

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΤΡΑΪΑΝΟΥΠΟΛΗΣ, ΝΟΜΟΥ ΕΒΡΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΑΛΕΤΣΑ ΞΑΝΘΗ – ΜΠΑΛΑΦΑ ΕΡΑΣΜΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Κ. ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Επίκ. Καθηγητής

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, ανατέθηκε προς έρευνα κατά το έτος 2012, η ευρύτερη λεκάνη Τραϊανουπόλεως του νομού Έβρου, για το σημαντικό γεωθερμικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει, καθώς επίσης και για τις δυνατότητες του δυναμικού αυτού για ενεργειακή αξιοποίηση.

Για την εκπόνηση της εργασίας συνεργαστήκαμε με τον επίκουρο καθηγητή Κον Κ. Βουδούρη, επιβλέποντα της εργασίας, τη Διδάκτορα Γεωθερμίας Μαρία Παπαχρήστου, τον Ν. Κολιό (Διδάκτορα Γεωθερμίας), ο οποίος μας παρείχε τις μελέτες του Ι.Γ.Μ.Ε. για τη συγκεκριμένη περιοχή, τον Δήμο Αλεξανδρούπολης, καθώς επίσης και τον Αντιδήμαρχο Πράσινης Ενέργειας, Κον Ιωάννη Φαλέκα.

Επισκεφθήκαμε την περιοχή με σκοπό τη συλλογή οπτικού υλικού, τη μελέτη αυτής από γεωλογική σκοπιά (τεκτονική δράση, μορφολογία, γεωλογικοί σχηματισμοί) και τέλος, τη λήψη νέων δειγμάτων γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις, η οποία δεν κατέστη τελικά δυνατή, λόγω της ευρύτερης εγκατάλειψης της περιοχής.

Για το λόγο αυτό, αναζητήσαμε και εργαστήκαμε πάνω σε στοιχεία και δεδομένα που συλλέξαμε από βιβλιογραφία, που σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις μας στην ύπαιθρο συντάξαμε την παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για μια συγκεντρωτική έκθεση για τη γεωθερμική κατάσταση στην περιοχή της Τραϊανούπολης, η οποία περιλαμβάνει τα χωριά του Αρίστηνου, της Άνθειας, του Αετοχωρίου και των Λουτρών, με τίτλο: **«Γεωθερμική κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή της Τραϊανούπολης, Νομού Έβρου»**.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	8
3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	9
4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	11
5. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ	12
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
7. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ	18
8. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΥΤΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΑΝ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ-ΘΡΑΚΗΣ	20
9. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	22
10. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ	23
11. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	25
12. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	32
13. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	34
14. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	43
15. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΡΕΥΣΤΩΝ	48
16. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεδομένων των περιβαλλοντικών προβλημάτων που μαστιίζουν τη σημερινή κοινωνία, η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στην εύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Αιτία των περιβαλλοντικών αυτών προβλημάτων φέρεται να είναι η αλόγιστη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας και κυρίως η καύση γαιάνθρακα και πετρελαίου. Ενδεικτικό της κατάστασης είναι ότι σήμερα σχεδόν το 40% της ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) προέρχεται από το πετρέλαιο (Οδηγία 2009/28/ΕΚ).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουμε στραφεί τις τελευταίες δεκαετίες στην αξιοποίηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδραυλική, η βιομάζα και η γεωθερμία. Ειδικότερα, στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η ανάπτυξη των Α.Π.Ε., με συμβολή στο ενεργειακό ισοζύγιο με ποσοστό 20% έως το 2020 (Οδηγία 2009/28/ΕΚ). Γενικότερα, στα πλαίσια των μέτρων που πρέπει να λάβουν οι κυβερνήσεις παγκοσμίως, για την αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συντάχθηκε το Πρωτόκολλο του Κιότο (Ιαπωνία, 1997), σύμφωνα με το οποίο για συνολικά 168 κράτη τίθεται ως δεσμευτικός στόχος, η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (CO_2 , CH_4 , N_2O , HFCs , PFCs , SF_6), περίπου 5% κάτω από το επίπεδο του 1990, μέχρι το διάστημα 2008-2012. Η ανάπτυξη των τεχνικών υποδομών, καθώς και η χρήση των Α.Π.Ε. θα συμβάλλει σε αυτόν τον σκοπό.

Η γεωθερμική ενέργεια εν προκειμένω, συγκαταλέγεται στις Α.Π.Ε., που παρότι δεν είναι ανανεώσιμη σε βάθος χιλιετιών, θεωρείται ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή. Σε σχέση με τις υπόλοιπες Α.Π.Ε, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για διάφορους λόγους. Πιο συγκεκριμένα, είναι διαθέσιμη σε 24ωρη βάση ετησίως και δεν επηρεάζεται από καιρικές συνθήκες. Οι γεωθερμικές μονάδες έχουν μικρό λειτουργικό κόστος, αν και το κόστος εγκατάστασης είναι σημαντικά αυξημένο σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Ακόμα, η απαίτηση γης είναι μικρή για την αξιοποίησή της, καθώς οι γεωθερμικές μονάδες δεν απαιτούν αποθηκευτικούς χώρους, όπως συμβαίνει με μερικές Α.Π.Ε. (βιομάζα, υδροηλεκτρικά και συμβατικά καύσιμα). Τέλος, συνεισφέρει στην ενεργειακή ανεξαρτησία μιας περιοχής, αφού περιορίζει την

εισαγωγή ορυκτών καυσίμων, συμβάλλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στην αύξηση της παραγωγικότητας, ενώ αναπτύσσονται άριστες συνθήκες αξιοποίησης στη σύγχρονη γεωργία, αγροτοβιομηχανία, ιχθυοκαλλιέργεια, αστικές και βιομηχανικές χρήσεις, κ.λ.π. (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004).

Για όλους τους παραπάνω λόγους είναι σημαντική η ανάπτυξη της γεωθερμίας στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στο γεωθερμικό πεδίο της Τραϊνούπολης, το οποίο βρίσκεται στο Νομό Έβρου, ΒΑ/κά της Αλεξανδρούπολης. Εκεί ανήκει και η περιοχή του Αρίστηνου, του Αετοχωρίου, της Άνθειας και των Λουτρών του Δήμου Τραϊανούπολης, για τις οποίες θα γίνει εκτενής αναφορά στα επόμενα κεφάλαια.

Επιγραμματικά, στα πρώτα κεφάλαια γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες της γεωθερμίας, στον τρόπο δημιουργίας των γεωθερμικών πεδίων, στο διαχωρισμό των πεδίων ανάλογα με το θερμοκρασιακό τους εύρος και στις χρήσεις και εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας ανάλογα με τις τιμές των θερμοκρασιών. Τέλος, αναφέρονται τα σημαντικά γεωθερμικά πεδία στον Ελληνικό χώρο.

Εν συνεχεία, παρατίθεται μια θερμική αξιολόγηση του ευρύτερου χώρου της Αν. Μακεδονίας και Θράκης, με σκοπό να κατανοήσουμε τον τρόπο δημιουργίας του γεωθερμικού πεδίου της περιοχής έρευνας. Στα επόμενα κεφάλαια, αναλύεται η γεωλογία, η τεκτονική και η μορφολογία της περιοχής μας, καθώς επίσης παρατίθεται ένας γεωλογικός και ένας τοπογραφικός χάρτης (επεξεργασμένος ψηφιακά).

Όλα αυτά, σε συνδυασμό με γεωφυσικές μελέτες που έγιναν στην περιοχή έρευνας, ήταν καθοριστικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις υδρογεωλογικές και γεωθερμικές συνθήκες που επικρατούν. Τα γεωθερμικά, γεωφυσικά και γεωχημικά στοιχεία, βάσει των οποίων συντάχθηκαν οι πίνακες και τα διαγράμματα για την περαιτέρω ανάλυση της περιοχής και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη γεωθερμική κατάσταση της ευρύτερης περιοχής της Τραϊανούπολης, αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

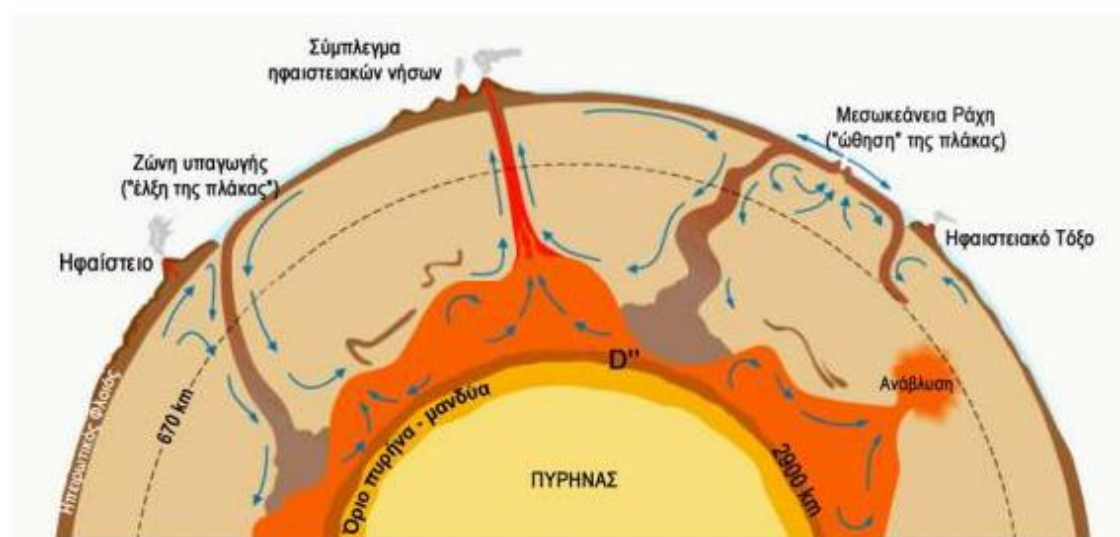
Η γεωθερμική ενέργεια κατ' ουσίαν αφορά στη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Η ύπαρξη αυξημένης θερμικής ροής σχετίζεται με τις γεωτεκτονικές συνθήκες μιας περιοχής ή και την ηφαιστειότητα. Στις περιοχές αυτές η γεωθερμική βαθμίδα είναι μεγαλύτερη από τη μέση γήινη (παρουσιάζουν, δηλ. θετική γεωθερμική ανωμαλία). Η θερμότητα αυτή μπορεί να ανέλθει στην επιφάνεια υπό τη μορφή ατμού ή θερμού νερού ή σε συνδυασμό των δύο μέσω ηφαιστειακών εκροών, ρηγμάτων, κυκλοφορίας των υπόγειων υδάτων, καθώς και από φυσικούς υδάτινους ταμιευτήρες υψηλής θερμοκρασίας ή μπορεί να παραμείνει αποθηκευμένη σε υπόγειους ταμιευτήρες ατμού, σε θερμά νερά, καθώς και σε θερμά-ξηρά πετρώματα. Τα θερμά ρευστά είναι πολλές φορές εμπλουτισμένα με άλατα, λόγω της επαφής τους με πετρώματα κατά την υπόγεια διαδρομή τους (*Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004*).

Σε κάποια μέρη της γης η γήινη θερμότητα εκδηλώνεται επιφανειακά, με τη δημιουργία εντυπωσιακών φαινομένων όπως οι πίδακες ζεστού νερού (geysers). Οι γεωθερμικές περιοχές συχνά εντοπίζονται από τον ατμό που βγαίνει από σχισμές στο φλοιό της γης ή από την παρουσία θερμών πηγών. Η χρήση των θερμών πηγών είναι ήδη γνωστή από τους αρχαίους χρόνους και αποσκοπούσε κυρίως στη δημιουργία λουτρών κ.α.

