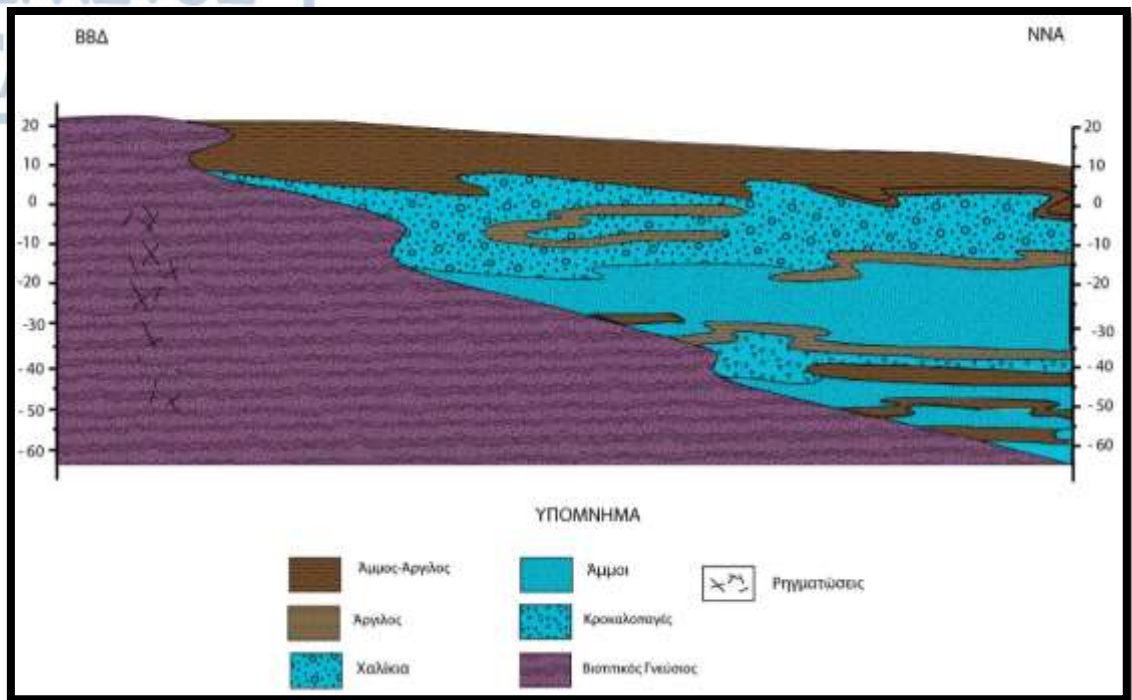
αποτύπωσε την παρουσία ρήγματος όπου πιθανή είναι η υδροφορία μετά τα 20 περίπου μέτρα βάθος. Από τα 225 έως τα 250 m της τομής και από τα 370 ως τα 400 m, ο υδροφορέας είναι ελεύθερος με πάχος 40 m και 80 m αντίστοιχα. Σε όλο το υπόλοιπο μήκος της τομής ο υδροφορέας είναι υπό πίεση με το πάχος του να μεταβάλλεται από 40 έως 70 m. Η υδροφορία αναπτύσσεται μέσα σε ογκόλιθους, κροκάλες, χαλίκια και άμμους αλλά και σε ζώνες διάρρηξης του βιοτιτικού γνεύσιου. Από τα 220 έως τα 230 περίπου μέτρα της τομής διακρίνεται μια αναθόλωση του υποβάθρου όπου η υδροφορία αναπτύσσεται εντός ρηγματωμένης ζώνης αλλά και εντός του υπερκείμενου υπό πίεση υδροφόρου.



Σχήμα 9.2: Υδρολιθολογική τομή Α-Α΄

Στο Σχήμα 9.3 διακρίνεται ο διαρρηγμένος και ο υπό πίεση υδροφορέας. Η υδροφορία στον διαρρηγμένο υδροφορέα, σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, αναπτύσσεται τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 30 περίπου μέτρων. Το πάχος του υπό πίεση υδροφορέα μεταβάλλεται από 5 έως 40 m περίπου. Η υδροφορία αναπτύσσεται εντός άμμων, χαλικιών και χαλαρών κροκαλοπαγών όπου ανάμεσά τους παρεμβάλλονται αργλικές ενστρώσεις.

