



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ (ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ,
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών σε υδροφορείς της
Μεσσαράς»

Μπουτσάκης Κωνσταντίνος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής (επιβλέπων)

Στειακάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής

Βουδούρης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής (ΑΠΘ)

Χανιά, Μάιος, 2016

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Ευχαριστίες

Η εν λόγω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και μολονότι είναι ατομική, ωστόσο είναι αποτέλεσμα συλλογικής προσπάθειας. Έτσι, φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ για την επιλογή του θέματος, για τη βοήθεια και καθοδήγησή που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την άριστη συνεργασία που αναπτύξαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, τον καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο και την κ. Παπαχρήστου Μαρία για το χρόνο τον οποίο παρείχαν για τις διορθώσεις της παρούσας εργασίας καθώς και για τις συμβουλές τους, τις πολύτιμες επισημάνσεις τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους. Τέλος, Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Σπανουδάκη Νικόλαο για την αμέριστη βοήθεια που παρείχε επιλύοντας απορίες και βγάζοντάς με από πολλά αδιέξοδα σε όλο το διάστημα συγγραφής της εργασίας.

Εκ μέρους του κ. Μανούτσογλου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μαρίνο Κριτσωτάκη, Διευθυντή στην Διεύθυνση Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης, για την διάθεση των πρώτων στοιχείων και πληροφοριών σχετικά με τις γεωτρήσεις. Τους γεωτρυπανιστές της περιοχής κ.κ. Ε. Χουστουλάκη και Ν. Γιαμπουλάκη για την αμέριστη συμπαράστασή τους και το ενδιαφέρον τους. Τον Δήμαρχο του Δήμου Αρχανών Αστερουσίων κ. Ε. Κοκοσάλη για το έμπρακτο ενδιαφέρον του και την διάθεση των συνεργατών του. Επίσης εκ μέρους του κ. Μανούτσογλου οφείλω να ευχαριστήσω τη διεύθυνση και το προσωπικό του εργαστηρίου ΜΗΠΕΡ (HERS LAB TUC) και πιο συγκεκριμένα: τον καθηγητή κ. Νίκο Νικολαΐδη που επέτρεψε την χρήση των εργαστηριακών οργάνων για τις απαραίτητες χημικές αναλύσεις των υδάτων καθώς και τις κυρίες Maria Liliana Saru και Δρ. Στέλλα Βουτσαδάκη για την άμεση διεξαγωγή των αναλύσεων καθώς και τις πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις μεθοδολογίες των αναλύσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου παρείχαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί στόχο σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες για τον εντοπισμό, τη συστηματική καταγραφή και εν μέρει αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού στον ελληνικό χώρο. Παρόλα αυτά όμως ελάχιστα είναι τα στοιχεία σχετικά με πιθανά γεωθερμικά πεδία στην Κρήτη. Πέρα από κάποιες ενδείξεις στην Ανατολική και Δυτική Κρήτη, στην Κεντρική Κρήτη στην ευρύτερη περιοχή της Μεσσαράς έχουν εντοπιστεί αυξημένες θερμοκρασίες σε υδρογεωτρήσεις. Η αυξημένη θερμοκρασία των υδάτων των υδρογεωτρήσεων, που έχει μετρηθεί και καλοκαιρινούς (ξηρή περίοδος) αλλά και σε χειμερινούς μήνες (υγρή περίοδος) παραπέμπει σε πιθανή ύπαρξη γεωθερμικών πεδίων στην ευρύτερη περιοχή.

Στα πλαίσια της περαιτέρω αναζήτησης στοιχείων σχετικών με τα πιθανά γεωθερμικά πεδία στην Κρήτη πάρθηκαν δείγματα για αναλύσεις ανόργανων στοιχείων από επτά γεωτρήσεις στην περιοχή της Μεσσαράς. Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται αρχικά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων: του χημισμού, τον χαρακτηρισμό των υδάτων και την σύγκριση τους μεταξύ δυο διαφορετικών περιόδων (ξηρής και υγρής), ενώ με υποστήριξη πληθώρας γεωλογικών στοιχείων γίνεται χρήση των δεδομένων αυτών σε συγκεκριμένα γεωθερμόμετρα. Οι δύο πιθανοί γεωθερμικοί ταμιευτήρες εντοπίζονται εντός των αλπικών σχηματισμών και πολύ πιθανώς εντός των ανθρακικών σχηματισμών της Ζώνης της Τρίπολης.

Συμπερασματικά οι τιμές που προέκυψαν από τις μετρήσεις, αναλύσεις και την επεξεργασία τους μπορούν να συνοψιστούν ως ακολούθως:

Μετρήσεις θερμοκρασιών υδάτων υδρογεωτρήσεων:

Περί 1 (6/2015): 20,9 °C, (2/2016): 20,7 °C,

Περί 2 (6/2015): 27,3 °C, (2/2016): 27,7 °C,

Περί 3 (6/2015): 22,4 °C, (2/2016): 22,0 °C,

Πλάτανος 1 (6/2015): 26,4 °C, (2/2016): 27,6 °C,

Πλάτανος 2 (6/2015): 21,4 °C, (2/2016): 22,1 °C,

Μελιδοχώρι 1 (7/2015): 23,1 °C, (2/2016): 23,2 °C,

Μελιδοχώρι 2 (7/2015): 23,5 °C, (2/2016): 24,8 °C

- Οι τιμές του pH την ξηρή περίοδο στις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 7.25 έως 8.04, ενώ την υγρή περίοδο κυμαίνονται από 7.33 έως 7.76, επομένως το νερό χαρακτηρίζεται αλκαλικό και προέρχονται από μια "νέα" σχετικά υδάτινη μάζα.
- Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις δειγματοληψίες και όσο αφορά όλες τις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 694-1987 $\mu\text{S}/\text{cm}$, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένες ποσότητες αλάτων στο νερό.
- Σύμφωνα με τη σκληρότητα το νερό χαρακτηρίζεται στη γεώτρηση Πλάτανος 2 ως μέτρια σκληρό ενώ στις υπόλοιπες σκληρό.
- Με βάση τις τιμές του συντελεστή Revelle το υπόγειο νερό χαρακτηρίζεται ως καλό χωρίς θαλάσσια διείσδυση.
- Από τις τιμές του λόγου Na/K, στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου, στις γεωτρήσεις Περί 1, Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό και στις γεωτρήσεις Πλάτανος 1 το νερό βρίσκεται σε περιοχή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί (1, 2 και 3) και Μελιδochώρι 1 βρίσκονται σε περιοχή εκφόρτισης λόγω προσρόφησης Na^+ και στη γεώτρηση Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό.
- Οι τιμές του λόγου Mg/Ca είναι μικρότερες από 0,7 επομένως δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση, επίσης το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή της γεώτρησης Πλάτανος 2 που είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, επομένως το νερό προέρχεται από υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} .
- Σύμφωνα με το λόγο Cl/SO_4 στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου το νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως θειούχο-χλωριούχο στις γεωτρήσεις Περί 2, Μελιδochώρι 1 και Μελιδochώρι2 ενώ στις γεωτρήσεις Περί 1, Περί 3, Πλάτανος 1 και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί 1, Περί 3 και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο ενώ στις υπόλοιπες ως θειούχο-χλωριούχο.
- Ο λόγος $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ είναι πάνω από τη μονάδα σε όλες τις γεωτρήσεις των δυο δειγματοληψιών και υποδεικνύει ότι υπάρχει υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία.

Σχετικά με τις τιμές των πιθανών γεωθερμικών ταμιευτήρων χρησιμοποιήθηκαν διάφορα γεωθερμόμετρα που έχουν προταθεί διαχρονικά:

- Από την χρήση των γεωθερμομέτρων Na/K, στην περιοχή Μελιδοχώρι, προέκυψαν τιμές του πιθανού γεωθερμικού ταμιευτήρα στο εύρος των 70-170°C, ενώ στην περιοχή Περί - Πλάτανος προέκυψαν στο εύρος των 90-380°C. Ο τύπος αυτός των γεωθερμομέτρων όμως δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για τιμές πάνω από 120°C.
- Με χρήση γεωθερμομέτρων K/Mg, στην περιοχή Μελιδοχώρι, προέκυψαν τιμές θερμοκρασίας του πιθανού ταμιευτήρα 70-90°C και στην περιοχή Περί - Πλάτανος προέκυψαν στο εύρος των 50-90°C. Τα δείγματα από τις ανωτέρω περιοχές όμως περιέχουν συγκεντρώσεις Mg^{2+} αρκετά μεγαλύτερες από το όριο του 1 ppm.
- Παραπλήσια προβλήματα υπάρχουν και με τα γεωθερμόμετρα πυριτίου, τα οποία και δίνουν πολύ υψηλές τιμές θερμοκρασιών στους πιθανούς ταμιευτήρες με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 170°C.

Καταλήγοντας, το πιο αξιόπιστο γεωθερμόμετρο θεωρούμε ότι είναι αυτό του Na-K-Ca, το οποίο μετά από τις προτεινόμενες διορθώσεις στις τιμές του μαγνησίου, οι τελικές τιμές ενός πιθανού ταμιευτήρα στην ευρύτερη περιοχή Περί – Πλάτανος υπολογίζονται στους 60°C και του πιθανού ταμιευτήρα στην περιοχή Μελιδοχωρίου στους 50°C.

Abstract

The utilization of renewable energy sources is aimed globally. In recent years, considerable efforts have been made to identify, systematically record and partly exploit the geothermal resources in the Greek area. Despite this, there are only few data on the potential geothermal fields in Crete. Apart from some evidence in Eastern and Western Crete, in the region of Messara in Central Crete, have been noted increased temperatures in water wells. The increased temperature of the waters in drillings, that has been measured both in summer time (dry season) and in winter time (wet season), is an indicator of the existence of geothermal fields in this particular region of Messara.

In the search for further information on the potential geothermal fields in Crete, samples have been collected of seven wells in the Messara region for geochemical analysis. The present diplomatic thesis firstly deals with the presentation of the results of the analysis of the chemistry, the characterization of the water quality and the comparison between two different periods (dry and wet). At the same time, with the support of geological data, specific geothermometers are utilized. The two potential geothermal reservoirs are located within the Alpine formations and may well also within the carbonate formations of the Tripolis Zone.

In conclusion, the values that resulted from the measurements, analyses and calculations can be summarized as follows:

Measurements of water temperatures of wells:

Peri 1 (6/2015): 20,9 °C, (2/2016): 20,7 °C,
Peri 2 (6/2015): 27,3 °C, (2/2016): 27,7 °C,
Peri 3 (6/2015): 22,4 °C, (2/2016): 22,0 °C,
Platanos 1 (6/2015): 26,4 °C, (2/2016): 27,6 °C,
Platanos 2 (6/2015): 21,4 °C, (2/2016): 22,1 °C,
Melidochori 1 (7/2015): 23,1 °C, (2/2016): 23,2 °C,
Melidochori 2 (7/2015): 23,5 °C, (2/2016): 24,8 °C

- The range of the values of pH during the dry season in wells is varies from 7.25 to 8.04, while during the wet season varies from 7.33 to 7.76. Therefore, water is characterized as alkaline and emanates from a "new" relatively aquatic mass.

- The range of the values of electrical conductivity in the samplings regarding all drillings varies from 694-1987 mS/cm. That indicates increased quantities of salts in water.
- In accordance with the water hardness, the water in well Platanos 2 is characterized as ‘moderately hard’ while in the other wells as ‘hard’.
- Based on the Revelle coefficient values the groundwater is characterized as ‘good without seawater penetration’.
- From the Na / K ratio values, sampled during the wet season, in wells Peri 1, Platanos 2 water is described as ‘meteoric’ and in well Platanos 1 water is in the aquifer recharge area. In contrast with the above, the sample of the water in the wells Peri (1, 2 and 3) and in Melidochori 1 during the dry period, are in discharge area by adsorption Na^+ and in well Platanos 2 water is designated as ‘meteoric’.
- The Mg/Ca ratio values are less than 0.7 so there is no sea water penetration and water also comes from limestone aquifers, excepting the value of well Platanos 2 which is slightly greater than one. That means that the water comes from ophiolitic aquifers formations or generally silicate-rich Mg^{2+} .
- According to the ratio Cl/SO_4 in the sample collected during the wet period, water can be characterized as ‘sulphide-chloride’ in the drillings of Peri 2, Melidochori 1 Melidochori 2. In the wells Peri 1, Peri 3, Platanos (1 and 2) water is characterized as ‘chloroSulphenated’ . In the sample collected during the dry season, water in wells Peri 1, Peri 3 and Platanos 2 is characterized as ‘chloroSulphenated’ , whereas in the others as ‘sulphide-chloride’.
- The ratio of $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ is above one to all wells in both samples taken and indicates that there is an aquifer with constant recharge.

The temperature of the potential geothermal reservoirs resulted utilizing various standard geothermometers:

- In the area of Melidochori, the range of the values of the potential geothermal reservoir is 70-170°C and was a result of the use of geothermometers Na/K. In the area of Peri – Platanos, the range of the values of the potential geothermal reservoir 90-380°C. This type of the geothermometers that were used, provides reliable results for values above 180°C.

- Using geothermometers K/Mg, in the area of Melidochori, the resulting values of the potential reservoir temperature were 70-90°C and in the areas of Peri and Platanos were in the range of 50-90°C. Samples of these areas contain Mg^{2+} concentrations exceeding the level of 1 ppm.
- Similar issues occur also with the silicon geothermometers, resulting very high temperature values to the potential reservoirs with maximum temperature up to 170°C.

In conclusion, we consider that the most reliable geothermometer is that of the Na-K-Ca. After the suggested corrections in the magnesium values, the temperature of a potential reservoir in the area of Peri - Platanos are estimated at 60°C and in the area of Melidochori at 50°C.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	i
Abstract	iv
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	14
Κεφάλαιο 2: Γεωλογικό περίγραμμα	18
2.1 Γενικά	18
2.2 Η λεκάνη της Μεσσαράς	25
Κεφάλαιο 3: Υδρογεωλογία	35
3.1 Γενικά	35
3.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης Μεσσαράς	36
3.2.1 Νεογενής υδροφορέας	38
3.2.2 Πλειστοκαινικός υδροφορέας (σχηματισμός Αγ. Γαλήνης)	38
3.2.3 Αλλουβιακός υδροφορέας	38
3.3 Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς.	40
Κεφάλαιο 4: Γεωθερμία	41
4.1 Βιβλιογραφική έρευνα για τη μελέτη γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας	43
4.2 Μονάδες μέτρησης	44
4.2.1 Parts Per Million (ppm)	45
4.2.2 mol/L	45
4.2.3 meq/L	46
4.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά ρευστού	46
4.4 Χημικές Παράμετροι	51
4.5 Ιοντικοί λόγοι	54
4.6 Υδροχημικά διαγράμματα	57

4.6.1	Τριγραμμικά διαγράμματα (Piper).....	57
4.6.2	Διάγραμμα Durov	58
4.6.3	Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (Redox potential).....	59
4.6.4	Διάγραμμα Wilcox.....	61
4.6.5	Διάγραμμα Ludwig Langelier.....	62
4.6.6	Διάγραμμα Schoeller	63
4.6.7	Τριγωνικό διάγραμμα Mg-Ca-Na	64
4.6.8	Τριγωνικό διάγραμμα Giggenbach	65
4.7	Γεωθερμομετρία ρευστών	66
4.7.1	Γεωθερμόμετρο Na/K	67
4.7.2	Γεωθερμόμετρο Na/K/Ca.....	68
4.7.3	Γεωθερμόμετρο K/Mg	70
4.7.4	Γεωθερμόμετρο πυριτίου	70
4.7.5	Γεωθερμόμετρο Na-Li	71
Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία για την περιοχή μελέτης.....		72
5.1	Εργασίες στο πεδίο.....	73
5.2	Δειγματοληψία και ανάλυση γεωθερμικών ρευστών.....	74
Κεφάλαιο 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		82
6.1	Υπολογισμός ιοντικών λόγων	82
6.2	Υδροχημικά διαγράμματα.....	89
6.2.1	Διάγραμμα Piper	89
6.2.2	Διάγραμμα Durov	91
6.2.3	Διάγραμμα Ludwig Langelier.....	92
6.2.4	Διάγραμμα Giggenbach	93
6.2.5	Τριγωνικά διαγράμματα.....	94
6.2.6	Διαγράμματα διασποράς.....	96
6.2.7	Διάγραμμα Wilcox.....	98

6.3	Αξιολόγηση γεωτρήσεων	98
6.4	Γεωθερμομετρία.....	106
Κεφάλαιο 7: Συζήτηση		115
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα		118
Βιβλιογραφία		122
	Διεθνής.....	122
	Ελληνική	124
Παράρτημα.....		126
Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων με το λογισμικό AquaChem 2014, Trial Version		126

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση των νερών με βάση τη σκληρότητα (από Καλλέργη, 2000).	50
Πίνακας 4.2: Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης ρευστού από τη θάλασσα διείσδυση (από Καλλέργη 2000).	54
Πίνακας 4.3: Εξισώσεις γεωθερμόμετρου Na/K	67
Πίνακας 4.4: Εξίσωση γεωθερμόμετρου Na/K/Ca.	69
Πίνακας 4.5: Εξίσωση γεωθερμόμετρου K/Mg.....	70
Πίνακας 5.1: Επιτόπιες θερμοκρασίες ρευστών γεωτρήσεων.	74
Πίνακας 5.2: Δεδομένα γεωτρήσεων και αποτελέσματα χημικών αναλύσεων.	80
Πίνακας 6.1: Υπολογισμός ιοντικών λόγων.	83
Πίνακας 6.2: Υπολογισμός διάφορων παραμέτρων.	86
Πίνακας 6.3: Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης ρευστού από τη θάλασσα διείσδυση (πηγή: Καλλέργη 2000).	87
Πίνακας 6.4: Εκτιμώμενες θερμοκρασίες με βάση τα γεωθερμόμετρα Na/K.....	108
Πίνακας 6.5: Εκτιμώμενες θερμοκρασίες σύμφωνα με τα γεωθερμόμετρα K-Mg, Na-K-Mg και SiO ₂	112

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενοτήτων στην Κρήτη (τροποποιημένη από Seidel et al., 1982).	20
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της Κρήτης, με τις μεγαλύτερες ομάδες σχηματισμών του Νεογενούς και το προνεογενές υπόβαθρο (αδιαίρετο). Παρουσιάζεται η μεταξύ τους σχέση όσο αναφορά τη κατακόρυφη και οριζόντια θέση αλλά και την αλληλοπαρεμβολή τους (Meulenkamp, 1979).	23
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Piper (από Σούλιο, 2006).	58
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Durov (από Σούλιο, 2006).	59
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Eh-pH (από Βουδούρη, 2009).....	60
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Wilcox (από Σούλιο, 2006).	62
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Ludwig Langelier (από Σούλιο, 2006).	63
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Schoeller (από Παρασκάκη 2014).....	64

Σχήμα 4.7: Τριγωνικό διάγραμμα κατιόντων.	65
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Giggenbach, 1988.....	66
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα Piper.....	89
Σχήμα 6.2: Διάγραμμα Durov.....	91
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα Ludwig Langelier.	92
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα Giggenbach.....	93
Σχήμα 6.5: Τριγωνικό διάγραμμα κατιόντων.	94
Σχήμα 6.6: Τριγωνικό διάγραμμα ανιόντων.	95
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα διασποράς Na-Cl.	96
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα διασποράς pH-Eh.	97
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα Wilcox.	98
Σχήμα 6.10: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Περί.	101
Σχήμα 6.11: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Πλάτανος.	103
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Μελιδοχώρι.....	106
Σχήμα 6.13: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την ξηρή περίοδο.....	109
Σχήμα 6.14: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την υγρή περίοδο.....	109
Σχήμα 6.15: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την ξηρή περίοδο.....	110
Σχήμα 6.16: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την υγρή περίοδο.....	110
Σχήμα 6.17: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα κατά την ξηρή περίοδο.	113
Σχήμα 6.18: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα κατά την υγρή περίοδο.	113
Σχήμα 6.19: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση διαφόρων τύπων γεωθερμομέτρων κατά την ξηρή περίοδο.	114
Σχήμα 6.20: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση διαφόρων τύπων γεωθερμομέτρων κατά την υγρή περίοδο.	114

Κατάλογος Εικόνων

<i>Εικόνα 1.1: Χάρτης με γεωλογικά στοιχεία και περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα (από Mendrinou et al., 2010).</i>	16
<i>Εικόνα 1.2: Γεωθερμικές περιοχές στην Ελλάδα (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών).</i>	17
<i>Εικόνα 2.1.: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς (Ι.Γ.Μ.Ε.).</i>	18
<i>Εικόνα 2.2.: Οι εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων και του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Πελοπόννησο και Κρήτη (Dornsiepen et al., 2001).</i>	19
<i>Εικόνα 2.3: (α)-(ε) απλοποιημένα μπλοκ-διαγράμματα που αντιπροσωπεύουν την τεκτονική εξέλιξη της λεκάνης της Μεσσαράς, ως αποτέλεσμα της, οι τρεις ομάδες ρηγμάτων. Οι περιφερειακές τάσεις του πεδίου παρουσιάζονται και τα συνδεδεμένα πρότυπα ρηγμάτων. Τα ανοικτά βέλη δείχνουν τους άξονες σ₃, ενώ, τα μαύρα βέλη δείχνουν τους άξονες σ₂. Να σημειωθεί ότι ο βορράς είναι προς την πάνω-αριστερή γωνία. (δ) Οι πρόσφατες (Τεταρτογενή ως σήμερα) κατακόρυφες κινήσεις στην Κρήτη (Fassoulas 2001).</i>	24
<i>Εικόνα 2.4: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (εποπτικός, από του χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. κλίμακας 1:50.000).</i>	25
<i>Εικόνα 2.5: Γεωλογικές χάρτης του μεγαλύτερου τμήματος της λεκάνης της Μεσσαράς και οι θέσεις αντιπροσωπευτικών γεωλογικών τομών διαφόρων διευθύνσεων (κατά Peterek & Schwarze, 2004).</i>	28
<i>Εικόνα 2.6: Γεωλογικές τομές B1-4 με τις αντίστοιχες ερμηνείες των γεωλογικών δομών μεταξύ των ορεινών όγκων του Ψηλορείτη και των Αστερουσίων (κατά Peterek & Schwarze, 2004).</i>	29
<i>Εικόνα 2.7: Σχηματική τομή σε όλη την νότιο-κεντρική Κρήτη αποτυπώνουν την ερμηνεία της σύνθετης τάφρου της Μεσσαράς, που μετατοπίστηκε κατά μήκος του ρήγματος του νότιου Ψηλορείτη. Τόσο η λεκάνη της Μεσσαράς όσο και το μπλοκ των Αστερουσίων ερμηνεύονται ως κατερχόμενο ρηξιτέμαχος σε αντίθεση με το ανερχόμενο ρηξιτέμαχος του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη στο οποίο παρατηρείται ασύμμετρη ανύψωση (κατά Peterek & Schwarze, 2004).</i>	30
<i>Εικόνα 2.8: Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη φύλλο Τυμπάκιον σε κλίμακα 1:50.000 και οι θέσεις των γεωτρήσεων.</i>	31
<i>Εικόνα 2.9: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη φύλλο Τυμπάκιον σε κλίμακα 1:50.000.</i>	32
<i>Εικόνα 2.10: Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη φύλλο Επάνω Αρχάναι με την θέση της περιοχής στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες (Βιδάκης et al., 1992).</i>	33

<i>Εικόνα 2.11: Υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη φύλλο Επάνω Αρχάναι σε κλίμακα 1:50.000.</i>	34
<i>Εικόνα 3.1: Διαφορετικοί τύποι υδρογεωλογικών ορίων (από Βουδούρης, 2015).</i>	36
<i>Εικόνα 3.2: Υδρολιθολογικός Χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Περιφέρεια Κρήτης, 2009).</i>	37
<i>Εικόνα 3.3: Αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας, Λεκάνη Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).</i>	40
<i>Εικόνα 3.4: Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).</i>	41
<i>Εικόνα 5.1: Η θέση της γεώτρησης Περί 1 και Περί 3.</i>	75
<i>Εικόνα 5.2: Η θέση της γεώτρησης Περί 2.</i>	75
<i>Εικόνα 5.3: Η θέση της γεώτρησης Πλάτανος 1.</i>	76
<i>Εικόνα 5.4: Η θέση της γεώτρησης Πλάτανος 2.</i>	76
<i>Εικόνα 5.5: Η θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.</i>	77
<i>Εικόνα 5.6: Διεύθυνση κλίσης και παράταξης του κάτοπτρου του ρήγματος στην θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.</i>	77
<i>Εικόνα 5.7: Η θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 2.</i>	78
<i>Εικόνα 5.8: Η θέση του υδραγωγείου ανατολικά της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.</i>	78
<i>Εικόνα 5.9: Τομή γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.</i>	79
<i>Εικόνα 8.1: Σχηματικό διάγραμμα ροής κατά μήκος μιας ρηγματογόνου ζώνης. Επιφανειακό νερό αλλά και των υδροφορέων κατεισδύει από την ορεινή περιοχή στη ζώνη του ρήγματος στη βάση της οροσειράς. Στη συνέχεια, θερμαίνεται εξαιτίας της γεωθερμικής βαθμίδας και πλέον ως θερμό νερό ανεβαίνει, μέσω των δυνάμεων της άνωσης, κατά μήκος του ρήγματος στην επιφάνεια, όπου μπορεί και να αναδυθεί.</i>	119

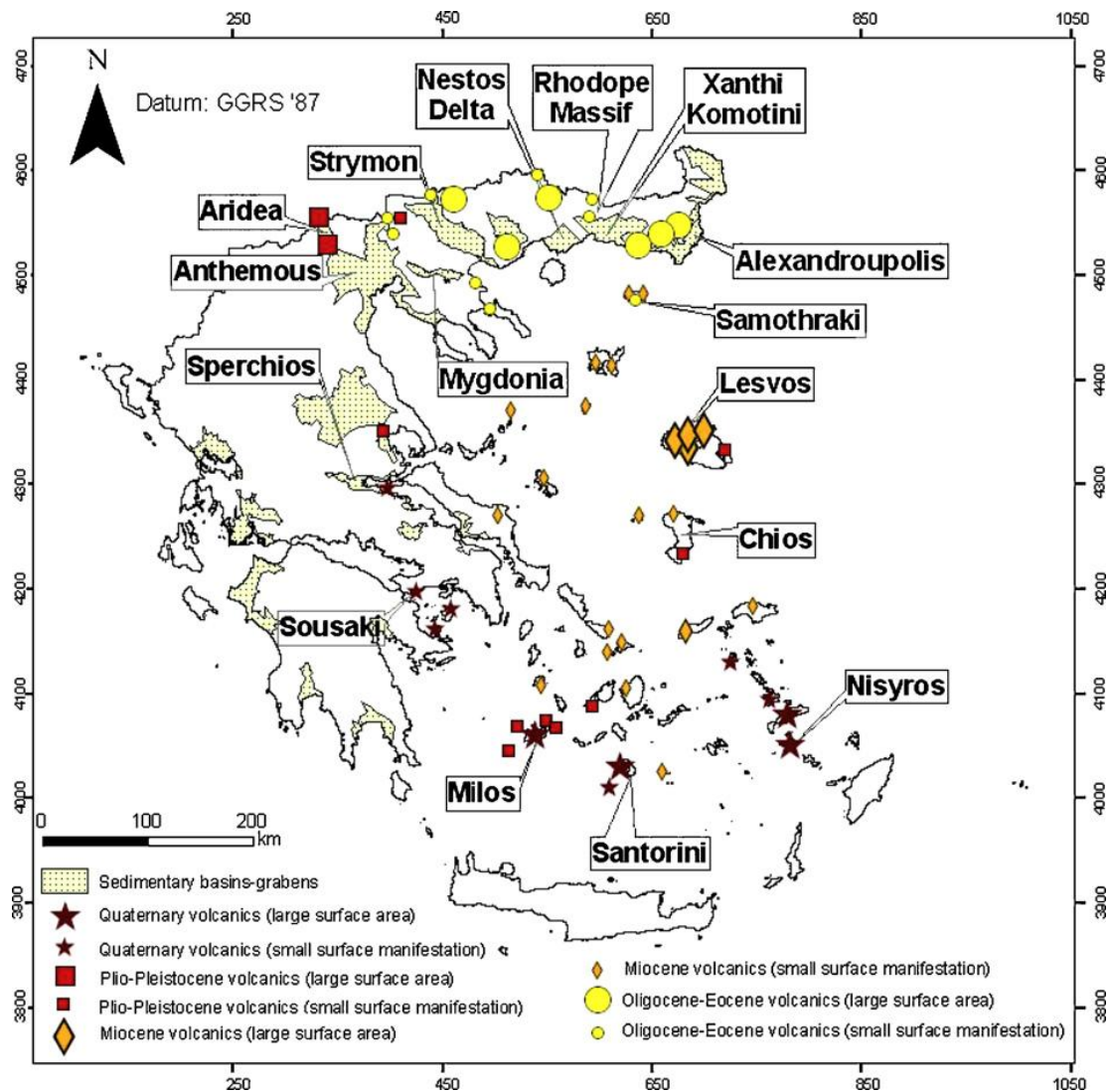
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το νησί της Κρήτης βρίσκεται πάνω στο εξωτερικό τόξο, πάνω από την ζώνη καταβύθισης της αφρικανικής πλάκας που υποβυθίζεται προς τον βορρά κάτω από την πλάκα του Αιγαίου. Το κυρτό Ελληνικό εξωτερικό τόξο ξεκινάει από την δυτική ελληνική ηπειρωτική χώρα έως τα δυτικά παράλια της Τουρκίας στα ανατολικά. Αρκετές υποθαλάσσιοι τάφροι προσανατολισμένοι κάθετα προς το τόξο και παράλληλα με τα όρια της τεκτονικής πλάκας υποδιαίρουν το τόξο σε μια αλυσίδα νησιών. Η Κρήτη βρίσκεται στην εξωτερική κορυφή του εξωτερικού τόξου. Η τοπογραφία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από ένα εξαιρετικά ορεινό τοπίο που υποδηλώνει μάλλον νέα και γρήγορη ανύψωση που ενισχύεται από το γεγονός ότι θαλάσσιες αποθέσεις του Νεογενούς (Μέσο Μειόκαινο) αλλά ακόμα και του Ανώτερου Πλειόκαινου που έχουν ανυψωθεί έως και αρκετές εκατοντάδες μέτρα πάνω από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας (Meulenkamp et al., 1988, 1994).

Ένας μεγάλος αριθμός επιφανειακών τεκτονικών ρηγμάτων τονίζουν την ουσιαστική συμβολή της έντονης τεκτονικής δραστηριότητας τόσο στην ίδια την επιφάνεια και στην εξέλιξη του τοπίου. (Bonnefont, 1971; Angelier, 1979; Stewart, 1993; Armijo et al., 1992). Από το γεωλογική καταγραφή τόσο των πετρωμάτων του υποβάθρου της Κρήτης (Kiliyas et al., 1994; Jolivet et al., 1996; Thomson et al., 1998), όσο και των ανυψωμένων Νεογενών λεκανών (Angelier, 1979; Meulenkamp, 1979; Meulenkamp et al., 1977, 1988, 1994; ten Veen and Meijer, 1998; Fassoulas, 2001), καταγράφεται μία τεκτονική εξέλιξη πολλών φάσεων, καθώς και του νοτιότερου τμήματος του Ελληνικού τόξου, από όταν ξεκίνησε η διαδικασία της καταβύθισης κατά το Ανώτερο Ολιγόκαινο (Thomson et al., 1998). Η ενεργός τεκτονική που είναι έκδηλη μέχρι πρόσφατα στην Κρήτη έχει δημιουργήσει όλες τις προϋποθέσεις ώστε το νησί να χρίζει ερευνών στον ευρύτερο χώρο των γεωθερμικών πεδίων (Peterek and Schwarze 2004, και βιβλιογραφικές αναφορές εντός αυτών). Η Ελλάδα, όπως αρκετές άλλες Μεσογειακές χώρες όπως η Ιταλία και η Τουρκία, είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια.

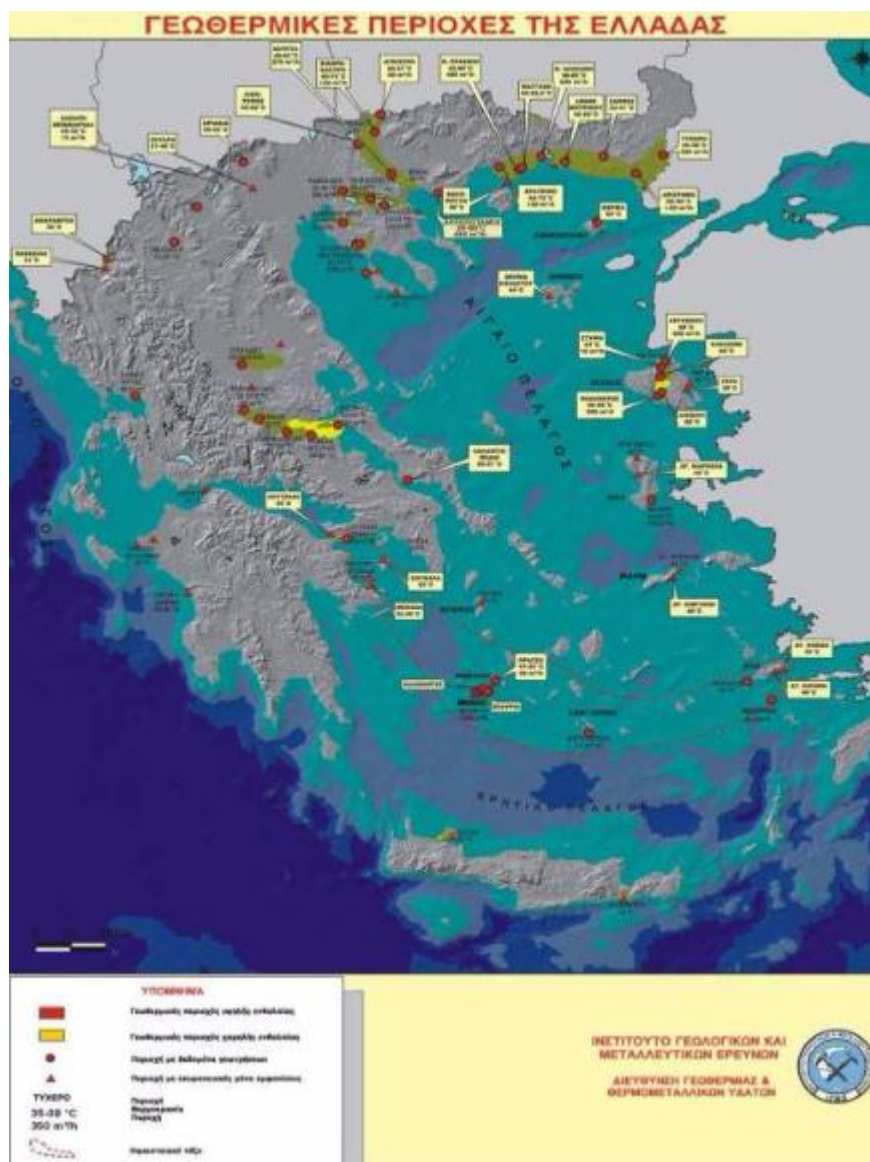
Η γεωθερμική ενέργεια, αν και δεν ήταν γνωστή με αυτό το όνομα χρησιμοποιήθηκε στις απλές τις εκδηλώσεις ήδη από προϊστορικές χρονικές περιόδους, αφού η χρήση των θερμών και ιαματικών πηγών ανάγονται σε αυτές τις περιόδους. Ωστόσο η συστηματική εξερεύνηση του γεωθερμικού δυναμικού της Ελλάδας, ξεκίνησε μόλις στις αρχές της

δεκαετίας του 1970 και πραγματοποιήθηκε κυρίως από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.). Αυτές οι προσπάθειες εξερεύνησης εστίασαν κυρίως σε περιοχές οι οποίες σχετίζονται με το νότιο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Μήλος, Νίσυρος, Μέθανα, Σουσάκι κ.ά.) καθώς και στο νησί της Λέσβου (παρατηρήστε το γεωθερμικό χάρτη της Ελλάδας στο σχήμα 1.1). Οι δραστηριότητες εξερεύνησης συνεχίστηκαν και κατά τη διάρκεια των δεκαετιών του 1980 και 1990, επικεντρώθηκαν δε σε κάποιες αρκετά υποσχόμενες περιοχές στην Ανατολική Μακεδονία, Θράκη και σε κάποια νησιά. Στο τέλος της δεκαετίας του 70, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) εξέφρασε ενδιαφέρον για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από το υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικό πεδίο της Μήλου. Έπειτα από εκτενείς και επιτυχημένες προσπάθειες εξερεύνησης, κατασκευάστηκε στη Μήλο το 1985 μια γεωθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού των 2 MWe, που λειτουργούσε περιοδικά έως το 1989, όταν και τερματίστηκε η λειτουργία της λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων (τα οποία, ωστόσο, θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με επιτυχία) και περιβαλλοντολογικών διαμαρτυριών από τους κατοίκους του νησιού (κυρίως για τις εκπομπές H_2S στο περιβάλλον). Από τότε καμία προσπάθεια δεν πραγματοποιήθηκε για την εκμετάλλευση του μεγάλου δυναμικού υψηλής ενθαλπίας, που υπάρχει σε μερικά νησιά στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου. Τα τελευταία χρόνια η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) με την θυγατρική της εταιρεία Δ.Ε.Η. Ανανεώσιμες Α.Ε. άρχισε διερευνητικές εργασίες με σκοπό τον εντοπισμό γεωθερμικών υδάτων κατάλληλης θερμοκρασίας και ποσότητας για την εγκατάσταση γεωθερμικής μονάδας στην Λέσβο. (Φυτίκας & Ανδρίτσος 2004).



Εικόνα 1.1: Χάρτης με γεωλογικά στοιχεία και περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα (από Mendrinou et al., 2010).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1, το νησί της Κρήτης δεν συμπεριλαμβάνεται καν στις εν δυνάμει γεωθερμικές περιοχές, παρόλο που υπάρχουν ενδείξεις για ύπαρξη γεωθερμικών πεδίων στην Κρήτη. Τα πιθανά γεωθερμικά πεδία στην Κρήτη, για τα οποία έχουμε ελάχιστα στοιχεία, είναι χαμηλής ενθαλπίας και εντοπίζονται σε τρεις περιοχές. Στη λεκάνη της Μεσσαράς, που βρίσκεται στο νομό Ηρακλείου, το οποίο αναφέρθηκε σε μελέτη του Ι.Γ.Μ.Ε. (Νικολάου, 1994), στο Ακρωτήριο του νομού Χανίων με πιθανό γεωθερμικό νερό της τάξης των 32°C που μελετήθηκε και στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων (Βλασταράς 2006) και τέλος στην περιοχή Καπίστρι της Ιεράπετρας για γεωθερμικό νερό με θερμοκρασία 25°C (Chatzigiannis and Kavouridis 2013). Τα δυο τελευταία απεικονίζονται στον χάρτη της Εικόνας 1.2, (Κυρκιμτζή 2013).



Εικόνα 1.2: Γεωθερμικές περιοχές στην Ελλάδα (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών).

Για την καλύτερη διερεύνηση και συλλογή στοιχείων των πιθανών γεωθερμικών πεδίων στην Κρήτη πάρθηκαν δείγματα για αναλύσεις ανόργανων στοιχείων από γεωτρήσεις της Μεσσαράς. Πρόσφατες εργασίες στην Κρήτη (Αμβράζης, 2015; Σμπώκος, 2015) έχουν δείξει ότι υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις για ύπαρξη γεωθερμικών πεδίων στην Κρήτη. Πέρα από μετρήσεις υδάτων γεωτρήσεων κατά την καλοκαιρινή περίοδο του 2015 σε δύο διαφορετικές περιοχές στην πεδιάδα της Μεσσαράς οι ενδείξεις στηρίχθηκαν σε λεπτομερείς χημικές αναλύσεις υδάτων, κύριων και ιχνοστοιχείων, που επέτρεψαν την χρήση σε ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούμενα γεωθερμόμετρα. Απαραίτητο στοιχείο ύπαρξης ταμειυτήρα σε μια περιοχή είναι η διατήρηση επίσης υψηλών θερμοκρασιών υδάτων γεωτρήσεων. Για

το λόγο αυτόν στόχος της εργασίας αυτή είναι η παράθεση όλων των αποτελεσμάτων μετρήσεων της θερμοκρασίας, υδροχημικών και γεωθερμομετρικών αναλύσεων και υπολογισμών στις ίδιες γεωτρήσεις από δείγματα νερού που πάρθηκαν και αναλύθηκαν κατά την χειμερινή περίοδο (Φεβρουάριος 2016).

Κεφάλαιο 2: Γεωλογικό περίγραμμα

2.1 Γενικά

Κατά τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, οι γνώσεις μας για την γεωλογική δομή της Κρήτης έχουν αυξηθεί σημαντικά. Τα αποτελέσματα των ερευνών στα πλαίσια μεγάλου αριθμού προγραμμάτων ευρωπαϊκών και εθνικών ερευνητικών ινστιτούτων αλλά και μεμονωμένων ερευνητών, οδήγησε στην έκδοση του πρώτου συνοπτικού γεωλογικού χάρτη της Κρήτης το 1977 σε κλίμακα 1/200.000. Όπως φαίνεται στον χάρτη αυτόν αλλά και στους επόμενους που εκδόθηκαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας κλίμακας 1:500.000, Εικόνα 2.1), το μεγαλύτερο ποσοστό προνεογενούς ηλικίας πετρωμάτων που δομούν και εμφανίζονται στην Κρήτη, ανήκουν σε μια ακολουθία μεταμορφωμένων πετρωμάτων που για δεκαετίες ήταν γνωστή στη βιβλιογραφία σαν «Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι», η παλαιογεωγραφική τοποθέτηση των οποίων παραμένει ένα ανοικτό γεωλογικό κεφάλαιο. Παρόμοια είναι τα προβλήματα που σχετίζονται με τα καλύμματα της ενότητας του Τρυπαλίου και του Φυλλιτικού Καλύμματος.



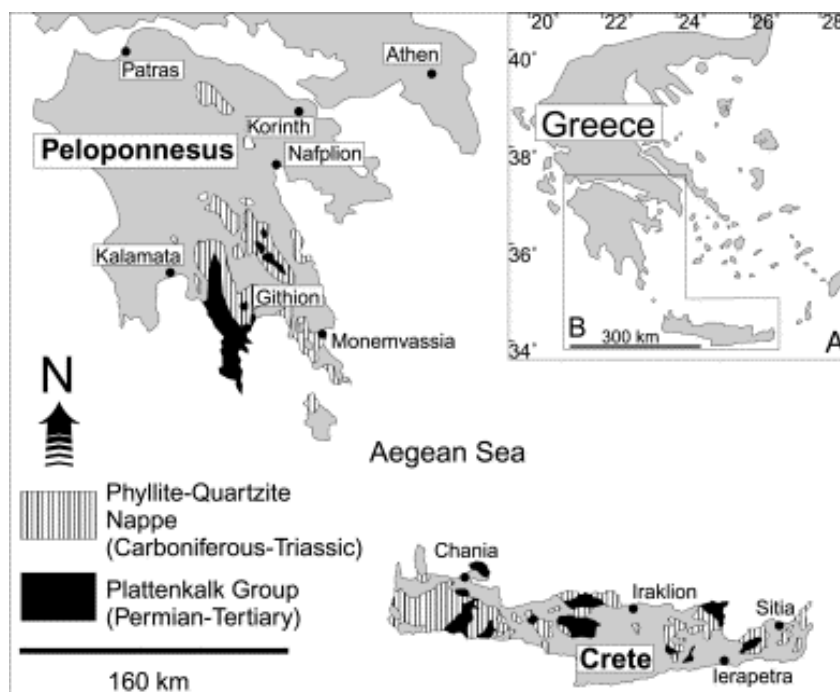
Εικόνα 2.1.: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος σε κλίμακα 1:500.000. με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις οι λεκάνες του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς (Ι.Γ.Μ.Ε.).

