



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
(ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ, ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ,
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συγκριτική μελέτη θερμομεταλλικών πηγών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Παραδείγματα από Κρήτη και τον υπόλοιπο Ελλαδικό χώρο»

Μπαμπανιώτης Γεώργιος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μανούτσογλου Ε., Καθηγητής (επιβλέπων)

Καλλίθρακας-Κοντός Ν., Καθηγητής

Σπανουδάκης Ν., Δρ. ΕΔΙΠ

Χανιά, Ιούνιος 2019

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

Φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν το χρονικό διάστημα ως την εκπλήρωση της.

Άρχικα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μανούτσογλου Εμμανουήλ, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ πάνω σε ένα ενδιαφέρον θέμα, την βιβλιογραφία που μου παρείχε και τις ουσιώδεις συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σπανουδάκη Νικόλαο, για την πολύτιμη καθοδήγηση του, τις ώρες που αφιέρωσε παρεχοντάς μου συμβουλές, την ευγένεια και την προθυμία να βοηθήσει σε όποια τυχόν δυσκολία ή απορία προέκυπτε.

Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ σε κάποια πρόσωπα για ξεχωριστούς λόγους. Την Όλγα Μπαμπανιώτη που βοήθησε σημαντικά με τις μεταφράσεις, τον Δημήτρη Παπαδόπουλο, τον Φώτη Σπυρόπουλο, τον Νίκο Τζιτζικόπουλο και τον Φώτη Μπαμπανιώτη.

Τέλος η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένεια μου, για την αμέριστη υποστηρίξη τους όλα τα χρόνια της φοιτησής μου στα Χανιά, αλλά πιο σημαντικά για τις αξίες που μου μετέδωσαν.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μετά από μια πρώτη γεωλογική προσέγγιση, η συγκριτική μελέτη κατανομής κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων δειγμάτων υδάτων από δύο θεσμικά αναγνωρισμένων ιαματικών πεδίων και μιας ιστορικά/παραδοσιακά ιαματικής περιοχής του ελληνικού χώρου. Τα δείγματα για την συγκριτική μελέτη και τις συσχετίσεις που συνδέονται με αυτή πάρθηκαν από δημοσιευμένες εργασίες σχετικά με τα πεδία της Αιδηψού στην βόρεια Εύβοια, των Καμένων Βούρλων του νομού Φθιώτιδας στην Στερεά Ελλάδα και του Αγίου του Αντωνίου του νομού Χανίων στην νοτιοδυτική Κρήτη. Οι τρεις αυτές περιοχές υδροληψίας δομούνται από εντελώς διαφορετικής λιθολογίας, προέλευσης και ηλικίας πετρώματα που παρόλη την διείσδυση του θαλασσινού νερού στις παράκτιες υδροφορίες από όπου πάρθηκε το σύνολο των δειγμάτων οι ομοιότητες και οι διαφορές στο γεωλογικό υπόβαθρο αντικατοπτρίζεται στην υδροχημεία των υδάτων.

Η κύρια γεωλογική ομοιότητα που μπορεί κανείς να καταγράψει είναι ότι όλα τα δείγματα φιλοξενούνται σε υδροφορίες που βρίσκονται εντός ανθρακικών πετρωμάτων διαφορετικού βαθμού μεταμόρφωσης. Η ύπαρξη υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας υδάτων που υπάρχουν στις περιοχές της Αιδηψού και Καμένων Βούρλων αυτονόητα παραπέμπει σε υδροφορίες που επηρεάζονται από διαφορετικές γεωλογικές διεργασίες: τα υψηλής ενθαλπίας ύδατα επηρεάζονται από την τοπική ηφαιστειότητα, που δεν επηρεάζει τους υδροφορείς χαμηλής ενθαλπίας στις εν λόγω περιοχές και λείπει παντελώς από την υδροφορία της Κρήτης. Η ύπαρξη γύψων από την άλλη στην ευρύτερη περιοχή που φιλοξενεί την υδροφορία στην Κρήτη επηρεάζει καθοριστικά την υδροχημεία των υδάτων και τα διακρίνει από αυτά των άλλων περιοχών που δεν εμφανίζουν γύψους.

Ποιο συγκεκριμένα: Τα ύδατα της περιοχής του Αγίου Αντωνίου είναι χαμηλής θερμοκρασίας (14.2°C – 15.2°C), χαρακτηρίζονται ως χλωρονατριούχα λόγω ανάμιξης με το θαλασσινό νερό (φαινόμενο Venturi) και περιέχουν υψηλή συγκέντρωση ραδονίου.

Τα ύδατα της περιοχής της Αιδηψού διακρίνονται σε δύο ομάδες. Τα νερά υψηλής θερμοκρασίας (43.9°C – 82.2°C) χαρακτηρίζονται ως χλωρονατριούχα, επηρεάζονται από την ύπαρξη του μαγματικού θαλάμου που εντοπίστηκε σε βάθος 18 km και περιέχουν επίσης ραδόνιο. Η ομάδα χαμηλής θερμοκρασίας στην ίδια περιοχή (θερμοκρασίες από 12.2°C – 23.2°C) παρουσιάζει πολύ χαμηλότερες τιμές ολικά διαλυμένων στερεών. Τα ύδατα χαρακτηρίζονται ως ασβεστούχα – διττανθρακικά.

Τα ύδατα της περιοχής των Καμένων Βούρλων που μελετήθηκαν είναι χαμηλής ενθαλπίας (θερμοκρασίες από 29.6°C – 40.4°C), χαρακτηρίζονται χλωρονατριούχα είναι εντόνως μεταλλικά και περιέχουν υψηλές επίσης συγκεντρώσεις ραδονίου.

Με βάση την κατανομή των κύριων ιόντων είναι εμφανείς οι διαφορές όχι μόνο στο χαρακτηρισμό των υδάτων μεταξύ περιοχών υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας, αλλά και μεταξύ περιοχών χαμηλής ενθαλπίας. Όπως φαίνεται από τα διάφορα συγκριτικά διαγράμματα συγκεντρώσεων, οι παράγοντες που επηρεάζουν τον χημισμό των υδάτων καθορίζονται από το σύνολο των γεωλογικών παραμέτρων της κάθε περιοχής.

Abstract

Within this Thesis, a comparative study of the distribution of main elements and trace elements of water samples from two institutionally recognized hydrothermal fields and a historical / traditional therapeutic region of the Greek area was carried out after a first geological approach. The samples for the comparative study and its associations were taken from published papers concerning the areas of Edipsos in northern Evia, Kamena Vourla in the prefecture of Fthiotis in Central Greece and Agios Antonios of the prefecture of Chania in southwestern Crete. These three water abstraction areas are structured with completely different rocks concerning the lithology, origin and age. These rocks despite the penetration of seawater into the costal aquifers, from where the samples were taken, have similarities and differences in the geological background, which are reflected in the hydrochemistry of the water.

The main geological similarity that could be recorded is that all samples are found in aquifers located in carbonate rocks of different degrees of metamorphism. The existence of high and low enthalpy waters in the regions of Edipsos and Kamena Vourla automatically refers to aquifers that are affected from geological processes. High enthalpy waters are affected by the local volcanism, which does not affect low enthalpy aquifers in these areas and is completely absent from the waters of Crete. On the other hand, the existence of gypsum in the wider area that hosts the aquifer in Crete has a decisive impact on the hydrochemistry of water and distinguishes it from other non-gypsum areas.

More specifically: The waters of Agios Antonios area are of low temperature (14.2°C – 15.2°C). They are characterized as chlorinated due to their mixing with seawater (Venturi phenomenon) and contain a high concentration of radon.

The waters of Edipsos are divided into two groups. The waters of high temperature (43.9°C - 82.2°C) are characterized as chlorinated. They are affected by the existence of the magma chamber located at a depth of 18 km and they also contain radon. The low temperature group in

the same area (temperatures from 12.2°C to 23.2°C) displays much lower total dissolved solids. The waters are characterized as calcareous - bicarbonate.

The waters of the Kamena Vourla, that were studied are of low enthalpy (temperatures from 29.6°C to 40.4°C). They are characterized as chlorinated, they are highly metallic and also contain high concentrations of radon.

Based on the distribution of the main ions, the differences are evident not only in the characterization of the waters between high and low enthalpy areas but also between low enthalpy areas. As it appears from the various comparative concentration diagrams, the factors affecting water chemistry are determined by the set of geological parameters of each area.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	9
1.1 Επίδραση στην υγεία	12
1.2 Ραδόνιο.....	14
1.3 Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.....	16
1.4 Υπό μελέτη περιοχές.....	17
Κεφάλαιο 2 Γεωλογικό υπόβαθρο υπό μελέτη περιοχών	20
2.1 Γεωλογία Βόρειας Εύβοιας	20
2.2 Γεωλογία Κρήτης	23
2.3 Πετρώματα υδροφορέων	28
Κεφάλαιο 3 Γεωθερμία υπό μελέτη περιοχών	30
3.1 Γεωθερμικό πεδίο	31
3.2 Πηγή Θερμότητας.....	32
3.3 Γένεση γεωθερμικών πεδίων	33
3.3.1 Τεκτονική δραστηριότητα στην “κεντρική Ελλάδα”	33
3.3.2 Ηφαιστειότητα στην Ελλάδα	36
Κεφάλαιο 4 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων	38
4.1 Χαρακτηριστικά της ταξινόμησης.....	38
4.2 Κατάσταση ισορροπίας ταμιευτήρα	40
4.3 Είδος του ρευστού	41
4.4 Θερμοκρασία του ταμιευτήρα.....	45
4.4.1 Συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας	45
4.4.2 Συστήματα υψηλής θερμοκρασίας	49
4.5 Γεωθερμικά συστήματα στην Ελλάδα	51
4.6 Η εξέλιξη των γεωθερμικών συστημάτων	53
4.7 Πηγή Θερμότητας.....	57
4.8 Τύποι υδάτων	60
4.8.1 Πλούσια σε χλωριόντα	60
4.8.2 Πλούσια σε θειικά.....	61
4.8.3 Πλούσια σε διττανθρακικά.....	62
Κεφάλαιο 5 Παράθεση δεδομένων	64
5.1 Ομάδες δεδομένων Αιδηψού.....	64

5.2 Ομάδα δεδομένων Αγίου Αντωνίου	75
Κεφάλαιο 6 Σύγκριση & Ανάλυση Δεδομένων	80
6.1 Σύγκριση με το θαλασσινό νερό	80
6.2 Σύγκριση με γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας	83
6.3 Διαγράμματα συγκεντρώσεων	87
6.4 Υδροχημικά διαγράμματα	90
6.5 Περιεκτικότητα σε ραδόνιο	92
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	93

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

ψυχῇσιν θάνατος ὕδωρ γενέσθαι, ὕδατι δὲ θάνατος γῆν γενέσθαι, ἐκ γῆς δὲ ὕδωρ γίνεται, ἐξ ὕδατος δὲ ψυχὴ. Ἡράκλειτος, 544-484 π.Χ.

Ο άνθρωπος παρατηρώντας τη φύση και κάνοντας χρήση των πόρων της, κατάλαβε από νωρίς την ιδιαίτερη σημασία που έχει το νερό. Εκτός από την πόση του, αναζήτησε σε αυτό ένα μέσο προκειμένου να πλύνει, να απαλύνει και να εξαγνίσει τους πόνους και τις πληγές του. Πολλοί άνθρωποι σε όλο τον κόσμο θεωρούσαν ότι η χρήση νερού από συγκεκριμένες πηγές ή ποταμούς οδηγούσε σε φυσικό και πνευματικό καθαρισμό. Σε θρησκευτικές τελετές που τελούνται μέχρι και σήμερα ανά τον κόσμο (όπως το βάπτισμα), μπορεί κανείς να διακρίνει την αναπαράσταση της αρχαίας πίστης στις θεραπευτικές ιδιότητες του νερού. Με το νερό λοιπόν συνέδεσε ο άνθρωπος την ιδέα της ζωής, ενώ με την ξηρασία το θάνατο και την πνευματική αδράνεια.

Οι θερμές ή οι κρύες πηγές χρησιμοποιούνταν για θεραπευτικούς σκοπούς από τους προϊστορικούς χρόνους. Το υδροχαρές πνεύμα των Αχαιών κληρονομήθηκε όμως και στις επόμενες γενεές. Στην αρχαία Ελλάδα υπήρχαν λουτρά που χρησιμοποιούνταν για καθαριότητα και τόνωση και λουτρά για θεραπευτικούς σκοπούς. Ο σπαρτιατικός, πειθαρχημένος τρόπος ζωής, επέβαλε στους Λακεδαιμόνες να λούζονται στα ψυχρά νερά του ποταμού Ευρώτα για σκληραγώγηση. Αντίθετα οι Αθηναίοι, ανάλογα με τις περιστάσεις, έκαναν χρήση θερμών και ψυχρών λουτρών, τα οποία και θεωρούσαν παράγοντα υγείας και πολιτισμού. Οι Μακεδόνες προτιμούσαν τα ψυχρά λουτρά, καθώς πίστευαν πως τα θερμά προκαλούσαν μαλθακότητα (από Παπαδοπούλου σελίδα 11, 2012).

Πολύ βασικό ρόλο στην επικράτηση και την εξέλιξη των θερμών και των ψυχρών λουτρών έπαιξε η ενασχόληση σπουδαίων αρχαίων Ελλήνων ιστορικών, ιατρών, γεωγράφων και φιλοσόφων με το φαινόμενο των ιαματικών πηγών. Κάποιοι από αυτούς είναι ο Ηρόδοτος (485 - 421/415 π.Χ.), ο Ιπποκράτης (460 - 380 π.Χ.), ο Αριστοτέλης (384 - 322 π.Χ.), ο Πλάτωνας (427 - 347 π.Χ.), ο Ηρόφιλος (331 - 280 π.Χ.) και ο Στράβωνας (64 - 23 π.Χ.).

Οι αρχαιότερες λουτρικές εγκαταστάσεις που γνωρίζουμε, λειτούργησαν στη Σύβαρη, αρχαία πόλη της Μεγάλης Ελλάδας στη Νότια Ιταλία, τέλος του 6^{ου} π.Χ. αιώνα. Στα μέσα του 5^{ου} π.Χ. αιώνα ο Ιπποκράτης (460 - 380 π.Χ.), που θεωρείται ο θεμελιωτής της ιατρικής επιστήμης και πατέρας της υδροθεραπείας θεμελιώνει την υδροθεραπεία σαν μέθοδο ίασης πολλών ασθενειών. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις αλλά και η διαδικασία του λουτρού στα αρχαία ονομάζεται «βαλανείον» (Ο όρος προέρχεται από τη λέξη «βαλανεύω» με την οποία περιγράφεται η τέχνη του μπάνιου). Βαλανεία βρίσκουμε στην Αθήνα από τον 5^ο π.Χ. αιώνα, αλλά η διάδοση τους συνεχίζει να είναι μεγάλη και κατά τους ελληνοιστικούς χρόνους. Τα βαλανεία ήταν δημόσια ή ιδιωτικά και βρίσκονταν συνήθως κοντά σε γυμνάσια (από Παπαδοπούλου σελίδες 11-12, 2012).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη δειγμάτων που είναι αποτελέσματα υδροχημικών αναλύσεων υπόγειων υδάτων και ακολούθως ο χαρακτηρισμός τους σύμφωνα με τον τύπο του ύδατος. Τα δεδομένα αυτά αναφέρονται στις περιοχές της Αιδηψού, των Καμένων Βούρλων και του Αγίου Αντωνίου και λήφθηκαν από τα εξής paper: (Κανελλόπουλος, 2011; 2016; 2017; από Κουφάκη, 2018) Επιπλέον δίνεται μια έμφαση, στην διάκριση των γεωθερμικών συστημάτων ανάλογα με την θερμοκρασία του ταμιευτήρα (χαμηλής – υψηλής θερμοκρασίας) κατά την διάρκεια της σύγκρισης και της ερμηνείας των υδάτων. Εκτός αυτού λήφθηκαν συμπληρωματικά δεδομένα που αφορούν το ραδόνιο στις περιοχές μελέτης, ώστε να συγκριθεί ο βαθμός ραδιενέργειας τους με τα όρια που προτείνει η επιτροπή των ευρωπαϊκών κοινοτήτων. Λόγω ότι οι περιοχές αυτές είναι παραθαλάσσιες, κρίνεται σκόπιμο να συγκριθούν τα δεδομένα με τη χημική σύσταση του θαλασσινού νερού, για να προσδιοριστεί κατά πόσο έχουν επηρεαστεί από αυτό.

Πριν το στάδιο της σύγκρισης είχε προηγηθεί η μελέτη της γεωλογίας και της γεωθερμίας των περιοχών από τις οποίες προέρχονται τα δείγματα. Από γεωλογικής άποψης, στην περιοχή της Αιδηψού κρίνονται σημαντικά τα ανθρακικά πετρώματα (κυρίως ασβεστόλιθοι) ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού που αποτελούν τον ταμιευτήρα του γεωθερμικού συστήματος, επηρεάζοντας κατ' επέκταση τη σύσταση του υπόγειου νερού και τα ιζηματογενή πετρώματα του μέσου και άνω Κρητιδικού (μάργκες, κροκαλοπαγή και φλύσχης) που αποτελούν το αδιαπέρατο κάλυμμα. Στην περιοχή του Αγίου Αντωνίου κρίνονται σημαντικά τα ανθρακικά πετρώματα (δολομίτες, ασβεστόλιθοι) του «καλύμματος του Τρυπαλίου», καθώς και η φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά ηλικίας Πέρμιου – Τριαδικού, εντός των οποίων ρέουν τα ύδατα.

Από γεωθερμικής άποψης, η υδροθερμική δραστηριότητα στο βόρειο Ευβοϊκό κόλπο εμφανίζεται καθώς ο λεπτός φλοιός έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη μαγματικού θαλάμου σε βάθος μόλις 18 χιλιομέτρων. Στον Άγιο Αντώνιο, η υδροθερμική δραστηριότητα εμφανίζεται λόγω του έντονου τεκτονισμού της περιοχής και την ύπαρξη 13 μεγάλων ρηγμάτων που διευκολύνουν την ροή των υδάτων και οδηγούν στο να χαρακτηρίζονται οι υδροφορείς ως έντονα ρωγματοωμένοι.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα δεδομένα και ακολούθως συγκρίθηκαν και αναλύθηκαν κατάλληλα ώστε να εκπληρωθούν οι στόχοι της μελέτης. Τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν, έχουν συνοπτικά ως εξής. Τα ύδατα της ομάδας δεδομένων υψηλής θερμοκρασίας Αιδηψού χαρακτηρίζονται ως θαλασσινό νερό. Τα ύδατα της ομάδας δεδομένων χαμηλής θερμοκρασίας Αιδηψού χαρακτηρίζονται ως πλούσια σε ανθρακικά. Τα ύδατα της ομάδας δεδομένων χαμηλής θερμοκρασίας Αγίου Αντωνίου χαρακτηρίζονται ως πλούσια σε χλωρίοντα, όπως επίσης και αυτά της ομάδας δεδομένων υψηλής θερμοκρασίας Καμένων Βούρλων.

Μεταλλικότητα των υδάτων των πηγών

Ως μεταλλική πηγή χαρακτηρίζεται η πηγή που περιέχει σύνολο διαλυμένων στερεών πάνω από 1000 mg/kg (από Κουφάκη σελίδα 82, 2018).

Η ταξινόμηση των μεταλλικών πηγών γίνεται με βάση τα επικρατούντα ανιόντα ή κατιόντα. Έτσι οι πηγές αυτές παίρνουν το όνομά τους από εκείνα τα ιόντα που η συμμετοχή τους στο σύνολο των ανιόντων ή κατιόντων ξεπερνά το 20% (συγκέντρωση σε meq/l) (από Κουφάκη σελίδα 82, 2018).

Διαλυτότητα

Η διαλυτότητα των υλικών μπορεί να προσεγγιστεί με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς αφορά την ποσότητα ενός υλικού που μπορεί να διαλυθεί στο νερό. Μπορεί να αφορά από ποσότητα μηδέν έως τη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του νερού. Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να διαλυθεί, ονομάζεται διαλυτότητα. Ένα διάλυμα που περιέχει τη μέγιστη ποσότητα διαλυμένου υλικού λέγεται κορεσμένο. Αν περιέχει μικρότερη ποσότητα λέγεται ακόρεστο και αν έχει περισσότερη, υπέρκορο (Hounslow, 1995).

Ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη διαλυτότητα είναι η θερμοκρασία. Η διαλυτότητα των περισσότερων αλάτων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (πχ άλατα των αλκαλίων και μετάλλων), ενώ η διαλυτότητα των αερίων μειώνεται. Υπάρχουν ορυκτά που η διαλυτότητα τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (πχ γύψος, ανυδρίτης, ασβεσίτης) και αυτά που η διαλυτότητά τους αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι ένα σημείο και μετά μειώνεται (πχ SiO₂) (Hounslow, 1995).

Όταν κάποια υλικά διαλύονται στο νερό συμβαίνει το φαινόμενο της διάστασης, κατά το οποίο ένα στερεό διασπάται σε ιόντα. Κάθε υλικό συμπεριφέρεται διαφορετικά. Η ζάχαρη όταν διαλύεται στο νερό βρίσκεται υπό τη μορφή μορίων ζάχαρης. Το χλωριούχο νάτριο όμως σε αραιό διάλυμα διίσταται σε ιόντα νατρίου (Na⁺) και χλωρίου (Cl⁻). Σε πιο πυκνά διαλύματα μερικά ιόντα έλκονται και σχηματίζουν σύνθετες ενώσεις NaCl (Hounslow, 1995).

1.1 Επίδραση στην υγεία

Από την αρχαία Ελλάδα μέχρι σήμερα ο άνθρωπος φροντίζει την υγεία του με τη χρήση ιαματικών φυσικών πόρων. Οι θεραπευτικές ιδιότητες των υδάτων διαχωρίζονται σε μηχανικές, θερμικές και χημικές.

Οι μηχανικές ιδιότητες οφείλονται σε χαρακτηριστικά των υδάτων όπως είναι η άνωση και η υδροστατική πίεση. Η υδροστατική πίεση, η οποία είναι η επίδραση της πύεσεως του ύδατος πάνω στο σώμα του λουόμενου, προκαλεί ελάττωση της περιμέτρου του θώρακα και των κοιλιακών τοιχωμάτων με αποτέλεσμα την άνοδο του διαφράγματος και τη διευκόλυνση της κένωσης των φλεβών της κοιλίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση της ενδοθωρακικής πύεσεως, η οποία βοηθά στην αποβολή μέρους του εφεδρικού αέρα και την αύξηση της αναπνευστικής εφεδρείας. Η παραπάνω επίδραση βοηθά πολύ στο πνευμονικό εμφύσημα. Η άνωση αποτελεί το έτερο μηχανικό ερέθισμα. Αυτή σχετίζεται με την περιεκτικότητα του νερού σε μεταλλικές ουσίες και είναι ανάλογη με την ποσότητα των περιεχομένων μεταλλικών ουσιών. Η άνωση βοηθά τις κινήσεις των αρθρώσεων και των μυών με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η τέλεση διαφόρων ασκήσεων από άτομα με μειωμένη λειτουργικότητα (Λουκας σελίδα 44, 2005).

Οι θερμικές ιδιότητες οφείλονται στην ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ύδατος και του ανθρώπινου σώματος. Σε σχέση με το κυκλοφορικό η επίδραση των θερμικών ερεθισμάτων αφορούν κυρίως τα αγγεία αλλά και την καρδιά. Τα θερμά λουτρά προκαλούν αγγειοδιαστολή και υπεραιμία του δέρματος που έχουν σαν αποτέλεσμα τη διέγερση της καρδιακής λειτουργίας και την αύξηση του κυκλοφορούντος αίματος, ενώ τα ψυχρά λουτρά προκαλούν αγγειοσυσπασση στο δέρμα. Όσον αφορά στο πεπτικό, τα θερμικά ερεθίσματα επιδρούν στην εκκριτική και την κινητική του λειτουργία. Έτσι το ψυχρό λουτρό του σώματος αυξάνει την έκκριση του στομάχου και κυρίως του HCl, ενώ το θερμό παρουσιάζει αντίθετη δράση ελαττώνοντάς την. Σχετικά με το αναπνευστικό, τα ψυχρά ερεθίσματα προκαλούν αύξηση του μεγέθους της αναπνοής, ενώ τα θερμά το αντίθετο. Όσον αφορά στο νευρικό σύστημα, τα ψυχρά ερεθίσματα αυξάνουν τη διεγερσιμότητα του νευρικού συστήματος με αποτέλεσμα να αυξάνουν την εγρήγορση του ατόμου. Τα θερμά ερεθίσματα έχουν αντίθετο αποτέλεσμα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για αναλγητική δράση σε διάφορα επώδυνα σύνδρομα. Τα θερμικά ερεθίσματα επιδρούν και στο αίμα. Έτσι τα θερμά λουτρά προκαλούν αλκάλωση και αραιώση του αίματος ενώ τα ψυχρά οξέωση και πύκνωση του αίματος με φαινομενική αύξηση του αριθμού των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Τέλος, οι μύες επηρεάζονται καθώς τα θερμά λουτρά αυξάνουν τη λειτουργική ικανότητα μειώνοντας ταυτόχρονα την κόπωση και δίνοντας το αίσθημα της ευεξίας. Ελαττώνουν τον πόνο και χρησιμοποιούνται σε ασθενείς με αρθροπάθειες και κατάγματα (Λουκας σελίδες 45-46, 2005).

Οι χημικές ιδιότητες οφείλονται στην επαφή του δέρματος με τα μεταλλικά στοιχεία του νερού καθώς και στην διείσδυση τους σε αυτό. Το φαινόμενο αυτό καλείται διαδερματική απορρόφηση. Τα στοιχεία που φέρονται στην κυκλοφορία στη συνέχεια φθάνουν στα όργανα στόχους όπου ασκούν την εκλεκτική οργανοτρόπο δράση τους. Τα στοιχεία που μένουν στο δέρμα ερεθίζουν τις νευρικές απολήξεις αυτού. Από αυτές ξεκινάει νέο ερέθισμα που διαμέσου του νευρικού συστήματος αλλάζει η εσωτερική κατάσταση του οργανισμού (Λουκας σελίδα 48, 2005).

Τα είδη θεραπείας με χρήση θερμών υδάτων είναι τα εξής:

Ποσιθεραπεία (η πόση ιαματικού νερού)

- Ενδείκνυνται για παθήσεις των ουροφόρων οδών (υπεριουρικαιμία, λιθιάσεις των νεφρών, ουρητήρων και κύστεως), παθήσεις καλοήθους ηπατογενούς διαβήτη, παχυσαρκία, παθήσεις του ήπατος και των χοληφόρων οδών (χρόνια χολοκυστίτιδα, λιθίαση της χοληδόχου κύστεως, μικρή ηπατική ανεπάρκεια), παθήσεις του πεπτικού συστήματος, λιθιάσεις μετά την πάροδο ενός μηνός από τον τελευταίο κολικό (από Λεγκίτσα, 2014).
- Ενώ παρουσιάζει αντενδείξεις για λιθιάσεις των νεφρών ή της κύστης με συχνές κρίσεις ή αιματουρία ή με ογκώδεις λίθους, νεφρίτιδες, πυελίτιδες ή κυστίτιδες σε οξεία φάση, χολολιθιάσεις με συχνούς κολικούς ή μεγάλους λίθους, χολοκυστίτις στην οξεία φάση, πρόσφατο έλκος του στομάχου ή του δωδεκαδακτύλου, προηγηθείσες φλεγμονές ή συμφύσεις (από Λεγκίτσα, 2014).

Εισποθεραπεία (η εισπνοή των ιαματικών νερών σε μορφή σταγονιδίων)

- Ενδείκνυνται για παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος, βρογχικό άσθμα και χρόνιες βρογχίτιδες, χρόνιες φλεγμονές του αναπνευστικού συστήματος (Λουκας σελίδα 60, 2005).
- Ενώ παρουσιάζει αντενδείξεις για φυματίωση, αρτηριακή υπέρταση, σακχαρώδη διαβήτη, νεφρική, ηπατική και καρδιακή ανεπάρκεια, οξείες λοιμώξεις (Λουκας σελίδα 60, 2005).

Λουτροθεραπεία (η βύθιση ολοκλήρου του σώματος ή μέρους του σε κάποιο ρευστό, νερό ή λάσπη)

- Ενδείκνυνται για δερματικές παθήσεις (ψωριάσεις, εκζέματα, νεανικές ακμές, τοπικές δερματίτιδες), παθήσεις των αρθρώσεων (ρευματολογικές, φλεγμονώδεις αρθροπάθειες), μετατραυματική αποκατάσταση (διαστρέμματα, κατάγματα, αιματώματα), γυναικολογικές παθήσεις (φλεγμονώδεις παθήσεις των γεννητικών οργάνων, διαταραχές εμμήνου κύκλου) (Λουκας σελίδα 52, 2005).

1.2 Ραδόνιο

Ένα από τα κριτήρια σύγκρισης των δειγμάτων είναι η περιεκτικότητά τους σε ραδιενέργεια. Στις υπό μελέτη πηγές ερευνάται εάν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ραδονούχες. Συνεπώς κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι σε σχέση με το ραδόνιο, το οποίο παρότι ραδιενεργό ανήκει στα χημικά στοιχεία με θετική επίδραση στον άνθρωπο αν χρησιμοποιηθεί κατάλληλα και υπό συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Το ραδόνιο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο ευγενές αέριο με τρία φυσικά ισότοπα ^{219}Rn , ^{220}Rn και ^{222}Rn . Το ισότοπο 222 του ραδονίου είναι αυτό που προσδιορίζεται με την ονομασία ραδόνιο. Προέρχεται από το ράδιο που βρίσκεται στο φλοιό της γης και είναι προϊόν της διάσπασης του ουρανίου, το οποίο εμφανίζει συγκεντρώσεις σε ορισμένα πετρώματα και σχηματισμούς. Εμφανίζει μικρό φυσικό χρόνο ημιζωής (3.82 ημέρες) που ευνοεί την προσκόλληση των ισοτόπων του στα αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Στο S.I., μονάδα μέτρησης της ενεργότητας των ραδιενεργών πυρήνων είναι το Becquerel (Bq). Πήρε το όνομά του από τον Γάλλο επιστήμονα Henri Becquerel, ο οποίος μοιράστηκε με τον Πιερ και τη Μαρία Κιουρί το βραβείο Νόμπελ, για την εργασία τους στην ραδιενέργεια. Ένα Μπεκερέλ αντιστοιχεί σε μια διάσπαση πυρήνα ανά δευτερόλεπτο, κατά μέσο όρο, σε ένα ραδιενεργό άτομο ($1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$) (Cottingham & Greenwood, 1992).

Η επικινδυνότητα του ραδονίου δεν οφείλεται στο ίδιο το ευγενές αέριο, αλλά σε μια σειρά θυγατρικών ραδιενεργών στοιχείων στα οποία διασπάται (Πολώνιο, Βισμούθιο, Μόλυβδος). Αυτά δεν αποτελούν ευγενή αέρια αλλά βαρέα μέταλλα και ανά περιπτώσεις κατακρατούνται στο ανθρώπινο σώμα, σε αντίθεση με το ραδόνιο που ως αδρανές αέριο δε δημιουργεί καμία χημική ένωση στον οργανισμό και κατά την σύντομη παραμονή του στο σώμα (βιολογικός χρόνος ημιζωής 20 – 30 λεπτά) κάνει ελάχιστες διασπάσεις, από τις οποίες προέρχονται τα βραχύβια θυγατρικά του (Καλλιβρούσης, 2015).

Η διαλυτότητα του ^{222}Rn στο νερό είναι μικρή, ελαττώνεται επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να περιμένει κανείς μικρές ποσότητες ^{222}Rn στο νερό (Al-Azmi et. al., 2004). Είναι όμως σχετικά μεγάλη αν αυτή συγκριθεί με την διαλυτότητα άλλων αερίων (Στους 10°C είναι 61 φορές μεγαλύτερη από αυτή του οξυγόνου). Κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης και της αύξησης των σταγόνων της βροχής ένα εξαιρετικά μικρό ποσό ^{222}Rn από τον αέρα περικλείεται σε αυτήν, έτσι στο νερό της βροχής περιέχονται περίπου 50 Bq/m^3 . Στα επιφανειακά νερά περικλείεται ένα ποσό μικρότερο των 2.000 Bq/m^3 . Τα υπόγεια νερά τα οποία έρχονται σε επαφή με πετρώματα και εδάφη με κανονικά ποσοστά ουρανίου και ραδίου, περιέχουν ένα σημαντικό ποσό διαλυμένου ^{222}Rn που μπορεί να ποικίλει από 20 έως 44.000 Bq/m^3 (Βογιάννης σελίδα 20, 2005). Έτσι οι οριακές τιμές στην συγκέντρωση του ραδονίου έχουν οριστεί

στα 185 Bq/L για νερό οικιακής χρήσης και 37 Bq/m³ για την ατμόσφαιρα. (Abdullaev et. al. 1997; Brofferio et. al., 2003).

Η συγκέντρωση ²²²Rn στο υπόγειο νερό κυμαίνεται σε κανονικά επίπεδα από 10 – 200 Bq/L. Σε αντίθεση, υψηλές συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1000 Bq/L στο υπόγειο νερό συνήθως παρατηρούνται σε περιοχές με γρανιτικά πετρώματα πλούσια σε ουράνιο. Εξίσου υψηλές συγκεντρώσεις ²²²Rn παρατηρούνται εκεί όπου εμφανίζονται πηγματίτες, γνεύσιοι και ηφαιστειακά πετρώματα πλούσια σε χαλαζία και αστρίους. Αντίθετα παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις σε περιοχές με αντίστοιχα χαμηλές συγκεντρώσεις σε ουράνιο (διορίτες, γάββροι, βασικά πυριγενή, ασβεστόλιθος, πυριτικά και σχιστόλιθος με περιστασιακές εξαιρέσεις). Αυτό όμως δεν είναι απαραίτητο καθώς υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου μπορεί να εμφανιστούν σε πετρώματα χαμηλής περιεκτικότητας σε ουράνιο. Καθώς επίσης και υψηλές περιεκτικότητες των πετρωμάτων σε ουράνιο δεν συνεπάγεται αναγκαία με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στο υπόγειο νερό. Για παράδειγμα παρά την υψηλή συγκέντρωση σε ουράνιο της στυπτηρίας που εμφανίζεται σε αργιλικούς σχιστόλιθους, δεν παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στα υπόγεια νερά περιοχών με τέτοια πετρώματα (Βογιάννης σελίδα 40, 2005). Περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ρήγματα ή περιοχές με έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα ενισχύουν την παρουσία του ραδονίου, όπως επίσης και καρστικές κοιλότητες, όπου το ραδόνιο μπορεί να είναι εγκλωβισμένο.

1.3 Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης

Ένα ακόμη κριτήριο σύμφωνα με το οποίο θα χαρακτηριστούν τα δείγματα, είναι η εγγύτητα στην χημική σύσταση του θαλασσινού νερού. Οι θέσεις από τις οποίες λήφθηκαν τα δεδομένα, βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή της εκάστοτε περιοχής, οπότε κρίνεται αναγκαίο να ερευνηθεί το ποσοστό της αλλοίωσης της χημικής σύστασης του υδροφόρου ορίζοντα από την επίδραση του θαλασσινού νερού.

Το θαλασσινό νερό είναι από τους πιο συχνούς ρυπαντές των υπογείων υδάτων. Η εισροή του θαλασσινού νερού που μετατοπίζει ή αναμιγνύεται με το γλυκό νερό του υδροφόρου ορίζοντα ονομάζεται φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Το φαινόμενο αυτό συναντάται σε διάφορους υδροφόρους ορίζοντες. Ρηχούς λόγω επιφανειακών απορροών, βαθύς λόγω της ανόδου υδάτων πλούσιων σε ιόντα χλωρίου και νατρίου γεωλογικής προέλευσης και σε παράκτιους λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα υπόγεια ύδατα να γίνονται υφάλμυρα και να είναι πια ακατάλληλα για ύδρευση ή για άρδευση. Επιπλέον, η υφαλμύρωση αποτελεί αιτία για την υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών, όπου σε ακραίες περιπτώσεις η φυτική γη καθίσταται εντελώς άγονη (από Πλιάμπα σελίδα 8, 2014). Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στη χώρα μας, καθώς το μήκος των ακτογραμμών στο σύνολο ανέρχεται σε 16.000 χλμ..

Οι αιτίες του φαινομένου μπορεί να δηλώνονται φυσικές (ο υψηλός βαθμός καρστικοποίησης του γεωλογικού υποβάθρου, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης) ή να αποδίδονται στον ανθρώπινο παράγοντα (η υπεράντληση των υπογείων υδάτων που οδηγεί στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα) ή και συνδυασμός των παραπάνω.

Συνολικά το αλμυρό νερό μπορεί να καταλήξει στους υδροφόρους ορίζοντες λόγω διάφορων παραγόντων, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιες περιοχές.
- Θαλασσινό νερό το οποίο είχε εισέλθει μέσα στους υδροφόρους ορίζοντες σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους.
- Άλατα από διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς.
- Νερό το οποίο συγκεντρώνεται λόγω εξάτμισης σε λιμνοθάλασσες, παραλίες ή άλλες περιοχές υδραυλικά απομονωμένες.
- Ροές που επιστρέφουν σε ρεύματα μετά την άρδευση περιοχών.
- Ανθρώπινα απορρίμματα που εμπεριέχουν άλατα.

(από Βαλσαμίδου σελίδα 32, 2017)

1.4 Υπό μελέτη περιοχές

Αιδηψός

Η πόλη της Αιδηψού βρίσκεται στην βόρεια Εύβοια και είναι γνωστή για τις ιαματικές πηγές της ήδη από την αρχαιότητα. Το όνομα Αιδηψός, λέγεται ότι παράγεται από το «αιδοία- άπτω», γιατί πήγαιναν εκεί πάσχοντες από παθήσεις των γεννητικών οργάνων (προστατίτις, κολπίτις, μητρίτις κ.λ.π.). Όλοι σχεδόν οι Έλληνες συγγραφείς, οι οποίοι ασχολήθηκαν με τα ιαματικά λουτρά, όπως ο Αριστοτέλης, ο Πλούταρχος, ο Στράβων, ο Πausanias αναφέρουν για αυτήν. Σύμφωνα με τη μυθολογία, ο θεός Ήφαιστος διέλυσε με μια σφυριά τον βράχο της Αιδηψού και ευθύς ανάβλυσαν θερμά ύδατα δημιουργώντας στην περιοχή ιαματικές πηγές. Ο Ηρακλής χρησιμοποιούσε τις πηγές για ξεκούραση μετά από τους άθλους του. Η φήμη των ιαματικών πηγών ανέδειξε την περιοχή σε τουριστικό θέρετρο από την ρωμαϊκή εποχή, όπου κτίστηκαν τα πρώτα λουτρά, τα ερείπια των οποίων διασώζονται μέχρι σήμερα δίπλα στην εκκλησία των Αγίων Αναργύρων. Η ακμή τους δεν διήρκησε για πολύ καθώς την Βυζαντινή εποχή θεωρήθηκαν κέντρα παγανιστικής λατρείας με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθούν. Η δημοτικότητα τους επανήλθε τον 20^ο αιώνα, με καινούργια κτίρια και τουριστικές εγκαταστάσεις να εμφανίζονται σε ελάχιστο χρόνο και επιφανής προσωπικότητες να επισκέπτονται την πόλη όπως ο Ωνάσης και ο Τσόρτσιλ.