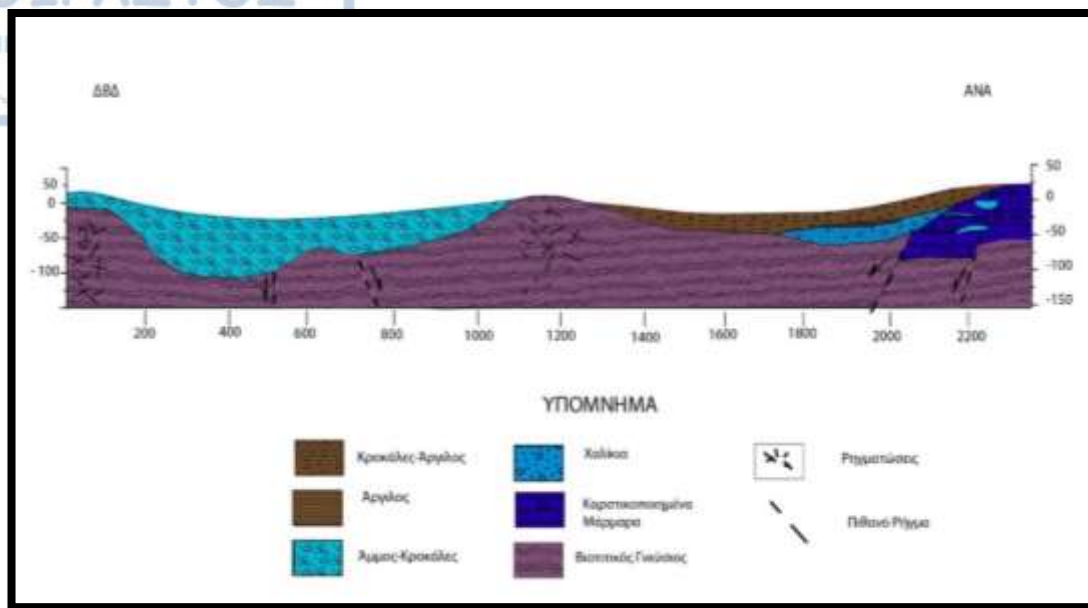
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.



Σχήμα 9.3: Υδρολιθολογική τομή B-B'.

Στο Σχήμα 9.3 διακρίνονται και οι τρεις πετρογραφικοί τύποι υδροφορέων και επι πλέον ο πορώδης αποτελείται από ένα ελεύθερο και ένα υπό πίεση σύστημα. Η υδροφορία του καρστικού υδροφορέα σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι το βάθος των 60 m. Ο διαρρηγμένος υδροφορέας διακρίνεται αρχικά στα 50 πρώτα περίπου μέτρα της τομής όπου υπόκειται ενός περατού στρώματος άμμων και κροκαλών. Η ζώνη διάρρηξης φθάνει μέχρι το βάθος των 150 μέτρων περίπου. Η υδροφορία όμως έχει κριθεί, μετά από ανόρυξη γεώτρησης, ως μη ικανοποιητική. Από τα 1100 ως τα 1250 m της τομής, η υδροφορία αναπτύσσεται εντός του διαρρηγμένου υποβάθρου και μέχρι το βάθος των 60 m. Στα 500 και 750 m της τομής η γεωφυσική έρευνα κατέδειξε την ύπαρξη δυο ζωνών διάρρηξης που προφανώς θα συνοδεύονται από την αντίστοιχη υδροφορία. Ο ελεύθερος υδροφορέας συνίσταται από άμμους και κροκάλες και το βάθος του μεταβάλλεται από 15 έως 100 m περίπου. Ο υπο πίεση υδροφορέας αποτελείται από χαλίκια μέγιστου πάχους 25 περίπου μέτρων και υπόκειται αδιαπέρατου στρώματος κροκαλών και αργίλων.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

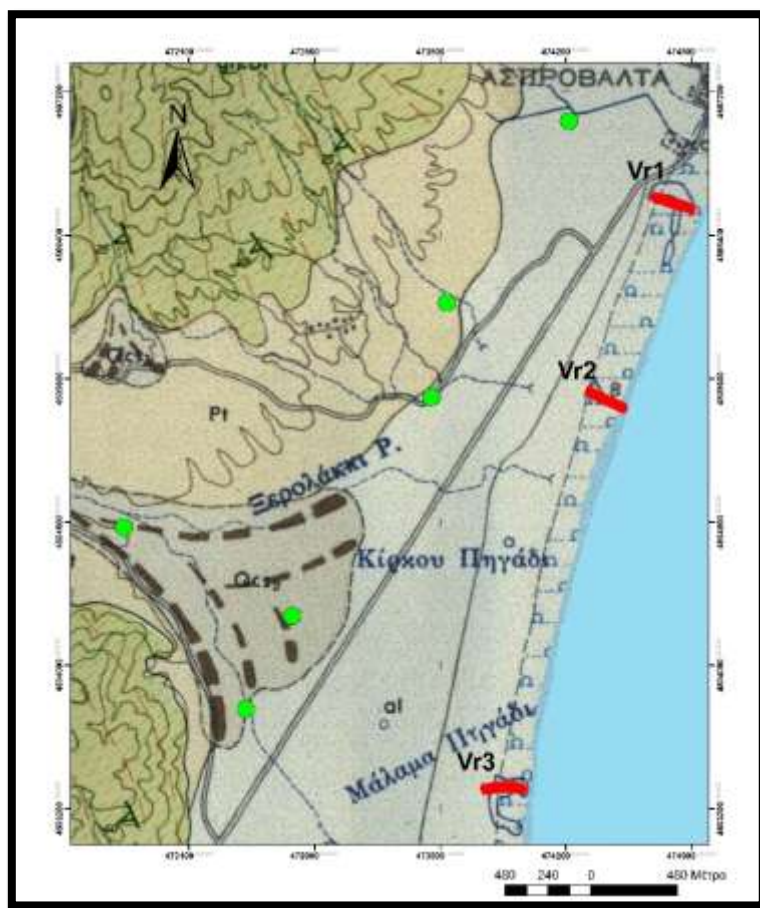


Σχήμα 9.4: Υδρολιθολογική τομή Γ-Γ '