Πιο ειδικά, η Κρήτη συγκροτείται από την κατώτερη τεκτονική ενότητα η οποία αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την μεταμορφωμένη Ομάδα των Πλακωδών Ασβεστόλιθων (Πλάτανος *tenkalk*) με ηλικία από το Άνω Πέρμιο έως το Ολιγόκαινο.

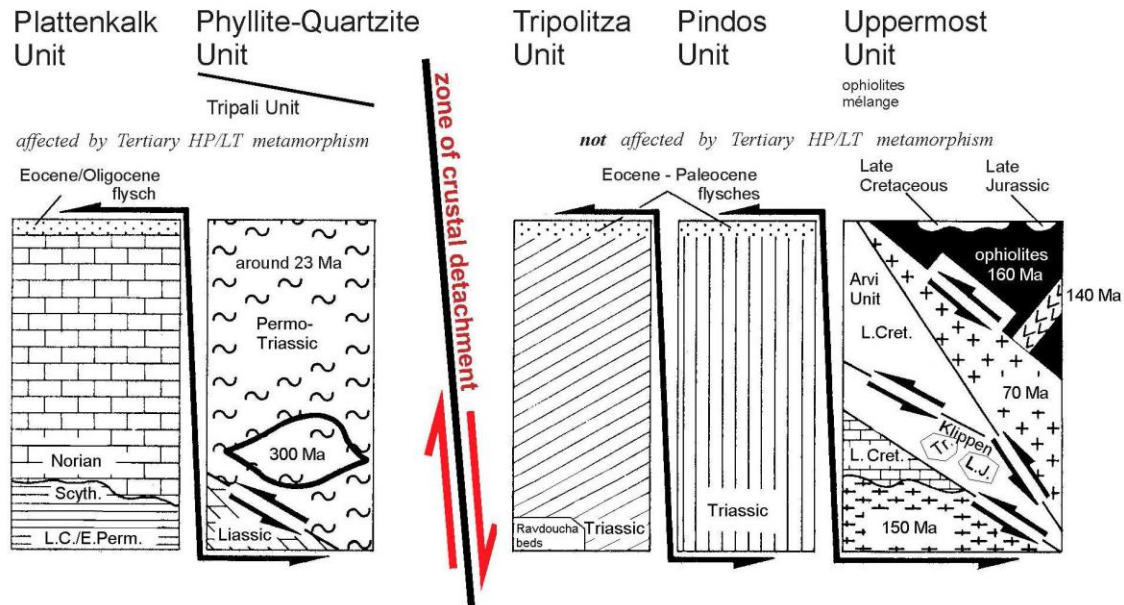
Με τεκτονική επαφή, ακολουθεί ένα αλλόχθονο σύστημα επωθημένο πάνω στο (παρα)αυτόχθονο, υπό τη μορφή αλληπαλλήλων τεκτονικών καλυμμάτων αλπικών ενοτήτων, και με χαρακτηριστική λεπιοειδή διάταξη. Τα αλληπαλλήλα τεκτονικά καλύμματα επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο τοποθετούνται με την ακόλουθη σειρά από το υποκείμενο προς το υπερκείμενο:

Ενότητα Τρυπαλίου αποτελούμενη από ημιμεταμορφωμένα έως μεταμορφωμένα κυρίως ανθρακικά πετρώματα ηλικίας Τριαδικό έως Λιάσιο.

Ακολούθως, η Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών (Φυλλιτικό Κάλυμμα κατά Dornsiepen & Manutsoglu 1994) με ηλικία Άνω Πέρμιο έως και το Κάρνιο όπου στα κατώτερα τμήματα παρουσιάζονται εντός δολομιτών και ραουβάκων εμφανίσεις γύψου και ανυδρίτου και στα ανώτερα εναλλαγές φυλλιτών με στρώσεις χαλαζιτών και στρώσεις μετα-ηφαιστίτων.



Εικόνα 2.2.: Οι εμφανίσεις της Ομάδας Πλακωδών Ασβεστολίθων και του Φυλλιτικού Καλύμματος στην Πελοπόννησο και Κρήτη (Dornsiepen et al., 2001).



Σχήμα 2.1: Τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενότητων στην Κρήτη (τροποποιημένη από Seidel et al., 1982).

Έπεται η ενότητα Τρίπολης με το κατώτερο τμήμα να αποτελείται από την αργιλοσχιστολιθική – ανθρακική σειρά Ραβδούχα, το ανώτερο τμήμα από την ανθρακική σειρά της Τρίπολης και τέλος, στο ανώτατο τμήμα της σειράς παρουσιάζεται ο φλύσχης της ενότητας της Τρίπολης. Η ηλικία της ενότητας τοποθετείται στο Μέσο - Άνω Τριαδικό.

Ακολουθεί η Ενότητα Ωλονού – Πίνδου, όπου στην Κρήτη εντοπίζεται με τρεις σειρές: Πίνδου στη Δυτική Κρήτη με την τυπική στρωματογραφική ακολουθία της ενότητας της Πίνδου, Εθιάς στην Κεντρική Κρήτη και Μαγκασσά στην Ανατολική Κρήτη (Φυτρολάκης, 1980). Η ηλικία της ενότητας τοποθετείται από το Άνω Τριαδικό έως και το Μέσο Παλαιόκαινο (από Μανούτσογλου, 2008).

Πάνω από τις παραπάνω αναφερόμενες εξωτερικές ζώνες (Σχήμα 2.1) υπάρχουν σε ανώτερη τεκτονική θέση αλλόχθονα τεκτονικά λείπια των Εσωτερικών ζωνών που έχει ονομαστεί και **"Ανώτατη ενότητα"**: ένα σύνθετο πολύμεικτο λιθοφασικά τεκτονικό σύμπλεγμα που αποτελείται από επαλληλικά καλυμμάτων (Bonneau 1984). Τα διάφορα καλύμματα τα οποία είναι επωθημένα το ένα επάνω στο άλλο από το υπερκείμενο προς το υποκείμενο είναι τα εξής:

- **Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινιωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσεις, ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού. Οι περισσότερες από τις εμφανίσεις αυτών των οφειολίθων στην Κρήτη**

εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της νήσου. Είναι σχηματισμοί με διαστάσεις χιλιομέτρων έως εκατοντάδων μέτρων στην κορυφή της λεγόμενης "Ανώτατης ενότητας". Αποτελούνται κυρίως από πλαστικά τεκτονισμένους σερπεντινίτες. Οι επαφές τους με τις υπόλοιπες ακολουθίες της "Ανώτατης ενότητας" είναι παντού τεκτονικές. Υπολείμματα των αρχικών περιδοτιτών γενικά αντιστοιχούν σε σπινελιούχους *lherzolites*. Οι σερπεντινίτες συχνά περιέχουν χρυσοτίλη και αντιγορίτη και σε ορισμένες θέσεις μόνο αντιγορίτη. Στα υπερβασικά αυτά πετρώματα που εμφανίζονται και στην Κρήτη έχουν εντοπιστεί γαββροειδείς διεισδύσεις (*gabbroic dikes*) που ποικίλουν σε μέγεθος από 1-100 περίπου μέτρα. Η χημική σύνθεση αυτών των διεισδύσεων ποικίλει: από γαββρονορίτη σε γάββρο, διορίτη, τωναλίτη έως πλαγιογρανίτη (Koepke et al., 2002).

- Κάλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοτιτικούς γνευσίους και σχιστολίθους, αμφιβολίτες και μάρμαρα ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού.

- Κάλυμμα Βάτου με εναλλαγές τεφρών ιλυολίθων και πάγκους από ψαμμιτικούς ασβεστολίθους και ψαμμίτες ηλικίας Ανωτέρου Ιουρασικού.

- Κάλυμμα Άρβης με βασάλτες σε «μαξιλαροειδείς λάβες» ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού.

Τέλος, πάνω από τους αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται πετρώματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς τα οποία συνήθως έχουν κυμαινόμενο πάχος και εξάπλωση στις διάφορες περιοχές της Κρήτης. Τα πετρώματα αυτά σχετίζονται με τις μετεωρεγενετικές διεργασίες που επέδρασαν στην περιοχή. Οι απόψεις για το είδος, την διαδοχή και εύρος αυτών των διεργασιών δίστανται στην βιβλιογραφία.

Οι εφελκυστικές τάσεις που έλαβαν χώρα στην περιοχή της Κρήτης είχαν ως συνέπεια τη δημιουργία μεγάλων βυθισμάτων, ως αποτέλεσμα της δράσης μεγάλων ρηγμάτων με κύριες διευθύνσεις B-N και A-Δ. Οι κυριότερες λεκάνες που πληρώθηκαν με ιζήματα του Νεογενούς είναι οι λεκάνες Ηρακλείου, Μεσσαράς, Ιεράπετρας και του βορείου τμήματος Νομών Ρεθύμνου και Χανίων. Τα νεογενή αυτά ιζήματα επικάθονται ασύμφωνα στους αλπικούς σχηματισμούς και είναι χερσαίας, ποτάμιας, υφάλμυρης και θαλάσσιας προέλευσης. Παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς την ηλικία τους και ως προς τη λιθολογία τους. Κατά Meulenkamp (1979) οι σχηματισμοί του Νεογενούς έχουν ομαδοποιηθεί σε λιθοφασικές ομάδες (Σχήμα 2.2):

Η Ομάδα Πρίνα αποτελείται από ασβεστολιθικά μαύρα χονδρόκοκκα λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή με ασβεστιτικό υλικό συγκόλλησης ενώ εμπεριέχει ολισθόλιθους προνεογενών ασβεστόλιθων. Αποτελεί τη βάση των Νεογενών ιζημάτων στις περιοχές της ανατολικής και δυτικής Κρήτης, ή μεταβαίνει πλευρικά ως προς την αμέσως Νεότερη. Η ηλικία της Ομάδας Πρίνα προσδιορίζεται στο Μέσο Μειόκαινο και το περιβάλλον απόθεσης χαρακτηρίζεται μη θαλάσσιο ως υφάλμυρο ή ρηχό θαλάσσιο.

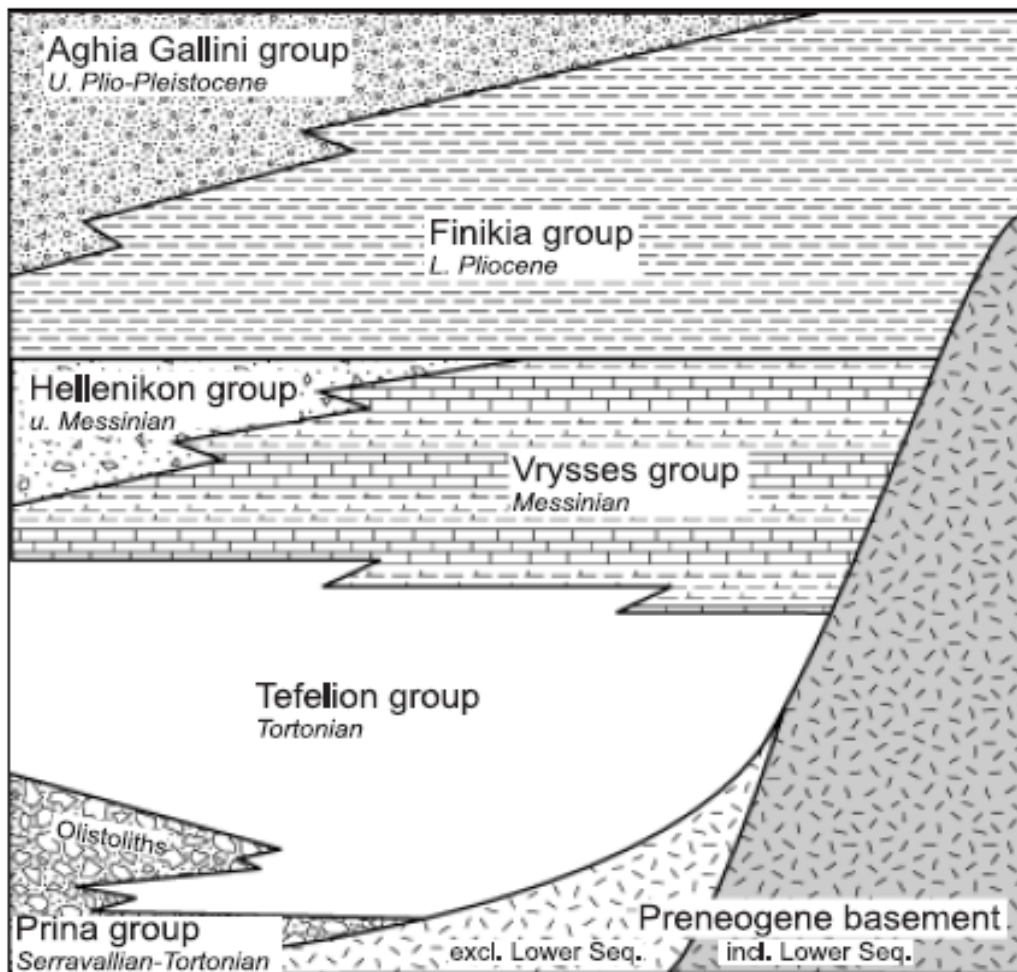
Η Ομάδα Τεφελίου τοποθετείται ασύμφωνα είτε πάνω στην Ομάδα Πρίνα, είτε απευθείας πάνω στο προνεογενές υπόβαθρο. Αποτελείται από χαλαρά θαλάσσια και ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμους, αργίλους και ιλύ. Η ηλικία τους τοποθετείται από το Σερραβάλλιο έως το Άνω Τορτόνιο. Η Ομάδα Τεφελίου αποτελείται από τους σχηματισμούς Βιάννου, Σκινιά και Αμπελούζου.

Η Ομάδα Βρυσών συντίθεται από το σχηματισμό της Αγίας Βαρβάρας και τοποθετείται υπερκείμενη είτε της Ομάδας Τεφελίου είτε του αλπικού υποβάθρου. Αποτελείται από θαλάσσιους βιοκλαστικούς ή υφαλογενής ασβεστόλιθους εναλλαγές φυλλωδών και ομογενών μαργών, οι οποίες κατά τόπους εμπεριέχουν παρεμβολές γύψων. Η ηλικία της Ομάδας των βρυσών τοποθετείται στο Άνω Τορτόνιο έως το Κάτω Μεσσήνιο.

Η Ομάδα Ελληνικού παρουσιάζεται τοποθετημένη ασύμφωνα σε παλαιότερους Νεογενής σχηματισμούς ή κατά θέσεις, απευθείας επάνω στο υπόβαθρο ή επάνω στην ομάδα Βρυσών στην οποία όμως κατά τόπους παρεμβάλετε. Περιλαμβάνει ερυθρωπά χερσαίας προέλευσης κροκαλοπαγή, ποταμολιμναίες σχετικώς λεπτόκοκκες αποθέσεις και ενίοτε υφάλμυρες και λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις με εμπεριεχόμενα λεπτά στρώματα γύψου. Η Ομάδα Ελληνικού αποτέθηκε κατά τη διάρκεια της κρίσης αλατότητας του Μεσσηνίου με την ηλικία της να προσδιορίζεται στο Άνω Μεσσήνιο. Στις περιοχές της κεντρικής και ανατολικής Κρήτης δεν υπάρχουν εμφανίσεις της Ομάδας Ελληνικού.

Η Ομάδα Φοινικιάς συντίθεται από το σχηματισμό της Φοινικιάς και τοποθετείται επί των στρωμάτων της Ομάδας Ελληνικού, Βρυσών ή του προνεογενούς υποβάθρου. Αποτελείται από ανοιχτής θάλασσας αργίλους και μάργες οι οποίες ενίοτε παρουσιάζουν πυριτικές ενστρώσεις ενώ τμήμα της βάσης της Ομάδας Φοινικιάς, περιέχει ένα λατυποπαγές αποτελούμενο από ιζήματα του Μειόκαινου και του Κατώτερου Πλειόκαινου. Η ηλικία της Ομάδας της Φοινικιάς είναι Πλειοκαινική.

Η Ομάδα Αγίας Γαλήνης συντίθεται από το σχηματισμό της Αγίας Γαλήνης και βρίσκεται υπερκείμενη της Ομάδας της Φοινικιάς και κατά ένα μέρος αποτελεί πλευρική αντιστοιχία της. Εμπεριέχει χονδροκλαστικά υλικά, χερσαία ερυθρά κροκαλοπαγή και ποταμοδελταϊκές άμμους και αργίλους. Αποτελεί την τελευταία ενότητα του Νεογενούς στην Κρήτη η οποία ανήκει στο Άνω Πλειόκαινο ή πιθανά στο Άνω Πλειστόκαινο.

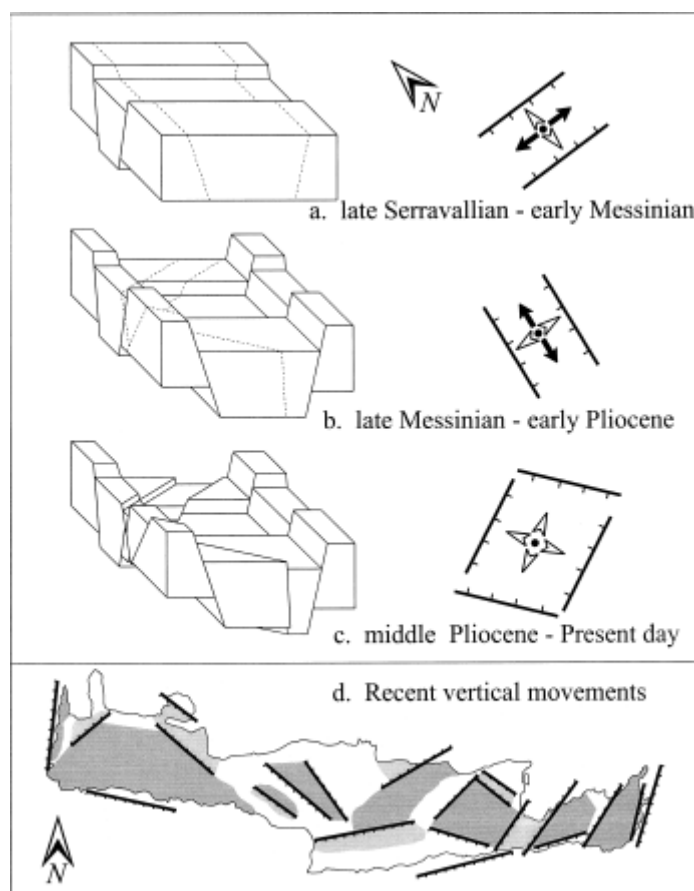


Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση της λιθοστρωματογραφίας της Κρήτης, με τις μεγαλύτερες ομάδες σχηματισμών του Νεογενούς και το προνεογενές υπόβαθρο (αδιαίρετο). Παρουσιάζεται η μεταξύ τους σχέση όσο αναφορά τη κατακόρυφη και οριζόντια θέση αλλά και την αλληλοπαρεμβολή τους (Meulenkamp, 1979).

Επάνω στους σχηματισμούς του Νεογενούς ή απευθείας στο προνεογενές υπόβαθρο υπέρκεινται ασύμφωνα τα ιζήματα του Τεταρτογενούς (Meulenkamp, 1979; Φυτρολάκης, 1980). Πρόκειται για συγκολλημένους ή ασύνδετους χερσαίους σχηματισμούς η ηλικία των οποίων τοποθετείται στο Πλειστόκαινο και νεότερη, ενώ οι μορφές τους ποικίλουν σε πλευρικά κορήματα σε κλιτύες, σε αλλουβιακά ριπιδία στις εξόδους χειμάρρων και σε αλλουβιακές αποθέσεις.

Πολυάριθμες έρευνες έχουν διεξαχθεί για την τεκτονική εξέλιξη της Κρήτης, στους αλπικούς σχηματισμούς της οποίας έχει διαπιστωθεί μια εναλλασσόμενη συμπίεστική και ελκυστική τεκτονική πολλών φάσεων.

Την αλπική τεκτονική δραστηριότητα διαδέχθηκε κατά το Νεογενές μια πολυφασική ρηξιγενής δραστηριότητα που συνοδεύτηκε από την έντονη μετατόπιση ρηξιτέμαχων από περιοχή σε περιοχή και αυτό αποδεικνύεται από τη στρωματογραφική σύσταση των λεκανών του Νεογενούς που αρχικά θεωρήθηκε ότι εξελίχθηκαν εντός βυθισμάτων που οριοθετήθηκαν από ενεργά ρήγματα, τα οποία έδρασαν διαχρονικά από το Μέσο Μειόκαινο (Fassoulas, 2001).

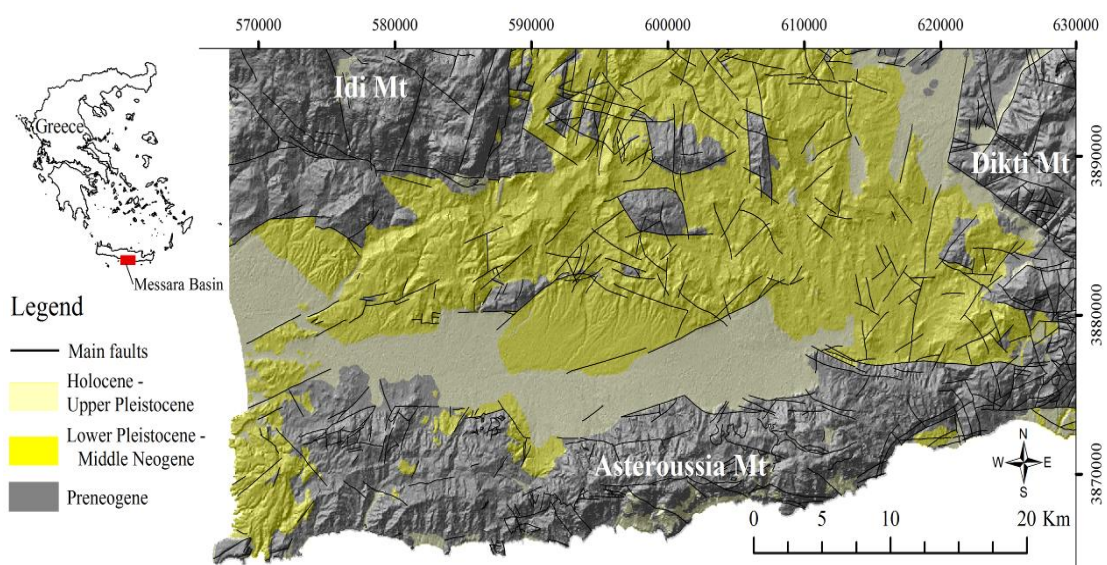


Εικόνα 2.3: (a)-(c) απλοποιημένα μπλοκ-διαγράμματα που αντιπροσωπεύουν την τεκτονική εξέλιξη της λεκάνης της Μεσσαράς, ως αποτέλεσμα της, οι τρεις ομάδες ρηγμάτων. Οι περιφερειακές τάσεις του πεδίου παρουσιάζονται και τα συνδεδεμένα πρότυπα ρηγμάτων. Τα ανοικτά βέλη δείχνουν τους άξονες σ₃, ενώ, τα μαύρα βέλη δείχνουν τους άξονες σ₂. Να σημειωθεί ότι ο βορράς είναι προς την πάνω-αριστερή γωνία. (d) Οι πρόσφατες (Τεταρτογενή ως σήμερα) κατακόρυφες κινήσεις στην Κρήτη (Fassoulas 2001).

2.2 Η λεκάνη της Μεσσαράς

Τοπογραφικά, η **τάφρος (graben)** της Μεσσαράς χαρακτηρίζεται από την τοπογραφική ταπείνωση ανάμεσα στον όγκο του Ψηλορείτη και της κορυφογραμμής του Ηρακλείου στο Βορρά και τον όγκο των Αστερουσίων στο Νότο.

Η λεκάνη διακρίνεται σε δυο (2) επιμέρους τεκτονικές ενότητες: Στην πρώτη περιλαμβάνονται οι τεταρτογενείς και οι νεογενείς σχηματισμοί και στη δεύτερη ανήκουν οι προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, οι οποίες καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης.



Εικόνα 2.4: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (εποπτικός, από τον χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. κλίμακας 1:50.000).

Στο υπόμνημα: με ανοικτό κίτρινο χρώμα οι αποθέσεις του Ολόκαινου – Ανώτερου Πλειστόκαινου, με κίτρινο οι αποθέσεις του Κατώτερου Πλειστόκαινου – Μέσο Νεογενούς και με γκρι οι προνεογενείς αποθέσεις.

Στη γεωλογική δομή της λεκάνης της Μεσσαράς συμμετέχουν από τις νεότερες προς τις παλαιότερες οι παρακάτω στρωματογραφικές και τεκτονικές ενότητες σχηματισμών:

Ολόκαινο: αλλουβιακές αποθέσεις, που αποτελούν προϊόντα αποσάθρωσης και καλύπτουν μικρές εσωτερικές λεκάνες καθώς και τις κοίτες των υδρορεμάτων (χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, ερυθρογή με κροκαλολατύπες) και *κώνοι κορημάτων* και *πλευρικά κορήματα*, που αναπτύσσονται κυρίως στις παρυφές των Αστερουσίων (κυρίως ανθρακικής σύστασης λατύπες, αναμεμιγμένες με ερυθρογή).

Πλειστόκαινο - Ολόκαινο: ποταμολιμναία κροκαλοπαγή, άμμοι, ιλυόλιθοι και αργιλικά στρώματα αποτελούμενα κυρίως από μεταφερμένα υλικά του σχηματισμού Αγ. Γαλήνη. Καλύπτουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης.

Ανώτερο Πλειόκαινο - Πλειστόκαινο: σχηματισμός Αγ. Γαλήνη (ποτάμια και λιμναία ερυθρά κροκαλοπαγή, ερυθρές και κίτρινες άμμοι, ιλυόλιθοι, άργιλοι, με παρεμβολές λιμναίων μαργαϊκών ασβεστόλιθων)

Νεογενές

Κατώτερο πλειόκαινο: σχηματισμός Φοινικιάς (κυρίως λευκές μάργες, με παρεμβολές αργίλων και άμμων, άργιλοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και κροκαλοπαγή).

Ανώτερο Τορτόνιο – Μεσσήνιο: σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας (βιοκλαστικοί, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς, ασβεστόλιθοι, ολισθημένοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και εναλλαγές ασβεστιτικών μαργών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων με παρεμβολές γύψων. Στο ανώτερο τμήμα του σχηματισμού απαντούν ασβεστολιθικοί ψαμμίτες και κροκαλοπαγή).

Τορτόνιο: σχηματισμός Αμπελούζου (ακανόνιστες εναλλαγές από θαλάσσια υφάλμυρα και ποτάμια κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ιλυόλιθους, μάργες, ιλυώδεις άργιλους και λιγνίτες).

Ανώτερο Σερραβάλλιο: σχηματισμός Σκοινιά (καλά στρωμένες θαλάσσιες άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι με παρεμβολές ψαμμιτών).

Μέσο Μειόκαινο: σχηματισμός Βιάννου (ποταμολιμναίες σκούρες στρωματώδεις άργιλοι και ιλυώδεις άργιλοι, με ενδιαστρώσεις ασβεστόλιθων και ψαμμιτών. Παρεμβολές κροκαλοπαγών κυρίως στα κατώτερα τμήματα του σχηματισμού).

Προνεογενείς σχηματισμοί

Νότιο τμήμα: τα Αστερούσια Όρη συνίσταται από Μεσοζωικά πετρώματα με βασικούς σχηματισμούς το φλύσχη και τα ανθρακικά της ζώνης Τρίπολης. Επιπλέον υπάρχουν μερικές επιφανειακές εμφανίσεις έντονα ρηγματωμένων και ελαφρώς καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων της ζώνης Πίνδου. Στα μεγαλύτερα υψόμετρα απαντώνται πετρώματα των εσωτερικών ζωνών.

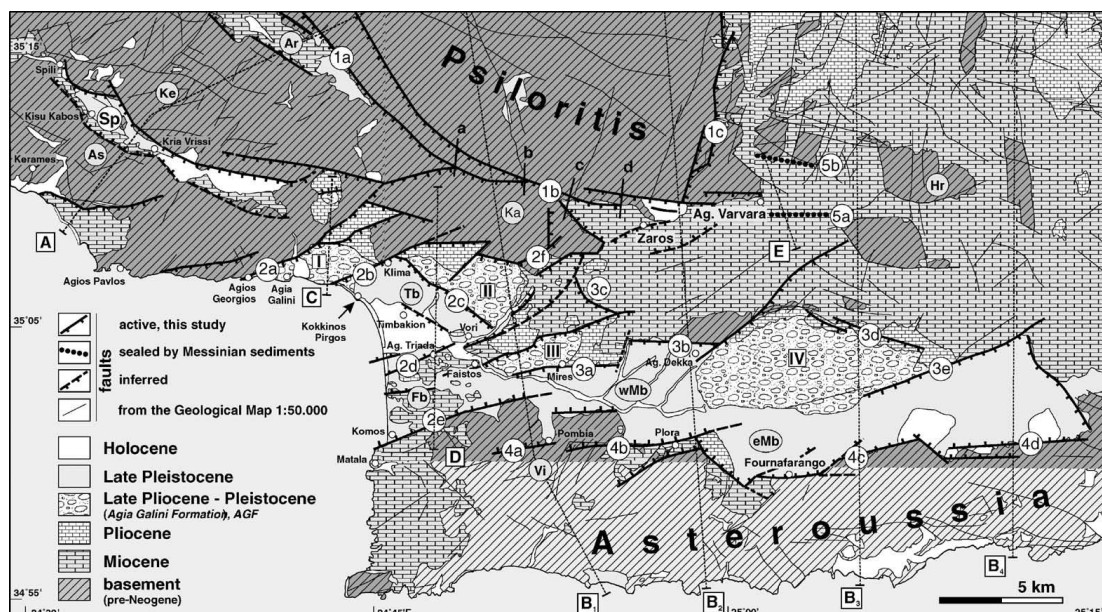
ΒΔ τμήμα: το Όρος Ψηλορείτης συνίσταται από μεσοζωικά πετρώματα της ενότητας της Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, φλύσχης), πετρώματα της ενότητας Φυλλιτών – χαλαζιτών και πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος (πλακώδεις ασβεστόλιθοι,

ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι ζώνης Ιονίου). Στα χαμηλότερα υψόμετρα απαντούν πλευρικά κορήματα (λατύπες).

Μια διαφορετική προσέγγιση για την λεκάνη της Μεσσαράς δόθηκε από τους Peterek & Schwarze (2004). Σύμφωνα με αυτούς του ερευνητές η ταπείνωση (depression) της Μεσσαράς αποτελεί μια σύνθετη τάφρο.

Τεκτονικά, αυτή η ταπείνωση χαρακτηρίζεται από μία εσωτερική και μία εξωτερική τάφρο. Κατά μήκος του βόρειου ορίου της **τάφρου της** Μεσσαράς, η εξωτερική τάφρος έχει πλάτος μέχρι και 10 χιλιόμετρα και αποτελείται από ενότητες που η ηλικία τους είναι πριν το Πλειστόκαινο και ανυψώθηκαν σε διαφορετικά ρηξιτεμάχη/μπλοκ που ανυψώθηκαν πριν το Πλειστόκαινο. Με βάση την κατανομή των αποθέσεων του Νεογενούς (και την επικράτηση των ΔΒΔ-ΑΝΑ ενεργών ρηγμάτων, συγκεκριμένα νότια του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη, μπορεί να θεωρηθεί ότι η βόρεια εξωτερική **τάφρος (graben)** της Μεσσαράς οριζόταν αρχικά από ρήγματα ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης. Μερικά από αυτά τα ρήγματα ενεργοποιήθηκαν ταυτόχρονα με την εναπόθεση των στρωμάτων του Νεογενούς. Κατά μήκος του βόρειου ορίου της τάφρου της Μεσσαράς, τα όρια της εξωτερικής τάφρου είναι λιγότερο σαφή και το πλάτος της περιορίζεται σε λιγότερο από κάποια χιλιόμετρα ή εξαφανίζεται τελείως. Όπως και το τμήμα της βόρειας εξωτερικής τάφρου έτσι και το αντίστοιχο νότιο τμήμα αποτελείται από ακολουθίες που έχουν ηλικίες παλαιότερες από το Πλειστόκαινο.

Η γεωμετρία των ενεργών ρηγμάτων στα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς υποδηλώνει την αύξηση του μήκους της λεκάνης προς τα ανατολικά. Η λεκάνη της Μεσσαράς χωρίζεται σε αρκετές υπολεκάνες, οι οποίες χωρίζονται από ξεχωριστά ρήγματα που είναι καλυμμένα από αποθέσεις του Πλειόκαινου έως το Ολόκαινο.

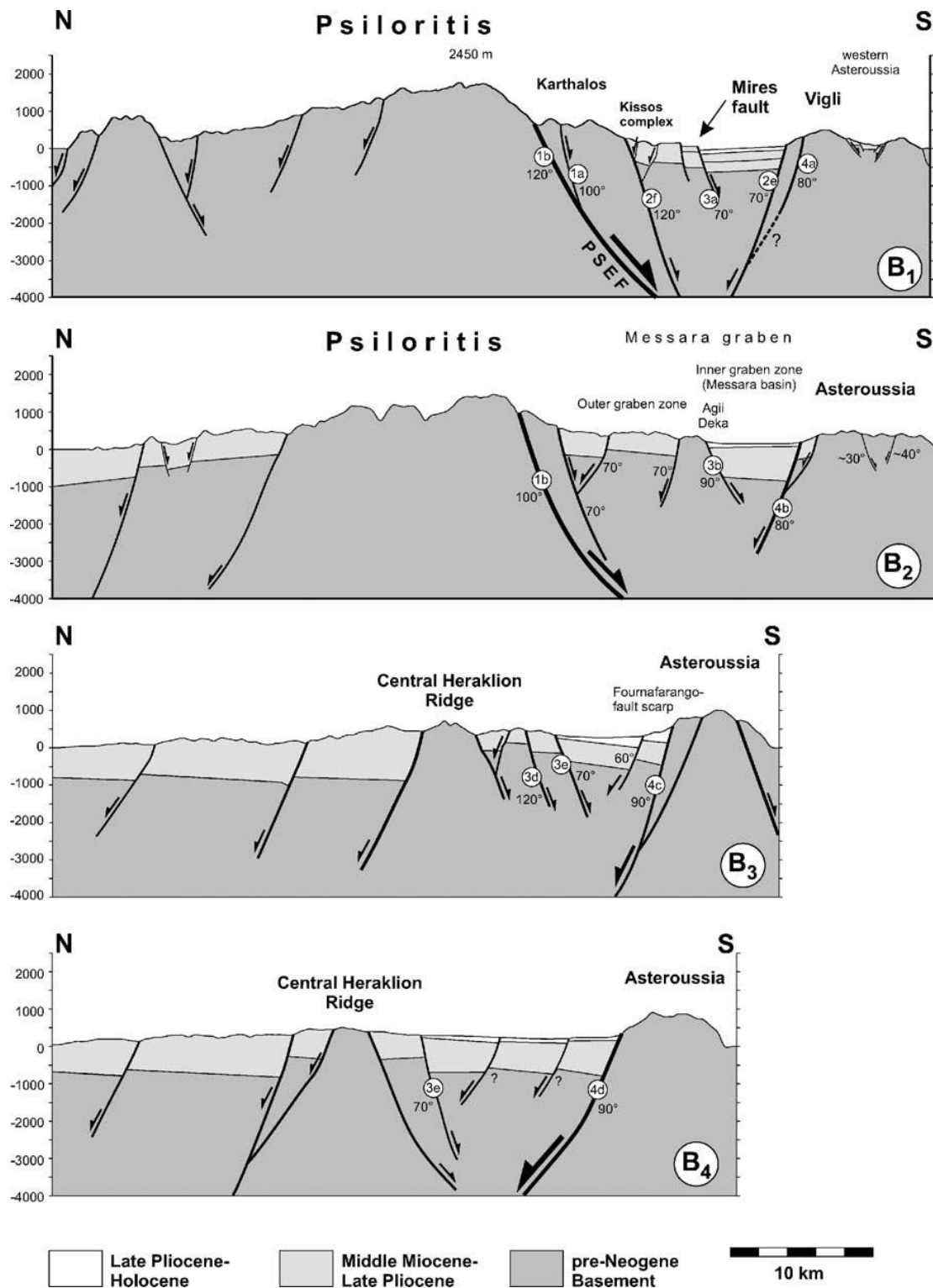


Εικόνα 2.5: Γεωλογικές χάρτης του μεγαλύτερου τμήματος της λεκάνης της Μεσσαράς και οι θέσεις αντιπροσωπευτικών γεωλογικών τομών διαφόρων διευθύνσεων (κατά Peterek & Schwarze, 2004).

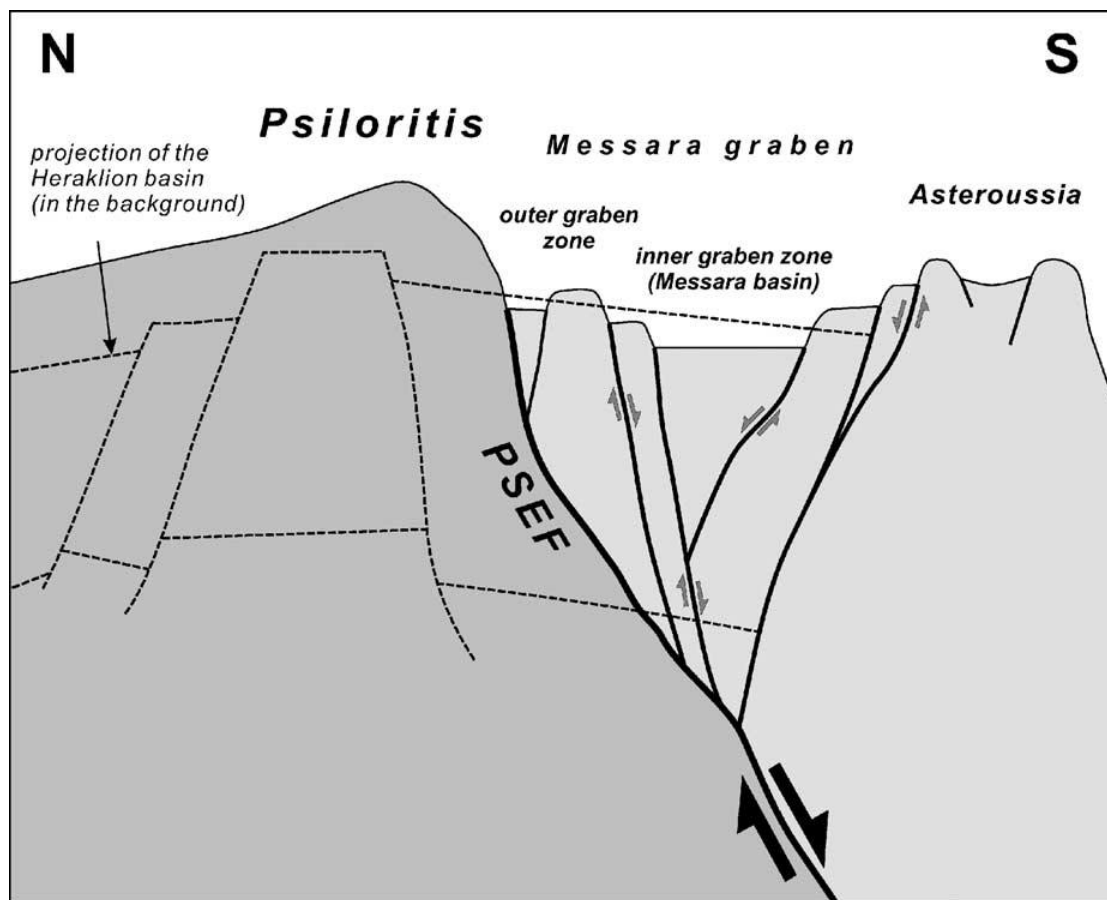
Η τοπογραφία της κεντρικής Κρήτης παρουσιάζει μια αύξηση στο υψόμετρο από το βορρά προς το νότο (Εικόνα 2.7). Αυτό αποδεικνύεται τόσο από τα μέγιστα της τοπογραφίας όσο και τη μέσο υψόμετρο, και έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της ασύμμετρης ανύψωσης του εξωτερικού τόξου. **Ωστόσο, η σημαντική μετατόπιση κατά μήκος των κύριων ρηγμάτων με διεύθυνση κλίσης προς τον νότο της νοτιοκεντρικής Κρήτης και η σχετιζόμενη άνοδος του ανερχόμενου ρηξιτεμάχους (footwall) εντείνουν την ασύμμετρη άνοδο.** Επιπλέον, η ασυμμετρία της ανύψωσης υποδεικνύεται επίσης από την ανύψωση των υπολειμμάτων θαλάσσιων αποθέσεων του Πλειόκαινου από το βορρά προς το νότο (Meulenkamp et al., 1994).

Παρότι η κατακόρυφη κίνηση τεμαχών συνέβη κατά το Μέσο Μειόκαινο, η σημαντική ανύψωση της Κρήτης ξεκίνησε από το Μέσο Πλειόκαινο (Meulenkamp, 1979; Meulenkamp et al., 1994). Όπως αποδείχθηκε από ιζήματα βαθιάς θάλασσας (deep-water deposits) του Πλειόκαινου, η ανύψωση των πρόσφατων Νεογενών λεκανών υπερβαίνει εν μέρει τα 1000 μέτρα από το Μέσο Πλειόκαινο (Meulenkamp et al., 1994). Αφού οι ομόλογες με τις σημερινές μετατοπίσεις των τεκτονικών τεμαχών κατά μήκος των περιφερειακών ρηγμάτων των λεκανών του Νεογενούς εκδηλώνεται ως νεότερη γεωμορφολογική εικόνα της πολυφασικής επανανεργοποίησης των ρηγμάτων, **η ανύψωση μετά το Μέσο**

Μειόκαινο του προ Νεογενούς υποβάθρου περίξ των λεκανών του Νεογενούς θα πρέπει να ξεπερνάει τα 2000 μ.