Σχήμα 1: Κομμάτι πήλινου δοχείου με αναπαράσταση λουτρών (Παπαδοπούλου, 2012)

Οι θερμές πηγές της Αιδηψού είναι πολυάριθμες και εκτείνονται στην περιοχή 600 μέτρα από ανατολικά προς δυτικά και 500 μέτρα από βόρεια προς νότια. Οι κύριες ιαματικές πηγές σύμφωνα με τον κ. Λέκκα (1938, σελίδες 105-106) είναι οι εξής:

- Πηγή Αγίων Αναργύρων, θερμοκρασίας 61°C, ραδιενέργειας 10.656 Bq m⁻³
- Πηγή Κεντρικού καταστήματος λουτρών, θερμοκρασίας 71.8 °C, ραδιενέργειας 8.611 Bq m⁻³

- Πηγή Λάσπης, θερμοκρασίας 71.4 °C, ραδιενέργειας 45.476 Bq m⁻³
- Πηγή Θερμοπόταμου, θερμοκρασίας 78.2 °C, ραδιενέργειας 1.345,5 Bq m⁻³
- Πηγή Νταμαρίου, θερμοκρασίας 70.5 °C, ραδιενέργειας 2.422 Bq m⁻³. Αφήνει να εκλύονται φουσαλίδες αερίου, του οποίου ένα λίτρο περιέχει 133.200 Bq m⁻³
- Πηγή Καζίνου
- Πηγή Ηλεκτρικού εργοστασίου, θερμοκρασίας 65.5 °C, ραδιενέργειας 53.818 Bq m⁻³
- Πηγή ξενοδοχείου, θερμοκρασίας 56.5 °C, ραδιενέργειας 34.982 Bq m⁻³
- Πηγή Παπαϊωάννου, λουτρών και λάσπης, θερμοκρασίας 48.7 °C, ραδιενέργειας 98.352 Bq m⁻³
- Πηγή Διαμαντή ή Πεπονή, θερμοκρασίας 67.6 °C
- Πηγή Ρίζου και Καπελάρη, θερμοκρασίας 62.75 °C
- Πηγή Λιάτσικα, θερμοκρασίας 50.2 °C, ραδιενέργειας 25.967 Bq m⁻³
- Πηγή Σκουρτανιώτη ή Γουρνά, θερμοκρασίας 62.6 °C
- Πηγή ξενοδοχείου Ηράκλειον, θερμοκρασίας 63.5 °C
- Πηγή παρά την θάλασσα, θερμοκρασίας 79.3 °C
- Πηγή επί του βράχου, θερμοκρασίας 76.45 °C
- Πηγή παρά καφενείο θαλάσσης, θερμοκρασίας 45 °C και δύο έτερες θερμοκρασίας 61 °C και 61.2 °C
- Φρέαρ Τομπάζη, ξενοδοχείου «Θερμαί Σύλλα» θερμοκρασίας 34.5 °C, ραδιενέργειας 780.361 Bq m⁻³
- Πηγή πόσιμος, ελαφρώς χλωριονατριούχος, ασθενώς διττανθρακική, θερμοκρασίας 37.2 °C, ραδιενέργειας 108.712 Bq m⁻³

Άγιος Αντώνιος

Ο Άγιος Αντώνιος βρίσκεται στην επαρχία Κανδάνου - Σελίνου στο νότιο τμήμα του νομού Χανίων, ανατολικά της Σούγιας. Είναι παραθαλάσσια περιοχή και βρέχεται στα νότια από το Λιβυκό πέλαγος. Ο επιβλητικός ορεινός όγκος των Λευκών Ορών διαχωρίζει τον νομό Χανίων σε βόρειο και νότιο τμήμα με έντονη μορφολογική αντίθεση. Στο νότιο τμήμα σχηματίζονται φαράγγια και χαράδρες ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής κίνησης του νερού, ενώ στο βόρειο τμήμα σχηματίζονται πεδινές εκτάσεις οι οποίες είναι ευκολότερα αξιοποιήσιμες γεωργικά και κατά συνέπεια φιλοξενούν τα αστικά κέντρα του νομού. Εκτός των μόνιμων κατοίκων, η περιοχή είναι πόλος άφιξης αρκετών επισκεπτών κάθε χρόνο λόγω της άνθησης του τουρισμού.

Καμένα Βούρλα

Τα Καμένα Βούρλα βρίσκονται στην δυτική ακτή του Βόρειου Ευβοϊκού κόλπου, απέναντι από τα Λιχαδονήσια. Η πόλη των Καμένων Βούρλων είναι κτισμένη στην τοποθεσία της αρχαίας πόλης Θρόνιο και οι ιαματικές πηγές της ήταν γνωστές εδώ και πολλά χρόνια. Το 1926 ο κ. Περγέσης διαπίστωσε ότι η συγκέντρωση του ραδονίου των υδάτων των πηγών είναι τέτοια που καθίσταται ευεργετική για τον άνθρωπο. Έτσι η περιοχή αναπτύχθηκε τουριστικά και για χρόνια θεωρούνταν κοσμοπολίτικο θέρετρο της χώρας μας και προορισμός για αρκετούς διάσημους της εποχής.

Οι κύριες ιαματικές πηγές σύμφωνα με τον κ. Λέκκα (1938, σελίδες 31-32) είναι οι εξής:

- Δυτική πηγή, θερμοκρασίας 32.4 °C, ραδιενέργειας περίπου 2.563.082 Bq m⁻³
- Ανατολική πηγή, θερμοκρασίας 34 °C, ραδιενέργειας περίπου 313.490 Bq m⁻³
- Πηγή παρά της ανωτέρω, θερμοκρασίας 28-29 °C, ραδιενέργειας περίπου 2.018.175 Bq m⁻³
- Πηγή παρά τη θάλασσα, θερμοκρασίας 31-33.2 °C, ραδιενέργειας περίπου 403.635 Bq m⁻³

Κεφάλαιο 2 Γεωλογικό υπόβαθρο υπό μελέτη περιοχών

Το πρώτο βήμα για την κατανόηση των όποιων ομοιοτήτων και διαφορών μεταξύ των πηγών των περιοχών είναι η μελέτη της γεωλογίας της εκάστοτε περιοχής. Επίσης γίνεται μια αναφορά στα πετρώματα μέσω των οποίων διέρχεται το νερό, καθώς επηρεάζουν άμεσα την σύστασή του και κατ' επέκταση το είδος των ελεύθερων ιόντων του.

2.1 Γεωλογία Βόρειας Εύβοιας

Η Βόρεια Εύβοια ανήκει γεωλογικά στην πελαγονική ζώνη που είναι μέρος των εσωτερικών Ελληνίδων. Η πελαγονική θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα ανυψωμένο τμήμα του θαλάσσιου πυθμένα, με τη μορφή ράχης, που διαχωρίζει δύο θαλάσσιες λεκάνες, της Αλμωπίας στα ανατολικά και της Πίνδου στα δυτικά. Η υποθαλάσσια ράχη της πελαγονικής πιστεύεται ότι διακόπτεται από δύο βυθίσματα στην περιοχή της Κοζάνης και της κεντρικής Εύβοιας δια μέσου των οποίων επικοινωνούν οι δύο λεκάνες. Η λεκάνη της Βόρειας Εύβοιας ειδικότερα, περιλαμβάνει στρωματογραφικά το τμήμα της βόρειας Εύβοιας που ορίζεται από την περιοχή των Ωρεών μέχρι τις Ροβιές, τον βόρειο Ευβοϊκό κόλπο, την χερσόνησο της Λιχάδας και στις παράκτιες περιοχές της Στερεάς Ελλάδας που βρίσκονται γύρω της χερσονήσου. Κατά το Πλειστόκαινο, εμφανίστηκε στην περιοχή έντονη τεκτονική δραστηριότητα οδηγώντας ένα τμήμα αυτής να βυθιστεί κάτω από τη θάλασσα δημιουργώντας τους κόλπους της Αταλάντης, τον Μαλιακό και τον βόρειο Ευβοϊκό (Βακαλόπουλος, Ξενάκη, *et. al.*, I.G.M.E., 2008).

*Η λιθοστρωματογραφική διαφοροποίηση όπως και η εμφάνιση γεωθερμικών εκδηλώσεων στις διάφορες περιοχές της λεκάνης από την περιοχή Λίμνη - Ροβιές έως και Αιδηψό - Χερσόνησο Λιχάδων είναι αποτέλεσμα των ιδιαίτερων παλαιογεωγραφικών και τεκτονικών συνθηκών που επικρατούσαν μετά τη δημιουργία της λεκάνης και κατά τη διάρκεια της πλήρωσής της με ιζήματα (Βακαλόπουλος, Ξενάκη, *et. al.*, I.G.M.E., σελίδα 8, 2008).*

Η τεκτονική δομή της πελαγονικής ζώνης, ταξινομημένη από τον παλαιότερο προς τον νεότερο γεωλογικό σχηματισμό, αποτελείται από το κρυσταλλικό υπόβαθρο, τους γνευσιωμένους γρανίτες, μια σειρά μεταμορφωμένων πετρωμάτων, ανθρακικά καλύμματα, οφειόλιθους και τα επικλυσιογενή ιζήματα του μέσου και άνω Κρητιδικού, όπως φαίνεται από το Σχήμα 2 (Μανούτσογλου, σελίδες 85-90, 2008). Πιο αναλυτικά:

- Το κρυσταλλικό υπόβαθρο ηλικίας πριν το Λιθανθρακοφόρο (359 - 300 εκ. χρόνια) είναι μια μη ομοιογενής βάση που συνίσταται από πολλές ενότητες πετρωμάτων οι οποίες εμφανίζονται σαν αλληπάλληλες τεκτονικές φολίδες. Παρόλα αυτά θεωρούνται μέρος του κοινού υποβάθρου με παρόμοια λιθολογική ανάπτυξη και κρυστάλλωση σε ίδιες συνθήκες. Τα πετρώματα που το απαρτίζουν είναι κυρίως ορθό-γνεύσιοι και σε μικρό ποσοστό παρά-γνεύσιοι, οφθαλμογνεύσιοι και σχιστόλιθοι. Κατά θέσεις παρατηρούνται αμφιβολίτες και αμφιβολιτικοί σχιστόλιθοι. Χαρακτηριστικά απουσιάζουν τα ανθρακικά πετρώματα.

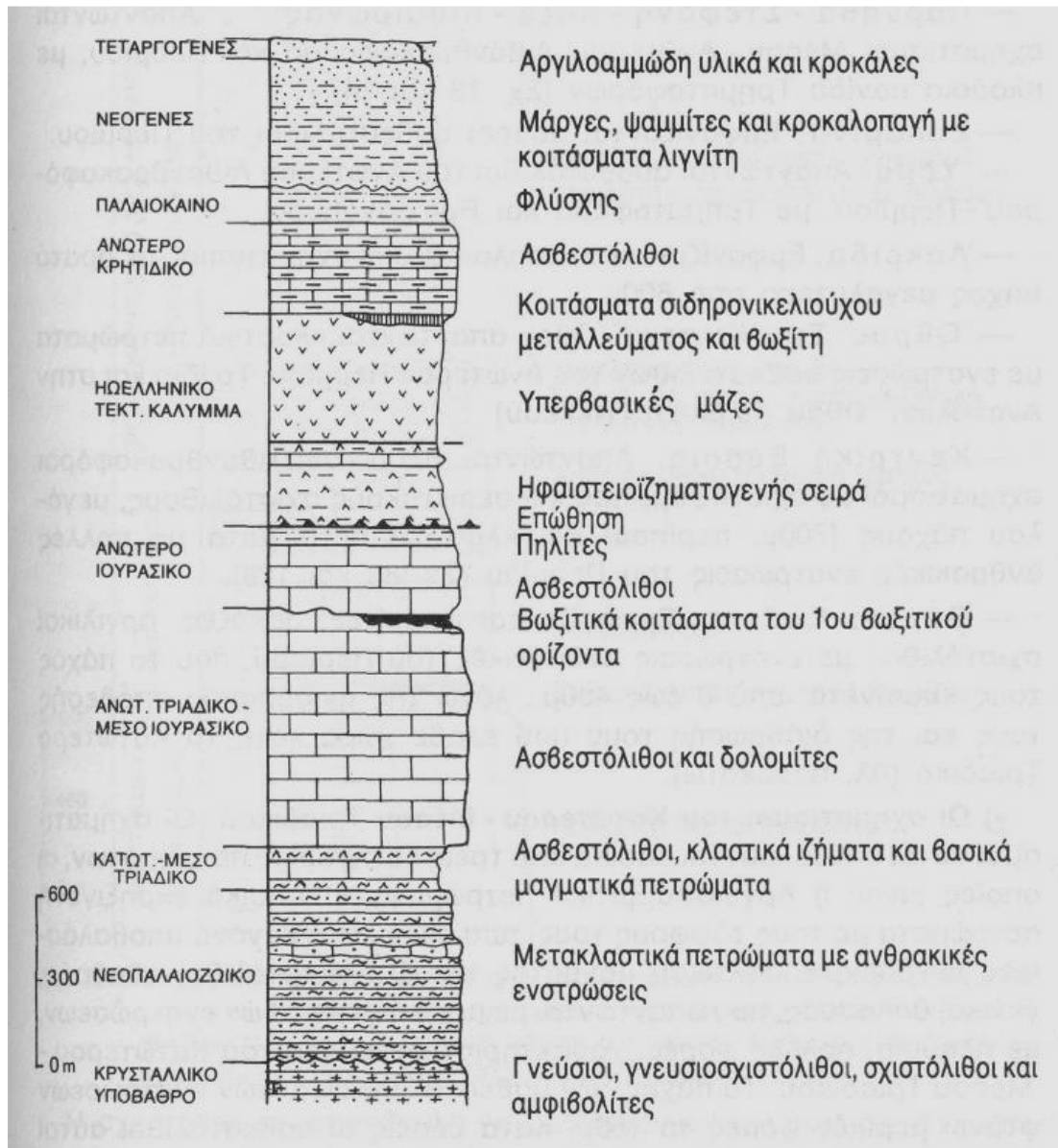
- Οι γνευσιωμένοι γρανίτες του άνω Λιθανθρακοφόρου είναι μαγματικές διεισδύσεις μέσα στο υπόβαθρο που έχουν επιφέρει μεταμόρφωση επαφής στα προϋπάρχουν πετρώματα.
- Τα μεταμορφωμένα πετρώματα ηλικίας 299 – 232 εκ. χρόνων (Πέρμιο – κάτω Τριαδικό) που ακολουθούν είναι φυλλίτες, ψαμμίτες, αρκόζες, τόφφοι και διασκορπισμένες εμφανίσεις μικροκρυσταλλικού ασβεστόλιθου.
- Τα ανθρακικά πετρώματα Τριαδικού – Ιουρασικού (231 – 146 εκ. χρόνια) αποκαλύπτουν την ιζηματογένεση που έλαβε χώρα εκείνη την περίοδο. Έχουν ιδιαίτερη σημασία καθώς αποτελούν τον γεωθερμικό ταμιευτήρα του συστήματος. Απαρτίζονται από νηριτικούς ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, σιπολίτες και δολομίτες.
- Μικρές εμφανίσεις οφειολίθων εμφανίζονται διάσπαρτες εντός της πελαγονικής ζώνης, ανάμεικτες με πελαγικά ιζήματα. Τα πετρώματα αυτά είναι γάββροι, pillow lavas, διαβάσεις, δουνίτες, χαρτσουργίτες. Τα συνοδά ιζήματα είναι κερατόλιθοι, αργιλικοί σχιστόλιθοι και πελαγικοί ασβεστόλιθοι.
- Η επίκληση της θάλασσας που έλαβε χώρα την περίοδο του μέσου Κρητιδικού μέχρι το άνω Κρητιδικό είχε ως αποτέλεσμα την εκ νέου ιζηματογένεση στις περιοχές των εσωτερικών Ελληνίδων. Τα ιζήματα κατακάθονται ασύμφωνα πάνω στα ανθρακικά πετρώματα που έχουν στο μεταξύ πτυχωθεί όσο ήταν άνωθεν της επιφάνειας της θάλασσας. Τα πετρώματα αυτά είναι μάργες, κροκαλοπαγή, φλύσσης και μαργαικοί ασβεστόλιθοι, τα οποία παίζουν το ρόλο του αδιαπέρατου καλύμματος του γεωθερμικού ταμιευτήρα.

Περιοχή Αιδηψού

Η ευρύτερη περιοχή διακρίνεται σε τρεις κύριες γεωμορφολογικές περιοχές, την περιοχή του Τελέθριου όρους, την περιοχή της χερσονήσου της Λιχάδας και την πεδινή περιοχή ανάμεσα τους. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η τελευταία, η οποία βρίσκεται σε μια έκταση που χαρακτηρίζεται από πεδινό ως λοφώδες ανάγλυφο. Χωρίζεται στις εξής περιοχές, από τις οποίες ελήφθησαν τα δεδομένα της εργασίας (Κανελλόπουλος, σελίδα 27, 2011):

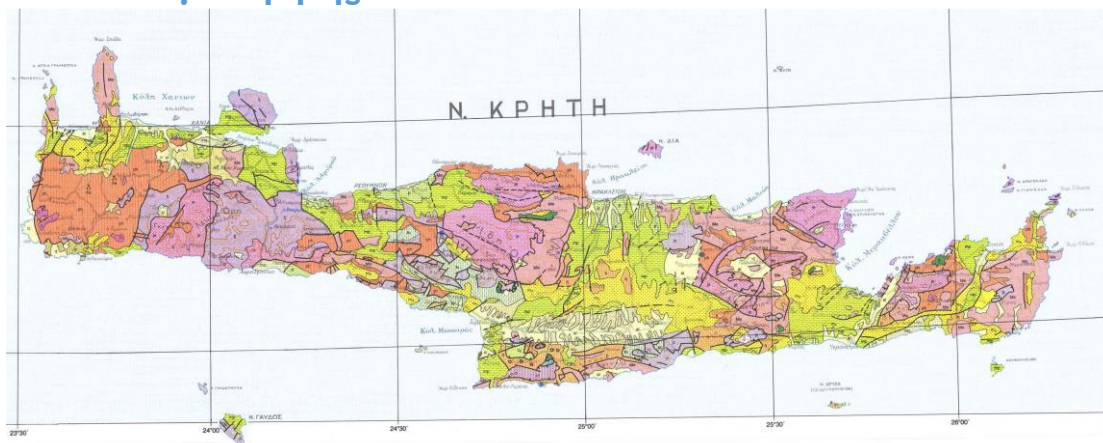
- Περιοχή Αγιόκαμπου, όπου στο βορειοδυτικό της όριο υπάρχει ο δίαυλος των Ωρεών
- Περιοχή λοφοσειράς Κουμάρι – Καλογήρου ράχη μέχρι το χωριό Άγιος, που παρουσιάζει γενική διεύθυνση βορειοδυτικά – νοτιοανατολικά. Οι νοτιοδυτικές κλίσεις της έχουν μεγαλύτερες μορφολογικές κλίσεις από τις βορειοανατολικές
- Περιοχή Πάντερμος - Αγία Βαρβάρα – Άγιος. Εντός της περιοχής βρίσκονται οι λίμνες Αλμυρή και Αυλακιά και το έλος Πάντερμου που έχει επικωματωθεί.

- Περιοχή Κουτρουλιές – Μονοδένδρι – Κορακόλιθος – Ψηλοράχη με διεύθυνση ανατολή – δύση με ψηλότερη κορυφή τον Κορακόλιθο (327 m).
- Περιοχή Λουτρών Αιδηψού – Αγίου Νικολάου, με διεύθυνση βορράς – νότος. Στο νότιο όριο της διαβρέχεται από τον βόρειο Ευβοϊκό κόλπο.
- Περιοχή Μακρύκαμπου – Μαραθιά – Βελατοράχης, όπου βορειοδυτικά καταλήγει στο διάυλο των Ωρεών και νοτιοανατολικά στον όρμο των Γιάλτρων.



Σχήμα 2: Στρωματογραφική στήλη της Πελαγονικής ζώνης μη μεταμορφωμένων σχηματισμών της Κεντρικής και Βόρειας Εύβοιας (Κατσικάτσος, 1986).

2.2 Γεωλογία Κρήτης



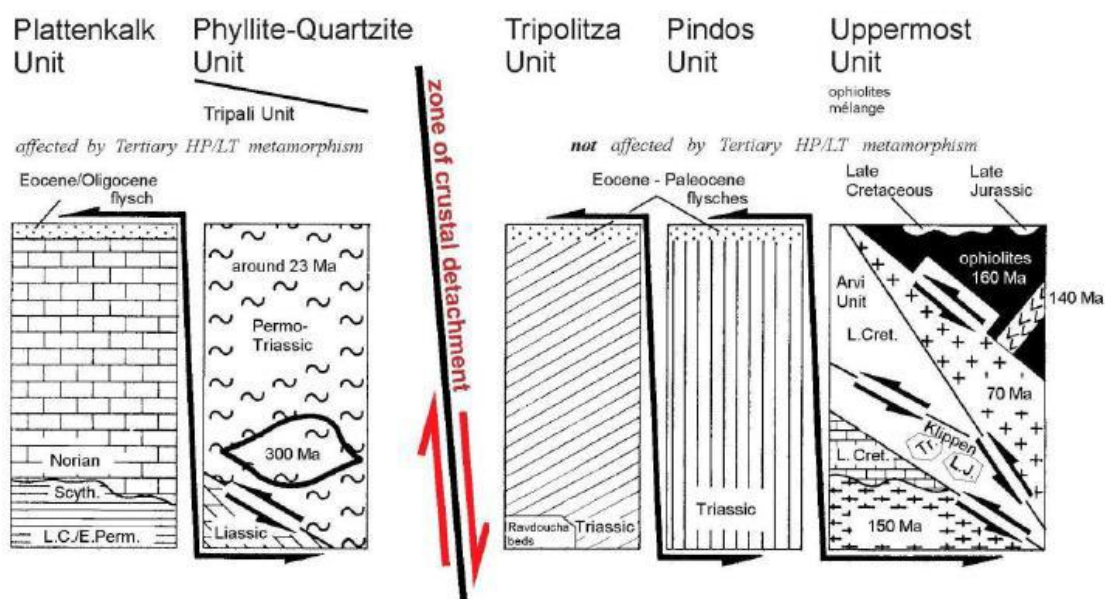
Σχήμα 3: Γεωλογικός χάρτης Κρήτης - Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. αρχικής κλίμακας 1:500.000. Με κίτρινες και πράσινες αποχρώσεις απεικονίζονται οι λεκάνες Νεογενούς και Τεταρτογενούς (Μπορνόβας et. al., 1983)

Η γεωλογία της Κρήτης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο καθώς βρίσκεται πάνω στην ζώνη καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας. Το ελληνικό ηφαιστειακό τόξο είναι αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική πλάκα και καθώς πολύ ισχυρές τάσεις θλίψης και εφελκυσμού αναπτύσσονται στις περιοχές επαφής τους, δημιουργείται ένα σύστημα πολυάριθμων ρηγμάτων.

Η γεωλογική δομή του νησιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη κυρίως αλπικών και προ-αλπικών πετρωμάτων τα οποία σχηματίζουν περίπλοκα τεκτονικά καλύμματα που διακρίνονται ανάλογα με την τεκτονική και τις συνθήκες μεταμόρφωσής τους. Επιπλέον χαρακτηρίζεται και από την εμφάνιση πολλών μετά-αλπικών ιζημάτων του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς τα οποία καλύπτουν τις λεκάνες που βρίσκονται μεταξύ των ορεινών συμπλεγμάτων του νησιού. Παρόλη την απουσία πλουτώνιων διεισδύσεων καθώς και μαγματικών θαλάμων στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, η έντονη νεοτεκτονική δραστηριότητα σε συνδυασμό με μια λιθοστρωματογραφική διάταξη υδρογεωλογικά περατών και αδιαπέρατων στρωμάτων δημιουργούν συνθήκες ανάπτυξης όχι μόνο γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας, αλλά και εκατοντάδων πηγών που ορισμένες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (όξινη, υπόθερμη) χρίζουν ιδιαίτερης μελέτης (Μανούτσογλου, σελίδες 110-136, 2008).

Ταξινομημένη από το παλαιότερο προς το νεότερο γεωλογικό σχηματισμό, η δομή της Κρήτης αποτελείται από την ομάδα των πλακώδων ασβεστόλιθων, την φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά, την ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, την ζώνη Ωλονού – Πίνδου και τα τεκτονικά καλύμματα των εσωτερικών ζωνών, που αναφέρονται ως «Ανώτατη Ενότητα» όπως φαίνεται από το Σχήμα 4. Πιο αναλυτικά:

- Η ομάδα των πλακώδων ασβεστόλιθων αναφέρεται σε μια κοινή ορολογία συγκεκριμένων γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην Κρήτη, ειδικότερα στην περιοχή των Ταλαίων Ορών. Ο σχηματισμός Φόδελε ηλικίας Πέρμιου (299 – 253 εκ. χρόνων) βρίσκεται στο κατώτατο επίπεδο και αποτελείται από κροκαλοπαγή, χαλαζίτες, φυλλίτες στο κάτω τμήμα του και από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες στο άνω τμήμα του. Ακολουθεί ο σχηματισμός Σισσών που εμφανίζει ομοιότητες με τον προηγούμενο και αποτελείται από ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα κάτω-μέσο Τριαδικής ηλικίας. Έπονται οι στρωματολιθικοί δολομίτες των Ταλαίων Ορών ή αλλιώς στρώματα Γκιγκίλου. Αποτελούνται από σχιστολιθικά στρώματα στα οποία παρεμβάλλονται ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και δολομιτών. Τέλος, οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι ηλικίας Μάλμιο – άνω Ηώκαινο είναι μάρμαρα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι.
- Η φυλλιτική – χαλαζιτική σειρά ηλικίας Πέρμιου – Τριαδικού (299 – 202 εκ. χρόνων) ακολουθεί επωθημένη πάνω στην προηγούμενη ενότητα. Αποτελείται από φυλλίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, μάρμαρα και ανδεσίτες στο άνω τμήμα, ενώ το κάτω τμήμα έχει εμφανίσεις γύψου και ανυδρίτη εντός δολομίτη και ραουβάκη. Η ενότητα αυτή είναι σημαντική, καθώς οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν τους υδροφορείς εντός των οποίων μετακινούνται ή εγκλωβίζονται τα ρευστά.
- Η ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης αποτελείται από πετρώματα ηλικίας άνω Παλαιοζωικού – Τριαδικού στα οποία υπάρχουν ενδιάμεσα στρώσεις ασβεστόλιθων ηλικίας άνω Τριαδικό – άνω Ηώκαινο. Οι συγκεκριμένοι ανθρακικοί σχηματισμοί είναι έντονα πτυχωμένοι και αποκαλύπτουν νηριτική ιζηματογένεση μικρού βάθους. Υπάρχει επίσης παρουσία βωξίτη και φλύσχη.
- Η ζώνη Ωλονού – Πίνδου ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού (220 - 150 εκ. χρόνων), εμφανίζει διαφοροποιήσεις στην Κρήτη και χαρακτηρίζεται με τρεις σειρές. Δυτικά η σειρά Πίνδου παρουσιάζει ομοιότητες στρωματογραφικά με τους αντίστοιχους σχηματισμούς στην ηπειρωτική Ελλάδα. Κεντρικά προσδιορίζεται ως η σειρά Εθιάς και ανατολικά ως η σειρά Μαγκασσά. Η σειρά Εθιάς έχει κοινά στοιχεία με την ζώνη της Πίνδου, η εμφάνιση του φλύσχη όμως αρχίζει στο κάτω Λουτήσιο, με καθυστέρηση δηλαδή από τον φλύσχη της ζώνης της Πίνδου που εμφανίζεται στο Παλαιόκαινο. Εκτός του φλύσχη η σειρά της Πίνδου, αποτελείται επίσης από εναλλασσόμενα στρώματα ψαμμιτών και πηλιτών, ροδόχρωμους ασβεστόλιθους με στρώσεις μαργών, ωλιθικούς ασβεστόλιθους, ραδιολαρίτες και εναλλαγές πηλιτών, ασβεστόλιθων και κατά θέσεις ψαμμιτών που συνολικά εκφράζουν τους σχηματισμούς του «πρώτου φλύσχη».



Σχήμα 4: Τεκτονική διάταξη των τεκτονοστρωματογραφικών ενοτήτων στην Κρήτη (τροποποιημένη από Seidel, 1982).

- Υπερκείμενες τεκτονικά των εξωτερικών ζωνών που αναφέρθηκαν παραπάνω, βρίσκονται οι αλλόχθονες εσωτερικές ζώνες που σχηματίζουν τεκτονικά λείπια και ονομάζονται «Ανώτατη Ενότητα». Περίπλοκες επαλληλίες από καλύμματα, συνθέτουν πολύπλοκα λιθοφασικά τεκτονικά συμπλέγματα. Τα διάφορα τεκτονικά καλύμματα που επωθούνται το ένα πάνω στο άλλο από το νεότερο προς το παλαιότερο είναι τα εξής:

- Οφειολιθικό κάλυμμα με σερπεντινωμένους περιδοτίτες, γάββρους, διορίτες, δολερίτες και διαβάσεις, ηλικίας Κατώτατου Ιουρασικού – Ανώτατου Κρητιδικού. 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 χρυσοσίλη και αντιγορίτη και σε ορισμένες θέσεις μόνο αντιγορίτη.

- Κάλυμμα Αστερούσιων με μετα-ιλυολιθικούς, διμαρμαρυγιακούς, χλωριτικούς, επιδοιτικούς 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.

(Μανούσογλου, σελίδα 55, 2008).

Ανωθεν των καλυμμάτων της «Ανώτατης Ενότητας» που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν σχηματισμοί Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας, οι εμφανίσεις των οποίων ποικίλλουν σε πάχος και εξάπλωση ανάλογα την περιοχή. Τα πετρώματα αυτά δημιουργήθηκαν από διεργασίες μετά τον αλπικό ορογενετικό κύκλο που επηρέασε την περιοχή. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι διασκορπισμένοι στην Κρήτη αλλά εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα του νησιού, καλύπτοντας περίπου το ένα τρίτο της έκτασής του. Κατά την διάρκεια δημιουργίας τους επικάθισαν ασύμφωνα στους αλπικούς σχηματισμούς και παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς την ηλικία τους και ως προς τη λιθολογία τους. Αποτελούνται από ασβεστόλιθους, δολομίτες, μάργες, άργιλους, κροκαλοπαγή και λατυποπαγή. Οι πάνω από εξήντα λιθοστρωματικές ενότητες του Νεογενούς και Τεταρτογενούς έχουν ταξινομηθεί σε έξι ομάδες σχηματισμών (κατά Meulenkamp, 1979). Πιο αναλυτικά:

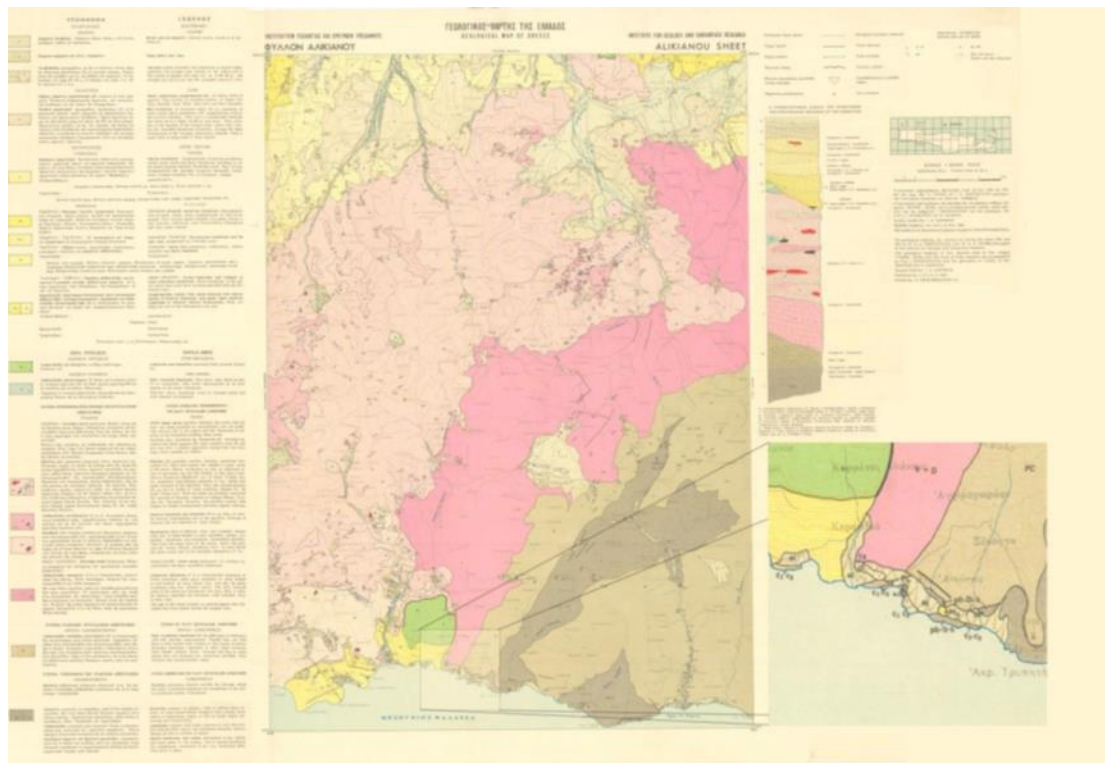
- Η Ομάδα Πρίνα (μέσο Μειόκαινο) αποτελείται από χονδρόκοκκα σκουρόχρωμα ασβεστολιθικά λατυποπαγή και κροκαλοπαγή, συνεκτικά συγκόλλημένα που εμπεριέχουν προ-Νεογενής ηλικίας ασβεστόλιθους. Αποτέθηκαν σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται ως μη θαλάσσιο, υφάλμυρο ή ρηχό θαλάσσιο.
- Η Ομάδα Τεφελίου (άνω Σερραβάλλιο – κάτω Τορτόνιο) αποτελείται από κροκαλοπαγή, άμμους και αργίλους. Αποτέθηκαν σε περιβάλλον που χαρακτηρίζεται γλυκό, υφάλμυρο ή θαλάσσιο και υπέρκειται είτε της Ομάδας Πρίνα είτε απευθείας του προ-Νεογενούς υποβάθρου.
- Η Ομάδα Βρυσών (Άνω Τορτόνιο - Κάτω Μεσσήνιο), αποτελείται από αποθέσεις βιοκλαστικών ασβεστόλιθων, συχνά από υφαλογενή – κοραλλιογενή προέλευση και εναλλαγές ταινιωτών μαργών, οι οποίες τοπικά εμπεριέχουν παρεμβολές γύψων. Αποτέθηκαν σε περιβάλλον ρηχής θάλασσας και υπέρκειται είτε της Ομάδας Τεφελίου είτε του αλπικού υποβάθρου είτε σε ορισμένες περιπτώσεις της ενότητας Πρίνα.
- Η Ομάδα Ελληνικού (Άνω Μεσσήνιο) αποτελείται από χονδρόκοκκα κροκαλοπαγή χερσαίας προέλευσης, λεπτόκοκκα ιζήματα ποταμών ή λιμνών και εμπεριέχουν λεπτά στρώματα εβαποριτών και γύψων. Αποτέθηκαν κατά τη διάρκεια της κρίσης αλατότητας του Μεσσηνίου και υπέρκειται είτε παλαιότερων Νεογενών σχηματισμών είτε της ομάδας Βρυσών. Στην κεντρική και ανατολική Κρήτη απουσιάζει.
- Η Ομάδα Φοινικιάς (Πλειόκαινο) αποτελείται από κροκαλοπαγή, μάργες, αργίλους και τοπικά εναλλαγές διατομιτών. Αποτέθηκαν σε περιβάλλον ανοικτής θάλασσας, πάνω στα Μειοκαινικά ιζήματα.
- Η Ομάδα Αγίας Γαλήνης (Πλειόκαινο) αποτελείται από κροκαλοπαγή, άμμους και άργιλους. Δημιουργήθηκε από τα διαβρωμένα πετρώματα της περιοχής του Ηρακλείου που

τροφοδότησαν με ιζήματα τη λεκάνη της Μεσσαράς, σχηματίζοντας κοκκινωπά χερσαία κροκαλοπαγή και άμμους.

Περιοχή Αγίου Αντωνίου

Στην περιοχή της δυτικής Κρήτης και ειδικότερα της ευρύτερης περιοχής του Αγίου Αντωνίου, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5, αναπτύσσεται το λεγόμενο «κάλυμμα του Τρυπαλίου» πάνω από την σειρά των πλακώδων ασβεστόλιθων. *Το κάλυμμα αυτό αποτελείται από δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, λατυποπαγείς ασβεστόλιθους έως ραουβάκες, σκουρόχρωμους κυψελώδεις δολομίτες, λευκά ζαχαρώδους υφής μάρμαρα και εμφανίσεις γύψου (από Κουφάκη, σελίδα 66, 2018).* Η τοποθέτηση του καλύμματος ως αυτούσια γεωτεκτονική και στρωματογραφική ενότητα είναι αμφιλεγόμενη.

Η σχέση μεταξύ των ανθρακικών σχηματισμών του «καλύμματος του Τρυπαλίου» με τους σχηματισμούς της «φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς» δεν είναι ξεκάθαρη, καθώς έχει προκύψει ότι η ηλικία Ραϊτίου - Λιάσιου που χαρακτηρίζει τα πετρώματα αυτά είναι υπό αμφισβήτηση. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η επαφή με τους υποκείμενους «Πλακώδεις Ασβεστόλιθους» είναι καθαρά τεκτονική, εξάγεται το συμπέρασμα να τοποθετείτε η ενότητα αυτή σαν υποκείμενη της «φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς» θεωρούμενη σαν ανεξάρτητη γεωτεκτονική ενότητα (από Κουφάκη, σελίδα 66, 2018). Είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι οι σχηματισμοί του «καλύμματος του Τρυπαλίου» παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους Τριαδικούς - Λιάσιους σχηματισμούς της Ομάδας των Πλακωδών Ασβεστόλιθων.



Σχήμα 5: Γεωλογικός χάρτης του Ι.Γ.Μ.Ε. για την δυτική Κρήτη και την ευρύτερη περιοχή του Αγίου Αντωνίου.
(Τάταρης και Χριστοδούλου, 1965)

2.3 Πετρώματα υδροφορέων

Από την γεωλογική μελέτη των περιοχών, παρατηρούμε ότι τόσο στην περιοχή της Αιδηψού όσο και στην περιοχή του Αγίου Αντωνίου, οι λεκάνες απορροής απαρτίζονται από ανθρακικά πετρώματα. Αυτά είναι κυρίως ασβεστόλιθος, δολομίτης και φλύσχος. Καθώς εμπλουτίζουν τα ύδατα με συγκεκριμένα ιόντα, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά τους. Πιο αναλυτικά:

Ασβεστόλιθος

Ο ασβεστόλιθος είναι πέτρωμα αποτελούμενο κυρίως από ασβεσίτη (CaCO_3) σε ποσοστό τουλάχιστον 90% και μέχρι 10% άλλες προσμίξεις. Συνηθισμένα συστατικά του σε μικρές αναλογίες είναι ο χαλαζίας, ο κλωρίτης, ο χαλκηδόνιος, οι άστριοι, τα αργιλικά ορυκτά, οι μαρμαρυγίες, ο αιματίτης, ο λειμονίτης, ο σιδηρίτης, ο σιδηροπυρίτης καθώς και οργανικό υλικό (από Γκιόκα, σελίδες 29-30, 2014).

Η απόθεση του ανθρακικού ασβεστίου μπορεί να είναι είτε χημική (κορεσμός λόγω εξάτμισης ή αύξησης συγκέντρωσης ή αλλαγής φυσικοχημικών σταθερών) είτε βιογενής από συσσώρευση και συμπαγοποίηση των σκελετικών στοιχείων διαφόρων ζωικών ή φυτικών οργανισμών μετά το θάνατό τους (από Γκιόκα, σελίδες 29-30, 2014).

Δολομίτης

Ο δολομίτης αποτελεί πέτρωμα με περιεκτικότητα τουλάχιστον 90% το ορυκτό δολομίτη ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) και μέχρι 10% ασβεστίτη. Σχηματίζεται όταν ένα μέρος του ασβεστίου του CaCO_3 του ασβεστολίθου αντικατασταθεί από μαγνήσιο (δολομιτίωση). Μπορεί να υπάρχουν όλα τα ενδιάμεσα σε σύσταση πετρώματα μεταξύ ασβεστολίθου και δολομίτη. Σε περίπτωση που το περιεχόμενο σε MgO υπερβαίνει το 21% ο δολομίτης θεωρείται μέταλλευμα και χρησιμοποιείται για την εξαγωγή μαγνησίου (από Γκιόκα, σελίδα 34, 2014).

Η δολομιτίωση των ασβεστολίθων διακρίνεται σε πρώτη και ύστερη. Η πρώτη λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την απόθεση των ασβεστολίθων και συνήθως σχετίζεται με το περιβάλλον απόθεσης, ενώ η δεύτερη λαμβάνει χώρα πολύ μετά την απόθεση του ασβεστίτη και δε σχετίζεται με συγκεκριμένο περιβάλλον απόθεσης (Γκιόκα, 2014). Η δολομιτίωση οδηγεί σε αύξηση πορώδους των ανθρακικών πετρωμάτων και αυτό γιατί η κυψελίδα του ορυκτού δολομίτη έχει μικρότερες διαστάσεις από την αντίστοιχη του ορυκτού ασβεστίτη, το οποίο και αντικαθίσταται. Το φαινόμενο αυτό αυξάνει το δυναμικό του πετρώματος ως ταμιευτήρα (από Γκιόκα, σελίδα 34, 2014).