Ο σχεδιασμός αντίστοιχων υδρολιθολογικών τομών στην περιοχή των Βρασνών δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί διότι παρά το γεγονός ότι υπήρχαν οι σχετικές γεωλογικές τομές των υδρευτικών γεωτρήσεων, λόγω μη αναγραφής των συντεταγμένων, δεν μπόρεσαν να συσχετιστούν με τις θέσεις των υπαρχουσών γεωτρήσεων με τη χρήση μόνο των τοπωνυμίων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα αποτελέσματα του γεωφυσικού μοντέλου και τα στοιχεία που αντλήθηκαν από τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. προκειμένου να αναπαραχθεί μια σχηματική αναπαράσταση του παράκτιου υδροφορέα στη θέση αυτή που θα συζητηθεί στη συνέχεια. Με λήψη των συντεταγμένων κατά την δειγματοληψία και αποτύπωσής τους στο φύλλο Σταυρός του Ι.Γ.Μ.Ε. ο παράκτιος υδροφορέας της περιοχής των Βρασνών χαρακτηρίζεται γενικά ως πορώδης.

10. ΥΔΡΟΛΙΘΟΓΕΩΦΥΣΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Όπως προαναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να αναπαραχθεί μια σχηματική αναπαράσταση του παράκτιου υδροφορέα στην περιοχή των Βρασνών, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα αποτελέσματα του γεωφυσικού μοντέλου και τα στοιχεία που αντλήθηκαν από τον γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 10.1 οι θέσεις των γεωτρήσεων ύδρευσης μπορεί να μην ταυτίζονται με τις θέσεις των μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους αλλά σίγουρα δίνουν μια ασφαλής εικόνα για το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης.

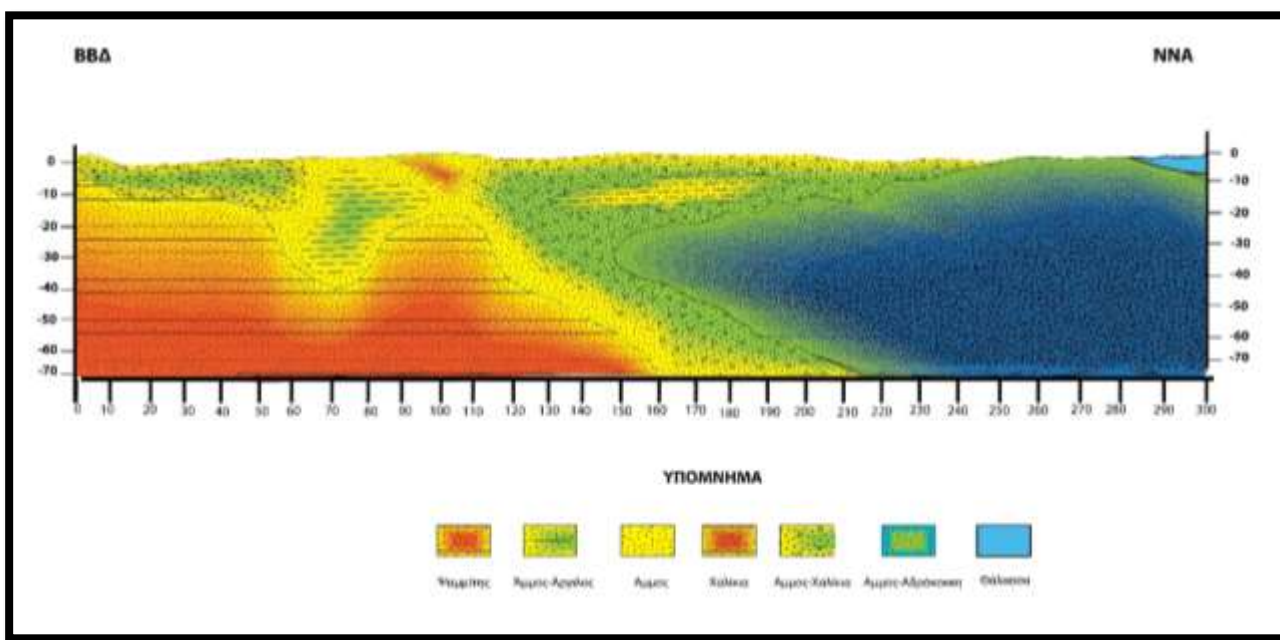


Σχήμα 10.1: Θέσεις ηλεκτρικών τομογραφιών (με κόκκινο χρώμα) και γεωτρήσεων (με πράσινο χρώμα).