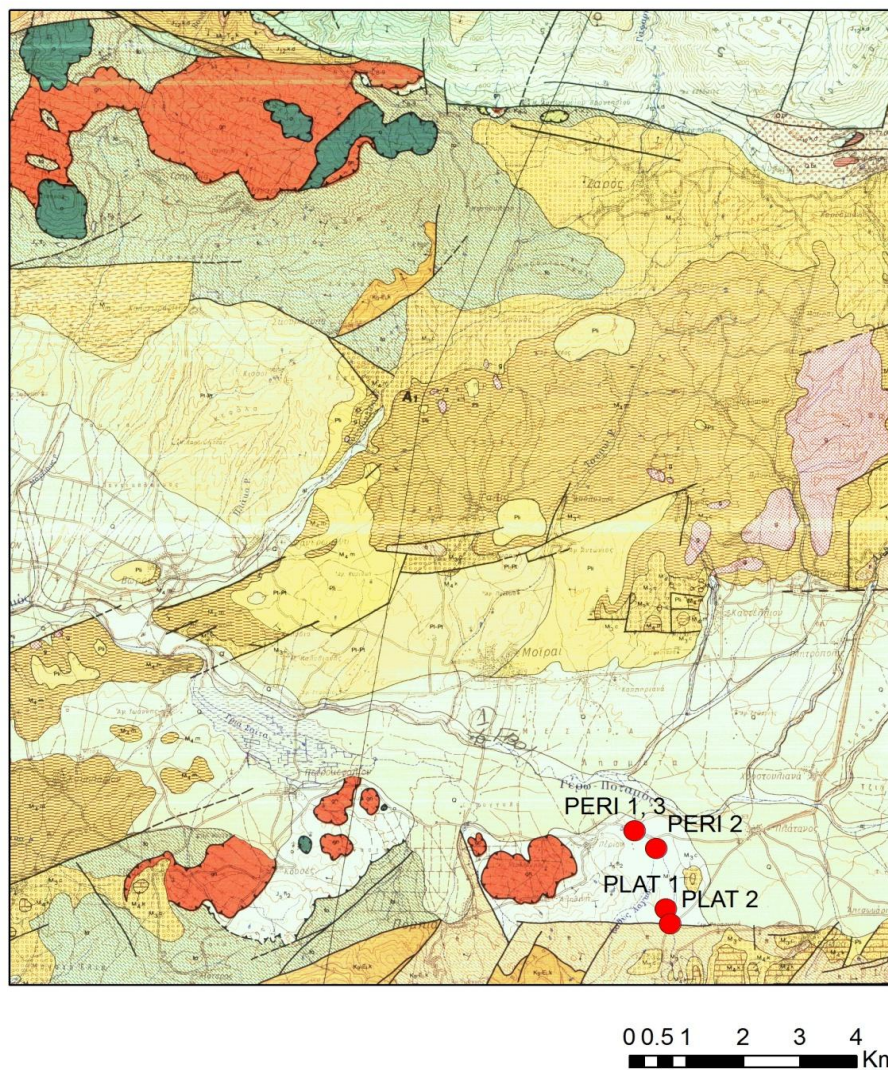


Εικόνα 2.6: Γεωλογικές τομές B1-4 με τις αντίστοιχες ερμηνείες των γεωλογικών δομών μεταξύ των ορεινών όγκων του Ψηλορείτη και των Αστερουσίων (κατά Peterek & Schwarze, 2004).

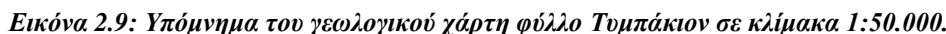


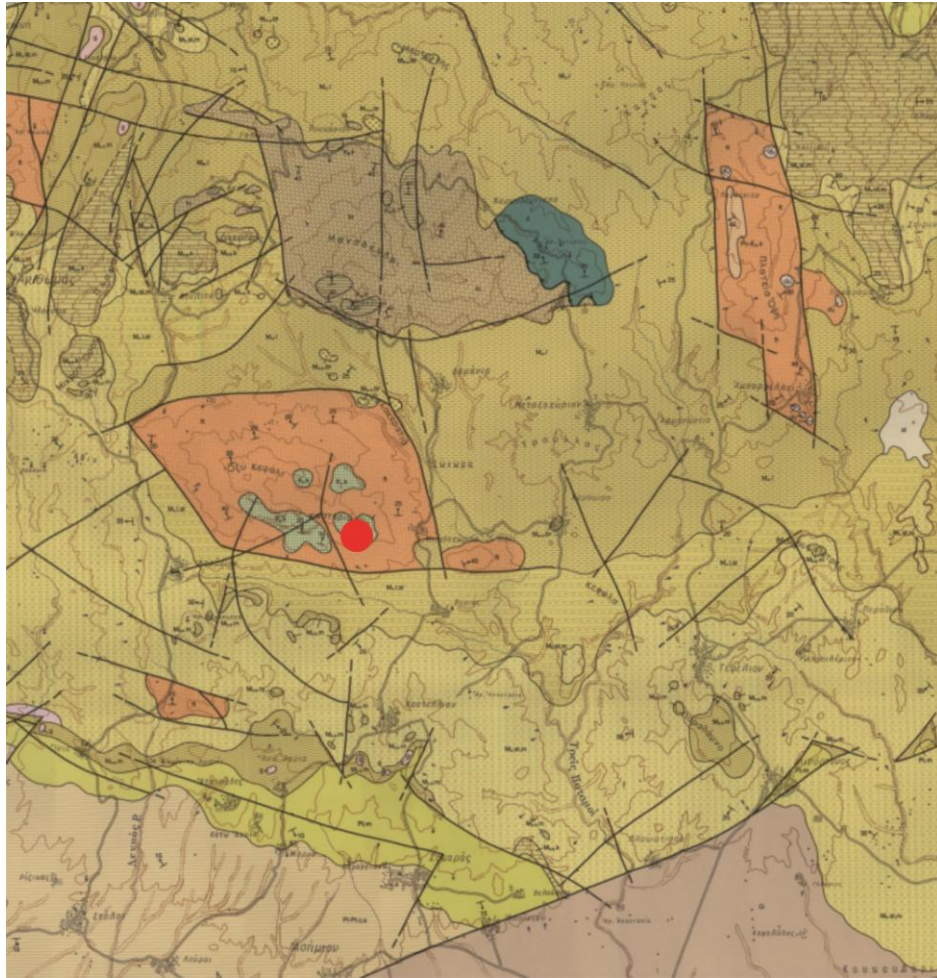
Εικόνα 2.7: Σχηματική τομή σε όλη την νότιο-κεντρική Κρήτη αποτυπώνουν την ερμηνεία της σύνθετης τάφρου της Μεσσαράς, που μετατοπίστηκε κατά μήκος του ρήγματος του νότιου Ψηλορείτη. Τόσο η λεκάνη της Μεσσαράς όσο και το μπλοκ των Αστερουσίων ερμηνεύονται ως κατερχόμενο ρηξιτέμαχος σε αντίθεση με το ανερχόμενο ρηξιτέμαχος του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη στο οποίο παρατηρείται ασύμμετρη ανύψωση (κατά Peterek & Schwarze, 2004).

Στην συνέχεια παρατίθενται αποσπάσματα από τα γεωλογικά φύλλα Επάνω Αρχάναι σε κλίμακα 1:50.000 του Ι.Γ.Μ.Ε. με τις θέσεις των γεωτρήσεων από όπου πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες.



Εικόνα 2.8: Απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη φύλλο Τυμπάκιον σε κλίμακα 1:50.000 και οι θέσεις των γεωτρήσεων.





Εικόνα 2.10: Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη φύλλο Επάνω Αρχάναι με την θέση της περιοχής στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες (Βιδάκης et al., 1992).



1

Κεφάλαιο 3: Υδρογεωλογία

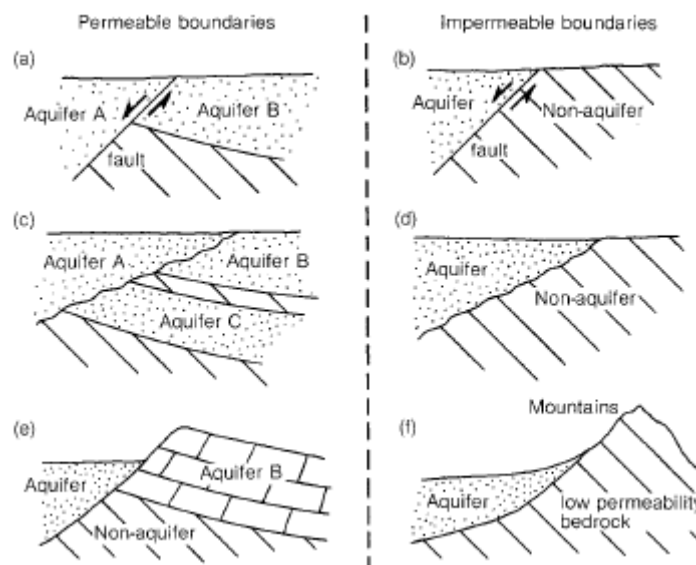
3.1 Γενικά

Τα πετρώματα που περιέχουν υπόγεια νερά και επιτρέπουν στο νερό να ρέει μέσα σε αυτά σε σημαντικές ποσότητες, ονομάζονται υδροφορείς. Ο ρυθμός ροής ποικίλει από τόπο σε τόπο. Το υπόγειο νερό ρέει διαμέσου ενός υδροφόρου ορίζοντα προς τα φυσικά σημεία εκκένωσης, εκτός και αν απομακρυνθεί με άντληση μέσω γεωτρήσεων. Ως φυσικά σημεία εκκένωσης θεωρούνται οι πηγές, διαρροή σε ρέματα και ποτάμια, και εκκενώσεις απευθείας στη θάλασσα.

Η ιδιότητα του υδροφόρου ορίζοντα που επιτρέπει στα νερά να ρέουν μέσα του, ονομάζεται διαπερατότητα, η οποία ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από γεωλογικούς παράγοντες. Στην περίπτωση του υπόγειου νερού η περατότητα ονομάζεται πιο σωστά υδραυλική αγωγιμότητα.

Υπάρχουν πολλά είδη των ορίων των υδροφορέων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μερικά παραδείγματα με διαφορετικά όρια υδροφορέων. Το όριο ενός ρήγματος μεταξύ δύο υδροφορέων (a) μπορεί να είναι διαπερατό και να επιτρέπει τη ροή σε αυτό, εφόσον έχει συμβεί θραύση πετρώματος που θα οδηγήσει σε τοπική αύξηση της διαπερατότητας. Εναλλακτικά, το σύνορο μπορεί να είναι αδιαπέρατο λόγω της δημιουργίας μυλονίτη που αποτίθεται κατά μήκος του ρήγματος. Ένα αδιαπέρατο σύνορο μπορεί να ανιχνευθεί από τις διαφορές στη χημεία των υπόγειων ρευστών ή από την ανάλυση των δοκιμών άντλησης. Το όριο ενός ρήγματος εικονίζεται στο (b) και είναι ουσιαστικά αδιαπέρατο, καθώς χωρίζει τον υδροφορέα από ένα αδιαπέρατο σχηματισμό. Στο παράδειγμα (c), ο υδροφόρος A βρίσκεται ασύμφωνα πάνω από μια αλληλουχία που περιλαμβάνει δύο ξεχωριστούς υδροφορείς, τον B και τον C. Οι καταστάσεις είναι παρόμοιες με το παράδειγμα (a), εκτός του ότι η ποιότητα των υπόγειων ρευστών μπορεί να είναι διαφορετική στους τρεις υδροφορείς. Στο παράδειγμα (d), οι συνθήκες των υπόγειων ρευστών στον υδροφορέα είναι παρόμοιες με εκείνες του (b). Στο παράδειγμα (e), ένας μη υδροφορέας σε μη συνεκτικά υλικά, όπως μια αναβαθμίδα ενός ποταμού, επικαλύπτει εν μέρει έναν υδροφορέα, στον

οποίο έχουν αποθεθεί ιζήματα (όπως είναι ο ασβεστόλιθος ή ψαμμίτη) που σχηματίζει ένα γκρεμό. Η ροή των υπογείων ρευστών μπορεί να είναι δυνατή μεταξύ του υδροφόρου Β στον Α, λόγω των τοπογραφικών διαφορών. Στο παράδειγμα (f), ένας υδροφορέας υπέρκειται ενός σχηματισμού με χαμηλή διαπερατότητα. Η ροή των υπόγειων ρευστών δεν λαμβάνει χώρα πέρα από το όριο, αλλά ο υδροφορέας επαναφόρτισης θα ενισχυθεί σημαντικά από την επιφανειακή απορροή από την ημιορεινή περιοχή.



Εικόνα 3.1: Διαφορετικοί τύποι υδρογεωλογικών ορίων (από Βουδούρης, 2015).

3.2 Υδρογεωλογικές συνθήκες της λεκάνης Μεσσαράς

Με βάση την ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών της Κρήτης διακρίνουμε τις παρακάτω υδρολιθολογικές ενότητες στην περιοχή της Μεσσαράς.

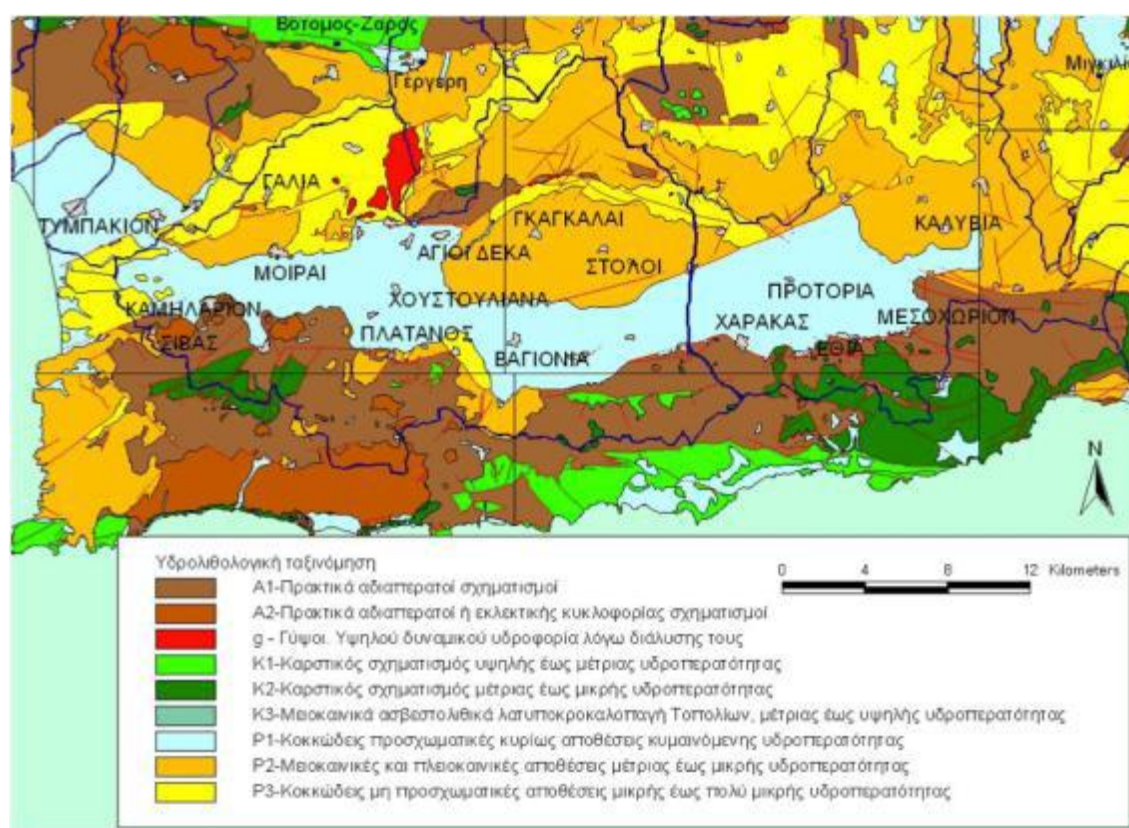
Ι. Καρστικοί σχηματισμοί, οι οποίοι συνίστανται από τα ανθρακικά πετρώματα των ενοτήτων της Πίνδου, της Τρίπολης και της Αυτόχθονου σειράς και καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης της Μεσσαράς. Βόρεια δομούν την οροσειρά του Ψηλορείτη (Ιδη) και νότια την οροσειρά των Αστερουσίων ορέων, στην οποία εντοπίζονται μικρότερες εμφανίσεις. Μικρό ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού υδροφορέα του Ψηλορείτη απορρέει από τις πηγές της Γέργερης με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Ληθαίου-Γεροποτάμου και από τις πηγές του Ζαρού με αποδέκτη την υδρολογική λεκάνη του Τυμπακίου. Το μεγαλύτερο ποσοστό του υπόγειου δυναμικού του καρστικού συστήματος του Ψηλορείτη απορρέει βόρεια στην υφάλμυρη πηγή του Αλμυρού Ηρακλείου. Οι

καρστικές εμφανίσεις των Αστερουσίων φιλοξενούν περιορισμένους υδροφόρους ορίζοντες με μικρό δυναμικό και το νερό τους χρησιμοποιείται κυρίως για την ύδρευση των οικισμών.

II. Προσχωματικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και αποτελούν το σημαντικότερο υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Συνίστανται από ποταμολιμναίες αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης συναντώνται μικρού πάχους και έκτασης αποθέσεις κατά μήκος των υδρορευμάτων.

III. Πλειστοκαινικές αποθέσεις που καταλαμβάνουν σημαντική έκταση στο βόρειο τμήμα της πεδινής περιοχής.

IV. Νεογενείς σχηματισμοί που καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής μελέτης βόρεια των προσχωματικών – πλειστοκαινικών αποθέσεων και σχηματίζουν το λοφώδες ανάγλυφο.



Εικόνα 3.2: Υδρολιθολογικός Χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Περιφέρεια Κρήτης, 2009).

Οι σημαντικότεροι υδροφορείς στην περιοχή μελέτης κατά σειρά δυναμικότητας είναι ο αλλουβιακός, ο πλειστοκαινικός και ο νεογενής. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι υδροφορείς της περιοχής μελέτης.

3.2.1 Νεογενής υδροφορέας

Οι νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσσαράς αποτελούν το υπόβαθρο των τεταρτογενών αποθέσεων και χαρακτηρίζονται από πετρώματα διαφορετικής σύστασης και στρωματογραφίας. Το χαρακτηριστικό του νεογενούς είναι οι ρηξιγενείς ζώνες, οι οποίες μετακίνησαν κατακόρυφα τα ρηξιτεμάχη και σχημάτισαν διάφορες λεκάνες μέσα στις οποίες εναποτέθηκαν οι σύγχρονες αποθέσεις. Το μεγαλύτερο μέρος των νεογενών σχηματισμών συνίστανται από εναλλαγές στρώσεων μεγάλου πάχους ιλυόλιθων, αργίλων και μαργών. Επίσης, απαντούν και ενστρώσεις μικρότερου πάχους αποτελούμενες από άμμο, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστολίθους οι οποίες εμφανίζουν μικρό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον καθώς φιλοξενούν ασθενείς υδροφορίες που είναι υπό πίεση. Οι υδροφόροι αυτοί εκμεταλλεύονται από αριθμό γεωτρήσεων βάθους 200m περίπου, κυρίως στις περιοχές που υπάρχει έλλειψη άλλων υδατικών πόρων (περιοχή Βαγιονιάς). Η παροχή των γεωτρήσεων αυτών είναι μικρή ($5-15 \text{ m}^3/\text{h}$).

3.2.2 Πλειστοκαινικός υδροφορέας (σχηματισμός Αγ. Γαλήνης)

Τα πλειστοκαινικά ιζήματα εναποτέθηκαν στα ρηξιτεμάχη των νεογενών σχηματισμών κάτω από ηπειρωτικές συνθήκες (ποταμολιμναία φάση). Το πλειστόκαινο στα κατώτερα (υψομετρικά) ρηξιτεμάχη, όπως της λεκάνης των Μοιρών και του Χάρακα, διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση σε αντίθεση με των ανώτερων υψομέτρων που σχεδόν διαβρώθηκε και διατηρείται μόνο μια στρώση πολύ μικρού πάχους (λεκάνη Βαγιονιάς). Επιφανειακά απαντούν στην περιοχή Καλυβιανής και των Γκαγκαλών. Το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας μετά την εναπόθεση των πλειστοκαινικών σχηματισμών ήταν σε κατώτερο υψόμετρο από ότι σήμερα και νέες τάφροι σχηματίστηκαν από την διάβρωση των κυρίων υδρορεμάτων του Γεροπόταμου, του Λιθαίου και του Αναποδάρη. Το μέγιστο βάθος των τάφρων αυτών καταγράφηκε στα 75 μέτρα κάτω από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών και το μέγιστο που έχει καταγραφεί στην ευρύτερη περιοχή είναι 80m στην περιοχή του Πλατύ (όμορη λεκάνη δυτικότερα του Τυμπακίου).

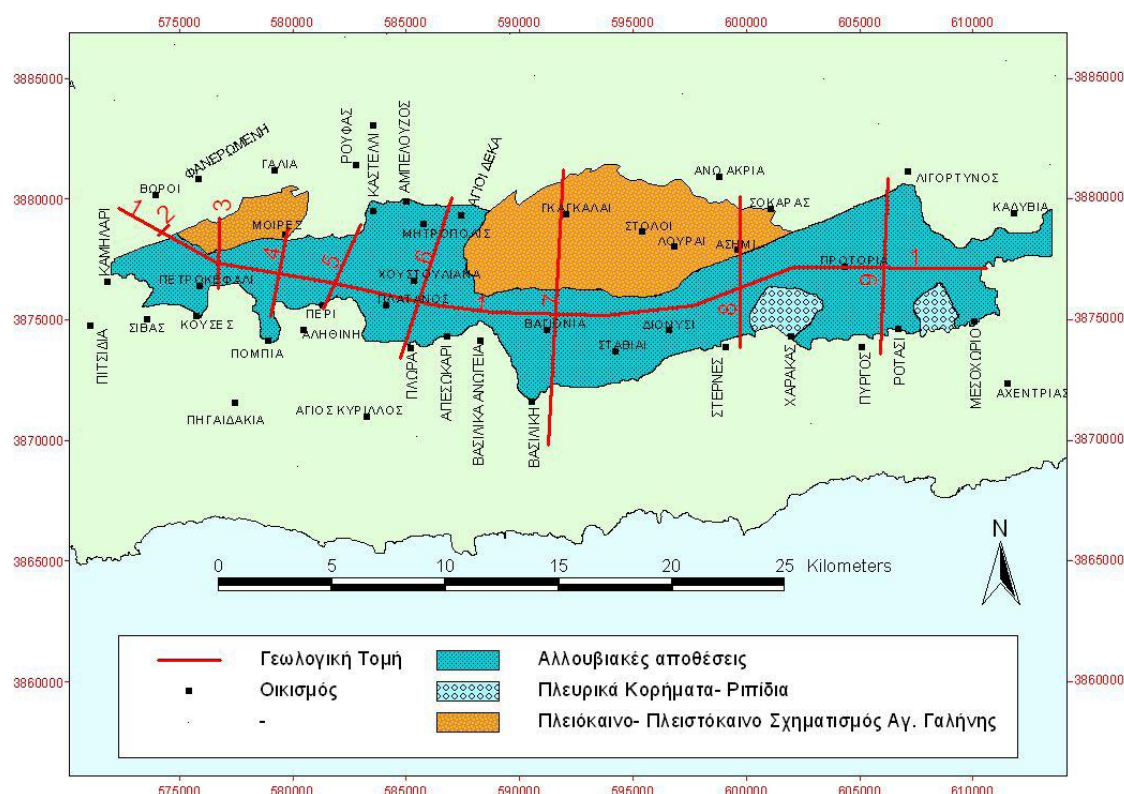
3.2.3 Αλλουβιακός υδροφορέας

Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επίμηκες σχήμα, καταλαμβάνει το κεντρικό πεδινό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς και συνίσταται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυολίθων και αργίλων. Ο υδροφορέας αυτός

συνίσταται από αποθέσεις διαφορετικής στρωματογραφικής ηλικίας και διαφορετικών τύπων απόθεσης και σύστασης και επομένως διαφορετικών υδρογεωλογικών ιδιοτήτων.

Ο αλλουβιακός υδροφορέας δύναται να διακριθεί σε τρεις κατηγορίες:

- i. Αποθέσεις στις τάφρους διάβρωσης, οι οποίες καταλαμβάνουν μια ζώνη γύρω από τα κύρια υδρορέματα (Γεροπόταμος, Αναποδάρης και Λιθαίος). Οι αποθέσεις κατωτέρου Πλειστοκαίνου αν και αποτελούνται από υλικά της ίδιας σύστασης με τα του Ολοκαίνου-ανώτερου Πλειστοκαίνου, συνήθως έχουν μεγαλύτερο βαθμό συμπίκνωσης και τσιμεντοποίησης με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερο συντελεστή υδροπερατότητας και συντελεστή αποθηκευτικότητας. Οι αλλουβιακές αποθέσεις των τάφρων διάβρωσης αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων χαλίκων, αργίλου και ιλύος. Στρώσεις άμμων είναι σπάνιες και συνήθως η άμμος είναι αναμεμιγμένη με τα άλλα υλικά.*
- ii. Οι κώνοι κορημάτων και τα πλευρικά κορήματα ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση τους και την θέση τους. Τα υλικά είναι περισσότερο χοντρόκοκκα και λατυποπαγή κοντά στις υπόγειες νότιες περιοχές. Κατά θέσεις τα κενά των χοντρόκοκκων πληρώνονται από λεπτόκοκκα υλικά με αποτέλεσμα να ελαττώνουν τις ιδιότητες του υδροφορέα (υδροπερατότητα, αποθηκευτικότητα). Οι κώνοι κορημάτων που προέρχονται από παλαιότερα πετρώματα των ορεινών όγκων έχουν συνήθως κοκκινωπό χρώμα και είναι δύσκολο να διακριθούν τα νεότερα από τα παλαιότερα (Πλειστόκαινα) ιζήματα και γενικά χαρακτηρίζονται με μεγάλο πορώδες. Τα πλευρικά κορήματα που προέρχονται από νεογενή πετρώματα συνίστανται από λεπτόκοκκα υλικά και γενικά περικλείουν ασθενείς υδροφορίες.*
- iii. Αποθέσεις που καλύπτουν την υπόλοιπη λεκάνη. Κυμαίνονται σε σύσταση και χαρακτηριστικά ανάλογα με τον τύπο πετρώματος που επικρατεί στα περιθώρια της. Στις περιοχές που επικρατούν Πλειστοκαινικές αποθέσεις (σχηματισμός Αγ. Γαλήνης) υπάρχει ένα λεπτό κάλυμμα από αποσαθρωμένα πλειστόκαινα υλικά. Στις περιοχές που επικρατούν οι νεογενείς σχηματισμοί, το αλλουβιακό κάλυμμα συνίσταται από μάργες, ιλύ και άργιλο, ενώ είναι δύσκολο να διακριθεί από το διαβρωμένο Νεογενές.*

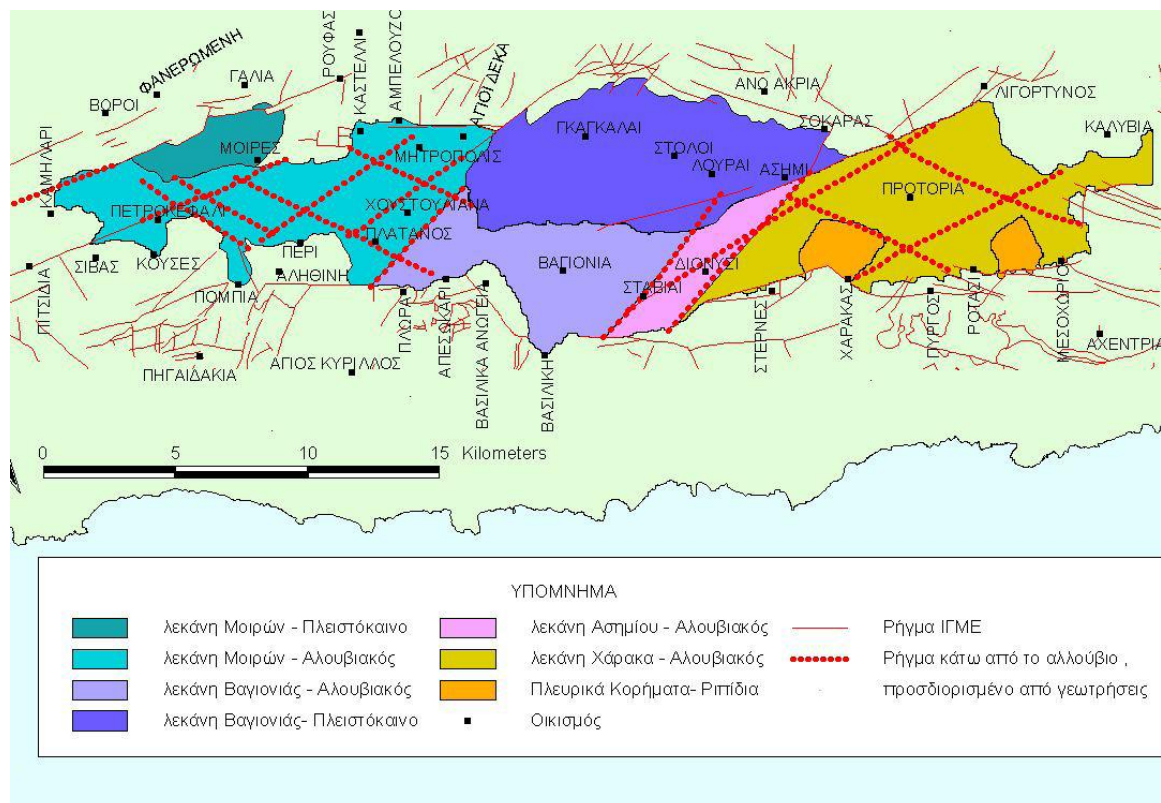


Εικόνα 3.3: Αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας, Λεκάνη Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).

3.3 Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς.

Η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί μια «ομοιόμορφη» υδρογεωλογική ενότητα αλλά κάτω από τον αλλουβιακό μανδύα κρύβει ρηξιτεμάχη με διαφορετικές υδρογεωλογικές ιδιότητες. Το πεδινό τμήμα της Μεσσαράς υποδιαιρέθηκε σε επιμέρους λεκάνες, οι οποίες υδραυλικά επικοινωνούν μεταξύ τους, σε αντιστοιχία με τις ρηξιγενείς ζώνες (block-faults) κατά την επιμήκη διάσταση της λεκάνης (Α-Δ). Οι ρηξιγενείς αυτές ζώνες διαμόρφωσαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τη σύσταση και τη στρωματογραφία του προσχωματικού-τεταρτογενή υδροφορέα (αλλουβιακός- πλειστοκαινικός). Οι υδροφορείς στις λεκάνες αυτές συνίστανται από τον αλλουβιακό σχηματισμό με «πολύ καλές» υδρογεωλογικές ιδιότητες κυρίως κατά μήκος των κύριων υδρορεμάτων και από τους πλειστοκαινικούς σχηματισμούς με σχετικά «μέτριες» ιδιότητες αλλά τοπικά εμφανίζουν και «καλές». Ο κατώτερος ορίζοντας, το νεογενές, έχει μικρή υδρογεωλογική σημαντικότητα ως υδροφορέας και κατά θέσεις εμφανίζει «μέτριες» υδρογεωλογικές ιδιότητες.

Η μόνη υπόγεια διαφυγή του νερού του υδροφορέα εκτός λεκάνης είναι από τη στενή και μικρού πάχους ζώνη της Φαιστού προς στη λεκάνη του Τυμπακίου και τελικά εκβάλλει στον κόλπο του Τυμπακίου. Τοπικά εμπόδια (ζώνες με μικρή διαπερατότητα) κατά θέσεις αναγκάζουν το υπόγειο νερό να αναβλύζει στην επιφάνεια ως επιφανειακή απορροή, όμως στη συνέχεια είτε κατεισδύει ξανά ή απορρέει επιφανειακά. Αυτή η διασύνδεση μεταξύ επιφανειακού και υπόγειου νερού λάμβανε χώρα σε μεγαλύτερο βαθμό πριν αρχίσει η έντονη εκμετάλλευση του υπόγειου δυναμικού και την συνεπακόλουθη πτώση του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 3.4: Υποδιαίρεση της υδρογεωλογικής λεκάνης της Μεσσαράς (Κριτσωτάκης, 2009).

Κεφάλαιο 4: Γεωθερμία

Σύμφωνα με τον ορισμό του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Γεωθερμίας (EGEC), η Γεωθερμία είναι η ενέργεια υπό μορφή θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης. Αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας παρέχοντας θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια 24 ώρες την ημέρα, όλο το χρόνο. Μια πηγή ενέργειας σχεδόν άπειρη και παγκοσμίως διαθέσιμη. Έχει χρησιμοποιηθεί από την αρχαιότητα για θέρμανση και λουτροθεραπεία, και τα τελευταία περίπου 100 χρόνια, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το δυναμικό της είναι ανεξάντλητο σε

ανθρώπινη κλίμακα χρόνου, συγκρίσιμο με εκείνο του ήλιου. Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εδώ και πολλές δεκαετίες η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε πολλές άμεσες εφαρμογές σε διάφορους τομείς όπως ο αγροτικός, βιομηχανικός και τουριστικός τομέας, καθώς και για θέρμανση κτιρίων. (Φυτίκας και Ανδρίτσος 2004).

Η θερμοκρασία της Γης βαίνει συνεχώς αυξανόμενη προς το κέντρο της. Όπως έχει υπολογιστεί, η μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος υπό φυσιολογικές συνθήκες μέσα στο γήινο φλοιό είναι περίπου 30°C ανά 1000 m. Η μεταβολή αυτή ονομάζεται **Γεωθερμική Βαθμίδα**.

Η συγκεντρωμένη για διάφορους λόγους θερμότητα στο εσωτερικό της Γης μεταφέρεται κοντά στην επιφάνεια είτε με αγωγή είτε με συναγωγή μέσω γεωλογικών διεργασιών.

Υπάρχουν περιοχές με αυξημένη θερμοκρασία που μπορεί να οφείλεται σε διάφορους γεωλογικούς παράγοντες όπως:

- Σε περιοχές όπου σε βαθύτερους ορίζοντες υπάρχουν γρανιτικά σώματα (π.χ. λακόλιθοι) προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας των περιβαλλόντων πετρωμάτων και επομένως παρουσιάζεται ανωμαλία στη γεωθερμική βαθμίδα.
- Σε ιζηματογενείς λεκάνες η διαπυρική κίνηση (άνοδος μέσω ρηγμάτων) των εβαποριτών (γύψου, ανυδρίτη και ορυκτού άλατος) που είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας μεταφέρει θερμότητα από τα μεγάλα σε μικρότερα βάθη.
- Επίσης το νερό κατά την κάθοδό του σε αρκετά βαθύτερους ορίζοντες μέσω βαθιών ρηγμάτων αποκτά υψηλές θερμοκρασίες λόγω της γεωθερμικής βαθμίδας.

Η θερμότητα που αναπτύσσεται σύμφωνα με τα παραπάνω, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα, προκαλεί ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες προς τις ρηχές και ψυχρότερες. Πολύ συχνά όμως, παραμένει σε βαθύτερους ορίζοντες θερμαίνοντας τα πετρώματα και τα υπόγεια βαθειά νερά.

Τα γεωθερμικά ρευστά, λόγω αυξημένης θερμοκρασίας και πίεσης, ανέρχονται προς την επιφάνεια και μέσω μεγάλων ρηγμάτων μπορεί να φτάσουν στην επιφάνεια και να σχηματίσουν τις **θερμές πηγές ή αλλες εντυπωσιακές επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας**.

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα γεωθερμικά ρευστά εγκλωβίζονται σε μεγαλύτερα βάθη μέσα σε περατά πετρώματα, προστατευόμενα από υπερκείμενα στεγανά πετρώματα (Cap Rocks) που εμποδίζουν τη διάχυση της θερμότητας προς την επιφάνεια. Αυτά τα περατά πετρώματα λειτουργούν ως «ταμιευτήρες» (reservoir).

4.1 Βιβλιογραφική έρευνα για τη μελέτη γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας

Οι Χατζηγιάννης και Καβουρίδης (2013) πραγματοποίησαν γεωθερμική έρευνα στην ευρύτερη περιοχή της Ιεράπετρας κοντά στο χωριό Καπίστρι. Πιο συγκεκριμένα, ανέλυσαν δείγματα από πέντε υδρογεωτρήσεις βάθους 100 ως 170m, με θερμοκρασίες ρευστών από 20 ως 25°C. Εξαιτίας του συστήματος των ρηγμάτων της περιοχής έχουν δημιουργηθεί συνθήκες που ευνοούν τη κυκλοφορία των ρευστών και τη μεταφορά θερμότητας.

Οι Battistel et al. (2014) μελέτησαν μέσω γεωθερμομετρίας ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα μέσης έως χαμηλής ενθαλπίας σε ανθρακικό-εβαποριτικό γεωθερμικό πεδίο. Η περιοχή μελέτης ήταν στην κεντρική Ιταλία, συγκεκριμένα στα Απέννινα Όρη, όπου η αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα οφείλεται σε ηφαιστειακή δραστηριότητα. Με βάση τη λιθολογία της περιοχής, θεωρήθηκε ότι τα κατάλληλα γεωθερμόμετρα για την εκτίμηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα είναι τα γεωθερμόμετρα του χαλαζία και του χαλκηδόνιου, σύμφωνα με τα οποία η θερμοκρασία κυμαίνεται από 48 έως 115°C.

Οι Porowski και Dowgiallo (2008) χρησιμοποίησαν γεωθερμόμετρα για την διερεύνηση ρευστών χαμηλής ενθαλπίας στην Πολωνία (Sudetes Mts). Η αυξημένη θερμοκρασία των ρευστών οφείλεται στη κατείσδυση μετεωρικού νερού σε μεγάλα βάθη. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, σε ευνοϊκές υδρογεωλογικές συνθήκες, οι καλύτερες εκτιμήσεις της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα προκύπτουν από τα γεωθερμόμετρα SiO₂, κυρίως χαλκηδόνιου, Na-K-Ca και εν μέρει Na-K, λόγω ότι ο αλβίτης και ο καλιούχος άστριος δεν υφίστανται σε όλους τους τύπους των πετρωμάτων υδροθερμική εξαλλοίωση (Arnorsson, 2000).

Οι Reyes και Jongens (2003), μελέτησαν το τεκτονικό χώρο στα γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας στη Νέα Ζηλανδία. Το σύστημα των θερμών πηγών

στη Νέα Ζηλανδία εντοπίζεται σε τρία μεγάλα τεκτονικά περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από:

1. Καταβύθιση των τεταρτογενών σχηματισμών που σχετίζονται με ρηγμάτωση και μαγματική διείσδυση.
2. Κυκλοφορία των θερμών ρευστών που ευνοείται από ρήγματα
3. Τη ραγδαία ανύψωση των Αλπικών ρηγμάτων

Η πολύπλοκη τεκτονική της Νέας Ζηλανδίας έχει σαν συνέπεια ένα ευρύ σύστημα από θερμές πηγές. Οι περιοχές με θερμές πηγές και θερμοκρασίες ταμιευτήρα $>150^{\circ}\text{C}$ διανέμονται σε όλη τη χώρα, είναι γενικά ανεκμετάλλευτες παρόλο που η θερμότητα έχει άμεση χρήση.

Οι Reyes et al. (2009) συνοψίζουν το ρόλο της κίνησης των τεκτονικών πλακών για την κατανομή, τις θερμοκρασίες, ισοτοπικές και χημικές συνθέσεις χαμηλής ενθαλπίας ρευστών στη Νέα Ζηλανδία και το πως αυτές επηρεάζονται από τους γεωλογικούς και γεωχημικούς παράγοντες. Η δειγματοληψία της συγκεκριμένης μελέτης περιλαμβάνει 86 νέες χημικές και ισοτοπικές αναλύσεις ρευστών και 30 από παλαιότερες εργασίες. Περίπου το 90% των θερμών ρευστών στη Νέα Ζηλανδία εκφορτίζεται στα όρια της σύγκλισης των πλακών του Ειρηνικού και της Αυστραλίας.

4.2 Μονάδες μέτρησης

Οι εκφράσεις περιεκτικότητας και συγκέντρωσης διαλυμάτων δείχνουν αριθμητικά την ποσότητα της ή των διαλυμένων ουσιών σε ορισμένη ποσότητα διαλύματος ή διαλύτη. Επειδή οι φράσεις "αραιό διάλυμα" ή "πυκνό διάλυμα" δεν είναι ακριβείς και απλά δηλώνουν αν ένα διάλυμα έχει μικρή ή μεγάλη περιεκτικότητα, υπήρξε η ανάγκη ακριβέστερων εκφράσεων που να δηλώνουν επακριβώς την ποσότητα (σε g, ή σε mL ή σε moles) της διαλυμένης ουσίας σε ορισμένη μάζα (g ή Kg) ή ορισμένο όγκο (mL ή L) διαλύματος ή διαλύτη.

Για τον υπολογισμό των ποιοτικών και γεωχημικών χαρακτηριστικών των ρευστών, για την κατασκευή διαγραμμάτων και τη χρήση των γεωθερμομέτρων είναι απαραίτητη η μετατροπή των μονάδων μέτρησης της περιεκτικότητας του ρευστού στα διάφορα στοιχεία. Οι απαιτούμενες μονάδες μέτρησης και οι αντίστοιχες μετατροπές για τη διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής είναι:

4.2.1 Parts Per Million (ppm)

Η έκφραση μέρη στο εκατομμύριο (ppm) είναι το κλάσμα της ποσότητας της διαλυμένης ουσίας προς τη συνολική ποσότητα του διαλύματος. Τα ppm (μέρη στο εκατομμύριο) υποδηλώνουν περιεκτικότητες και αναλογίες της τάξης κυρίως του εκατομμυριοστού, είναι αδιάστατοι αριθμοί γιατί είναι σχέσεις ομοίων ποσοτήτων.

$$\text{ppm} = 0,001 \text{ g ανά } 1.000 \text{ g}$$

$$\text{ppm} = 1 \text{ mg διαλυμένης ουσίας ανά διαλύματος } 1 \text{ kg}$$

Για ένα υδατικό διάλυμα:

$$\text{ppm} = 1 \text{ mg διαλυμένης ουσίας ανά λίτρο διαλύματος.}$$

Παράδειγμα:

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα αλλά και για τα επόμενα χρησιμοποιείται μια τυχαία περιεκτικότητα από μια τυχαία γεώτρηση.

Περιεκτικότητα Ca^{2+} στη γεώτρηση Μελιδοχώρι 1

$$117,74 \text{ ppm} = 117,74 \text{ mg } \text{Ca}^{2+} / \text{L διαλύματος} = 0,11774 \text{ g/L}$$

4.2.2 mol/L

Η τροποποίηση του ppm (σε mg / L) μας επιτρέπει να πάμε σε μοριακότητα, η οποία έχει μονάδες mol/L. Η μοριακότητα δηλώνει τον αριθμό των moles μιας διαλυμένης ουσίας ανά λίτρο διαλύματος. Η συγκέντρωση συμβολίζεται με C και δίνεται από τη σχέση :

$$C = \frac{n}{V}$$

όπου :

n = τα moles της διαλυμένης ουσίας (mol)

V = ο όγκος του διαλύματος (L)

Παράδειγμα:

Διαιρώντας το ατομικό βάρος των ιόντων του ασβεστίου:

$$\frac{0,11774 \text{ g/L}}{40,08 \text{ g/mol}} = 0,0029 \text{ mol/L}$$

4.2.3 meq/L

Η ποσότητα μιας ουσίας σε ισοδύναμα έχει συχνά ένα πολύ μικρό μέγεθος, γι' αυτό περιγράφεται από τον όρο meq ή mEq (milliequivalents), το πρόθεμα milli δηλώνει ότι το μέτρο έχει πολλαπλασιαστεί με το 1000. Πολύ συχνά, το μέτρο έχει χρησιμοποιηθεί με τον όρο meq διαλυμένης ουσίας ανά λίτρο διαλύτη (meq/L).

$$\text{meq/L} = \frac{\text{mg/L}}{\text{ισοδύναμο βάρους}}$$

Παράδειγμα:

ατομικό βάρος Ca^{2+} = 40,08

$$\frac{117,74 \text{ mg/L}}{40,08} \cdot 2 = 5,88 \text{ meq/L}$$

ατομικό βάρος Na^{+} = 23

συγκέντρωση Na στη γεώτρηση Μελιδοχώρι 1 = 13,56 mg/L

$$\frac{13,56 \text{ mg/L}}{23} \cdot 1 = 0,59 \text{ meq/L}$$

4.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά ρευστού

Φυσικές Παράμετροι (από Βουδούρη, 2009).