Φλύσξης

Ο όρος φλύσξης δεν αναφέρεται σ' ένα συγκεκριμένο πέτρωμα, αλλά αποτελεί λιθολογικό σχηματισμό. Με τον όρο αυτό νοούνται ορισμένες αποθέσεις που αποτελούνται από διάφορα πετρώματα. Χαρακτηρίζεται από παχιά ακολουθία ιζημάτων που αποτελούνται κυρίως από εναλλαγές μαργών, ασβεστολίθων, κροκαλοπαγών, και αδρόκκοκων ψαμμιτών. Συνήθως τα στρώματα του φλύσχη είναι πτυχωμένα και επομένως τεκτονικά καταπονημένα (πολλαπλές ρωγμές, πολλαπλοί θρυμματισμοί) και εγκλείουν υπολειμματικές τάσεις. Είναι ένας προορογενετικός σχηματισμός και αντιπροσωπεύει το σύνολο των πετρογραφικών φάσεων που αποτίθενται στις λεκάνες στο τελευταίο στάδιο πλήρωσης του γεωσυγκλίνου (Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Κεφάλαιο 3 Γεωθερμία υπό μελέτη περιοχών

Το δεύτερο βήμα της μελέτης των περιοχών είναι οι γεωθερμικές συνθήκες τους. Έτσι στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή, καθώς και ουσιώδης έννοιες για την γεωθερμία όπως το γεωθερμικό πεδίο και η πηγή θερμότητας.

Γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα

Η συστηματική εξερεύνηση του γεωθερμικού δυναμικού της Ελλάδας, ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και πραγματοποιήθηκε κυρίως από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (από Μπουτσάκη, σελίδα 15, 2016). Το πρώτο ερευνητικό έργο χρηματοδοτήθηκε το 1971 και οι περιοχές ενδιαφέροντος ήταν τα νησιά της Μήλου, της Νισύρου και της Λέσβου, καθώς και ηπειρωτικών τοποθεσιών όπως είναι τα Μέθανα, το Σουσάκι, τα Καμένα Βούρλα, οι Θερμοπύλες, η Ύπατη και η Αιδηψός δηλαδή περιοχές που σχετίζονται με το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου. Στις δεκαετίες του 1980 και 1990, οι έρευνες για γεωθερμικά πεδία επικεντρώθηκαν στις περιοχές που χαρακτηρίστηκαν ως αρκετά υποσχόμενες, όπως η Ανατολική Μακεδονία η Θράκη και ορισμένα νησιά του Αιγαίου. Επί του παρόντος, η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα συνδέεται με τη χρήση θερμών και μεταλλικών υδάτων. Εκτιμάται ότι το 1% της ενέργειας που απορρέει από την εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων χρησιμοποιείται για οικιακή θέρμανση, το 7% στις ιχθυοκαλλιέργειες, το 21% χρησιμοποιείται σε ιαματικές εγκαταστάσεις, το 30% αξιοποιείται σε θερμοκήπια και το 41% σε γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (από Μπουτσάκη, σελίδα 15, 2016).

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 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).

3.1 Γεωθερμικό πεδίο

Το γεωθερμικό πεδίο είναι κατά βάση ένας γεωγραφικός όρος που υποδεικνύει μια περιοχή γεωθερμικής δραστηριότητας στην επιφάνεια της Γης. Σε περιπτώσεις που απουσιάζει τέτοιου είδους δραστηριότητα στην επιφάνεια, ο όρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί ο χώρος στην επιφάνεια που αντιστοιχεί στον υποκείμενο γεωθερμικό ταμιευτήρα. Η δημιουργία ενός γεωθερμικού πεδίου προϋποθέτει τα εξής:

1. Την παρουσία ενός διαπερατού υδροφόρου στρώματος ικανού να φιλοξενήσει και να μεταβιβάσει το νερό σε βαθύτερα σημεία.
2. Την παρουσία ενός αδιαπέραστου καλύμματος πάνω από το αντίστοιχο υδροπερατό υδροφόρο στρώμα.
3. Συνθήκες μεταφοράς του νερού σε βάθος μέσα στο στερεό φλοιό για την απόκτηση θερμοκρασίας ή την παρουσία βαθιάς θερμικής ή μαγματικής εστίας, που προσδίδει στο νερό υψηλή θερμοκρασία.
4. Κατάλληλες γεωλογικές, υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες ικανές για τον ανεφοδιασμό, την κίνηση και την άνοδο του παραγόμενου γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια.

Ένδειξη της ύπαρξης πιθανού γεωθερμικού πεδίου, είναι οι υψηλές τιμές της γεωθερμικής βαθμίδας. Φυσιολογικά η θερμοκρασία του εδάφους αυξάνεται όσο πλησιάζουμε σε μεγαλύτερα βάθη, κατά μέσο όρο 1 °C ανά 30m που ορίζεται ως γεωθερμική βαθμίδα. Όταν τιμή της σε μια περιοχή υπερβαίνει αρκετά τον μέσο όρο, πληρούνται οι προϋποθέσεις για την διεξαγωγή έρευνας.

Ένας γεωθερμικός ταμιευτήρας θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας διότι καθόσον χρόνο λαμβάνει χώρα η παραγωγή συγχρόνως συχνά γίνεται και επαναφόρτιση με θερμική ενέργεια νέας ποσότητας ρευστού. Επίσης, θα μπορούσε να θεωρηθεί και αειφόρος πηγή ενέργειας υπό την έννοια ότι υφίσταται ένας μηχανισμός αναπλήρωσης των παραγομένων ρευστών εις τρόπον ώστε να δύνανται να ωφεληθούν και οι επόμενες γενεές. Κατά κύριο λόγο, η επανατροφοδότηση με ρευστό του ταμιευτήρα γίνεται από τα ύδατα που περιβάλλουν τον ταμιευτήρα ή από νερό ακριβώς πιο πάνω από τον ευρισκόμενο σε υψηλή θερμοκρασία ταμιευτήρα. Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες εν γένει υπόκεινται σειράς αδιαπέρατων πετρωμάτων και είναι υδραυλικά συνδεδεμένοι με την επιφάνεια έτσι ώστε το μετεωρικό νερό να μπορεί να εισέρχεται και να αντικαθιστά μερικώς τους όγκους νερού που είτε διαφεύγουν μέσω φυσικών εκροών ή παράγονται από γεωτρήσεις (Βαρότσης, σελίδα 6, 2018).

3.2 Πηγή Θερμότητας

Ένας γεωθερμικός ταμιευτήρας είναι αναγκαίο να τροφοδοτείται από μια πηγή θερμότητας που να παρέχει την θερμική ενέργεια που είναι απαραίτητη για να λάβουν χώρα θερμοκρασίες υψηλότερες του συνήθους. Η πηγή θερμότητας προέρχεται από ένα συνδυασμό διεργασιών όπως οι βαρυτικές δυνάμεις που διαχωρίζουν τον πυρήνα από τον μανδύα, η θερμότητα που παράγεται από την αποσύνθεση ραδιενεργών στοιχείων, η αρχέγονη θερμότητα αστρικής προέλευσης (primordial) ή η λανθάνουσα θερμότητα κρυστάλλωσης τμημάτων του εξώτερου τμήματος του πυρήνα. Τροφοδοτεί ένα γεωθερμικό πεδίο με μορφή είτε μαγματικής διείσδυσης η οποία ανήλθε σε χαμηλά βάθη (3 - 10 χλμ.) είτε ως κανονική θερμική ροή της Γης που θερμαίνει τους σχηματισμούς λόγω βάθους. Ενισχύεται από φαινόμενα όπως η ηφαιστειότητα και ο τεκτονισμός αλλά προϋποθέτει την κυκλοφορία και την συσσώρευση θερμών ρευστών σε σημεία προσεγγίσιμα από την ανθρώπινη δραστηριότητα ώστε να δύναται η αξιοποίηση της (Βαρότης, σελίδα 4, 2018).

Η θερμότητα μεταδίδεται μέσω:

- Αγωγής (conduction)
- Συναγωγής (convection)
- Ακτινοβολίας (radiation)

Μετάδοση με αγωγή

Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή μεταξύ δύο γειτονικών σημείων λόγω της αλληλεπίδρασης των στοιχειωδών σωματιδίων των σημείων αυτών. Στα υγρά και αέρια οφείλεται στις κρούσεις των μορίων κατά τη διάρκεια των τυχαίων κινήσεων που πραγματοποιούν. Στα στερεά οφείλεται στο συνδυασμό των δονήσεων των μορίων στο πλέγμα τους και της ενέργειας μεταφοράς των ελεύθερων ηλεκτρονίων (Βαρότης, σελίδα 18, 2018).

Μετάδοση με συναγωγή

Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή προς ή από μία επιφάνεια στερεού λόγω της κίνησης μάζας ρευστού που βρίσκεται σε επαφή με αυτήν ή μεταξύ ρευστών που κινούνται το ένα ως προς το άλλο. Η θερμότητα επομένως μεταδίδεται με συνδυασμό αγωγής και συναγωγής. Διακρίνουμε την ελεύθερη και την εξαναγκασμένη συναγωγή (Βαρότης, σελίδα 19, 2018).

Μετάδοση με ακτινοβολία

Κάθε σώμα ευρισκόμενο σε μια οποιαδήποτε θερμοκρασία άνω του απόλυτου μηδενός, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Για τη μεταφορά της ενέργειας δεν απαιτείται η παρουσία παρεμβαλλόμενου μέσου. Η ενέργεια εκπέμπεται από τη θερμή πηγή με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και θερμαίνει την ψυχρή μάζα που την απορροφά (Βαρότης, σελίδα 19, 2018).

3.3 Γένεση γεωθερμικών πεδίων

Τα γεωθερμικά πεδία μπορούν να διαχωριστούν σε εκείνα που έχουν ηφαιστειογενή προέλευση και σε εκείνα από τεκτονικά ενεργές περιοχές. Ο διαχωρισμός αυτός μπορεί να ισχύει και στην περίπτωση της Ελλάδας, καθώς η εκτεταμένη εμφάνιση γεωθερμικών πεδίων και θερμών υδάτων στην χώρα μας οφείλεται στις δυο προαναφερθείσες παραμέτρους, πρώτον την ενεργή τεκτονική δραστηριότητα και δεύτερον στην πρόσφατη ηφαιστειότητα, η οποία ξεκίνησε στην αρχή του Τριτογενούς ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης μεταξύ της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας. Τα υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία (θερμοκρασία ρευστού: $>150^{\circ}\text{C}$) αναπτύχθηκαν κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου ενώ τα χαμηλής (θερμοκρασία ρευστού: $<90^{\circ}\text{C}$) και μέσης ενθαλπίας (θερμοκρασία ρευστού: $90 - 150^{\circ}\text{C}$) γεωθερμικά πεδία σχετίζονται με τα συστήματα ρηγμάτων του κεντρικού Αιγαίου και τις Τριτογενείς ιζηματογενείς λεκάνες της Μακεδονίας. Το γεωθερμικό σύστημα της Βόρειας Εύβοιας αναφέρεται στη πρώτη κατηγορία, ενώ της Δυτικής Κρήτης αναφέρεται στην δεύτερη.

3.3.1 Τεκτονική δραστηριότητα στην “κεντρική Ελλάδα”

Τα τελευταία 2 – 3 εκατομμύρια χρόνια παρατηρείται μια κίνηση με γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στην περιοχή της βόρειας Πελοποννήσου, Ανατολικής Στερεάς και βόρειας Εύβοιας. Αυτό φαίνεται από το ενεργό τεκτονικό σύστημα της περιοχής που χαρακτηρίζεται από την παρουσία μιας σειράς μεγάλων ρηξιγενών ζωνών διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ που έχουν δημιουργήσει μια σειρά διαδοχικών τεκτονικών βυθισμάτων όπως ο Κορινθιακός κόλπος, η λεκάνη Βοιωτικού Κηφισσού – Κωπαίδα, η λεκάνη Λοκρίδας, ο Ευβοϊκός κόλπος και το υποθαλάσσιο βύθισμα ΒΑ της βόρειας Εύβοιας. Στην επισκόπηση των Roberts και Jackson (1991), τα βυθίσματα της κεντρικής Ελλάδας περιγράφονται ως μια σειρά ασύμμετρων τεκτονικών τάφρων, με τα κύρια ρήγματα στην ΝΔ πλευρά του κάθε βυθίσματος, πλην του βόρειου Ευβοϊκού. Η ασυμμετρία επιδεικνύεται από μορφολογικές διαφορές των πλευρών τους, τη στρέψη των αποθέσεων που πληρούν τις λεκάνες προς ΝΔ, τη βυθομετρία και διαφορικές κατακόρυφες κινήσεις ακτογραμμών στα βυθίσματα που έχει εισβάλλει η θάλασσα. Με βάση το μοντέλο αυτό, στις ΒΑ πλευρές των τάφρων της κεντρικής Ελλάδας υπάρχουν ενεργά αντιθετικά ρήγματα (antithetic faults), δεν πρόκειται δηλαδή για απλές ημι-τάφρους (half-graben) τύπου domino. Κάποια δε από αυτά τα αντιθετικά ρήγματα είναι μεγάλα με την έννοια ότι μπορούν να δώσουν σεισμούς της τάξεως του 6.0 ρίχτερ. Όμως στο παραπάνω μοντέλο θεωρούνται δευτερεύοντα, ως σχετιζόμενα με σημαντικά μικρότερες συνολικές κατακόρυφες μετακινήσεις σε σύγκριση με τα κύρια ρήγματα.

Δυτική Κρήτη:

Στην Δυτική Κρήτη, οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για την έρευνα του ενεργού τεκτονισμού της περιοχής ανέδειξαν την ύπαρξη 13 βαθιών ρηγμάτων, με μεγάλη γωνία κλίσης, τα οποία σχηματίστηκαν από το Μέσο - Άνω Μειόκαινο μέχρι σήμερα. Μέσω κινηματικής ανάλυσης, στρωματογραφικών και αλληλοεπιδρώντων κριτηρίων μεταξύ των γραμμών ολίσθησης πάνω στις ρηξιγενείς επιφάνειες, ανακαλύφθηκε ότι τα ρήγματα αυτά είναι προϊόν δύο κύριων εφελκυστικών τεκτονικών φάσεων.

Η παλαιότερη τεκτονικά φάση με διεύθυνση ανατολική – δυτική, διήρκτησε από το Μέσο - Άνω Μειόκαινο ως το Άνω Πλειόκαινο. Σχημάτισε βαθιά ρήγματα με μεγάλη γωνία κλίσης και κύρια βύθιση προς τα βόρεια. Η κινηματική ανάλυση έδειξε ότι εμφανίζουν έντονη κατακόρυφη συνιστώσα κίνησης προς τα κάτω. Η νεότερη τεκτονικά φάση με κύρια διεύθυνση βόρεια – νότια, διήρκτησε από το Άνω Πλειόκαινο ως το Τεταρτογενές. Σχημάτισε βαθιά ρήγματα με κύρια διεύθυνση βύθισης προς τα δυτικά, που συνδέονται με τα προηγούμενα ρήγματα ή κόβουν τον κατακλαστίτη που αναπτύσσεται μέσα σε αυτά. (από Κορώνη & Αθανασόπουλο, σελίδα 37, 2014).

Οι μελέτες αυτές πιστοποιούν ότι οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες είναι ικανές να μεταφέρουν σημαντικούς όγκους ρευστών στην επιφάνεια ή σε σχετικά μικρές αποστάσεις από αυτήν. Συνεπώς η υδροθερμική δραστηριότητα του νησιού, μπορεί να συσχετιστεί με αυτά.

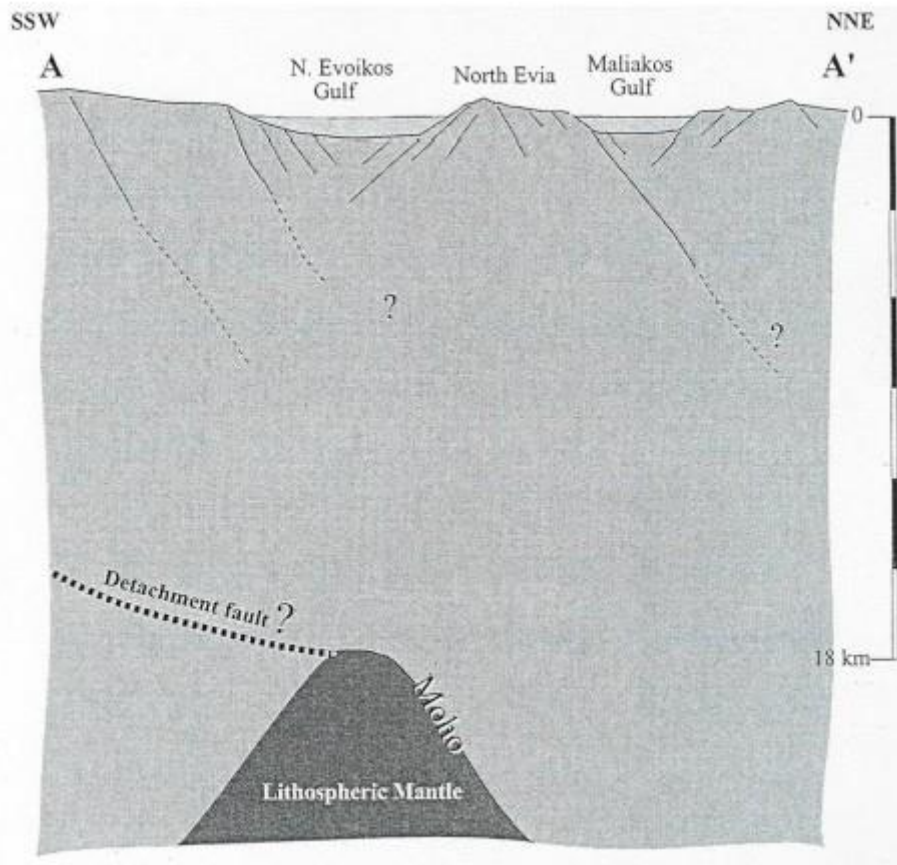
Βόρεια Εύβοια:

Στην περίπτωση της βόρειας Εύβοιας έχουμε μια μακρόστενη χέρσα έκταση με γενική διεύθυνση βορειοδυτική - νοτιοανατολική, που ορίζεται δυτικά από την τάφρο του βόρειου Ευβοϊκού κόλπου, βόρεια από το διάυλο των Ωρεών, ενώ ανατολικά ένα σύστημα ρηγμάτων την χωρίζει με το Αιγαίο πέλαγος.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί προ-Νεογενούς και Νεογενούς ηλικίας, έχουν επηρεαστεί από διάφορες τεκτονικές φάσεις που έχουν ως αποτέλεσμα να κυριαρχούν τρεις κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων. Η πρώτη διεύθυνση είναι βορειοδυτική - νοτιοανατολική, η δεύτερη βορειοανατολική - νοτιοδυτική και η τρίτη ανατολική - δυτική. Σύμφωνα με δεδομένα μικροτεκτονικών αναλύσεων (Μέττος & Ροντογιάννη, 1991) η τεκτονική δομή της περιοχής αποδίδεται στην ύπαρξη δύο εφελκυστικών φάσεων παραμόρφωσης και μιας φάσης συμπίεσης ή οριζόντιας μετατόπισης. Η πρώτη εφελκυστική φάση επηρέασε τα ιζήματα Μειο-Πλειοκαινικής ηλικίας και το προ-Νεογενές υπόβαθρο με διεύθυνση εφελκυσμού ΒΑ-ΝΔ, δημιουργώντας ρήγματα ΒΔ-ΝΑ. Σχημάτισε τις ανατολικές ακτές της Εύβοιας, το βόρειο Ευβοϊκό κόλπο και διαμόρφωσε τις λεκάνες. Ακολούθησε η φάση συμπίεσης ή οριζόντιας μετατόπισης κατά το Πλειό-Πλειστόκαινο, διακόπτοντας την εφελκυστική φάση του Αιγαίου. Η δεύτερη εφελκυστική φάση με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ επηρέασε την βόρεια Εύβοια, οι καθοδικές κινήσεις τις οποίες κατά το Τεταρτογενές επέτρεψαν τη διείσδυση της θάλασσας (Αν. Τυρρήνιο) και το σχηματισμό της Άνω Πλειστοκαινικής ενότητας του βόρειου Ευβοϊκού κόλπου. Η τελευταία εφελκυστική φάση, είναι ο λόγος του μεγάλου βάθους του βόρειου τμήματος του Βόρειου Ευβοϊκού καθώς και της διάνοιξης του διαύλου των Ωρεών (Αναγνώστου & Σιούλας, 1988).

Αυτή η εφελκυστική φάση τεκτονισμού που χαρακτηρίζει την περιοχή σήμερα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών και βαθιών ρηγμάτων που συντελούν στην κυκλοφορία σε βάθος αλλά και στην άνοδο προς την επιφάνεια των θερμαινόμενων ρευστών. Επιφανειακές εκδηλώσεις αυτών είναι οι θερμές πηγές των Γιάλτρων, της Αιδηψού και των Ηλίων με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 42 °C έως 82 °C (Βακαλόπουλος & Ξενάκη et. al., Ι.Γ.Μ.Ε., σελίδα 13, 2008).

Μικροσεισμικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, πιστοποιούν ότι η ασυνέχεια Μοχο βρίσκεται σε βάθος 18 χλμ. στο κέντρο του βόρειου Ευβοϊκού κόλπου, ενώ ο φλοιός στη γύρω περιοχή στο βόρειο κομμάτι της Εύβοιας πλησιάζει σε πάχος τα 32 χλμ. (Σχήμα 6). Συνεπώς η σημαντική υδροθερμική δραστηριότητα στη Βόρεια Εύβοια μπορεί να συσχετιστεί με τον θραυσμένο και λεπτό φλοιό.



Σχήμα 6: Σχηματική τομή της λιθόσφαιρας στην περιοχή της Βόρειας Εύβοιας. Σύμφωνα με σεισμικά δεδομένα (Μακρής, 1996) η λιθόσφαιρα λεπταίνει και φτάνει τα 18 χλμ.

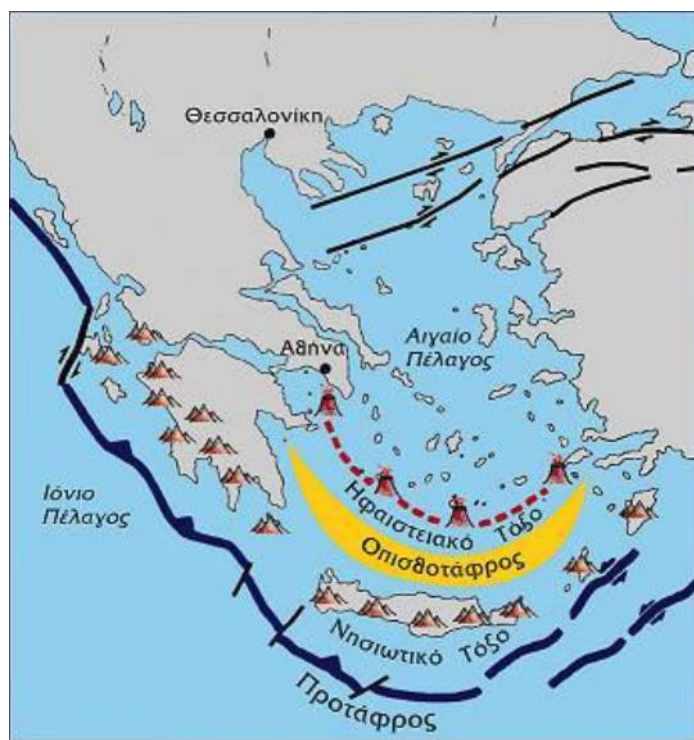
3.3.2 Ηφαιστειότητα στην Ελλάδα

Η περιοχή του Αιγαίου είναι αντικείμενο ορογενετικής ηφαιστειακής δραστηριότητας από την περίοδο του Τριτογενούς. Διακρίνονται δύο μεγάλες ζώνες ηφαιστειότητας, η "βόρεια" και η "νότια" που εμφανίζουν ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Οι δύο ζώνες διαφέρουν ως προς την ηλικία σχηματισμού και ως προς τη σχετική θέση τους στην περιοχή. Οι κύριες διαφορές τους είναι η κατανομή των πετρογραφικών δομών τους, ο συνεχώς ενισχυμένος καλιούχος χαρακτήρας της ηφαιστειότητας της βόρειας ζώνης και η στροφή της προς νότια κατεύθυνση. Αυτές οι διαφορές, οδήγησαν στην πολύ σπάνια εμφάνιση σίδηρομαγνησιούχων πετρωμάτων σε συνδυασμό με μια αύξηση του περιεχομένου K_2O σε όλα τα μέλη αυτής της ζώνης.

Στη βόρεια ζώνη, το ηφαιστειακό μέτωπο αναπτύχθηκε κατά μήκος των ορίων της οροσειράς της Ροδόπης, όπου ο φλοιός είναι σχετικά παχύς, περίπου 40 χλμ. (Μακρής, 1977), σε αντίθεση με τη νότια ζώνη, όπου η ηφαιστειότητα αναπτύχθηκε σε ένα σχετικά λεπτό φλοιό, 25-30 χλμ. (Μακρής, 1977). Απόδειξη της μετανάστευσης της ηφαιστειότητας της βόρειας ζώνης αποτελεί η παρατήρηση ότι στο βορειότερο τμήμα του νομού της Θράκης, μόνο τα ηφαιστειακά πετρώματα του Ολιγόκαινου

είναι ορατά στην επιφάνεια, ενώ στα νότια τμήματα η ηλικία των ορατών ηφαιστειακών πετρωμάτων είναι του Μειόκαινου. Γενικά, από το Ηώκαινο έως το Ολιγόκαινο, το νότιο όριο της Ευρασιατικής πλάκας, συγκρούστηκε με την Απούλια μικροπλάκα, που βρίσκονταν μεταξύ της ευρασιατικής και της αφρικανικής πλάκας, ενώ οι διαδικασίες υποβύθισης πυροδότησαν την ηφαιστειότητα στη βόρεια ζώνη μεταξύ Ολιγόκαινου και Κάτω Μειόκαινου. Το νότιο όριο είναι μια τυπική συγκλίνουσα περιοχή, ενώ το βόρειο και το δυτικό όριο είναι μια επέκταση του ρήγματος της βόρειας Ανατολίας. Το ανατολικό όριο χαρακτηρίζεται από μια σειρά τάφρων φορτισμένων με τάσεις με διεύθυνση ανατολική - δυτική. Έτσι, η πιο πρόσφατη και σχετικά ασθενέστερη ηφαιστειότητα μεταξύ άνω Μειόκαινου και Τεταρτογενούς περιορίζεται μεταξύ αυτών των ορίων. Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι κυρίως αλκαλικού χαρακτήρα και δείχνουν έντονο τεκτονισμό που ευνοεί τον σχηματισμό και την άνοδο του μάγματος.

Η ηφαιστειότητα της νότιας ζώνης ξεκίνησε στο τέλος του Κάτω Πλειστόκαινου, κατά μήκος ενός τόξου που κυμαίνεται από την περιοχή Σουσάκι-Λουτράκι (ηπειρωτική Ελλάδα) έως τα νησιά Αίγινα, Μήλος, Σαντορίνη, Νίσυρο, Κω και σχετίζεται με το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Σχήμα 7), παράλληλα στη ζώνη υποβύθισης της αφρικανικής πλάκας.



Σχήμα 7: Το Ελληνικό τόξο (Παπανικολάου, 1998).

<http://www.oasp.gr/node/207>

Κεφάλαιο 4 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια να αναλυθούν τα είδη των γεωθερμικών συστημάτων, ώστε να καθίσταται ευκολότερα κατανοητές οι ομοιότητες και οι διαφορές τους.

Ο όρος "γεωθερμικό σύστημα" αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει ύδατα που μεταφέρονται με φυσικό τρόπο στον ανώτερο φλοιό της γης. Αυτά κινούνται σε περιορισμένο χώρο μεταφέροντας θερμότητα από μια πηγή θερμότητας σε έναν αποδέκτη που διαχέει θερμότητα, συνήθως την ελεύθερη επιφάνεια. Ο όρος αργότερα διευρύνθηκε για να συμπεριλάβει κάθε άλλο φυσικό πόρο της γης από τον οποίο η θερμότητα που συσσωρεύεται μπορεί να έχει ωφέλιμη αξία. Η κ. Moeck (2014) ορίζει ένα γεωθερμικό σύστημα γενικά ως:

"Οποιαδήποτε τοπικά τοποθετημένα γεωλογικά περιβάλλοντα στα οποία τμήματα της φυσικής ροής θερμότητας από τον πυρήνα της γης μεταφέρονται αρκετά κοντά στην επιφάνεια της γης με κυκλοφορία ατμού ή ζεστού νερού ώστε να χρησιμοποιούνται με ευκολία".

Οι όροι "γεωθερμικός ταμιευτήρας" και "γεωθερμικό σύστημα" αντιπροσωπεύουν σημαντικές έννοιες. Ένας γεωθερμικός ταμιευτήρας συνήθως περιβάλλεται από ψυχρότερα πετρώματα που συνδέονται υδραυλικά με τον ταμιευτήρα. Ως εκ τούτου, τα ύδατα μπορούν να μετακινούνται από τα εξωτερικά ψυχρά πετρώματα προς τον ταμιευτήρα. Τα θερμά ρευστά κινούνται υπό την επίδραση των δυνάμεων της άνωσης προς μια περιοχή εκφόρτισης. Ο συνολικός όγκος των πετρωμάτων, μέσω των οποίων τα ρευστά κινούνται τόσο εντός όσο και εκτός του ταμιευτήρα, μαζί με την πηγή θερμότητας και τη φυσική εκφόρτιση, αποτελούν ένα γεωθερμικό σύστημα (Hochstein, 1990).

4.1 Χαρακτηριστικά της ταξινόμησης

Τα γεωθερμικά πεδία συνήθως ταξινομούνται ή διαχωρίζονται με μια σειρά χαρακτηριστικών που τα περιγράφουν. Χαρακτηρίζονται ως κυριαρχούμενα από ρευστά ή από ατμό, χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας, σε ιζηματογενή ή σε ηφαιστειακά περιβάλλοντα κλπ. Αυτή η ενότητα περιγράφει την έννοια αυτών των χαρακτηριστικών ταξινόμησης που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία (Nicholson, σελίδα 1-2, 1993).

Κατάσταση ισορροπίας ταμιευτήρα: Αυτή είναι η θεμελιώδης διάκριση μεταξύ των γεωθερμικών συστημάτων και βασίζεται στην κυκλοφορία του ρευστού του ταμιευτήρα και στον μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας. Τα συστήματα που βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία επαναφορτίζονται συνεχώς από το νερό που εισέρχεται στον ταμιευτήρα. Το νερό θερμαίνεται και στη συνέχεια αποφορτίζεται έξω από τον ταμιευτήρα, είτε στην επιφάνεια είτε σε υπόγειους διαπερατούς υδροφόρους ορίζοντες. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω του συστήματος με συναγωγή και με την

κυκλοφορία του ρευστού. Τα συστήματα που βρίσκονται σε στατική ισορροπία (αποκαλούνται επίσης στάσιμα ή συστήματα αποθήκευσης) έχουν ελάχιστη ή καθόλου επαναφόρτιση του ταμιευτήρα και η θερμότητα μεταφέρεται μόνο με αγωγή.

Είδος του ρευστού: Το ρευστό του ταμιευτήρα μπορεί να αποτελείται κυρίως από νερό σε υγρή κατάσταση (κυριαρχείται από ρευστό) ή ατμό (κυριαρχείται από αέριο). Στους περισσότερους ταμιευτήρες, τόσο ο ατμός όσο και το ρευστό συνυπάρχουν σε διάφορες αναλογίες ως διαφασικές ζώνες. Τα συστήματα που κυριαρχεί το ρευστό είναι πιο συνηθισμένα και ενδέχεται να περιέχουν ένα στεγανό κάλυμμα με ατμό που μπορεί να επεκτείνεται ή να αξιοποιείται κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης όπως συνέβη στο Wairakei της Νέας Ζηλανδίας. Τα συστήματα που αποφορτίζουν μόνο ατμό είναι σπάνια, τα πιο γνωστά είναι το Larderello στην Ιταλία και τα Geysers, στις ΗΠΑ. Σημειώνεται ότι τα συστήματα που κυριαρχεί το ρευστό αποκαλούνται μερικές φορές ως κυριαρχούμενα από νερό. Αυτό δεν είναι καλός όρος δεδομένου ότι όλα τα υδροθερμικά πεδία αποτελούνται από νερό είτε σε υγρή φάση είτε σε αέρια φάση. Τα συστήματα που κυριαρχεί ο ατμός αναφέρονται επίσης ως πεδία ατμού.

Θερμοκρασία του ταμιευτήρα: Η θερμοκρασία (ή η ενθαλπία) του γεωθερμικού ταμιευτήρα είναι ένας σημαντικός διευκρινιστικός όρος όσον αφορά τη χημεία των ρευστών και την πιθανή χρήση των αποθεμάτων τους. Τα συστήματα συνήθως περιγράφονται ως χαμηλής θερμοκρασίας (< 150°C) ή υψηλής θερμοκρασίας (>150°C). Οι θερμοκρασίες που διαχωρίζουν τις κατηγορίες δεν είναι απόλυτες και ορισμένοι χρησιμοποιούν επίσης τον όρο «ενδιάμεση» για να υποδείξουν θερμοκρασίες ταμιευτήρα στους 120°C - 180°C. Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για εφαρμογές άμεσης χρήσης (π.χ. θέρμανση), ενώ συστήματα υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και για εφαρμογές άμεσης χρήσης.

Είδος του πετρώματος: Τα πετρώματα που φιλοξενούν τον γεωθερμικό ταμιευτήρα αντιδρούν με το γεωθερμικό ρευστό. Καθώς οι αντιδράσεις μεταξύ ρευστού και πετρώματος καθορίζουν την τελική σύσταση των γεωθερμικών υδάτων και αερίων, η γνώση αυτών των πετρωμάτων είναι σημαντική για την σωστή χρήση των γεωθερμομέτρων και για την πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων εάν αξιοποιηθεί το πεδίο. Μόνο γενικές διακρίσεις όπως ηφαιστειακά ή ιζηματογενή (κλαστικά / ανθρακικά) είναι απαραίτητες. Μεταμορφωμένα ισοδύναμα αυτών των λιθολογιών μπορούν να υποδειχθούν προσθέτοντας το πρόθεμα "μετά-" στους παραπάνω όρους. Τα ηφαιστειακά, κλαστικά-ιζηματογενή και ανθρακικά-ιζηματογενή πετρώματα (και τα μεταμορφωμένα ισοδύναμα αυτών των λιθολογιών) παράγουν όλα τα γεωθερμικά ρευστά με ξεχωριστές χημικές συστάσεις. Εάν η γεωλογία είναι εν μέρει γνωστή, γίνεται δυνατή η πρόβλεψη των υπόγειων λιθολογιών από τη χημεία του ύδατος.

Πηγή θερμότητας: Η πηγή θερμότητας του συστήματος είναι συνάρτηση του γεωλογικού ή τεκτονικού περιβάλλοντος. Εάν η ροή θερμότητας προέρχεται από το μάγμα, τότε τέτοια συστήματα ορίζονται ως ηφαιστειακά. Αυτά τα συστήματα είναι πάντοτε υψηλής θερμοκρασίας. Ωστόσο, η θερμότητα δεν προέρχεται αναγκαστικά από το μάγμα. Ένα γεωθερμικό σύστημα μπορεί να δημιουργηθεί σε περιοχές με τεκτονική δραστηριότητα. Για παράδειγμα, η θερμότητα μπορεί να παρέχεται από την τεκτονική ανύψωση θερμών πετρωμάτων υποβάθρου ή το νερό μπορεί να θερμαίνεται από την κυκλοφορία του σε μεγάλα βάθη που δημιουργούνται από την πτύχωση ενός διαπερατού υδροφόρου ορίζοντα ή την ρηγμάτωση. Αυτά ορίζονται ως μη ηφαιστειακά συστήματα και περιλαμβάνουν παραδείγματα ταμιευτήρων τόσο υψηλής όσο και χαμηλής θερμοκρασίας.

4.2 Κατάσταση ισορροπίας ταμιευτήρα

Τα γεωθερμικά συστήματα κυριαρχούνται είτε από μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ή από μεταφορά θερμότητας με αγωγή. Τα γεωθερμικά συστήματα στα οποία κυριαρχεί η συναγωγή (συχνά αναφερόμενα ως βιώσιμα ή ενεργά γεωθερμικά συστήματα λόγω του δυναμικού των ρευστών) φιλοξενούν ρευστά υψηλής ενθαλπίας και εμφανίζονται στα όρια τεκτονικών πλακών ή σε περιβάλλοντα ενεργού τεκτονισμού ή ηφαιστειότητας. Η συναγωγή των θερμών ρευστών που προκαλείται λόγω μιας πηγής θερμότητας ή αυξημένης ροής θερμότητας, μεταφέρει θερμότητα από μεγάλα βάθη στην επιφάνεια. Η δόμηση των πετρωμάτων έχει σημαντική επίδραση στις διόδους ροής των ρευστών στα συστήματα που κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Στα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας, οι ταχύτητες ροής του ρευστού είναι υψηλότερες από ότι στα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας. Η μεταφορά θερμότητας μέσα σε ένα γεωθερμικό σύστημα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και διεργασίες. Εκτός από την υψηλή γεωθερμική βαθμίδα, είναι απαραίτητη και η υψηλή διαπερατότητα για να είναι σημαντική η αγωγή θερμότητας. Στα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας παρουσιάζεται μικρή ή καθόλου μεταφορά θερμότητας. Γενικά, η αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα, η φυσική ροή και το δυναμικό των ρευστών χαρακτηρίζουν τα συστήματα στα οποία κυριαρχεί η συναγωγή (Moeck, σελίδα 870, 2014).

Αντίθετα, τα συστήματα που κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με αγωγή φιλοξενούν ρευστά χαμηλής έως μέσης ενθαλπίας, τα οποία μπορούν επίσης να αποκαλούνται παθητικά γεωθερμικά συστήματα εξαιτίας της απουσίας γρήγορης φυσικής κυκλοφορίας των ρευστών και μικρότερου δυναμικού ροής. Αυτά τα συστήματα εντοπίζονται κυρίως σε περιβάλλον με παθητικό τεκτονισμό, όπου δεν παρατηρείται σημαντική πρόσφατη τεκτονική ή ηφαιστειακή δραστηριότητα. Σε αυτό το περιβάλλον, η γεωθερμική βαθμίδα παρουσιάζει τιμές κοντά στο μέσο όρο, οπότε αυτός ο τύπος γεωθερμικών συστημάτων βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος από ότι

τα γεωθερμικά συστήματα με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Τα γεωθερμικά συστήματα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, απαντώνται σε περιοχές χαμηλής διαπερατότητας, όπως συνεκτικοί ψαμμίτες, ανθρακικά ή κρυσταλλικά πετρώματα. Τα ρήγματα μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο σε αυτά τα συστήματα καθώς λειτουργούν ως αγωγός ή φράγμα κατά τη διάρκεια της παραγωγής και μπορεί να προκαλέσουν διαχωρισμό του συστήματος σε μικρότερες ξεχωριστές ομάδες ρηγμάτων. Οι λιθοφασικές, οι διαγενετικές και οι διεργασίες διαλυτοποίησης που περιλαμβάνουν την καρσιτοποίηση και την ρηγμάτωση, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση της ποιότητας των ταμιευτήρων όπως και στα συστήματα του πετρελαίου και του αερίου (Moeck, σελίδα 870, 2014).