Στην υδρολιθογεωφυσική τομή Vr1 (σχήμα 10.2) είναι έντονη η εμφάνιση της ζώνης υφαλμύρισης μετά τα 130 m. Μέχρι τα 160 m της τομής και σε κυμαινόμενο βάθος διακρίνεται ημιπερατός ως αδιαπέρατος σχηματισμός πιθανόν ψαμμιτομαργαϊκός ή ψαμμιτικός. Στα 60 ως 80 m μέτρα και σε βάθος 5 ως 30 m της

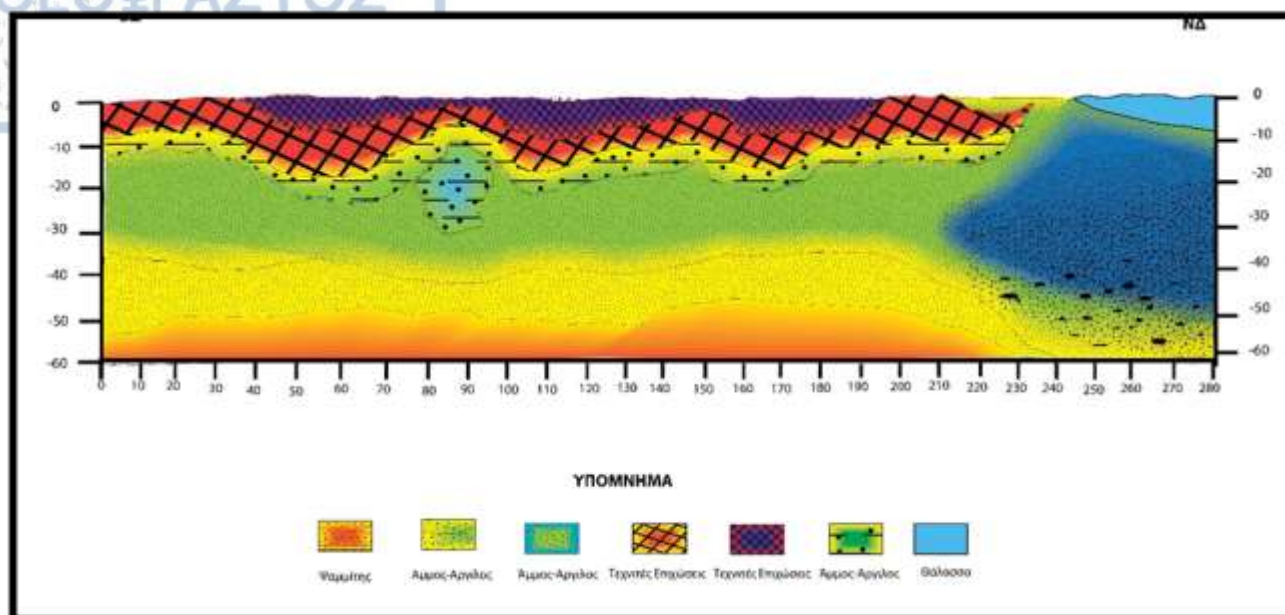
Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

τομής εντοπίζεται πιθανόν μια παλαιοκοίτη που συνίσταται από άμμους, χαλίκια και λιγότερο αργιλικό υλικό. Στα 100 περίπου μέτρα της τομής και από την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 10 m παρεμβάλλονται πιο αδρόκοκκα υλικά, πιθανόν χαλίκια. Από τα 130 m που ξεκινάει η υφάλμυρη ζώνη διακρίνονται αμμοχαλικώδες υλικό, ενώ περιβάλλεται φακός που στη σύστασή του επικρατεί η άργιλος.



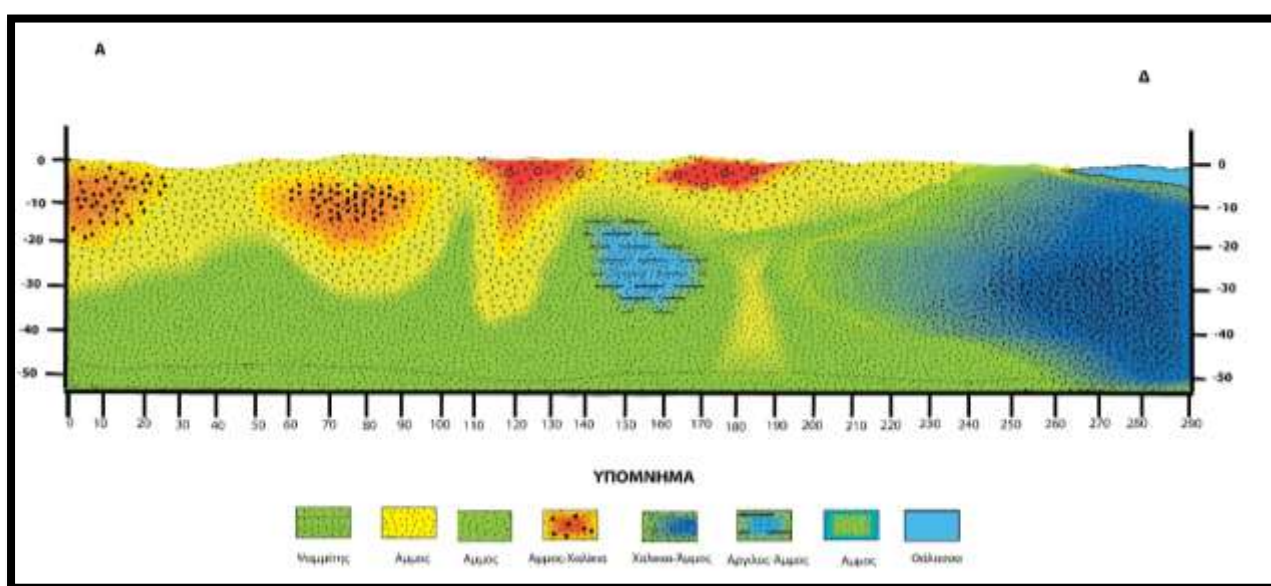
Σχήμα 10.2: Υδρολιθογεωφυσική τομή V1.