Η ποιότητα του υπόγειου ρευστού εξαρτάται τόσο από τις χημικές όσο και από τις φυσικές παραμέτρους που το χαρακτηρίζουν, οι οποίες είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία
- Χρώμα
- Θολότητα
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ραδιενέργεια
- Αλατότητα
- Αλκαλικότητα
- Σκληρότητα

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία των υπόγειων ρευστών καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία των πετρωμάτων, τα οποία τα περιβάλλουν. Οι θερμοκρασίες των υπόγειων ρευστών τείνουν να παραμείνουν σταθερές, εκτός από τα επιφανειακά νερά που παρουσιάζουν διακυμάνσεις ως αποτέλεσμα των μεταβολών της ηλιακής ενέργειας πάνω στην επιφάνεια της γης. Κατά κύριο λόγο αυτό που μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία των υπογείων ρευστών είναι οι μεταβολές της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα και οι γεωθερμικές συνθήκες της περιοχής του υδροφορέα.

Συνήθεις τιμές της θερμοκρασίας είναι $14-15^{\circ}\text{C}$, στους αβαθείς υδροφορείς $10-20^{\circ}\text{C}$, ενώ στις πηγές η θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την παροχή τους, με εξαίρεση τις θερμομεταλλικές πηγές.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα υπόγεια νερά επηρεάζεται από το ποσοστό των διαλυμένων αλάτων, το οποίο εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία, γι' αυτό και η μέτρηση της πρέπει να γίνεται στους 25°C . Στο γλυκό νερό ενδεικτικές τιμές της αγωγιμότητας είναι $140-1100\ \mu\text{S}/\text{cm}$, στα υφάλμυρα νερά $2000-3000\ \mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ στα υπεραλμυρά νερά $100000\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Στο πόσιμο νερό το επίπεδο της αγωγιμότητας είναι $400\ \mu\text{S}/\text{cm}$.

Ενεργός οξύτητα (pH)

Ενεργός οξύτητα είναι η συγκέντρωση των ιόντων H_3O^+ που περιέχονται στο διάλυμα και εκφράζεται με το pH, δηλ. με τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων H_3O^+ . Ο προσδιορισμός του pH γίνεται είτε χρωματομετρικά, με τη χρήση δεικτών, προσθέτοντας ένα δείκτη οξέος-βάσης στο διάλυμα. Οι δείκτες οξέος-βάσης (ονομάζονται και 'ηλεκτρολυτικοί' ή 'πρωτολυτικοί' δείκτες) είναι ουσίες των οποίων το χρώμα αλλάζει ανάλογα με το pH του διαλύματος στο οποίο προστίθενται, είτε ηλεκτρομετρικά, με τη χρήση ενός πεχάμετρου, το οποίο είναι μία ειδική συσκευή που χρησιμοποιεί την αρχή της ποτενσιομετρικής μέτρησης του pH (ηλεκτρομετρική μέθοδος). Το πεχάμετρο βοηθά στην περίπτωση που απαιτείται ιδιαίτερη ακρίβεια στη μέτρηση του pH.

Το pH του υπόγειου ρευστού καθορίζεται από τις διάφορες χημικές αντιδράσεις και ισορροπίες μεταξύ των διαλυμένων ιόντων μέσα σε αυτό. Το pH που οφείλεται στην παρουσία του CO_2 αποτελεί το pH ισορροπίας ή pHs κορεσμού. Αν το pH του ρευστού είναι μικρότερο από το pHs κορεσμού τότε το νερό έχει μεγάλη διαλυτική ικανότητα και

μπορεί να διαλύσει το CaCO_3 . Στην αντίθετη περίπτωση το διάλυμα είναι κορεσμένο και αποθέτει το CaCO_3 .

Το pH των νερών γενικά μειώνεται όσο η υδάτινη μάζα ενηλικιώνεται. Μια νέα υδάτινη μάζα είναι συνήθως αλκαλική και σιγά-σιγά με τον χρόνο γίνεται όξινη. Αυτό οφείλεται κυρίως στη συγκέντρωση οργανικού υλικού, που εκλύει CO_2 όταν αποσυντίθεται. Γενικά ισχύει:

- $\text{pH}=7$ ουδέτερο
- $\text{pH} < 7$ όξινο
- $\text{pH} > 7$ αλκαλικό

Συνολικά Διαλυμένα Στερεά (T.D.S)- Αλατότητα του υπόγειου ρευστού

Η παρουσία αλάτων στο υπόγειο νερό σχετίζεται με το είδος των πετρωμάτων στα οποία κινείται, τον χρόνο παραμονής, την ταχύτητα ροής κ.λπ.

Τα T.D.S εκφράζουν τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων στο νερό, χωρίς να περιλαμβάνονται τα αιωρούμενα ιζήματα, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα αέρια. Δηλ. το T.D.S αποτελεί ένα δείκτη μεταλλικότητας (αλατότητας) και συνδέεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) με τις σχέσεις:

$$\text{TDS (ppm)} = 0.65 \cdot \text{EC } (\mu\text{S/cm})$$

Οι διακυμάνσεις των τιμών TDS είναι:

- Ιζήματα 1000-1200 mg/l
- Γρανίτες 200-300 mg/l
- Αλμυρά νερά 30.000 mg/l

για $\text{TDS} < 1000 \text{ mg/L}$ το νερό είναι γλυκό και υφάλμυρο για τιμές 1000-10.000 mg/L.

Για τον υπολογισμό του T.D.S. προστίθενται οι τιμές όλων των ιόντων, ενώ ο Hounslow(1995) προτείνει την κάτωθι αναλυτική έκφραση για το T.D.S.:

$$\text{T.D.S.} = \text{Σύνολο ιόντων} + \text{SiO}_2 - (0,5082 \times \text{HCO}_3^-)$$

Το T.D.S. μπορεί να επηρεασθεί από τη διείσδυση της θάλασσας, την εξάτμιση του ρευστού και τη διάλυση ορυκτής ύλης. Το πλεόνασμα του αρδευτικού ρευστού που

δηθείται στον υδροφόρο αυξάνει το T.D.S. Μεγάλες τιμές αλατότητας απαντώνται σε υδροφόρους ξηρών περιοχών και σε λεκάνες με κακή στράγγιση.

Στις παράκτιες περιοχές τα αερομεταφερόμενα άλατα αποτελούν μια σημαντική πηγή αλατότητας των υπόγειων νερών. Εγκλωβισμένα αλμυρά νερά εντοπίζονται σε περιοχές ιζηματογενών αποθέσεων (badlands).

Τα υπόγεια νερά έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων από τα επιφανειακά, λόγω φόρτισης με άλατα από τη διάλυση των πετρωμάτων. Η αλατότητα είναι μεγαλύτερη σε περιοχές, όπου η κίνηση του ρευστού είναι μικρότερη και σε ξηρές περιοχές με ασήμαντη έπλυση από τη βροχή. Γενικά, η αλατότητα αυξάνει με το βάθος.

Αλκαλικότητα – Οξύτητα

Αλκαλικότητα είναι η ικανότητα του ρευστού να εξουδετερώνει οξέα. Η αλκαλικότητα οφείλεται στην παρουσία όξινων ανθρακικών, των ανθρακικών και των υδροξυλίων ιόντων. Κάτω από 4,5 pH το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα είναι σε ισορροπία με το ανθρακικό οξύ στο διάλυμα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αλκαλικότητα.

Αντίθετα η οξύτητα είναι η ικανότητα του ρευστού να εξουδετερώνει βάσεις και οφείλεται στην ύπαρξη διαλυμένου CO_2 στο νερό και στις ενώσεις H_2S , H_2SO_4 , HCl .

Ραδιενέργεια

Το υπόγειο νερό ενδέχεται να περιέχει και ραδιενεργά στοιχεία, όπως Ra, Sr, U, Th.

Σκληρότητα (Hardness)

Η σκληρότητα των νερών προέρχεται από την παρουσία δισθενών μεταλλικών κατιόντων, εκ των οποίων τα πιο συνηθισμένα είναι το Ca^{2+} και το Mg^{2+} . Τα ιόντα αυτά αντιδρούν με το σαπούνι και σχηματίζουν ίζημα και μαζί με ορισμένα ανιόντα, που βρίσκονται στο νερό δημιουργούν κρούστα.

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας έχει μεγάλη σημασία γιατί αποτελεί κριτήριο καταλληλότητας για πολλές χρήσεις των νερών γιατί δείχνει την τάση για σχηματισμό ανθρακικών επικαθήσεων στους λέβητες και τις ψυκτικές δεξαμενές, την ικανότητα δέσμευσης σαπώνων και χρωμάτων κ.ά. (Μήτρακας, 2001). Η σκληρότητα του πόσιμου ρευστού μεταξύ των άλλων συνδέεται και με την υγεία του ανθρώπου και συγκεκριμένα σχετίζεται με καρδιακές παθήσεις.

Η σκληρότητα διακρίνεται σε:

α) **Παροδική ή ανθρακική σκληρότητα** που προέρχεται από την παρουσία όξινων ανθρακικών αλάτων του Ca^{2+} και Mg^{2+} δηλ. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ και $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Τα άλατα αυτά προέρχονται από τη διάλυση αλάτων Ca^{2+} και Mg^{2+} , που υπάρχουν στα διάφορα πετρώματα ή στο έδαφος μέσα από τα οποία διέρχεται το νερό. Η διάλυση αυτή διευκολύνεται από το CO_2 που ελευθερώνεται από τη βακτηριακή δράση σε οργανικές ουσίες του εδάφους ή προσλαμβάνεται από την ατμόσφαιρα. Όταν το νερό θερμανθεί τα άλατα αυτά αποσυντίθεται στα αντίστοιχα ανθρακικά και πέφτουν ως ίζημα.

γ) **Ολική σκληρότητα (Total Hardness):** Είναι το άθροισμα της ανθρακικής και της μόνιμης σκληρότητας. Εκφράζεται σε ισοδύναμο CaCO_3 (mg/L), αλλά και σε βαθμούς σκληρότητας.

Ο Γαλλικός βαθμός ισοδυναμεί με 10 mg/L CaCO_3 και ο Γερμανικός βαθμός ισοδυναμεί με 17,86 mg/L $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Η ολική σκληρότητα (TH) δίνεται από τη σχέση: $\text{TH} = 2,5\text{Ca} + 4,1\text{Mg}$ αν οι περιεκτικότητες των ιόντων είναι εκφρασμένες σε mg/L και $\text{TH} = 50 (\text{Ca} + \text{Mg})$ αν είναι εκφρασμένες σε meq/L.

Η περιοχή μεταξύ 15-20 γαλλικών βαθμών χαρακτηρίζουν πολύ καλό νερό από άποψη σκληρότητας. Η μηδενική σκληρότητα, η παντελής δηλ. έλλειψη ασβεστίου και μαγνησίου δεν είναι επιθυμητή. Η μεγάλη σκληρότητα προκαλεί ελαφρά διάρροια σε όσους πίνουν για πρώτη φορά, ενώ η συνεχής εξωτερική του χρήση προκαλεί ερεθισμό στο δέρμα. Επίσης καταστρέφει τα υφάσματα και φθείρει τις συσκευές. Τα νερά με βάση τη σκληρότητα ταξινομούνται όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η ολική αλκαλικότητα ισούται με $\text{Alk} = 0,81967 \text{HCO}_3^-$ (mg/L).

Στην περίπτωση που η αλκαλικότητα είναι μεγαλύτερη από την ολική σκληρότητα τότε η μη ανθρακική σκληρότητα (μόνιμη) είναι μηδέν και η ολική σκληρότητα ισούται με την ανθρακική σκληρότητα (παροδική). Αν η αλκαλικότητα είναι μικρότερη από την ολική σκληρότητα τότε η παροδική σκληρότητα είναι ίση με την αλκαλικότητα και η μόνιμη είναι η διαφορά της αλκαλικότητας από την ολική σκληρότητα.

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση των νερών με βάση τη σκληρότητα (από Καλλέργη, 2000).

Ισοδύναμο CaCO_3 (mg/L)	Γαλλικοί βαθμοί	Χαρακτηρισμός του ρευστού
0-100	0-10	Μαλακό

101-200	10-20	Μέτρια σκληρό
201-300	20-30	Σκληρό
>300	>30	Πολύ σκληρό

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

4.4 Χημικές Παράμετροι

- Κύρια ιόντα: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-
- Δευτερεύοντα ιόντα: Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , F^- , CO_3^{2-} , Al^{3+} κ.α.
- Βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία: Pb^{2+} , Cr^{6+} , Hg^{2+} , As^{3+} , Cd^{2+} κ.α.

Κατιόντα

✓ **Κάλιο**

Το κάλιο είναι ένα σημαντικό στοιχείο για τον οργανισμό, για τη διατήρηση της ισορροπίας οξέων και βάσεων στο μεταβολισμό. Το ιόν κάλιο παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της διέγερσης των νευρών και των μυών.

Στα υπόγεια νερά συναντάται σε συγκεντρώσεις μικρότερες των 10 mg/L με εξαίρεση κάποιες ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες όπου η συγκέντρωση μπορεί να ανέβει στα 20-25 mg/L. Παρόμοιες συγκεντρώσεις παρατηρούνται και στα επιφανειακά νερά. (Σκληβανιώτης, 2004).

✓ **Νάτριο**

Το νάτριο είναι απαραίτητο στοιχείο για πολλούς μηχανισμούς του σώματος. Η επαρκής και ασφαλής ποσότητα του ημερήσια λαμβανομένου νατρίου είναι 1100 έως 3300 mg για ενήλικες και 115 έως 750 mg για νεογνά.

Για να εξασφαλιστεί ότι το νερό είναι χωρίς γεύση για την πλειοψηφία των καταναλωτών η συγκέντρωση αλατιού στο νερό πρέπει να είναι ίδια με αυτή στο σάλιο. Η μέση συγκέντρωση νατρίου στο σάλιο είναι 300 mg/L, αλλά μπορεί να φτάσει ακόμα και σε διπλάσιες τιμές. (Σκληβανιώτης, 2004).

✓ **Ασβέστιο**

Το ασβέστιο είναι βασικό στοιχείο για τον οργανισμό και μη τοξικό όταν λαμβάνεται από το στόμα. Συγκεντρώσεις μέχρι και 1800 mg/L στο πόσιμο νερό έχει αναφερθεί ότι είναι αβλαβείς. Η ημερήσια ανάγκη για τον άνθρωπο εκτιμάται στα 800 mg. Το ασβέστιο δεν συναντάται ελεύθερο στην φύση διότι οξειδώνεται πολύ εύκολα στον αέρα. Όμως, άλατα του ασβεστίου είναι τα πλέον διαδεδομένα στο νερό. Η ημερήσια πρόσληψη σε ασβέστιο υπολογίζεται σε 500 με 1000 mg.

Είναι ένα βασικό στοιχείο του πόσιμου ρευστού που δεν έχει αρνητικές επιδράσεις στην υγεία. Τα προβλήματα διάβρωσης και αποθέσεων εντείνονται όταν το νερό είναι υπό- ή υπέρ- κορεσμένο σε ανθρακικό ασβέστιο. (Σκληβανιώτης, 2004).

✓ **Μαγνήσιο**

Το μαγνήσιο είναι ένα βασικό ορυκτό στοιχείο για τον άνθρωπο. Συναντάται στον ολιβίνη (Mg,Fe)SiO₄, μαγνησίτη, δολομίτη και στους χλωρίτες. Προέρχεται και από τη διάλυση αργιλικών ορυκτών, όπου βρίσκεται προσροφημένο στο πλέγμα τους. Ο λόγος Ca/Mg στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 0,25, σε υφάλμυρα νερά 1,5-3,7, ενώ σε ασβεστολιθικά νερά 1,6 και σε δολομιτικά νερά 1,25.

Η κύρια πηγή λήψης μαγνησίου για τον άνθρωπο είναι κανονικά η τροφή, κυρίως το κρέας και τροφές φυτικής προέλευσης. Η τυπική διατροφή δίνει 200-400 mg μαγνησίου την ημέρα. (Βουδούρης, 2009).

Ανιόντα

✓ **Χλωριούχα**

Κύρια προέλευση είναι τα ιζηματογενή πετρώματα, που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσιας γένεσης, καθώς και οι εβαπορίτες. Άλλη πηγή αποτελεί η διείσδυση της θάλασσας στους παράκτιους υδροφόρους. Στις βιομηχανικές περιοχές αύξηση του Cl⁻ προέρχεται από την καύση των πλαστικών και τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Τα χλωριούχα ιόντα συμβάλλουν στη διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας των ερυθρών αιμοσφαιρίων και στην παραγωγή του υδροχλωρικού οξέος στο στομάχι.

Επιθυμητό όριο συγκέντρωσης των χλωριόντων στο πόσιμο νερό είναι 25 mg/L και το ανώτατο 250 mg/L.

Υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στο νερό προσδίδουν μία δυσάρεστη γεύση. Η επιθυμητή τιμή των 250 mg/L που έχει ορίσει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας βασίζεται μόνο στην αρνητική επίπτωση στη γεύση του ρευστού.

Νερό με συγκέντρωση μεγαλύτερη από 150 mg/L επιταχύνει την διαδικασία της διάβρωσης στους μεταλλικούς αγωγούς με αποτέλεσμα να εντείνονται τα φαινόμενα "καφετί" χρωματισμού του ρευστού λόγω σκουριάς. (Σκληβανιώτης, 2004).

✓ **Νιτρικά**

Τα νιτρικά ιόντα είναι το τελικό προϊόν της φυσικής αποσύνθεσης οργανικών αζωτούχων ενώσεων, όπως φυτικής και ζωικής πρωτεΐνης. Μπορεί να προέρχεται από ζωικά περιττώματα, λιπάσματα ή προηγούμενη χρήση του ρευστού από τον άνθρωπο. Τα νιτρικά χρησιμοποιούνται κυρίως στην παρασκευή λιπασμάτων. Σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται στην παραγωγή εκρηκτικών και το καθαρό νιτρικό κάλιο στην κατασκευή του γυαλιού.

Τα νιτρικά που βρίσκονται στο έδαφος απορροφώνται από τις ρίζες των φυτών και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οργανικών ενώσεων του αζώτου. Η περίσσια των νιτρικών διαλύεται στο νερό και μεταφέρεται στα βαθύτερα υδροφόρα στρώματα. Εκεί αν επικρατούν αερόβιες συνθήκες παραμένουν σαν νιτρικά ενώ αν επικρατούν αναερόβιες συνθήκες ανάγονται σε νιτρώδη αλλά η διαδικασία αυτή μπορεί να φθάσει και μέχρι πλήρους μετατροπής σε άζωτο (απονιτροποίηση).

Η συγκέντρωση των νιτρικών στα επιφανειακά νερά είναι σχετικά χαμηλή (0-18 mg/L) αλλά όταν υπάρχουν εισροές από στραγγίσματα γεωργικών εκμεταλλεύσεων ή σκουπιδότοπων, οι συγκεντρώσεις μπορεί να φτάσουν σε σημαντικά υψηλότερα επίπεδα. (Σκληβανιώτης, 2004).

✓ **Θειικά**

Κύρια προέλευση των θειικών ανιόντων είναι η διάλυση της γύψου και του ανυδρίτη, η χρήση θειικών λιπασμάτων τύπου $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, καθώς και η οξείδωση θειούχων ενώσεων (πυριτών), που εμφανίζονται σε αργιλικά πετρώματα. Στο φυσικό υδάτινο περιβάλλον τα θειικά ιόντα συναντώνται σαν αμμωνιακά άλατα ή αμμωνιακά μεταλλικά σύμπλοκα. Στην παράμετρο αυτή δεν συμπεριλαμβάνονται τα θειικά που είναι δεσμευμένα σε οργανικές ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές, όπως το θειικό διμεθύλιο και το θειικό διεθύλιο είναι έντονα τοξικές και ερεθιστικές στα μάτια και το δέρμα. Σε υψηλές συγκεντρώσεις τα οργανικά θειικά έχουν πιθανότητα να δράσουν σαν καρκινογόνοι και μεταλλακτικοί παράγοντες.

Τα θειικά επηρεάζουν επίσης και την γεύση του ρευστού. Οι συγκεντρώσεις για το αποδεκτό όριο γεύσης για τα πλέον συνήθη θειικά άλατα είναι (Σκληβανιώτης, 2004):

1. θεικό νάτριο 200-500 mg/L
2. θεικό ασβέστιο 250-900 mg/L
3. θεικό μαγνήσιο 400-600 mg/L

✓ **Όξινα ανθρακικά ιόντα (HCO_3^-)**

Είναι το επικρατέστερο ανιόν στα γλυκά υπόγεια νερά. Προέρχεται από το CO_2 της ατμόσφαιρας και το ελευθερούμενο στο έδαφος κατά την οργανική αποσύνθεση. Είναι σημαντικό ιόν για την ανθρώπινη υγεία γιατί ρυθμίζει το pH του οργανισμού σε κατάλληλες τιμές. Υπάρχουν και φυσικά ανθρακούχα νερά που περιέχουν σε μεγάλες περιεκτικότητες HCO_3^- και CO_2 . (Βουδούρης, 2009).

4.5 Ιοντικοί λόγοι

Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης μπορεί να διαπιστωθεί με τη χρήση χημικών δεικτών ή χημικών στοιχείων. Σε αυτά ανήκουν:

✓ **Συντελεστής Revelle**

Ο συντελεστής Revelle αποτελεί κριτήριο της διείσδυσης του θαλασσινού ρευστού και ορίζεται από τον λόγο: $\frac{\text{Cl}}{\text{CO}_3 + \text{HCO}_3}$, σε meq/L. Τιμές $R \geq 1$ αποτελούν ένδειξη της θαλάσσιας διείσδυσης.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης ρευστού από τη θαλάσσια διείσδυση (από Καλλέργης 2000).

Συντελεστής Revelle	Χαρακτηρισμός ρευστού
<1	Καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση
1-2	Ελαφρά ρυπασμένο νερό
2-6	Μέτρια ρυπασμένο νερό
6-10	Σοβαρά ρυπασμένο νερό
10-150	Επικίνδυνα ρυπασμένο νερό
>150	Θαλασσινό νερό

✓ **Ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)**

οι τιμές στο γλυκό νερό κυμαίνονται μεταξύ 140-1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, στα υφάλμυρα 2000-3000 και στα υπεράλμυρα 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

✓ **Χλώριο**

Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος ιχνηθέτης στις απλές περιπτώσεις διείσδυσης θαλασσινού ρευστού είναι το ιόν του Cl^- , το οποίο είναι το πιο συντηρητικό φυσικό συστατικό στο νερό, όταν αυτό είναι σε διαλυμένη μορφή. Στις περιπτώσεις αυτές έχει ιδιαίτερη σημασία να γνωρίζουμε τη βασική σύνθεση σε Cl^- των νερών σε μία δεδομένη περιοχή, κυρίως από ιστορικές πληροφορίες ή από γεωτρήσεις που έχουν μείνει ανέπαφες από το αλμυρό νερό, διότι και μικρές ακόμη ανεπαίσθητες αλλαγές στο περιεχόμενο Cl^- είναι δυνατόν να σημαίνουν την ενεργοποίηση της θαλάσσιας διείσδυσης, έτσι ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Οποσδήποτε η βασική γραμμή του περιεχομένου στα γλυκά υπόγεια νερά Cl^- ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή. Η βασική σύνθεση σε Cl^- είναι δυνατόν να είναι υψηλή σε ανεπηρέαστα υπόγεια νερά ίσως και πάνω από 200 mg/L. Γενικά όμως, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε το νερό ως γλυκό όταν η περιεκτικότητά του σε χλώριο είναι έως 250 mg/L. Αν η περιεκτικότητά του είναι μεγαλύτερη από 300 mg/L μέχρι 4.000-5.000 mg/L τότε είναι υφάλμυρο, ενώ αν είναι μεγαλύτερη από αυτή χαρακτηρίζεται σαν αλμυρό. Το θαλασσινό νερό έχει περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου συνήθως 18.000 mg/L.

✓ **Λόγος Na/Cl**

Ο λόγος Na/Cl στο υφάλμυρο νερό από θαλάσσια διείσδυση είναι συνήθως μικρότερος από ότι στο θαλασσινό νερό. Για το λόγο αυτό η παραπάνω σχέση σε συνδυασμό και με άλλες γεωχημικές παραμέτρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης της θαλάσσιας διείσδυσης, ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις χλωρίου κατά τα πρώτα στάδια της θαλάσσιας διείσδυσης. Η τιμή της σχέσης αυτής στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 0,876. Εάν η τιμή του είναι μεγαλύτερη του 1 τότε το νερό προέρχεται από υδροφόρους με αλκαλικά μαγματικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα (ιοντική ανταλλαγή Ca^{2+} και Mg^{2+} με Na^+). Μικρή τιμή της σχέσης αυτής μαρτυρά ρύπανση του υδροφόρου από θαλάσσια διείσδυση.

- $\text{Na/Cl}=0.876\pm 10\%$ για κανονικό νερό
- $\text{Na/Cl}>1$ για νερό από αλκαλικά πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα
- $\text{Na/Cl}<0.876\pm 10\%$ για υφαλμύρωση του υδροφορέα

✓ Λόγος Na/K

Ο λόγος Na/K σχετίζεται με το αν το νερό είναι θαλασσινό ή βρόχινο ή αν υπάρχει περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων με τις τιμές να κυμαίνονται:

- $\text{Na/K}=46-47$ για το θαλασσινό νερό
- $\text{Na/K}=10$, για βρόχινο νερό
- $\text{Na/K}=15-25$ νερό σε περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων
- $\text{Na/K}=45-70$ νερό σε περιοχή εκφόρτισης λόγω προσρόφησης Na^+

✓ Λόγος Mg/Ca

Ο λόγος Mg/Ca χρησιμοποιείται επίσης για τη διάκριση της θαλάσσιας διείσδυσης. Η τιμή αυτής της σχέσης στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 5 ενώ στο γλυκό είναι συνήθως μικρότερη της μονάδας. Ο λόγος αυτός αυξάνεται με την προέλαση του μετώπου υφαλμύρωσης. Αν η τιμή του λόγου αυτού ξεπεράσει το 5 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένδειξη θαλάσσιας διείσδυσης. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την προέλευση του ρευστού από ασβεστολιθικά ή μαγνησιούχα πετρώματα:

- $\text{Mg/Ca} < 0.5-0.7$ αντιστοιχούν σε νερό από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα
- $\text{Mg/Ca} = 0,7-0,9$ αντιστοιχούν σε δολομιτικά υδροφόρα στρώματα
- $\text{Mg/Ca} > 0.9$ αντιστοιχούν σε υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} . Στα οφιολιθικά οι τιμές είναι συνήθως μεγαλύτερες από 1.

✓ Λόγος Cl/SO₄

Η σχέση Cl/SO₄ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση σύγχρονης θαλάσσιας διείσδυσης από προηγούμενες διεισδύσεις σε νερά με συγκεντρώσεις χλωρίου μεγαλύτερες από 500 mg/L. Οι τιμές της σχέσης Cl/SO₄ είναι υψηλότερες στα παλαιά αλμυρά νερά σε σχέση με το σύγχρονο θαλάσσιο νερό, σαν αποτέλεσμα

της αναγωγής των θεικών. Στο θαλασσινό νερό η τιμή της παραπάνω σχέσης είναι περίπου 10 ενώ αν η τιμή κυμαίνεται από 5 έως 10 τότε το νερό είναι υφάλμυρο:

- $Cl/SO_4=10$ θαλασσινό νερό
- $Cl/SO_4>5$ νερό χλωριούχο
- $Cl/SO_4=1-5$ νερό χλωροθειούχο
- $Cl/SO_4= 0,2-1$ νερό θειούχο-χλωριούχο
- $Cl/SO_4<0,2$ νερό θειούχο

✓ Λόγος Br/Cl

Η σχέση Br/Cl εξαιτίας της συντηρητικής φύσης των Br^- και Cl^- μπορεί συχνά να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ πηγών αλμυρού ρευστού, ιδιαίτερα δε για τη διάκριση ανάμεσα στη θαλάσσια διείσδυση και σε αύξηση αλάτων λόγω παρουσίας εβαποριτών, αφού τα τελευταία επιδεικνύουν σημαντικά υψηλότερες τιμές από ότι στο θαλάσσιο νερό ή αλμύρες που προήλθαν από τη διάλυση αλίτη.

✓ $(Ca+Mg)/(Na+K)$

Σχετίζεται με την τροφοδοσία του υπογείου ρευστού:

- $(Ca+Mg)/(Na+K)>1$ υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία.
- $(Ca+Mg)/(Na+K)<1$ παλιό νερό στα κατάντη τμήματα του υδροφορέα (ως προς τη διεύθυνση ροής).

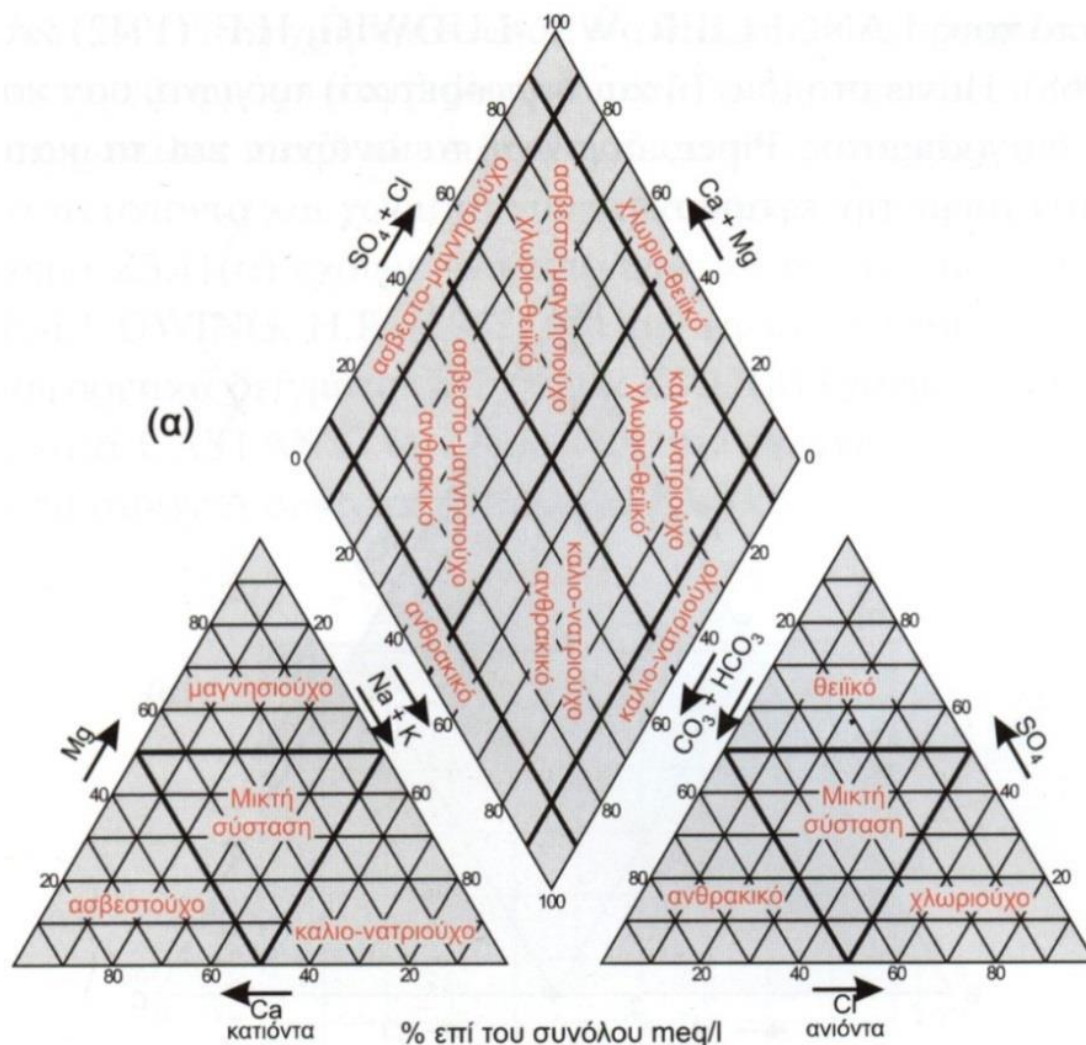
4.6 Υδροχημικά διαγράμματα

4.6.1 Τριγραμμικά διαγράμματα (Piper)

Είναι τα πιο εύχρηστα ίσως από τα διαγράμματα, γιατί η σύγκριση διάφορων ποιοτήτων ρευστού είναι άμεση μ'αυτά. Στα τριγραμμικά διαγράμματα που προτάθηκαν από τον Piper (1944), τα κατιόντα, εκφρασμένα επί τις % του συνόλου των κατιόντων σε meq/L, προβάλλονται σαν ένα σημείο στο αριστερό τρίγωνο, ενώ τα ανιόντα, εκφρασμένα επίσης επί τις % του συνόλου των ανιόντων, εμφανίζονται σαν ένα σημείο στο δεξιό τρίγωνο. Τα δύο αυτά σημεία, προβάλλονται, στη συνέχεια, στον κεντρικό ρόμβο, παράλληλα προς τις δύο πάνω πλευρές του. Το σημείο αυτό

παρουσιάζει την ολική ιοντική κατανομή και παριστάνεται με ένα κύκλο, του οποίου η ακτίνα, σε σχέση με κάποια κλίμακα, είναι ανάλογη προς το TDS.

Τα διαγράμματα αυτά, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα, ότι είναι άμεση η αναγνώριση των ομοιοτήτων και των διαφορών που παρουσιάζουν διάφορα δείγματα ρευστού, καθώς και της ανάμιξης δύο διαφορετικών νερών.

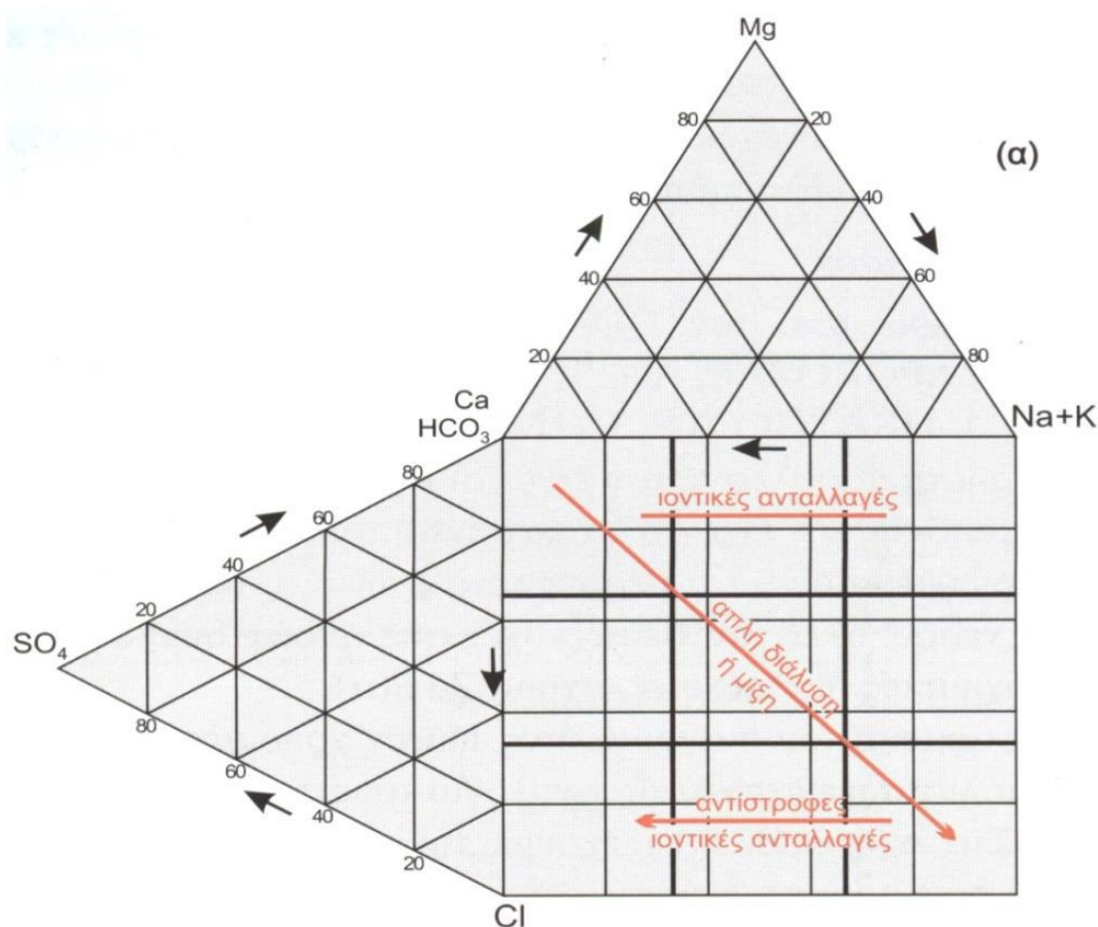


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Piper (από Σούλιο, 2006).

4.6.2 Διάγραμμα Durov

Αναπτύχθηκε από τη Σοβιετική σχολή και περιγράφηκε στην αγγλική γλώσσα από τον Zaporozec (1972). Για την κατασκευή του διαγράμματος Durov, προβάλλονται, σε χωριστά τρίγωνα, τα ανιόντα και κατιόντα σε meq%, όπως και στο διάγραμμα Piper. Στη συνέχεια, η προέκταση των καθέτων στις βάσεις των

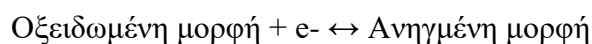
ισόπλευρων τριγώνων, που ξεκινούν από τα σημεία, που παριστάνουν την % περιεκτικότητα (σε meq) του ρευστού σε ανιόντα και κατιόντα, τέμνονται σε ένα σημείο, που παριστάνει την κύρια ιοντική συγκέντρωση % στο νερό. Από το σημείο αυτό της τομής, τα προηγούμενα ευθύγραμμα τμήματα προεκτείνονται στα δυο ορθογώνια, παριστάνοντας, έτσι, άλλες δύο επιλεγμένες χημικές παράμετρες (π.χ. TDS σε meq/L και pH όπως δείχνει το παρακάτω διάγραμμα ή ειδική αγωγιμότητα και σκληρότητα ή διαλυμένος οργανικός άνθρακας και TDS κλπ.).



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Durov (από Σούλιο, 2006).

4.6.3 Δυναμικό Οξειδοαναγωγής (Redox potential)

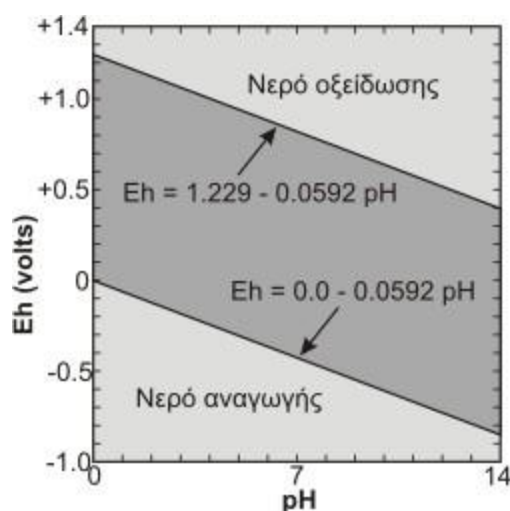
Το δυναμικό οξειδοαναγωγής (Eh) ενός υδατικού διαλύματος μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση του Nerst. Μετράται με ευαίσθητα ηλεκτρόδια και εξαρτάται από τη θέση ισορροπίας της αντίδρασης:



Η θέση της ισορροπίας εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις του οξειδωτικού και του αναγωγικού σώματος. Το πιο άφθονο και ισχυρό οξειδωτικό στη φύση είναι το οξυγόνο και το ισχυρότερο αναγωγικό θεωρείται το υδρογόνο.

Η μεταβολή του pH στο περιβάλλον προκαλεί σημαντική μεταβολή της τιμής του δυναμικού οξειδοαναγωγής, λόγω της συμμετοχής των ιόντων OH^- στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Γνωρίζοντας τις τιμές του δυναμικού οξειδοαναγωγής σε συνάρτηση με το pH, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μορφών με τις οποίες βρίσκεται ένα χημικό στοιχείο σε ένα συγκεκριμένο φυσικό περιβάλλον.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σχέση Eh-pH και διακρίνονται περιοχές όπου το νερό οξειδώνεται σε O_2 και περιοχές όπου ανάγεται σε H_2 . Επίσης η κατανομή των H_2S , CH_4 , Fe^{2+} και άλλων ενώσεων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του Eh. Με τη βοήθεια του Eh ενός υδάτινου περιβάλλοντος είναι δυνατόν να υπολογισθούν με ακρίβεια οι συγκεντρώσεις ιόντων ή ενώσεων στο περιβάλλον αυτό. Στην επιφάνεια της θάλασσας το $\text{Eh}=+0,3$ (οξειδωτικό περιβάλλον), λόγω εμπλουτισμού με αέρα και κοντά στον πυθμένα $\text{Eh}=-0,6$ (αναγωγικό περιβάλλον), λόγω περίσσειας οργανικού υλικού και έλλειψης οξυγόνου. Χαμηλό Eh συμβάλλει στη διατήρηση οργανικής ύλης σ' ένα ίζημα. Στην ξηρά, άφθονη οργανική ύλη υπάρχει στον πυθμένα λιμνών και ελών και στη θάλασσα σε κλειστούς κόλπους με περιορισμένη κυκλοφορία ρευστού και απουσία αδρόκοκκων κλαστικών υλικών.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Eh-pH (από Βουδούρη, 2009)

4.6.4 Διάγραμμα Wilcox

Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της καταλληλότητας του αρδευτικού ρευστού σε σχέση με τη φύση και τις ιδιότητες των καλλιεργούμενων εδαφών. Χρησιμοποιεί το δείκτη S.A.R. και την ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C.

Ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου (Sodium Adsorption Ratio) ισούται με:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

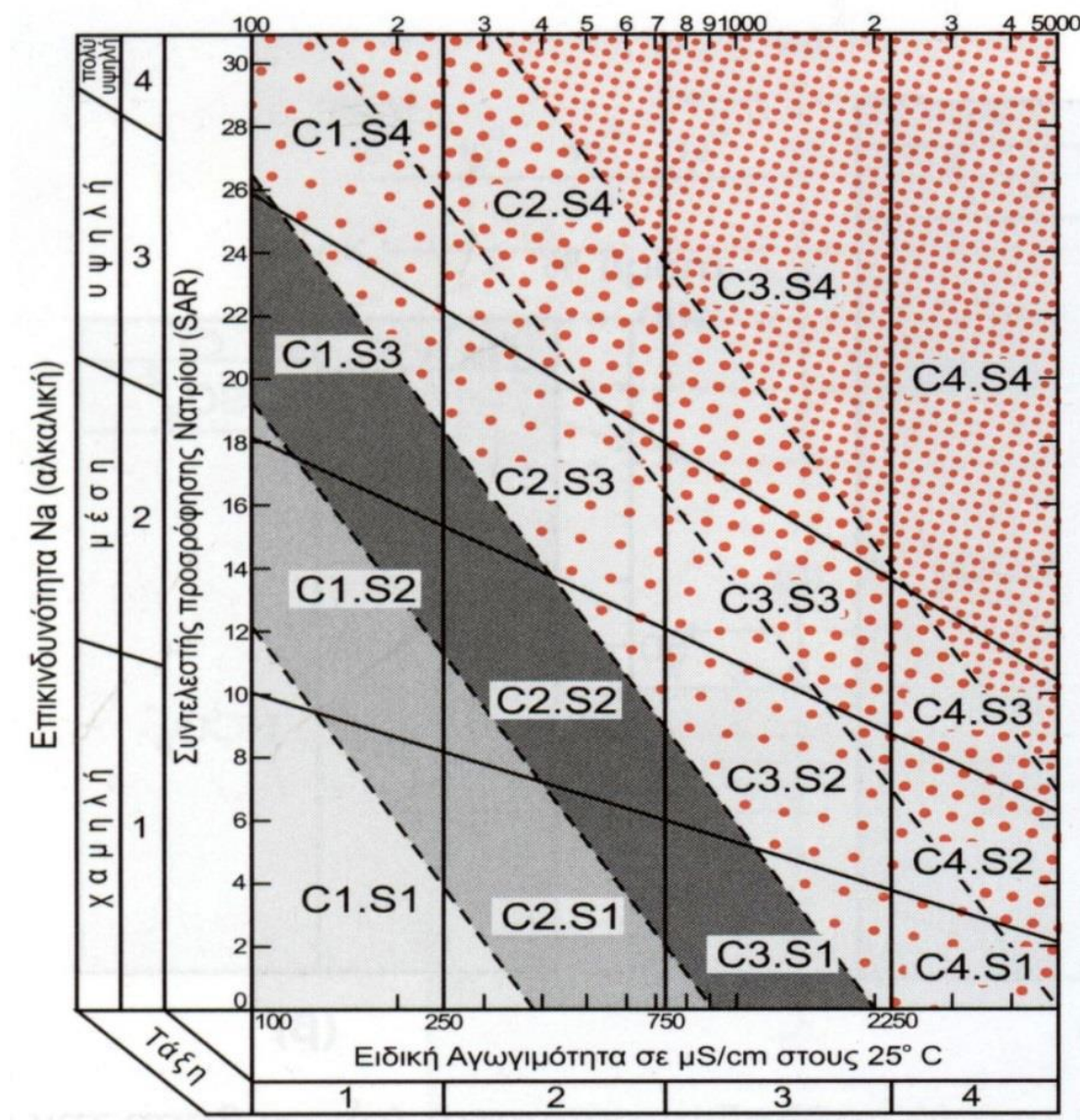
όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων είναι εκφρασμένες σε meq/L.

Ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου αποτελεί ένα βασικό κριτήριο της καταλληλότητας ενός ρευστού για άρδευση. Το νάτριο δημιουργεί αποκροκίδωση του εδάφους, προκαλώντας μείωση του αερισμού και της περατότητας του εδάφους. Για ηλεκτρική αγωγιμότητα 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τιμές του $SAR < 6$ υποδηλώνουν μικρό κίνδυνο νατρίου, 6-12 μέσο κίνδυνο νατρίου, 12-18 μεγάλο κίνδυνο νατρίου και τιμές $SAR > 18$ πολύ μεγάλο κίνδυνο νατρίου.

Με βάση το διάγραμμα αυτό μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες αρδευτικού ρευστού:

- C1-S1. Ποιότητα καλή.
- C1-S2, C2-S1. Ποιότητα καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά.
- C1-S3, C2-S2, C3-S1. Ποιότητα μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.
- C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1. Ποιότητα πολύ μέτρια έως κακή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ευαίσθητα φυτά, ούτε γενικά για βαριά εδάφη. Μπορεί να χρησιμοποιείται με μέτρα προφύλαξης σε ελαφρά εδάφη που αποστραγγίζονται καλά ή να προστίθεται γύψος.
- C2-S4, C3-S3, C4-S2. Ποιότητα κακή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται παρά μόνο για ανθεκτικά φυτά σε ελαφρά εδάφη καλώς αποστραγγιζόμενα, με προσθήκη γύψου.

- C3-S4, C4-S3, C4-S4. Πολύ κακή ποιότητα. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε καμία περίπτωση



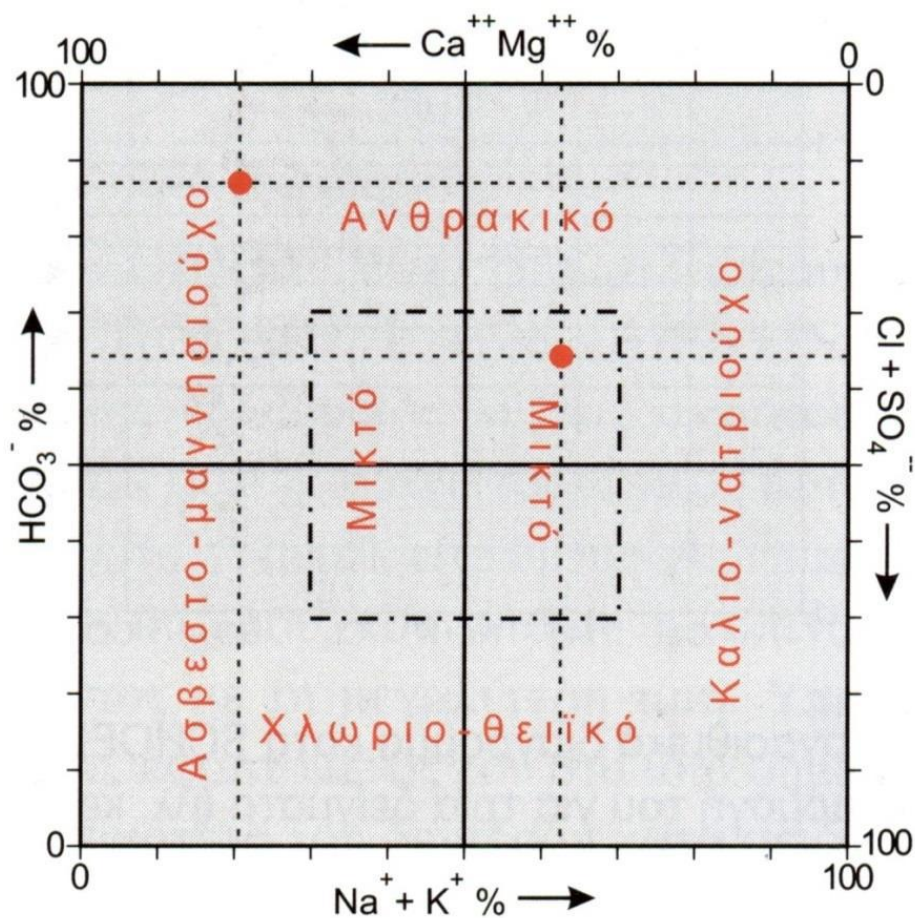
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Wilcox (από Σούλιο, 2006).

4.6.5 Διάγραμμα Ludwig Langelier

Το διάγραμμα αυτό εμφανίζει την κατανομή των δειγμάτων σε σχέση με το χλωριο-θειικό και καλιο-νατριούχο χαρακτήρα τους. Για τον ασβεστο-μαγνησιούχο και ανθρακικό χαρακτήρα των δειγμάτων, αντικαθιστώνται οι άξονες του διαγράμματος με $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ και HCO_3^- αντίστοιχα.

Στη μορφή που το διάγραμμα έχει και τους τέσσερις άξονες (HCO_3^- , $\text{Na}^+ - \text{K}^+$, $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$, $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$) εμφανίζεται η κατανομή των δειγμάτων και ως προς τους τέσσερις υδροχημικούς χαρακτήρες. Κάθε τομή των αξόνων σε σχέση με το κέντρο του διαγράμματος ορίζει μια τετραγωνική περιοχή όπου υπερσχύουν κάθε φορά δύο

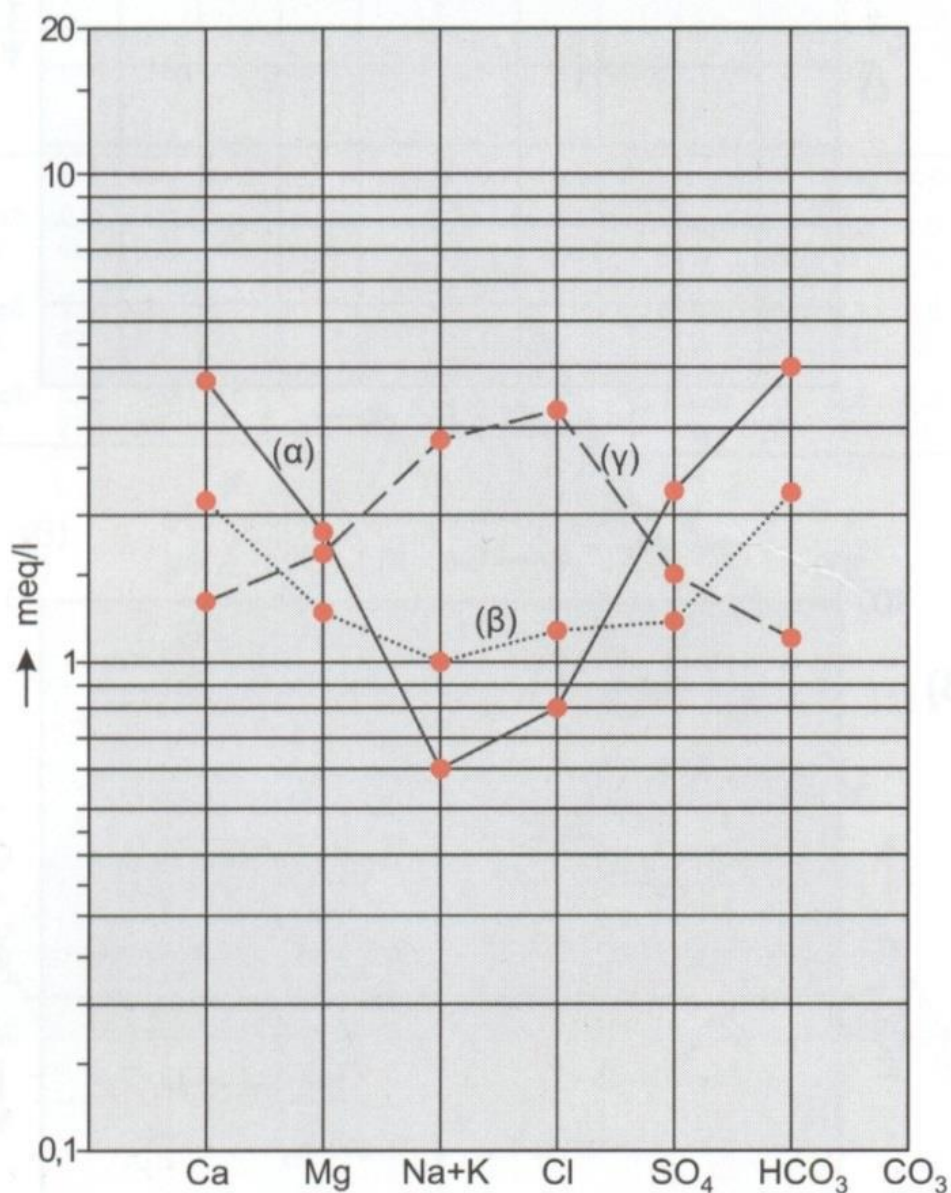
από τους τέσσερις χαρακτήρες. Στο κέντρο του διαγράμματος ορίζεται και μία μικτή περιοχή που όλοι σχεδόν οι χαρακτήρες είναι ισομερείς.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Ludwig Langelier (από Σούλιο, 2006).

4.6.6 Διάγραμμα Schoeller

Το Διάγραμμα Schoeller στον κατακόρυφο άξονα έχει τιμές διαφόρων ιόντων σε ημιλογαριθμική κλίμακα και στον οριζόντιο σε δεκαδική κλίμακα τα διάφορα ιόντα με την εξής σειρά: Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}+\text{K}$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Οι τιμές των ιόντων κάθε δείγματος ενώνονται στο διάγραμμα με μία τεθλασμένη γραμμή. Όταν η καμπύλη αυτή έχει το κυρτό μέρος προς τα επάνω το νερό είναι υφάλμυρο, ενώ όταν έχει το κοίλο το νερό είναι γλυκό. Όσο πιο ψηλά βρίσκεται αυτή, τόσο πιο μεγάλη είναι η συνολική περιεκτικότητα σε ιόντα (T.D.S.).

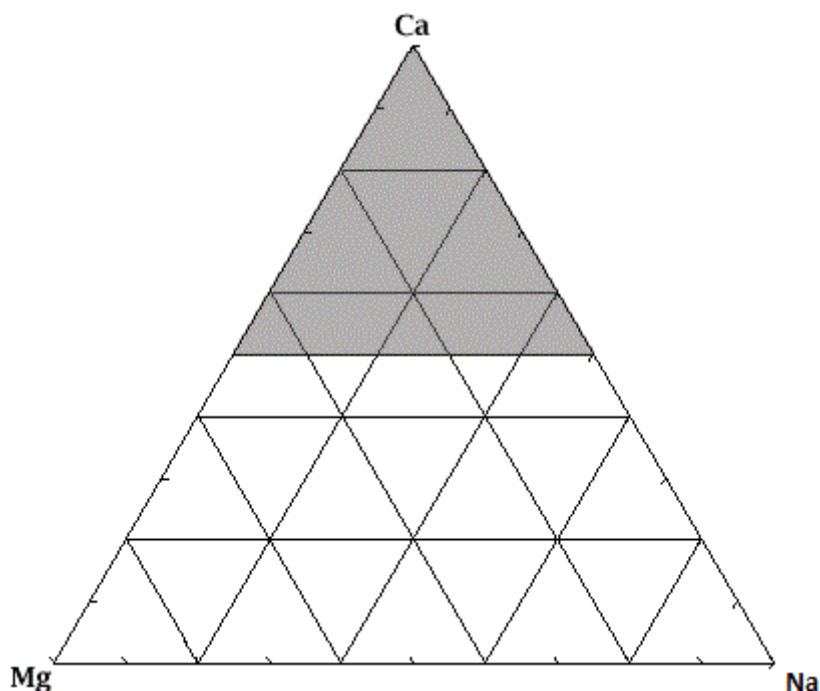


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Schoeller (από Παρασκάκη 2014)

4.6.7 Τριγωνικό διάγραμμα Mg-Ca-Na

Το τριαδικό διάγραμμα Na-K-Mg αποτελείται από ένα ταχείας ανταπόκρισης σύστημα K-Mg με ένα βραδέως εκ νέου εξισορροπημένο σύστημα Na-K για να αξιολογηθεί ο βαθμός επίτευξης ισορροπίας υγρού-πετρώματος. Αυτό το τριαδικό διάγραμμα είναι ένα ισχυρό εργαλείο για να: (1) γίνεται διάκριση μεταξύ ρευστού, κατάλληλου και ακατάλληλου για την εφαρμογή των γεωθερμομέτρων ιοντικής διαλυμένης ουσίας, (2) αξιολογεί σε βάθος τη θερμοκρασία ισορροπίας και (3) να

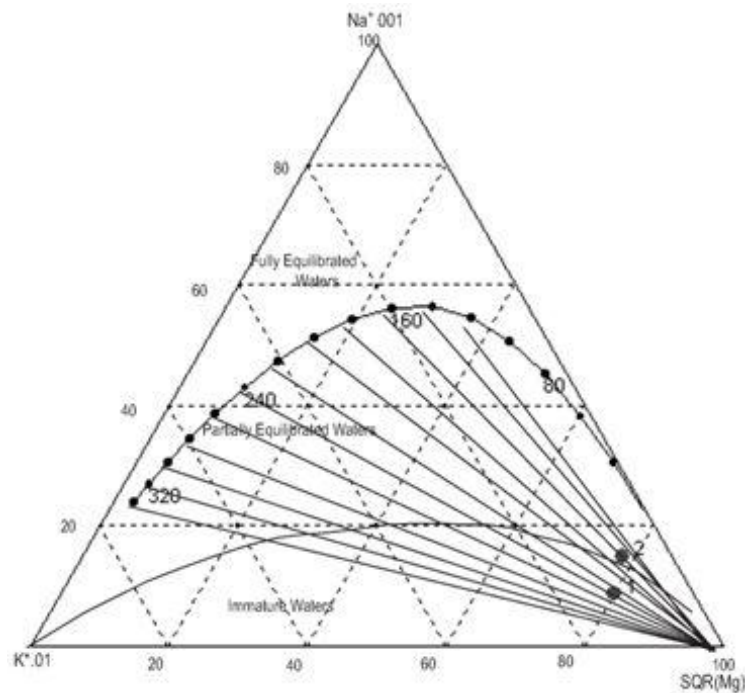
αξιολογήσει εκ νέου την επίδραση στην ισορροπία και ανάμιξη ενός μεγάλου αριθμού δειγμάτων ρευστού (Marini, 2004).



Σχήμα 4.7: Τριγωνικό διάγραμμα κατιόντων.

4.6.8 Τριγωνικό διάγραμμα Giggenbach

Ο Giggenbach (1988) πρότεινε ένα τριγωνικό διάγραμμα $\text{Na}/1000\text{-K}/100\text{-(Mg)}^{1/2}$ σαν μέθοδο υπολογισμού της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, καθώς και για να αναγνωρίζονται τα νερά που έχουν φτάσει σε ισορροπία με το μητρικό πέτρωμα. Το τριγωνικό αυτό διάγραμμα είναι χωρισμένο σε τρεις ζώνες, για εκτίμηση του βαθμού ισορροπίας που υπάρχει μεταξύ ρευστού-πετρώματος, απαραίτητη συνθήκη για την εκτίμηση των θερμοκρασιών προέλευσης των νερών. Έτσι, στη βάση του τριγώνου εμπίπτουν τα δείγματα «μη ώριμων» νερών, στο μέσο δείγματα «μερικώς ισορροπημένα», ενώ «πλήρης ισορροπία» υπάρχει όταν τα δείγματα (σημεία) βρίσκονται πλησίον ή επάνω στην καμπύλη που αντιπροσωπεύει την πλήρη ισορροπία του συστήματος.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Giggenbach, 1988.

4.7 Γεωθερμομετρία ρευστών

Οι χημικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μερικές φορές για να εκτιμηθεί η θερμοκρασία του υπόγειου ταμιευτήρα μέσω των γεωθερμομέτρων. Είναι, επίσης, χρήσιμα στην εκτίμηση νέων πεδίων και στην παρακολούθηση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών γεωθερμικών συστημάτων που βρίσκονται υπό αξιοποίηση. Υπάρχουν γεωθερμόμετρα που βασίζονται στην διαλυτότητα των ορυκτών, γεωθερμόμετρα αερίου, γεωθερμόμετρα ισοτόπων και γεωθερμόμετρα που βασίζονται σε αντιδράσεις στοιχείων (αλκαλικά γεωθερμόμετρα). Τα αλκαλικά γεωθερμόμετρα βασίζονται στην ισορροπία ρευστών – ορυκτών, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία, και η επιτυχής εφαρμογή τους προϋποθέτει 5 συνθήκες (Ellis 1979, Fournier 1977, Fournier et al 1974, Truesdell 1976, White 1970)

A) Η συγκέντρωση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στο γεωθερμόμετρο ελέγχεται μόνο από την εξαρτώμενη από την θερμοκρασία αντίδραση ορυκτού – ρευστού.

B) Υπάρχει αφθονία των ορυκτών και/ή των διαλυμένων ουσιών στον ταμιευτήρα ώστε η αντίδραση να γίνει αμέσως.

Γ) Η αντίδραση οδηγεί σε ισορροπία μέσα στον ταμιευτήρα.

Δ) Δεν γίνονται αντιδράσεις στην επιφάνεια, εφόσον το νερό έχει ανέλθει ταχύτατα μετά την πραγματοποίηση της ισορροπίας στον ταμιευτήρα.

Ε) Δεν γίνεται ανάμειξη ή διάλυση του αρχικού ρευστού.

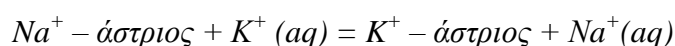
Δεν προσφέρονται όλες οι πηγές για γεωθερμομετρία. Τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε νερά, τα οποία ανέβηκαν στην επιφάνεια πολύ γρήγορα και δεν αντέδρασαν με τα πετρώματα κατά την άνοδό τους. Τέτοια νερά είναι τα θερμά νερά με υψηλή συγκέντρωση σε χλωριόντα. Αντίθετα, επιφανειακά όξινα νερά είναι ακατάλληλα για γεωθερμομετρία αφού η σύστασή τους είναι αποτέλεσμα αντιδράσεων ρευστού – πετρωμάτων και δεν αντιστοιχεί στην σύσταση του ρευστού που βρίσκεται στον ταμιευτήρα. Νερά θερμά, πλούσια σε όξινα ανθρακικά ιόντα, με μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωριόντα δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά (Nicholson, 1993).

Τα γεωθερμόμετρα «καταγράφουν» την θερμοκρασία της τελευταίας ισορροπίας (που μπορεί να μην είναι απαραίτητα αυτή του ταμιευτήρα).

Τα πυριτικά γεωθερμόμετρα βασίζονται στις απόλυτες συγκεντρώσεις και όχι στους λόγους συγκέντρωσης και έτσι επηρεάζονται από βρασμούς και διαλύσεις περισσότερο από τα αλκαλικά γεωθερμόμετρα. (από Παπαδάκης, 2004).

4.7.1 Γεωθερμόμετρο Na/K

Η εξαρτώμενη από την θερμοκρασία ιοανταλλαγή που γίνεται μεταξύ αυτών των στοιχείων έχει ως εξής:



Πίνακας 4.3: Εξισώσεις γεωθερμόμετρου Na/K

Εξισώσεις γεωθερμόμετρου Na/K	
$t^{\circ}\text{C} = \frac{856}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 0.857]} - 273.15$	Truesdell (1976)
$t^{\circ}\text{C} = \frac{883}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 0.780]} - 273.15$	Tonani (1980)
$t^{\circ}\text{C} = \frac{933}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 0.933]} - 273.15$	Arnorsson (1983)
$t^{\circ}\text{C} = \frac{1319}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 1.699]} - 273.15$	Arnorsson (1983)

$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 1.438]} - 273.15$	Fournier (1979)
$t^{\circ}\text{C} = \frac{1178}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 1.470]} - 273.15$	Nieva & Nieva (1987)
$t^{\circ}\text{C} = \frac{1390}{[\log(\frac{\text{Na}}{\text{K}}) + 1.750]} - 273.15$	Giggenbach (1988)
όπου $t > 120^{\circ}\text{C}$, Na, K οι συγκεντρώσεις σε mg/kg	

Πειραματικές εφαρμογές των παραπάνω εξισώσεων έδειξαν πως είναι αξιόπιστες για θερμοκρασίες $180\text{--}350^{\circ}\text{C}$, ενώ δεν δίνουν σωστά αποτελέσματα για θερμοκρασίες κάτω από 120°C . Σε τέτοιες θερμοκρασίες οι συγκεντρώσεις των Na^+ και K^+ επηρεάζονται από άλλα ορυκτά, όπως είναι οι άργιλοι, και δεν ελέγχονται μόνο από την ιοντοανταλλαγή των αστρίων. Παρότι έχουν προταθεί πολλές εξισώσεις, όλες δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα πάνω από 300°C , ενώ κάτω από αυτή την θερμοκρασία μόνο οι εξισώσεις των Fournier (1976) και Giggenbach (1988) δίνουν σημαντικά διαφορετική (υψηλότερη) θερμοκρασία σε σχέση με τις άλλες εξισώσεις (Nicholson, 1993).

4.7.2 Γεωθερμόμετρο Na/K/Ca

Διαπιστώθηκε ότι το γεωθερμόμετρο **Na/K** υπολόγιζε θερμοκρασίες υψηλές σε πεδία με χαμηλή θερμοκρασία όταν χρησιμοποιόταν σε νερά με υψηλή συγκέντρωση σε Ca^{2+} . Ο λόγος που συνέβαινε αυτό ήταν ότι κάτω από αυτές τις συνθήκες τα στοιχεία Ca^{2+} , Na^+ και K^+ ανταγωνίζονταν στην ιοντοανταλλαγή με πυριτικά ορυκτά, με αποτέλεσμα να ανατρέπεται η ισορροπία $\text{Na} - \text{K} - \text{άστριοι}$ που συζητήθηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό, οι Fournier και Truesdell (1973) δημιούργησαν το εμπειρικό γεωθερμόμετρο **Na-K-Ca** που πρότειναν να χρησιμοποιείται αντί του γεωθερμόμετρου Na-K, όταν ισχύει η σχέση: $\frac{[\text{Na}]/[\text{K}]}{[\text{Ca}]^{1/2}} > 1$ (οι συγκεντρώσεις σε mol/kg). Κατά την διατύπωση της παραπάνω σχέσης οι Fournier και Truesdell υπέθεσαν ότι:

1. Υπάρχει περίσσεια πυριτίου.
2. Το αργίλιο είναι προφυλαγμένο στην στερεά φάση.
3. Δεν παρατηρείται αλλαγή στο pH.

Πίνακας 4.4: Εξίσωση γεωθερμόμετρου Na/K/Ca.

Εξισώσεις γεωθερμόμετρου Na/K/Ca	
$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \beta \left[\log\left(\frac{\text{Ca}^2}{\square\square}\right) + 2.06\right] + 2.47} - 273 \text{ (Fournier, Truesdell, 1973)}$	
όπου $t > 70^{\circ}\text{C}$, Na, K, Ca οι συγκεντρώσεις σε mg/kg, $\beta = 4/3$ αν $t < 100^{\circ}\text{C}$, $\beta = 1/3$	

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, υπολογίζουμε την θερμοκρασία με $\beta = 4/3$. Αν πάρουμε $t < 100^{\circ}\text{C}$, χρησιμοποιούμε αυτήν την θερμοκρασία. Αν πάρουμε $t > 100^{\circ}\text{C}$ ή ο λογάριθμος βγει αρνητικός, τότε βάζουμε $\beta = 1/3$ και υπολογίζουμε ξανά τη θερμοκρασία.

Το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca (Fournier, Truesdell, 1973) είναι το πιο κατάλληλο για χαμηλής ενθαλπίας νερά, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ανάμιξη γλυκού με θαλασσινό νερό. Στην περίπτωση ανάμιξης, θα πρέπει να γίνει διόρθωση Mg^{2+} :

- Αν $t_{\text{Na-K-Ca}}$ είναι $< 70^{\circ}\text{C}$ δεν απαιτείται διόρθωση.
- Υπολογίζεται το R, χρησιμοποιώντας ισοδύναμα (meq/L) όπου:

$$R = \frac{\square\square}{\square\square + \square\square + \square} \cdot 100$$

- Αν $R > 50$ τότε ότι το νερό προέρχεται από σχετικά δροσερές συνθήκες ισορροπίας με θερμοκρασίες περίπου ίσες με τη μετρούμενη, ανεξάρτητα από την υψηλή $t_{\text{Na-K-Ca}}$.
- Αν $t_{\text{Na-K-Ca}} > 70^{\circ}\text{C}$ και $R < 50$, χρησιμοποιείται το R για τον προσδιορισμό του ΔT_{Mg} (Fournier 1979), το οποίο ΔT_{Mg} αφαιρείται από το $t_{\text{Na-K-Ca}}$.

$$\Delta t_{\text{Mg}} = 10.66 - 4.7415R + 325.87(\log R)^2 - 1.032 \times 10^5(\log R)^2/T - 1.968 \times 10^7(\log R)^2/T^2 + 1.605 \times 10^7(\log R)^3/T^2 \quad (1) \quad , \text{ για } 5 < R < 50$$

$$\Delta t_{\text{Mg}} = -1.03 + 59.971(\log R) + 145.05(\log R)^2 - 36711(\log R)^2/T - 1.67 \times 10^7 \log R/T^2 \quad (2) \quad \text{για } 0,5 < R < 5$$

Σε περίπτωση που η σχέση Δt_{Mg} βγει αρνητική ή το R είναι μικρότερο από 0,5, δεν πραγματοποιείται διόρθωση.

4.7.3 Γεωθερμόμετρο K/Mg

Η συγκέντρωση του Mg^{2+} μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς, νερά με υψηλή συγκέντρωση σε Mg^{2+} θα βρίσκονται σε ισορροπία σε συστήματα «νερό-πέτρωμα» χαμηλής θερμοκρασίας, πιθανόν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Το γεωθερμόμετρο **K/Mg** παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1983 και έπειτα μελετήθηκε το 1988 από τον Giggenbach. Εφαρμόστηκε αρχικά σε νερά χαμηλής ενθαλπίας (120-140°C), όπου δεν είχε επέλθει ισορροπία με τους αλκαλικούς άστριους, και επομένως δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν τα γεωθερμόμετρα **Na/K** και **Na-K-Ca**. Παρόλα αυτά, τα νερά είχαν έρθει σε ισορροπία με K-Mg-ούχα αργιλικά ορυκτά, επιτρέποντάς τα να χρησιμοποιηθούν στην γεωθερμομετρία. Το γεωθερμόμετρο **K/Mg** «λειτουργεί» σε θερμοκρασίες 50-300°C, και χρησιμοποιείται σε συστήματα, όπου δεν έχει επέλθει πλήρης ισορροπία μεταξύ του ρευστού και των πετρωμάτων του ταμιευτήρα (Nickolson, 1993).

Πίνακας 4.5: Εξίσωση γεωθερμόμετρου K/Mg.

Εξίσωση γεωθερμόμετρου K/Mg
$t^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{\log\left[\frac{K}{Mg^2}\right] + 14} - 273, \text{ Giggenbach (1988)}$
όπου K, Mg οι συγκεντρώσεις σε mg/kg

4.7.4 Γεωθερμόμετρο πυριτίου

Το γεωθερμόμετρο πυριτίου βασίζεται σε πειραματικά προσδιορισμένες διακυμάνσεις στην διαλυτότητα των διαφορετικών ειδών SiO_2 σε νερό, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Η βασική αντίδραση για διάλυση του πυριτίου είναι:



Το γεωθερμόμετρο χαλαζία είναι το καλύτερο για συνθήκες ταμιευτήρα >150°C. Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία το χαλκηδόνιο και όχι ο χαλαζίας πιθανότατα ελέγχει το διαλυμένο περιεχόμενο του διοξειδίου του πυριτίου.

Κύρια γεωθερμόμετρα του διοξειδίου του πυριτίου:

1. Γεωθερμόμετρο χαλαζία με μέγιστη απώλεια ατμού (25-250°C) , το οποίο εφαρμόζεται κυρίως σε πηγές και πηγάδια ρευστού χωρισμένα από ατμοσφαιρική πίεση.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5,75 - \log (\square\square\square 2)} - 273,15 \text{ (Fournier 1977)}$$

2. Γεωθερμόμετρο χαλαζία χωρίς απώλεια ατμού (25-250°C) , που εφαρμόζεται κυρίως σε δείγματα γεωτρήσεων

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5,19 - \log (\square\square\square 2)} - 273,15 \text{ (Fournier 1977)}$$

3. Εάν το γεωθερμόμετρο χαλαζία, άλλων γεωθερμομέτρων, δείχνουν θερμοκρασία 120-180°C είναι πιθανό ότι χαλκηδόνιος μπορεί να ελέγχει τη διαλυτότητα του πυριτίου. Υπό αυτές τις συνθήκες, ελέγχετε το γεωθερμόμετρου χαλκηδόνιου.

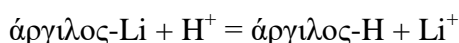
$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1112}{4,91 - \log (\square\square\square 2)} - 273,15 \text{ (Arnorsson 1983)}$$

4. Εάν το γεωθερμόμετρο του χαλκηδόνιου δίνει θερμοκρασίες 100-120°C, μπορεί να αντιπροσωπεύουν την πραγματική βαθιά θερμοκρασία. Ωστόσο, αν η υπολογιζόμενη θερμοκρασία είναι κάτω από 100°C, το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου μπορεί να ελέγχει τη διαλυτότητα. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε συστήματα με πυριτικά περιβάλλον πετρώματα, η αφθονία του ηφαιστειακού γυαλιού μπορεί να επιτρέψει τον κορεσμό ενός ρευστού σε σχέση με το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{731}{4,52 - \log (\square\square\square 2)} - 273,15 \text{ (Fournier 1977)}$$

4.7.5 Γεωθερμόμετρο Na-Li

Η θεωρία πίσω από αυτό το γεωθερμόμετρο βασίζεται στην θερμοκρασία της παρακάτω αντίδρασης:



Στην πραγματικότητα, η ελέγχουσα ισορροπία πιθανώς βασίζεται σε αντιδράσεις ανταλλαγής κατιόντων με άργιλο και ζεόλιθο παρά το σχηματισμό φάσεων από διακριτά ορυκτά. Η αναλογία πιστεύεται ότι είναι σταθερή καθώς το νερό ανεβαίνει από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια. Ωστόσο, ορισμένο λίθιο μπορεί να χαθεί από το διάλυμα στα αλλοιωμένα ορυκτά κατά τη διάρκεια της ψύξης.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1195}{0,130 - \log (\square\square\square/\square\square\square)} - 273,15 \text{ (Fouillac 1981)}$$

Ισχύει για συγκεντρώσεις $\text{Cl}^- > 0,3\text{mol/kg}$.

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{0,389 - \log (\square\square\square/\square\square\square)} - 273,15 \text{ (Fouillac 1981)}$$

Ισχύει για συγκεντρώσεις $\text{Cl}^- < 0,3\text{mol/kg}$.

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία για την περιοχή μελέτης

Μια υδρογεωχημική έρευνα γεωθερμικών ρευστών ουσιαστικά περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια (Baba et al., 2014).

1. Συλλογή των δειγμάτων.
2. Επιτόπιες μετρήσεις .
3. Χημικές αναλύσεις.
4. Ερμηνεία δεδομένων.

Η συλλογή δειγμάτων για χημική ανάλυση είναι το πρώτο βήμα για την αξιολόγηση των γεωθερμικών ρευστών. Είναι επιτακτική ανάγκη αυτό το βήμα να πραγματοποιείται σωστά, διότι όλα τα επόμενα βήματα εξαρτώνται από αυτό. Το πιο κοινό λάθος κατά τη δειγματοληψία περιλαμβάνει τη χρήση ακατάλληλων δοχείων, πλημμελή καθαρισμό και η έλλειψη ή κακή μεταχείριση για τη διατήρηση των δειγμάτων. Εάν η δειγματοληψία είναι εσφαλμένη, η ερμηνεία των χημικών δεδομένων γίνεται χωρίς νόημα.

Η υδρογεωχημική έρευνα πρέπει να διεξάγεται σε δύο περιόδους (πριν και μετά τις βροχές), έτσι ώστε φαινόμενα όπως πχ ανάμειξης με νερά άλλων ταμιευτήρων να κατανοηθούν καλύτερα. Σε γενικές γραμμές, δεν συνιστάται η ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού χημικών παραμέτρων σε ένα μικρό αριθμό δειγμάτων ούτε να αναλυθούν ένας μικρός αριθμός χημικών παραμέτρων σε ένα τεράστιο αριθμό δειγμάτων. Για τη μελέτη ενός μη ερευνημένου γεωθερμικού πεδίου, η καλύτερη στρατηγική δειγματοληψίας είναι να συλλεχθούν δείγματα από έναν εύλογο αριθμό πηγών ή/και γεωτρήσεων, που κατανέμονται σε όλο τον χώρο της έρευνας και να αναλυθούν, το συντομότερο δυνατό, ως προς τα κύρια ανιόντα (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), κατιόντα (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) καθώς και άλλα στοιχεία και ιχνοστοιχεία (SiO_2).

5.2 Δειγματοληψία και ανάλυση γεωθερμικών ρευστών

Σύμφωνα με τον πίνακα 5.1, οι θερμοκρασίες των ρευστών στο πεδίο και στις δυο εποχές είναι σχεδόν σταθερές. Αυτό ενισχύει την άποψη για την ύπαρξη πιθανών γεωθερμικών πεδίων.

Πίνακας 5.1: Επιτόπιες θερμοκρασίες ρευστών γεωτρήσεων.

Περίοδος δειγματοληψίας	Περί1	Περί 2	Περί 3	Πλάτανος 1	Πλάτανος 2	Μελιδο χώρι 1	Μελιδο χώρι 2
Υγρή	20,7°C	27,7°C	22°C	27,6°C	22,1°C	23,2°C	24,8°C
Ξηρή	20,9°C	27,3°C	22,4°C	26,4°C	21,4°C	23,1°C	23,5°C

Η δειγματοληψία έγινε σε τρεις γεωτρήσεις στο χωριό Περί (1, 2 και 3), σε δύο στο χωριό Πλάτανος (1 και 2) στις 25/2/2016 και σε δύο στο χωριό Μελιδοχώρι (1 και 2) στις 29/2/2016. Οι γεωτρήσεις Περί 1 και 3 έχουν ανορυχθεί εντός της ίδιας ιδιοκτησίας αλλά σε θέσεις που απέχουν πάνω από 50 μέτρα μεταξύ τους.

Αν και σήμερα τα «κολάρα» των γεωτρήσεων βρίσκονται στον επιφανειακό εδαφικό μανδύα (εκτός της γεώτρησης Πλάτανος 1) οι γεωτρήσεις διέτρησαν ασβεστολίθους της Ζώνης της Πίνδου και πιθανώς και της Τρίπολης. Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Εικόνα 2.10) διαπιστώνουμε ότι κοντά στις γεωτρήσεις υπάρχουν γνευσιακά σώματα μεγάλων διαστάσεων των ανώτερων καλυμμάτων.



Εικόνα 5.1: Η θέση της γεώτρησης Περί 1 και Περί 3.



Εικόνα 5.2: Η θέση της γεώτρησης Περί 2.



Εικόνα 5.3: Η θέση της γεώτρησης Πλάτανος 1.



Εικόνα 5.4: Η θέση της γεώτρησης Πλάτανος 2.

Στην περιοχή Μελιδοχώρι, ο υδροφόρος έχει απόλυτη στάθμη στα +40m. Έτσι, λόγω του μεγάλου υψομέτρου οι γεωτρήσεις έχουν μεγάλο βάθος. Η πρώτη Μελιδοχώρι 1 συναντά την υδροφορία μετά από 460 m περίπου και η δεύτερη Μελιδοχώρι 2 μετά από 380 m περίπου. Η γεώτρηση Μελιδοχώρι 1 έχει ανορυχθεί στο κατερχόμενο τέμαχος ενός μεσαίων διαστάσεων κανονικού ρήγματος μεγάλης γωνίας κλίσης, εμπρός από τον καθρέπτη του ρήγματος στο ανερχόμενο τέμαχος, με εμφανή μετάπτωση 5-6m και διεύθυνση κλίσης προς τα ΝΑ.



Εικόνα 5.5: Η θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.



Εικόνα 5.6: Διεύθυνση κλίσης και παράταξης του κάτοπτρου του ρήγματος στην θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.

Η δεύτερη γεώτρηση Μελιδοχώρι 2 που βρίσκεται σε μικρότερο υψόμετρο επίσης έχει ανορυχθεί εντός των Ανωκρητιδικών ασβεστολίθων της ζώνης της Τρίπολης στο κέντρο μιας αντικλινικής δομής μερικών δεκάδων μέτρων. Και οι δύο γεωτρήσεις

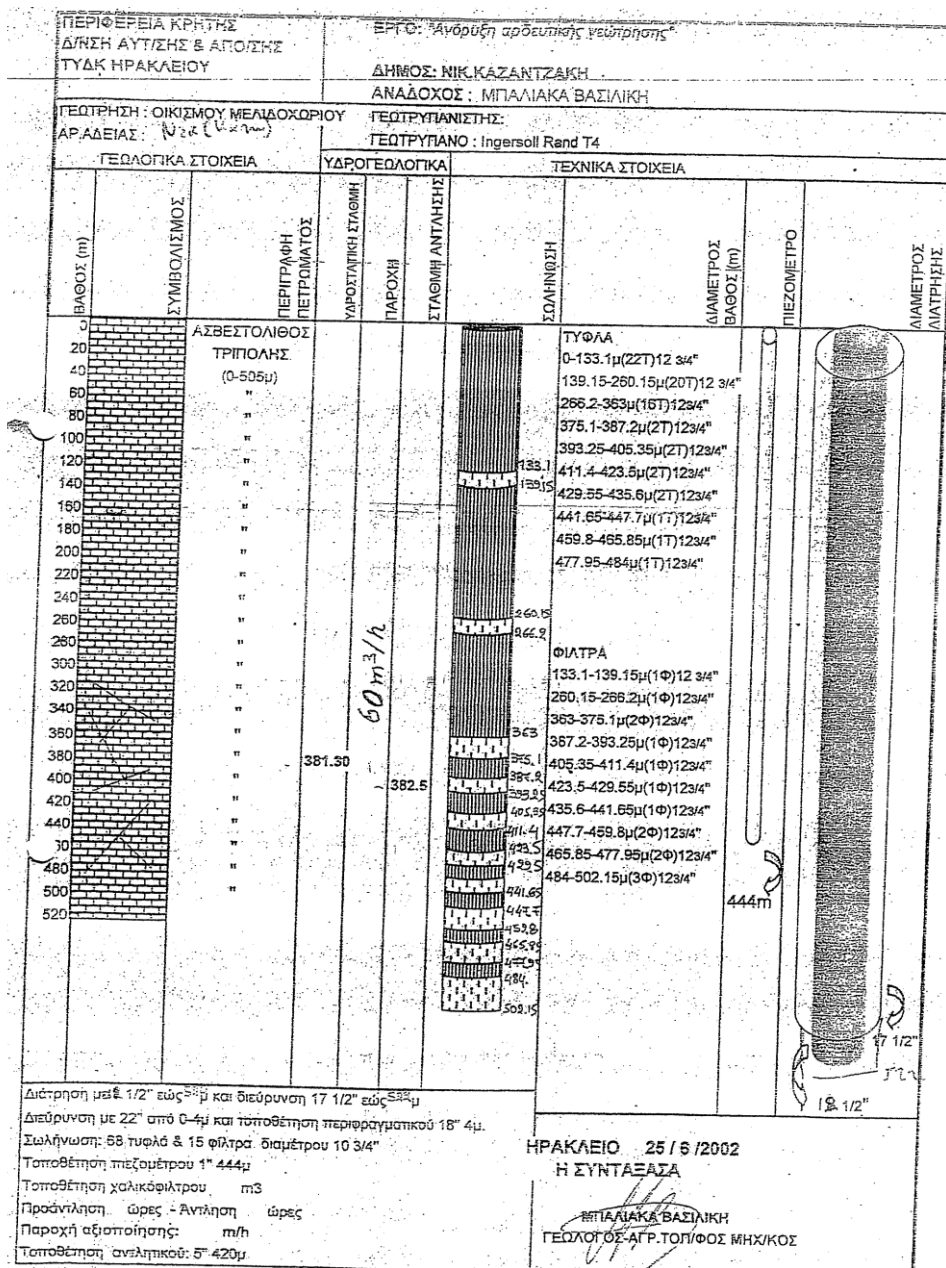
τροφοδοτούν μια δεξαμενή συγκέντρωσης που παίζει και τον ρόλο του υδραγωγείου της ευρύτερης περιοχής. Η δεξαμενή τροφοδοτείται από την γεώτρηση Μελιδοχώρι 1 που βρίσκεται σε καθεστώς συνεχούς άντλησης, ενώ όταν η στάθμη του νερού πέσει κάτω από ένα κρίσιμο ύψος τίθεται αυτόματα σε λειτουργία και η γεώτρηση Μελιδοχώρι 2 για συμπληρωματική τροφοδοσία.



Εικόνα 5.7: Η θέση της γεώτρησης Μελιδοχώρι 2.



Εικόνα 5.8: Η θέση του υδραγωγείου ανατολικά της γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.



Εικόνα 5.9: Τομή γεώτρησης Μελιδοχώρι 1.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων.

Πίνακας 5.2: Δεδομένα γεωτρήσεων και αποτελέσματα χημικών αναλύσεων.