4.3 Είδος του ρευστού

Τα γεωθερμικά συστήματα ανάλογα με την φάση του ρευστού διακρίνονται σε:

- *γεωθερμικούς ταμιευτήρες κατά κύριο λόγο νερού, όπου το νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη ή ίση με την θερμοκρασία ζέσεως που αντιστοιχεί στην πίεση την οποία υφίσταται το ρευστό, η βαθμίδα πίεσης στον ταμιευτήρα είναι κοντά στην υδροστατική και υπάρχει παρουσία ατμού (Βαρότσης, σελίδες 31-32, 2018).*
- *γεωθερμικούς ταμιευτήρες κατά κύριο λόγο ατμού, όπου η θερμοκρασία είναι ίση ή ανώτερη της θερμοκρασίας κορεσμού που προκύπτει από το διάγραμμα τάσης – ατμών (Βαρότσης, σελίδες 31-32, 2018).*
- *διφασικούς ταμιευτήρες, όπου νερό και ατμός συνυπάρχουν και η θερμοκρασία ακολουθεί την καμπύλη τάσης – ατμών (Βαρότσης, σελίδες 31-32, 2018).*

Τα συστήματα που κυριαρχεί η φάση του υγρού είναι πιο διαδεδομένα και έχουν μελετηθεί εκτενέστερα. Τα συστήματα στα οποία κυριαρχεί η φάση του αερίου είναι σπάνια. Ωστόσο οι δύο μεγαλύτεροι γεωθερμικοί ταμιευτήρες από την άποψη της παραγωγής ενέργειας είναι αυτού του είδους, τα Geysers στις ΗΠΑ και το Larderello στην Ιταλία. Οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι κυριαρχούμενων από αέρια συστημάτων ονομάζονται φουμαρόλες. Αυτές σχηματίζονται σε ηφαιστειογενείς περιοχές και είναι γνωστές καθώς εκπέμπουν αέρια στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τον κ. Minissale (σελίδες 259-260, 2018), κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Υπερκρίσιμες φουμαρόλες χαμηλής πίεσης: $T > 371\text{ }^{\circ}\text{C}$ (θεωρητικά) μέχρι $1000/1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 2) Υπέρθερμες φουμαρόλες γενικά χαμηλής πίεσης: $160^{\circ}\text{C} < T < 371^{\circ}\text{C}$.
- 3) Φουμαρόλες κορεσμένου ατμού τύπου "solfatara": θερμοκρασία συχνά γύρω στους $160\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 4) Φουμαρόλες κορεσμένου ατμού $100\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 160\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 5) Φουμαρόλες θερμοκρασίας βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση: $85\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 6) Θερμές λεκάνες ιλύος - νερού, μερικές φορές πολύ όξινη: $85\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 7) Θερμό έδαφος (steaming ground) σε θερμοκρασία βρασμού: $85\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 8) Διάχυτο θερμό έδαφος (steaming ground) (μερικές φορές ζεστός αέρας): $30\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 9) Πηγές κοντά σε συνθήκες βρασμού (με υψηλή ταχύτητα ροής, πλούσιες σε N_2 και He): $90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 10) Θερμές πηγές, που συνδέονται με CO_2 (συχνά με χαμηλή ταχύτητα εκφόρτισης): $20^{\circ}\text{C} / 30^{\circ}\text{C} < T < 99\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 11) Κανάλια εξαέρωσης CO_2 , είτε σχετίζονται με ρευστές φάσεις (θερμή πηγή αερίου), είτε με ξηρές φάσεις ("mofette").

Οι φουμαρόλες τύπου #1 και #2 παράγονται από την παρουσία μάγματος και μαγματικών αερίων σε μικρό βάθος. Οι συγκεντρώσεις των ρευστών τους σε SO_2 (H_2S) και HCl (HF) είναι υψηλές, ενώ εκείνες του ατμού και του CO_2 είναι χαμηλές, που υποδηλώνουν την απουσία συμπύκνωσης ατμού κατά την μεταφορά στην επιφάνεια. Είναι τοξικά, όξινα ρευστά, με ελεύθερο SO_2 , που μπορούν να παραμένουν σε χαμηλή θερμοκρασία (σε συνθήκες βρασμού του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση, ή ακόμα και σε χαμηλότερη θερμοκρασία), μερικές φορές παρόμοια με τις εκπομπές του θερμού εδάφους (τύποι #7 και #8), που υποδηλώνουν την εξάτμιση της βροχής, ανίκανη να συμπυκνώσει τα όξινα συστατικά της αέριας φάσης.

Οι φουμαρόλες κορεσμένου ατμού τύπου "solfatara" #3, με μέγιστη θερμοκρασία περίπου $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, είναι η καλύτερη ένδειξη της παρουσίας ρηχών υπόγειων γεωθερμικών συστημάτων που κυριαρχεί η φάση του ατμού. Οι συνθήκες που επικρατούν είναι στο μέγιστο σημείο ενθαλπίας για το νερό (περίπου $230^{\circ}\text{C} / 240^{\circ}\text{C}$ και πίεση $30/35\text{ atm}$) ή σε υψηλότερες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η γρήγορη αδιαβατική εκτόνωση ενός τέτοιου βαθιού ταμειυτήρα που κυριαρχείται από ατμό, προς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που κυριαρχούν στην επιφάνεια,

παράγει μία σταθερή φουμαρολική δραστηριότητα θερμοκρασίας 160 °C (Goguel, 1953; Facca and Tonani, 1964).

Οι φουμαρόλες που βρίσκονται στην θερμοκρασία ζέσης και αναδύουν (#5) βραστό νερό / λάσπη ή θερμές λεκάνες ιλύος (#6) είναι αρκετά διαδεδομένες φυσικές εκδηλώσεις σε ηφαιστειογενείς και γεωθερμικές περιοχές σε όλο τον κόσμο. Η χημική τους σύσταση είναι εξαιρετικά μεταβλητή: από πολύ όξινες και υψηλά αλατώδεις στα πιο ενεργά ηφαιστειακά περιβάλλοντα (κρατήρες, πρηνή κρατήρων, ηφαιστειακές λίμνες) λόγω της συμπύκνωσης όξινων μαγματικών συστατικών (κυρίως HCl, H₂S και SO₂), σε ουδέτερες συστάσεις ακόμη και αλκαλικές και με χαμηλή αλατότητα, όπως για παράδειγμα στα συμπυκνώματα ατμού πλούσιου σε βόριο και αμμωνία του Larderello στην Ιταλία (Duchi, 1992) ή μόνο πλούσιου σε αμμωνία ατμού, όπως στα Geysers (Facca και Tonani, 1964). Η συμπύκνωση της υγρασίας του αέρα δημιουργεί ψευδό-φουμαρολική δραστηριότητα (π.χ. στο Larderello).

Η μειωμένη ροή ατμού αμφότερα σε γεωθερμικά και ηφαιστειακά περιβάλλοντα, μερικές φορές λανθασμένα αναφέρεται ως φουμαρολική δραστηριότητα, και είναι αυτό που ονομάζουν οι ηφαιστειολόγοι: θερμό έδαφος (steaming ground) (#7 και #8). Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από εδάφη με ατμούς που καλύπτει αυτή η περίπτωση: από τον ατμό κοντά σε θερμοκρασία βρασμού σε ατμοσφαιρική πίεση, μέχρι μια θερμοκρασία 6 °C σε ατμίζον έδαφος γύρω από το ηφαίστειο Baekdu στη Βόρεια Κορέα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία ήταν 25 °C, υποδηλώνοντας σαφώς ότι το θερμό ρευστό της περιοχής ανέρχονταν από βάθος. Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, δύναται να υπάρχει ροή θερμού αέρα χωρίς εμφανή εκπομπή ατμού σε ξηρές περιοχές, π.χ. 75°C / 89°C στην Υεμένη και σε περιοχές του ισημερινού ή του τροπικού. Εάν εκδηλώσεις από τον τύπο #1 έως τον τύπο #6 μπορούν να θεωρηθούν ισχυροί δείκτες υψηλών υπόγειων θερμοκρασιών, τότε το έδαφος με ατμούς, ιδιαίτερα μακριά από τις ενεργές ηφαιστειακές περιοχές, μπορεί μερικές φορές να είναι παραπλανητικό. Στην πραγματικότητα, αν και δεν είναι πολύ συνηθισμένη πέρα των ηφαιστειακών περιοχών, η εξάτμιση του θερμού υδροφόρου νερού συναγωγής θερμότητας σε διαπερατούς σχηματισμούς π.χ. ασβεστόλιθος, μπορεί να σχηματίσει εστιασμένη ροή σε ανοικτές ρωγμές, ειδικά το χειμώνα, όταν η συμπύκνωση της υγρασίας στον αέρα δημιουργεί ψευδό-φουμαρολική δραστηριότητα (Ceccarelli, 1987).

Οι τύποι #9 μέχρι #11 είναι οι συχνότερες ενδείξεις θερμών εκπομπών της Γης, δηλαδή θερμές πηγές και εκπομπές υγρών ή ξηρών αερίων (πλούσιες σε CO₂ ή N₂ ή/και μικτές. Αρκετά συχνά αυτές οι εκδηλώσεις είναι μόνο εκπομπές γύρω από ενεργά ηφαίστεια, αλλά η εμφάνισή τους ως σημειακές εκπομπές είναι επίσης χαρακτηριστική των ηπειρωτικών περιοχών κατά μήκος των περιφερειακών ρηγμάτων. Υπάρχουν πολλοί τύποι θερμών πηγών, αλλά οι κατηγορίες τους, από άποψη γεωθερμικής

ερευνητικής σημασίας, μπορεί να τοποθετηθεί, σε παγκόσμια κλίμακα, μεταξύ αυτών των δύο τύπων:

1) Ο καλύτερος τύπος: χαμηλή αλατότητα, χαμηλή ταχύτητα ροής, χαμηλό pH, τύπος HCO_3 , χαμηλή συνολική περιεκτικότητα He, υψηλή αναλογία $^3\text{He}/^4\text{He}$, έντονη αέρια φάση με φυσαλίδες πλούσιες σε CO_2 .

2) Ο χειρότερος τύπος: υψηλή αλατότητα, υψηλή ταχύτητα ροής, υψηλό pH, τύπος Cl ή HCO_3 , υψηλή περιεκτικότητα He, χαμηλή αναλογία $^3\text{He}/^4\text{He}$, ήρεμη αέρια φάση με φυσαλίδες πλούσιες σε N_2 .

Ο πρώτος τύπος #1 είναι η τυπική θερμή πηγή των γεωθερμικών περιοχών, όπως το Larderello στην Ιταλία, όπου η ροή θερμότητας είναι τόσο υψηλή που ακόμη και τα πολύ ρηχά νερά που κυκλοφορούν στους σχηματισμούς των υπερκείμενων στεγανών καλυμμάτων μπορούν να θερμανθούν. Διατηρούν τη σύνθεση $\text{Ca}(\text{Na})\text{-HCO}_3$ των υπόγειων υδάτων (είτε Ca είτε Na ανάλογα με το αν η κυκλοφορία λαμβάνει χώρα σε ανθρακικούς ή πυριτικούς σχηματισμούς. Ο δεύτερος τύπος #2, που ορίστηκε καλά στην Ινδία, είναι το τυπικό νερό βαθιάς κυκλοφορίας με υψηλή αλατότητα και σύνθεση Na-HCO_3 ή Na-Cl , το οποίο θερμαίνεται μέσω της φυσικής γεωθερμικής βαθμίδας μετά από βαθιά κυκλοφορία του ρευστού (Minissale, σελίδες 259-260, 2018).

4.4 Θερμοκρασία του ταμιευτήρα

Ανάλογα με την θερμοκρασία (σύμφωνα με τον κ. Βαρότση, σελίδα 31, 2018) διακρίνονται σε (όπως φαίνεται στο Σχήμα 8):

- Υψηλής θερμοκρασίας: Πρόκειται για συστήματα των οποίων η θερμοκρασία σε βάθος 1 km υπερβαίνει τους 150°C.
- Μεσαίας θερμοκρασίας: Στα συστήματα αυτά η θερμοκρασία σε βάθος 1 km κυμαίνεται μεταξύ 150°C - 200°C.
- Χαμηλής θερμοκρασίας: Η θερμοκρασία στους ταμιευτήρες αυτούς δεν ξεπερνάει τους 200°C.

Ανάλογα με την ενθαλπία διακρίνονται σε:

- Υψηλής ενθαλπίας: Το γεωθερμικό ρευστό έχει ειδική ενθαλπία μεγαλύτερη των 800 KJ/Kg.
- Χαμηλής ενθαλπίας: Η ειδική ενθαλπία του γεωθερμικού ρευστού δεν ξεπερνάει τα 800 KJ/Kg, ενώ η θερμοκρασία είναι γενικά χαμηλότερη των 190°C.

Οι προαναφερθέντες τρόποι ταξινόμησης συνδέονται μεταξύ τους διότι το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης είναι ταυτόσημο στις περισσότερες περιπτώσεις. Όταν χαρακτηρίζουμε ένα γεωθερμικό πεδίο ως υψηλής θερμοκρασίας είναι κατά κανόνα και υψηλής ενθαλπίας παρόλο που οι δυο χαρακτηρισμοί απορρέουν από διαφορετικές έννοιες.

4.4.1 Συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας

Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας (αποκαλούμενα επίσης χαμηλής ενθαλπίας) εμφανίζονται πιο συχνά από τα υψηλής θερμοκρασίας. Μπορούν να προκύψουν σε διάφορες γεωλογικές τοποθεσίες τόσο αυξημένης όσο και κανονικής ροής θερμότητας καθώς η θερμική ανωμαλία είναι μικρή έως ανύπαρκτη. Η βαθιά κυκλοφορία του ρευστού γίνεται μέσω ρηγμάτων ή διαπερατών στρωμάτων και όχι λόγω κάποιας μαγματικής πηγής θερμότητας. Το υπόγειο νερό θερμαίνεται λόγω της φυσιολογικής αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος. Η τεκτονική ανύψωση θερμών πετρωμάτων από βάθος και η υπολειπόμενη θερμότητα από περιβάλλοντα πλουτώνια πετρώματα μπορούν να παράγουν πεδία χαμηλής θερμοκρασίας. Η φυσική θερμική ροή και η υπόγεια κυκλοφορία των ρευστών είναι σημαντικά για τη μεταφορά ενέργειας από μεγάλα βάθη και την αποθήκευση της σε υδροπερατούς λιθολογικούς σχηματισμούς σχετικά κοντά στην επιφάνεια.

Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας βρίσκονται σε όλη την Ευρώπη, την Ασία και κατά μήκος ορισμένων περιοχών του Ειρηνικού. Περιοχές με εφελκιστικού τύπου τεκτονική, φιλοξενούν συνήθως λεκάνες Τριτογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας, οι οποίες έχουν μικρή θερμική ανωμαλία. Λόγω των «ανοικτών» ρηγμάτων, της ύπαρξης υδροφόρων οριζόντων με καλή μεταβιβασιμότητα και των αδιαπέρατων σχηματισμών πάνω από αυτούς, επιτρέπεται η σύντομη άνοδος θερμών ρευστών βαθιάς

προέλευσης και η μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής και πολλές φορές μέσης ενθαλπίας. Σε παλαιότερες γεωλογικά λεκάνες ή σε περιοχές γεωτεκτονικά σταθερές με ανάλογες συνθήκες, μπορεί επίσης να εντοπιστούν ταμειυτήρες χαμηλής ενθαλπίας (π.χ. 75°C σε βάθος 1.5 – 2 χλμ.) (Baba et. al., 2014).

Η δομή των πεδίων χαμηλής θερμοκρασίας δεν μπορεί να αναπαρασταθεί από κάποιο εξιδανικευμένο μοντέλο δεδομένης της ποικίλης προέλευσης αυτών των τύπων συστημάτων. Συνήθως πληρούν νερά, με συγκεντρώσεις ολικών διαλυμένων στερεών περίπου 1000 mg/kg ή λιγότερο, μέσω θερμών πηγών στους 30 με 65 βαθμούς κελσίου. Πολλές τέτοιες πηγές αποθέτουν ορυκτά μεταβαλλόμενης διαλυτότητας (ασβεστίτης, γύψος) με ελάχιστη ή καθόλου απόθεση πυριτίου. Η σύνθεση των υδάτων εξαρτάται από τη σχετική συνεισφορά των υδάτων του σχηματισμού και των μετεωρικών υδάτων. Τα ύδατα που πληρούν ασβεστόλιθο ή χρησιμοποιούν άλλους ανθρακικά πλούσιους σχηματισμούς ως ταμειυτήρες, θα είναι πλούσια σε διττανθρακικά, με ενδεχομένως χαμηλές συγκεντρώσεις χλωρίου. Νερά από ταμειυτήρες που αποτελούνται από θαλάσσια κλαστικά ιζήματα, ειδικά από σχιστόλιθο, συχνά έχουν υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου, βορίου και διοξειδίου του άνθρακα (Baba et. al., 2014).

1) Υδροφορείς σε ιζηματογενείς λεκάνες

Οι ταμειυτήρες αυτοί εμφανίζονται συχνά σε πολλές ιζηματογενείς λεκάνες σε όλο τον κόσμο. Ο υδροφόρος ορίζοντας έχει την ίδια θερμοκρασία σε όλη την έκταση της λεκάνης στο ίδιο περίπου βάθος. Τα ρευστά είναι στάσιμα και συνήθως υψηλής αλατότητας. Οι υδροφόροι αυτοί καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις (500 km² ή και περισσότερα). Στην περίπτωση που η συναγωγή θερμότητας απουσιάζει (γεωθερμικό σύστημα με αγωγή θερμότητας του Reed, 1983), η θερμοκρασία του υδροφόρου ορίζοντα ελέγχεται από τη μέση θερμική ροή, τη μέση θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα (Hochstein, 1990).

Παραδείγματα: Υδροφόροι ορίζοντες στις λεκάνες του Παρισιού και της Ακουιτανίας (Γαλλία), στη λεκάνη του Pannonian (Ουγγαρία), ιζηματογενείς λεκάνες στο Wyoming (ΗΠΑ).

Το παράδειγμα της λεκάνης του Παρισιού

Τα ύδατα της περιοχής ποικίλλουν ευρέως όσον αφορά τη σύσταση και τη ολικά διαλυμένα στερεά (TDS). Η μεταβολή του TDS δεν συσχετίζεται με τις θερμοκρασίες του υποβάθρου, αντανakλώντας την σύνθετη ανάμιξη και κυκλοφορία των ρευστών. Η ύπαρξη θαλασσινού νερού που τροποποιήθηκε με διεργασίες διαγένεσης αναγνωρίστηκε από την αναλογία Cl:Br για όλα τα ρευστά. Ωστόσο, η διακύμανση του βορίου ή του θειικού ιόντος που περιέχουν τα ρευστά, επιτρέπει την διάκριση

αρκετών ομάδων μεταξύ τους, με βάση τις μεταβολές των αναλογιών $\text{Cl}:\text{B}$ και $\text{Cl}:\text{SO}_4$. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν ειδικότερα για το θείο δείχνουν τη βακτηριακή αναγωγή των θειικών ιόντων, όπως υποδηλώνει η μεγάλη ποσότητα SO_4 και η ισοτοπική σύσταση του θείου στο θειικό ιόν. Η σχέση $\delta^{18}\text{O}$ - δD υποδεικνύει ότι υπάρχει επαναφόρτιση των υδάτων για μερικές περιοχές (Marty et. al., 1988).

II) Υδροφόροι ορίζοντες υποβάθρου κάτω από ιζηματογενείς λεκάνες

Σε αυτόν τον τύπο συστήματος υπάρχει ένας πολύ διαπερατός υδροφόρος ορίζοντας μέσα ή κοντά στην οροφή του υποβάθρου που καλύπτεται από μια σειρά νεότερων ιζηματογενών πετρωμάτων χαμηλής διαπερατότητας. Η εξαναγκασμένη συναγωγή θερμότητας του ρευστού δημιουργεί ένα μοτίβο ροής, όπου θερμά ρευστά μεταφέρονται από το κέντρο της λεκάνης προς τα όρια της λεκάνης ή προς ένα αντίκλινο της λεκάνης (Hochstein & Yang, 1988). Ο υδροφόρος ορίζοντας υποβάθρου κάτω από τα όρια του ή το αντίκλινο αποτελεί έναν χώρο αποθήκευσης ρευστού χαμηλής θερμοκρασίας και ρευστά με θερμοκρασίες μεταξύ 50°C και 65°C μπορούν συχνά να βρεθούν σε βάθος πολύ μικρό, της τάξης του 0.5 - 1 χλμ. Η περιοχή από την οποία μπορούν να εκχυλίζονται τα θερμά ρευστά είναι μεγάλη (της τάξεως μερικών εκατοντάδων km^2). Η αλατότητα των ρευστών είναι χαμηλή και το μακροπρόθεσμο δυναμικό ενέργειας είναι παρόμοιο με αυτό των υδροφορέων στις ιζηματογενείς λεκάνες (Hochstein, 1990).

Παραδείγματα: Πολλά συστήματα στην Κίνα που σχετίζονται με καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες στους δολομίτες της Σιναίας, παρόμοια συστήματα έχουν αναφερθεί για την Ιταλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ.

Το παράδειγμα της περιοχής Nurra, Σαρδηνία

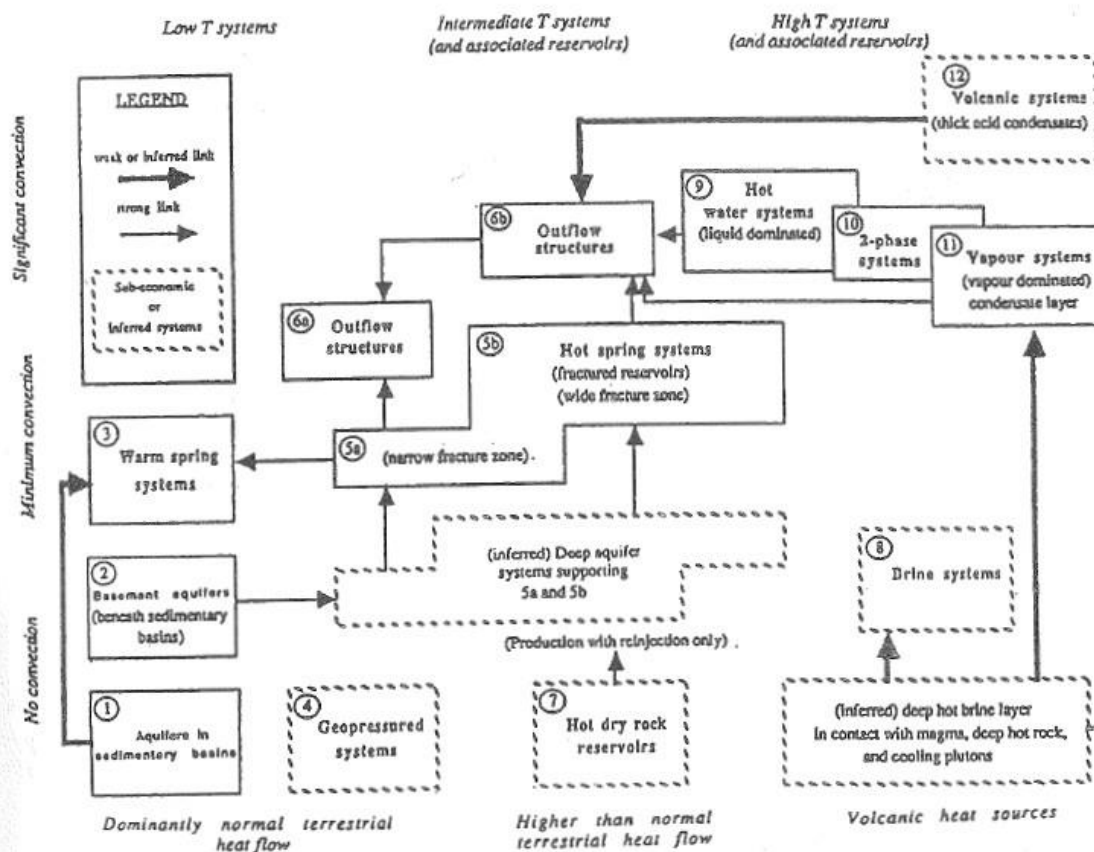
Στα ύδατα των πηγών, τα κύρια ανιόντα είναι είτε διττανθρακικά είτε χλωριούχα, ενώ τα δείγματα υπόγειων υδάτων μπορούν να χαρακτηριστούν ως διττανθρακικά, χλωριούχα ή θειικά. Τα υπόγεια ύδατα που ανήκουν στον Ιουρασικό υδροφορέα παρουσιάζονται ως ασβεστούχα – διττανθρακικά, στα οποία όταν το TDS είναι πάνω από 1.1 g/l, μετατρέπονται σε Ca-SO_4 ή Ca-Cl_2 . Τα υπόγεια ύδατα που ανήκουν στον Ολιγο-Μειοκενικό υδροφορέα παρουσιάζονται ως Na-Cl-HCO_3 , ενώ μετατρέπονται σε Na-Cl όταν το TDS υπερβαίνει τα 2 g/l. Τα ύδατα από τον Τριασικό υδροφόρο ορίζοντα ποικίλλουν από Ca-SO_4 έως Ca-Cl_2 και τελικά μετατρέπονται σε Na-Cl ανάλογα με την αύξηση του TDS. Τα Κρητιδικά υπόγεια ύδατα παρουσιάζονται ως Ca ή Na-HCO_3 , τα οποία μετατρέπονται σε Ca ή Mg-Cl_2 και Na-Cl ανάλογα με την αύξηση της αλατότητας. Τα υπόγεια ύδατα του Τεταρτογενούς υδροφόρου ορίζοντα είναι ως επί το πλείστον Ca-Cl_2 , μετατρέπονται σε Na-Cl σε υψηλότερο TDS. Τα ύδατα που χαρακτηρίζονται χλωριούχου - θειικού άλατος περιέχουν πραγματικά χαμηλά ποσοστά θειικού άλατος. Έτσι, η αύξηση

του TDS σχετίζεται κυρίως με την αύξηση του χλωρίου. Ποσοστά θειικού άλατος μεγαλύτερα του 20% εντοπίζονται μόνο στα υπόγεια ύδατα από τους υδροφόρους ορίζοντες του Τριασικού και του Ιουρασικού (Ghiglieri, 2008).

III) Συστήματα θερμών πηγών

Τα συστήματα αυτά είναι πολύ συνηθισμένα και σχετίζονται με βαθιά ρήγματα που παρουσιάζουν υψηλές διαπερατότητες. Η συναγωγή θερμότητας των πετρωμάτων, χρησιμοποιώντας τις διόδους ροής, μεταφέρει θερμότητα από τα βαθύτερα σημεία των ρηγμάτων. Τα συστήματα βρίσκονται συχνά σε έδαφος με ομαλό ανάγλυφο, μερικές φορές στην τομή βαθιών ρηγμάτων (Reed, 1983). Η θερμότητα που μεταφέρεται φυσικά με αγωγή από αυτά τα συστήματα, σπάνια υπερβαίνει το 1 MW. Η αγωγή θερμότητας μπορεί να εξουδετερωθεί εάν εισχωρήσουν υπόγεια ύδατα σε ένα παρακείμενο τμήμα του ρήγματος (Hochstein, 1990).

Παραδείγματα: Πολλά συστήματα πηγών στους πρόποδες των βουνών σε όλο τον κόσμο



Σχήμα 8: Επισκόπηση των διάφορων τύπων γεωθερμικών συστημάτων ανάλογα με την θερμοκρασία (Hochstein, 1990)

4.4.2 Συστήματα υψηλής θερμοκρασίας

Τα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας (αποκαλούμενα επίσης υψηλής ενθαλπίας) βρίσκονται σε περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι αρκετές φορές υψηλότερη από τον μέσο όρο θερμοκρασίας $-30^{\circ}\text{C} / \text{km}$, και όπου η θερμοκρασία του πετρώματος είναι αρκετών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου σε βάθη μόνο λίγων χιλιομέτρων. Τυπικά η θερμοκρασία του ρευστού ξεπερνά τους 180°C σε βάθος έως και 3χλμ. Οι θέσεις των γεωθερμικών πεδίων είναι κατά κανόνα τεκτονικά ελεγχόμενες και βρίσκονται συχνά σε περιοχές που παρουσιάζουν ρήγματα, τάφρους και σε κατεστραμμένες καλντέρες, με βάθος ταμιευτήρα περίπου 1 - 3 χλμ. Τυπικές τοποθεσίες είναι γύρω από τα ενεργά όρια τεκτονικών πλακών όπως οι ζώνες υποβύθισης, στις ζώνες ρηγμάτων και στις ορογενετικές ζώνες.

Τα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας είναι συχνά ηφαιστειογενή, με την θερμότητα να παρέχεται από περιβάλλουσες μάζες συνήθως ρυολιθικής - ανδεσιτικής σύνθεσης. Οι ζεστές πηγές τυπικά πληρούνται με χλωριούχα νερά, που έχουν συνολικά διαλυμένα στερεά (TDS) συγκέντρωσης 3000 ως 5000 mg/kg. Συσσωματωμένο πυρίτιο συχνά αποτίθεται γύρω από πηγές κοντά στο σημείο βρασμού. Αλάτι ή πεδία άλμης σχηματίζονται όπου το θαλασσινό νερό εμπλέκεται στο σύστημα ή όπου τα χλωριούχα ρευστά περνούν μέσα από ακολουθίες εβαπορίτη (Baba et. al., 2014).

Όταν στις περιοχές αυτές δεν υφίσταται κυκλοφορία ρευστών, η μεταφορά θερμότητας προς την επιφάνεια γίνεται με αγωγή. Η περατότητα των πετρωμάτων κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι μεγαλύτερη και έτσι επιτρέπει την κατείδυση των ρευστών σε βάθος, όπου αυτά θερμαίνονται από την επαφή τους με τα πετρώματα. Έτσι γίνονται ελαφρύτερα και ανέρχονται προς την επιφάνεια, ενώ τα ψυχρότερα ρευστά παίρνουν την θέση τους και έτσι σχηματίζεται ένα σύστημα κυκλοφορίας που το αποτέλεσμα της θα είναι η συνεχής μεταφορά θερμότητας από βάθος προς την επιφάνεια της Γης. Η ενθαλπία του ρευστού είναι μεγαλύτερη όσο πιο θερμή και όσο πιο κοντά στην επιφάνεια της Γης είναι η εστία (Baba et. al., 2014).

IV) Συστήματα θερμών αλατούχων υδάτων

Η προέλευση αυτών των συστημάτων δεν είναι ικανοποιητικά κατανοητή. Είναι πιθανό ότι ξεκίνησαν ως συστήματα θερμών υδάτων όπου το θερμό νερό διέλυσε εβαπορίτες σε υψηλότερα επίπεδα μέχρις ότου σταματήσει η συναγωγή θερμότητας όταν η πυκνότητα του ρευστού φθάσει σε κρίσιμη τιμή (Rex, 1985). Η θερμοκρασία αυτών των αλμών είναι πολύ υψηλή (έχει παρατηρηθεί ότι φτάνει περίπου 300°C σε βάθος 2 χιλιομέτρων σε δύο συστήματα). Η ουδέτερη απώλεια θερμότητας είναι χαμηλή, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας μεταφέρεται με αγωγή. Παρόλο που δεν υπάρχουν διαθέσιμες λεπτομερείς μελέτες για την απώλεια της θερμότητας, οι απώλειες αυτές φαίνεται να είναι $<30\text{ MW}$. Το

μακροπρόθεσμο δυναμικό ενέργειας φαίνεται να είναι παρόμοιο με αυτό άλλων συστημάτων υψηλής θερμοκρασίας (Hochstein, 1990).

Παραδείγματα: Αρκετά συστήματα στην κοιλάδα Imperial (ΗΠΑ), το ερευνητικό φρέαρ στο Cesano (Ιταλία), το Asal (Τζιμπουτί), τη Μήλο (Ελλάδα).

V) Συστήματα θερμών υδάτων

Τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων αυτών των συστημάτων είναι γνωστά και έχουν αναπτυχθεί για αυτά λεπτομερή μοντέλα (Elders, 1976; Grant, 1982). Η απόθεση ορυκτών συνήθως συμβαίνει στο άνω μέρος του ταμιευτήρα και στην οροφή όπου τα καυτά αλατούχα ρευστά έρχονται σε επαφή με ψυχρότερα νερά. Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω του συστήματος εκφορτίζεται στην επιφάνεια. Σε αυτό το υδρολογικό περιβάλλον ο ταμιευτήρας που παράγει θερμότητα βρίσκεται κάτω από την περιοχή που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά ενεργής εκφόρτισης (Hochstein, 1990).

VI) Ηφαιστειακά γεωθερμικά συστήματα

Αυτά τα συστήματα δεν είναι καλά κατανοητά. Φαίνονται να καλύπτονται από ένα παχύ, όξινο στρώμα στο οποίο παρατηρείται υγροποίηση των αερίων (Heming, 1982). Ο ατμός που έχει ανοδική ροή περιέχει ηφαιστειακά αέρια με υψηλή δραστικότητα, τα οποία μπορούν να εκφορτιστούν μέσω του στρώματος υγροποίησης. Όταν τα υγροποιημένα αέρια εκφορτίζονται από όξινες πηγές, συχνά περιέχουν υψηλή ποσότητα χλωρίου (συμπύκνωση του HCl). Τα ηφαιστειακά συστήματα δεν έχουν μελετηθεί λεπτομερώς και η δομή του ταμιευτήρα κάτω από το στρώμα υγρών συμπυκνωμάτων είναι ακόμη άγνωστη (Hochstein, 1990).

Το παράδειγμα της Ισλανδίας

Η κατανομή των κύριων κατιόντων (Na, K, Ca) και των ιόντων υδρογόνου ελέγχεται από ισορροπία ιοντοανταλλαγής, η κινητικότητα του πυριτίου ρυθμίζεται από τη διαλυτότητα του χαλαζία, το ανθρακικό ιόν (CO_3^{2-}) από τη διαλυτότητα του ασβεστίου και του φθορίου (F^-) προφανώς με αντίδραση ιοντοανταλλαγής. Σύμφωνα με τον Arnorsson (1978a) φαίνεται επίσης πιθανό ότι οι δραστικότητες του Mg^{2+} ελέγχονται από ισορροπία ιοντοανταλλαγής. Υπάρχει κάποια αβεβαιότητα σχετικά με τους παράγοντες που περιορίζουν την κινητικότητα των θειικών αλάτων. Η φύση των αναλυτικών δεδομένων δείχνει, ωστόσο, ότι η χημική ισορροπία με μέταλλα ή/και άλλες διαλυμένες ουσίες περιορίζει την κινητικότητα του συστατικού αυτού στο νερό. Κατά συνέπεια, η χημική ισορροπία που περιλαμβάνει αλληλεπίδραση του νερού με γεωθερμικά ορυκτά καθορίζει την κινητικότητα των εννέα βασικών συστατικών στα γεωθερμικά ύδατα (SiO_2 , pH, Na, K, Ca, Mg, CO_2 , SO_4 , F). Τα υπόλοιπα κύρια συστατικά είναι το H_2S (ολικό) και το Cl (Arnorsson, σελίδα 12, 1978).

Φαίνεται πως η κύρια σύσταση των στοιχείων των βαθιών, υψηλής θερμοκρασίας γεωθερμικών ρευστών, ελέγχεται μόνο από δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Αυτές είναι η θερμοκρασία και η τροφοδοσία στο νερό του αδιάλυτου στοιχείου του χλωρίου, γεγονός που υποδεικνύει ότι το στοιχείο αυτό δεν κρυσταλλώνεται στα γεωθερμικά ορυκτά. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πιο περίπλοκη. Επηρεάζει την τιμή των διαφόρων σταθερών ισορροπίας που περιγράφουν τη χημική ισορροπία μεταξύ των διαλυμένων ουσιών και την αντίστοιχη ισορροπία μεταξύ των διαλυμένων ουσιών και του ορυκτού, αλλά μπορεί επίσης να επηρεάσει την εκροή χλωρίου από το πέτρωμα. Μια μεγάλη ποσότητα χλωρίου, σημαίνει υψηλές συγκεντρώσεις αυτού του στοιχείου στο νερό, είτε πρόκειται για θαλάσσιο νερό, πλούσια σε χλώριο πετρώματα, είτε για μαγματική πηγή. Εκτός από τις διάφορες χημικές ισορροπίες, είναι η ποσότητα χλωρίου που εισέρχεται στο διάλυμα που καθορίζει ως επί το πλείστον τις απόλυτες συγκεντρώσεις των κυριότερων κατιόντων στο διάλυμα, αν και οι ισορροπίες ιοντικής ανταλλαγής καθορίζουν τη σχετική τους κατανομή (Arnorsson, σελίδα 12, 1978).

Οι χημικές ισορροπίες στα γεωθερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας διαταράσσονται στις ζώνες ανοδικής ροής όπου εμφανίζονται φαινόμενα απαέρωσης και το νερό ψύχεται είτε μέσω εκτόνωσης είτε μέσω αγωγής. Η ανάμιξη με κρύο νερό στα όρια των ζωνών ανοδικής ροής μπορεί εξίσου να διαταράξει αυτές τις χημικές ισορροπίες, αλλά θεωρείται ότι η ανάμιξη είναι γενικά λιγότερο σημαντική στην διατάραξη αυτών των ισορροπιών από την εκτόνωση και την ψύξη (Arnorsson, σελίδα 12, 1978).

4.5 Γεωθερμικά συστήματα στην Ελλάδα

Οι περιοχές με αυξημένη ροής θερμότητας στην Ελλάδα χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες που αναλύονται περαιτέρω ως εξής:
(Baba & Bundschuh & Chandrasekaram, 2014)

1) Περιοχές του οπισθότοξου

Οι περιοχές του οπισθότοξου περιλαμβάνουν τις Τεταρτογενείς ιζηματογενείς λεκάνες του Στρυμόνα καθώς και τα δέλτα του Νέστου και του Έβρου στη βόρεια Ελλάδα. Αυτές οι περιοχές έχουν χαμηλή έως μέση ενθαλπία με εφελκυστική τεκτονική συμπεριφορά, η οποία πιθανότατα έχει επίσης ως αποτέλεσμα ο φλοιός να λεπταίνει. Αυτός ο τύπος τεκτονικής ενεργοποιεί το σχηματισμό ρηγμάτων, τα οποία ευνοούν τη γρήγορη άνοδο των θερμών ρευστών που δικαιολογούν την αυξημένη ροή θερμότητας που παρατηρείται σε αυτές τις περιοχές. Μια πρόσθετη αιτία για την αύξηση της ροής θερμότητας είναι η ύπαρξη πλουτωνισμού πλούσιου σε πυρίτιο. Η περιοχή της Βόρειας Εύβοιας και η λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού ανήκουν στα γεωθερμικά πεδία του οπισθότοξου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της επίδρασης του ρήγματος της Βόρειας Ανατολίας, που εκτείνεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο (μεταξύ της

Σαμοθράκης και της Λήμνου) και καταλήγει στην λεκάνη του Σπερχειού (κεντρική Ελλάδα).

2) Περιοχές του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου

Το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου έχει σχηματιστεί σαν αποτέλεσμα της υποβύθισης του βυθού της Μεσογείου που αποτελεί τμήμα της Αφρικανικής πλάκας, κάτω από την Κρήτη και το Νότιο Αιγαίο. Η εκδήλωση της ηφαιστειότητας κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου, συμπίπτει με τη μετάβαση από συνθήκες συμπίεσης (Μειόκαινο) σε συνθήκες έκτασης (Πλειόκαινο μέχρι σήμερα). Πίσω από το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου υπάρχει μια λεκάνη που δημιουργήθηκε λόγω εφελκυσμού, στην οποία ο φλοιός είναι εκλεπτισμένος. Στη λεκάνη αυτή υπάρχουν διασκορπισμένα ηφαιστειακά κέντρα με λάβες ανώτερου Μειόκαινου μέχρι Τεταρτογενούς ηλικίας. Αν και κάποια από τα ηφαιστειακά αυτά κέντρα έχουν μελετηθεί με αρκετή λεπτομέρεια υπάρχουν διαφορετικές απόψεις για την σχέση τους με το ευρύτερο τεκτονικό περιβάλλον. Ορισμένοι θεωρούν ότι η ηφαιστειότητα αυτή, συνδέεται μάλλον με τις συνθήκες εφελκυσμού που επικρατούν στο Βόρειο Αιγαίο παρά με την ύπαρξη της ζώνης υποβύθισης. Άλλοι όμως σημειώνουν ότι αυτός ο τύπος της ηφαιστειότητας σχετίζεται με το βάθος στο οποίο βρίσκεται η υποβυθιζόμενη πλάκα, αν και οι εφελκυστικές συνθήκες διευκολύνουν την άνοδο μικρών ποσοτήτων μάγματος.