Στο σχήμα 10.3 το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης καλύπτει όλο το μήκος της τομής. Ο θόρυβος των τεχνητών επιχώσεων και το υποκείμενό τους στρώμα από άμμους και αργίλους καλύπτουν όλο το μήκος της τομής μέχρι την ακτογραμμή και συνιστούν την ακόρεστη ζώνη. Οι τεχνητές επιχώσεις βρίσκονται σε κυμαινόμενα βάθη από 5 ως 15 m, ενώ ο υποκείμενος σχηματισμός από 5 έως 25 m περίπου. Από τα 30 m βάθος και μετά πρόκειται πιθανόν για το ημιπερατό στρώμα του ψαμμιτομαργαϊκού ή ψαμμιτικού σχηματισμού που εντοπίστηκε και στην τομή του σχήματος 10.2.



Σχήμα 10.3: Υδρολιθογεωφυσική τομή Vt2.

Στην υδρολιθογεωφυσική τομή του σχήματος Vt3 είναι ευδιάκριτη η θαλάσσια διείσδυση από τα 190 m της τομής και μετά. Από την επιφάνεια και μέχρι το βάθος των 20 m διακρίνεται η ακόρεστη ζώνη που αποτελείται από άμμους και χαλίκια. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 10.4, οι υψηλότερες αντιστάσεις από το βάθος των 20 m και μετά αντιστοιχούν σε αμμόδη σχηματισμό επηρεασμένο από την ζώνη ανάμειξης γλυκού νερού από την παρακείμενη τροφοδοσία της λιμνοθάλασσας και της θαλάσσιας διείσδυσης. Τα τελευταία 10 μέτρα βάθους της τομής εμφανίζεται ο ημιπερατός ψαμμιτομαργαϊκός σχηματισμός.



Σχήμα 10.4: Υδρολιθογεωφυσική τομή Vt3.

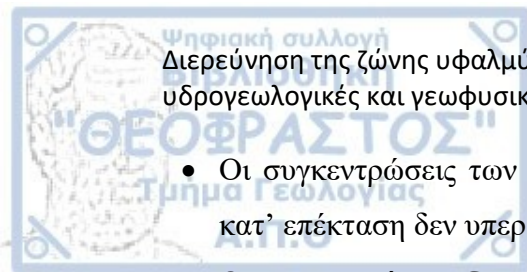
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τον Σεπτέμβριο του 2017 (ξηρή περίοδος) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων των υδρογεωτρήσεων της περιοχής μελέτης Βρασνών-Σταυρού που βρίσκεται ανατολικά του Ν. Θεσσαλονίκης. Η περιοχή αναπτύσσεται τουριστικά με ταχείς ρυθμούς. Οι υδρευτικές ανάγκες καλύπτονται αποκλειστικά από τις δημόσιες υδρογεωτρήσεις, ενώ οι αρδευτικές καλύπτονται από ιδιωτικές υδρογεωτρήσεις μικρού βάθους.

Σε όλη την έκταση του παράκτιου υδροφορέα διεξήχθησαν μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων σε 17 γεωτρήσεις ενώ αναλύθηκαν τα δείγματα που λήφθηκαν από 11 γεωτρήσεις για τα κύρια ιόντα. Επιπλέον διεξήχθησαν έξι μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης για τον προσδιορισμό του μετώπου υφαλμύρισης. Από τα αποτελέσματα της υδρογεωλογικής και γεωφυσικής έρευνας προκύπτουν συνοπτικά τα εξής συμπεράσματα:

Ο παράκτιος υδροφορέας της περιοχής διακρίνεται σε πορώδη, καρστικό και διαρρηγμένο. Ο πορώδης αναπτύσσεται εντός των τεταρτογενών αποθέσεων, ενώ ο καρστικός και ο διαρρηγμένος εντός των μαρμάρων και των βιοτιτικών γνευσίων της περιοχής, αντίστοιχα.