Η ανάκτηση της γεωθερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω γεωτρήσεων, οι οποίες αντλούν ζεστό νερό ή ατμό από τους υπόγειους ταμιευτήρες. Αφού χρησιμοποιηθεί η θερμική τους ενέργεια, τα ρευστά επανεγχύνονται στον ταμιευτήρα μέσω μιας δεύτερης γεώτρησης, τη γεώτρηση επαναεισαγωγής. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η επαναπλήρωση της μάζας των ρευστών στον ταμιευτήρα, η οποία συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενισχύοντας ταυτόχρονα τη μακροβιότητα του ταμιευτήρα και αποτρέποντας τη θερμική ρύπανση του περιβάλλοντος χώρου (*Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004*).

3. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν οι συνθήκες δημιουργίας των γεωθερμικών πεδίων. Πιο συγκεκριμένα, από τον πυρήνα της Γης μεταφέρεται μέρος της θερμότητας κοντά στην επιφάνεια δημιουργώντας υπέρθερμες περιοχές. Η μεταφορά της θερμότητας πραγματοποιείται με ένα σύνολο γεωλογικών φαινομένων, με σημαντικότερο την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Σύμφωνα με την θεωρία του Wegener, κατά το φαινόμενο αυτό, οι τεκτονικές πλάκες, από τις οποίες αποτελείται η Γη, πραγματοποιούν σχετικές μεταξύ τους κινήσεις πάνω στην υποκείμενη πλαστική ασθενόσφαιρα (Παπαζάχος, 2008). Ανάλογα με αυτές τις σχετικές κινήσεις στα όρια δύο γειτονικών πλακών, αναπτύσσονται διάφορα γεωλογικά φαινόμενα, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα της περιοχής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση της θερμικής κυκλοφορίας στον μανδύα και της επίδρασής της στα γεωδυναμικά φαινόμενα μεγάλης κλίμακας στην επιφάνεια της Γης. (Πηγή: Α. Τζάνης, 2010)

Τα όρια προσδιορίζονται από τις περιοχές όπου εκδηλώνεται υψηλή σεισμικότητα και ταξινομούνται σε:

- Όρια αποκλινουσών πλακών
- Όρια συγκλινουσών πλακών
- Όρια ολισθαίνουσων πλακών

Μια ακόμη περίπτωση, που δημιουργεί ιδιαίτερα ευνοϊκές γεωθερμικές συνθήκες είναι αυτή του μαγματισμού στο εσωτερικό των πλακών, η οποία ονομάζεται «μαγματισμός θερμών κηλίδων» (Παπαζάχος, 2008).

Στις παραπάνω περιοχές παρατηρείται μαγματισμός και κατά συνέπεια άνοδος τον ισόθερμων καμπυλών. Περιοχές με γεωθερμικό ενδιαφέρον μικρότερης γεωθερμικής βαθμίδας μπορούν να εντοπισθούν και σε άλλες περιοχές. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κάποιον από τους ακόλουθους παράγοντες (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004):

1. Τοπικά υψηλή θερμική ροή από το μανδύα και τη βάση του φλοιού προς την επιφάνεια, σε μεγάλες περιοχές.
2. Αυξημένες συγκεντρώσεις των ραδιενεργών στοιχείων ουρανίου, θορίου και καλίου σε ορισμένες περιοχές στο φλοιό της γης, που συντελούν στην παραγωγή θερμότητας και κατά συνέπεια στην αύξηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Πετρώματα με αυξημένες συγκεντρώσεις είναι τα γρανιτικά με 5 - 10 ppm σε ουράνιο και 80 ppm σε θόριο.
3. Φαινόμενα συναγωγής που προκαλούνται από κυκλοφορία νερού διαμέσου πορωδών σχηματισμών ή μέσα από συστήματα ρηγμάτων. Με αυτό τον τρόπο μεταφέρεται η θερμότητα σε μικρότερα βάθη και αυξάνεται η γεωθερμική βαθμίδα.
4. Σε μια περιοχή με δεδομένη θερμική ροή στη βάση του φλοιού και απουσία άλλης θερμής πηγής μέσα στο φλοιό, η γεωθερμική βαθμίδα ποικίλλει ανάλογα με τη θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων που αποτελούν το φλοιό. Τα αργιλικά πετρώματα έχουν τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, ενώ τα κρυσταλλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμική αγωγιμότητα (περίπου 6 φορές αυτή των αργίλων) (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004).

4. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Με τον όρο "γεωθερμικά πεδία" εννοούνται περιοχές στις οποίες η θερμική ενέργεια της γης είναι επαρκώς συγκεντρωμένη ακόμη και σε μικρά σχετικά βάθη, ώστε να δημιουργεί μια εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή. Η θερμική ενέργεια βρίσκεται σε ένα σύνολο φυσικών ατμών και θερμών νερών (επιφανειακών ή υπόγειων), καθώς και στη θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών, των οποίων η θερμοκρασία υπερβαίνει τη μέση ετήσια θερμοκρασία της κάθε περιοχής.

Η ύπαρξη υψηλής γεωθερμικής βαθμίδας σε κάποια περιοχή θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλη υδρολογία των γεωλογικών σχηματισμών έτσι ώστε να είναι ικανή η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς. Δεν έχουν όλες οι θερμικές περιοχές κατάλληλη υδρολογία για να μπορεί να αξιοποιηθεί η γεωθερμική ενέργεια. Για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη γεωθερμικής βαθμίδας με τιμή μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της περιοχής, αλλά και η ύπαρξη νερού που μπορεί να κυκλοφορήσει μέσω κατάλληλων υδροφορέων (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004).

Ανάλογα με τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών γίνεται η ταξινόμηση τους. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

- Τα Υψηλής Ενθαλπίας ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) που χρησιμοποιούνται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τα Μέσης Ενθαλπίας (90 έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων, καθώς και ενίοτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).
- Τα Χαμηλής Ενθαλπίας (25 έως $90\text{ }^{\circ}\text{C}$) που χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.
- Τέλος, έχουμε την αβαθή γεωθερμία ($<25^{\circ}\text{C}$, για τα γεωθερμικά ρευστά) της οποίας η εκμετάλλευση γίνεται με αντλίες θερμότητας, για ψύξη-θέρμανση.

Η ενθαλπία, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής αξία τους (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004).

5. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

Η χώρα μας παρουσιάζει ένα αρκετά αξιόλογο δυναμικό γεωθερμικής ενέργειας μέσης και χαμηλής ενθαλπίας. Με τις σημερινές γνώσεις μας από τα δεδομένα των γεωτρήσεων και από άλλες ενδείξεις στα γεωθερμικά πεδία, εκτιμάται ότι το βεβαιωμένο συνολικό δυναμικό της γεωθερμίας μέσης και χαμηλής ενθαλπίας ανέρχεται σε 2500 MW, εκ των οποίων τα 700-800 MW_{th} περίπου αφορούν τα πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

Οι ορατές εκμεταλλεύσεις τη γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας μπορούν να αγγίξουν τα 150 MW_{th} εγκατεστημένης ισχύος, εξοικονομώντας 17.000 περίπου τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Τ.Ι.Π.) κατ' έτος.

Από τις πεδινές εκτάσεις της Αν. Μακεδονίας και Θράκης είναι δυνατόν να αντληθούν 2500m³/h θερμών ρευστών με θερμοκρασίες μέχρι και 100°C. Το εκμεταλλεύσιμο θερμοκρασιακό εύρος είναι κατά μέσο όρο 40°C. Έτσι τα ρευστά αυτά ισοδυναμούν με θερμική ισχύ 100 MW, που σημαίνει εξοικονόμηση 90.000 τόνων ισοδύναμου πετρελαίου (Τ.Ι.Π.) (<http://imarinakiss.webs.com/geothermal.pdf>).

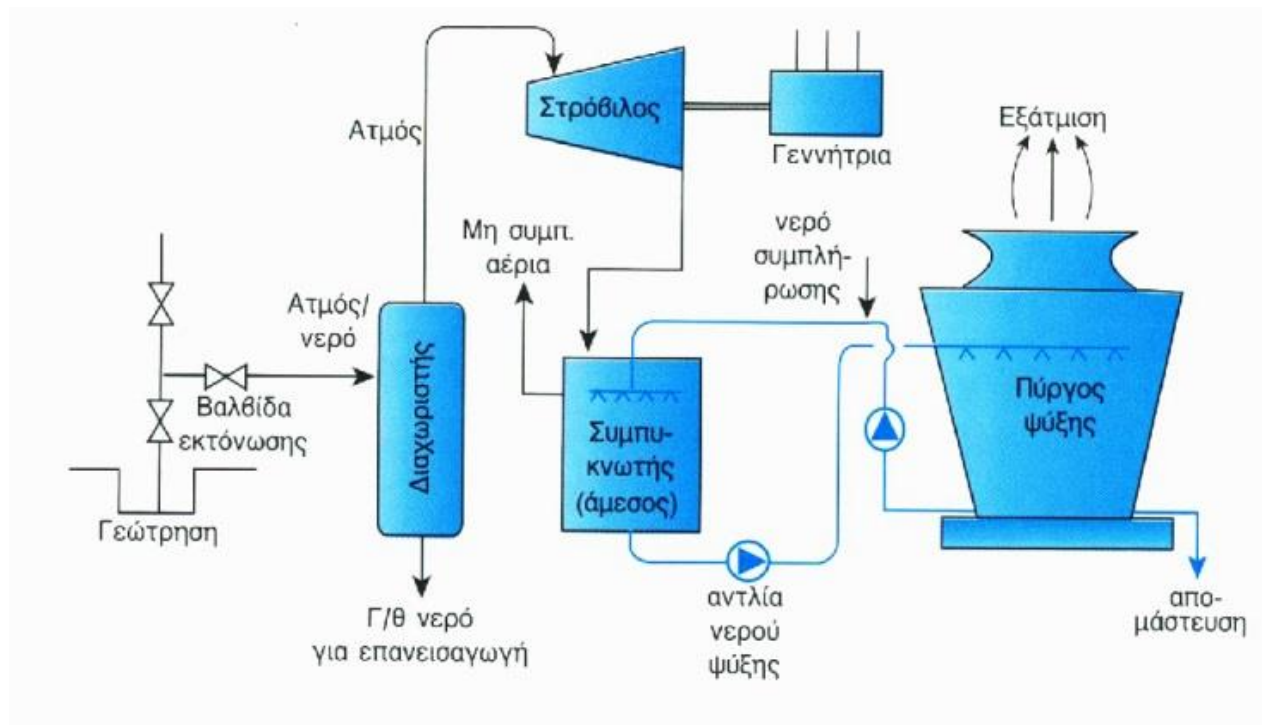
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Συνολικά, οι χρήσεις της γεωθερμίας είναι πολλαπλές και άμεσα εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή τη θερμοκρασία του υπεδάφους. Συνήθως χωρίζονται σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις. Στην άμεση κατηγορία γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών χωρίς να παραχθεί ενδιάμεσα ηλεκτρική ενέργεια. Συνοπτικά παρατίθενται:

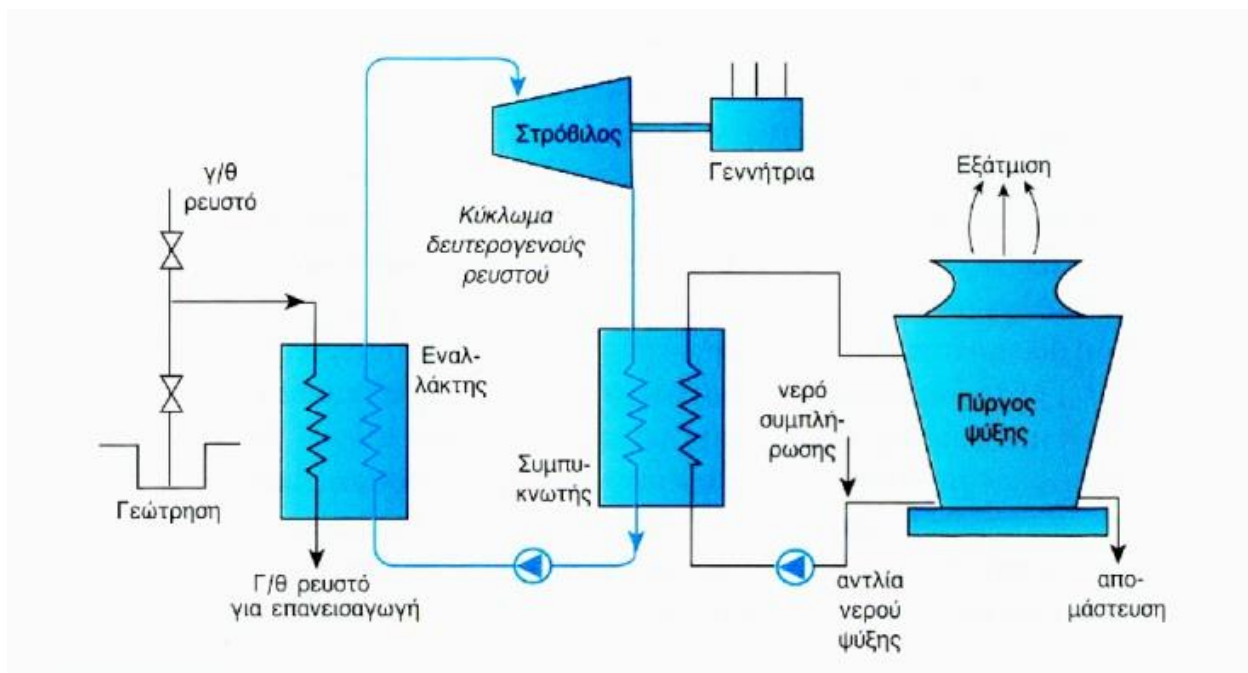
ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($T > 90^{\circ}\text{C}$)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωθερμίας επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού ρευστού, δηλαδή τη θερμοκρασία, τη πίεση, την περιεκτικότητά του σε αέρια και σε σωματίδια καθώς και την παροχή του. Βάσει λοιπόν, αυτών των χαρακτηριστικών του γεωθερμικού μέσου, το οποίο είναι διαθέσιμο σε κάθε περιοχή, σχεδιάζεται και η αντίστοιχη μονάδα παραγωγής (Εικόνα 2 & 3) .

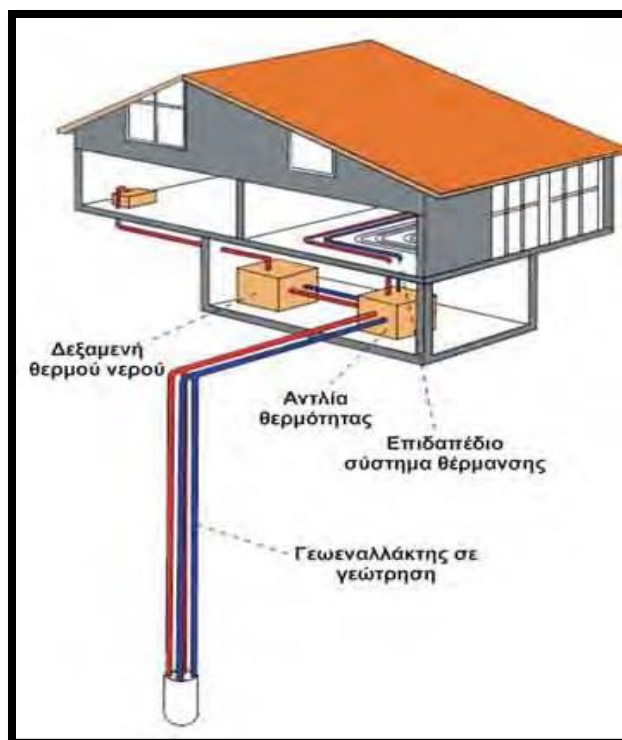


Εικόνα 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με εκτόνωση διφασικού ρευστού και άμεση συμπύκνωση του ατμού
(Πηγή: Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004)



Εικόνα 3: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με χρήση δευτερεύοντος οργανικού ρευστού. Ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι αεροψυκτός. (Πηγή: Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004)

ΑΜΕΣΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ



Εικόνα 4: Τυπική εφαρμογή ενός γεωεναλλάκτη σε γεώτρηση και αντλίας θερμότητας σε κατοικία.

(Πηγή: <http://www.geotrissi.net/geotrissi/geothermia/>)

Θέρμανση χώρων ($T > 25^\circ\text{C}$ - 60°C)

- με καλοριφέρ για $T > 60^\circ\text{C}$,
- με αερόθερμα για $T > 40^\circ\text{C}$,
- με ενδοδαπέδιο σύστημα ($T > 25^\circ\text{C}$)

Μαζί με την παραγωγή ζεστού νερού, η θέρμανση χώρων (Εικόνα 4 & 5) αποτελεί την πιο διαδεδομένη εφαρμογή της γεωθερμίας στην Ευρώπη. Ιδιαίτερα με την εφαρμογή τηλεθέρμανσης δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες εκμετάλλευσης, αφού η παραγωγή θερμικής ενέργειας εξασφαλίζεται από εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους κατασκευής, συντηρήσεως και κυρίως λειτουργίας.

Στην Ελλάδα, μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές θέρμανσης χώρων με γεωθερμία είναι εγκατεστημένη στα Λουτρά Τραϊανούπολης. Όπως αναφέρουν σε σχετικό άρθρο τους οι Μενδρινός-Καρύτσας, στην επιθεώρηση της ΜΓΜΕ, τόμος 15 (2005), «Το σύστημα των εγκαταστάσεων είναι ένα επιτυχημένο παράδειγμα χρήσης και εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας καθώς περιλαμβάνει θέρμανση των τεσσάρων κτηρίων του ξενώνα από γεώτρηση παραγωγής περίπου $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ζεστού νερού, θερμοκρασίας 52°C , μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Το γεωθερμικό νερό, αφού μεταδώσει τη θερμότητα του στο κλειστό κύκλωμα τηλεθέρμανσης των κτηρίων, διοχετεύεται στους υδροφόρους ορίζοντες απ' όπου προήλθε σε θερμοκρασία 37°C διαμέσου γεώτρησης επανεισαγωγής. Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας από και προς το κάθε κτήριο, γίνεται με υπόγειου σωλήνες πολυπροπυλενίου (PP). Κάθε ένα από τα δωμάτια του κάθε ξενώνα θερμαίνεται με αυτόματο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης που λειτουργεί σε θερμοκρασία $30\text{-}40^\circ\text{C}$. Παράλληλα γίνεται και προθέρμανση του ζεστού νερού χρήσης, ενώ η συνολική θερμική ισχύς του συστήματος ανέρχεται σε 1050 kW ».



Εικόνα 5: Εσωτερικό παλιών λουτρών Τραϊανούπολης (Χάνες). Φαίνεται ο σωλήνας που μεταφέρει θερμό νερό

Θέρμανση θερμοκηπίων ($T > 25^{\circ}\text{C}$)

Οι χρήσεις και το μέγεθος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων εξαρτάται από τη διαθέσιμη γεωθερμική ενέργεια, από τις κλιματολογικές συνθήκες, από τα υλικά κατασκευής των θερμοκηπίων και από το είδος της καλλιέργειας.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων με χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμική ενέργεια θεωρείται εύκολος τρόπος θέρμανσης.



Εικόνα 6: Θέρμανση θερμοκηπίου με εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας
Στην εικόνα φαίνονται οι σωλήνες παροχής θερμού νερού.
(Πηγή: <http://www.toxrima.gr/geothermiki-thermansi-sta-thermokipia/>)

Το γεωθερμικό ρευστό μπορεί να μεταφερθεί από το εσωτερικό της γης, μέσω μονωμένων σωλήνων και μπορεί να διανεμηθεί είτε απευθείας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε πλαστικούς σωλήνες, είτε έμμεσα, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (Εικόνα 6).

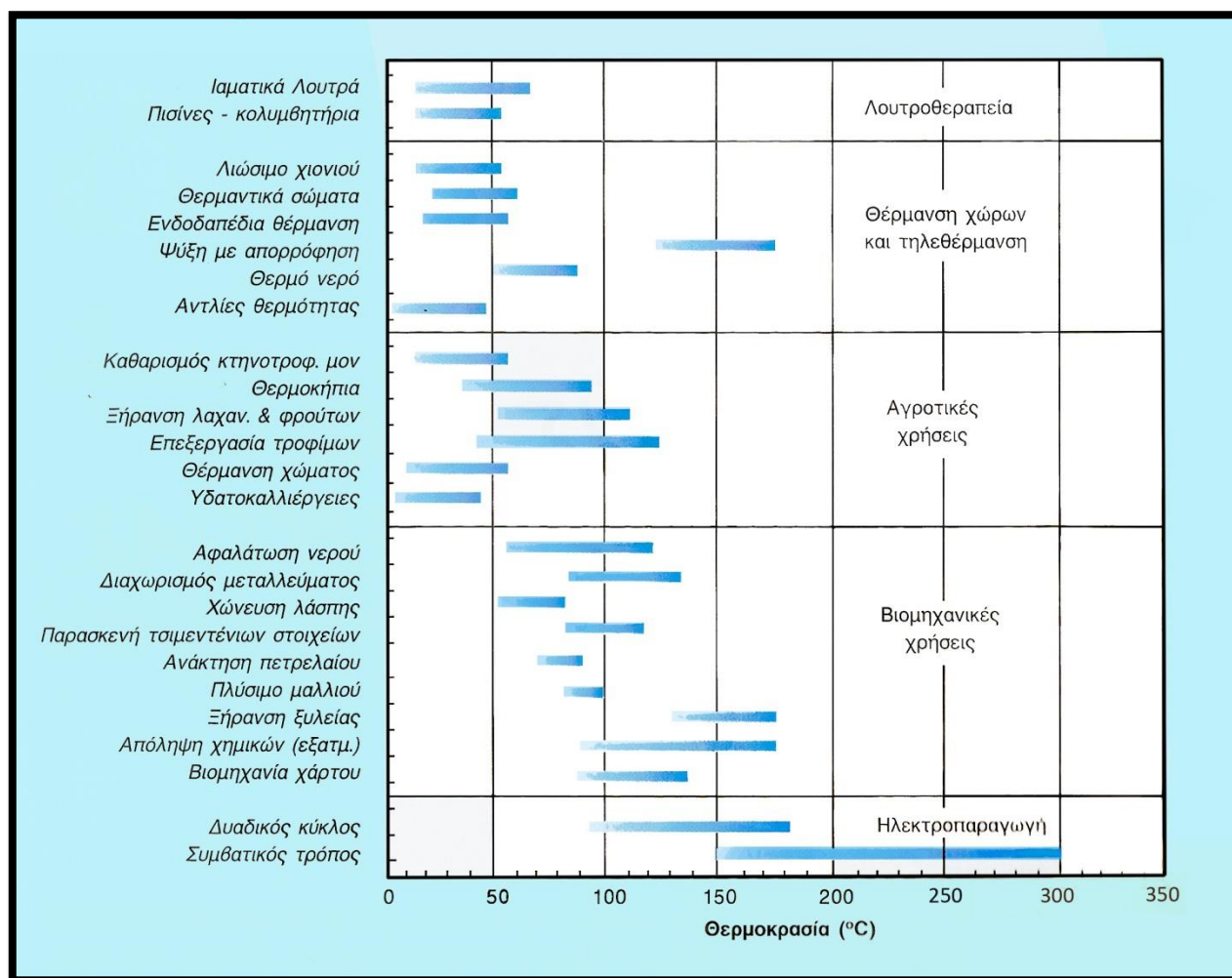
Αφαλάτωση θαλασσινού νερού

Αποτελεί γεγονός το ότι η λειψυδρία συμβαδίζει με την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών. Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αφαλάτωση η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών πρέπει να είναι τουλάχιστον 60°C . Η θερμοκρασία απόρριψης σχεδιάζεται να είναι $40 - 50^{\circ}\text{C}$. Για να θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα η εκμετάλλευση της αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας, πρέπει το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας να αντιστοιχεί το πολύ στο 60% του κόστους αφαλάτωσης με πετρέλαιο.