3) Περιοχές χαμηλής ενθαλπίας της δυτικής Ελλάδας

Τα γεωθερμικά πεδία της δυτικής Ελλάδας ανήκουν στην ομάδα χαμηλής ενθαλπίας. Το γεωθερμικό πεδίο στις Συκιές της Άρτας που αναπτύχθηκε σε αλλουβιακά ιζήματα είναι ένα τυπικό γεωθερμικό πεδίο για αυτή την ομάδα. Εκτός από τις αλλουβιακές αποθέσεις, συμμετέχουν επίσης ιζήματα του Νεογενούς που περιλαμβάνουν εναλλαγές άμμου, αργίλου και ψαμμίτη. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της Ιόνιας ζώνης υπόκεινται σε αυτά τα ιζήματα, των οποίων το πάχος κυμαίνεται από 280 m στα δυτικά σε 480 m στα ανατολικά λόγω του διαφορετικού τεκτονισμού της περιοχής. Τα ανθρακικά πετρώματα αποτελούν τον ταμιευτήρα του θερμού ύδατος. Ο τεκτονισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην διείσδυση του μετεωρικού ύδατος σε μεγαλύτερα βάθη, καθώς και στην κυκλοφορία του θερμού ύδατος και την ανοδική του πορεία. Η γεωθερμική βαθμίδα υπολογίζεται μεταξύ 5 και 11°C ανά 100m.

4.6 Η εξέλιξη των γεωθερμικών συστημάτων

Η εξέλιξη των γεωθερμικών ρευστών σε δυναμικά συστήματα που κυριαρχούν τα ρευστά, μπορεί να συνοψιστεί ως εξής. Τα μετεωρικά νερά διεισδύουν στον φλοιό της Γης μέσω διαπερατών ζωνών και κυκλοφορούν σε βάθη μέχρι περίπου 5 – 7 χλμ. Καθώς κατεισδύουν, θερμαίνονται, αντιδρούν με τα υδροπερατά πετρώματα και ανέρχονται μέσω συναγωγής. Αυτά τα νερά βάθους είναι τα αρχικά γεωθερμικά χλωριούχα ρευστά και οι υπόλοιποι τύποι γεωθερμικών νερών προέρχονται άμεσα ή έμμεσα από αυτά τα χλωριούχα νερά. Σε βάθος, τα ρευστά τυπικά περιέχουν 1000 - 10.000 mg/kg Cl σε θερμοκρασίες περίπου 350°C. Τα ιόντα της "διαλυτής ομάδας" είναι τα πρώτα που εκπλένονται από τα πετρώματα λόγω των υδάτων, ακολουθούμενα από άλλα στοιχεία που ελέγχονται από αντιδράσεις που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Αυτές οι αντιδράσεις αλλάζουν την αρχική ορυκτολογία των πετρωμάτων, ανάλογα με την συγκέντρωση των ιόντων του νερού και την θερμοκρασία του. Τα ρευστά συγκρατούνται μέσα σε έναν διαπερατό υδροφόρο ορίζοντα σχηματίζοντας έναν ταμιευτήρα στον οποίο δημιουργούνται ισορροπίες ορυκτών - ρευστών και μία σειρά δευτερογενών εξαλλοιώσεων των ορυκτών. Καθώς τα χλωριούχα ρευστά εξέρχονται από τον ταμιευτήρα και αναδύονται στην επιφάνεια, μπορεί να έρθουν σε σημείο βρασμού σχηματίζοντας μια ζώνη βρασμού δύο φάσεων (ατμός + υγρό). Το υπολειμματικό χλωριούχο νερό μπορεί να εκφορτιστεί στην επιφάνεια σε θερμές πηγές ή να μεταναστεύσει πλευρικά για να αναδυθεί τελικά πολλά χιλιόμετρα μακριά από τη ζώνη ανοδικής ροής. Οι ατμοί από αυτή τη ζώνη βρασμού μπορούν να μεταναστεύσουν στην επιφάνεια ανεξάρτητα από την υγρή φάση και να εκφορτιστούν ως φουμαρόλες. Εναλλακτικά, οι ατμοί μπορούν να διαλυθούν σε υπόγεια ύδατα ή να συμπυκνωθούν σε ψυχρότερο έδαφος για να σχηματίσουν ύδατα θερμού ατμού, όξινα θειικά ή ανθρακικά (Nicholson, σελίδα 7, 1993).

Η υδροθερμική εξαλλοίωση είναι ένας γενικός όρος που περιλαμβάνει την ορυκτολογική και την χημική απόκριση των πετρωμάτων σε ένα μεταβαλλόμενο θερμικό και χημικό περιβάλλον παρουσία ζεστού νερού, ατμού ή αερίου.

Η υδροθερμική εξαλλοίωση προκύπτει μέσω φάσεων μεταμόρφωσης, της ανάπτυξης νέων ορυκτών, της διάλυσης και της καθίζησης των ορυκτών και των αντιδράσεων ιοντοανταλλαγής. Αν και ο αρχικός τύπος πετρώματος επηρεάζει τη δευτερεύουσα ορυκτολογία, η επίδρασή αυτή είναι μικρότερη από εκείνη που οφείλεται στη διαπερατότητα, τη θερμοκρασία και τη σύσταση του ρευστού. Ο Browne (1978) σημείωσε ότι σε θερμοκρασίες 250°C - 280°C βρέθηκε η κοινή εμφάνιση χαλαζία, αλβίτη, K-άστριου, χλωρίτη, Fe-επίδοτου, ιλίτη, ασβεσίτη, σιδηροπυρίτη σε βασάλτες στην Ισλανδία, ψαμμίτες στην Imperial Valley, ρυόλιθους στη Νέα Ζηλανδία και ανδεδίτες στην Ινδονησία (Henley & Ellis, σελίδες 10-17, 1983).

Με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής διαπερατότητα, σε θερμοκρασίες άνω των 100°C – 150°C προκύπτει μια ανταλλαγή ισοτόπων οξυγόνου κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ ύδατος και ορυκτών πετρωμάτων, ιδιαίτερα των λεπτόκοκκων και στρωματομένων αργιλοπυριτικών και του ασβεστίτη. Ωστόσο, ο πρωτογενής χαλαζίας (quartz) ανταλλάσσει αργά ισότοπα ακόμη και σε θερμοκρασίες άνω των 300°C. Για πολλά λεπτόκοκκα ορυκτά σε διαπερατά πετρώματα, η ισοτοπική ισορροπία προσεγγίζεται σε θερμοκρασίες άνω των 230°C - 250°C, ενώ για δευτερογενή χαλαζία και ασβεστίτη που εναποτίθενται σε ρωγμές, η ισοτοπική ισορροπία επιτυγχάνεται με διαλύματα (Henley & Ellis, σελίδες 10-17, 1983)..

Τα πρωτογενή ορυκτά ποικίλλουν επίσης σημαντικά ανάλογα με την επιδεκτικότητά τους στην εξαλλοίωση. Το ηφαιστειακό γυαλί είναι το πλέον δραστικό, καθώς αλλοιώνεται πρώτα σε οπάλιο, σμεκτίτη, ασβεστίτη ή ζεόλιθο και κατόπιν σε αργίλους. Η παρουσία τέτοιων ενδιάμεσων φάσεων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις δραστικότητες των ιόντων του υδρογόνου και του διοξειδίου του πυριτίου, καθώς και τις χημικές αντιδράσεις τους. Μια φθίνουσα τάξη επιδεκτικότητας στα ορυκτά είναι περίπου ολιβίνης, μαγνητίτης, βιοτίτης = πλαγιόκλαστο (Steiner, 1968). Ο χαλαζίας είναι συχνά αδρανής σε γεωθερμικά ρευστά σε θερμοκρασίες έως 300°C, αλλά υπάρχουν στοιχεία από την Cerro Prieto ότι η επανακρυστάλλωση προκύπτει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο Steiner (1968) έδειξε πως οι διαδοχικά υψηλές θερμοκρασίες επηρέασαν τον σχηματισμό ορυκτών της ομάδας αργιλικού μαρμαρυγία μετά την εξαλλοίωση του πλούσιου σε πυρίτιο ηφαιστειακού γυαλιού από αραιά γεωθερμικά ύδατα. Μεταβολή σε ασβεστιτικούς ζεόλιθους και μοντμοριλλονίτη προέκυψε σε θερμοκρασίες 100°C - 120°C. Με την αύξηση της θερμοκρασίας προέκυψε μοντμοριλλονίτης – ιλλίτης με τους χώρους του ορυκτού που πληρούνταν από βασάλτη να γίνονται μικρότεροι μέχρις ότου να εμφανιστεί ιλλίτης στους 230°C. Ο Steiner έδειξε μια τάση στους ασβεστιτικούς ζεόλιθους από μορδενίτη (πιλιόλιθος) σε θερμοκρασίες περίπου 100°C, μέσω λειμωνίτη από 150°C έως 200°C, στο Wairakite σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Henley & Ellis, σελίδες 10-17, 1983).

Σε θερμοκρασίες άνω των 180°C, οι συγκεντρώσεις των ορυκτών σε γεωθερμικά συστήματα σχηματίζονται γενικά από διαλύματα κορεσμένα όσον αναφορά τον χαλαζία, αλλά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ιδιαίτερα σε υαλώδεις πετρώματα, οι δραστικότητες του διοξειδίου του πυριτίου μπορεί να είναι υψηλότερες και να προσεγγίζουν τις διαλυτότητες του χαλκηδόνιου ή της άμορφης πυριτίας. Κατά συνέπεια, οι εμφανίσεις ορυκτών χαμηλής θερμοκρασίας, ιδιαίτερα οι ζεολιθικές, είναι πιο μεταβλητές (Browne, 1978) και ευνοούν τους πλούσιους σε διοξείδιο του πυριτίου ζεόλιθους όπως ο μορδενίτης.

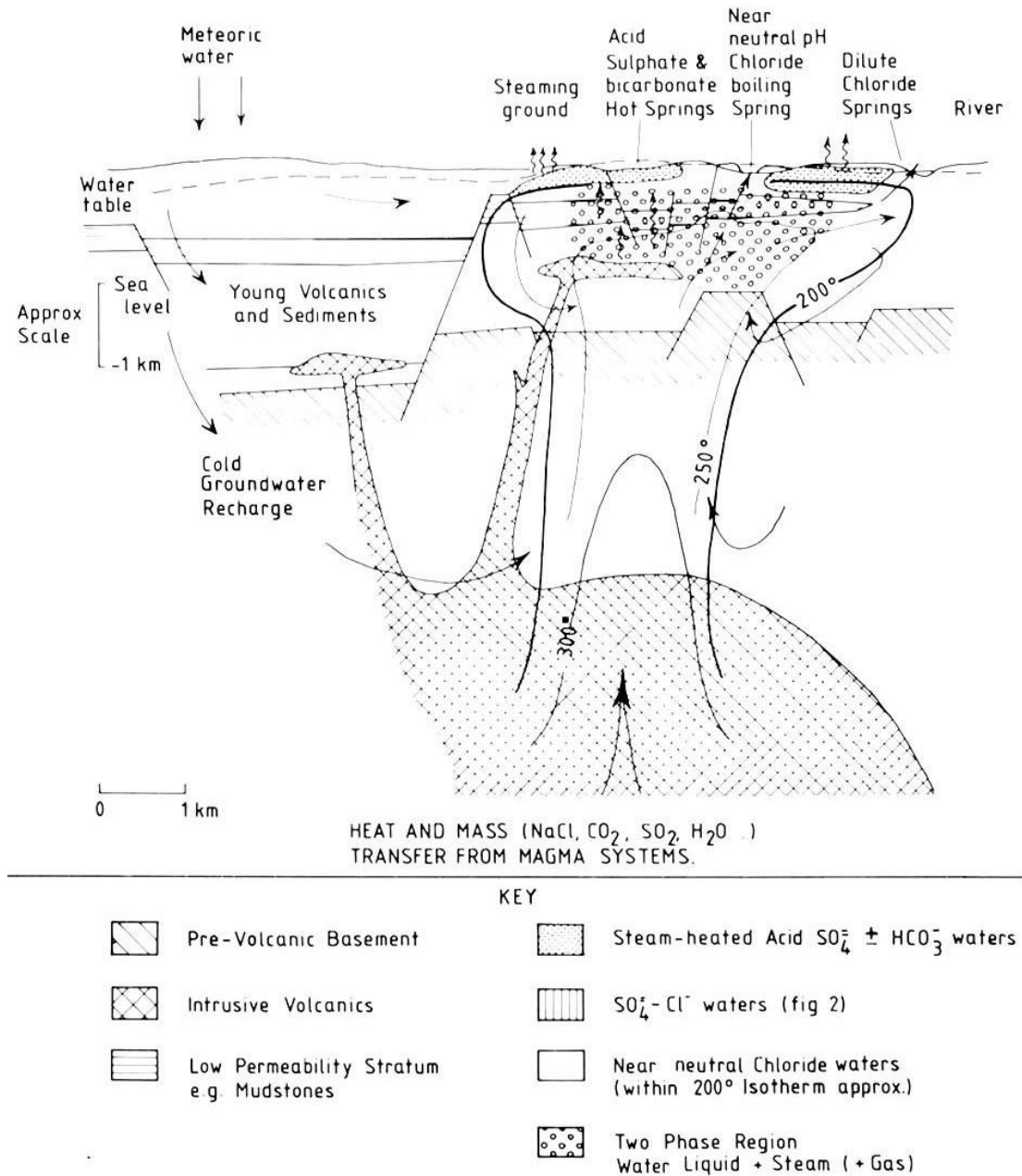
Η γενική ακολουθία της υδροθερμικής εξαλλοίωσης καθώς αυξάνεται το βάθος σε ένα γεωθερμικό σύστημα σχετίζεται μέσω της θερμοκρασίας έως

το σημείο βρασμού με την σχέση με το βάθος για την περιεκτικότητα σε αέριο και την ενθαλπία της βαθιάς εισροής μονοφασικού ρευστού στο σύστημα. Στην διφασική περιοχή, η απώλεια ατμού με CO₂, H₂S και άλλα διαλυμένα αέρια οδηγεί σε αύξηση του pH και στην ανάπτυξη μιας χαρακτηριστικής εμφάνισης ασβεστίτη και αλκαλικού άστριου (Browne & Ellis, 1970), ιδιαίτερα στις ζώνες ανοδικής ροής.

Λόγω των αισθητών συγκεντρώσεων CO₂ στα γεωθερμικά ρευστά και της χαμηλής διαλυτότητας του ασβεστίου σε υψηλές θερμοκρασίες, η μέγιστη δραστηριότητα του ασβεστίου στο διάλυμα διαφέρει από το ένα σύστημα στο άλλο. Το γεγονός αυτό, μαζί με την διακύμανση της δραστηριότητας του διοξειδίου του πυριτίου σε ορισμένα νερά χαμηλής θερμοκρασίας, εξηγεί τη μεγάλη ποικιλία ορυκτών του ασβεστίου που απαντώνται στα γεωθερμικά συστήματα (Henley & Ellis, σελίδες 10-17, 1983).

Οι μεταβολές στη σύνθεση των κύριων στοιχείων των πετρωμάτων κατά τη διάρκεια της εξαλλοίωσης αντανακλούν ορυκτολογικές μεταβολές, όπως η ανάπτυξη του K-άστριου και του μαρμαρυγία, ή η εναπόθεση χαλαζία. Δευτερεύοντα στοιχεία μπορούν να ληφθούν σε μεταλλικά πλέγματα εξαλλοίωσης ή μπορεί να σχηματίσουν διακριτές ορυκτές φάσεις όπως οξειδία ή σουλφίδια. Έτσι δύσκολα μπορούν να ανιχνευθούν σε μικρές ποσότητες (Henley & Ellis, σελίδες 10-17, 1983).

Συγκρίνοντας τους νέους με τους υδροθερμικά εξαλλοιωμένους ρυολίθους στο σύστημα Wairakei, ο Steiner έδειξε μια χαρακτηριστική μείωση του νατρίου και του ασβεστίου και αύξηση του καλίου και του διοξειδίου του πυριτίου σε όλες τις ζώνες εξαλλοίωσης. Στις εμφανίσεις μοντιοριλλονίτη κοντά στην επιφάνεια και στις ενδιάμεσες μαρμαρυγιακές ζώνες αργίλου και ζεολίθου, οι συγκεντρώσεις Al, Fe, Mn, Mg και P ελάχιστα άλλαξαν, αλλά αυτές είχαν αποθεθεί στις ζώνες εξαλλοίωσης υψηλότερου βαθμού. Η συμπεριφορά των Pb και Ag ήταν μεταβλητή, πιθανώς λόγω της συγκέντρωσής τους σε σουλφίδια, που συμβαίνουν σε κάποιες από τις ζώνες εξαλλοίωσης. Η ανάλυση υδροθερμικού χαλαζία έδειξε περιεκτικότητα σε μόλυβδο, αρσενικό και άργυρο 150, 300 και 50 ppm, αντίστοιχα.



Σχήμα 9: Μεταφορά θερμότητας και μάζας στα μαγματικά συστήματα
(Henley & Ellis, 1983)

4.7 Πηγή Θερμότητας

Ένας σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση της ύπαρξης γεωλογικών συστημάτων που βασίζονται στην αγωγή και την συναγωγή θερμότητας είναι η διάκριση μεταξύ των μαγματικών και των μη μαγματικών γεωθερμικών πεδίων. Αυτοί οι όροι αναφέρονται στην πηγή θερμότητας και στην τεκτονική δραστηριότητα. Τα μαγματικά συστήματα μπορούν να δημιουργήσουν γεωθερμικά συστήματα τόσο αγωγής όσο και συναγωγής. Η διαφορά είναι ότι τα συστήματα με μεταφορά θερμότητας με αγωγή, εμφανίζονται μέσα ή κοντά σε πυριγενή πετρώματα που σχετίζονται με υψηλή παραγωγή ραδιενεργής θερμότητας, αλλά δεν υπάρχει ενεργή ηφαιστειότητα καθώς επίσης ήσσονος σημασίας ή καθόλου ενεργός τεκτονισμός. Εναλλακτικά, τα μαγματικά πεδία με μεταφορά θερμότητας με συναγωγή απαιτούν ένα μαγματικό θάλαμο ως πηγή θερμότητας σε περιοχές με ενεργή ηφαιστειότητα ή τεκτονισμό. Στα μαγματικά αυτά συστήματα, δεν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες φυσικών ρευστών (MoECK, σελίδα 871, 2014).

Στα συστήματα που κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, η ανοδική κυκλοφορία των ρευστών μεταφέρει τη θερμότητα από βάθος σε ρηχότερους ταμιευτήρες ή στην επιφάνεια. Αυτά τα συστήματα εμφανίζονται σε περιοχές ενεργού τεκτονισμού, ενεργής ηφαιστειότητας, πρόσφατου πλουτωνισμού (<3 Ma). Η ανοδική ροή θερμότητας προκαλείται από εκτατική τεκτονική. Τα συστήματα αυτά ελέγχονται είτε από ηφαιστειακή δραστηριότητα όπως ένα μαγματικό θάλαμο σε ηφαιστειακές περιοχές, είτε από ρήγματα σε περιοχές φορτισμένες με τάσεις ή και από τα δύο, όπως τα μητρικά πετρώματα στις ζώνες των ρηγμάτων. Τα ρευστά προέρχονται συνήθως από τη διείδυση μετεωρικού ύδατος από ανώτερα επίπεδα και μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν μερική ανάμειξη με μαγματικά ρευστά (MoECK, σελίδα 874, 2014).

Τα ρευστά παίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιοποίηση του γεωθερμικού συστήματος, αφού είναι απαραίτητα για τη μεταφορά θερμότητας από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια. Ο όγκος των παραγόμενων ρευστών καθορίζει εάν ένα γεωθερμικό σύστημα είναι αξιοποιήσιμο. Η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ παραγωγής και έγχυσης θερμών ρευστών επηρεάζει τον οικονομικό χρόνο ζωής ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα.

A) Μαγματικά γεωθερμικά συστήματα – Ηφαιστειακά και πλουτώνια πεδία

Τα μαγματικά συστήματα (Σχήμα 9) μπορούν να βρεθούν σε περιοχές με ενεργή βασαλτική ηφαιστειότητα σε όρια απόκλισης τεκτονικών πλακών όπως στην Ισλανδία, βασαλτική ως ανδεσιτική ηφαιστειότητα κατά μήκος των νησιωτικών τόξων όπως στη Ιάβα, πρόσφατη ανδεσιτική ως δακιτική ηφαιστειότητα όπως κατά μήκος των νότιων Αμερικανικών Άνδεων ή της Ταϊβάν και στην επαφή μεταξύ των ηπειρωτικών πλακών με πρόσφατο πλουτωνισμό, όπως στη νότια περιφέρεια της Αλπικής ορογένεσης. Οι θάλαμοι μάγματος σε ηφαιστειακά πεδία, με τα μητρικά τους τήγματα,

αποφορτίζουν βασάλτη και κρυσταλλωμένα τήγματα, ελέγχουν την χημεία του ρευστού, την ροή του ρευστού και το γεωθερμικό σύστημα (Moeck, σελίδα 871, 2014).

Αυτά τα συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε μια ζώνη ανοδικής ροής και μια ζώνη εκροής. Η παρουσία και το μέγεθος της πηγής θερμότητας σε αυτούς τους τύπους μπορεί να ελέγχεται από την ηλικία του μαγματισμού.

Τυπικά ρευστά: Ζώνη ανοδικής ροής: όξινα θειικά νερά, αέρια από μαγματικό θάλαμο: SO_2 , HCl , HF , CO_2 , H_2S , χαμηλό pH από 0 έως 3.

Ζώνη εκροής: Χλωριούχο νάτριο, ουδέτερο έως αλκαλικό pH, ανάμειξη με μετεωρικό νερό, πλούσιο σε Ca, χαμηλό Mg, αέριο: CO_2 και H_2S .

Β) Μη μαγματικά γεωθερμικά συστήματα – Περιοχές εφελκυσμού

Τα μη-μαγματικά γεωθερμικά συστήματα που κυριαρχούνται από τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, είναι είτε ελέγχονται από ρήγματα είτε από διαρροές στα ρήγματα. Σε συστήματα ρηγμάτων χωρίς διαρροές, η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει κατά μήκος του ρήγματος και συνήθως συνδυάζεται με διείσδυση μετεωρικού νερού κατά μήκος του ρήγματος. Σε ελεγχόμενα από διαρροές συστήματα, το ρευστό διαρρέει από το ρήγμα σε διαπερατό στρώμα. Με τη σειρά τους, τα ρευστά μπορούν να μετακινηθούν από ένα διαπερατό στρώμα στη ζώνη του ρήγματος και από εκεί στην επιφάνεια. Καθώς τα θερμά ρευστά απομακρύνονται από το άνοιγμα της ζώνης ανάδυσης του ρευστού, κατά μήκος της ζώνης ρήγματος, αναμειγνύονται με ψυχρότερα υπόγεια ή μετεωρικά νερά, όπως υποδεικνύεται από την αύξηση των διττανθρακικών και μαγνησίου και τη μείωση του βορίου, του θειικού άλατος και του χλωρίου (Moeck, σελίδα 873, 2014).

Τυπικά ρευστά: Υψηλό Cl και HCO_3 , χαμηλό Ca και Mg.

Γ) Πυριγενή γεωθερμικά συστήματα – Τύπου υποβάθρου

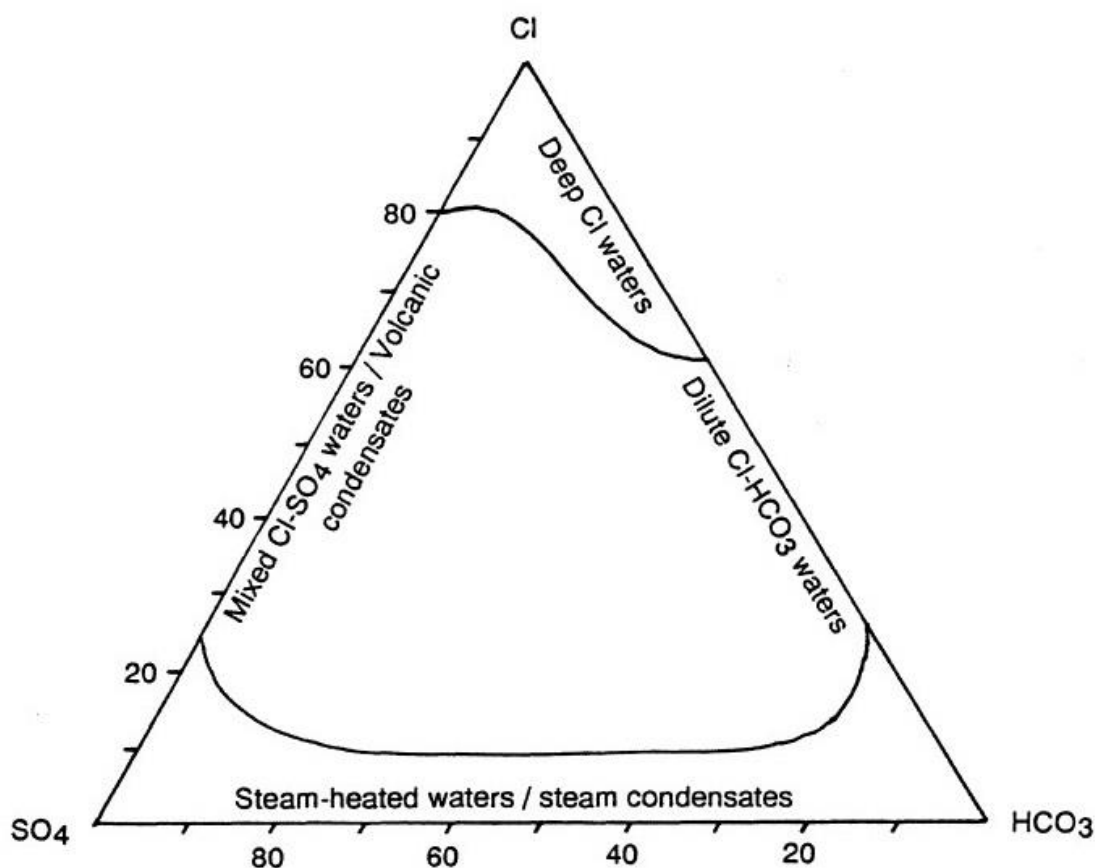
Τα κρυσταλλικά (π.χ. γρανιτικά) πετρώματα φιλοξενούν τεράστια αποθέματα θερμικής ενέργειας στις πυριγενείς περιοχές, οι οποίες συχνά βρίσκονται κάτω από μεγάλες εκτάσεις περιοχών ηπειρωτικών πλακών. Αυτά τα πετρώματα χαμηλού πορώδους και διαπερατότητας απαιτούν ανάπτυξη του ταμιευτήρα με τεχνικές διέγερσης για να επιτρέπεται η κυκλοφορία μεταξύ των φρεατίων έγχυσης και των φρεατίων παραγωγής, με τη μάζα των πετρωμάτων να λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας (Moeck, σελίδα 875, 2014).

Τυπικά ρευστά: Χρειάζεται να εγχυθούν.

Δ) Μη μαγματικά γεωθερμικά συστήματα - Ενδοηπειρωτικές λεκάνες και ορογενείς ζώνες.

Τα γεωθερμικά συστήματα που κυριαρχεί η μεταφορά θερμότητας με αγωγή χωρίς ενεργό ηφαιστειακή δραστηριότητα καλύπτουν διάφορους τύπους γεωλογικών περιοχών που βρίσκονται εντός ενδοηπειρωτικών λεκανών (δηλαδή εντός του σταθερού ηπειρωτικού φλοιού) και εντός των ορογενών ζωνών και των λεκανών που σχετίζονται με αυτές. Η τεκτονική δραστηριότητα σε αυτές τις τοποθεσίες είναι συνήθως χαμηλή έως απύσχα. Η μεταβολή της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο σε ορεινές περιοχές της ορογενούς ζώνης, όπου η υψηλή διαπερατότητα και τα βαθιά ρήγματα επιτρέπουν τη βαθιά κυκλοφορία του μετεωρικού νερού. Αυτός ο τύπος κυκλοφορίας συνδέεται συχνά με τον επακόλουθο σχηματισμό θερμών πηγών. Τα γεωθερμικά συστήματα στις ορεινές ζώνες συσχετίζονται σπάνια με υδροθερμικούς ταμιευτήρες, αλλά είναι μάλλον το αποτέλεσμα συστημάτων βαθιάς κυκλοφορίας που συνδέονται με σύνθετα ρήγματα μεγάλης κλίμακας. Αυτές οι περιοχές συνήθως περιέχουν χαμηλή έως μέτρια ροή θερμότητας (Moeck, σελίδα 875, 2014).

Τυπικά ρευστά: Άλμη υψηλού Cl. Νερό διείσδυσης, πλούσιο σε HCO_3 .



Σχήμα 10: Διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των γεωθερμικών υδάτων βάσει της σχετικής τους περιεκτικότητας σε χλωριούχα, θειούχα και διττανθρακικά ιόντα (Nicholson, 1993).

4.8 Τύποι υδάτων

Ο πιο συνηθισμένος τύπος ρευστού που βρίσκεται σε βάθος σε γεωθερμικά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας είναι σχεδόν ουδέτερου pH, με το χλώριο ως κυρίαρχο ανιόν. Άλλα ύδατα που συναντώνται στο προφίλ ενός γεωθερμικού πεδίου προέρχονται από αυτό το ρευστό ως συνέπεια χημικών ή φυσικών διεργασιών. Αυτά τα ύδατα, τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται παρακάτω, ταξινομούνται σύμφωνα με τα κυρίαρχα ανιόντα. Παρόλο που δεν είναι τυπικό σύστημα ταξινόμησης, αυτή η περιγραφική ταξινόμηση επιτρέπει κάποιες γενικεύσεις σχετικά με την πιθανή προέλευση των υδάτων, όπως φαίνεται από το Σχήμα 10 (Nicholson, σελίδα 19, 1993).

4.8.1 Πλούσια σε χλωρίοντα

Εμφάνιση: Αυτός ο τύπος νερού, που ορίζεται επίσης "χλωριούχο αλκαλικό" ή "ουδέτερο χλωριούχο", είναι χαρακτηριστικός του βαθιού γεωθερμικού ρευστού που βρίσκεται στα περισσότερα συστήματα υψηλής θερμοκρασίας. Οι περιοχές που περιέχουν θερμές πηγές υψηλής ροής με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τροφοδοτούνται πιο άμεσα από τον βαθύ ταμειυτήρα και σχηματίζουν διαπερατές ζώνες εντός του πεδίου. Εντούτοις, αυτές οι περιοχές μπορεί να μην υπέρκεινται αναγκαστικά της κύριας ζώνης ανοδικής ροής, αφού η τοπογραφία της περιοχής μπορεί να ελέγξει σημαντικά στην υδρολογία (Nicholson, σελίδες 19-20, 1993).

Χαρακτηριστικά επιφάνειας: Το χλωριούχο ρευστό εκφορτίζεται συνήθως από τις θερμές πηγές και τις λεκάνες με καλή ροή και από τα περισσότερα Geysers. Το νερό σε βαθιές λεκάνες εμφανίζεται διαυγές με μπλε – πράσινο χρώμα, χαρακτηριστικό γνώρισμα των χλωριούχων νερών.

Χημεία: Το χλώριο είναι το κυρίαρχο ανιόν και συνήθως παρουσιάζει συγκεντρώσεις της τάξεως των χιλιάδων mg/kg, μέχρι περίπου 10.000 mg/kg. Λιγότερο συχνά, τα επίπεδα χλωρίου υπερβαίνουν τα 100.000 mg/kg σε αλατούχα συστήματα (π.χ., Salton Sea, California, USA). Σε τέτοια συστήματα, τα ύδατα σχηματισμού ή το θαλασσινό νερό μπορεί να έχουν αναμιχθεί με το αρχικό χλωριούχο ρευστό. Άλλα κύρια συστατικά είναι το νάτριο και το κάλιο (συχνά σε αναλογία συγκέντρωσης 10:1), ως κύρια κατιόντα, με σημαντικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του πυριτίου (υψηλότερες συγκεντρώσεις καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία με το βάθος) και βόριο. Οι συγκεντρώσεις των θειικών και των διττανθρακικών ιόντων μεταβάλλονται, αλλά συνήθως είναι μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερες από εκείνες του χλωρίου. Το pH είναι πάντοτε ελαφρώς όξινο ή αλκαλικό, δηλαδή, σχεδόν ουδέτερο, στη θερμοκρασία που γίνονται οι μετρήσεις. Διοξείδιο του άνθρακα και πολύ χαμηλότερα επίπεδα υδρόθειου, είναι τα κύρια διαλυμένα αέρια. Σε πεδία με υψηλή περιεκτικότητα σε αέριο, τα χλωριούχα ρευστά ενδέχεται να περιέχουν υψηλά επίπεδα διττανθρακικού ιόντος και να βράζουν σε μεγαλύτερα βάθη. Ωστόσο, η υψηλή συγκέντρωση του χλωρίου εμποδίζει οποιαδήποτε σύγκυση μεταξύ αυτών

των υδάτων και των διττανθρακικών ή των αραιωμένων υδάτων χλωρίου - διττανθρακικού άλατος.

Εξαλλοίωση: Αργίλική - προπυλιτική, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ορυκτά: Πυρίτιο (άμορφο πυρίτιο, κρυσταλλικό, χαλαζιακό) αλβίτης, αδουλαίος, ιλλίτης, χλωρίτης, επίδοτο, ζεόλιθοι, ασβεσίτης, σιδηροπυρίτης, πυροτίτης και σουλφίδια μετάλλων υποβάθρου. Η υπόγεια πυριτίωση είναι συνηθισμένη.

Αποθέσεις: Τα χαρακτηριστικά της εκφόρτισης περιβάλλονται πάντοτε από πυριτική συσσωμάτωση, η οποία παρέχει έναν οδηγό για την διάκριση μεταξύ θερμών πηγών, λεκανών και Geysers και υπόγειων θερμοκρασιών που υπερβαίνουν τους 200°C. Τα πεδία υψηλής συγκέντρωσης σε αέριο με σημαντικές συγκεντρώσεις διττανθρακικών μπορούν να εναποθέσουν ένα μείγμα sinter και τραβερτίνη.

Εφαρμογές: Αυτά είναι τα μόνα νερά πηγών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με βεβαιότητα στη γεωθερμομετρία. Οι θερμές χλωριούχες πηγές υψηλής εισροής συνήθως υποδεικνύουν μια εξαιρετικά διαπερατή ζώνη τροφοδοσίας (π.χ. ρήγμα, διάκενο εκρήξεως).

4.8.2 Πλούσια σε θειικά

Εμφάνιση: Επίσης γνωστά ως "ύδατα θειικού οξέος", αυτά είναι επιφανειακά ρευστά που σχηματίζονται από τη συμπύκνωση γεωθερμικών αερίων κοντά στην επιφάνεια υπόγειων υδάτων πλούσιων σε οξυγόνο. Τα αέρια, με ατμό και άλλα πτητικά, αρχικά διαλύθηκαν στο βαθύ ρευστό, αλλά διαχωρίστηκαν από τα χλωριούχα νερά κατόπιν βρασμού σε βάθος. Βρίσκονται συχνά στα όρια του πεδίου σε κάποια απόσταση από την περιοχή της κύριας ανοδικής ροής, σε υψόμετρα άνωθεν του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα και σε ζώνες που βρίσκονται σε συνθήκες βρασμού. Αν και συνήθως βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια (100m), τα θειικά ύδατα μπορούν να διεισδύσουν σε βάθος μέσω ρηγμάτων στο γεωθερμικό σύστημα. Εκεί θερμαίνονται, συμμετέχουν στις αντιδράσεις εξαλλοίωσης των πετρωμάτων και αναμιγνύονται με τα ανερχόμενα χλωριούχα ρευστά (π.χ. πολλά πεδία στις Φιλιππίνες) (Nicholson, σελίδες 20-21, 1993).

Χαρακτηριστικά επιφάνειας: Αυτά τα όξινα νερά βρίσκονται συχνά σε λεκάνες ιλύος αλλά μπορεί επίσης να εμφανιστούν ως πηγές. Καθώς ο διαχωρισμένος ατμός περιέχει μια σημαντική αναλογία της ενθαλπίας του βαθιού ρευστού, τα θερμά νερά μπορεί να βράσουν στο επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα για να δημιουργήσουν θερμές λεκάνες ιλύος και θερμό έδαφος. Αυτά τα ζεστά, όξινα νερά μπορούν να διαλύσουν τα πετρώματα για να σχηματίσουν μεγάλους κρατήρες και σπηλιές (π.χ. Waiotapu, Νέα Ζηλανδία).

Χημεία: Η οξείδωση του υδρόθειου σε θειικά ιόντα παράγει ένα ελάχιστο pH περίπου 2.8. Εάν τα ύδατα είναι σημαντικά πιο όξινα από αυτό (pH

<2.0), η συνεισφορά αερίου από το μάγμα είναι πιθανή. Το χλώριο εμφανίζεται σε ίχνη. Το διττανθρακικό ιόν είτε απουσιάζει είτε βρίσκεται σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αφού σε πολύ όξινα νερά το διαλυμένο ανθρακικό ιόν συνήθως εξατμίζεται από το διάλυμα ως αέριο διοξείδιο του άνθρακα. Άλλα πτητικά συστατικά, τα οποία διαχωρίζονται από το βαθύ ρευστό με βρασμό, μπορούν επίσης να συμπυκνώνονται σε αυτά τα νερά (π.χ., NH_3 , As, B) και παρουσιάζουν σημαντικές συγκεντρώσεις. Οι αντιδράσεις κοντά στην επιφάνεια μεταξύ των όξινων υδάτων και των γύρω πετρωμάτων ενδέχεται να προκαλούν έκπλυση του διοξειδίου του πυριτίου και των μεταλλικών κατιόντων (Na, K, Mg, Ca, Al, Fe κ.λπ.), τα οποία μπορούν έτσι να εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις στα ύδατα.

Εξαλλοίωση: Τα νερά θειικού οξέος αντιδρούν ταχέως και εκπλένουν τα πετρώματα για να προκαλέσουν προχωρημένη αργλική εξαλλοίωση με καολινίτη, αλλουσίτη, χρυστοβαλλίτη και αλουνίτη. Η εκτεταμένη έκπλυση των λιθολογιών στην επιφάνεια από αυτά τα νερά, ή τον όξινο ατμό, μπορεί να παράγει υπολείμματα διοξειδίου του πυριτίου. Αυτό πρέπει να διαφοροποιείται από την πυροσυσσωμάτωση, η οποία είναι προϊόν των διαδικασιών εναπόθεσης, όχι της εξαλλοίωσης. Ανυδρίτης, αιματίτης, πυρίτης, μίγματα γκαϊτίτη - αιματίτη και στοιχειακό θείο απαντώνται επίσης συχνά.

Αποθέσεις: Δεν υπάρχουν εκτεταμένες αποθέσεις. Συνήθως σχηματίζονται γύρω από πηγές που εκφορτίζουν θειικά ύδατα, αν και μπορεί να υπάρχει στοιχειακό θείο, αλουνίτης και άλλα θειικά άλατα.

Εφαρμογές: Δεδομένου ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του πυριτίου και των περισσότερων κατιόντων είναι το προϊόν έκπλυσης κοντά στην επιφάνεια, τέτοια θερμά ύδατα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γεωθερμομετρία, καθώς οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων συστατικών δεν έχουν καμία σχέση με την ισορροπία ορυκτών - ρευστών στον ταμιευτήρα. Καθώς τα αέρια κινούνται πιο γρήγορα προς την επιφάνεια από τα ύδατα, η κατανομή στο χώρο των χαρακτηριστικών του θειικού οξέος και η όξινη εξαλλοίωση μπορούν να υποδείξουν περιοχές που υπέρκεινται μιας διαπερατής ζώνης βρασμού. Ωστόσο, απαιτείται κάποια προσοχή στην απόδοση μιας τέτοιας ερμηνείας, καθώς η ύπαρξη ενός αδιαπέρατου ορίζοντα τόσο από τα ύδατα όσο και από τα αέρια, θα προκαλέσει πλευρική ροή και των δύο φάσεων. Υπό τέτοιες συνθήκες, η παρουσία όξινης εκφόρτισης μπορεί να υποδηλώσει την λέπτυνση αυτού του αδιαπέρατου φράγματος.

4.8.3 Πλούσια σε διττανθρακικά

Εμφάνιση: Αυτά τα ύδατα, περιλαμβάνουν εκείνα τα ρευστά που είναι πλούσια σε CO_2 και ουδέτερα ύδατα θειικού - ανθρακικού άλατος, είναι το προϊόν της υγροποίησης ατμού και αερίου σε υπόγειο περιβάλλον φτωχό σε οξυγόνο. Τέτοια ρευστά εμφανίζονται σε ζώνες, με ομπρελοειδή

σχήμα, συμπυκνωμένων επικαθίσεων που υπέρκεινται του γεωθερμικού συστήματος και εμφανίζονται συνήθως όρια των πεδίων. Τα διττανθρακικά ύδατα που απαντώνται σε μη ηφαιστειακά συστήματα υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. Τουρκία και Αφρική), η προέλευση τους αποτελεί ένα πρόβλημα. Μπορεί να αποτελέσουν το ρευστό βάθους του ταμιευτήρα (Nicholson, σελίδα 22, 1993).