- Από τα διαγράμματα των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων παρατηρείται άνοδος της θερμοκρασίας και μείωση των βροχοπτώσεων αντίστοιχα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της τελευταίας δεκαετίας κυμαίνεται από 160-430 mm, ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία της τελευταίας δεκαετίας κυμαίνεται από 12.8 έως 15.2 °C.
- Σε όλο τον παράκτιο υδροφορέα η θερμοκρασία, το pH (ελαφρώς όξινο ως ελαφρώς αλκαλικό) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα με τα ολικά διαλυμένα στερεά αφενός τα μεν είναι εντός των φυσιολογικών ορίων και αφετέρου τα δε δεν υπερβαίνουν τα όρια της οδηγίας 60/2000 της Ε.Ε. για νερό ανθρώπινης κατανάλωσης. Οι τιμές των γεωτρήσεων **W_St1** και **W_St11** είναι οι υψηλότερες με αγωγιμότητα 960 και 1060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και ολικά διαλυμένα στερεά 615 και 680 mg/L, αντίστοιχα.
- Οι συγκεντρώσεις των **νιτρικών** είναι εντός των ορίων ποσιμότητας, καθώς δεν υπερβαίνουν το ανώτατο επιτρεπτό όριο των 50 mg/L της ευρωπαϊκής οδηγίας.



Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Οι συγκεντρώσεις των **θεικών** είναι επίσης εντός των φυσιολογιών ορίων και κατ' επέκταση δεν υπερβαίνουν το όριο των 250 mg/L της οδηγίας.
- Οι συγκεντρώσεις **Ca, Mg, K** και **Cl** είναι επίσης εντός των φυσιολογικών ορίων. Εξαίρεση αποτελεί η συγκέντρωση των χλωριόντων της γεώτρησης **W_St1** που θα συζητηθεί στη συνέχεια.

Πορώδης υδροφορέας

- Οι συγκεντρώσεις του Na^+ στις γεωτρήσεις **W_St1**, **W_St8**, **W-St11**, **W_Vr1** και **W_Vr3** ξεπερνούν το όριο των 46 mg/L σύμφωνα με τους Apello and Postman. Τις υψηλότερες τιμές έχει η **W_St1** και **W-St11** (159.4 και 120.1 mg/L αντίστοιχα) γεώτρηση.
- Ο υδροφορέας είναι υπό πίεση με πάχος που κυμαίνεται από 5-70 περίπου μέτρα ενώ ο ελεύθερος είναι στην περιοχή **W_St1** πάχους περίπου 50 m.
- Με βάση τη γεωφυσική έρευνα για την περιοχή του Σταυρού χαρτογραφήθηκε ακόρεστη ζώνη πάχους 50-40 m περίπου και την υδροφορία του παράκτιου υδροφορέα να ξεκινάει αμέσως μετά από αυτό το βάθος.
- Σύμφωνα με τα γεωφυσικά μοντέλα που παρήχθησαν για την περιοχή του Σταυρού, αποκαλύφθηκαν στο σύνολο πέντε ρήγματα, το ένα ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης, δύο ΒΒΑ-ΝΝΔ διεύθυνσης και δύο ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης που μπορούν να αποτελέσουν και πιθανές θέσεις για ανόρυξη νέων γεωτρήσεων.
- Για την περιοχή των Βρασνών σύμφωνα με τα γεωφυσικά μοντέλα το μέτωπο της υφαλμύρισης στις τομογραφίες **Vr2** και **Vr3** εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι τα 300 m από την ακτή ενώ στη **Vr1** σταματάει στα 150 m από την ακτή όπου συναντάει, τις υποκείμενες των παράκτιων αποθέσεων, αλλουβιακές αποθέσεις.

Καρστικός Υδροφορέας

- Όλα τα κυρίαρχα ιόντα βρίσκονται εντός των φυσιολογικών ορίων με υψηλές συγκεντρώσεις HCO_3^- και Ca^{2+} όπως αναμένεται σε ασβεστολιθικούς υδροφορείς
- Η ανάλυση των ιοντικών λόγων δείχνει ότι ο υδροφορέας βρίσκεται σε περιοχή εμπλουτισμού.
- Καμία απολύτως ένδειξη δεν υπάρχει για διείσδυση θαλασσινού νερού.
- Σύμφωνα με τη λιθολογική τομή της γεώτρησης το βάθος του καρστικού υδροφορέα ξεκινάει από τα 12 μέτρα περίπου.

Διερεύνηση της ζώνης υφαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Διαρρηγμένος Υδροφορέας

- Όλα τα κυρίαρχα ιόντα βρίσκονται εντός των φυσιολογικών ορίων. Καμία απολύτως ένδειξη δεν υπάρχει για υφαλμύριση, από διείσδυση θαλασσινού νερού.
- Σύμφωνα με τη λιθολογική τομή της γεώτρησης ο υδροφορέας αναπτύσσεται εντός ρηγματωμένης ζώνης του γνευσίου των Κερδυλλίων και ο οποίος εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους.
- Σύμφωνα με τη λιθολογική τομή της γεώτρησης το βάθος του διαρρηγμένου υδροφορέα ξεκινάει από τα 10 μέτρα περίπου.

Σύμφωνα λοιπόν με τα ανωτέρω η κατάσταση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων του παράκτιου υδροφορέα της περιοχής Βρασνών Σταυρού θεωρείται καλή.