Element	Περί 1 (10/06/2015)	Περί 1 (25/02/2016)	Περί 2 (10/06/2015)	Περί 2 (25/02/2016)	Περί 3 (10/06/2015)	Περί 3 (25/02/2016)	Πλάτανος 1 (10/06/2015)	Πλάτανος 1 (25/02/2016)	Πλάτανος 2 (10/06/2015)	Πλάτανος 2 (25/02/2016)	Μελιδοχώρι 1 (28/07/2015)	Μελιδοχώρι 1 (29/02/2016)	Μελιδοχώρι 2 (28/07/2015)	Μελιδοχώρι 2 (29/02/2016)	Μονάδες
Easting	582036	582036	582412	582412	582036	582036	582585	582585	582659	582659	599637	599637	599663	599663	
Northing	3875832	3875832	3875507	3875507	3875832	3875832	3874409	3874409	3874137	3874137	3885549	3885549	3885318	3885318	
Height	85	85	91	91	85	85	120	120	113	113	497	497	423	423	m
Temperature	20,85	20,7	27,3	27,7	22,43	22	26,43	27,6	21,43	22,1	27,03	23,2	23,5	24,8	°C
pH	7,25	7,68	7,26	7,36	7,34	7,56	7,58	7,33	7,94	7,96	7,76	7,76	8,04	7,7	
Conductivity	1200	1143	1879	1987	1181	1102	1471	1546	740	694	ΔΥ	705	ΔΥ	890	μS/cm
Eh	NM	213,7	NM	217,1	NM	216,4	NM	211,5	NM	202,4	NM	193,2	NM	194,1	
Li	0,0054	0,0064	0,01144	0,0228	0,0052	0,0082	0,0112	0,0152	0,0045	0,0060	<DL	0,0039	0,0063	0,0132	ppm
B	0,0188	0,0181	0,0415	0,0503	0,0176	0,0215	0,0266	0,0314	0,0184	0,0181	0,0147	0,0138	0,0200	0,0187	ppm
Na	24,31	19,28	65,88	71,75	21,27	21,85	45,09	46,76	18,49	16,67	27,05	13,56	33,33	17,6	ppm
Mg	35,04	34,6	53,98	76,39	29,65	37,23	48,84	55,53	36,78	41,43	21,25	38,04	23,34	50,77	ppm
Si	6,20	7,24	3,11	5,27	4,51	7,32	4,04	5,54	6,03	9,07	2,34	3,29	2,15	3,79	ppm
K	0,85	2,55	2,47	3,81	0,61	1,41	2,18	4,08	3,47	4,54	0,71	0,59	1,29	0,68	ppm
Ca	142,64	152,24	109,11	194,56	109,75	156,33	108,68	144,43	29,00	35,02	57,35	117,74	57,8	147,22	ppm
Ti	<DL	0,0074	<DL	0,0051	<DL	0,0074	<DL	0,0055	<DL	0,0092	0,0011	0,0030	0,0010	0,0035	ppm
V	0,0007	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	0,0237	<DL	0,0004	<DL	<DL	<DL	ppm
Mn	<DL	<DL	0,0064	0,0046	0,0060	<DL	0,0746	0,0384	0,0037	0,0147	<DL	0,0008	0,0008	<DL	ppm

Fe	<DL	0,0159	0,19	0,35	<DL	0,0880	0,0334	1,10	<DL	0,1461	0,0300	0,0128	0,0500	0,0530	ppm
Co	<DL	<DL	<DL	<DL	0,0005	<DL	0,0005	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	
Ni	<DL	<DL	0,0004	<DL	0,0061	<DL	0,0008	<DL	<DL	<DL	0,0010	<DL	<DL	<DL	
Cu	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	-0,0004	<DL	0,0010	<DL	
Zn	0,0453	0,0332	0,0326	0,0032	0,0979	0,0711	0,0061	0,0049	0,0031	0,0065	0,0083	0,1743	0,0219	0,0026	ppm
Rb	<DL	0,0012	0,0013	0,0033	<DL	0,0015	0,0010	0,0031	0,0010	0,0027	0,0015	0,0024	0,0016	0,0030	ppm
Sr	0,41	0,45	11,19	16,88	0,50	0,66	5,06	8,92	0,57	0,77	7,68	10,29	6,54	11,05	ppm
Mo	0,0001	0,0017	0,0037	0,0187	0,0040	0,0135	0,0028	0,0180	0,0012	0,0105	0,0116	0,0909	0,0079	0,0780	ppm
Cs	<DL	0,0007	<DL	0,0011	<DL	0,0007	<DL	0,0012	<DL	0,0009	0,0009	0,0014	0,0008	0,0016	ppm
Ba	0,0674	0,0714	0,0243	0,0266	0,0546	0,0724	0,2536	0,0263	0,0640	0,1001	0,0558	0,0807	0,0457	0,0791	ppm
U	0,0011	<DL	0,0079	<DL	0,0029	<DL	0,0004	<DL	0,0007	<DL	0,0135	0,0201	0,0102	0,0215	ppm
F	NM	0,29	NM	2,67	NM	0,34	NM	2,24	NM	0,25	NM	1,41	NM	1,33	ppm
Cl⁻	117,80	171,30	147,00	283,30	111,20	127,30	142,20	259,30	60,80	80,80	50,76	61,90	69,68	65,40	mg/L
SO₄²⁻	137,00	153,48	349,50	453,70	125,20	144,35	302,00	329,35	60,80	71,52	109,52	102,61	200,04	211,52	mg/L
N-NO₃⁻	13,30	9,88	0,57	0,03	11,20	8,72	0,09	<DL	0,60	<DL	0,64	0,49	0,96	0,53	mg/L
P-PO₄³⁻	0,02	0,02	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,11	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	mg/L
N-NH₃	<DL	0,04	0,17	0,09	<DL	0,04	0,10	0,23	0,05	0,06	0,09	0,06	0,07	0,05	mg/L
N-NO₂⁻	0,0020	<DL	0,0070	<DL	0,0060	0,0040	<DL	0,0020	0,0080	<DL	0,0020	0,0060	0,0030	<DL	mg/L
HCO₃⁻	348,80	359,70	305,20	337,90	348,80	337,90	327,00	305,20	218,00	228,90	272,50	305,20	261,60	272,50	mg/L
Hardness	28,5	29,4	24,9	27,6	28,5	27,6	26,7	24,9	17,8	18,7	22,3	24,9	21,4	22,3	oF

Κεφάλαιο 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, υπολογίζονται οι ιοντικοί λόγοι, ο συντελεστής Revelle, ο δείκτης προσρόφησης Νατρίου (SAR), τα συνολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.), κ.ά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα υδροχημικά διαγράμματα, από τα οποία αξιολογείται η κάθε γεώτρηση ξεχωριστά. Τέλος, παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις των θερμοκρασιών του πιθανού γεωθερμικού ταμιευτήρα με βάση την εφαρμογή συγκεκριμένων γεωθερμομέτρων.

6.1 Υπολογισμός ιοντικών λόγων

Οι ιοντικοί λόγοι που υπολογίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρατίθενται παρακάτω στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Υπολογισμός ιοντικών λόγων.

	Περί 1 (10/06/201 5)	Περί 1 (25/02/201 6)	Περί 2 (10/06/201 5)	Περί 2 (25/02/201 6)	Περί 3 (10/06/201 5)	Περί 3 (25/02/201 6)	Πλάτανος 1 (10/06/201 5)	Πλάτανος 1 (25/02/201 6)	Πλάτανος 2 (10/06/201 5)	Πλάτανος 2 (25/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 1 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 1 (29/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 2 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 2 (29/02/201 6)
Na/Cl	0,32	0,17	0,69	0,39	0,30	0,26	0,49	0,28	0,47	0,32	0,82	0,34	0,74	0,42
Na/K	48,48	12,86	45,33	32,03	59,37	26,35	35,13	19,49	9,07	6,24	64,79	39,09	43,94	44,02
Mg/Ca	0,41	0,37	0,82	0,65	0,45	0,39	0,74	0,63	2,09	1,95	0,61	0,53	0,67	0,57
Cl/SO₄	1,16	1,51	0,57	0,85	1,20	1,19	0,64	1,07	1,35	1,53	0,63	0,82	0,47	0,42
(Ca+Mg)/(Na +K)	9,27	11,56	3,38	4,97	8,42	11,01	4,68	5,51	5,01	6,13	3,86	14,89	3,24	14,72

Παρατηρήσεις επί των ιοντικών λόγων.

Λόγος Na/Cl

Σύμφωνα με τον λόγο Na/Cl όλες οι γεωτρήσεις έχουν μικρές τιμές (<1) αυτό ενδέχεται να είναι το αποτέλεσμα της ιοντοανταλλαγής Na^+ στο έδαφος και τις αργίλους, κάτι το οποίο πιθανά λαμβάνει χώρα στην περιοχή έρευνας.

Λόγος Na/K

Σύμφωνα με το λόγο Na/K στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου στις γεωτρήσεις Περί 1, Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό και στη γεώτρηση Πλάτανος 1 το νερό βρίσκεται σε περιοχή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί (1, 2, και 3) και Μελιδochώρι 1 βρίσκονται σε περιοχή εκφόρτισης λόγω προσρόφησης Na^+ και στη γεώτρηση Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό.

Λόγος Mg/Ca

Ο λόγος Mg/Ca χρησιμοποιείται για την προέλευση του ρευστού από ασβεστολιθικά ή μαγνησιούχα πετρώματα:

- $\text{Mg/Ca} < 0.5-0.7$ αντιστοιχούν σε νερό από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα
- $\text{Mg/Ca} = 0.7-0.9$ αντιστοιχούν σε δολομιτικά υδροφόρα στρώματα
- $\text{Mg/Ca} > 0.9$ αντιστοιχούν σε υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} . Στα οφιολιθικά οι τιμές είναι συνήθως μεγαλύτερες από 1.

Στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου οι τιμές του λόγου αυτού είναι μικρότερες από 0,7 επομένως δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση, επίσης το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα. Εξαίρεση αποτελεί η τιμή της γεώτρησης Πλάτανος 2 που είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, επομένως το νερό προέρχεται από υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} . Αντίθετα στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου οι τιμές του λόγου αυτού είναι μεγαλύτερες από 0,7 στις γεωτρήσεις Περί 2 και Πλάτανος 1 το νερό προέρχεται από υδροφόρους που αντιστοιχούν σε δολομιτικά υδροφόρα στρώματα ενώ στη γεώτρηση Πλάτανος 2 το νερό προέρχεται από υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά

πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} , στις γεωτρήσεις Περί (1 και 3), Μελιδοχώρι (1 και 2) ο λόγος είναι $<0,7$ επομένως δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση, επίσης το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα.

Λόγος Cl/SO_4

Σύμφωνα με το λόγο Cl/SO_4 στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου το νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως θειούχο-χλωριούχο στις γεωτρήσεις Περί 2, Μελιδοχώρι (1 και 2), ενώ στις γεωτρήσεις Περί (1 και 3), Πλάτανος (1 και 2) χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί (1 και 3) και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο ενώ στις υπόλοιπες ως θειούχο-χλωριούχο.

Λόγος $(Ca+Mg)/(Na+K)$

Ο λόγος αυτός σχετίζεται με την τροφοδοσία του υπογείου ρευστού. Σε όλες τις γεωτρήσεις ο λόγος εμφανίζεται πάνω από τη μονάδα γεγονός που δείχνει υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία.

Στη συνέχεια, παρατίθενται στον πίνακα 6.2 διάφορες παράμετροι που υπολογίστηκαν με βάση τις χημικές αναλύσεις.

Πίνακας 6.2: Υπολογισμός διάφορων παραμέτρων.

	Περί 1 (10/06/201 5)	Περί 1 (25/02/201 6)	Περί 2 (10/06/201 5)	Περί 2 (25/02/201 6)	Περί 3 (10/06/201 5)	Περί 3 (25/02/201 6)	Πλάτανος 1 (10/06/201 5)	Πλάτανος 1 (25/02/201 6)	Πλάτανος 2 (10/06/201 5)	Πλάτανος 2 (25/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 1 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 1 (29/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 2 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 2 (29/02/201 6)
pH	7,25	7,68	7,26	7,36	7,34	7,56	7,58	7,33	7,94	7,96	7,76	7,76	8,04	7,7
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (μS/cm)	1200	1143	1879	1987	1181	1102	1471	1546	740	694	-	705	-	890
Συντελεστής Revelle	0,58	0,82	0,83	1,44	0,55	0,65	0,75	1,46	0,48	0,61	0,32	0,35	0,46	0,41
Περιεκτικότη τα χλωριόντων (Cl⁻) σε ppm	117,8	171,3	147	283,3	111,2	127,3	142,2	259,3	60,8	80,8	50,76	61,9	69,68	65,4
Σκληρότητα	28,5	29,4	24,9	27,6	28,5	27,6	26,7	24,9	17,8	18,7	22,3	24,92	21,4	22,25
TDS (ppm)	780	742,95	1221,35	1291,55	767,65	716,3	956,15	1004,9	481	451,1	-	458,25	-	578,5
SAR	2,58	1,99	7,3	6,16	2,55	2,22	5,08	4,68	3,22	2,7	4,31	1,54	5,23	1,77

Ενεργός οξύτητα (pH)

Οι τιμές του pH στις γεωτρήσεις εμφανίζονται μεγαλύτερες από 7, επομένως το νερό χαρακτηρίζεται αλκαλικό. Γενικά γνωρίζουμε ότι το pH των νερών μειώνεται όσο η υδάτινη μάζα ενηλικιώνεται. Μία νέα υδάτινη μάζα είναι συνήθως αλκαλική και με το χρόνο γίνεται όξινη. Έτσι είναι πολύ πιθανόν τα νερά των γεωτρήσεων να προέρχονται από μία σχετικά νέα υδάτινη μάζα.

Συντελεστής Revelle

Ο συντελεστής Revelle αποτελεί κριτήριο της διείσδυσης του θαλασσινού ρευστού και ορίζεται από τον λόγο: $\frac{[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-]}$, σε meq/lit. Τιμές $R \geq 1$ αποτελούν ένδειξη της θαλάσσιας διείσδυσης.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης ρευστού από τη θαλάσσια διείσδυση (πηγή: Καλλέργης 2000).

Συντελεστής Revelle	Χαρακτηρισμός ρευστού
<1	Καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση
1-2	Ελαφρά ρυπασμένο νερό
2-6	Μέτρια ρυπασμένο νερό
6-10	Σοβαρά ρυπασμένο νερό
10-150	Επικίνδυνα ρυπασμένο νερό
>150	Θαλασσινό νερό

Σύμφωνα με τον πίνακα 6.3 το νερό των γεωτρήσεων στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου χαρακτηρίζεται ως καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση ενώ στις γεωτρήσεις Περί 2 και Πλάτανος 1 το νερό χαρακτηρίζεται ελαφρά ρυπασμένο. Αντίθετα, στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου ο συντελεστής Revelle είναι σε όλες τις γεωτρήσεις μικρότερος της μονάδας, επομένως το νερό χαρακτηρίζεται ως καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Οι τιμές στο γλυκό νερό κυμαίνονται μεταξύ 140-1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, στα υφάλμυρα 2000-3000 και στα υπεράλμυρα 100,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, οπότε οι γεωτρήσεις Πλάτανος 2, Μελιδοχώρι (1 και 2) την υγρή περίοδο αποτελούνται από γλυκό νερό, ενώ οι τιμές των υπόλοιπων γεωτρήσεων κυμαίνονται από 1100-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, το οποίο δηλώνει αυξημένες ποσότητες αλάτων στο νερό. Όσο αφορά τη ξηρή περίοδο το νερό χαρακτηρίζεται στη γεώτρηση Πλάτανος 2 ως γλυκό, ενώ στις υπόλοιπες που οι τιμές κυμαίνονται από 1100-1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, το οποίο δηλώνει αυξημένες ποσότητες αλάτων στο νερό. Στις γεωτρήσεις Μελιδοχώρι (1 και 2) οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν μετρήθηκαν.

Συνολικά Διαλυμένα Στερεά (T.D.S)- Αλατότητα του υπόγειου ρευστού

Η παρουσία αλάτων στο υπόγειο νερό σχετίζεται με το είδος των πετρωμάτων στα οποία κινείται, τον χρόνο παραμονής, την ταχύτητα ροής κ.λπ.

Οι διακυμάνσεις των τιμών TDS είναι:

- Ιζήματα 1000-1200 mg/L
- Γρανίτες 200-300 mg/L
- Αλμυρά νερά 30.000 mg/L

για $\text{TDS} < 1000 \text{ mg/L}$ το νερό είναι γλυκό και υφάλμυρο για τιμές 1000-10.000 mg/L. Τα TDS εκφράζουν την συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων στα στερεά, αποτελούν ένα δείκτη μεταλλικότητας και συνδέονται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι τιμές στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου είναι κάτω από 1000 mg/L και το νερό είναι γλυκό, στη γεώτρηση Περί 2 είναι πάνω από 1000 mg/L οπότε και χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο, ελάχιστα πάνω από τα 1000 mg/L είναι το νερό της Πλάτανος 1. Οι ίδιοι χαρακτηρισμοί ισχύουν και για τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου εφόσον οι τιμές είναι παραπλήσιες, εξαίρεση αποτελεί το νερό της γεώτρησης Πλάτανος 1 που είναι λίγο κάτω από τα 1000 mg/L και χαρακτηρίζεται ως γλυκό.

Χλώριο

Το ιόν του Cl^- χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό διεύσδυσης θαλασσινού ρευστού, είναι το πιο συντηρητικό φυσικό συστατικό στο νερό, όταν αυτό είναι σε

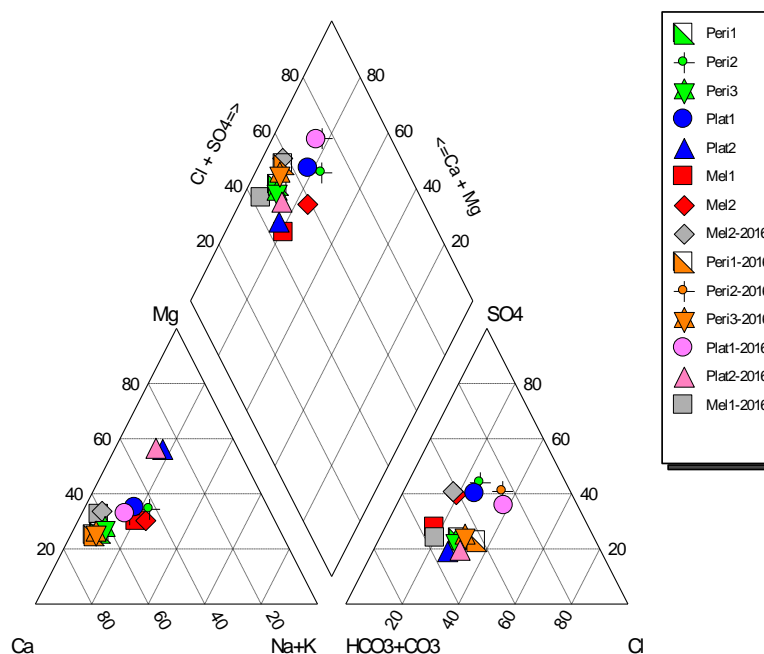
διαλυμένη μορφή. Σε όλες τις γεωτρήσεις, όσο αφορά την υγρή περίοδο, η περιεκτικότητα σε χλώριο είναι μικρότερη από 250 mg/L οπότε το νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως γλυκό. Εξαιρέση αποτελούν οι γεωτρήσεις Περί 2 και Πλάτανος 1, που παρουσιάζουν ελαφρώς αυξημένη περιεκτικότητα σε χλώριο. Ενώ, όσον αφορά την ξηρή περίοδο η περιεκτικότητα σε χλώριο σε όλες τις γεωτρήσεις είναι μικρότερη από 250 mg/L οπότε το νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως γλυκό.

Συντελεστής προσρόφησης νατρίου (SAR)

Σύμφωνα με τον συντελεστή προσρόφησης νατρίου και με το διάγραμμα Wilcox, σε όλες τις γεωτρήσεις και στις δυο δειγματοληψίες οι τιμές είναι μικρότερες από 6 που υποδηλώνουν μικρό κίνδυνο νατρίου. Εξαιρέση αποτελεί η τιμή της γεώτρησης Περί 2 με τιμή 6,16 την ξηρή περίοδο και 7,30 την υγρή περίοδο, οι οποίες δηλώνουν μέσο κίνδυνο νατρίου.

6.2 Υδροχημικά διαγράμματα

6.2.1 Διάγραμμα Piper



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα Piper.

Σύμφωνα με το σχήμα 6.1 και το διάγραμμα Piper, τα νερά των γεωτρήσεων χαρακτηρίζονται ως εξής:

- **Γεώτρηση Περί 1**

Ο χημικός τύπος του ρευστού είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ και στις δυο δειγματοληψίες. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-) από 118 σε 171 ppm.

- **Γεώτρηση Περί 2**

Ο χημικός τύπος του ρευστού στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl}$ ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-) από 147 σε 283 ppm και του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 109 σε 194 ppm.

- **Γεώτρηση Περί 3**

Ο χημικός τύπος του ρευστού είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ και στις δυο δειγματοληψίες. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 110 σε 156 ppm.

- **Γεώτρηση Πλάτανος 1**

Ο χημικός τύπος του ρευστού στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-) από 142 σε 259 ppm και του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 109 σε 144 ppm.

- **Γεώτρηση Πλάτανος 2**

Ο χημικός τύπος του ρευστού είναι $\text{Mg-Ca-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ και στις δυο δειγματοληψίες. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-) από 61 σε 81 ppm και των θεικών (SO_4^{2-}) από 61 σε 72 ppm.

- **Γεώτρηση Μελιδοχώρι 1**

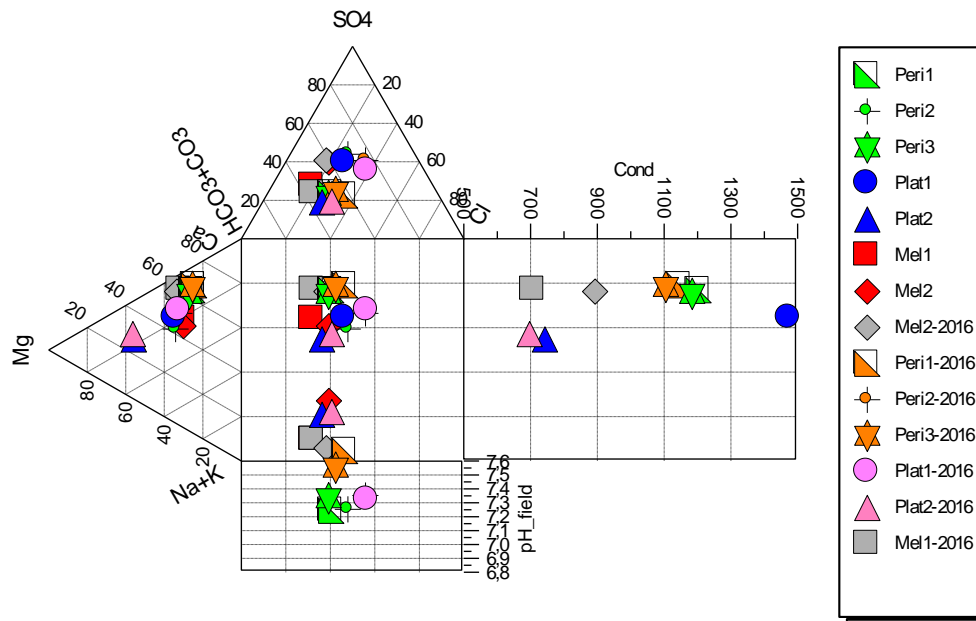
Ο χημικός τύπος του ρευστού στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$ ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 57 σε 118 ppm.

- **Γεώτρηση Μελιδοχώρι 2**

Όπως και στη γεώτρηση Μελιδοχώρι 1, ο χημικός τύπος του ρευστού στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Cl}$ ενώ στη

δειγματοληψία της υγρής περιόδου είναι $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 58 σε 147 ppm και των θεικών (SO_4^{2-}) από 200 σε 212 ppm .

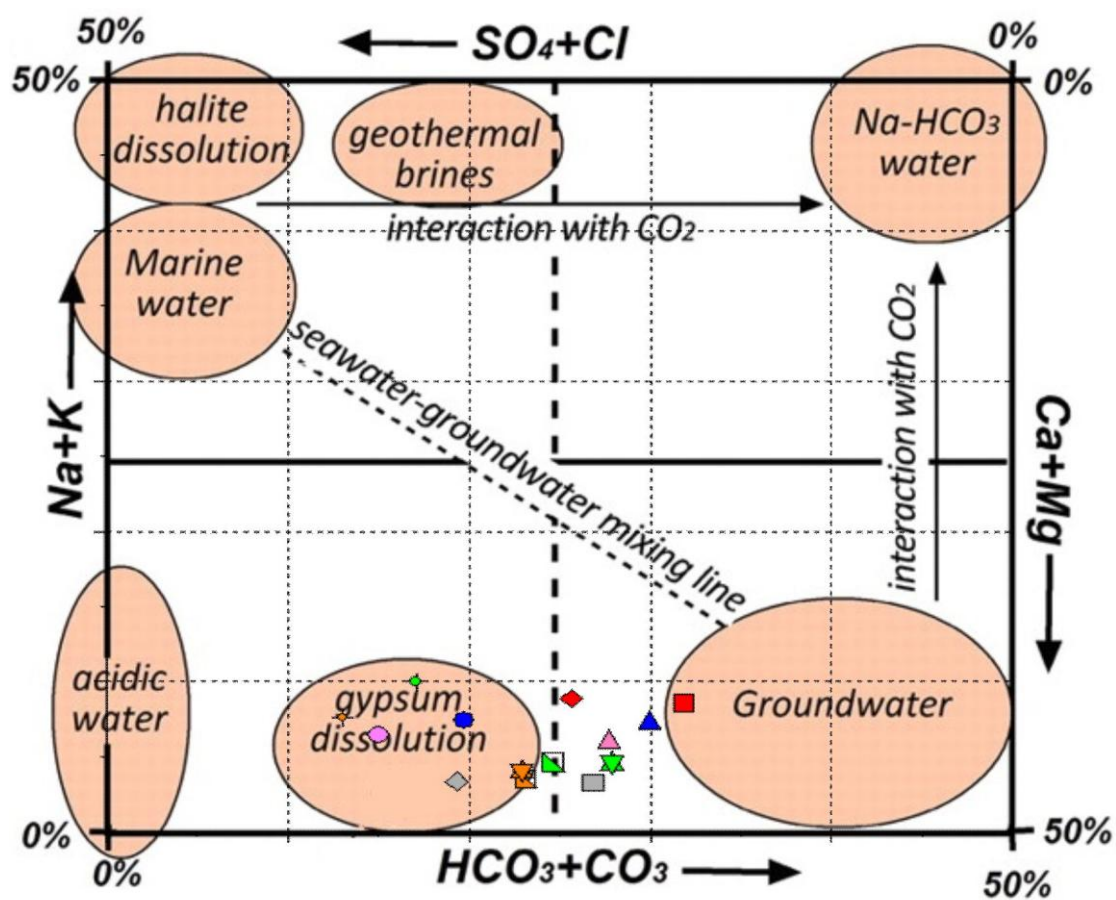
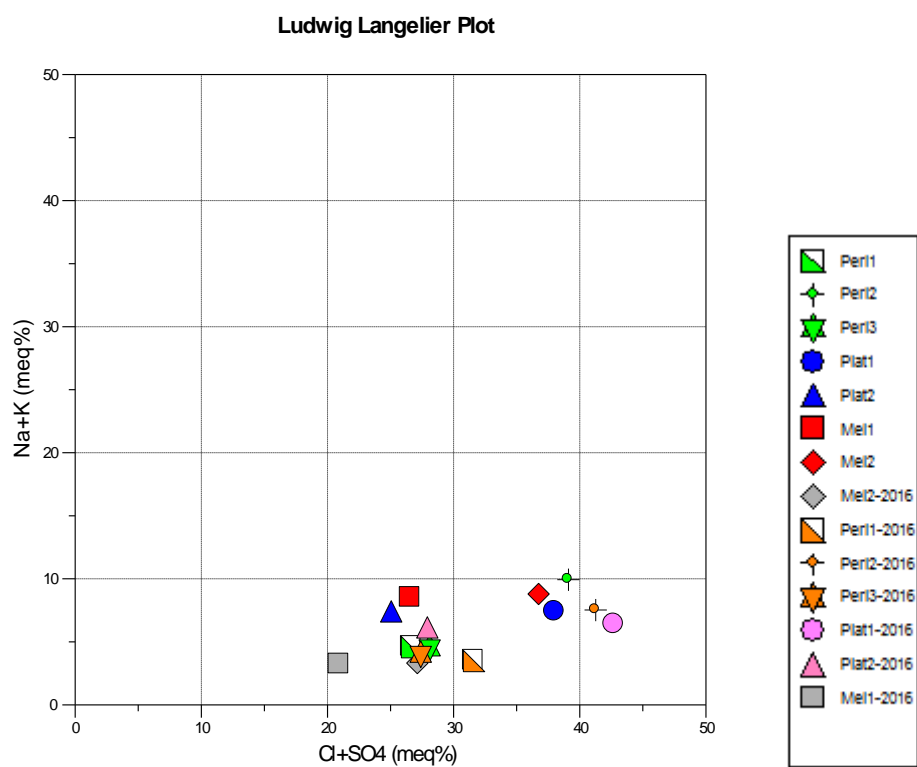
6.2.2 Διάγραμμα Durov



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα Durov.

Σύμφωνα με το σχήμα 6.2 όλες οι γεωτρήσεις βρίσκονται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

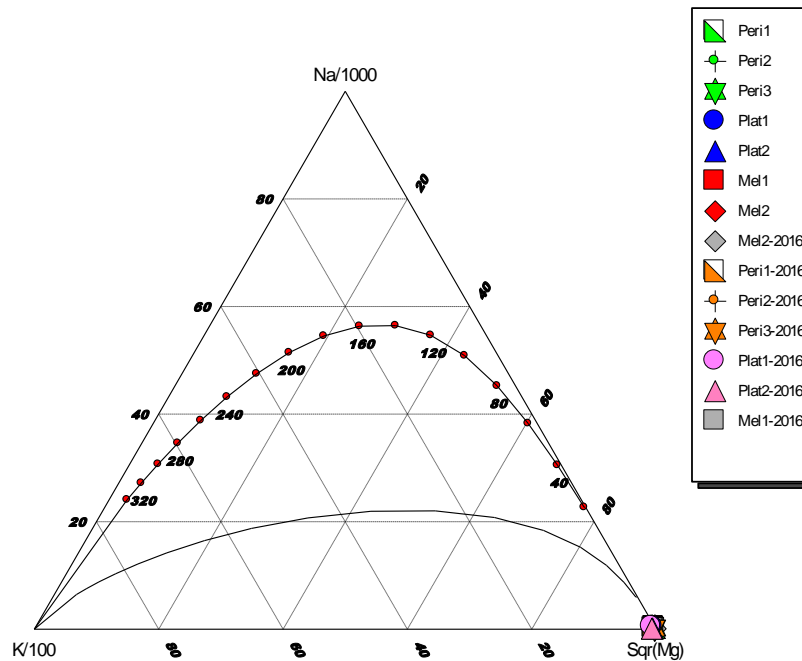
6.2.3 Διάγραμμα Ludwig Langelier



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα Ludwig Langelier.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig Langelier του σχήματος 6.3 όλες οι γεωτρήσεις βρίσκονται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου και επιφανειακών νερών.

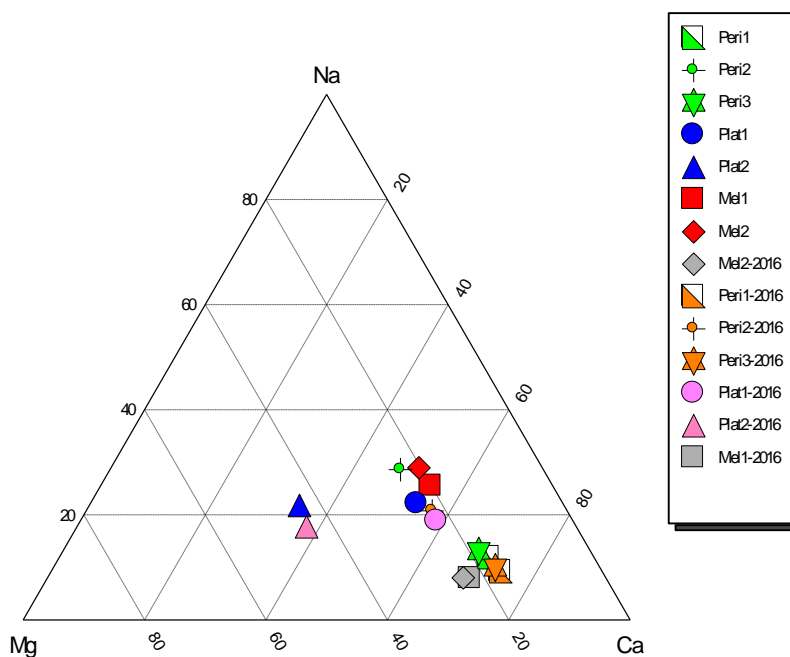
6.2.4 Διάγραμμα Giggenbach



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα Giggenbach.

Σύμφωνα με το σχήμα 6.4 παρατηρούμε ότι όλες οι γεωτρήσεις είναι στην περιοχή των "ανώριμων" ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, και πιθανή θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

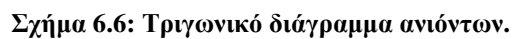
6.2.5 Τριγωνικά διαγράμματα



Σχήμα 6.5: Τριγωνικό διάγραμμα κατιόντων.

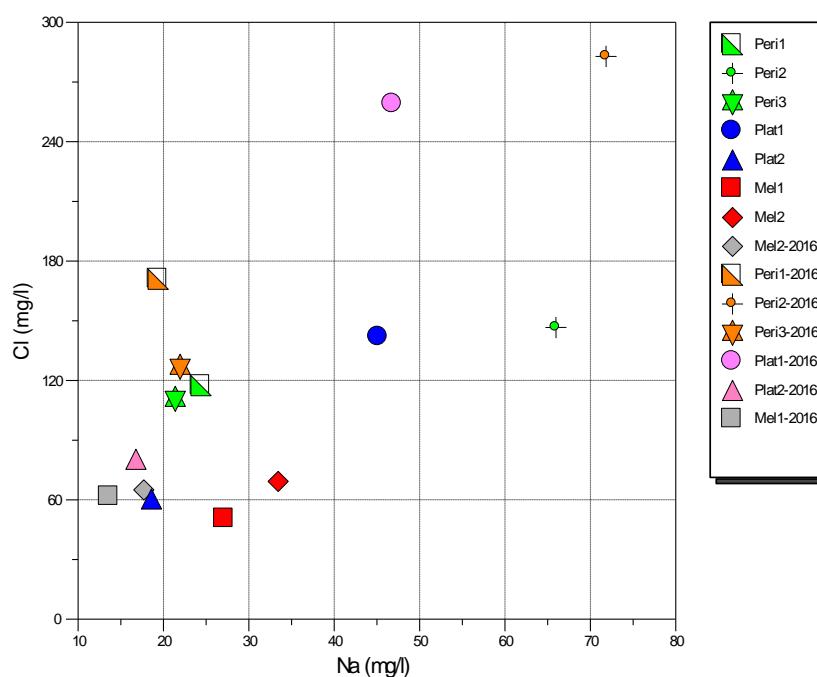
Σύμφωνα με το σχήμα 6.5 παρατηρούμε ότι τα νερά των γεωτρήσεων έχουν υψηλό ποσοστό σε Ca^{2+} ενώ στην γεώτρηση Πλάτανος 2 το ποσοστό του Ca^{2+} είναι της τάξης του 45-50%.

Συγκριτικά με την περίοδο δειγματοληψίας παρατηρείται αύξηση του ποσοστού σε Ca^{2+} σε όλες τις γεωτρήσεις την χειμερινή περίοδο, ενώ στις γεωτρήσεις Περί 2 και Μελιδοχώρι 2 η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη, της τάξης των 100 ppm περίπου.



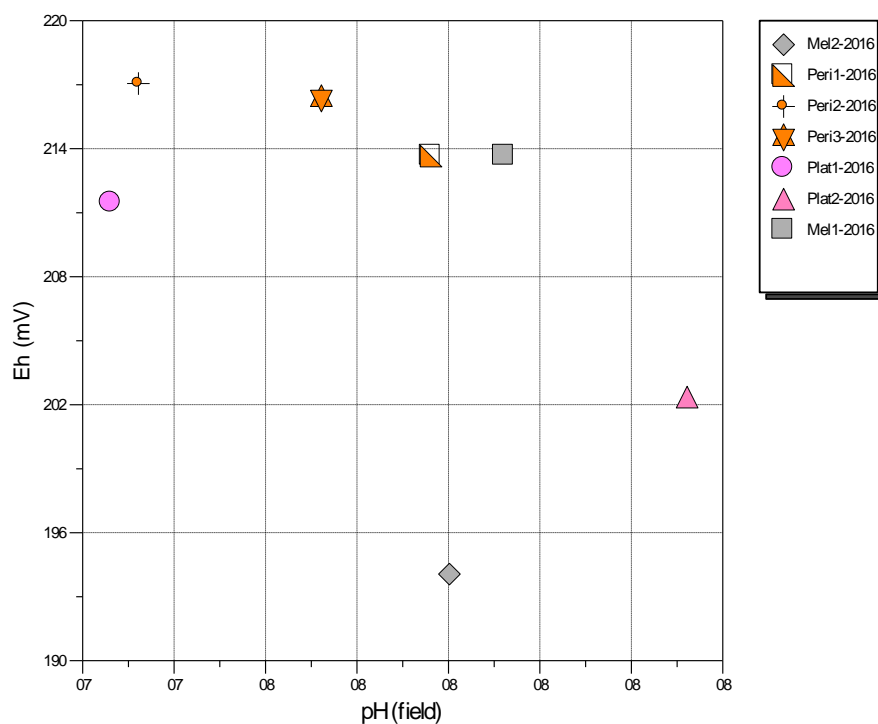
Όσο αφορά την περίοδο δειγματοληψίας παρατηρείται αύξηση του ποσοστού σε CI στη γεώτρηση Περί 2 την χειμερινή περίοδο, κατά 110 ppm περίπου, ενώ στις υπόλοιπες γεωτρήσεις οι τιμές είναι παραπλήσιες.

6.2.6 Διαγράμματα διασποράς



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα διασποράς Na-Cl.

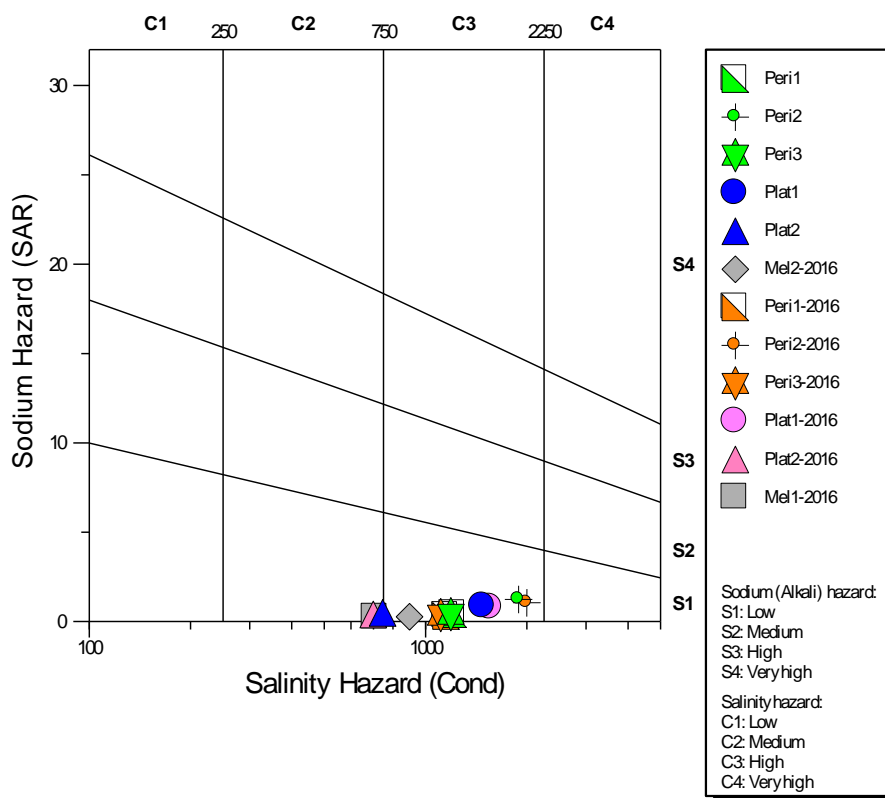
Σύμφωνα με το σχήμα 6.7 παρατηρούμε, μικρές αποκλίσεις στις συγκεντρώσεις του Na^+ ανάμεσα στις δειγματοληψίες της ξηρής περιόδου και της υγρής περιόδου, εξαίρεση αποτελούν οι τιμές στις γεωτρήσεις Μελιδοχώρι1 και Μελιδοχώρι2 όπου παρουσιάζονται μειωμένες την υγρή περίοδο. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του Cl^- έχουν μεγάλες αποκλίσεις στις γεωτρήσεις Περί 1, Περί 2 και Πλάτανος 1, ενώ στις υπόλοιπες γεωτρήσεις οι τιμές είναι παραπλήσιες. Μόνο στη γεώτρηση Περί 3 παρατηρείται μια μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Cl^- , της τάξης των 10-20 mg/L.



Σχήμα 6.8: Διάγραμμα διασποράς pH-Eh.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα όλες οι γεωτρήσεις ανήκουν στη ζώνη ισορροπίας, τα όρια της οποίας είναι $Eh=1.229 - 0.0592 \text{ pH}$ και $Eh=0 - 0.0592 \text{ pH}$, οπότε το νερό τους είναι ελαφρώς βασικό αλλά δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως νερό έντονης οξείδωσης ή αναγωγής.

6.2.7 Διάγραμμα Wilcox



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα Wilcox.

Με βάση το διάγραμμα Wilcox, του σχήματος 6.9, τα νερά των γεωτρήσεων Μελιδοχώρι (1 και 2) και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζονται στην εξής κατηγορία αρδευτικού ρευστού: C2-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά. Ενώ, τα νερά των υπόλοιπων γεωτρήσεων (Περί 1, Περί 2, Περί 3, Πλάτανος 1) ανήκουν στην κατηγορία C3-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.

6.3 Αξιολόγηση γεωτρήσεων

Γεώτρηση Περί 1

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται ως Ca-Mg-HCO₃-Cl-SO₄ και στις δυο δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν τους χειμερινούς

μήνες και τους καλοκαιρινούς. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-), από 117 σε 171 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C .

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει υψηλό ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 80% και 70% αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωρίων (Cl^-) από 117 σε 171 ppm στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης Περί 1 ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C3-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.

Γεώτρηση Περί 2

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται ως Ca-Mg- $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl}$, ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου ως Ca-Mg- $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωρίων (Cl^-) από 147 σε 283 ppm και του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 109 σε 195 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C .

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 60% με 50%.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μεγάλη αύξηση της περιεκτικότητας των χλωρίων (Cl^-) και του νατρίου (Na^+) στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C3-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.