Χαρακτηριστικά επιφάνειας: Ζεστό σε θερμές πηγές και δροσερό σε ανθρακικές πηγές.

Χημεία: Τα ύδατα έχουν σχεδόν ουδέτερο pH καθώς οι χημικές αντιδράσεις με τα πετρώματα της περιοχής (είτε στο ρηχό ταμιευτήρα είτε κατά την πλευρική ροή), εξουδετερώνει την αρχική οξύτητα αυτών των υδάτων. Η απώλεια πρωτονίων σε τέτοιες αντιδράσεις παράγει σχεδόν ουδέτερα ύδατα με τα διττανθρακικά ιόντα και το νάτριο ως τα κύρια συστατικά. Το θειικό ιόν υπάρχει σε μεταβλητές ποσότητες, ενώ το χλώριο υπάρχει σε χαμηλές συγκεντρώσεις ή απουσιάζει. Αυτά τα ύδατα είναι εξαιρετικά δραστικά και η διαβρωτική τους δράση στα τοιχώματα των γεωτρήσεων πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη ενός πεδίου.

Εξαλλοίωση: Αργλική εξαλλοίωση, με αργίλους (καολίνη, μοντμοριλλονίτη) και μορδενίτη. Μπορεί επίσης να εμφανιστεί ασβεστίτης και πυριτίωση.

Αποθέσεις: Εκτεταμένες αποθέσεις τραβερτίνη (CaCO_3) μπορούν να σχηματιστούν γύρω από διττανθρακικές πηγές και μπορεί να είναι ένδειξη υπόγειων θερμοκρασιών κάτω από $150\text{ }^\circ\text{C}$. Αραγωνίτης μπορεί να σχηματιστεί εάν η εκφόρτιση στην επιφάνεια και η ψύξη είναι πολύ γρήγορη.

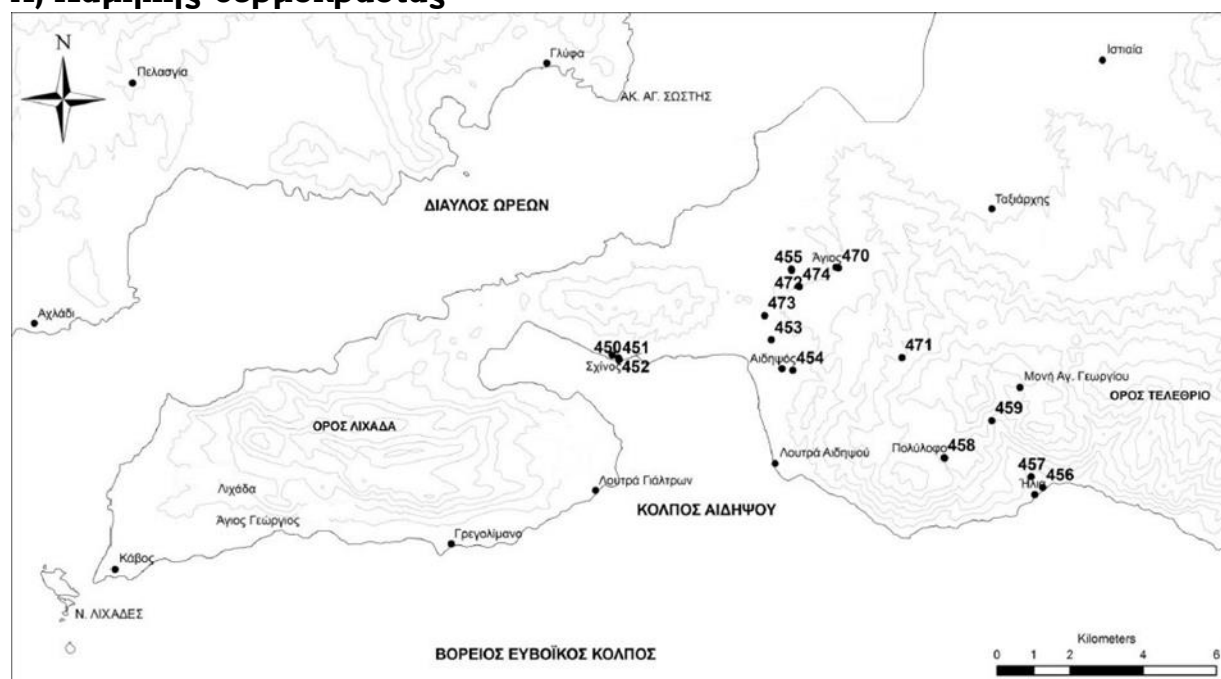
Εφαρμογές: Παρόλο που τέτοια ρευστά μπορεί να εκφορτίζονται και σε ρηχούς και σε βαθύς υδροφόρους ορίζοντες σε συστήματα υψηλής θερμοκρασίας, η χρήση τους στη γεωθερμομετρία είναι αμφίβολη. Οι εξισώσεις των γεωθερμομέτρων έχουν προκύψει από δεδομένα σχετικά με την ισορροπία χλωριούχου ρευστού και η εφαρμογή τους σε έναν εντελώς διαφορετικό τύπο ρευστού είναι αμφισβητήσιμη. Η εφαρμογή του γεωθερμομέτρου Na-K-Ca σε ρευστά τύπου Na- HCO_3 έχει χαρακτηριστεί ως προβληματική. Όπου αυτά τα ύδατα σχηματίζονται από θέρμανση ή υγροποίηση ατμού, η χημεία τους δεν σχετίζεται με την ισορροπία του ρευστού του ταμιευτήρα, καθιστώντας την γεωθερμομετρία ακατάλληλη.

Κεφάλαιο 5 Παράθεση δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα των περιοχών μελέτης και κατόπιν γίνεται μια περιεκτική περιγραφή τους. Επίσης με την βοήθεια διαγραμμάτων συγκεντρώσεων και υδροχημικών διαγραμμάτων χαρακτηρίζεται ο τύπος των υδάτων για κάθε ομάδα δεδομένων.

5.1 Ομάδες δεδομένων Αιδηψού

Α) Χαμηλής θερμοκρασίας



Σχήμα 11: Χάρτης θέσεων προέλευσης δειγμάτων υπόγειων ψυχρών νερών Βόρειας Εύβοιας (Κανελλόπουλος, 2011)

Πίνακας 1: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 1/3

Αριθμός Δείγματος	Γεωγραφικές Συντεταγμένες	Περιοχή	Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Είδος Υδροσημ.
450	N38 52.865 E22 59.557	Σχίνος	20/11/2004	Πηγάδι
451	N38 52.858 E22 59.551	Σχίνος	20/6/2005	Πηγάδι
452	N38 52.894 E22 59.542	Σχίνος	16/6/2008	Πηγάδι
453	N38 53.181 E23 02.427	Αιδηψός	12/3/2005	Πηγάδι
454	N38 52.738 E23 02.842	Αιδηψός	13/3/2005	Γεώτρηση
455	N38 54.219 E23 02.793	Αιδηψός	14/3/2005	Γεώτρηση
456	N38 51.056 E23 07.587	Ήλια	14/3/2005	Πηγή
457	N38 51.210 E23 07.365	Ήλια	30/4/2008	Πηγή

458	N38 51.476 E23 05.718	Πολύλοφο	20/11/2005	Πηγή
459	N38 52.029 E23 06.609	Μοναστήρι	20/11/2004	Πηγή - Καταρράκτης
470	N38 54.245 E23 03.685	Αιδηψός	12/3/2005	Πηγάδι
471	N38 52.940 E23 04.899	Πλατάνια	20/11/2004	Πηγή
472	N38 54.206 E23 02.800	Αιδηψός	20/11/2004	Γεώτρηση
473	N38 53.537 E23 02.295	Αιδηψός	20/11/2004	Γεώτρηση
474	N38 53.966 E23 02.947	Αιδηψός	12/3/2005	Πηγή

Πίνακας 2: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 2/3

Αριθμός Δείγματος	Θερμοκρασία °C	pH πεδίου	TDS mg/l	HCO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	PO ₄ mg/l
450	17.5	7.66	1270	320	160	9.2	0.21
451	21.9	7.85	1770	295	200	9.7	0.23
452	23.2	7.1	3630	283	70	1	0.35
453	16	6.8	330	280	39	9.7	0.25
454	14.45	7.45	410	313	70	29	0.14
455	12.2	6.99	475	381	26	19.8	0.24
456	15	7.9	260	154	20	7	0.13
457	18	8.27	250	213	38.6	0.5	0.2
458	15.3	7.7	390	292	30	24.2	0.12
459	12.7	8.1	270	224	19	7	0.04
470	15.35	6.91	610	298	94	73.5	3.04
471	12.7	7.6	250	234	20	7	0.04
472	14.3	7.33	460	352	34	18	0.17
473	12.6	7.17	390	304	51	27.7	0.11
474	15	7.39	510	410	55	29	0.32

Πίνακας 3: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 3/3

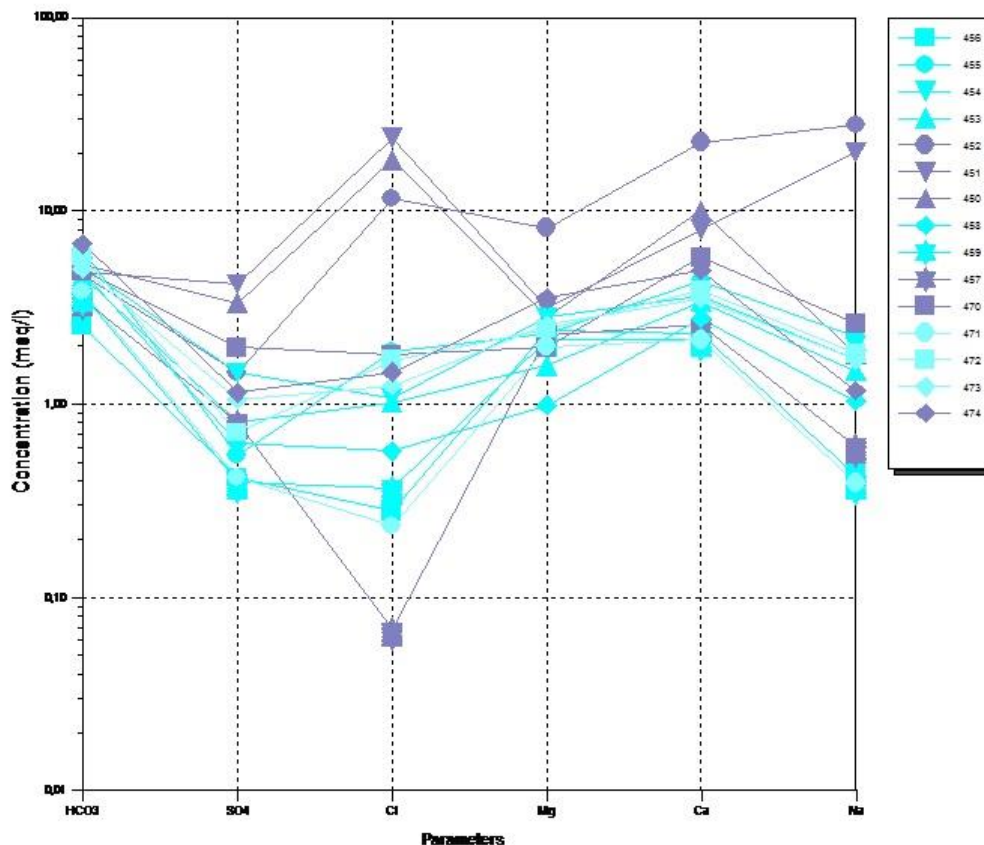
Αριθμός Δείγματος	Cl mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Zn μg/l	Fe μg/l	Ni μg/l	Mn μg/l
450	650	200	34.1	8	42	420	35	4	9
451	848	160.5	38.1	5	465	150	9	1	1
452	410	454	99	9.3	642	29	100	6.1	10
453	36	68	19.2	3	34	10	9	0.1	1
454	38	72	34.1	4	39	240	2	0.5	2
455	66	87	28.4	4	51	10	3	0.1	1
456	9.9	46	29.3	3	10	7	3	0.1	1
457	2.41	51.5	27.4	0.9	14	23	100	1.2	10
458	20.2	56	12	5	24	17	9	0.1	0.1
459	13	43	26.4	5	9	13	7	0.1	0.4
470	64	115	23.8	13	60	7	2	0.2	120
471	8.3	43	24.1	5	9	8	8	0.4	0.4
472	60	78	29.8	6	42	13	5	0.2	0.4
473	44	70	31.1	6	39	16	12	0.4	1
474	52	99	42.9	4	27	3	2	1	1

Περιγραφή:

Η πρώτη ομάδα δεδομένων από την περιοχή της Βόρειας Εύβοιας αφορά ψυχρές πηγές (Σχήμα 11). Η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές από 12.2°C στο δείγμα 455 έως 23.2°C στο δείγμα 452. Ξεχωρίζουν οι τιμές 21.9°C στο δείγμα 451, 12.7°C στο 459, 12.6°C στο 473 και 12.7°C στο 471. Το pH του πεδίου είναι ελαφρώς βασικό και κυμαίνεται από 6.8 στο δείγμα 453 έως 8.27 στο δείγμα 457. Κοντά στο ελάχιστο είναι οι τιμές 6.91 στο δείγμα 470, 6.99 στο 455 και 7.1 στο 452, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι οι τιμές 8.1 στο δείγμα 459, 7.9 στο 456 και 7.85 στο 451. Οι τιμές των ολικών διαλυμένων στερεών είναι σχετικά μικρές τις τάξεως των μερικών εκατοντάδων mg/l, με ανώτατη τιμή 610 mg/l στο δείγμα 470 και κατώτατη τιμή 250 mg/l στα δείγματα 457 και 471. Παρατηρούμε ωστόσο ότι τα τρία δείγματα που λήφθηκαν στην περιοχή Σχίνος ξεχωρίζουν καθώς παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από τα υπόλοιπα: 3630 mg/l στο δείγμα 452, 1770 mg/l στο 451 και 1270 mg/l στο 450.

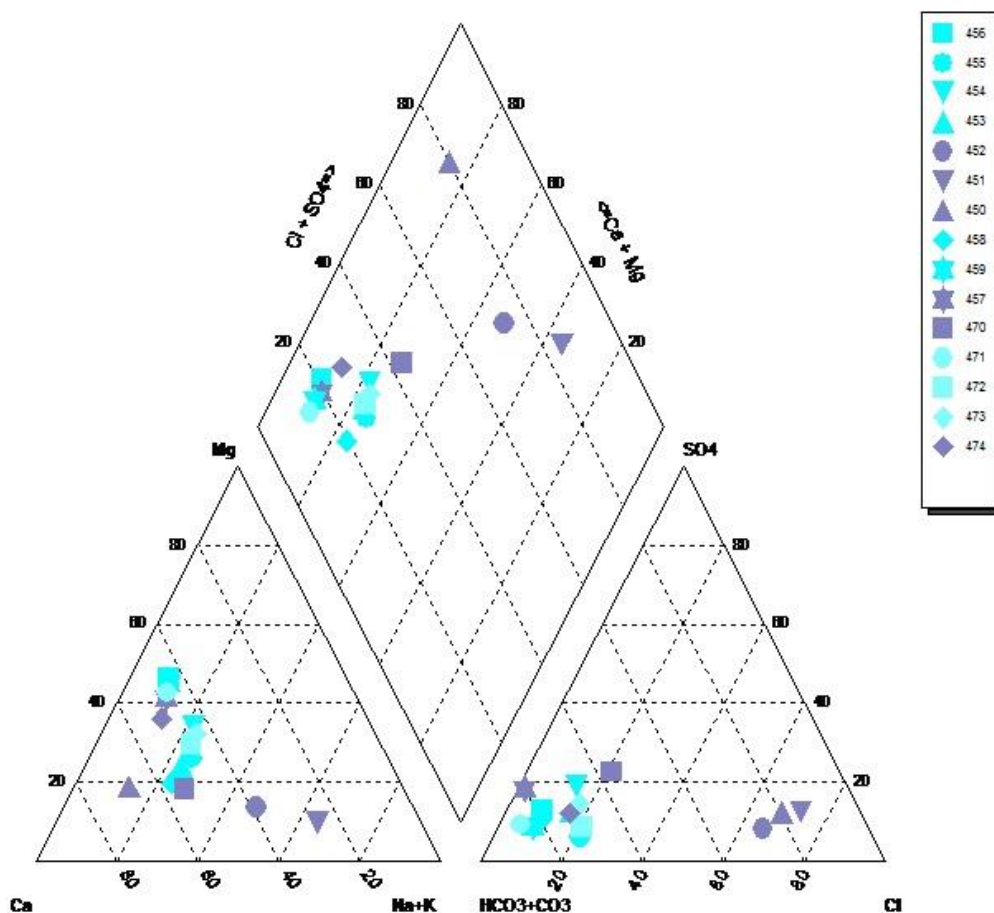
Όσον αφορά τις περιεκτικότητες των δειγμάτων σε ιόντα, ιδιαίτερη εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι τα τρία δείγματα που λήφθηκαν στην περιοχή Σχίνος, εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από τα υπόλοιπα. Η περιεκτικότητα σε διττανθρακικά εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές της, 410 mg/l στο δείγμα 474 και 381 mg/l στο 455, ενώ τις μικρότερες τιμές της, 154 mg/l στο δείγμα 456 και 213 mg/l στο 457. Η περιεκτικότητα σε θειικά έχει ανώτατο όριο 200 mg/l στο δείγμα 451, 160 mg/l στο 450 και κατώτατο όριο 19 mg/l στο δείγμα 459, 20 mg/l στα δείγματα 471 και 456. Αντίστοιχα η περιεκτικότητα σε νιτρικά παρουσιάζεται μέγιστη, 29 mg/l στα δείγματα 454 και 474, 27.7 mg/l στο 473, ενώ ελάχιστη 0.5 mg/l στο δείγμα 457 και 1 mg/l στο 452. Τέλος, τα φωσφορικά είναι μεταξύ 0.04 mg/l στα δείγματα 459, 471 και 0.35 mg/l στο δείγμα 452, ενώ υπερβολικά μεγάλη τιμή 3.04 mg/l εμφανίζεται στο δείγμα 470.

Η περιεκτικότητα σε χλώριο κυμαίνεται από 848 mg/l στο δείγμα 451 έως 2.41 mg/l στο δείγμα 457. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 650 mg/l στο δείγμα 450, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι η τιμή 9.9 mg/l στο δείγμα 456. Η περιεκτικότητα σε ασβέστιο λαμβάνει τιμές από 454 mg/l στο δείγμα 452 έως 43 mg/l στα δείγματα 459 και 471. Κοντά στο ελάχιστο ξεχωρίζει η τιμή 46 mg/l στο δείγμα 456. Η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο παρουσιάζει ανώτατη τιμή 99 mg/l στο δείγμα 452 και κατώτατη τιμή 12 mg/l στο δείγμα 458. Κοντά στο ελάχιστο ξεχωρίζει η τιμή 19.2 mg/l στο δείγμα 453. Η περιεκτικότητα σε κάλιο έχει ανώτατο όριο 9.3 mg/l στο δείγμα 452 και κατώτατο όριο 0.9 mg/l στο δείγμα 457. Κοντά στο μέγιστο ξεχωρίζει η τιμή 8 mg/l στο δείγμα 450. Τέλος, η περιεκτικότητα σε νάτριο είναι μεταξύ 642 mg/l στο δείγμα 452 και 9 mg/l στα δείγματα 459 και 471. Κοντά στο ελάχιστο ξεχωρίζει η τιμή 10 mg/l στο δείγμα 456.



Σχήμα 12: Διάγραμμα Schoeller υπόγειων ψυχρών νερών Βόρειας Εύβοιας

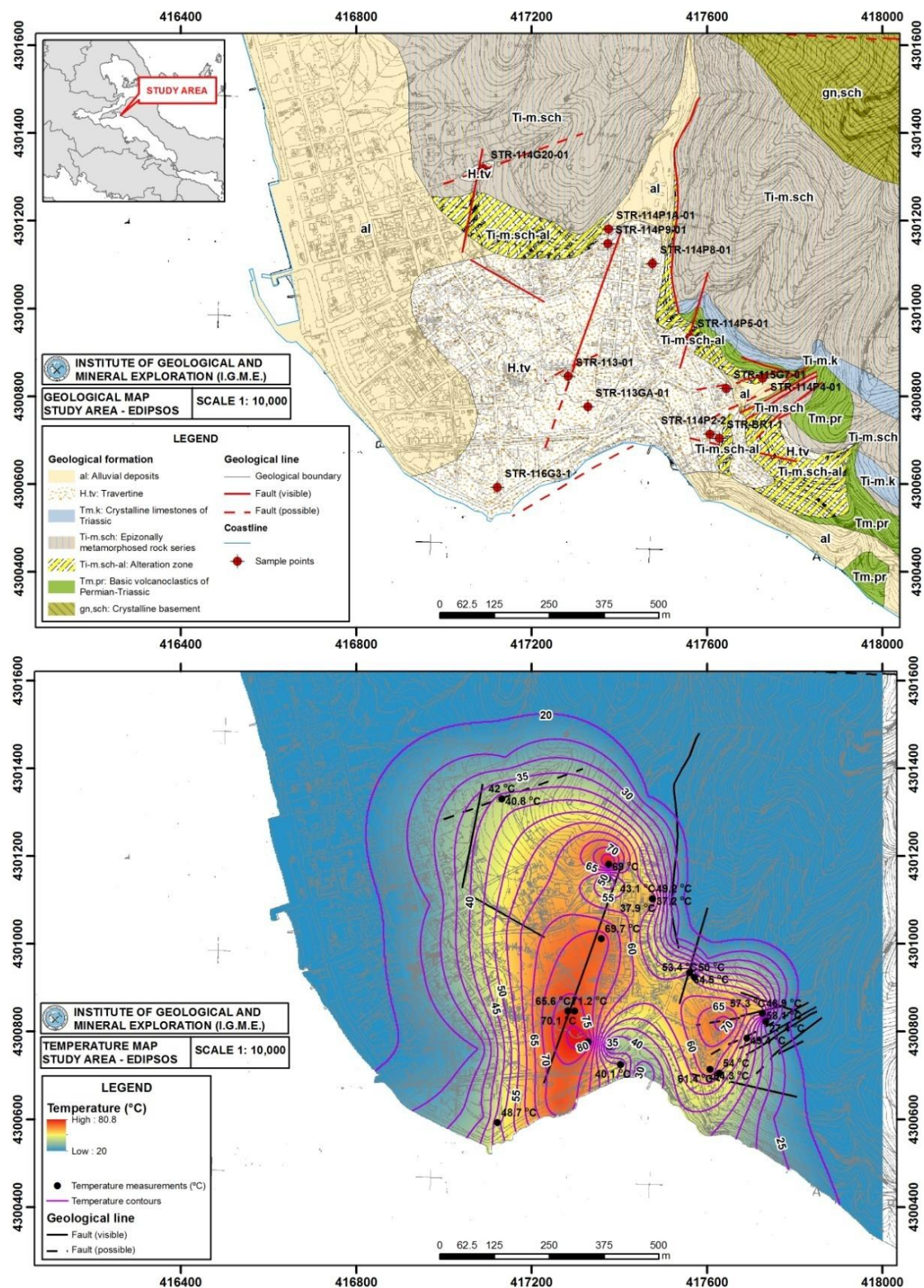
Από το διάγραμμα του σχήματος 12, μπορούμε να διακρίνουμε ότι οι περιεκτικότητες σε ιόντα παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, ειδικότερα στην περίπτωση του χλωρίου και του νατρίου. Τα τρία δείγματα της περιοχής Σχίνος εμφανίζουν αρκετά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε χλώριο και νάτριο από τα υπόλοιπα δείγματα της ομάδας. Εξαιρέση αποτελούν οι περιεκτικότητες σε διττανθρακικά, οι οποίες εμφανίζουν μικρές διακυμάνσεις. Εν κατακλείδι, δεν υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων στα ύδατα της περιοχής.



Σχήμα 13: Διάγραμμα Piper υπόγειων ψυχρών νερών Βόρειας Εύβοιας

Από το άνωθεν διάγραμμα Piper, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Τα κατιόντα χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε ανθρακικά” με εξαίρεση τα δείγματα 451 και 452, για τα οποία το νάτριο και το κάλιο υπερτερεί. Τα ανιόντα χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε ανθρακικά” με εξαίρεση τα δείγματα 450, 451 και 452, για τα οποία ο χαρακτηρισμός “πλούσια σε χλωριόντα” είναι πιο εύστοχος. Συνεπώς συμπεραίνουμε ότι τα τρία δείγματα της περιοχής Σχίνος εμφανίζουν ασυμφωνία ως προς τα χαρακτηριστικά τους από την υπόλοιπη ομάδα μετρήσεων. Τα ύδατα της περιοχής Σχίνος χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωριόντα” που υποδηλώνει επιρροή της θάλασσας, καθώς η τοποθεσία της προέλευσης των δειγμάτων βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την ακτή (10 – 20 m) και τα δείγματα προέρχονται από ρηχό υδροφόρο ορίζοντα. Αντιθέτως τα υπόλοιπα δείγματα της ομάδας παρουσιάζουν ύδατα που χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε ανθρακικά” που υποδηλώνει ότι ο υδροφορέας εμπλούτισε με ασβέστιο και ανθρακικά άλατα τα ύδατα της περιοχής.

Β) Υψηλής Θερμοκρασίας



Σχήμα 14: Χάρτης θέσεων προέλευσης δειγμάτων υπόγειων θερμών νερών Βόρειας Εύβοιας (ειδικότερα περιοχή Αιδηψού) (Κατσικάτος, 1984 & Βαβάσσης, 2001)

Πίνακας 4: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 1/2

Αριθμός Δείγματος	Καρτεσιανές Συντεταγμένες	Περιοχή	Θερμοκρασία °C	pH πεδίου	TDS mg/l
STR 116G3	X 4300593 Y 417122.1	Αιδηψός – Θερμαί Σύλλα	48.7	6.5	32330
STR 114P2	X 4300710 Y 417610.0	Αιδηψός – Σκουρτα νιώτη	64.3	6.2	30875
STR 114P4	X 4300842 Y 417727.0	Αιδηψός – Σκουρτα νιώτη - Ήλιος	58.1	6.8	27350
STR 115G7	X 4300818 Y 417644.1	Αιδηψός - Κομπογιάννη	71.8	6.2	33365
STR 114P8	X 4301103 Y 417476.0	Αιδηψός – Ρίζου - Καπελάρη	60.2	6	32195
STR 114P1A	X 4301182 Y 417376.0	Αιδηψός – Θερμο πόταμος	69	6.2	27400
STR 113GA	X 4300776.5 Y 417328.6	Αιδηψός – ΕΟΤ - Άρτεμις	79.6	6.2	33575
STR 113-01	X 4300846.7 Y 417283.2	Αιδηψός – ΕΟΤ - Νταμάρια	70.1	6	32530
STR 114G20	X 4301320 Y 417090.0	Αιδηψός - Κουκουμός	82.2	6.5	33735
STR 114P5	X 4300935 Y 417561.0	Αιδηψός – Αι πηγαί	54.5	6.6	30585
STR 114P9	X 4301149 Y 417374.0	Αιδηψός – Παπα ϊωάννου	43.9	6.4	18800
STR BP1	X 4300705.3 Y 417628.1	Αιδηψός - Βρυσάκια	54	6.6	20870

Πίνακας 5: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 2/2

Αριθμός Δείγματος	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	SiO ₂ mg/l
STR 116G3	1357	484	10133	354	18298	489	1450	13.8
STR 114P2	1584	301	9668	330	17589	678	1050	16.5
STR 114P4	1346	264	8546	294	15601	568	1000	17.6
STR 115G7	1675	313	10469	344	19006	591	1200	18.2
STR 114P8	1620	313	9679	335	18722	626	1200	17.1
STR 114P1A	1379	267	8551	293	15601	593	1000	16.4

STR 113GA	1650	322	10500	361	19290	585	1150	16.4
STR 113-01	1642	321	10219	351	18722	620	950	17.0
STR 114G20	1668	322	10592	363	19574	610	900	16.2
STR 114P5	1496	288	9459	321	17730	657	950	16.2
STR 114P9	864	174	5980	204	10567	598	700	17.7
STR BP1	1079	220	6490	217	11843	619	700	16.3

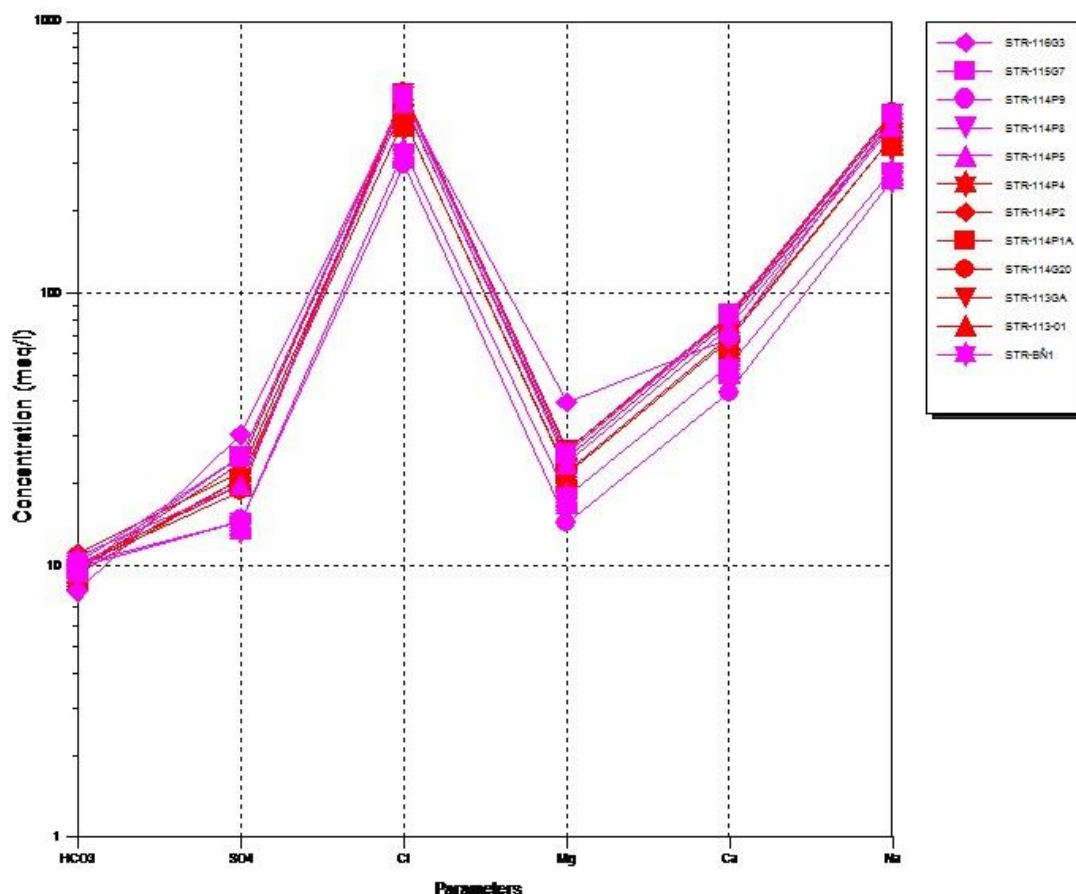
Περιγραφή:

Η δεύτερη ομάδα δεδομένων από την περιοχή της Βόρειας Εύβοιας αφορά θερμές πηγές (Σχήμα 14). Η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές από 43.9°C στο δείγμα 114P9 και 48.7°C στο δείγμα 116G3 έως 79.6°C στο δείγμα 113GA και 82.2°C στο δείγμα 114G20. Το pH του πεδίου είναι ελαφρώς όξινο και κυμαίνεται από 6 στα δείγματα 114P8, 113-01 έως 6.8 στο δείγμα 114P1. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 6.4 στο δείγμα 114P9, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι οι τιμές 6.6 στα δείγματα 114P5 και BP1. Οι τιμές των ολικών διαλυμένων στερεών είναι αρκετά μεγάλες σε όλα τα δείγματα, με ανώτατη τιμή 33735 mg/l στο δείγμα 114G20 και κατώτατη τιμή 18800 mg/l στο δείγμα 114P9. Παρατηρούμε ωστόσο ότι οι τιμές είναι πλησιέστερες στην ανώτερη τιμή για παράδειγμα 33575 mg/l στο δείγμα 113GA και 33365 mg/l στο δείγμα 115G7.

Όσον αφορά τις περιεκτικότητες των δειγμάτων σε ιόντα, η περιεκτικότητα σε διττανθρακικά εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές της, 678 mg/l στο δείγμα 114P2 και 657 mg/l στο 114P5, ενώ τις μικρότερες τιμές της, 489 mg/l στο δείγμα 116G3 και 568 mg/l στο 114P4. Η περιεκτικότητα σε θειικά έχει ανώτατο όριο 1450 mg/l στο δείγμα 116G3, 1200 mg/l στα δείγματα 115G7 και 114P8 και κατώτατο όριο 700 mg/l στα δείγματα 114P9 και BP1 και 900 mg/l στο δείγμα 114G20. Αντίστοιχα η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου παρουσιάζεται μέγιστη, 18.2 mg/l στο δείγμα 115G7, 17.7 mg/l στο 114P9, ενώ ελάχιστη 13.8 mg/l στο δείγμα 116G3, 16.2 mg/l στα δείγματα 114G20 και 114P5.

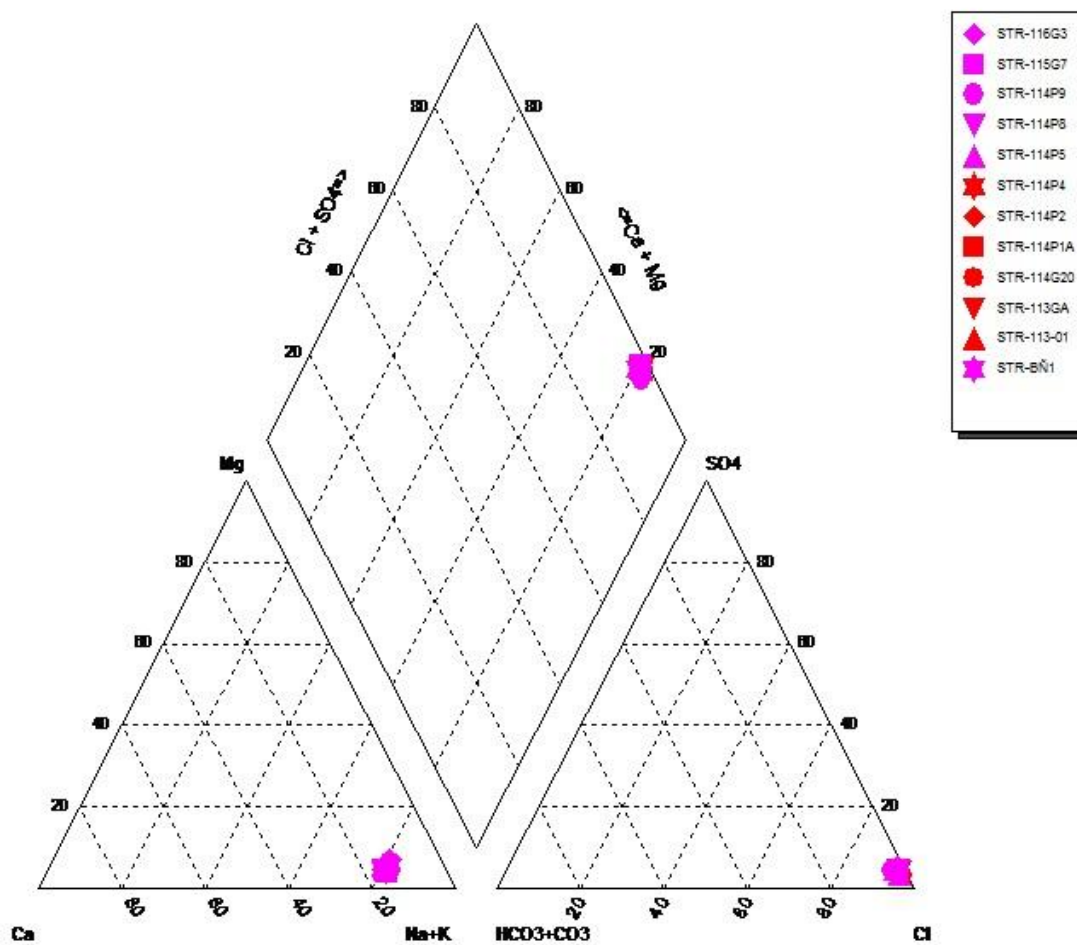
Η περιεκτικότητα σε χλώριο κυμαίνεται από 19574 mg/l στο δείγμα 114G20 έως 10567 mg/l στο δείγμα 114P9. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 11843 mg/l στο δείγμα BP1, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι η τιμή 19290 mg/l στο δείγμα 113GA. Η περιεκτικότητα σε ασβέστιο λαμβάνει τιμές από 1675 mg/l στο δείγμα 115G7 έως 864 mg/l στο δείγμα 114P9. Κοντά στο μέγιστο ξεχωρίζει η τιμή 1668 mg/l στο δείγμα 114G20. Η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο παρουσιάζει ανώτατη τιμή 484 mg/l στο δείγμα 116G9 και κατώτατη τιμή 174 mg/l στο δείγμα 114P9. Κοντά στο ελάχιστο ξεχωρίζει η τιμή 220 mg/l στο δείγμα BP1. Η περιεκτικότητα σε

κάλιο έχει ανώτατο όριο 363 mg/l στο δείγμα 114G20 και κατώτατο όριο 204 mg/l στο δείγμα 114P9. Κοντά στο μέγιστο ξεχωρίζει η τιμή 361 mg/l στο δείγμα 113GA. Τέλος, η περιεκτικότητα σε νάτριο είναι μεταξύ 10592 mg/l στο δείγμα 114G20 και 5980 mg/l στο δείγμα 114P9. Κοντά στο μέγιστο ξεχωρίζει η τιμή 10500 mg/l στο δείγμα 113GA, ενώ κοντά στο ελάχιστο 6490 mg/l στο δείγμα BP1.



Σχήμα 15: Διάγραμμα Schoeller υπόγειων θερμών νερών Βόρειας Εύβοιας

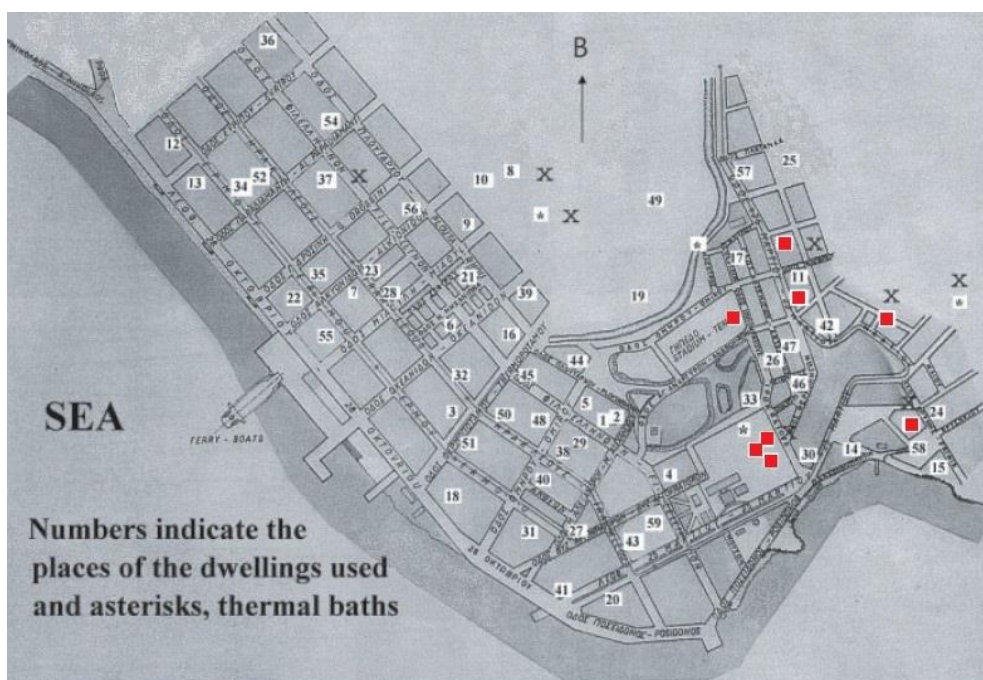
Από το διάγραμμα του σχήματος 15, μπορούμε να διακρίνουμε ότι οι περιεκτικότητες σε ιόντα παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις. Το νάτριο και το χλώριο εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές, ενώ ακολουθεί το ασβέστιο. Συμπερασματικά παρατηρείται μια ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων στα ύδατα της περιοχής.