Συνιστάται :

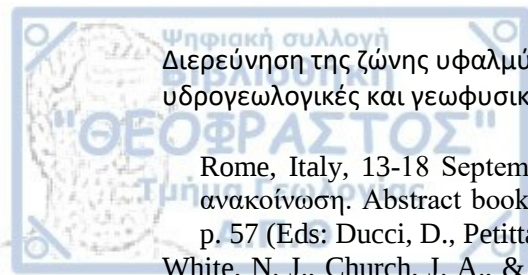
- Η συνεχής και συστηματική παρακολούθηση και περαιτέρω έρευνα της γεώτρησης W_St1 διότι ναι μεν δεν ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια των χλωριόντων και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλά βρίσκεται σε δυνητικό κίνδυνο συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών και τους ιοντικούς λόγους Cl/HCO_3 , Na/Ca αλλά και επειδή πρόκειται για γεώτρηση που έχει την μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.
- Υδρογεωλογική μελέτη για αναζήτηση νέων θέσεων γεωτρήσεων δεδομένου τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για υδροδότηση.
- Άμεση αποκατάσταση των πιεζομετρικών σωλήνων για παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aizebeokhai, A. P., & Oyeyemi, K. D. (2014). The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 364–376. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.023>
- Alexakis, D., Gotsis, D., & Giakoumakis, S. (2015). Evaluation of soil salinization in a Mediterranean site (Agoulinitsa district—West Greece). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1373–1383. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1279-0>
- Apello C., Postma D., (2005): *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd Ed. A.A. Balkema Publishers.
- Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera I., (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Cooper, M. (2010). *Advanced Bash-Scripting Guide*. An in-depth exploration of the art of shell scripting Table of Contents. Okt 2005 Abrufbar Über [Httpwww Tldp OrgLDPabsabsguide Pdf](http://www.tldp.org/LDP/absabsguide/Pdf) Zugriff 1112 2005, 2274(November 2008), 2267–2274. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Dahlin, T. (1997). *Geophysical Investigations of*, 9229098.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113–123. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005037>
- Daskalaki, P., & Voudouris, K. (2008). Groundwater quality of porous aquifers in Greece: A synoptic review. *Environmental Geology*, 54(3), 505–513. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0843-2>
- Dazy, J., Drogue, C., Charmanidis, P., & Darlet, C. (1997). The influence of marine inflows on the chemical compositions of groundwater in small islands: The example of the Cyclades (Greece). *Environmental Geology*, 31(3–4), 133–141. <https://doi.org/10.1007/s002540050172>
- Demek, J., (1972). *Manual of detailed geomorphological mapping*. Academia, Prague, pp. 344
- Dikau, R., (1989). The application of digital relief model to landform analysis. In Raper, J. (Ed.): *Three Dimensional Application in Geographic Information Systems*. pp: 51-77
- Edwards, L. S. (1977). A Modified Pseudosection for Resistivity and Ip. *Geophysics*, 42(5), 1020–1036. <https://doi.org/10.1190/1.1440762>
- El Moujabber, M., Bou Samra, B., Darwish, T., & Atallah, T. (2006). Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on the Lebanese coast. *Water Resources Management*, 20(2), 161–180.
- Ferguson, G., Gleeson, T. (2012). *Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change*.
- Fetter, C.W., (2001) “*Applied Hydrogeology*” Forth Edition, editions Pearson Education.
- Galazoulas, E. C., Mertzanides, Y. C., Petalas, C. P., & Kargiotis, E. K. (2015). Large Scale Electrical Resistivity Tomography Survey Correlated to Hydrogeological Data for Mapping Groundwater Salinization: A Case Study from a Multilayered Coastal Aquifer in Rhodope, Northeastern Greece. *Environmental Processes*, 2(1), 19–35. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0061-y>
- Garcia, C., & Servera, J. (2003). Impacts of Tourism Development on Water Demand and Beach Degradation on the Island of Impacts of Tourism Development on Water Demand and Beach Degradation on the Island of Mallorca (Spain). *Tourism*, 287–300. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2003.00206.x>
- Hamdan, H., Kritikakis, G., Andronikidis, N., Economou, N., Manoutsoglou, E., & Vafidis, A. (2010). Integrated geophysical methods for imaging saline karst aquifers. A case study of Stylos, Chania, Greece. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 13(6), 1–8.

Ψηφιακή συλλογή
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Διερεύνηση της ζώνης υπαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