Ιχθυοκαλλιέργειες

Η απαραίτητη θερμοκρασία στο νερό της δεξαμενής της ιχθυοκαλλιέργειας κυμαίνεται από 14 έως 30°C, ανάλογα με το είδος της. Η ιχθυοκαλλιέργεια μπορεί να γίνει είτε μεμονωμένα με γεωθερμικά ρευστά σαν θερμαντικό μέσο θερμοκρασίας 25 έως 35°C, είτε από το απορριπτόμενο νερό από τη θέρμανση θερμοκηπίων.

Επιπροσθέτως, κάποιες από τις κυριότερες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας παρουσιάζονται συνοπτικά στο τροποποιημένο διάγραμμα *Lindal* (1973), στο οποίο καταγράφονται παραδείγματα δοκιμασμένων και πιθανών χρήσεων, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας των ρευστών.



Διάγραμμα 1: Τροποϊημένο διάγραμμα Lindal, στο οποίο καταγράφονται παραδείγματα χρήσεων των γεωθερμικών ρευστών ανάλογα με την θερμοκρασία τους. (Πηγή: , Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004)

7. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν εντοπισθεί σε Μήλο και Νίσυρο και γενικότερα στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, με ρευστά θερμοκρασίας μέχρι 325 και 350 °C αντίστοιχα, ενώ περιοχές ευνοϊκές για τον εντοπισμό γεωθερμικών ρευστών μέσης ή και υψηλής ενθαλπίας είναι η Κίμωλος, η Σαντορίνη, το Σουσάκι, τα Μέθανα, η Κως, η Λέσβος, η Χίος, η Σαμοθράκη, το Δέλτα του Νέστου, το Δέλτα του Έβρου κ.ά. (Εικόνα 7).

Έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Βόρεια Ελλάδα στην οποία έχουν εντοπιστεί οι εξής πιθανοί γεωθερμικοί πόροι μέσης ενθαλπίας:

- Λεκάνη Δέλτα Νέστου (γεωθερμικό πεδίο Ερατεινού - Χρυσούπολης)
- Λεκάνη Δέλτα Έβρου (γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου)
- Λεκάνη Στρυμόνα
- Σαμοθράκη
- Γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου Καβάλας (ευρύτερη περιοχή λεκάνης Στρυμόνα).

Πεδία χαμηλής ενθαλπίας έχουν εντοπιστεί σε:

- Λεκάνη Στρυμόνα (Νιγρίτα, Σιδηρόκαστρο, Λιθότοπος-Ηράκλεια, Άγκιστρο, Ίβηρα-Αχινός-Μαυροθάλασσα)
- Ανατολική Μακεδονία - Θράκη (Ακροπόταμος Καβάλας, Ερατεινό, Χρυσούπολη, Νέο Εράσμιο, Σάμπες, Λίμνη Μητρικού, Αρίστηνο, Τυχερό, Σαμοθράκη)
- Χερσόνησος Χαλκιδικής (Ελαιοχώρια, Αγία Παρασκευή, Σάνη)
- Περιοχή Θεσσαλονίκης [Λεκάνη Μυγδονίας (Λαγκαδάς-Νυμφόπετρα-Απολλωνία), Λεκάνη Θεσσαλονίκης (Αλεξάνδρεια), Θέρμη - Λεκάνη Ανθεμούντα]
- Λεκάνη Αλμωπίας
- Δυτική Μακεδονία (Αετός Αμύνταιου Φλώρινας)

8. ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΥΤΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ ΑΝ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ-ΘΡΑΚΗΣ

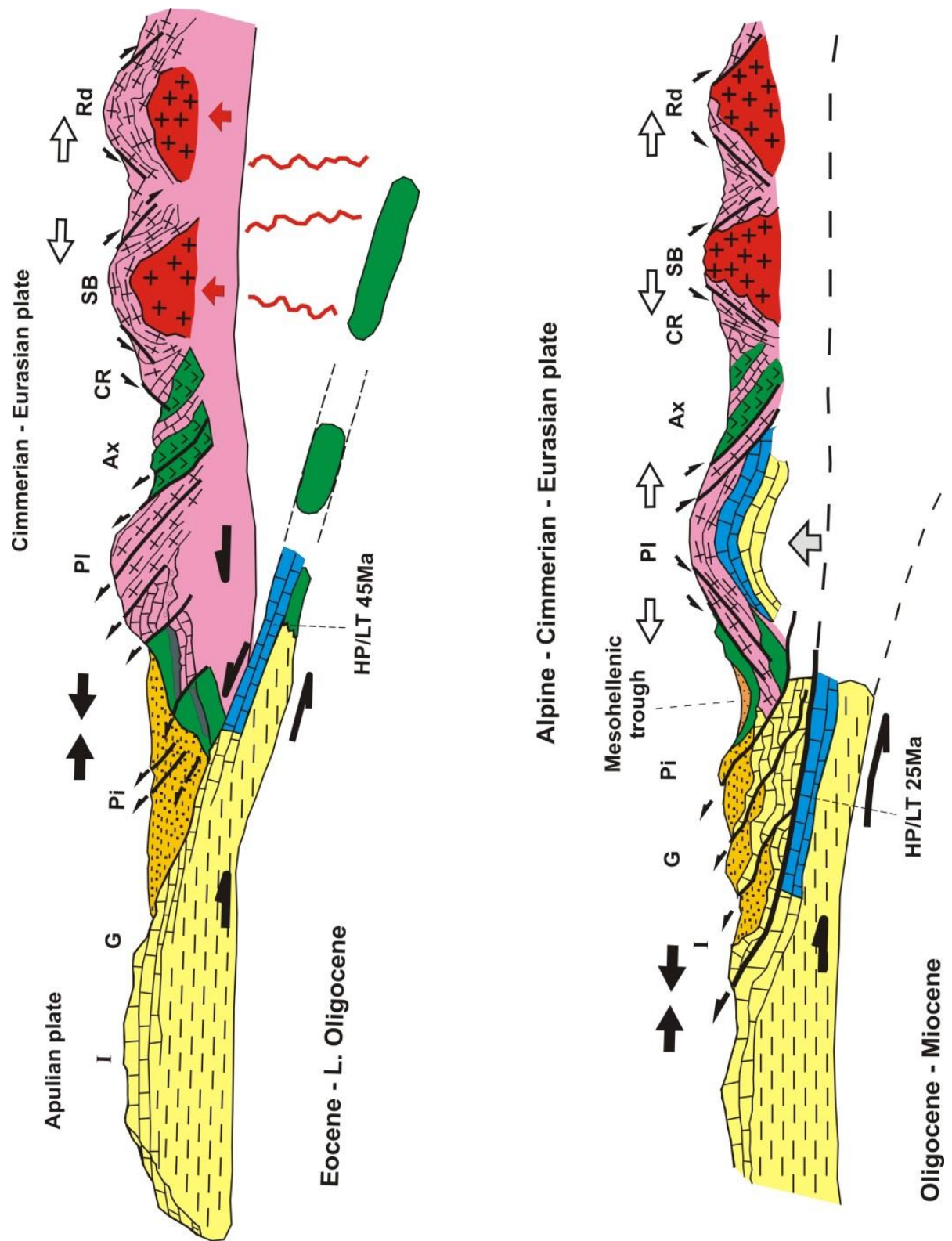
Κατά το Ηώκαινο, η λιθοσφαιρική πλάκα της Ευρασίας και αυτή της Αφρικής συγκρούονται. Από τη διαδικασία αυτή επηρεάζεται το σύνολο των Ελληνίδων, με την εμφάνιση ηφαιστειακής δραστηριότητας, τη δημιουργία ρηγμάτων, καθώς επίσης συμπιεστικών και εφελκυστικών δομών. Λόγω της εφελκυστικής τεκτονικής που λαμβάνει χώρα στην οπισθοτάφρο περιοχή, προκαλείται λέπτυνση του φλοιού συνοδευόμενη από αύξηση της ροής της θερμότητας, με αποτέλεσμα την μετατόπιση των ισόθερμων προς την επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ευρύτερος χώρος της Αν. Μακεδονίας – Θράκης να ενεργοποιηθεί θερμικά (*ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001*).

Όσο αυτή η διαδικασία συνεχιζόταν, τα φαινόμενα αυτά έγιναν πιο έντονα, με άμεση συνέπεια την ανάπτυξη της ηφαιστειακής δράσης και τη διείσδυση μαγματικών μαζών ασβεσταλκαλικού τύπου στην περιοχή. Τα Τριτογενή τεκτονικά βυθίσματα που αναπτύχθηκαν, είναι το επακόλουθο της δυναμικής του χώρου, μέσα στα οποία αναπτύχθηκε η ηφαιστειότητα και παράλληλα έγινε απόθεση μολασσικών ιζημάτων.

Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, στο τέλος του Αν. Μειόκαινου δημιουργήθηκε το δεξιόστροφο ρήγμα της Ανατολής, το οποίο αποτέλεσε αιτία για την παραμένουσα θερμική δραστηριότητα έως και σήμερα.

Η συνεχιζόμενη εφελκυστική τεκτονική, η κατάλληλη στρωματογραφία και ο συνδυασμός ενεργών ρηγμάτων βοήθησε στην εγκαθίδρυση υδροθερμικών συστημάτων στην περιοχή, τα οποία όπως θα αναλυθεί παρακάτω είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για ενεργειακούς σκοπούς (*ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001*).