Σχήμα 16: Διάγραμμα Piper υπόγειων θερμών νερών Βόρειας Εύβοιας

Από το άνωθεν διάγραμμα Piper, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Τα κατιόντα χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως νατριούχα. Τα ανιόντα χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως χλωριούχα σε τέτοιο βαθμό, που εμφανίζονται συγκεντρωμένα στην γωνία του διαγράμματος. Συνολικά τα ύδατα της περιοχής χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωρίοντα”. Εκτιμάται, ότι τα δείγματα δεν υφίσταται απλή αλλοίωση λόγω της επιρροής του θαλασσινού νερού, αλλά προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό την χημική σύσταση του θαλασσινού νερού.

Γ) Ραδιενέργειας



Σχήμα 17: Χάρτης θέσεων προέλευσης δειγμάτων ραδιενέργειας (με κόκκινο) στην πόλη της Αιδηψού (Geranios et. al., 2004).

Πίνακας 6: Δεδομένα μετρήσεων ραδιενέργειας

Αριθμός Δείγματος	Ραδόνιο (Bq m^{-3})
1	680 ± 90
2	570 ± 70
3	380 ± 60
4	320 ± 50
5	230 ± 40
6	260 ± 50
7	160 ± 40
8	40 ± 30

Από οκτώ πηγές εντός της πόλης της Αιδηψού λήφθηκαν μετρήσεις ραδιενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Με μια πρώτη ανάγνωση του Πίνακα 6, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου των θερμών υδάτων της περιοχής, είναι πολύ χαμηλότερες από 100000 Bq m^{-3} που είναι το όριο που προτείνει η επιτροπή των ευρωπαϊκών κοινοτήτων.

5.2 Ομάδα δεδομένων Αγίου Αντωνίου

A) Χαμηλής θερμοκρασίας

Πίνακας 7: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 1/2

Αριθμός Δείγματος	Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Θερμοκρασία °C	pH πεδίου	TDS mg/l	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα uS/cm
Άγιος Αντώνιος 1-1	19/09/2016	15.2	7.45	240	11327
Άγιος Αντώνιος 2-1	19/09/2016	14.3	7.4	244	7591
Άγιος Αντώνιος 1-2	18/09/2017	14.3	7.6	3750	7520
Άγιος Αντώνιος 1-3	17/04/2018	14.5	7.9	3780	7420
Άγιος Αντώνιος 1-4	20/09/2018	14.2	8.17	-	7670

Σημείωση: Το TDS (ολικά διαλυμένα στερεά) του τελευταίου δείγματος δεν μετρήθηκε λόγω προβλήματος του οργάνου.

Πίνακας 8: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 2/2

Αριθμός Δείγματος	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l
Άγιος Αντώνιος 1-1	84.82	25	-	34	3294.42	163.5	690.8	2.27
Άγιος Αντώνιος 2-1	79.67	83.61	-	22.78	2184.26	163.5	552.8	2.59
Άγιος Αντώνιος 1-2	111.7	303.6	3748	53.74	2360	128.5	633	0.09
Άγιος Αντώνιος 1-3	82.4	136.54	2353	40.19	2618	137.4	760	0.21
Άγιος Αντώνιος 1-4	117.9	131.88	-	40.62	2324.4	146.1	558.3	0.3

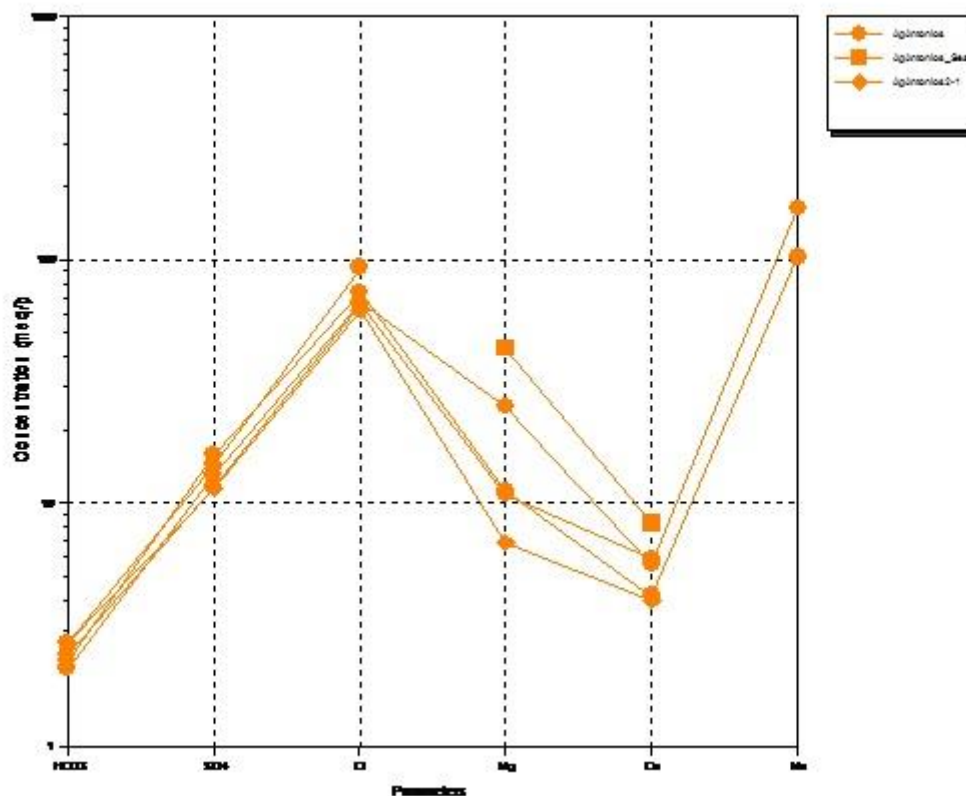
Σημείωση: Στα περισσότερα δείγματα δεν μετρήθηκε η συγκέντρωση του νατρίου λόγω προβλήματος του οργάνου.

Περιγραφή:

Η τρίτη ομάδα δεδομένων αφορά την περιοχή του Αγίου Αντωνίου και αναφέρεται σε ψυχρά ύδατα. Η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές από 15.2°C στο δείγμα 1-1 έως 14.2°C στο δείγμα 1-4. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 14.3°C στα δείγματα 2-1 και 1-2. Το pH του πεδίου είναι ελαφρώς βασικό και κυμαίνεται από 7.4 στο δείγμα 2-1 έως 8.17 στο δείγμα 1-4. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 7.45 στο δείγμα 1-1, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι η τιμή 7.9 στο δείγμα 1-3. Οι τιμές των ολικών διαλυμένων στερεών, εκτός φυσικά της τελευταίας που δεν μετρήθηκε, διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Τα δύο πρώτα δείγματα έχουν τιμές 240 mg/l στο δείγμα 1-1 και 244 mg/l στο 2-1. Τα δύο επόμενα έχουν τιμές 3750 mg/l στο δείγμα 1-2 και 3780 mg/l στο 1-3. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εμφανίζει μέγιστο 11327 uS/cm στο δείγμα 1-1, ενώ ελάχιστο 7420 uS/cm στο δείγμα 1-3. Οι τιμές από τα υπόλοιπα δείγματα είναι πιο κοντά στο ελάχιστο, ενδεικτικά 7520 uS/cm στο δείγμα 1-2.

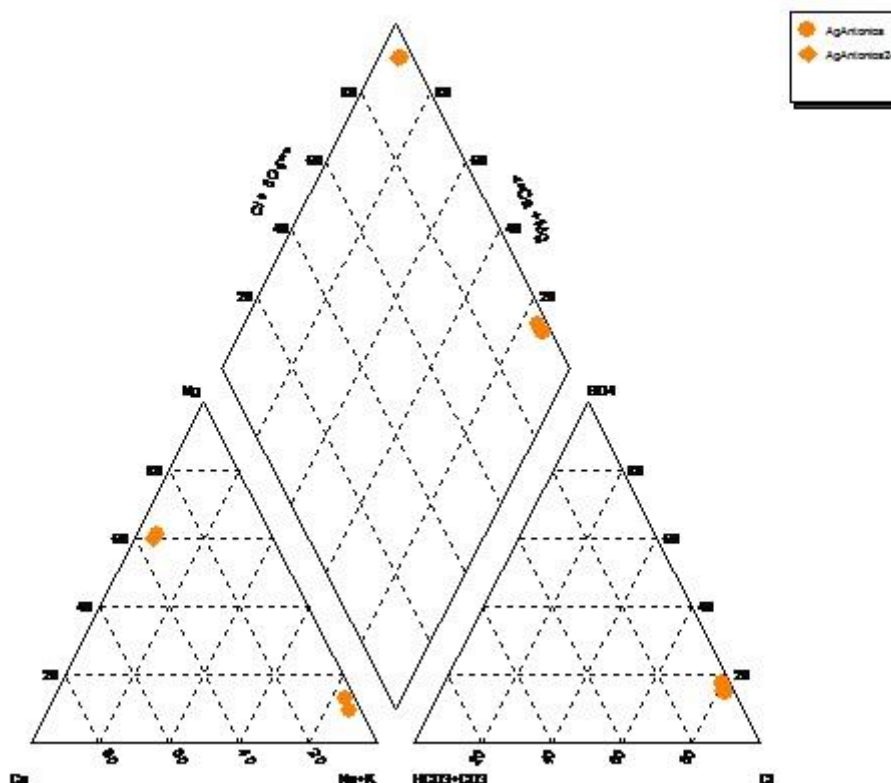
Όσον αφορά τις περιεκτικότητες των δειγμάτων σε ιόντα, η περιεκτικότητα σε διττανθρακικά εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές της, 163.5 mg/l στα δείγματα 1-1 και 2-1, ενώ τις μικρότερες τιμές της, 128.5 mg/l στο δείγμα 1-2 και 137.4 mg/l στο 1-3. Η περιεκτικότητα σε θειικά έχει ανώτατο όριο 760 mg/l στο δείγμα 1-3 και κατώτατο όριο 552.8 mg/l στο δείγμα 2-1, 558.3 mg/l στο δείγμα 1-4. Αντίστοιχα η περιεκτικότητα σε νιτρικά παρουσιάζεται μέγιστη, 2.59 mg/l στο δείγμα 2-1, 2.27 mg/l στο 1-1, ενώ ελάχιστη 0.09 mg/l στο δείγμα 1-2 και 0.21 mg/l στο 1-3.

Η περιεκτικότητα σε χλώριο κυμαίνεται από 3294.42 mg/l στο δείγμα 1-1 έως 2184.26 mg/l στο δείγμα 2-1. Η περιεκτικότητα σε ασβέστιο λαμβάνει τιμές από 117.9 mg/l στο δείγμα 1-4 έως 79.67 mg/l στο δείγμα 2-1. Κοντά στο μέγιστο ξεχωρίζει η τιμή 111.7 mg/l στο δείγμα 1-2. Η περιεκτικότητα σε μαγνήσιο παρουσιάζει ανώτατη τιμή 303.6 mg/l στο δείγμα 1-2 και κατώτατη τιμή 25 mg/l στο δείγμα 1-1. Η περιεκτικότητα σε κάλιο έχει ανώτατο όριο 53.74 mg/l στο δείγμα 1-2 και κατώτατο όριο 22.78 mg/l στο δείγμα 2-1. Τέλος, όσον αφορά την περιεκτικότητα σε νάτριο, οι περισσότερες τιμές δεν ελήφθησαν λόγω προβλήματος του οργάνου, παρόλα αυτά οι υπάρχουσες τιμές βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα της τάξης των 3748 mg/l και 2353 mg/l.



Σχήμα 18: Διάγραμμα Schoeller υπόγειων ψυχρών νερών Αγίου Αντωνίου

Από το διάγραμμα του σχήματος 18, μπορούμε να διακρίνουμε ότι οι περιεκτικότητες σε ιόντα παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις. Εξαιρέση αποτελεί μόνο η περίπτωση του μαγνησίου, που παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις. Μεγαλύτερες τιμές εμφανίζει το χλώριο και το νάτριο. Συνολικά φαίνεται να υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων στα ύδατα της περιοχής.



Σχήμα 19: Διάγραμμα Piper υπόγειων ψυχρών νερών Βόρειας Εύβοιας

Από το άνωθεν διάγραμμα Piper, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Τα κατιόντα χαρακτηρίζονται ως νατριούχα, εκτός ενός δείγματος που εμφανίζεται μαγνησιούχο. Τα ανιόντα χαρακτηρίζονται ως χλωριούχα. Συνεπώς τα ύδατα της περιοχής χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωριόντα”, κάτι που υποδηλώνει προσωρινή σκληρότητα. Σε αυτό συμβάλει βέβαια η μερική διείσδυση του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Καθότι οι τιμές του χλωρίου και του νατρίου των δειγμάτων δεν εμφανίζουν μεγέθη ανάλογα των τιμών του θαλασσινού νερού, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα δείγματα αποτελούνται από θαλασσινό νερό, παρά μόνο ότι επηρεάζονται μερικώς.

Β) Ραδιενέργειας

Πίνακας 9: Δεδομένα μετρήσεων ραδιενέργειας

Αριθμός Δείγματος	Ραδόνιο (Bq m^{-3})	Θορόνιο (Bq m^{-3})
Άγιος Αντώνιος 1-1	27911 \pm 0.02	-
Άγιος Αντώνιος 2-1	45676 \pm 0.02	199 \pm 0.4
Άγιος Αντώνιος 1-2	138132	1048 \pm 0.5
Άγιος Αντώνιος 1-3	96560	223

Σημείωση: Το Θορόνιο του πρώτου δείγματος ήταν μη ανιχνεύσιμο.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 9, οι συγκεντρώσεις ραδονίου των υδάτων της περιοχής είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της Αιδηψού. Ειδικότερα το δείγμα 1-2 λαμβάνει τιμή 138132 Bq/m^3 που υπερβαίνει κατά πολύ το όριο των 100000 Bq/m^3 που ορίζει η νομοθεσία, ενώ το δείγμα 1-3 πλησιάζει σημαντικά το όριο, με τιμή 96560 Bq/m^3 .

Κεφάλαιο 6 Σύγκριση & Ανάλυση Δεδομένων

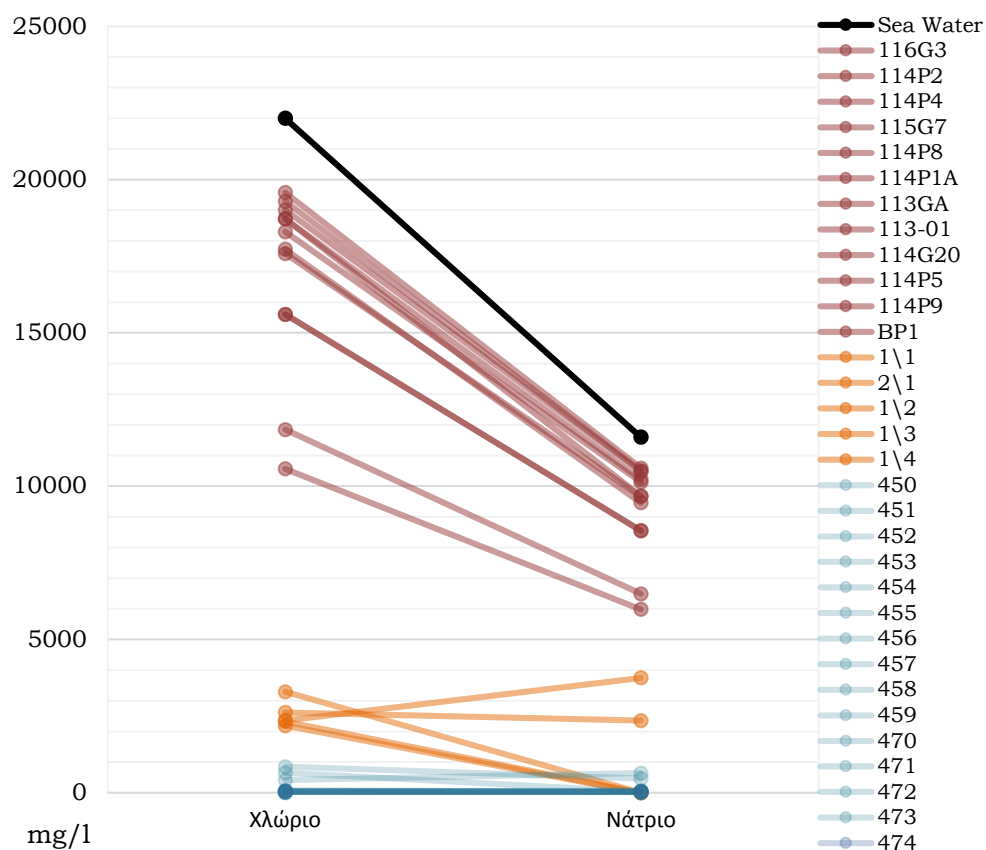
Η ανάλυση και η αξιολόγηση των δεδομένων θα γίνει συγκριτικά με τρία κριτήρια. Το πρώτο είναι η σχέση των δειγμάτων με την χημική σύσταση του θαλασσινού νερού, το δεύτερο που είναι και ο στόχος της εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός του τύπου των υδάτων μέσω των αποτελεσμάτων των υδροχημικών αναλύσεων που παρατέθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο και το τρίτο είναι η περιεκτικότητα τους σε ραδόνιο.

6.1 Σύγκριση με το θαλασσινό νερό

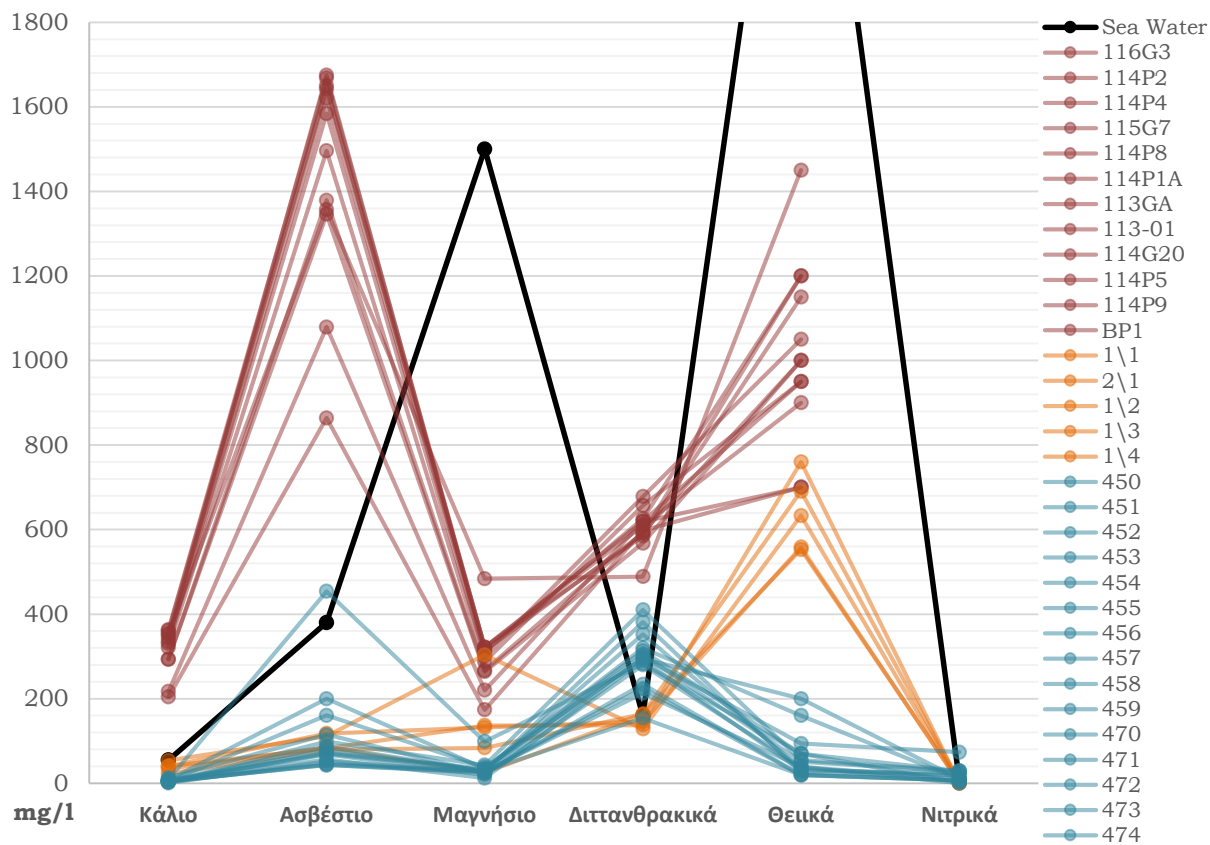
Το θαλασσινό νερό αποτελεί το 97% του συνολικού όγκου του νερού της Γης και καλύπτει το 71% της επιφάνειας της. Παρόλη την συντριπτική παρουσία του στον πλανήτη μας, η χημική του σύσταση διαφοροποιείται ως ένα βαθμό ανάλογα με την περιοχή. Έτσι οι τιμές που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία διαφέρουν από εκείνες για την περιοχή του Αιγαίου που παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση αλάτων, όπως φαίνεται στον πίνακα 10. Τα κύρια στοιχεία που περιέχονται στο νερό είναι το χλώριο, το νάτριο, το μαγνήσιο, το θείο, το ασβέστιο, το κάλιο και ο άνθρακας, που αποτελούν το 99.9% όλων των διαλυμένων στοιχείων. Τα υπόλοιπα γνωστά στοιχεία που περιέχονται στο νερό υπό μορφή ιόντων, μπορούν να αγνοηθούν καθώς η συγκέντρωσή τους είναι ελάχιστη.

Πίνακας 10: Σύσταση θαλασσινού νερού στην περιοχή του Αιγαίου

pH	7.3
TDS	40000 mg/l
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα	56300 uS/cm
Cl	22000 mg/l
Na	11600 mg/l
Mg	1500 mg/l
Ca	380 mg/l
K	55 mg/l
HCO ₃	160 mg/l
SO ₄	2800 mg/l
NO ₃	5 mg/l



Σχήμα 20: Διάγραμμα περιεκτικότητας δειγμάτων σε κύρια ιόντα 1/2



Σχήμα 21: Διάγραμμα περιεκτικότητας δειγμάτων σε κύρια ιόντα 2/2

Στον πίνακα 20, παρατηρούμε ότι η ομάδα δεδομένων υψηλής ενθαλπίας της Αιδηψού εμφανίζει συγκέντρωση σε αλατούχες ρίζες αντάξια του θαλασσινού νερού, με τα δείγματα 114P1A, BP1 και 114P9 να λαμβάνουν τις χαμηλότερες τιμές με κατώτατο όριο 10567 mg/l χλώριο και 5980 mg/l νάτριο. Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας του Αγίου Αντωνίου επηρεάστηκε συγκριτικά λιγότερο από το θαλασσινό νερό, ενώ η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αιδηψού δείχνει πολύ χαμηλή συγκέντρωση σε αλατούχες ρίζες με ανώτατο όριο 66 mg/l χλώριο στο δείγμα 455 και 60 mg/l νάτριο στο δείγμα 470. Ξεχωρίζουν ωστόσο τα τρία δείγματα από την περιοχή Σχίνος με ανώτατες τιμές 848 mg/l χλώριο στο δείγμα 451 και 642 mg/l νάτριο στο δείγμα 452.

Στον πίνακα 21, παρατηρούμε ότι το σύνολο των δεδομένων παρουσιάζει χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε μαγνήσιο και θεικές ρίζες σχετικά με το θαλασσινό νερό, με την ομάδα υψηλής ενθαλπίας να πλησιάζει περισσότερο. Οι συγκεντρώσεις σε κάλιο και ασβέστιο, είναι υψηλότερες από το θαλασσινό νερό στην ομάδα δεδομένων υψηλής ενθαλπίας, ενώ είναι χαμηλότερες στις ομάδες δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας. Εξαιρέση αποτελούν οι τιμές 53.74 mg/l κάλιο στο δείγμα 1\2 και 454 mg/l ασβέστιο στο δείγμα 452. Οι διττανθρακικές ρίζες είναι περισσότερες από το θαλασσινό νερό στην περιοχή της Αιδηψού, ενώ στον Άγιο Αντώνιο ελαφρώς λιγότερες. Οι νιτρικές ρίζες κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα στο σύνολο των δεδομένων.

Παρατηρώντας τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ομάδα δεδομένων υψηλής ενθαλπίας Αιδηψού αποτελείται κατά κύριο λόγο από θαλασσινό νερό που έχει εισχωρήσει στον υδροφόρο ορίζοντα. Εξαιρέση αποτελούν τα δείγματα 114P1A, 114P9 και BP1 όπου αν και υπάρχει θαλασσινό νερό κατά ένα μεγάλο ποσοστό, αυτό δεν έχει πληρώσει ολοκληρωτικά τα συγκεκριμένα δείγματα. *Γενικότερα, το ποσοστό των διττανθρακικών ιόντων στο θαλάσσιο νερό ως ποσοστό όλων των διαλυμένων ιόντων είναι πολύ χαμηλότερο από το αντίστοιχο ποσοστό στο ποτάμιο νερό, με τα διττανθρακικά ιόντα να αποτελούν το 48% των διαλυμένων ιόντων στα ποτάμια ύδατα, αλλά μόλις το 0.14% όλων των ιόντων του θαλάσσιου νερού (Gale & Thomson, 2006).* Καθώς αυτό ισχύει για την προαναφερθείσα ομάδα δεδομένων, ενισχύεται ο παραπάνω χαρακτηρισμός. Επιπροσθέτως οι υψηλές συγκεντρώσεις ασβεστίου υποδηλώνουν ότι τα θερμά υπόγεια ύδατα σε κάποιο σημείο συναντούν και διαλύουν ανθρακικά πετρώματα.

Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αιδηψού δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη θαλασσινού νερού. Οι τιμές της περιοχής Σχίνος είναι πιο αυξημένες, αλλά όχι σε υπερβολικό βαθμό. Αυτό συμφωνεί με την γεωχημική μελέτη που είχε πραγματοποιηθεί στα κρύα ύδατα της περιοχής και δείχνει ότι οι κρύοι υδροφορείς δεν επηρεάζονται από τα θερμά υπόγεια ύδατα (Κανελλόπουλος, 2011). Στην ίδια έρευνα υπογραμμίζεται ότι οι θερμοί ταμιευτήρες και η ροή του θερμού ύδατος

της περιοχής, δεν συνδέεται υδραυλικά με τους ρηχότερους κρύους υδροφορείς.

Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αγίου Αντωνίου, έχει σαφώς υψηλότερες τιμές από της άνωθεν ομάδας. Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου της υφαλμύρωσης του υδροφόρου ορίζοντα. Υπό φυσικές συνθήκες οι υπόγειοι υδροφορείς αποστραγγίζονται προς τη θάλασσα, όμως σε περιπτώσεις που η στάθμη του γλυκού νερού μειώνεται, αντιστρέφεται η κατάσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την διείσδυση θαλασσινού νερού που ενισχύει την παρουσία ιόντων χλωρίου και νατρίου. Αυτό βέβαια είναι δυνατόν να συμβαίνει και λόγω διέλευσης των υδάτων μέσω πετρωμάτων ιζηματογενής προέλευσης.

6.2 Σύγκριση με γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας

Η αδυναμία του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Αιδηψού να παράγει δεδομένα που να χαρακτηρίζουν την χημική σύσταση ενός «τυπικού» γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας, λόγω της επιρροής του θαλασσινού νερού, επιφέρει την εισαγωγή δεδομένων κατάλληλων ώστε να εκπονηθεί ο στόχος της μελέτης. Τα δεδομένα αυτά αναφέρονται σε μετρήσεις από την περιοχή των Καμένων Βούρλων. Η περιοχή αυτή τοποθετείται νοτιοδυτικά της χερσονήσου της Λιχάδας, στην απέναντι όχθη του Ευβοϊκού κόλπου, από την πλευρά της Στερεάς Ελλάδας (Σχήμα 22). Λόγω της εγγύτητας στην Βόρεια Εύβοια χαρακτηρίζεται από την ίδια γεωλογική διαστρωμάτωση και ο μαγματικός θάλαμος του Ευβοϊκού κόλπου επιδρά εξίσου καταλυτικά από γεωθερμικής απόψεως. Τα δεδομένα του γεωθερμικού πεδίου των Καμένων Βούρλων παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 11: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 1/2

Αριθμός Δείγματος	Θερμοκρασία °C	pH πεδίου	TDS mg/l	HCO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l
THE1	40.4	5.95	7.55	756	510	12.8
KBE10	32.8	6.24	22.54	540	744	0.7
KB1	35.5	5.92	11.53	567	960	4
KB3A	29.6	6.19	8.14	560	580	3.7
KB3B	30.2	6.09	7.96	524	560	4
KB3C	30.3	6.14	8.23	576	580	4
KB4	30.3	6.06	9	650	680	3.1

Πίνακας 12: Δεδομένα υδροχημικών αναλύσεων 2/2

Αριθμός Δείγματος	Cl mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	Zn μg/l	Fe μg/l	Ni μg/l	Pb μg/l
THE1	4400	470	219	75	2750	4	0.005	3	3
KBE10	6720	510	267	83	3800	8	1.04	35	4
KB1	7250	720	323	166	5900	8	0.29	37	2
KB3A	4650	520	220	86	4200	13	0.026	6	2
KB3B	4900	480	197	91	3800	11	0.023	6	2

KB3C	5000	520	218	88	4000	12	0.038	6	2
KB4	5500	650	291	132	5000	8	0.1	8	3

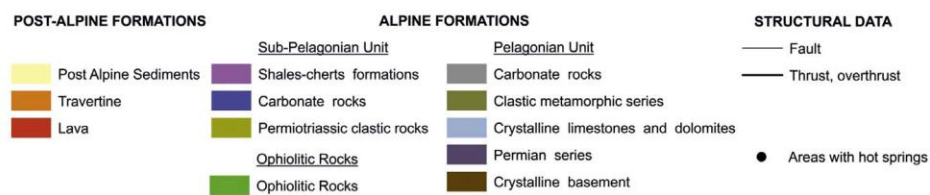
Περιγραφή:

Η τέταρτη και τελευταία ομάδα δεδομένων από την περιοχή των Καμένων Βούρλων αφορά θερμές πηγές (Σχήμα 22). Η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές από 40.4°C στο δείγμα THE1 έως 29.6°C στο δείγμα KB3A. Το pH του πεδίου είναι ελαφρώς όξινο και κυμαίνεται από 5.92 στο δείγμα KB1 έως 6.24 στο δείγμα KBE10. Κοντά στο ελάχιστο είναι η τιμή 5.95 στο δείγμα THE1, ενώ κοντά στο μέγιστο είναι οι τιμές 6.19 στο δείγμα KB3A. Οι τιμές των ολικών διαλυμένων στερεών είναι πολύ μικρές σε όλα τα δείγματα, με ανώτατη τιμή 22.54 mg/l στο δείγμα KBE10 και κατώτατη τιμή 7.55 mg/l στο δείγμα THE1.

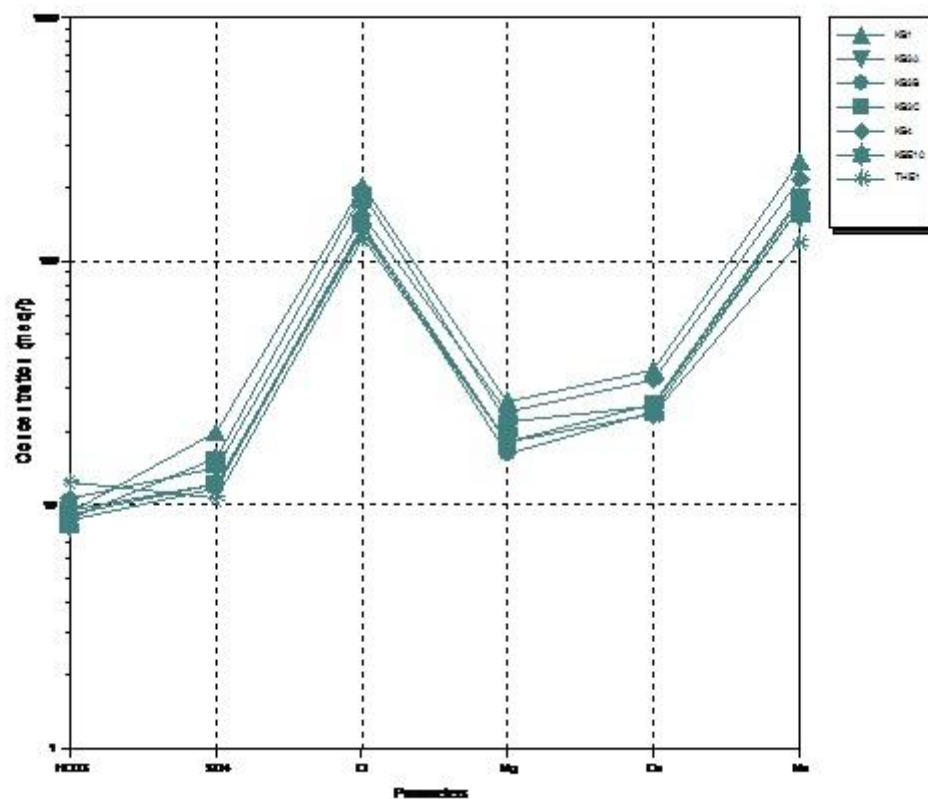
Όσον αφορά τις περιεκτικότητες των δειγμάτων σε ιόντα, η περιεκτικότητα σε διπτανθρακικά εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές της, 756 mg/l στο δείγμα THE1 και 650 mg/l στο KB4, ενώ τις μικρότερες τιμές της, 524 mg/l στο δείγμα KB3B και 540 mg/l στο KBE10. Η περιεκτικότητα σε θειικά έχει ανώτατο όριο 960 mg/l στο δείγμα KB1 και κατώτατο όριο 510 mg/l στο δείγμα THE1. Αντίστοιχα η περιεκτικότητα σε νιτρικά παρουσιάζεται μέγιστη, 12.8 mg/l στο δείγμα THE1 ενώ ελάχιστη 0.7 mg/l στο δείγμα KBE10.

Οι τιμές των κύριων ιόντων παρουσιάζονται μέγιστες στο δείγμα KB1, με χλώριο 7250 mg/l, ασβέστιο 720 mg/l, μαγνήσιο 323 mg/l, κάλιο 166 mg/l και νάτριο 5900 mg/l. Αντίθετα παρουσιάζουν την ελάχιστη τιμή τους στο δείγμα THE1, με χλώριο 4400 mg/l, ασβέστιο 470 mg/l, μαγνήσιο 219 mg/l, κάλιο 75 mg/l και νάτριο 2750 mg/l.

LEGEND

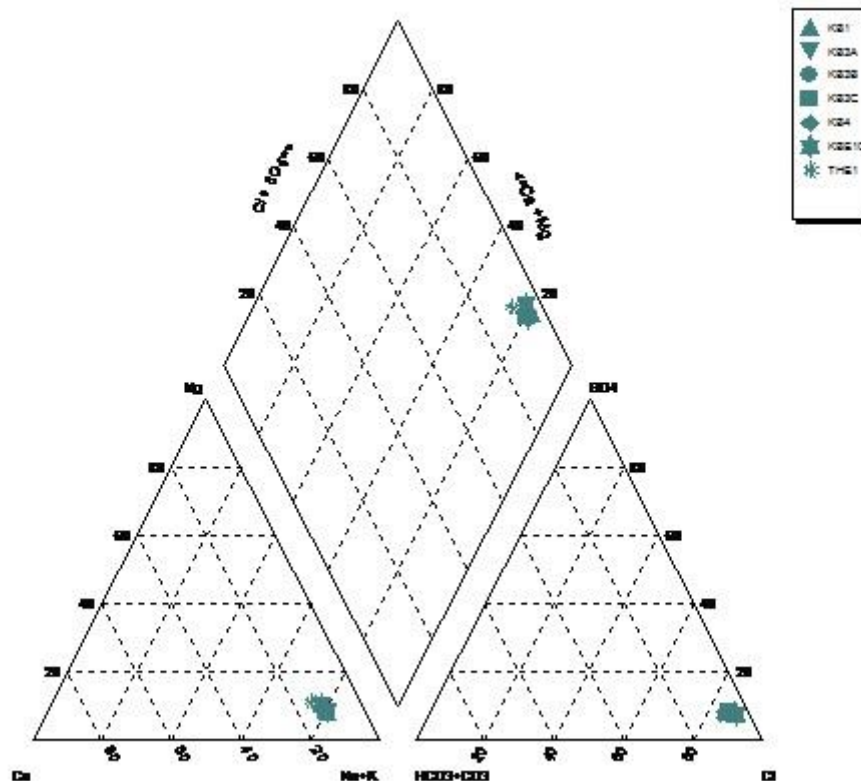


Σχήμα 22: Γεωλογικός χάρτης Καμένων Βούρλων και ευρύτερης περιοχής Βόρειας Εύβοιας (Κανελλόπουλος, 2017)



Σχήμα 23: Διάγραμμα Schoeller υπόγειων θερμών νερών Καμένων Βούρλων

Από το διάγραμμα του σχήματος 23, μπορούμε να διακρίνουμε ότι οι περιεκτικότητες σε ιόντα παρουσιάζουν πολύ μικρές διακυμάνσεις. Το νάτριο και το χλώριο εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές, ενώ ακολουθεί το ασβέστιο. Συμπερασματικά παρατηρείται μια ομοιόμορφη κατανομή των ιόντων στα ύδατα της περιοχής.



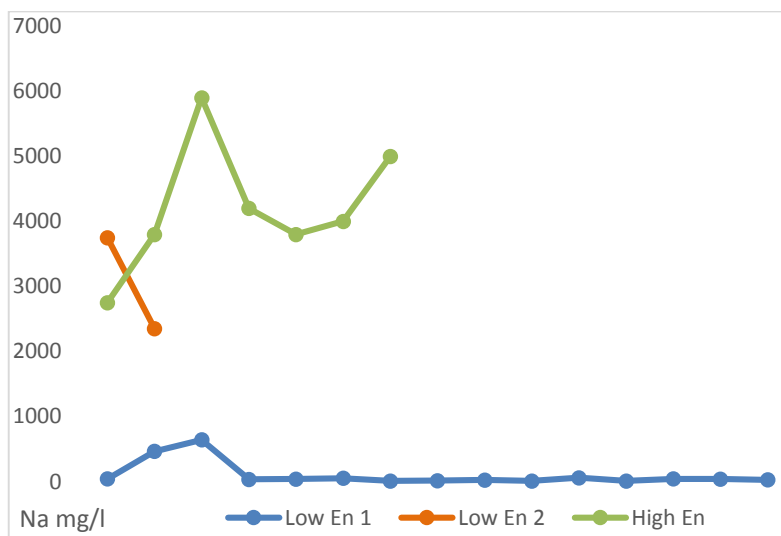
Σχήμα 24: Διάγραμμα Piper υπόγειων θερμών νερών Καμένων Βούρλων

Από το άνωθεν διάγραμμα Piper, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Τα κατιόντα χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως νατριούχα. Τα ανιόντα χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως χλωριούχα. Συνεπώς τα ύδατα της περιοχής χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωριόντα”, κάτι που υποδηλώνει μερική επιρροή του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, σύμφωνα με το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

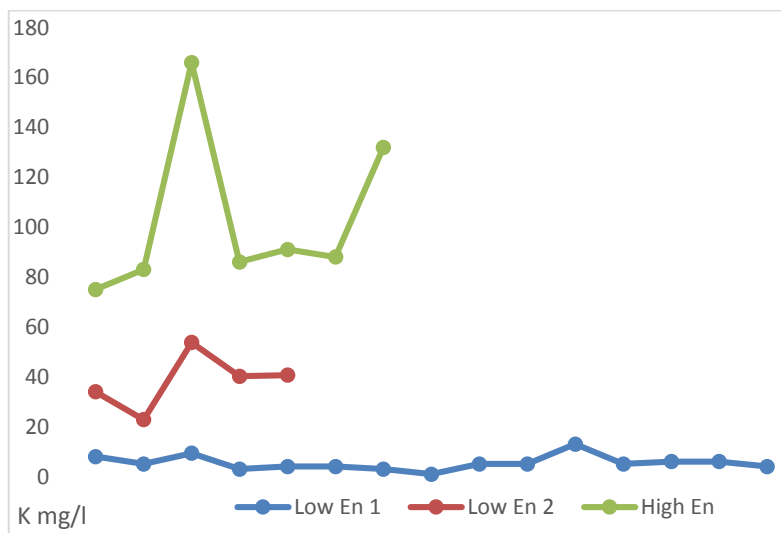
6.3 Διαγράμματα συγκεντρώσεων

Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν σε μια ποσοτική κλίμακα την περιεκτικότητα σε κύρια ιόντα των τριών ομάδων δεδομένων. Η ομάδα χαμηλής ενθαλπίας Αιδηψού απεικονίζεται με μπλε, η ομάδα χαμηλής ενθαλπίας Αγίου Αντωνίου με πορτοκαλί και η ομάδα Καμένων Βούρλων με πράσινο. Ο σκοπός αυτών των διαγραμμάτων είναι να λειτουργήσουν βοηθητικά στην ερμηνεία και τον χαρακτηρισμό των δεδομένων.