- Hounslow, A., (1995). Water Quality Data., editions Lewis Publishers.
- Kazakis, N., Pavlou, A., Vargemezis, G., Voudouris, K. S., Soulios, G., Pliakas, F., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.041>
- Kura, N. U., Ramli, M. F., Ibrahim, S., Sulaiman, W. N. A., & Aris, A. Z. (2014). An integrated assessment of seawater intrusion in a small tropical island using geophysical, geochemical, and geostatistical techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(11), 7047–7064. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2598-0>
- Lambrakis, N. (2006). Multicomponent heterovalent chromatography in aquifers. Modelling salinization and freshening phenomena in field conditions. *Journal of Hydrology*, 323(1–4), 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.002>
- Lee, J.-Y., & Song, S.-H. (2007). Evaluation of groundwater quality in coastal areas: implications for sustainable agriculture. *Environmental Geology*, 52(7), 1231–1242. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0560-2>
- Martorana, R., Capizzi, P., D'Alessandro, A., & Luzio, D. (2017). Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. *Journal of Applied Geophysics*, 137, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.012>
- Mtoni, Y., Mjemah, I. C., Bakundukize, C., Van Camp, M., Martens, K., & Walraevens, K. (2013). Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania. *Environmental Earth Sciences*, 70(3), 1091–1111. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2197-7>
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLoS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Petalas CP (1997) Analysis of aquifer systems in the heterogeneous coastal plain of Rhodope region. PhD, University of Thrace, Department of Civil Engineering, Xanthi, Greece (in Greek).
- Petalas CP, Diamantis IB (1995) Investigation of the mechanism of seawater intrusion and hydrochemical conditions in the coastal aquifers of Rhodope. *Proc 3rd Hydrogeol Congr., Iraklio, Greece*, pp 323–334 (in Greek).
- Petalas, C. P., & Diamantis, I. B. (1999). Origin and distribution of saline groundwaters in the upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northeastern Greece. *Hydrogeology Journal*, 7(3), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s100400050204>
- Small, C. & Nicholls, R. J. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.* 19, 584599.
- Somay, M. A., & Gemici, Ü. (2009). Assessment of the salinization process at the coastal area with hydrogeochemical tools and geographical information systems (GIS): Selçuk plain, Izmir, Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, 201(1–4), 55–74. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9927-1>
- Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). Occurrence of Nitrate in Groundwater—A Review. *Journal of Environment Quality*, 22(3), 392.
- Todd, D. K., (1959). “Groundwater Hydrology”, editions John Wiley & Sons, Inc
- Tsourlos, P. (1995). Modelling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. University of York, (November), 294.
- Van Dam, J. C. (1976). Possibilities and limitations of the resistivity method of geoelectrical prospecting in the solution of geo-hydrological problems. *Geoexploration*, 14(3–4), 179–193. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(76\)90012-0](https://doi.org/10.1016/0016-7142(76)90012-0)
- Vengosh, A., Spivack, A.J., Artzi, Y., & Ayalon, A. (1999). Geochemical and boron, strontium, and oxygen isotopic constraints on the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean coast of Israel. *Water Resources Research*, 35(6), 1877–1894.
- Voudouris, K., Kazakis, N., Stratis, J. (2015): Groundwater quality in the wider area of Volos city, Greece. *AQUA 2015*, 42nd Congress of International Association of Hydrogeologists.



Διερεύνηση της ζώνης υπαλμύρισης στη παράκτια περιοχή Σταυρού-Βρασνών με υδρογεωλογικές και γεωφυσικές μεθόδους.

Rome, Italy, 13-18 September. Παρουσίαση με μορφή E-poster και 5-λεπτη προφορική ανακοίνωση. Abstract book, Rendiconti Online della Societa Geologica Italiana, Vol. 39, p. 57 (Eds: Ducci, D., Petitta, M., 2016).

White, N. J., Church, J. A., & Gregory, J. M. (2005). Coastal and global averaged sea level rise for 1950 to 2000. *Geophysical Research Letters*, 32(1), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021391>

Ελληνική Βιβλιογραφία

Α.Π.Θ., Σπυρίδης, Α. – Κουταλού, Β.Ο.Ε., “ΥΕΤΟΣ”, Περλέρος, Β., Λιόνης Μ. Λεβογιάννης, Μ.. Έργο έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπογείων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας. Αποτελέσματα λεκάνης Στρυμόνα.

Α.Π.Θ., Σπυρίδης, Α. – Κουταλού, Β., .Ο.Ε., “ΥΕΤΟΣ”, Περλέρος, Β., Λιόνης Μ. Λεβογιάννης, Μ.. Έργο: Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας, Θράκης και Θεσσαλίας. Αποτελέσματα λεκάνης Μυγδονίας.

Βαμβακάρης, Δ., (2004). Συμβολή στη σεισμοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής της Μυγδονίας λεκάνης Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Βουδούρης, Κ., Scheidleder, A., Δασκαλάκη, Π. (2005): Θαλάσσια διείσδυση σε παράκτια υπόγεια υδατικά συστήματα, λόγω υπεράντλησης και η Οδηγία 2000/60/ΕΚ. Υδροτεχνικά, Επιστημονικό περιοδικό της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Ειδική Έκδοση «Η Οδηγία 2000/60». Τόμος 15, Δεκέμβριος 2005, 75-86.

Βουδούρης Κ., (2009). Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος, Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Καλλέργης Γ.Α., (2000). Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. Τόμος Β΄. Έκδοση: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας .

Μουντράκης, Δ., Μ., (1985). Γεωλογία της Ελλάδας, εκδ. University Studio Press.

Παπαζάχος, Β., (1996). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Σούλιος, Γ., (2006). Γενική Υδρογεωλογία Τόμος 4. University Studio Press.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2018). Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας.

Διαδικτυακές Πηγές:

- <http://wfdver.ypeka.gr/el/geoportal-gr/>
- <http://geodata.gov.gr>
- <https://earthexplorer.usgs.gov>
- <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>