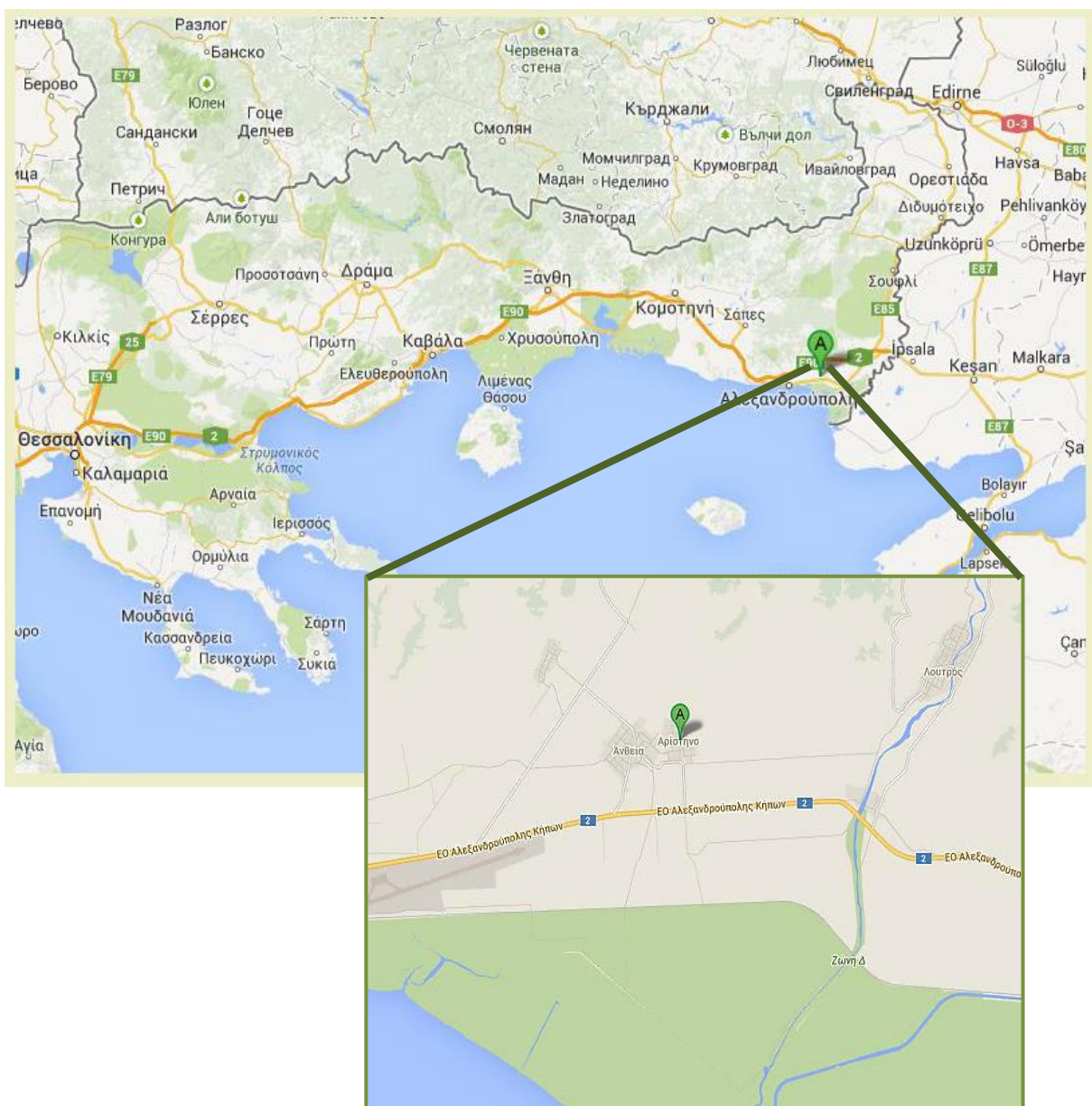
Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8), έχουμε τη σχηματική αναπαράσταση της παραπάνω διαδικασίας, που έλαβε χώρα κατά την περίοδο του Ηωκαίνου - Μειοκαίνου.



Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση γεωτεκτονικής εξέλιξης της Ελλάδας από το Ηώκαινο έως το Μειόκαινο.
(Πηγή: Δημοσθένης Μ. Μουντράκης, 2010)

9. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται ανατολικά της Αλεξανδρούπολης, στο δυτικό τμήμα του Δέλτα του Έβρου, όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 9). Περιλαμβάνει την περιοχή του Αρίστηνου - Άνθεια, τα λουτρά Τραϊανούπολης και τέλος το χωριό Αετοχώρι.



Εικόνα 9: Χάρτης Περιοχής. Στο σημείο Α του χάρτη απεικονίζεται το χωριό Αρίστηνο. (Πηγή: <https://maps.google.gr/>)

10. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η ανάπτυξη της ιζηματογενούς λεκάνης της περιοχής ακολούθησε την ίδια εξελικτική πορεία του ευρύτερου Περιοδοπικού ιζηματογενούς χώρου από το Α. Κρητιδικό μέχρι σήμερα. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μία ιζηματογενή λεκάνη έκτασης 700 km², με σχετικά χαμηλό υψόμετρο (<40 m), ελαφριά νότια γεωλογική κλίση και έντονη τεκτονική (βλ. τοπογραφικό χάρτη). Το σύστημα διασταυρούμενων ρηγμάτων της περιοχής, με διευθύνσεις BBA – NNΔ και BBΔ – NNA (Εικόνες 10, 11 & 12) είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία τεκτονικού βυθίσματος, το οποίο αργότερα πληρώθηκε με Τεταρτογενή και Τριτογενή ιζήματα. Το ίδιο σύστημα είναι επίσης υπεύθυνο για την ανάπτυξη θερμού υδροφόρου ταμιευτήρα.



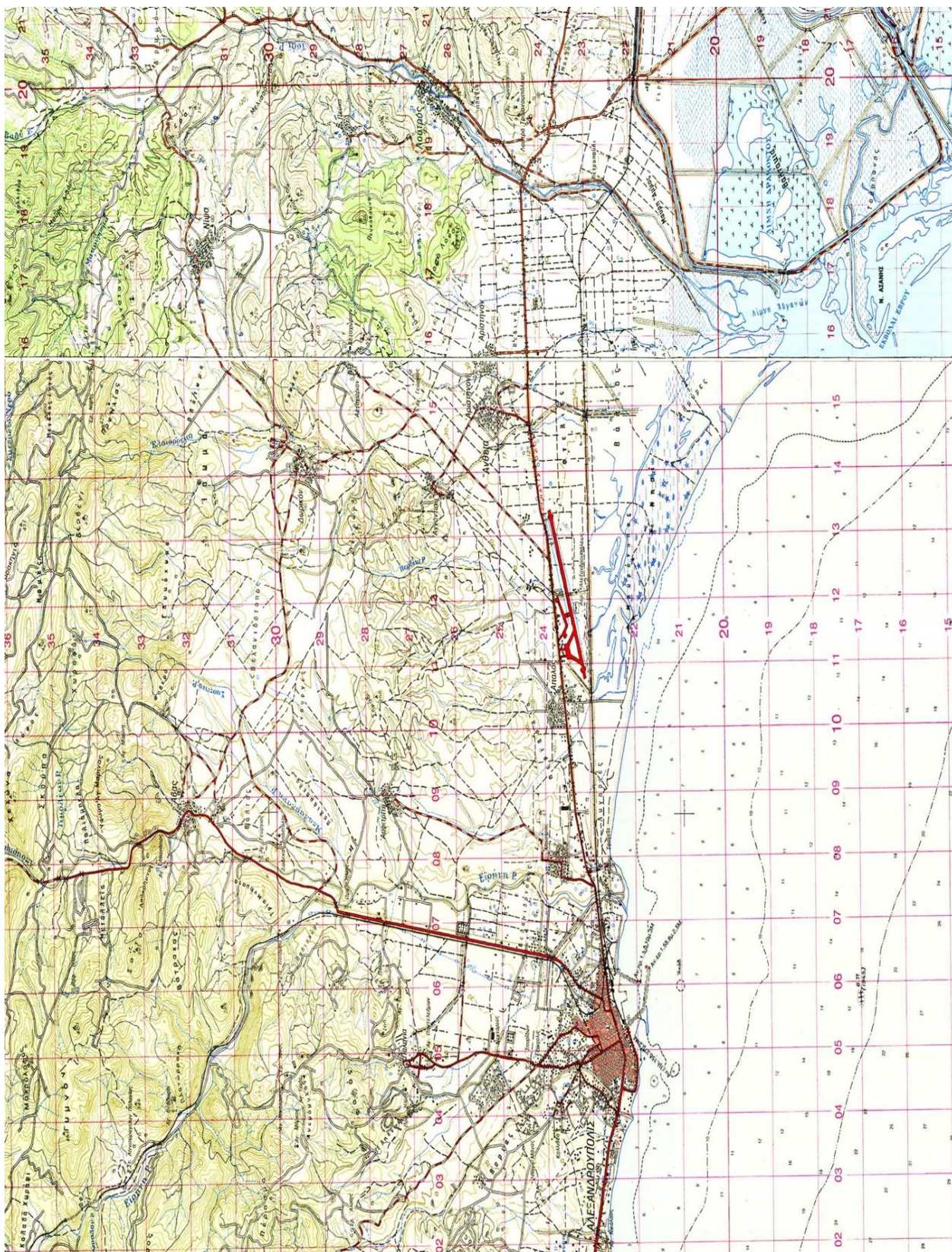
Εικόνα 10: Ρήγμα BBA – NNΔ με διακεκομμένες γραμμές.



Εικόνα 11: Ρήγμα ΒΒΔ - ΝΝΑ με διακεκομμένες γραμμές. Στο βάθος η κορυφή Λουτρά Τραϊανούπολης



Εικόνα 12: Ρήγμα ΒΒΔ - ΝΝΑ με διακεκομμένες γραμμές.
Στο βάθος οι κορυφές (από αριστερά προς τα δεξιά) Πασά Λόφος, Λόφος των λουτρών Τραϊανούπολης



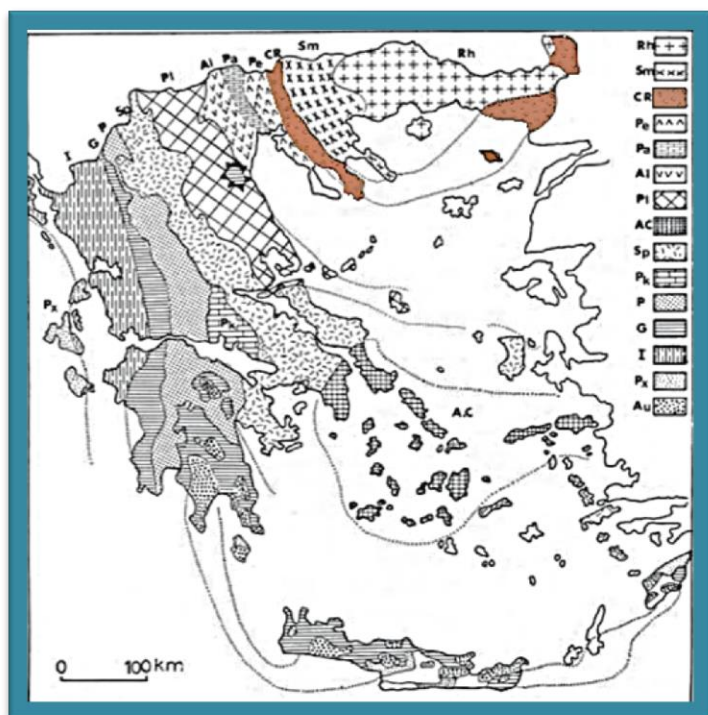
Χάρτης 1: Τοπογραφικός χάρτης (φύλλο Αλεξανδρούπολης και φύλλο Φέρες).

11. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΚΑΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η περιοχή έρευνας ανήκει στην Περιοδοποική ζώνη και αποτελεί τον μεγάλο ιζηματογενή χώρο Δυτικά του Έβρου. Η Περιοδοποική ζώνη (Εικόνα 13) έχει πλάτος 10-20 km και εκτείνεται ΝΑ, από τα Ελληνογιουγκοσλαβικά σύνορα προς τη λίμνη Λαγκαδά, τον κορμό της Χαλκιδικής και τη χερσόνησο της Σιθωνίας όπου κάμπτεται προς ΒΑ, με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ περνάει από την άκρη της χερσονήσου του Άθω και προεκτείνεται υποθαλάσσια προς το νησί της

Σαμοθράκης και την περιοχή Αλεξανδρούπολης- Έβρου, όπου και βρίσκεται η περιοχή μελέτης.