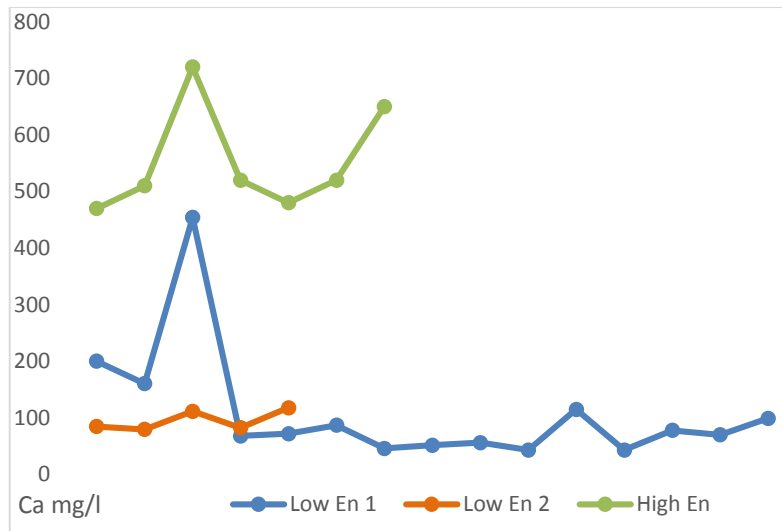
Κατιόντα



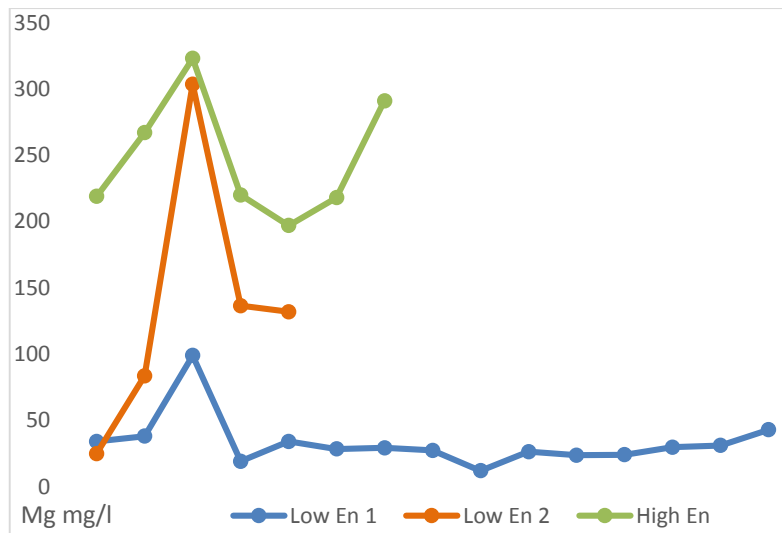
Σχήμα 25: Διάγραμμα συγκεντρώσεων Na



Σχήμα 26: Διάγραμμα συγκεντρώσεων K

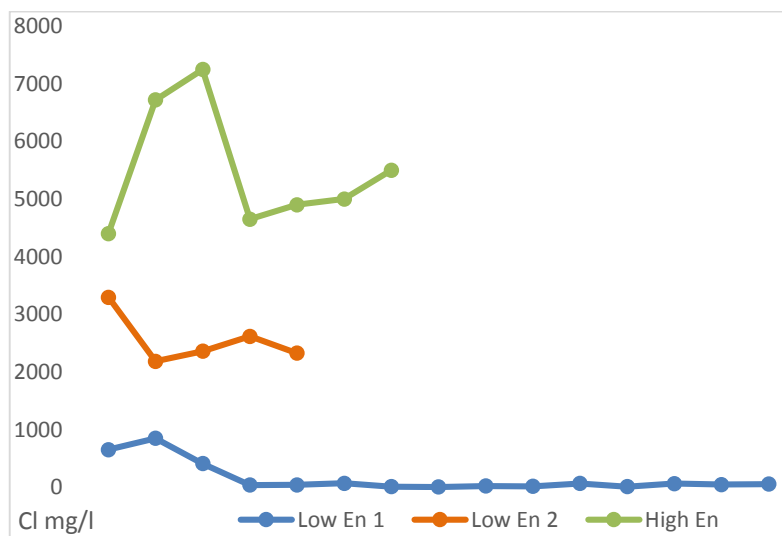


Σχήμα 27: Διάγραμμα συγκεντρώσεων Ca

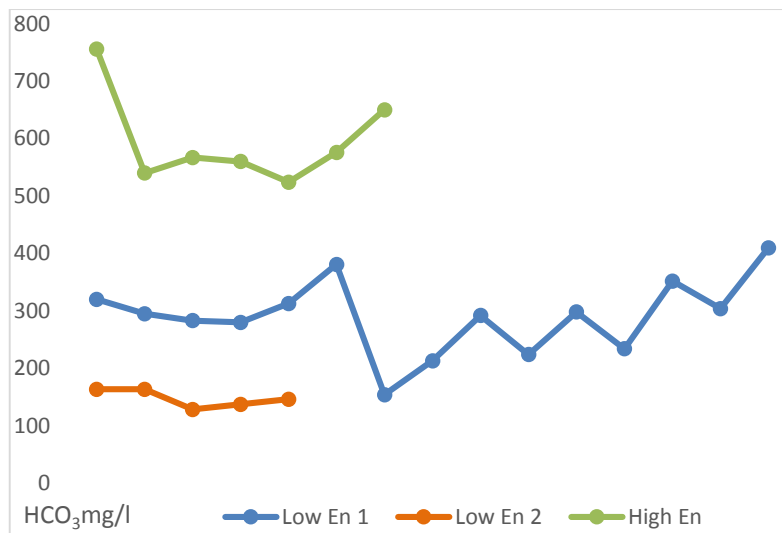


Σχήμα 28: Διάγραμμα συγκεντρώσεων Mg

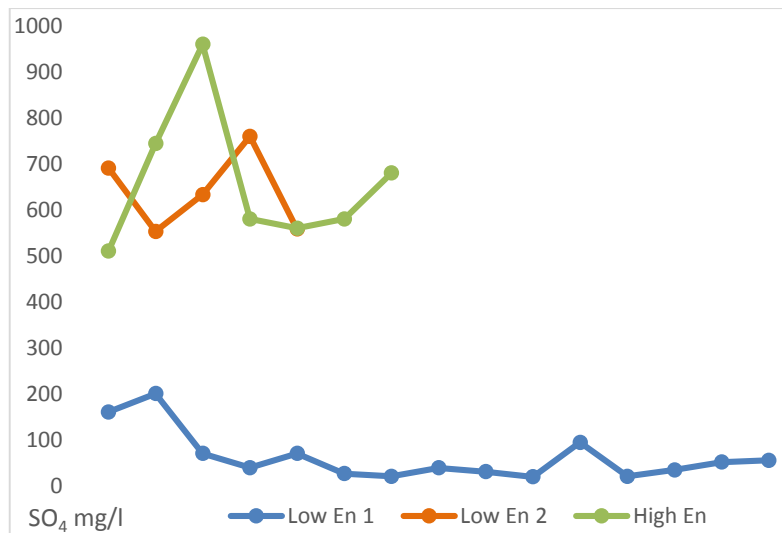
Ανιόντα



Σχήμα 29: Διάγραμμα συγκεντρώσεων Cl



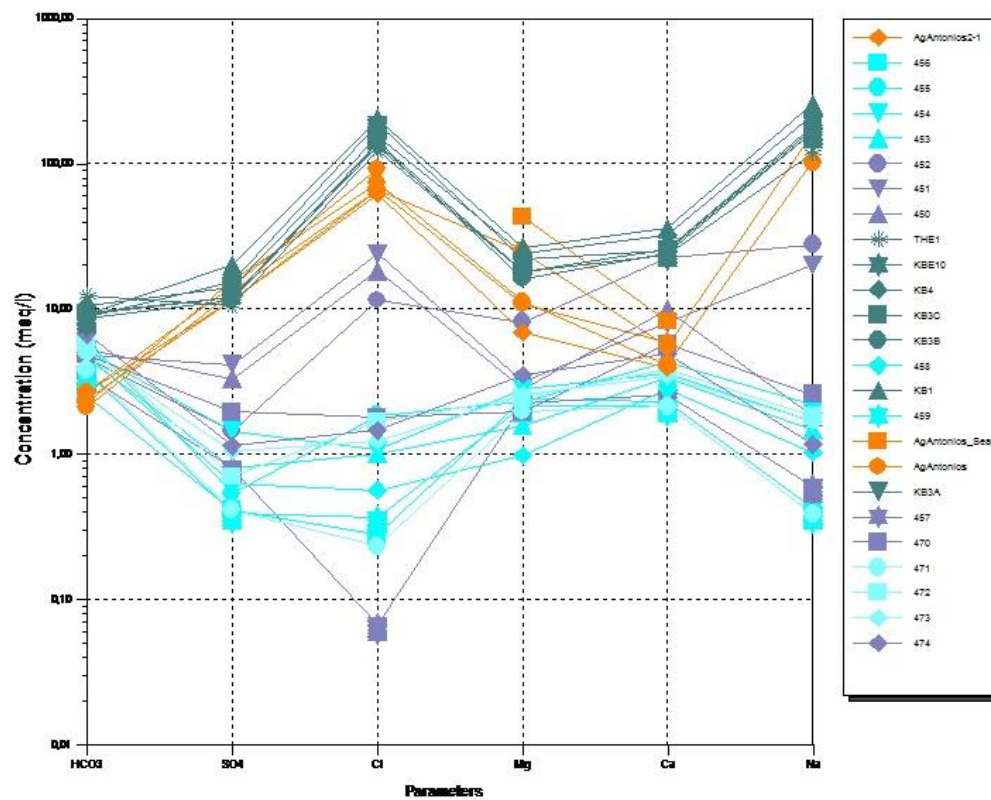
Σχήμα 30: Διάγραμμα συγκεντρώσεων HCO_3



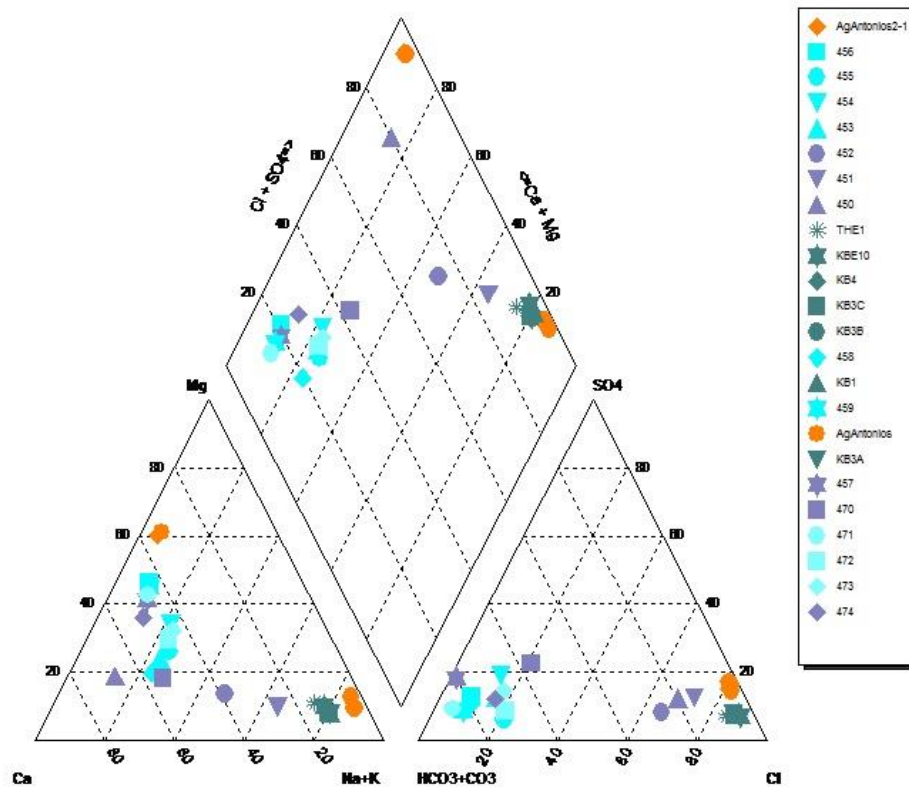
Σχήμα 31: Διάγραμμα συγκεντρώσεων SO_4

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα, τόσο των ανιόντων (Σχήματα 29,30,31) όσο και των κατιόντων (Σχήματα 25,26,27,28), αποδεικνύεται ότι το πεδίο με την μεγαλύτερη θερμοκρασία, περιέχει αυξημένη ποσότητα σε όλα τα ιόντα συγκριτικά με τα «τυπικά» χαμηλής ενθαλπίας πεδία. Εξαιρέση αποτελούν μεμονωμένα δείγματα, που σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζουν τιμές ανάλογης τάξης μεγέθους με εκείνες του πεδίου των Καμένων Βούρλων. Παραδειγματος χάριν το δείγμα 1-2 στα Σχήματα 25 και 28, το δείγμα 452 στο Σχήμα 27 και τα θειικά ιόντα της ομάδας δεδομένων Αγίου Αντωνίου στο Σχήμα 31. Ωστόσο σε γενικό πλαίσιο ακολουθείται το αναμενόμενο μοτίβο, με τις τιμές του πεδίου Καμένων Βούρλων να είναι πολλαπλάσιες των αντίστοιχων τιμών των πεδίων χαμηλής ενθαλπίας. Αυτό συμβαίνει διότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ταμιευτήρα, αυξάνονται οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα με τα περιβάλλοντα πετρώματα, καθώς η προσφερόμενη θερμότητα λειτουργεί διεγερτικά στο σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγαλύτερου αριθμού ιόντων.

6.4 Υδροχημικά διαγράμματα

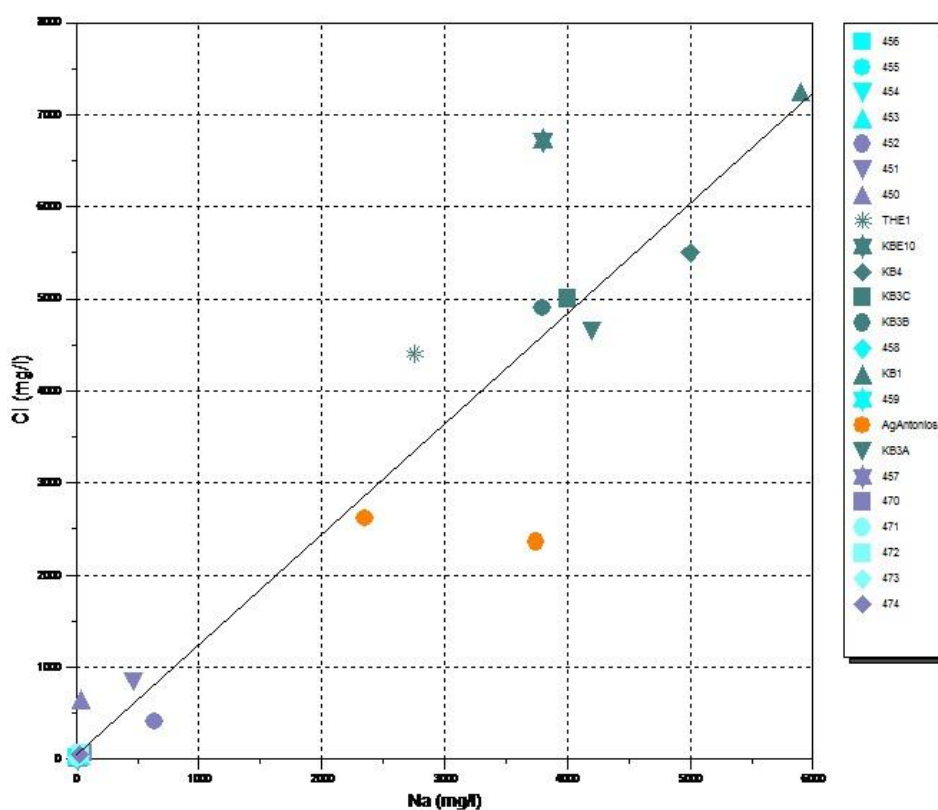


Σχήμα 32: Συγκριτικό διάγραμμα Schoeller



Σχήμα 33: Συγκριτικό διάγραμμα Piper

Από το διάγραμμα Piper του σχήματος 33, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα. Τα κατιόντα διαχωρίζονται σε δυο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει το σύνολο των δειγμάτων των Καμένων Βούρλων, τα δείγματα της περιοχής Σχίνος και την πρώτη πηγή του Αγίου Αντωνίου. Τα δείγματα αυτά χαρακτηρίζονται ως νατριούχα. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει το σύνολο των δειγμάτων της Αιδηψού και την δεύτερη πηγή του Αγίου Αντωνίου. Τα δείγματα αυτά χαρακτηρίζονται ως ασβεστομαγνησιούχα. Τα ανιόντα της πρώτης ομάδας χαρακτηρίζονται ως χλωριούχα, ενώ της δεύτερης ως ανθρακικά. Συνολικά, τα ύδατα της περιοχής του Αγίου Αντωνίου, των Καμένων Βούρλων καθώς και της περιοχής Σχίνος χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωριόντα”, Τα ύδατα της περιοχής της Αιδηψού χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε ανθρακικά”.



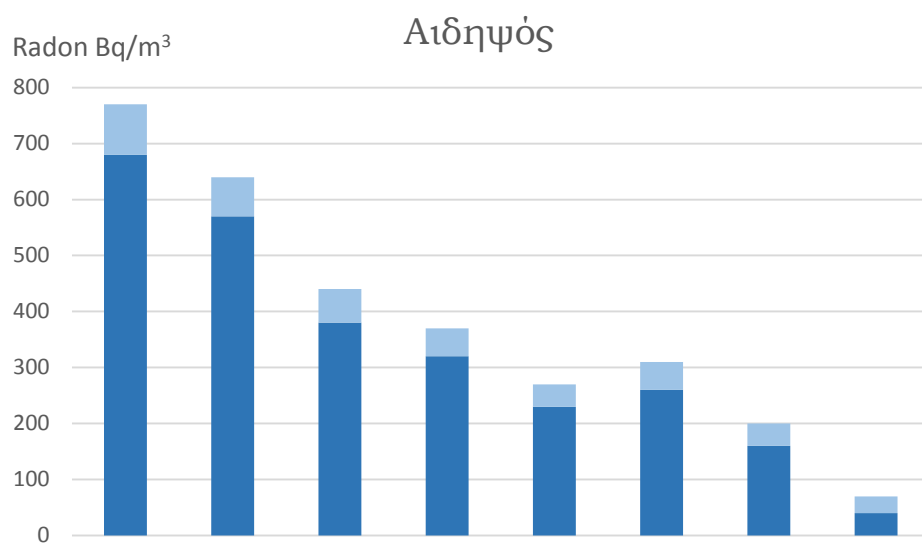
Σχήμα 34: Διάγραμμα Νατρίου – Χλωρίου

Η γραμμική σχέση που περιγράφει το νάτριο με το χλώριο είναι η εξής:

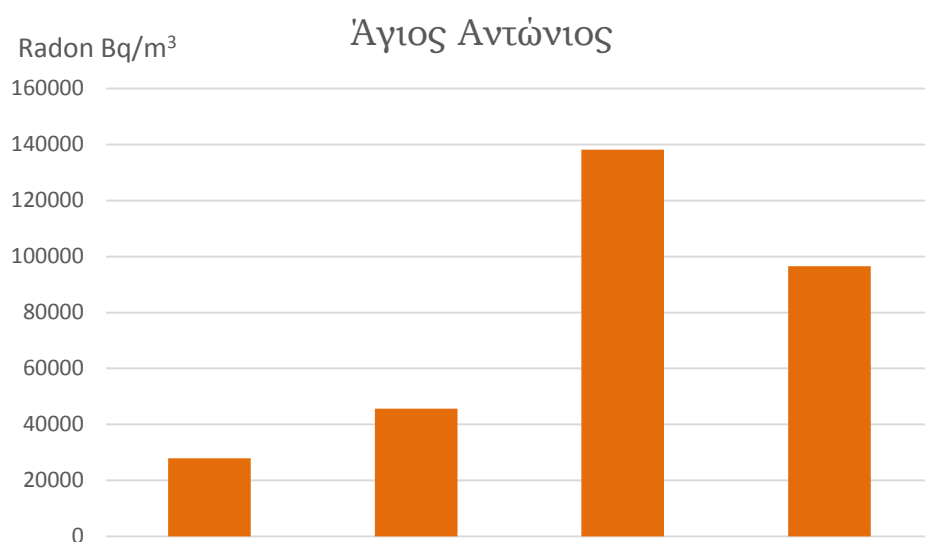
$$Cl = 1.19 * Na + 57.205 \text{ με } r = 95.4\%$$

Από το Σχήμα 34, παρατηρούμε ότι το σύνολο των δειγμάτων της Αιδηψού τοποθετούνται κοντά στην αρχή των αξόνων λόγω της ελάχιστης περιεκτικότητας τους σε χλώριο και νάτριο, με τα δείγματα της περιοχής Σχίνος να ξεχωρίζουν εμφανίζοντας υψηλότερες τιμές. Τα υπόλοιπα δείγματα, όντας “πλούσια σε χλωριόντα”, τοποθετούνται πιο κεντρικά στο εν λόγω διάγραμμα, με το δείγμα KB1 να λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές.

6.5 Περιεκτικότητα σε ραδόνιο



Σχήμα 35: Διάγραμμα ραδονίου Αιδηψού



Σχήμα 36: Διάγραμμα ραδονίου Αγίου Αντωνίου

Από τα σχήματα 35 και 36 μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, η διαφορά της τάξης μεγέθους μεταξύ των δειγμάτων της Αιδηψού και των δειγμάτων του Αγίου Αντωνίου είναι αξιοσημείωτη, σε βαθμό που τα δείγματα κρίνονται μη συγκρίσιμα. Τα δείγματα της Αιδηψού έχουν ελάχιστη περιεκτικότητα σε ραδόνιο, χαρακτηρίζονται βέβαια ως ραδονιούχα αλλά ελάχιστης σημασίας. Τα δείγματα του Αγίου Αντωνίου από την άλλη, δεν χαρακτηρίζονται απλά ως ραδονιούχα αλλά υπερβαίνουν σε δυο περιπτώσεις το όριο των 100.000 Bq m⁻³ που προτείνει η επιτροπή των ευρωπαϊκών κοινοτήτων. Συνεπώς κρίνονται επικίνδυνα για την υγεία σε περίπτωση πόσης τους.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν με βάση την σύγκριση και την ανάλυση των δεδομένων ώστε να εκπονηθεί ο στόχος της εργασίας, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των δεδομένων με την χημική σύσταση του θαλασσινού νερού, όπου προέκυψαν διαφορετικά πορίσματα για κάθε ομάδα δεδομένων.

- Η ομάδα δεδομένων υψηλής ενθαλπίας Αιδηψού παρουσίασε υψηλή συσχέτιση με το θαλασσινό νερό, όσον αφορά την χημική της σύσταση. Οι τιμές των δειγμάτων της ομάδας, πλην τριών περιπτώσεων, ήταν τόσο κοντινές με το θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα τα ύδατα της ομάδας να χαρακτηρίζονται ως θαλασσινό νερό. Ακόμα και στα τρία δείγματα που αποτέλεσαν εξαίρεση, η επιρροή του θαλασσινού νερού είναι συντριπτική, αλλά όχι ολοκληρωτική.
- Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αιδηψού παρουσίασε ασύμφωνη χημική σύσταση σε σχέση με το θαλασσινό νερό. Μόνο τρία δείγματα από την περιοχή Σχίνος εμφάνισαν αυξημένες τιμές, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται “πλούσια σε χλωριόντα”. Τα υπόλοιπα δείγματα δεν εμφάνισαν καμία αλλοίωση στην χημική τους σύσταση, καθώς οι κρύοι υδροφορείς της περιοχής δεν συνδέονται υδραυλικά με την αναδυόμενη, από βαθύτερα σημεία, ροή θερμού θαλασσινού νερού.
- Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αγίου Αντωνίου παρουσίασε ύδατα που χαρακτηρίζονται ως “πλούσια σε χλωριόντα”. Αυτό συμβαίνει λόγω της διείσδυσης και της ανάμιξης του θαλασσινού νερού, σύμφωνα με το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Η αλλοίωση της χημικής σύστασης λόγω του θαλασσινού νερού είναι μερική και όχι πλειοψηφική.

Στη συνέχεια συγκρίθηκε η περιεκτικότητα σε ελεύθερα ιόντα, «τυπικών» συστημάτων υψηλής θερμοκρασίας με «τυπικά» συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας. Λόγω των ακατάλληλων, για την σύγκριση, τιμών της ομάδας δεδομένων υψηλής θερμοκρασίας Αιδηψού, ούτως ώστε να εξυπηρετηθεί ο στόχος της μελέτης, αντικαταστάθηκαν από δεδομένα της περιοχής των Καμένων Βούρλων. Βέβαια η αλλοίωση της χημικής σύστασης λόγω της επίδρασης του θαλασσινού νερού ήταν εμφανής στην περίπτωση και αυτής της ομάδας δεδομένων, με αποτέλεσμα καμία ομάδα να μην μπορεί να χαρακτηριστεί ως «τυπική» ενός γεωθερμικού συστήματος υψηλής θερμοκρασίας.

Το πεδίο υψηλής θερμοκρασίας περιέχει αυξημένη συγκέντρωση ιόντων συγκριτικά με τα χαμηλής ενθαλπίας πεδία. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται η ενέργεια που προσφέρεται στο σύστημα ώστε να πραγματοποιηθούν χημικές αντιδράσεις με τα περιβάλλοντα πετρώματα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του συστήματος. Το πόρισμα για κάθε ομάδα δεδομένων είναι το εξής:

- Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αιδηψού αποτελείται κατά κύριο λόγο από “πλούσια σε ανθρακικά” ύδατα. Στην περιοχή Σχίνος τα ύδατα είναι “πλούσια σε χλωρίοντα”. Ως εκ τούτου, η γεωχημική μελέτη των υπόγειων υδάτων της περιοχής δείχνει ότι η σύσταση των υδάτων ελέγχεται από τρεις παράγοντες. Ο πρώτος είναι ο βαθύς μαγματικός θάλαμος, ο δεύτερος είναι η χημική σύσταση των περιβαλλόντων πετρωμάτων τα οποία είναι ανθρακικά και ο τρίτος είναι η διείσδυση του θαλασσινού νερού, το οποίο ανέρχεται από μεγαλύτερα βάθη χρησιμοποιώντας τα κύρια ρήγματα της περιοχής.
- Η ομάδα δεδομένων χαμηλής ενθαλπίας Αγίου Αντωνίου αποτελείται από “πλούσια σε χλωρίοντα” ύδατα. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Εκτός αυτού, οι αυξημένες περιεκτικότητες των δειγμάτων σε θειικά ιόντα που υποβαθμίζουν ποιοτικά τους υδροφορείς, οφείλονται σε φακούς γύψων στη βάση της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς.
- Η ομάδα δεδομένων Καμένων Βούρλων αποτελείται από “πλούσια σε χλωρίοντα” ύδατα. Η συμμετοχή του θαλασσινού νερού, σύμφωνα με έρευνες (Κανελλόπουλος, 2016), στις θερμές πηγές των Καμένων Βούρλων κυμαίνεται σε ποσοστά 20% – 43%, σε αντίθεση με την περιοχή της Αιδηψού που το ποσοστό είναι 90% - 94%. Το γεγονός αυτό αλλοιώνει την χημική σύσταση σε τέτοιο βαθμό, έτσι ώστε να μην μπορεί να χαρακτηριστεί «τυπικό» σύστημα υψηλής θερμοκρασίας.

Ο τελευταίος στόχος της μελέτης είναι ο χαρακτηρισμός των υδάτων ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ραδόνιο. Όπως παρατηρήθηκε από τις τιμές τους, η μεν ομάδα δεδομένων της Αιδηψού είχε ελάχιστη περιεκτικότητα σε ραδόνιο με αποτέλεσμα να χαρακτηριστούν τα ύδατα ως ελάχιστα ραδονιούχα, η δε ομάδα δεδομένων του Αγίου Αντωνίου είχε σημαντικά υψηλή περιεκτικότητα σε ραδόνιο που υπερέβαινε ανά περιπτώσεις τα όρια, με αποτέλεσμα να χαρακτηριστούν τα ύδατα ως εξαιρετικά ραδονιούχα.

Βιβλιογραφία

Διεθνή

Abdullaev I.G., Abdullaeva I.G., Murtazaev CH., Rustamova M. (1997). Indoor and outdoor radon measurements in some regions of Tajikistan and European Russia. *Radiation Measurements*, Volume 28, No 1-6, pp. 739-740.

Al-Azmi D., Snopek B., Sayed A.M., Domanski T. (2004). A simple bubbling system for measuring radon (^{222}Rn) gas concentrations in water samples based on the high solubility of radon in olive oil, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 71, No 2, pp. 175-186.

Arnorsson S., Gronvold K., Sigurdsson S. (1978). Aquifer chemistry of four high – temperature geothermal systems in Iceland, *National Energy Authority*, Volume 42, pp. 523-536.

Baba A., Bundschuh J., Chandrasekaram D. (2014). Sustainable Energy Developments, Volume 7, Geothermal Systems and Energy Resources, Turkey and Greece.

Brofferio C., Cesana A., Fascilla A., Garlati L., Giuliani A., Pedretti M., Raselli G.L., Terrani M. (2004). Characterization of an underground site in Northern Italy in view of low radioactivity measurements, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 71, No 2, pp. 159-173.

Browne P.R.L., (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, Volume 6, pp. 229--250.

Ceccarelli, A., Celati, R., Grassi, S., Minissale, A., Ridolfi, A., (1987). The southern boundary of Larderello geothermal field. *Geothermics* Volume 16, pp. 505-515.

Cottingham W.N., Greenwood D.A. (1992). *An Introduction to Nuclear Physics*. University of Bristol. Publisher: Cambridge University Press.

Duchi, V., Minissale, A., Manganelli, M., (1992). Chemical composition of natural deep and shallow hydrothermal fluids in the Larderello geothermal field. *J. Volcanol. Geothermal Res.* 49, pp. 313-328.

Facca, G., Tonani, F., (1964). Theory and technology of a geothermal field. *Bull. Volcanol.* Volume 27, pp. 143–189.

Geranios, A., Nikolopoulos, D., Louizi, A., Karatzi, A., (2004): Multiple radon survey in spa of Loutra Edipsou (Greece), *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 122, pp. 251 – 258.

Ghiglieri G. (2008). Hydrogeology of the Nurra region, Sardinia (Italy): Basement – cover influences on groundwater occurrence and

hydrogeochemistry, *Hydrogeology Journal*, January 2009, Volume 17, pp. 447–466.

Goguel, J., (1953). Le régime thermique de la eau souterraine. *Annal. de Mines* 10, 1–29. Horita, J., 2001. Carbon isotope exchange in the system CO₂-CH₄ at elevated temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 1907–1919.

Henley R.W., Ellis A.J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review, *Earth – Science Reviews*, Volume 19, pp. 1-50.

Hochstein M. P. (1990). Classification and assessment of geothermal resources, Geothermal Institute, University of Auckland, New Zealand.

Hounslow W.A. (1995). *Water Quality data, Analysis and Interpretation*, Lewis Publishers, Oklahoma, USA.

Kanellopoulos C., Christopoulou M., Xenakis M., Vakalopoulos P. (2016). Hydrochemical characteristics and geothermometry applications of hot groundwater in Edipsos area, NW Euboea, *Proceedings of the 14th International Congress*, May 2016, Thessaloniki, Greece.

Kanellopoulos C., Mitropoulos P., Voudouris P. (2017). A new terrestrial active mineralizing hydrothermal system associated with ore-bearing travertines in Greece (northern Euboea island and Sperchios area), *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 179, pp. 9-24.

Katsikatsos, G. (1976). La structure tectonique de l' Attique et de l'île de Eubée. *Bull. Soc. Geol. France*, Volume 19, pp. 75-80.

Katsikatsos, G., Mettos A., Vidakis M., (1984). Geological map of Istiea in 1: 50,000, I.G.M.E.

Marty B., Criaud A., Fouillac C. (1988). Low enthalpy geothermal fluids from the Paris sedimentary basin – Characteristics and origin of gases, *Geothermics*, Volume 17, No. 4, pp. 619-633.

Makris J., Papanikolaou D., Stavrakakis G., Liu J., Papoulia J., Sakellariou D., Sachpazi M., Wodtke D. (1996). Detection of thin continental crust below Northern Evoikos Gulf, central Greece, In: XXV General Assembly of the ESC, Reykjavik, Iceland.

Makris J., Veis R. (1977). Crustal structure of the central Aegian Sea and the islands of Evia and Crete (Greece), obtained by refraction seismic measurements, *J. Geophys* 42, pp. 329-341.

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

Minissale A.A. (2018). A simple geochemical prospecting method for geothermal resources in flat areas, Geothermics, Italian Council for Research (CNR), Institute of Geosciences and Earth Resources (IGG), Volume 72, pp. 258-267.

Moeck I.S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls, Earth and atmospheric sciences, University of Alberta, Canada, Renewable and sustainable energy reviews 37, pp. 867-882.

Nicholson K. (1993). Geothermal Fluids: Chemistry and exploration techniques, The Robert Gordon University, Aberdeen, Scotland. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, pp. 1-24.

Reed M.J. (1983). Assessment of low temperature geothermal resources of the United States, U.S. Geological Survey Circular 892.

Roberts S., Jackson J. (1991). Active normal faulting in central Greece: an overview, in Roberts, A.M., G. Yielding, B. Freeman (eds.): The Geometry of Normal Faults, Geol. Soc. Sp. Pub., 56, pp. 125-142.

Seidel, E., Kreuzer, H., Harre, W. (1982): A Late Oligocene/Early Miocene High Pressure Belt in the External Hellenides. Geol. Jb., E 23, pp.165–206.

Steiner, A., (1968). Clay minerals in hydrothermally altered rock at Wairakei, New Zealand. Clays Clay Miner., Volume 16, pp. 193--213.

Vavassis I. (2001). Geology of the Pelagonian zone in Northern Evia Island (Greece): Implications for the geodynamic evolution of the Hellenides, These de doctorat, Univ. de Lausanne.

Ελληνική

Αναγνώστου Χ., Σιούλας Α., Σταυρακάκης Σ., Τζιάβος Χ., (1988). Σχέση μεταξύ νεοτεκτονικής και ιζηματογένεσης στο Β. Ευβοϊκό κόλπο. Γεωλογική Εταιρεία. 30^ο Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Αθήνα.

Βαλοαμίδου Α. (2017). Μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρωσης με χρήση του προσομοιωτή MODFLOW – SEAWAT στην περιοχή Τυμπακίου, Κρήτης. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Βαρδαλή Α. (2018). Γεωλογική και υδροχημική μελέτη των ιστορικά ιαματικών πηγών της περιοχής Τεμενίων, δυτική Κρήτη. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Βαρότσης Ν. (2018). Αδημοσίευτες Σημειώσεις Πανεπιστημιακών Παραδόσεων Μαθήματος Μηχανικής Γεωθερμικών Ταμιευτήρων, του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά.

Βογιάννης Ε. (2005). Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Περιβάλλοντος. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Μυτιλήνη.

Γκιοκά Α. (2014). Ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη ιζημάτων από Νεογενείς λεκάνες της Κρήτης. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Καλλιβρούσης Γ.Δ. (2015). Θεραπευτική δράση του ραδονίου των ιαματικών πηγών. Σύλλογος Ικάρων Επιστημόνων.

Κανελλόπουλος Χ. (2011). Γεωχημική Έρευνα της κατανομής μεταλλικών και άλλων στοιχείων στα υπόγεια ψυχρά και θερμά νερά, το έδαφος και τα φυτά των περιοχών του Ν. Φθιώτιδας και της Β. Εύβοιας. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Κορώνης Δ., Αθανασόπουλος Γ. (2014). Επαναπροσδιορισμός σεισμολογικού καταλόγου του Σεισμολογικού Δικτύου Νότιου Αιγαίου, για την περιοχή της δυτικής Κρήτης. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Χανιά.

Κουφάκης Μ. (2018). Μελέτη γεωλογικών και γεωχημικών χαρακτηριστικών θερμομεταλλικών πηγών στην δυτική Κρήτη. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Λεγκίτσα Σ.Φ. (2014). Ιαματικές Πηγές – Το Θεσμικό Πλαίσιο. Διπλωματική Εργασία. Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας. Διοίκηση Τουριστικών Επιχειρήσεων. ΤΕΙ Πειραιά.

Λέκκας Ν. (1938). Αι 750 μεταλλικαί πηγαί της Ελλάδος. Διεύθυνση ιαματικών πηγών και εκθέσεων. Αθήνα.

Λουκας Γ. (2005). Συμβολή εις την μελέτη των μηχανισμών δράσεως των ιαματικών πηγών στην μεταβολή της ψυχικής διάθεσης του ανθρώπου κατά τη λουτροθεραπευτική αγωγή. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Ιατρικής. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Αλεξανδρούπολη.

Μανούσογλου Ε. (2008). Αδημοσίευτες Σημειώσεις του μαθήματος εισαγωγή στην Γεωλογία Ελλάδος, της Ερευνητικής Μονάδας Γεωλογίας, του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης.

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

Μέττος Α., Ροντογιάννη Θ., Παπαδάκης Γ., Πάσχος Π., Γεωργίου Χ., (1991). Νέα δεδομένα στη γεωλογία των Νεογενών αποθέσεων της Β. Εύβοιας. Γεωλογική Εταιρεία. Αθήνα.

Μπορνόβας Ι., Ροντογιάννη-Τσιαμπάου Θ., (1983). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:500.000. Έκδοση ΙΓΜΕ.

Μπουτσάκης Κ. (2016). Διερεύνηση θερμοκρασιακών μεταβολών σε υδροφορείς της Μεσσαράς. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Παπαδοπούλου Σ. (2012). Η ιστορία των ιαματικών λουτρών και η μετεξέλιξη τους σε Spa. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Αισθητικής και Κοσμητολογίας. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα. Θεσσαλονίκη.

Πλιάμπας Γ. (2014). Γεωφυσική Διασκόπηση στα Φαλάσαρνα με τη μέθοδο της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.

Τάταρης Α., Χριστοδούλου Γ. (1969). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος 1:50000, Φύλλο Χάρτη «Αλικιανός» - Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήνα (Υ.Γ.Ε.Υ).

Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν. (2004). Γεωθερμία – Γεωθερμικοί πόροι, Γεωθερμικά Ρευστά, Εφαρμογές, Περιβάλλον. Εκδόσεις Τζιόλα.

Χατζής, Καβουρίδης, Βακαλόπουλος, Ξενάκη (2008). Έρευνα και εντοπισμός γεωθερμικών πεδίων στη βόρεια Εύβοια. Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών. Διεύθυνση Γεωθερμίας & Θερμομεταλλικών Υδάτων. Αθήνα.

Διαδικτυακή

<https://www.mikrosapoplous.gr/heracletus/heracletus4.html>

<https://www.thermalsprings.gr/index.php/el/menu-istorika-stoixeia>

http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm

<https://www.lenntech.com/composition-seawater.htm>

<http://www.oasp.gr/node/207>

<http://www.waterencyclopedia.com/Mi-Oc/Ocean-Chemical-Processes.html>