Γεώτρηση Περί 3

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται ως Ca-Mg- HCO_3 -Cl- SO_4 και στις δυο δειγματοληψίες. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωρίων (Cl^-) από 111 σε 127 ppm και του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 109 σε 156 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

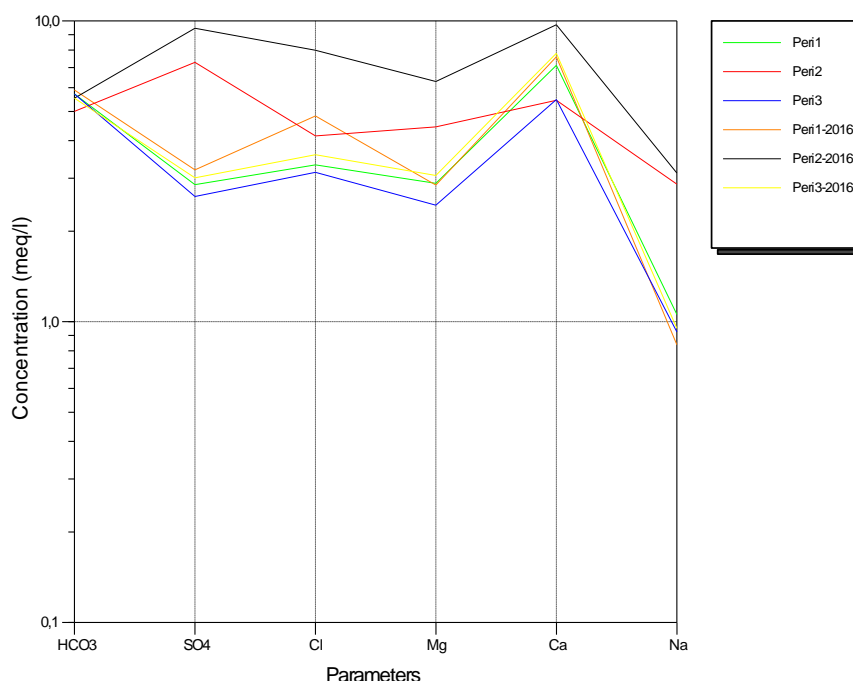
Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχουν υψηλό ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 80% και 70% αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μια μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Cl^- και του Na^+ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C3-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Περί.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Schoeller (Σχήμα 6.10) στη σύγκριση ανάμεσα στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου με αυτή της υγρής περιόδου, παρατηρούμε ότι, στη γεώτρηση Περί 1 έχουμε αύξηση του Cl^- από 117 σε 171 ppm, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν παραπλήσιες τιμές. Στη γεώτρηση Περί 2 παρατηρείται αύξηση των στοιχείων SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} και Ca^{2+} , ενώ τα HCO_3^- και Na^+ έχουν παραπλήσιες τιμές. Αύξηση των ίδιων στοιχείων, μικρότερης κλίμακας, παρατηρείται και στη γεώτρηση Περί 3.

Γεώτρηση Πλάτανος 1

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου ως $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-Cl-SO}_4$ ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου ως $\text{Ca-Mg-Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωρίων (Cl^-) από 142 σε 259 ppm και του ασβεστίου (Ca^{2+}) από 109 σε 144 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5- Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει υψηλό ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 70% και 65-55% αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μια μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Cl^- και του Na^+ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C3-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.

Γεώτρηση Πλάτανος 2

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται ως Mg-Ca- HCO_3 -Cl- SO_4 και στις δυο δειγματοληψίες. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των χλωριόντων (Cl^-) από 61 σε 81 ppm και των θεικών (SO_4^{2-}) από 61 σε 72 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

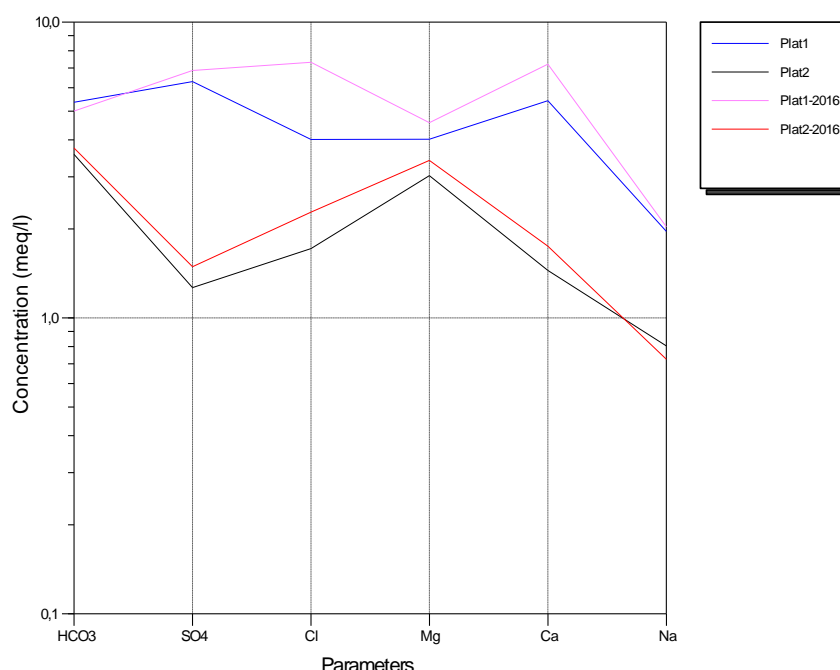
Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 45-50% και 70% αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του Cl^- 61 σε 81 ppm στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C2-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά.



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Πλάτανος.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Schoeller (Σχήμα 6.11) στη σύγκριση ανάμεσα στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου με αυτή της υγρής περιόδου, παρατηρούμε ότι, στη γεώτρηση Πλάτανος 1 έχουμε μια μικρό αύξηση των SO_4^{2-} , Mg^{2+} και Ca^{2+} από 6 έως 25 mg/L ενώ το Cl^- αυξάνεται κατά 110 mg/L, ακόμα τα HCO_3^- και Na^+ έχουν παραπλήσιες τιμές. Στη γεώτρηση Πλάτανος 2 παρατηρείται αύξηση των στοιχείων HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} και Ca^{2+} από 6 έως 20 mg/L, ενώ το Na^+ μειώνεται ελάχιστα κατά 1 mg/L.

Γεώτρηση Μελιδοχώρι1

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου ως Ca-Mg- HCO_3 - SO_4 -Cl ενώ στη δειγματοληψία

της υγρής περιόδου ως Ca-Mg-HCO₃-SO₄. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστίου (Ca²⁺) από 57 σε 118 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη επιφανειακών νερών.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει ποσοστό σε Ca²⁺ και HCO₃⁻+CO₃²⁻, περίπου 70% και 80% αντίστοιχα. Ενώ στη σύγκριση ανάμεσα στις δυο δειγματοληψίες παρατηρούμε ότι την υγρή περίοδο η περιεκτικότητα του Ca αυξήθηκε από 57 σε 118 ppm και μειώθηκε το ποσοστό του Na⁺ από 27 σε 14 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μια μικρή αύξηση της συγκέντρωσης του Cl⁻ από 51 σε 62 ppm ενώ στη συγκέντρωση του Na παρατηρείται μια μείωση κατά 13 ppm στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C2-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά.

Γεώτρηση Μελιδοχώρι2

Σύμφωνα με το διάγραμμα Piper (Σχήμα 6.1), το νερό χαρακτηρίζεται στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου ως Ca-Mg-HCO₃-SO₄-Cl, ενώ στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου ως Ca-Mg-HCO₃-SO₄. Την υγρή περίοδο παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστίου (Ca²⁺) από 58 σε 147 ppm και των θεικών (SO₄²⁻) από 200 σε 212 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Durov (Σχήμα 6.2), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη απλής διάλυσης ή μίξης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Ludwig-Langelier (Σχήμα 6.3), η γεώτρηση βρίσκεται στη ζώνη διαλυτοποίησης γύψου.

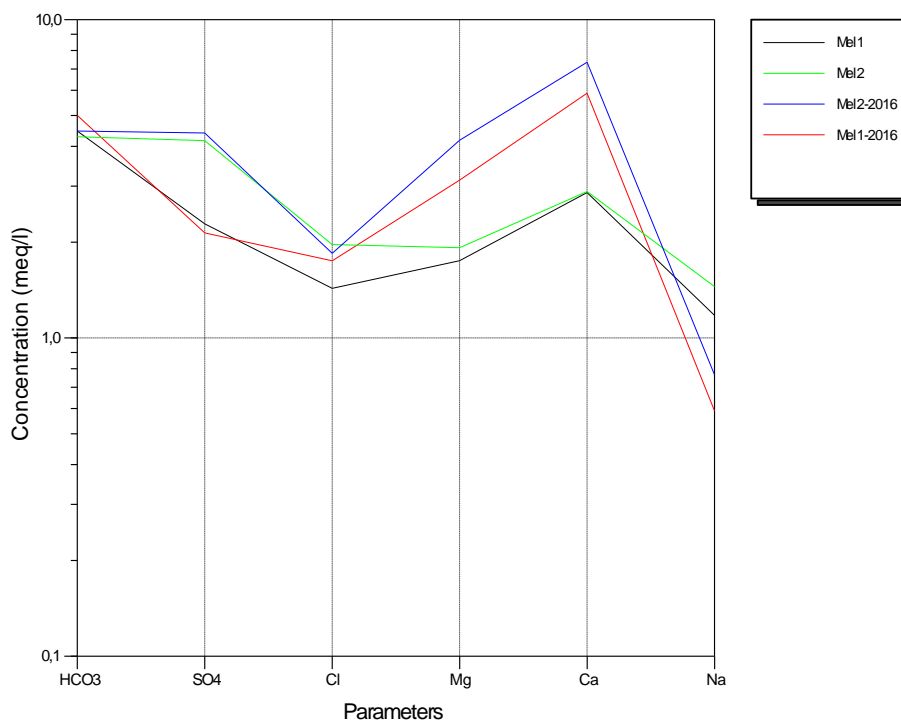
Σύμφωνα με το διάγραμμα Giggenbach (Σχήμα 6.4), το νερό βρίσκεται στην περιοχή των ανώριμων ρευστών, δηλαδή ανανεώσιμα νερά, με προτεινόμενη θερμοκρασία ταμιευτήρα μικρότερη των 70°C.

Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα (Σχήμα 6.5 - Σχήμα 6.6), παρατηρούμε ότι το νερό της γεώτρησης έχει ποσοστό σε Ca^{2+} και $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, περίπου 70%. Ενώ στη σύγκριση ανάμεσα στις δυο δειγματοληψίες παρατηρούμε ότι την υγρή περίοδο το ποσοστό του Ca^{2+} αυξήθηκε από 58 σε 147 ppm και μειώθηκε το ποσοστό του Na^+ από 33 σε 18 ppm.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς Na-Cl (Σχήμα 6.7), παρατηρείται μια μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Cl^- κατά 5 ppm, το ίδιο ισχύει και στη συγκέντρωση του Na που παρατηρείται μια μικρή μείωση κατά 5 ppm στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου συγκριτικά με τη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα διασποράς pH-Eh (Σχήμα 6.8), το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης ανήκει στη ζώνη ισορροπίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Wilcox (Σχήμα 6.9), το νερό της γεώτρησης ανήκει στην κατηγορία αρδευτικού ρευστού C2-S1, όπου η ποιότητα χαρακτηρίζεται καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά.



Σχήμα 6.12: Διάγραμμα Schoeller για τις γεωτρήσεις στην περιοχή Μελιδοχώρι.

Σύμφωνα με το διάγραμμα Schoeller (Σχήμα 6.12), στη γεώτρηση Μελιδοχώρι1 στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου το 2016 παρατηρείται μια σημαντική αύξηση στα στοιχεία Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , από 10 έως 30 ppm και μια μείωση στο Na^+ από 27 σε 14 ppm, ενώ τα HCO_3^- και SO_4^{2-} έχουν παραπλήσιες τιμές, συγκριτικά με τη δειγματοληψία που έγινε την ξηρή περίοδο του 2015. Στη γεώτρηση Μελιδοχώρι 2 παρατηρείται μείωση στο Na^+ , από 33 σε 18 ppm, στο Mg^{2+} παρατηρείται αύξηση της τάξης των 18 ppm και στο Ca^{2+} , από 58 σε 147 ppm, ενώ τα HCO_3^- , SO_4^{2-} και Cl^- έχουν παραπλήσιες τιμές στη σύγκριση των δυο δειγματοληψιών.

6.4 Γεωθερμομετρία

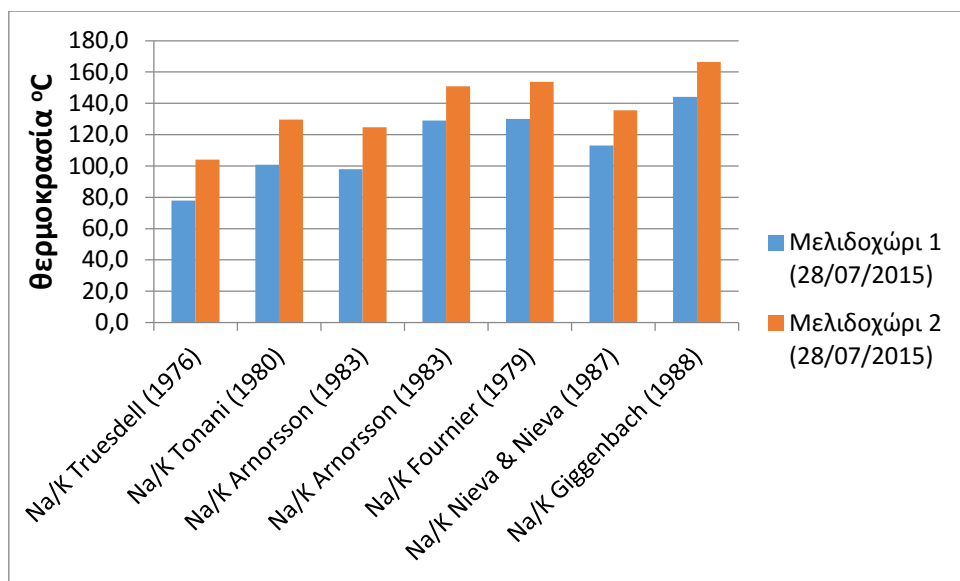
Μια αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό των γεωθερμικών ρευστών του πιθανού ταμιευτήρα έγινε με την χρήση των γεωθερμομέτρων Na/K. Η αρχή στην οποία βασίζονται όλα τα προτεινόμενα γεωθερμόμετρα Na/K προϋποθέτει ότι τα νερά βρίσκονται σε ισορροπία με νατριούχους άστριους (αλβίτης) και καλιούχους άστριους (αδουλαίος). Με τη βασική προϋπόθεση ότι τα πιθανά γεωθερμικά νερά έχουν ως στεγανό υπόβαθρο μέλη του Φυλλιτικού καλύμματος (φυλλίτες – χαλαζίτες, είτε σχηματισμός γύψων ραουβακών) τότε δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα σχετικά με τον απαραίτητο χημισμό.

Πειραματικές εφαρμογές των γεωθερμομέτρων Na/K έδειξαν πως είναι αξιόπιστα για θερμοκρασίες 120–350°C, ενώ δεν δίνουν σωστά αποτελέσματα για θερμοκρασίες κάτω από 120°C. Σε τέτοιες θερμοκρασίες οι συγκεντρώσεις των Na⁺ και K⁺ επηρεάζονται από άλλα ορυκτά, όπως είναι οι άργιλοι, και δεν ελέγχονται μόνο από την ιονταλλαγή των αστρίων.

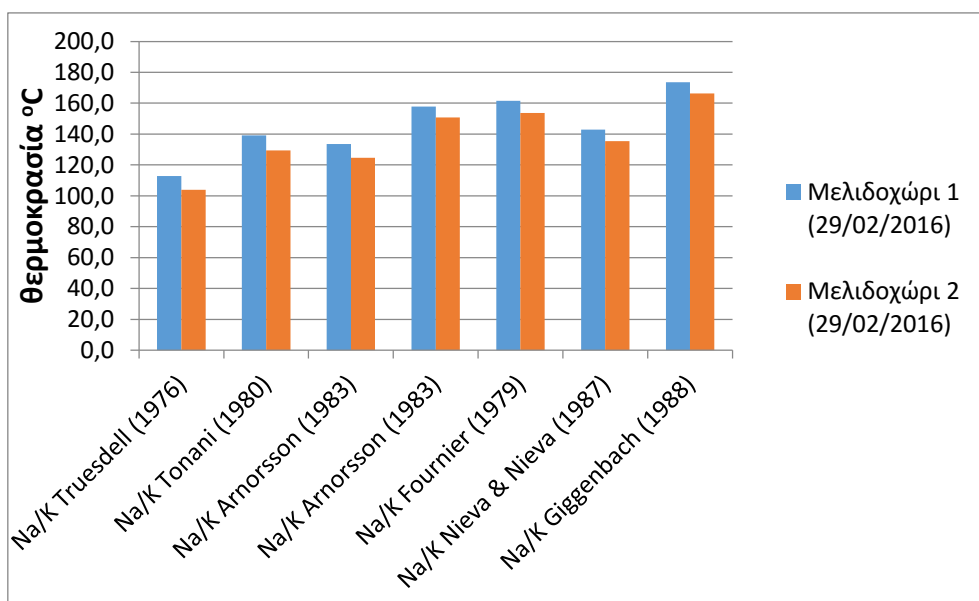
Με βάση τα γεωθερμόμετρα Na/K προκύπτουν οι παρακάτω θερμοκρασίες και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 6.4: Εκτιμώμενες θερμοκρασίες με βάση τα γεωθερμόμετρα Na/K.

	Περί 1 (10/06/201 5)	Περί 1 (25/02/201 6)	Περί 2 (10/06/201 5)	Περί 2 (25/02/201 6)	Περί 3 (10/06/201 5)	Περί 3 (25/02/201 6)	Πλάτανος 1 (10/06/201 5)	Πλάτανος 1 (25/02/201 6)	Πλάτανος 2 (10/06/201 5)	Πλάτανος 2 (25/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 1 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 1 (29/02/201 6)	Μελιδοχώ ρι 2 (28/07/201 5)	Μελιδοχώ ρι 2 (29/02/201 6)	Μονάδε ς
Na/K- Truesdell (1976)	97	220	102	128	84	145	121	174	267	329	78	113	104	104	°C
Na/K- Tonani (1980)	122	259	127	157	107	175	148	207	313	383	101	139	130	129	°C
Na/K- Arnorsson (1983)	108	242	113	149,	95	166	131	195	269	350	98	133	125	125	°C
Na/K- Arnorsson (1983)	145	238	149	170	134	183	165	205	271	309	129	158	151	151	°C
Na/K- Fournier (1979)	148	252	152	175	135	190	169	214	289	334	130	162	154	154	°C
Na/K- Nieva & Nieva (1987)	130	228	134	156	118	170	150	193	263	306	113	143	136	135	°C
Na/K- Giggenbac h (1988)	161	256	165	186	149	200	181	222	288	327	144	174	166	166	°C

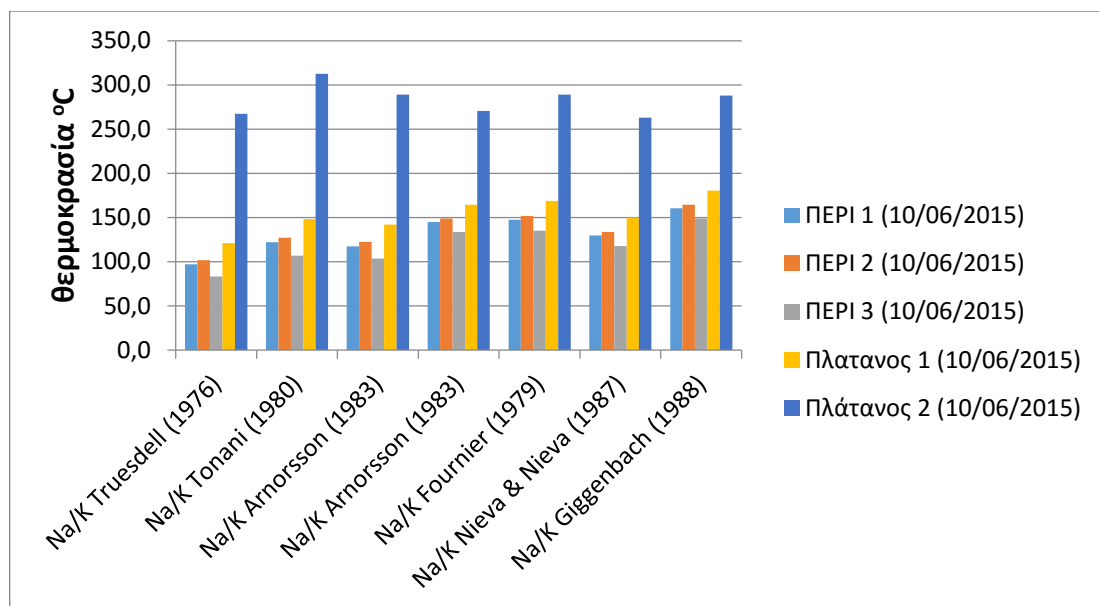


Σχήμα 6.13: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την ξηρή περίοδο.

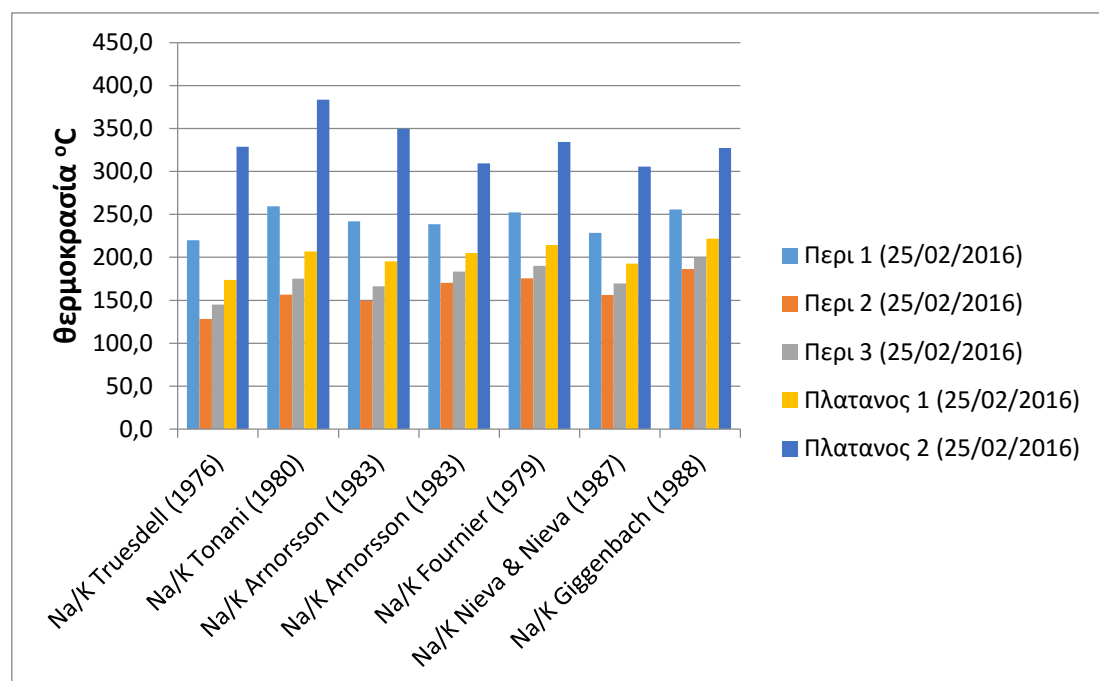


Σχήμα 6.14: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την υγρή περίοδο.

Σύμφωνα με τα γεωθερμόμετρα τύπου Na/K και τα δεδομένα από τις γεωτρήσεις Μελιδοχώρι (1 και 2), οι πιθανές τιμές των θερμοκρασιών του ταμιευτήρα και στις δυο περιόδους είναι της τάξης των 70 ως 170°C. Ακόμα, με βάση τα γεωθερμόμετρα Na/K παρατηρείται στην υγρή περίοδο μια αύξηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, περίπου 20°C, στη γεώτρηση Μελιδοχώρι 1.



Σχήμα 6.15: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την ξηρή περίοδο.



Σχήμα 6.16: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση γεωθερμομέτρων τύπου Na/K κατά την υγρή περίοδο.

Σύμφωνα με τα γεωθερμόμετρα τύπου Na/K και τις παραπάνω πέντε γεωτρήσεις, οι πιθανές τιμές των θερμοκρασιών του ταμιευτήρα και στις δυο περιόδους είναι της τάξης των 90 ως 380°C. Ακόμα, με βάση τα γεωθερμόμετρα Na/K παρατηρείται στην υγρή περίοδο μια αύξηση της εκτιμώμενης θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, περίπου 20-100°C.

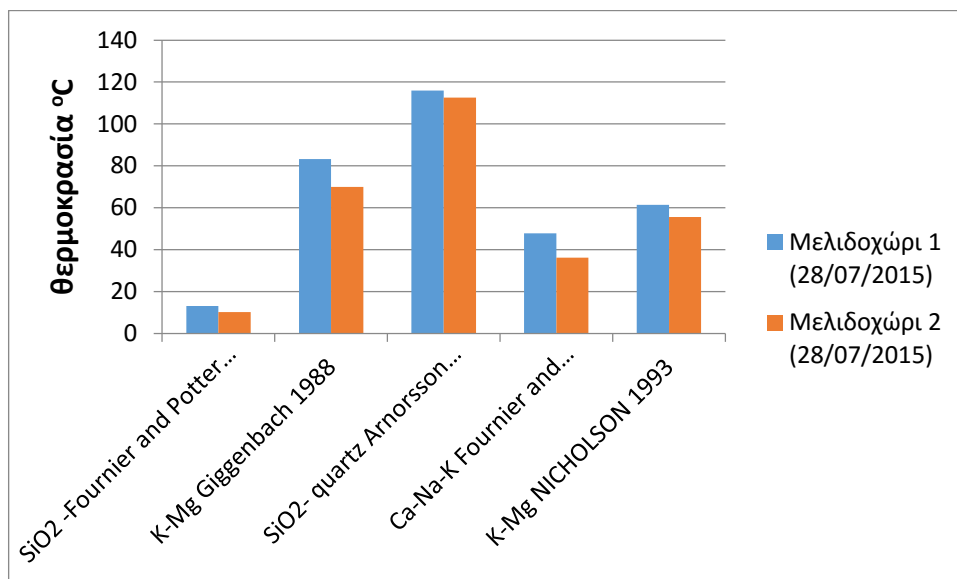
Όπως αναφέρθηκε πρωτίτερα τα γεωθερμομέτρα Na/K δεν δίνουν σωστά αποτελέσματα για θερμοκρασίες κάτω από 120°C. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκαν τα γεωθερμομέτρα K/Mg, Na/K/Ca και SiO₂ με όλους τους περιορισμούς και τις απαιτούμενες διορθώσεις που προτείνονται βιβλιογραφικά.

Η αρχή στην οποία βασίζεται το γεωθερμομέτρο K/Mg προϋποθέτει ότι τα νερά έχουν έλθει σε ισορροπία με K-άστριους (αδουλαίους), K-μαρμαρυγία (ιλλίτης, μοσχοβίτης), χλωρίτη (κλινοχλωρίτη), χαλκηδόνιο. Δεν έχει ερευνηθεί εάν υπάρχουν κατά θέσεις αποθέσεις χαλκιδόνιου είναι όμως ευρέως γνωστό ότι υπάρχει πληθώρα διοξειδίου του πυριτίου στην περιοχή, αλλά υπό μορφή χαλαζία για αυτό και θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις. Το πλεονέκτημα αυτού του γεωθερμομέτρου είναι ότι φτάνει πολύ γρήγορα σε ισορροπία για θερμοκρασίες των 100°C ή λίγο χαμηλότερες. Η συνολική ποσότητα του μαγνησίου όμως κάνει τη χρήση και αυτού του γεωθερμομέτρου προβληματική. Το συγκεκριμένο γεωθερμομέτρο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για νερά, τα οποία είναι χλωριούχα και περιέχουν συγκεντρώσεις Mg²⁺ μικρότερες του 1 ppm. Οι συγκεντρώσεις Mg²⁺, που προέκυψαν από τις χημικές αναλύσεις, είναι αρκετά μεγαλύτερες από το όριο του 1 ppm.

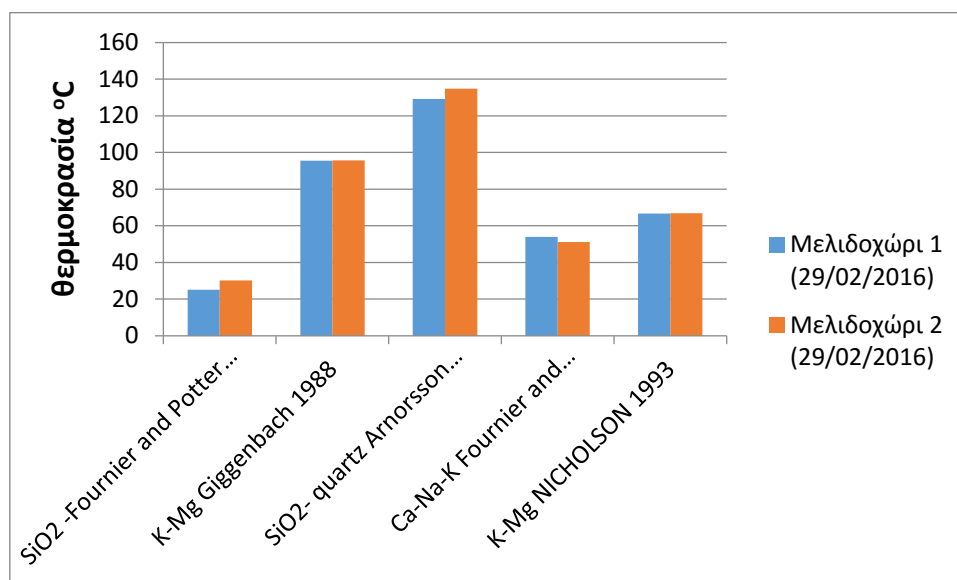
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι θερμοκρασίες από τα γεωθερμομέτρα K/Mg, Na/K/Ca και SiO₂ και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 6.5: Εκτιμώμενες θερμοκρασίες σύμφωνα με τα γεωθερμόμετρα K-Mg, Na-K-Mg και SiO₂.

	ΠΕΡΙ 1 (10/06/20 15)	Περι 1 (25/02/20 16)	ΠΕΡΙ 2 (10/06/20 15)	Περι 2 (25/02/20 16)	ΠΕΡΙ 3 (10/06/20 15)	Περι 3 (25/02/20 16)	Πλατανο ς 1 (10/06/20 15)	Πλατανο ς 1 (25/02/20 16)	Πλάτανο ς 2 (10/06/20 15)	Πλατανο ς 2 (25/02/20 16)	Μελιδοχ ώρι 1 (28/07/20 15)	Μελιδοχ ώρι 1 (29/02/20 16)	Μελιδοχ ώρι 2 (28/07/20 15)	Μελιδοχ ώρι 2 (29/02/20 16)	Μονάδ ες
K, Mg- Giggenbach (1988)	85	59	65	59	91	73	66	54	53	49	83	96	70	96	°C
K, Mg- NICHOLS ON (1993)	62	50	53	50	65	57	54	48	48	45	61	67	56	67	°C
Na,K,Ca (Fournier και Truesdell 1973)	62	47	30	42	54	55	31	42	21	22	48	54	36	51	°C
SiO₂ (Fournier and Potter, 1982)	48	54	23	42	36	54	32	44	47	63	13	25	10	30	°C
SiO₂ (Arnorsson , 1985)	154	160	127	148	142	161	137	150	153	170	116	130	113	135	°C

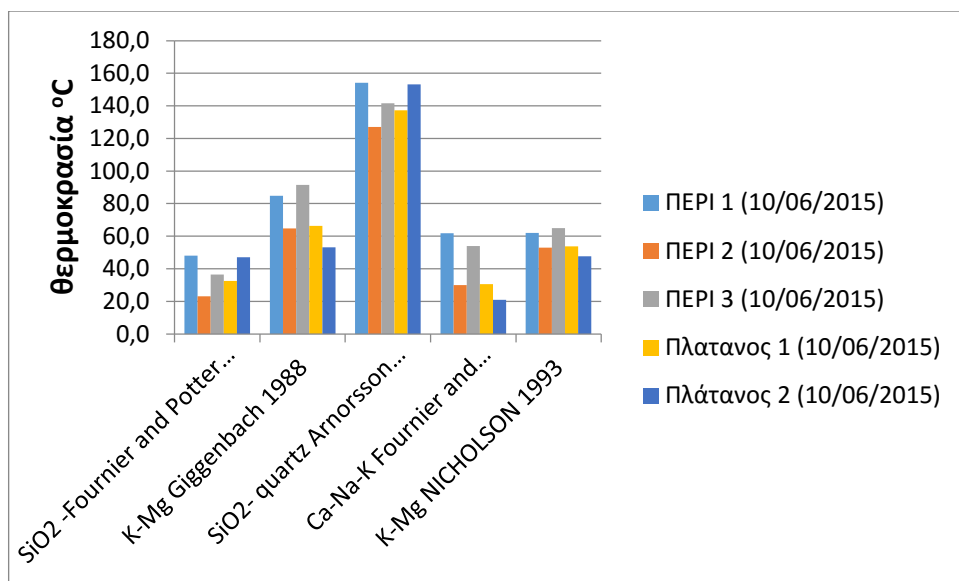


Σχήμα 6.17: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα κατά την ξηρή περίοδο.

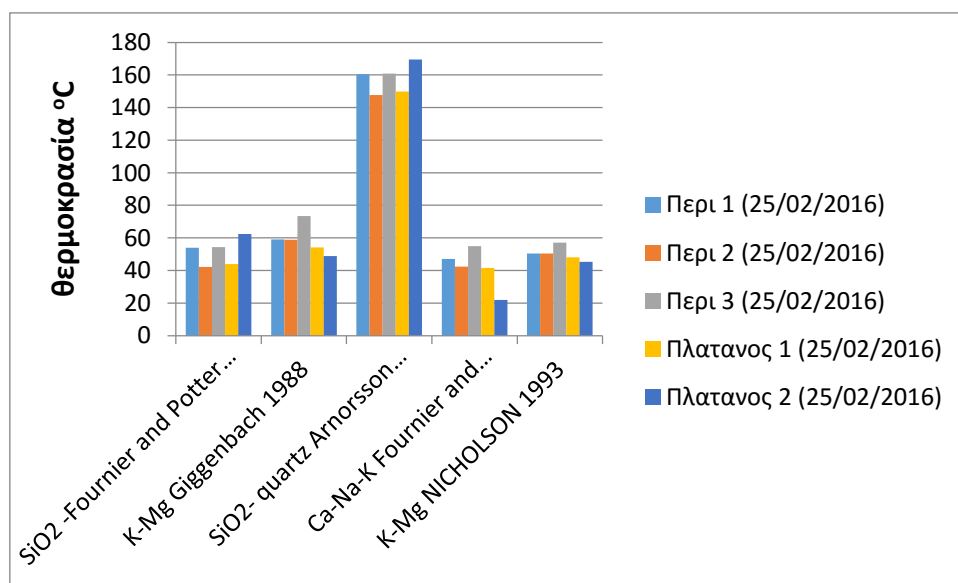


Σχήμα 6.18: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα κατά την υγρή περίοδο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γεωθερμόμετρα οι πιθανές τιμές των θερμοκρασιών του ταμιευτήρα και στις δυο περιόδους είναι της τάξης των 10 ως 135°C. Ακόμα, με βάση τα παραπάνω γεωθερμόμετρα παρατηρείται στην υγρή περίοδο ότι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή κατά κανόνα.



Σχήμα 6.19: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση διαφόρων τύπων γεωθερμομέτρων κατά την ξηρή περίοδο.



Σχήμα 6.20: Υπολογισμένες τιμές θερμοκρασίας πιθανού ταμιευτήρα εξαγόμενες με την χρήση διαφόρων τύπων γεωθερμομέτρων κατά την υγρή περίοδο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γεωθερμομέτρα και τα δεδομένα των πέντε γεωτρήσεων, οι πιθανές τιμές των θερμοκρασιών του ταμιευτήρα και στις δυο περιόδους είναι της τάξης των 20 ως 165°C. Ακόμα, με βάση τα παραπάνω γεωθερμομέτρα παρατηρείται στην υγρή περίοδο ότι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή κατά κανόνα.

Κεφάλαιο 7: Συζήτηση

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν από τις αναλύσεις και την επεξεργασία τους μπορούν να συνοψιστούν ως ακολούθως:

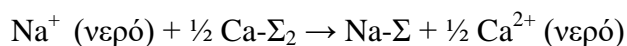
- Οι τιμές του pH την ξηρή περίοδο στις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 7.25 έως 8.04, ενώ την υγρή περίοδο κυμαίνονται από 7.33 έως 7.76 επομένως το νερό χαρακτηρίζεται αλκαλικό και προέρχονται από μια "νέα" σχετικά υδάτινη μάζα.
- Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στις δειγματοληψίες και όσο αφορά όλες τις γεωτρήσεις κυμαίνονται από 694-1987 $\mu\text{S}/\text{cm}$, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένες ποσότητες αλάτων στο νερό. Η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων και των θεικών ιόντων συνοδεύεται από παράλληλη αύξηση της αγωγιμότητας ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με τις συγκεντρώσεις των όξινων ανθρακικών ιόντων.
- Η σκληρότητα του ρευστού οφείλεται στη διάλυση των αλάτων Ca^{2+} και Mg^{2+} σε αυτό. Ανάλογα με τη σκληρότητα, στις δυο δειγματοληψίες, το νερό χαρακτηρίζεται στη γεώτρηση Πλάτανος 2 ως μέτρια σκληρό ενώ στις υπόλοιπες σκληρό. Σύμφωνα με τον Βουδούρη (2009), η διάλυση των αλάτων Ca^{2+} και Mg^{2+} , λαμβάνει χώρα στα διάφορα πετρώματα ή στο έδαφος μέσα από τα οποία διέρχεται το νερό.
- Όσο αφορά τα Συνολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS) και στις δυο δειγματοληψίες στη γεώτρηση Περί 2 είναι πάνω από 1000 mg/L, το οποίο οφείλεται σε μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα, που προέρχονται από τη διάλυση των πετρωμάτων, ενώ στις υπόλοιπες είναι κάτω από 1000 mg/L και μπορεί να χαρακτηριστεί ως γλυκό. Εξαίρεση αποτελεί η γεώτρηση Πλάτανος 1 στην υγρή περίοδο που ξεπερνάει κατά πολύ λίγο τα 1000 mg/L, συγκεκριμένα είναι 1005 mg/L, το οποίο είναι λογικό γιατί την ξηρή περίοδο έχει τιμή 956 mg/L.
- Με βάση του Συντελεστή Revelle το νερό των γεωτρήσεων στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου χαρακτηρίζεται ως καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση ενώ στις γεωτρήσεις Περί 2 και Πλάτανος 1 το νερό χαρακτηρίζεται ελαφρά ρυπασμένο. Σε αυτές τις δυο γεωτρήσεις ο συντελεστής είναι αυξημένος λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των

χλωριόντων (Cl^-), που οφείλεται στην διαλυτοποίηση των ιζηματογενών και πυριγενών πετρωμάτων από τα οποία διέρχεται το νερό. Αντίθετα, στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου ο συντελεστής Revelle είναι σε όλες τις γεωτρήσεις μικρότερος της μονάδας, επομένως το νερό χαρακτηρίζεται ως καλό υπόγειο νερό χωρίς θαλάσσια διείσδυση.

- Όλα τα δείγματα που πάρθηκαν και στις δυο δειγματοληψίες έχουν χαμηλές τιμές (<1) του λόγου Na/Cl , που ενδέχεται να είναι το αποτέλεσμα της ιοντοανταλλαγής Na^+ στο έδαφος και τις αργίλους, κάτι το οποίο πιθανά λαμβάνει χώρα στην περιοχή έρευνας.
- Από τις τιμές του λόγου Na/K στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου στις γεωτρήσεις Περί 1, Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό και στις γεωτρήσεις Πλάτανος 1 το νερό βρίσκεται σε περιοχή εμπλουτισμού του υδροφορέα. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί (1, 2 και 3) και Μελιδοχώρι 1 βρίσκονται σε περιοχή εκφόρτισης λόγω προσρόφησης Na^+ και στη γεώτρηση Πλάτανος 2 το νερό χαρακτηρίζεται ως μετεωρικό.
- Οι τιμές του λόγου Mg/Ca στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου οι τιμές του λόγου αυτού είναι μικρότερες από 0,7 επομένως δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση, επίσης το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή της γεώτρησης Πλάτανος 2 που είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, επομένως το νερό προέρχεται από υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} . Αντίθετα στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου οι τιμές του λόγου αυτού είναι μεγαλύτερες από 0,7 στις γεωτρήσεις Περί 2 και Πλάτανος 1 το νερό προέρχεται από υδροφόρους που αντιστοιχούν σε δολομιτικά υδροφόρα στρώματα ενώ στη γεώτρηση Πλάτανος 2 το νερό προέρχεται από υδροφόρους οφιολιθικών σχηματισμών ή γενικά πυριτικών πλούσιων σε Mg^{2+} , στις γεωτρήσεις Περί (1 και 3), Μελιδοχώρι (1 και 2) ο λόγος είναι $<0,7$ επομένως δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση, επίσης το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά υδροφόρα στρώματα.
- Σύμφωνα με το λόγο Cl/SO_4 στη δειγματοληψία της υγρής περιόδου το νερό μπορεί να χαρακτηριστεί ως θειούχο-χλωριούχο στις γεωτρήσεις Περί 2,

Μελιδοχώρι 1 και Μελιδοχώρι 2 ενώ στις γεωτρήσεις Περί 1, Περί 3, Πλάτανος 1 και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο. Ενώ στη δειγματοληψία της ξηρής περιόδου το νερό στις γεωτρήσεις Περί 1, Περί 3 και Πλάτανος 2 χαρακτηρίζεται ως χλωροθειούχο ενώ στις υπόλοιπες ως θειούχο-χλωριούχο. Όσον αφορά τη συγκέντρωση ιόντων SO_4^{2-} και Cl^- , η αύξηση των θειικών ιόντων δε συνοδεύεται από παράλληλη αύξηση και των χλωριόντων, οπότε συμπεραίνεται ότι η πηγή των θειικών ιόντων σε αυτή την περίπτωση, είναι η παρουσία γυψούχων σχηματισμών στην περιοχή κατανομής των δειγμάτων.

- Ο λόγος $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ είναι πάνω από τη μονάδα σε όλες τις γεωτρήσεις των δυο δειγματοληψιών και υποδεικνύει ότι υπάρχει υδροφόρο στρώμα με συνεχή τροφοδοσία.
- Στις δυο δειγματοληψίες οι τιμές του συντελεστή προσρόφησης νατρίου είναι μικρότερες από 6 που υποδηλώνουν μικρό κίνδυνο νατρίου. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή της γεώτρησης Περί 2 με τιμή 6,16 την ξηρή περίοδο και 7,30 την υγρή περίοδο, οι οποίες δηλώνουν μέσο κίνδυνο νατρίου.
- Σύμφωνα με τα τριγωνικά διαγράμματα παρατηρείται σε όλες γεωτρήσεις αύξηση της περιεκτικότητας του Ca^{2+} ενώ ταυτόχρονα η περιεκτικότητα του Na^+ παραμένει σχετικά σταθερή, εκτός στις γεωτρήσεις Μελιδοχώρι (1 και 2), όπου μειώνεται από 27 σε 14ppm και από 33 σε 18 ppm αντίστοιχα. Αυτό θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από τη διείσδυση θαλασσινού νερού (πλούσιο σε Na^+) στην ενδοχώρα (ανθρακικό παράκτιο υδροφορέα με αφθονία Ca^{2+} ή Mg^{2+}) όπου λαμβάνει χώρα **αντίστροφη ιοντοανταλλαγή** (Apello & Postma, 1994):



όπου Σ είναι η στερεά φάση (υλικό υδροφορέα) στην οποία λαμβάνει χώρα η ανταλλαγή (εδαφικός ιοντοανταλλάκτης). Η αντίστροφη ιοντοανταλλαγή οδηγεί σε απελευθέρωση ασβεστίου (Ca^{2+}) και δέσμευση του νατρίου (Na^+) και το υπόγειο νερό από τον υδροχημικό τύπο $\text{Na}-\text{Cl}$ μετατρέπεται στον τύπο $\text{Ca}-\text{Cl}_2$.