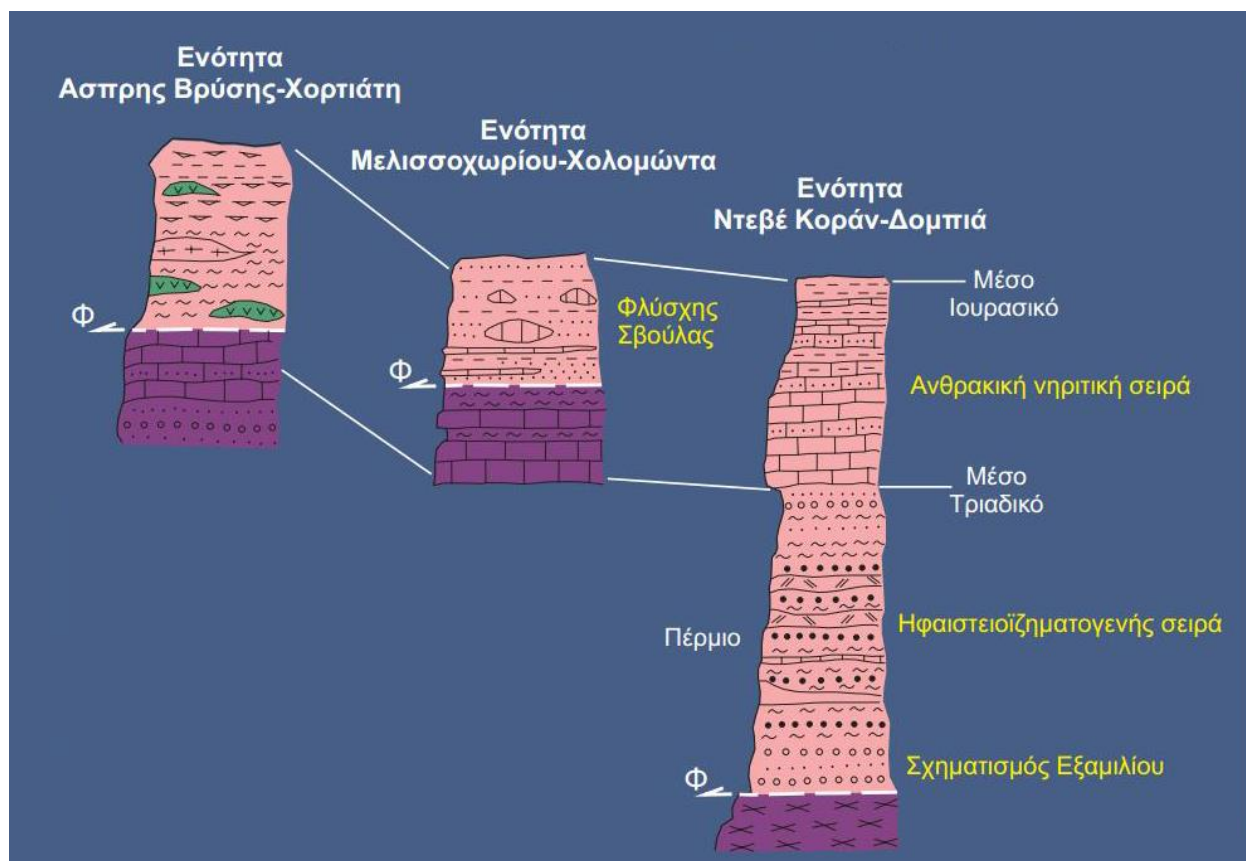
Η Περιοδοποική ζώνη έχει ιδιαίτερη παλαιογεωγραφική και γεωτεκτονική σημασία. Στη διάρκεια του Ιουρασικού αποτελούσε την ηπειρωτική κατωφέρεια της ηπειρωτικής Ελληνικής ενδοχώρας, η οποία κατέληγε σε μια βαθιά αύλακα, περιφερειακή της ηπειρωτικής μάζας. Η περιφερειακή αύλακα ήταν η θέση βύθισης της ωκεάνιας περιοχής της ζώνης



Εικόνα 12: Περιοδοποική Ζώνη χρωματισμένη με πορτοκαλί. (Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/museum/MammalFiles/pERIRODOPIKI.pdf>)

Αξιού, η οποία βυθιζόταν κάτω από την ηπειρωτική πλάκα (Μουντράκης, 2010).

Στον ευρύτερο χώρο συναντάμε πετρώματα τόσο της Ροδοπικής μάζας (γνεύσιοι, αμφιβολίτες) όσο και πετρώματα της Περιοδοποικής ζώνης (Εικόνα 13). Στα Δυτικά τοποθετείται το φυλλιτικό υπόβαθρο (σειρά Μάκρης), δηλαδή, Ιουρασικής – Κρητιδικής ηλικίας αργιλικοί σερικιτικοί σχιστόλιθοι. Στα Βόρεια έχουμε την εμφάνιση πετρωμάτων της σειράς Μάκρης, αποτελούμενη κυρίως από Κρητιδικής ηλικίας αργιλικούς σχιστόλιθους ισχυρά διαγεννημένα, μάργες, χαλαζίτες και ανθρακικά πετρώματα. Σημαντική εξάπλωση παρουσιάζουν και οι



Εικόνα 13: Στρωματογραφική στήλη Περιοδοπικής Ζώνης
(Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/museum/MammalFiles/pERIRODOPIKI.pdf>)

διαβάσεις (δολερίτες, σπηλίτες) αποτελώντας τα κράσπεδα της Τριτογενούς λεκάνης (βλ. γεωλογικός χάρτης) (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

Προς τα Νότια και μέχρι το θαλάσσιο χώρο αναπτύσσεται πλήρως όλη η ιζηματογενής σειρά, σε μια διαδοχή από τα παλαιότερα Παλαιογενή ως τις σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις με ενδιάμεσες παρεμβολές από τα μαγματικά επεισόδια (Εικόνες 14 & 15).

Τα Παλαιογενή ιζήματα του Ηωκαίνου και Ολιγοκαίνου κάθονται ασύμφωνα, είτε σε Μεσοζωϊκά πετρώματα, είτε σε αμφιβολίτες, γνευσίους και οφειόλιθους της Ροδοπικής μάζας. Το μέγιστο πάχος των ιζημάτων του Παλαιογενούς, του Νεογενούς και Τεταρτογενούς φτάνει τα 3.500-4.000 m. Από αυτά, τα 2.000 m συνθέτουν θαλάσσια ιζήματα του Παλαιογενούς, αποτελούμενα από ψαμμίτες, μάργες, ασβεστόλιθους, λατυποπαγή, πολυγενή ηφαιστειακά, τόφφους και ιλυόλιθους φλυσχοειδών ιζημάτων στις Ολιγοκαινικές θαλάσσιες φάσεις, ενώ περί τα 1500 m φθάνουν τα ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς τα οποία

αποτελούνται από αργίλους, ιλυόλιθους, ψαμμίτες, λιγνιτικά στρώματα καθώς και άμμους, ψαμμίτες και άργιλους στα ανώτερα στρώματα.



Εικόνα 14: Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά και διεισδύσεις ρυολιθικών δόμων, ηλικίας Ολιγοκαίνου.



Εικόνα 15: Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά και διεισδύσεις ρυολιθικών δόμων, ηλικίας Ολιγοκαίνου.

Με το τέλος του Κρητιδικού ο χώρος του Βορείου Αιγαίου επηρεάστηκε από μια συμπίεστική τεκτονική δράση. Η ιζηματογένεση στο χώρο της λεκάνης του Έβρου, που ξεκίνησε το Α. Κρητιδικό και διαρκεί μέχρι σήμερα, ακολούθησε τις τελευταίες παροξυσμικές φάσεις των Αλπικών πτυχώσεων. Οι φάσεις αυτές συνοδεύτηκαν από έντονες διαρρήξεις και σύγχρονες μετακινήσεις μεγάλων τμημάτων της Ροδοπικής μάζας, ως αποτέλεσμα εφελκυστικής τεκτονικής. Εξαιτίας των παραπάνω διαδικασιών, δημιουργούνται μεγάλες ταφροειδείς λεκάνες που αποτελούν και το χώρο απόθεσης Τριτογενών μολασσικών και φλυσχοειδών ιζημάτων.

Το Μέσο Ηώκαινο, λαμβάνει χώρα επίκλυση της θάλασσας. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία της παλαιότερης μολασσικής λεκάνης του Ελληνικού χώρου. Οι προηγούμενες πτυχωμένες δομές καλύπτονται από θαλάσσια μολασσικά ιζήματα. Λόγω της σταδιακής υποχώρησης του υποβάθρου και της δημιουργίας περιβάλλοντος αβαθούς θάλασσας, ευνοείται η δημιουργία νουμουλιτοφόρου ασβεστόλιθου.

Στο Άνω Ηώκαινο, η βύθιση της θάλασσας συνεχίζεται και έτσι αρχίζει να καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση, καθώς η ιζηματογένεση συνεχίζεται με απόθεση ιζημάτων βαθιάς θάλασσας. Στις πτυχωμένες σειρές του Άνω Ηωκαίνου περιέχονται ενστρώσεις ηφαιστιτών.

Κατά το Ολιγόκαινο η ιζηματογένεση συνεχίζεται με τις ίδιες συνθήκες με απόθεση φλυσχοειδών ιζημάτων. Την ίδια εποχή, εμφανίζεται ηφαιστειακή δραστηριότητα (33 -23 Ma), με έντονα γεωδυναμικά φαινόμενα, αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Αφρικανικής με την Ευρασιατική πλάκα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την απόθεση κλαστικών ιζημάτων σε εναλλαγές με ηφαιστίτες ασβεσταλκαλικού τύπου που μαρτυρούν μια διαδικασία καταβύθισης (Εικόνα 16). Όλος ο χώρος χαρακτηρίζεται σαν οπισθοτάφρος περιοχή.