Επίσης παρατηρείται αύξηση των χλωριόντων σε όλες τις γεωτρήσεις, με εξαίρεση την Μελιδοχώρι 2, που θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από τη διείσδυση θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα.

Παρόλα αυτά θεωρούμε ότι δεν υπάρχει θαλάσσια διείσδυση στις συγκεκριμένες γεωτρήσεις.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα γεωθερμόμετρα, στα οποία χρησιμοποιούνται οι συγκεντρώσεις των στοιχείων Na^+ , K^+ και Ca^{2+} παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα την υγρή περίοδο συγκριτικά με την ξηρή. Το Na^+ , K^+ και Ca^{2+} είναι ευδιάλυτα στοιχεία, επομένως μέσω των αυξημένων βροχοπτώσεων και της αυξημένης κατείσδυσης αυξάνονται και οι συγκεντρώσεις τους.

Όσον αφορά την προσέγγιση της θερμοκρασίας του πιθανού γεωθερμικού ταμιευτήρα χρησιμοποιήθηκαν διάφορα γεωθερμόμετρα, τα οποία έχουν προταθεί διαχρονικά. Όμως, δεν είναι όλα τα γεωθερμόμετρα αξιόπιστα σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, διότι έχουν σχεδιαστεί με βάση γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας.

Από την χρήση των γεωθερμομέτρων Na/K, στην περιοχή Μελιδοχώρι, προέκυψαν τιμές του πιθανού γεωθερμικού ταμιευτήρα στο εύρος των 70-170°C, ενώ στην περιοχή Περί - Πλάτανος προέκυψαν στο εύρος των 90-380°C. Ο τύπος αυτός των γεωθερμομέτρων όμως δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για τιμές πάνω από 120°C.

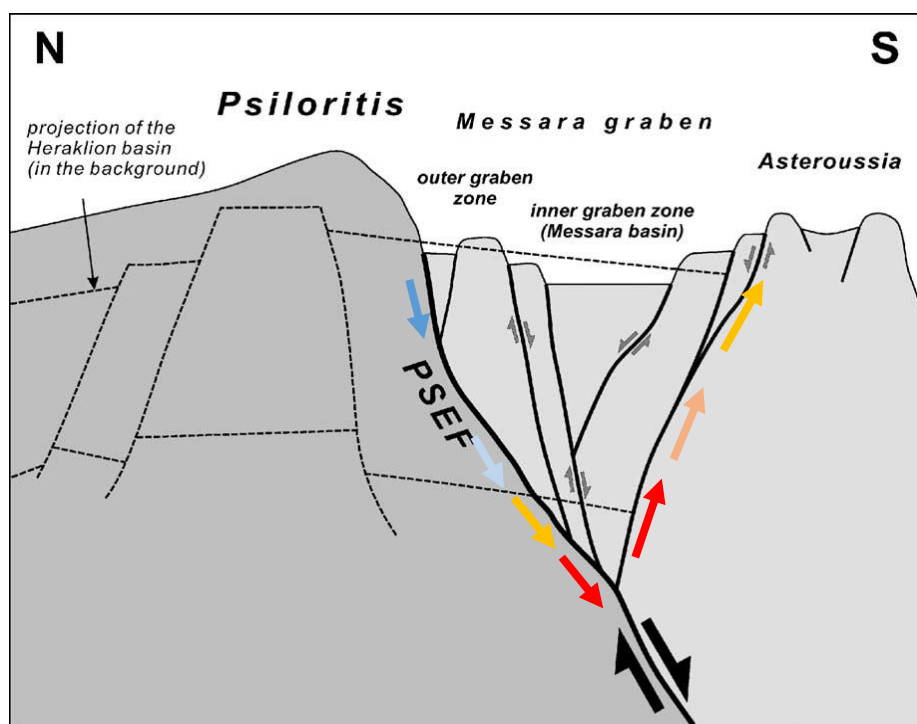
Με χρήση γεωθερμομέτρων K/Mg, στην περιοχή Μελιδοχώρι, προέκυψαν τιμές θερμοκρασίας του πιθανού ταμιευτήρα 70-90°C και στην περιοχή Περί - Πλάτανος προέκυψαν στο εύρος των 50-90°C. Τα δείγματα από τις ανωτέρω περιοχές όμως περιέχουν συγκεντρώσεις Mg^{2+} αρκετά μεγαλύτερες από το όριο του 1 ppm.

Για το λόγο αυτό εμπιστευόμαστε περισσότερο το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca, το οποίο μετά από τις προτεινόμενες διορθώσεις στις τιμές του μαγνησίου, οι τελικές τιμές ενός πιθανού ταμιευτήρα στην ευρύτερη περιοχή Περί – Πλάτανος υπολογίζονται στους 60°C και του πιθανού ταμιευτήρα στην περιοχή Μελιδοχωρίου στους 50°C.

Η υδροφορία στην περιοχή έχει ως πιθανότερο στεγανό υπόβαθρο του πιθανού γεωθερμικού υδροφορέα τμήματα του Φυλλιτικού καλύμματος, είτε τους φυλλίτες – χαλαζίτες, είτε το σχηματισμό γύψων – ραουβακών. Το συνολικό πάχος των επάλληλων τεκτονικών ακολουθιών, της Πίνδου, της Τρίπολης και της υποκείμενης

τεκτονικής ενότητας αυτής του Φυλλιτικού καλύμματος διαφέρει από περιοχή σε περιοχή ακόμα και εντός της Μεσσαράς, όπου εμφανίζονται εντός της εκτεταμένης ακολουθίας του Νεογενούς, τα τεκτονικά παράθυρα μικρών σχετικά διαστάσεων της Πίνδου και της Τρίπολης. Με μια μέση γεωθερμική βαθμίδα οι τιμές της θερμοκρασίας που έχουν μετρηθεί σε δείγματα νερού στην επιφάνεια δεν επιτυγχάνονται στα 300m, που είναι το μέγιστο βάθος της γεώτρησης Πλάτανος αλλά απαιτούν πολύ μεγαλύτερο βάθος.

Μία εξήγηση για την αύξηση είναι ότι η μέση θερμική ροή που έχει υπολογιστεί στα 60 mW/m^2 για την περιοχή της Μεσσαράς αυξάνει κατά μήκος των μεγάλων ρηγματογόνων ζωνών, εντός των οποίων κυκλοφορεί το νερό, και οι οποίες είναι ενεργές ήδη από το Μέσο Μειόκαινο και δραστηριοποιήθηκαν κατ'επανάληψη (Peterek and Schwarze 2004).



Εικόνα 8.1: Σχηματικό διάγραμμα ροής κατά μήκος μιας ρηγματογόνου ζώνης. Επιφανειακό νερό αλλά και των υδροφορέων κατεισδύει από την ορεινή περιοχή στη ζώνη του ρήγματος στη βάση της οροσειράς. Στη συνέχεια, θερμαίνεται εξαιτίας της γεωθερμικής βαθμίδας και πλέον ως θερμό νερό ανεβαίνει, μέσω των δυνάμεων της άνωσης, κατά μήκος του ρήγματος στην επιφάνεια, όπου μπορεί και να αναδυθεί.

Η εικόνα 8.1 απεικονίζει την ερμηνεία των Peterek & Schwarze (2004) για την τεκτονική στη Νότια-Κεντρική Κρήτη, από την οποία συμπεραίνεται ότι τα

Αστερούσια βυθίζονται μαζί με τη λεκάνη της Μεσσαράς, ενώ ταυτόχρονα ο ορεινός όγκος του Ψηλορείτη αναδύεται. Ποσότητες υδάτων κατεισδύουν στις νότιες παρυφές του Ψηλορείτη πιθανώς εντός της μεγάλης ρηγματογόνου ζώνης, θερμαίνονται σε βάθος χιλιομέτρων και τα θερμά ύδατα ανέρχονται στο αντιθετικό ρήγμα που επιφανειακά διέρχεται από τις βόρειες παρυφές των Αστερουσίων.

Η αύξηση της θερμικής ροής στις μεγάλες ρηγματογόνες ζώνες, μπορεί να συνδέεται με αύξηση της τιμής της γεωθερμικής βαθμίδας. Με τη σειρά της η αυξημένη τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας θα μπορούσε να συνδέεται α) είτε με μια πιθανή ύπαρξη πλαγιογρανιτικών σωμάτων εντός της τεκτονικής ακολουθίας των ανωτέρων ενοτήτων που επηρεάζονται και γειτνιάζουν με αυτές τις ρηγματογόνες ζώνες και β) είτε με την ύπαρξη ανυδριτών στο κλαστικό υπόβαθρο της Ζώνης της Τρίπολης.

Όσον αφορά στην περιοχή Μελιδοχώρι, στο ανερχόμενο τέμαχος οι παραπάνω ενότητες βρίσκονται στην επιφάνεια, στο κατερχόμενος τέμαχος μπορεί να είναι καλυμμένες από εκατοντάδες μέτρα αποθέσεων του Νεογενούς και να συνδράμουν, ακόμα και ως σώματα μικρών διαστάσεων στην αύξηση τοπικά της θερμοκρασίας και της δημιουργίας ενός ταμιευτήρα χαμηλής ενθαλπίας, του οποίου η θερμοκρασία των υδάτων αυξομειώνεται επηρεαζόμενη από πολλούς παραμέτρους μεταξύ των οποίων είναι η ποσότητα και η ταχύτητα των κατεισδυόντων υδάτων, η ποσότητα και η ταχύτητα άντλησης τους κτλ.

Όσον αφορά στα «κολάρα» των γεωτρήσεων (Περί 1, Περί 2, Περί 3, Πλάτανος 1 και Πλάτανος 2), τα οποία σήμερα βρίσκονται στον επιφανειακό εδαφικό μανδύα οι γεωτρήσεις διάτρησαν ασβεστολίθους της Ζώνης της Πίνδου και πιθανώς και της Τρίπολης. Από τον γεωλογικό χάρτη της περιοχής διαπιστώνουμε ότι στην άμεση γειτονία αυτών των γεωτρήσεων υπήρχαν ενδείξεις κατά το διάστημα της γεωλογικής χαρτογράφησης για την ύπαρξη σχετικά μεγάλων σε μέγεθος γνευσιακών σωμάτων. Η ύπαρξη τέτοιων πετρωμάτων θα μπορούσαν να συνδράμουν στην αύξηση τοπικά της θερμοκρασίας και της δημιουργίας ενός ταμιευτήρα χαμηλής ενθαλπίας, του οποίου η θερμοκρασία των υδάτων αυξομειώνεται επηρεαζόμενη από πολλούς παραμέτρους μεταξύ των οποίων είναι η ποσότητα και η ταχύτητα των κατεισδυόντων υδάτων, η ποσότητα και η ταχύτητα άντλησης τους, αλλά ακόμα και από την θερμοκρασία των επιφανειακών υδροφοριών όπως στις περιπτώσεις των γεωτρήσεων Περί 1 και Πλάτανος 2, στις οποίες η συνεισφορά των επιφανειακών υδροφοριών είναι εμφανής από την μικρού βάθους στάθμη άντλησης.

Η συστηματική έρευνα για την απάντηση αυτών των ερωτημάτων ξεφεύγει από τα στενά όρια μιας διπλωματικής εργασίας.

Βιβλιογραφία

Διεθνής

Arnorsson, S. (ed.), 2000: Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. Sampling methods, data handling, interpretation. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Alper Baba, D. Chandrasekaram, Jochen Bundschuh (2014): Geothermal Systems and Energy Resources - Turkey and Greece, CRC Press/Balkema, Volume 7, 35-43, pp. 77-82.

Battistel M., Hurwitz S., Evans W., Barbieri M. (2014): Multicomponent geothermometry applied to a medium-low enthalpy carbonate-evaporite geothermal reservoir, Energy Procedia , Volume 59, pp. 359–365

Brassington R. (2007): Field Hydrogeology, Wiley, third edition.

Bonneau M. (1984): Correlation of the Hellenic Nappes in the south east Aegean and their tectonic reconstruction, Geological Society, London, Special Publications, 17, pp. 517-527.

Chatzigiannis G. and Kavouridis Th. (2013): The geothermal Occurrence of Kapistri, Ierapetra area, Crete, Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII, 1914-1919.

Dornsiepen U.F., Manutsoglu E., Mertmann D. (2001): Permian – Triassic palaeogeography of the external Hellenides, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 172, pp. 327-338.

Fassoulas C., (2001): The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active European margin: the Heraklion basin, Crete, Greece, Journal of Geodynamics, Volume 31, pp. 49-70.

Fournier O. R. (1977): Chemical Geothermometers and Mixing Models for Geothermal Systems, Geothermics, Volume 5, pp. 41-50.

Fournier O. R. (1979): A Revised Equation for the Na/K Geothermometer, Geothermal Resources Council Transactions Bulletin, Volume 3, pp. 221-224..

Fournier O. R. (1989): The Solubility of Silica in Hydrothermal Solutions: Practical Applications, pp. 21-39.

Fournier O. R. (1990): Interpretation of Na-K-Mg Relations in Geothermal Waters, Geothermal Resources Council Transactions Bulletin, Volume 14, pp. 1421-1425.

Fournier O. R. and Potter W. R. II (1979): Magnesium Correction to the Na-K-Ca Chemical Geothermometer, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, pp. 1543-1550.

Fournier O. R. and Potter W. R. II (1983): A Revised and Expanded Silica (quartz) Geothermometer, Geothermal Resources Council Transactions Bulletin, Volume 11, pp. 3-12.

Fournier R.O. and Truesdell A.H. (1973): An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1255-1275.

Giggenbach W.F. (1988): Geothermal solute equilibria. *Geochimica. Cosmochim. Acta*, 52, 2749 - 2765.

Giggenbach W.F. (1991): Chemical techniques in geothermal exploration; Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development (D'Amore F., Ed.), UNITAR/UNDP Center on Small Energy Resources, Rome, pp. 119-144.

Karingithi W. C. (2009): Chemical Geothermometers for Geothermal Exploration. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, November 1-22.

Marini L. (2000): Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy, pp. 5-7.

Mendrinis D., Choropanitis I., Polyzou O. and Karytsas C. (2010): Exploring for geothermal resources in Greece, *Geothermics*, V. 39, pp. 124-137.

Meulenkamp J.E. (1979): Field Guide to the Neogene of Crete. Publ. Dep. Geol. Pal. Univ. Athens, pp. 1-32.

Reyes A. G. and Jongens R. (2003): Tectonic Settings of Low Enthalpy Geothermal Systems in New Zealand, Proceedings NZ geothermal Workshop 2003, pp. 31-38.

Reyes A. G., Christenson B.W., Faure K. (2010): Sources of solutes and heat in low-enthalpy mineral waters and their relation to tectonic setting, New Zealand, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 192, pp. 117-141.

Peterek A., Schwarze J. (2004): Architecture and Late Pliocene to recent evolution of outer-arc basins of the Hellenic subduction zone (south-central Crete, Greece), *Journal of Geodynamics*, Volume 38, pp. 19-55.

Porowski A. and Dowgiallo J. (2008): Application of selected geothermometers to exploration of low-enthalpy thermal water: the Sudetic Geothermal Region in Poland, Environmental Geology, Volume 58, pp. 1629-1638.

Yock A. (2009): Geothermometry, Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, 17-30 October, 2009.

Ελληνική

Αμβράζης Μ. (2015): Μελέτη γεωθερμικών υδάτων στην περιοχή νοτιοδυτικής Μεσσαράς, Κρήτη. Διπλωματική εργασία Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης.

Βιδάκης Μ. et. al. (1992): Βασικός γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος, κλίμακα 1:50.000, φύλλο ΕΠΑΝΩ ΑΡΧΑΝΑΙ, ΙΓΜΕ, Αθήνα.

Βλασταράς Π.Ν. (2006): Γεωφυσική έρευνα για τον εντοπισμό γεωθερμικού πεδίου στο Ακρωτήρι Χανίων. Διπλωματική εργασία του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης, σελ 91.

Βουδούρης Κ. (2009): Θέματα Υδρογεωλογίας περιβάλλοντος, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 35-67.

Βουδούρης Κ. (2015): Εκμετάλλευση & Διαχείριση Υπόγειου Νερού. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 35-67.

Βρέλλης Γ., Βέκιος Π., Ευθυμιόπουλος Θ., Σπυρίδωνος Ε. (2007): Τελική Μελέτη Γεωθερμικού Πεδίου Συκιών-Άρτας, σελ. 9-14.

Καλλέργης Γ.Α. (1986): Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, Τόμος Α', Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα.

Κυρκιμτζή Ισμήνη-Χαρά (2013): Καθορισμός γεωλογικών παραμέτρων εμφάνισης γεωθερμικών ρευστών, εντός σχηματισμών της Λεκάνης Μεσσαράς. Διατριβή ειδίκευσης, μεταπτυχιακό πρόγραμμα Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, σελ.172.

Κριτσωτάκης Ν. Μ. (2009): Διαχείριση Υδάτινων Πόρων Μεσσαράς Κρήτης, Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διατμητικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Έλεγχος Ποιότητας & Διαχείριση Περιβάλλοντος».

Μανούτσογλου Ε. (2008): Αδημοσίευτες Σημειώσεις Σεμιναρίου Γεωλογίας της Κρήτης, της Ερευνητικής Μονάδας Γεωλογίας του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, σελ 55.

Μήτρακας Μ. (2001): Ποιοτικά χαρακτηριστικά και επεξεργασία νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Νικολάου Σ. (1994): Αποτελέσματα Αναγνωριστικής Γεωηλεκτρικής Έρευνας στην περιοχή νότια του Ψηλορίτη, Τεχνική Έκθεση, Ινστιτούτο Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών, Διεύθυνση Γεωφυσικών ερευνών.

Παπαδάκης Γ. Μ. (2004): Βέλτιστη Αξιοποίηση Πηγών Χαμηλής Ενθαλπίας, Εφαρμογή στα Αγιάσματα Νήσου Χίου, σελ. 72-107.

Παρασκάκη Ν. Α. (2014): Υδρογεωλογικό καθεστώς πεδιάδας Φαιστού-Τυμπακίου με έμφαση στην ποιότητα των υπόγειων νερών, σελ. 34-57.

Σκληβανιώτης Μ. (2004): Παράμετροι γενικών χαρακτηριστικών και ανόργανων στοιχείων-ενώσεων, Δ.Ε.Υ.Α.Π..

Σμπώκος Μ. (2015): Μελέτη γεωλογικών παραμέτρων και διερεύνηση της θερμοκρασίας του υπόγειου υδροφορέα στην νοτιοδυτική Μεσσαρά, Κρήτη, Διπλωματική εργασία Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείου Κρήτης.

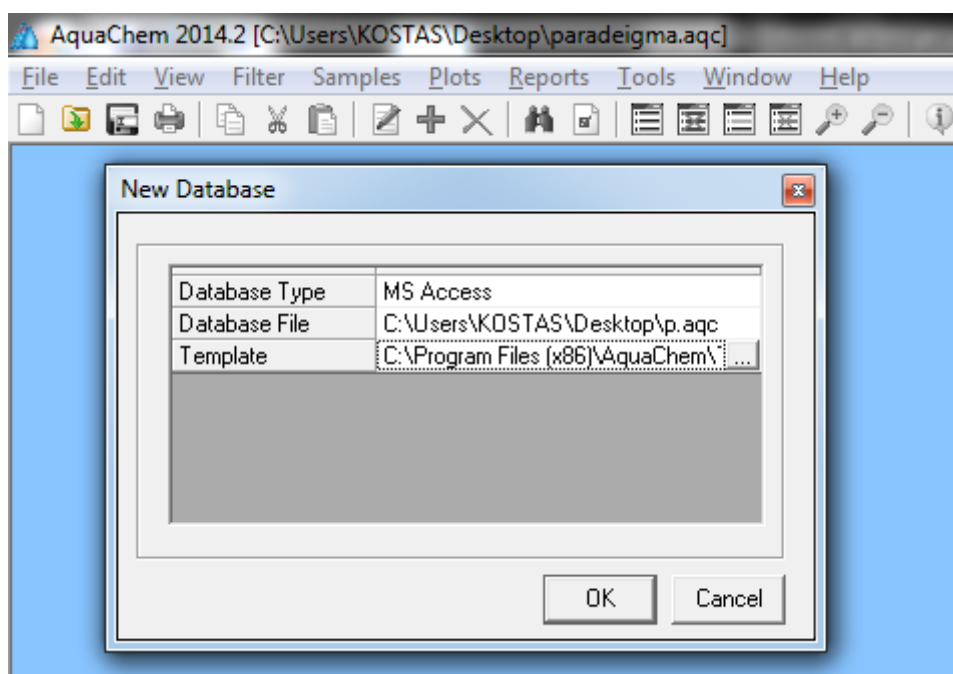
Σούλιος Χ. Γ. (1996): Γενική Υδρογεωλογία, Εκδόσεις University Studio Press.

Φυτίκας Μ. και Ανδρίτσος Ν. (2004): Γεωθερμία–Γεωθερμικοί πόροι, Γεωθερμικά Νερά, Εφαρμογές, Περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Παράρτημα

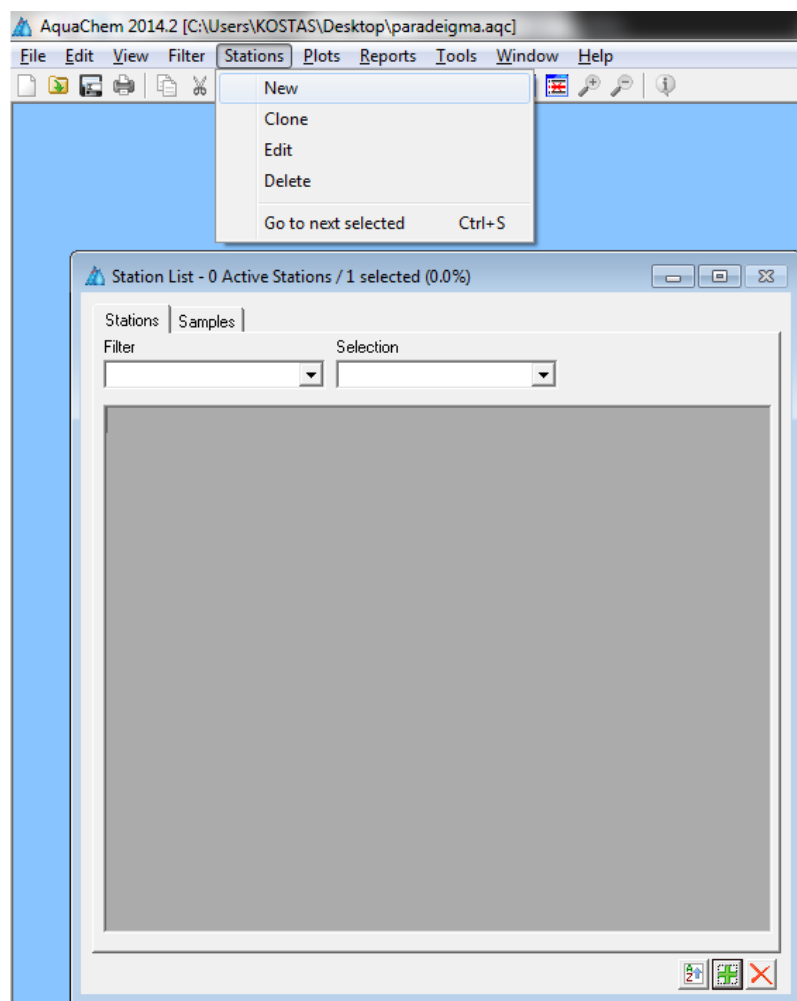
Εισαγωγή και επεξεργασία δεδομένων με το λογισμικό AquaChem 2014, Trial Version

Πριν ακόμα γίνει η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα πρέπει να δημιουργηθεί ένα αρχείο .aqc, το οποίο είναι η βάση δεδομένων που θα αποθηκεύονται τα δεδομένα και οι τυχόν αλλαγές τους. Εφόσον έχουμε ανοίξει το λογισμικό επιλέγουμε file→new, ως πρότυπο επιλέγουμε το πρότυπο αρχείο από τα ήδη υπάρχοντα αρχεία που προέκυψαν από την εγκατάσταση του λογισμικού και αποθηκεύουμε το αρχείο με επιλέγοντας όνομα και τοποθεσία.



Εικόνα 1: Αποθήκευση αρχείου.

Στη συνέχεια, προσθέτουμε τα δείγματα δηλαδή τις γεωτρήσεις, δημιουργώντας ένα σταθμό. Η δημιουργία ενός σταθμού μπορεί να γίνει μέσω των εντολών Stations→new είτε με την συντόμευση της εντολής "+" στη γραμμή εργαλείων και στην κάτω δεξιά γωνία του παραθύρου.



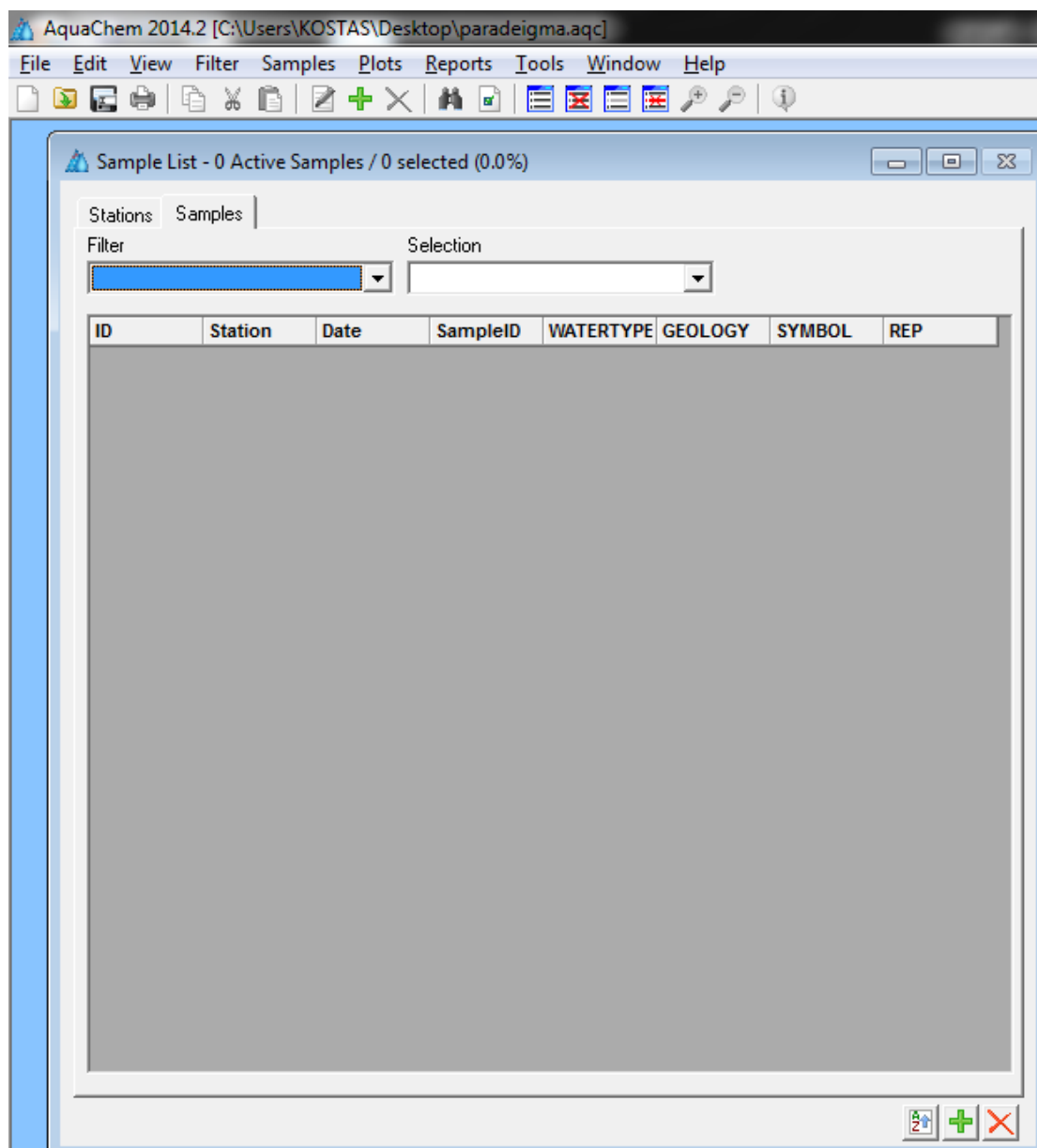
Εικόνα 2: Εισαγωγή σταθμού.

Έπειτα, καταχωρούνται τα στοιχεία της γεώτρησης, όνομα, συντεταγμένες και βάθος.

Parameter	Unit	Value
Station ID		
Location		
Geology		
Latitude	°	
Longitude	°	
X coordinate	m	
Y coordinate	m	
Elevation	m(asl)	
Well Depth	m	
Screen depth top	m	
Screen depth midpoint	m	
Screen depth bottom	m	
Gradient		
Comment		

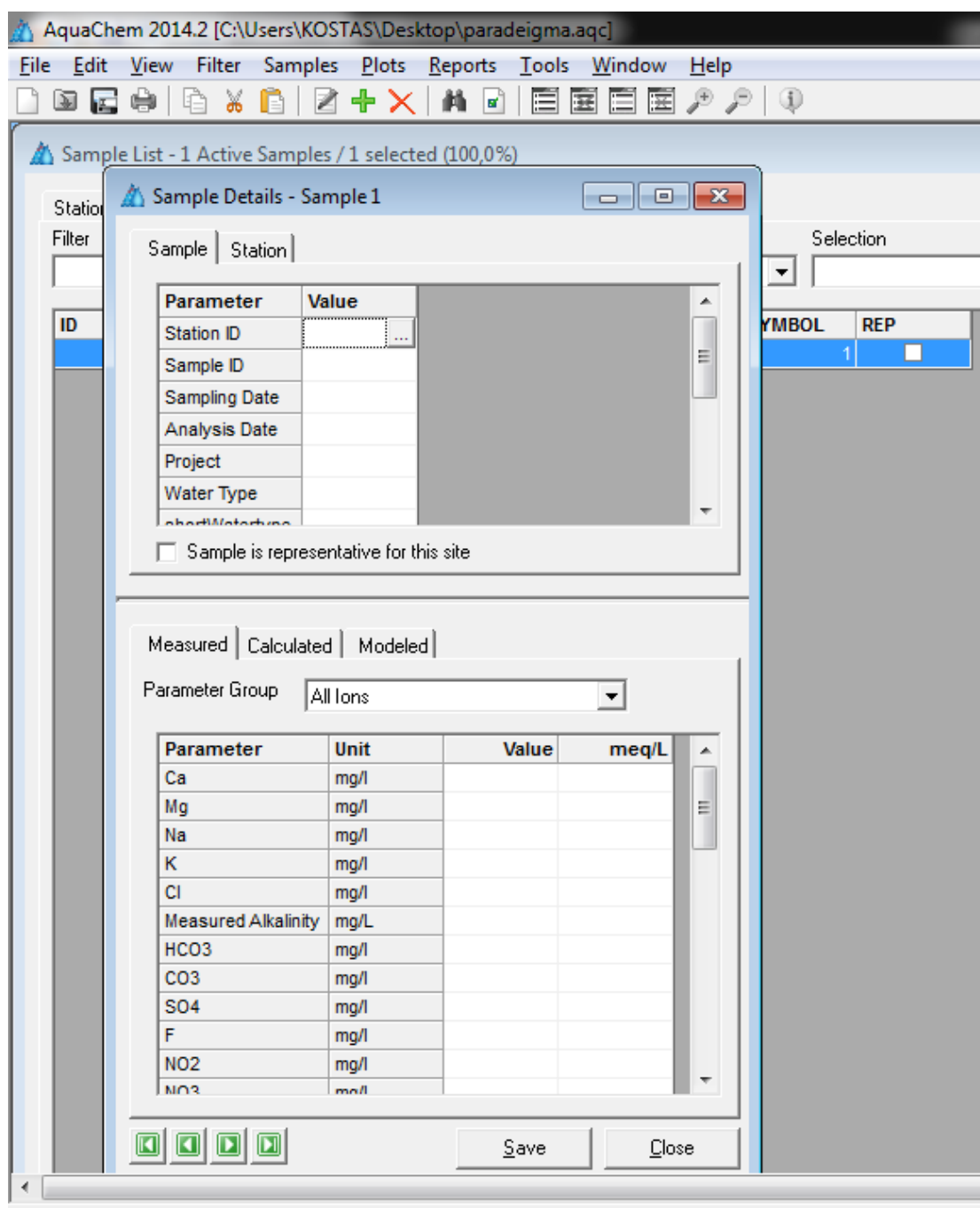
Εικόνα 3: Εισαγωγή στοιχείων γεώτρησης.

Αφού αποθηκεύσουμε τα στοιχεία της γεώτρησης, προσθέτουμε τις λεπτομέρειες του δείγματος. Το συγκεκριμένο βήμα γίνεται επιλέγοντας στο αναδυόμενο παράθυρο τη καρτέλα Samples.



Εικόνα 4: Επιλογή καρτέλας Samples.

Για να προσθέσουμε τα δεδομένα της γεώτρησης μπορούμε μέσω των εντολών Samples→new είτε με την συντόμευση της εντολής "+" στη γραμμή εργαλείων και στην κάτω δεξιά γωνία του παραθύρου.



Εικόνα 5: Εισαγωγή δεδομένων γεώτρησης.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλες τις γεωτρήσεις. Από τη στιγμή που έχουν εισαχθεί όλα τα δεδομένα των γεωτρήσεων το λογισμικό προσδιορίζει αυτόματα το χημικό τύπου του ρευστού. Αν για οποιοδήποτε λόγο επιθυμούμε να εισαχθούν επιπλέον στοιχεία ή για τυχόν διορθώσεις η εντολή αυτή γίνεται είτε πατώντας δεξί και επιλέγοντας την εντολή "edit" είτε με διπλό κλικ στη συγκεκριμένη γεώτρηση.

AquaChem 2014.2 [C:\Users\KOSTAS\Desktop\tuc\Διπλωματική\messara.aqc]

File Edit View Filter Samples Plots Reports Tools Window Help

Sample List - 14 Active Samples / 0 selected (0,0%)

Stations Samples

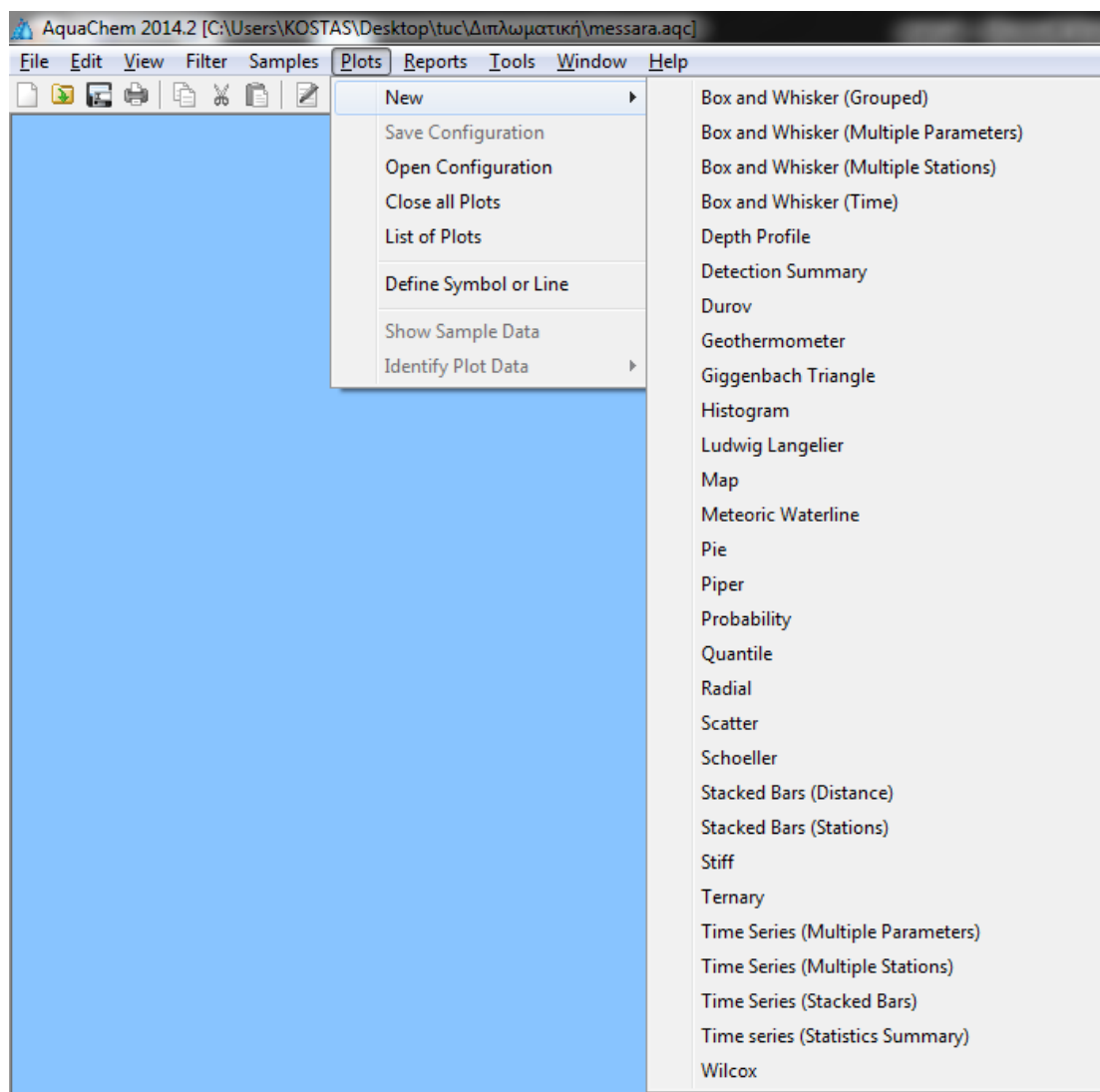
Filter Selection

Show only selected

ID	Station	Date	SampleID	WATERTYPE	GEOLOGY	SYMBOL	REP
6	Mel1-2015	27/7/2015	Mel1-2015	Ca-Mg-HCO3-SO4-Cl		7	<input type="checkbox"/>
20	Mel1-2016	29/2/2016	Mel1-2016	Ca-Mg-HCO3-SO4		21	<input type="checkbox"/>
7	Mel2-2015	27/7/2015	Mel2-2005	Ca-Mg-HCO3-SO4-Cl		8	<input type="checkbox"/>
21	Mel2-2016	29/2/2016	Mel2-2016	Ca-Mg-HCO3-SO4		22	<input type="checkbox"/>
1	Peri1-2015	7/6/2015	Peri1-2015	Ca-Mg-HCO3-Cl-SO4		2	<input type="checkbox"/>
15	Peri1-2016	25/2/2016	Peri1-2016	Ca-Mg-HCO3-Cl-SO4		16	<input type="checkbox"/>
2	Peri2-2015	7/6/2015	Peri2-2015	Ca-Mg-SO4-HCO3-Cl		3	<input type="checkbox"/>
16	Peri2-2016	25/2/2016	Peri2-2016	Ca-Mg-SO4-Cl-HCO3		17	<input type="checkbox"/>
3	Peri3-2015	7/6/2015	Peri3-2015	Ca-Mg-HCO3-Cl-SO4		4	<input type="checkbox"/>
17	Peri3-2016	25/2/2016	Peri3-2016	Ca-Mg-HCO3-Cl-SO4		18	<input type="checkbox"/>
4	Plat1-2015	7/6/2015	Plat1-2015	Ca-Mg-SO4-HCO3-Cl		5	<input type="checkbox"/>
18	Plat1-2016	25/2/2016	Plat1-2016	Ca-Mg-Cl-SO4-HCO3		19	<input type="checkbox"/>
5	Plat2-2015	7/6/2015	Plat2-2015	Mg-Ca-HCO3-Cl-SO4		6	<input type="checkbox"/>
19	Plat2-2016	25/2/2016	Plat2-2016	Mg-Ca-HCO3-Cl-SO4		20	<input type="checkbox"/>

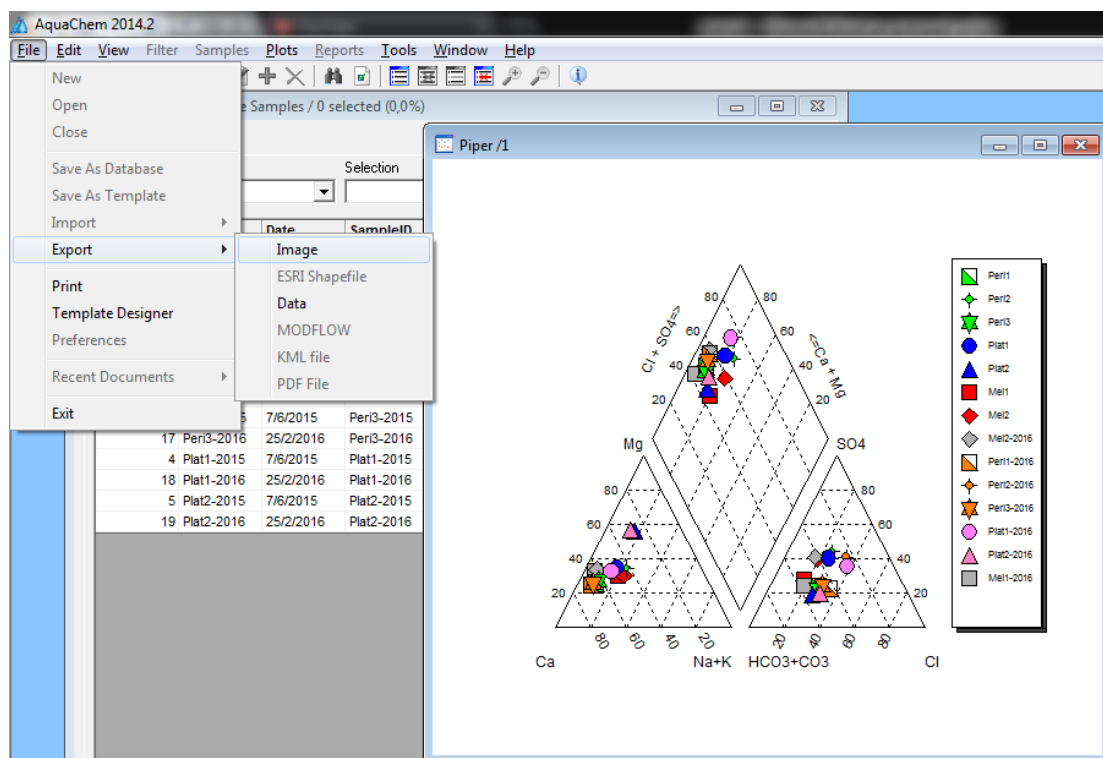
Εικόνα 6: Γεωτρήσεις.

Μέσω των εντολών Plots→new μπορούμε να φτιάξουμε ένα από τα διαγράμματα που φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 7 : Διαγράμματα.

Τέλος, αφού επιλέξουμε το επιθυμητό διάγραμμα (π.χ. Piper), το αποθηκεύουμε ως εικόνα μέσω των εντολών file→export→image στην τοποθεσία που θέλουμε.



Εικόνα 7 : Αποθήκευση διαγράμματος.