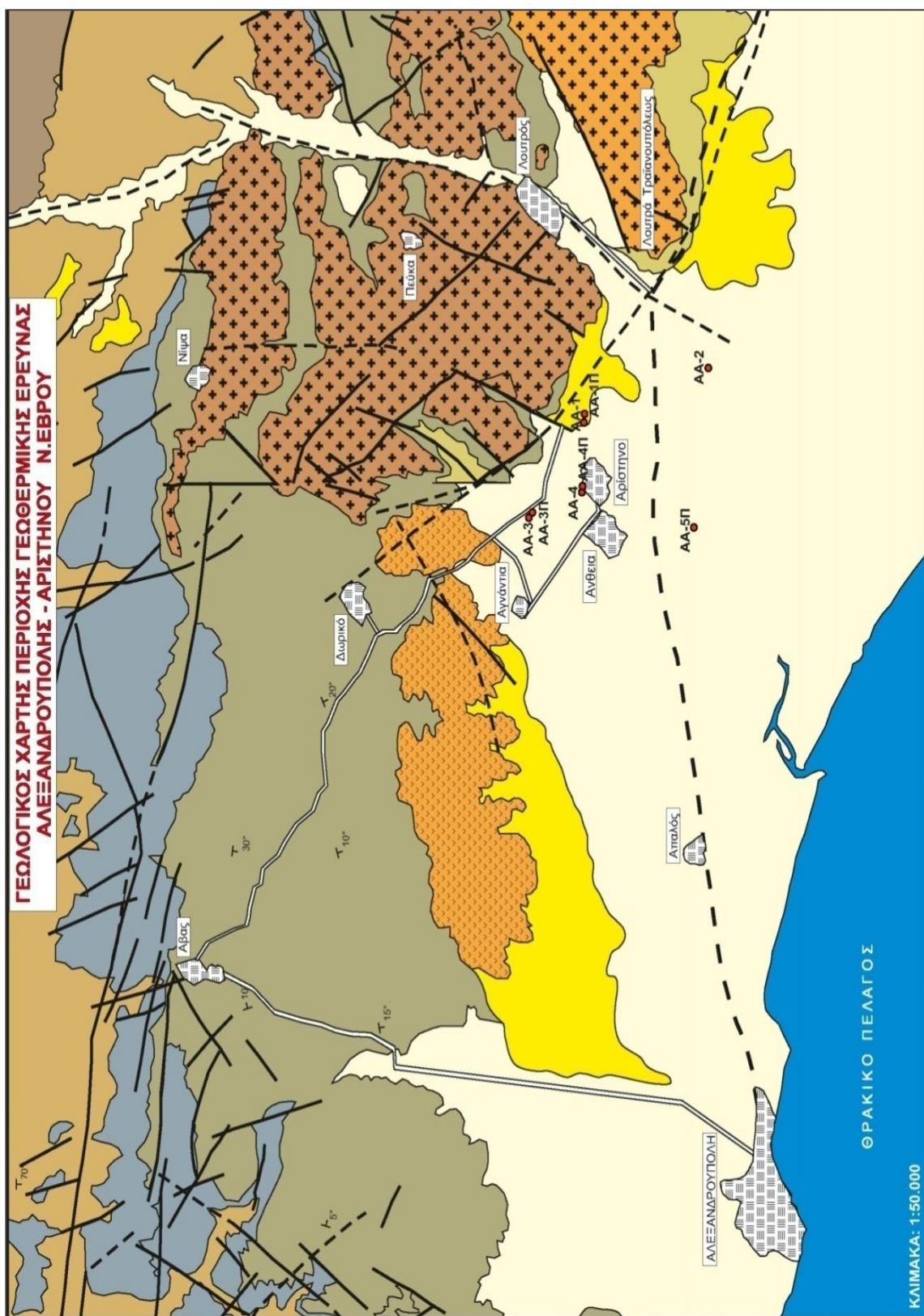


Εικόνα 16: Δακίτοιδοίς Ανδεσίτες, ηλικίας Άνω Ηωκαίνου-Ολιγόκαινου

Από την ανάλυση της μικροτεκτονικής του χώρου φαίνεται ότι στο Άνω Μειόκαινο οι διευθύνσεις των τάσεων είναι ΔΒΔ. Κατά το Πλειόκαινο – Κ. Πλειστόκαινο ΒΑ, ενώ σήμερα είναι τοποθετημένες στον Β-Ν άξονα.

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή της Ανατολικής Ροδόπης μεταξύ Αλεξανδρούπολης και Σουφλίου, εντοπίζονται στη στρωματογραφία ηφαιστειακά προϊόντα, αποτελούμενα κυρίως από πυροκλαστίτες, τόφφους, τοφφίτες σε εναλλαγές με τα ιζήματα του Ολιγοκαίνου. Στην περιοχή της Δαδιάς κυρίως, συναντώνται πολλά ιγνιμβριτικά επεισόδια. Στην εξωτερική πλευρά της λεκάνης συναντάμε πυροκλαστικά προϊόντα τα οποία τείνουν να λιγοστεύουν, ενώ αυξάνουν οι λάβες και οι ηφαιστειακοί δόμοι. Μερικοί από αυτούς είναι ρυολιθικής σύστασης και αποτελούν τα περιθώρια της λεκάνης.

Η σχέση μεταξύ ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων, τεκτονικής, ηφαιστειότητας και ιζηματογένεσης παίζει σημαντικό ρόλο στη γένεση και εγκαθίδρυση θερμικών ανωμαλιών και υδροθερμικών συστημάτων υψηλής ή χαμηλής ενθαλπίας και γενικά δημιουργούν συνθήκες υψηλής ροής θερμότητας (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

Πλειστόκαινο



Σύγχρονες αποθέσεις



Κατώτερο και ανώτερο σύστημα αναβαθμίδων χερσαίας προέλευσης

ΝΕΟΓΕΝΕΣ



Αργίλοι, αμμούχες άργιλοι και κροκαλοπαγή αποτελούμενα από ηφαιστίτες και τόφφους



Θαλάσσιο νεογενές παράκτιας φάσης (ψαμμίτες, μάργες, άργιλοι και πορώδεις ασβεστόλιθοι)

ΠΑΛΑΙΟΓΕΝΕΣ

Ολιγόκαινο



Ανώτερη ηφαιστειογενή σειρά (μάργες, ψαμμίτες, τόφφοι) και διεισδύσεις ρυολιθικών δόμων



Ανώτερη κλαστική σειρά (ψαμμιτικοί - μαργαϊκοί τόφφοι, ψαμμίτες, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι)



Αν. Ηώκαινο - Ολιγόκαινο

Δακτοειδείς ανδεσίτες που συνοδεύονται από πυροκλαστικά, τοπικά έντονα εξαλλοιωμένα



Μέσο Ηώκαινο

Νουμουλιτικοί ασβεστόλιθοι



Βασική κλαστική σειρά με αργιλοψαμμιτικές ενστρώσεις

ΥΠΟΒΑΘΡΟ



Μεσοζωικό

Φλυσχοειδής σειρά Δρυμού Μελιάς

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΦΥΛΛΑ 1:50.000
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ ΚΑΙ ΦΕΡΩΝ - ΠΕΠΛΟΥ - ΑΙΝΟΥ

12. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ύπαρξη υδροπερατών γεωλογικών σχηματισμών, η κατάλληλη τεκτονική με ενεργά ρήγματα, οι εναλλαγές ηφαιστιτών και πυροκλαστικών προϊόντων, καθώς επίσης και η ρυολιθική ηφαιστειότητα δικαιολογούν την ύπαρξη γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, οι ηφαιστειακές μάζες του υποβάθρου λειτουργούν ως θερμικές αποθήκες που σε συνδυασμό με τα ενεργά ρήγματα, δημιουργούν επαγωγικά ρεύματα μεταφοράς και συσσώρευσης θερμικής ενέργειας σε περατούς σχηματισμούς (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

Τα Παλαιογενή, Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής (άμμοι, άργιλοι, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι, μάργες), καθώς επίσης και τα ηφαιστειακά πετρώματα ανδεδιτιτικής σύστασης, οι λάβες, οι τόφφοι και ηφαιστειακά λατυποπαγή (τα οποία είναι τοπικά έντονα εξαλλοιωμένα), εντάσσονται στους υδροπερατούς έως ημιπερατούς σχηματισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές ποσότητες νερού να αποθηκεύονται εκεί.

Ακόμη, ταμιευτήρες με υψηλό ενεργό πορώδες μπορούν να εντοπισθούν σε ψαμμίτες και κροκαλοπαγή, στον Νουμουλιτοφόρο ασβεστόλιθο, σε ασβεστοψαμμιτικές σειρές, στους ρυολιθικούς σχηματισμούς καθώς και στις επικλυσιογενείς σειρές της βάσης των νεογενών σχηματισμών.

Σύμφωνα με γεωφυσικές μελέτες, (Κάρμης κ.α., 2004) τα γεωθερμικά ρευστά πληρούν τον υδροπερατό σχηματισμό των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών σχηματισμών και βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με βαθύ θερμό υδροφορέα.

Τα γεωθερμικά ρευστά ανέρχονται μέσω του συστήματος των ρηγμάτων της περιοχής, έχοντας αποκτήσει μεγάλη θερμοκρασία από την επαφή με μαγματικές μάζες. Τα ρήγματα είναι και οι τελικοί συλλέκτες και περιορίζονται σε ζώνη ενδιάμεση των ρηγμάτων με ΑΝΑ διεύθυνση. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του επιφανειακού θερμού υδροφόρου ορίζοντα που επεκτείνεται Βόρεια του Αρίστηνου και μεταξύ των κύριων ρηγμάτων, διαμορφώνοντας ζώνη τοπικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

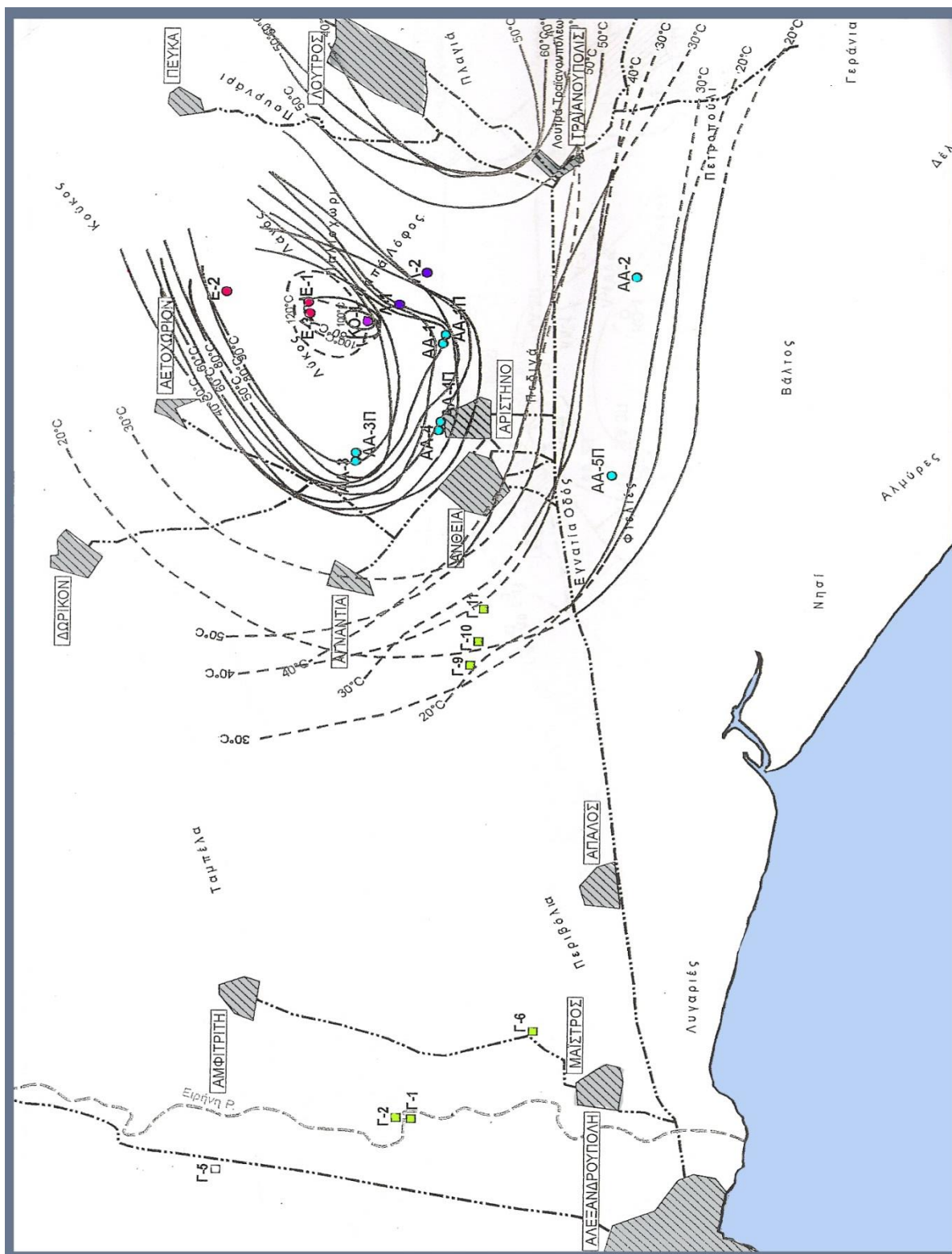
Σε ανώτερους σχηματισμούς παρουσιάζονται και συνθήκες υδροφορίας χωρίς γεωθερμικό ενδιαφέρον με τροφοδοσία από μετεωρικά νερά.

13. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Οι προαναφερθείσες συνθήκες οδήγησαν στη δημιουργία του γεωθερμικού πεδίου της περιοχής της Τραϊανούπολης. Έχει εντοπισθεί γεωθερμικός ταμιευτήρας σε βάθος 150-400 m με παροχή 200 m³/h και θερμοκρασίες ταμιευτήρα από 30 έως 90°C.

Η έκταση του γεωθερμικού ταμιευτήρα δεν έχει χαρτογραφηθεί επαρκώς, αλλά εικάζεται ότι πρόκειται για ένα αρκετά εκτεταμένο γεωθερμικό κοίτασμα, με το βεβαιωμένο πεδίο να υπολογίζεται στα 20 km², ενώ το πιθανό πεδίο οριοθετείται στα 50 km² (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

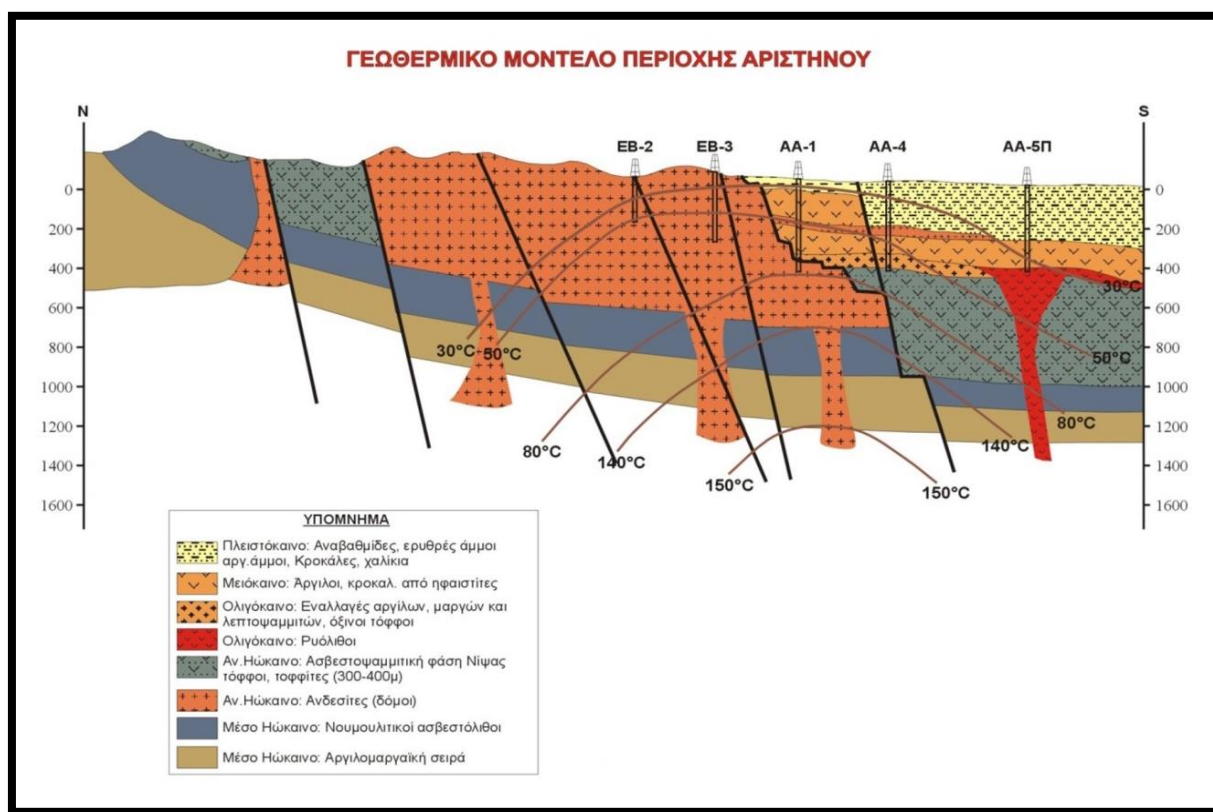
Όπως φαίνεται και στο χάρτη των ισόθερμων καμπυλών (Εικόνα 17), το μέγιστο των θερμοκρασιών φτάνει τους 120°C, βορειοανατολικά του Αρίστηνου κοντά στη γεώτρηση E-3. Η θερμική ανωμαλία θα πρέπει να εξελίσσεται ομαλότερα προς τα βόρεια προς το χώρο εμφάνισης των μολλασικών ιζημάτων και τη ζώνη επαναφόρτισης του υδραυλικού συστήματος. Ο χώρος γύρω από τους οικισμούς Αγνάντια – Αετοχώρι– Δωρικό, θα πρέπει να παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον, καθώς επίσης και αυτός ανατολικά, προς τον χώρο των Λουτρών (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).



Εικόνα 17: Επεξεργασμένος ψηφιακά χάρτης Ισόθερμων καμπυλών της περιοχής μελέτης.
(Πηγή: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου - 'Ανθειας, Ν. Κολιός 2001)

Η κατανομή των καμπυλών με το βάθος παρουσιάζουν τη μορφή της θερμικής διείσδυσης εντοπισμένης στο χώρο εμφάνισης των μαγματικών σχηματισμών και στο χώρο των κυρίων ρηγμάτων που διαμορφώνουν τις νεότερες τεκτονικές ανακατατάξεις στην περιοχή.

Μεγαλύτερο γεωθερμικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γεωτρήσεις εκείνες που βρίσκονται κοντά στο χώρο εμφάνισης των μαγματικών σχηματισμών και στο χώρο των κυρίων ρηγμάτων (Εικόνα 18).

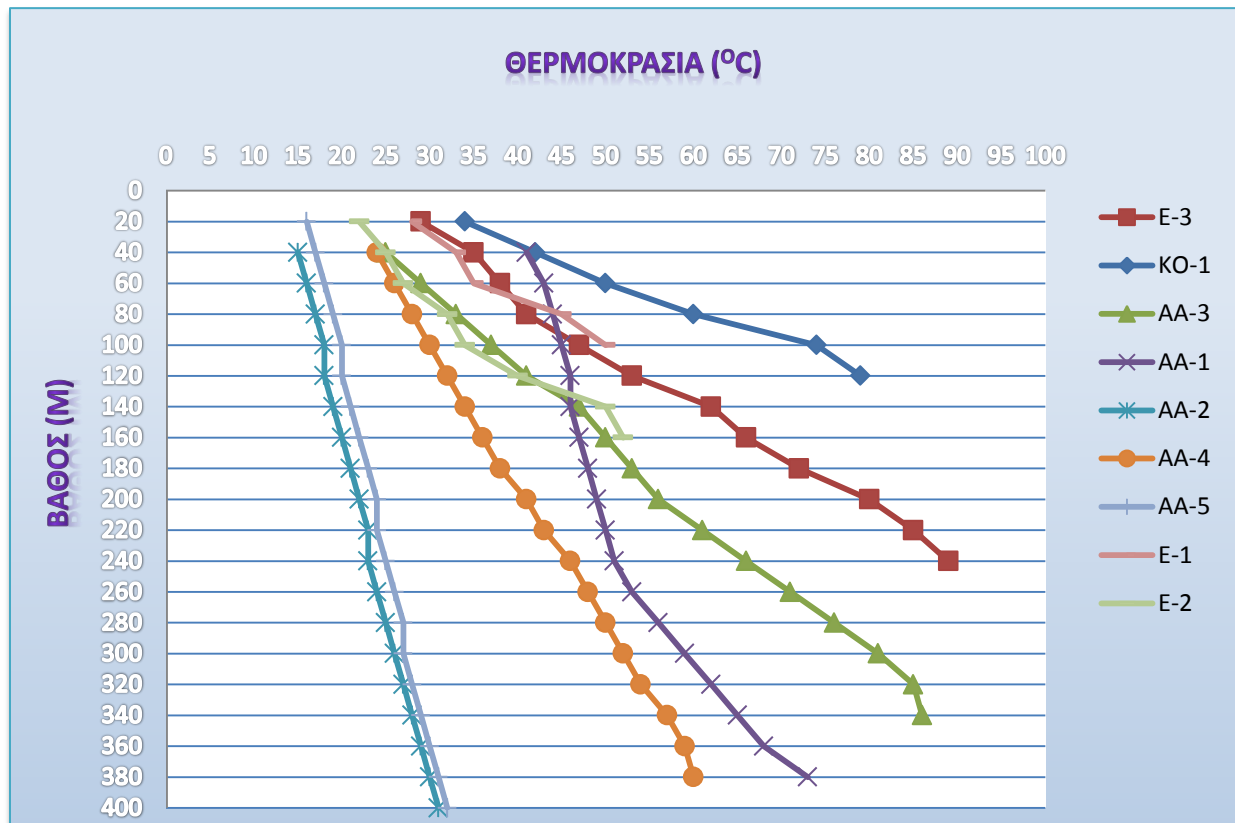


Εικόνα 18: Γεωθερμικό Μοντέλο Περιοχής Αρίστηνου (Πηγή: Φυτίκας, κ.α. 2007)

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας (Πίνακας 1), με τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος, καθώς και ένα διάγραμμα (Σχήμα 1) θερμοκρασίας – βάθους, τα οποία δημιουργήθηκαν με δεδομένα που συλλέχθηκαν από μελέτες του ΙΓΜΕ (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

Πίνακας 1: Θερμοκρασίες γεωτρήσεων ΑΑ-1, ΑΑ-2, ΑΑ-3, ΑΑ-4, ΑΑ-5, ΚΟ-1, Ε1, Ε2, Ε3 ανάλογα με το βάθος
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, ΙΓΜΕ, Κολιός 2001)

Βάθος (m)	Θερμοκρασία (°C)								
	ΑΑ-1	ΑΑ-2	ΑΑ-3	ΑΑ-4	ΑΑ-5	ΚΟ-1	Ε1	Ε2	Ε3
0					15,2				
20	41,6	15,2			16	34	28	22	29
40	43,3	16,2	25,5	24	17	42	33	25	35
60	44,1	17,2	29,6	26,2	18	50,5	35	27	38
80	44,9	18	33,7	28	19	60	45	32	41
100	45,6	18,9	37,2	29,8	19,5	74	50	34	47
120	46	19,7	41,5	31,8	20,2	79		40	53
140	47	20,3	47	33,8	21			50	62
160	47,5	21,3	50	36,2	21,5			52	66
180	48,3	22,2	53,5	38,4	23				72
200	50	23,1	56,9	40,7	24				80
220	51,6	23,7	61,5	43,1	24,5				85
240	53,6	24,2	66,8	45,8	25,1				89
260	56	25,2	71,5	47,5	26,5				
280	58,9	26	76,3	49,4	27				
300	62,1	27,1	81	51,6	27,5				
320	65,2	27,8	85	54,2	28,5				
340	68,4	28,6	86,8	56,8	29				
360	72,3	29,5		59,2	30,3				
380		30,5		60,1	31				
400					32				



Σχήμα 1: Μεταβολή θερμοκρασίας με το βάθος για τις γεωτρήσεις AA-1, AA-3, AA-4, AA-5, KO-1, E-1, E-2, E-3 (Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)

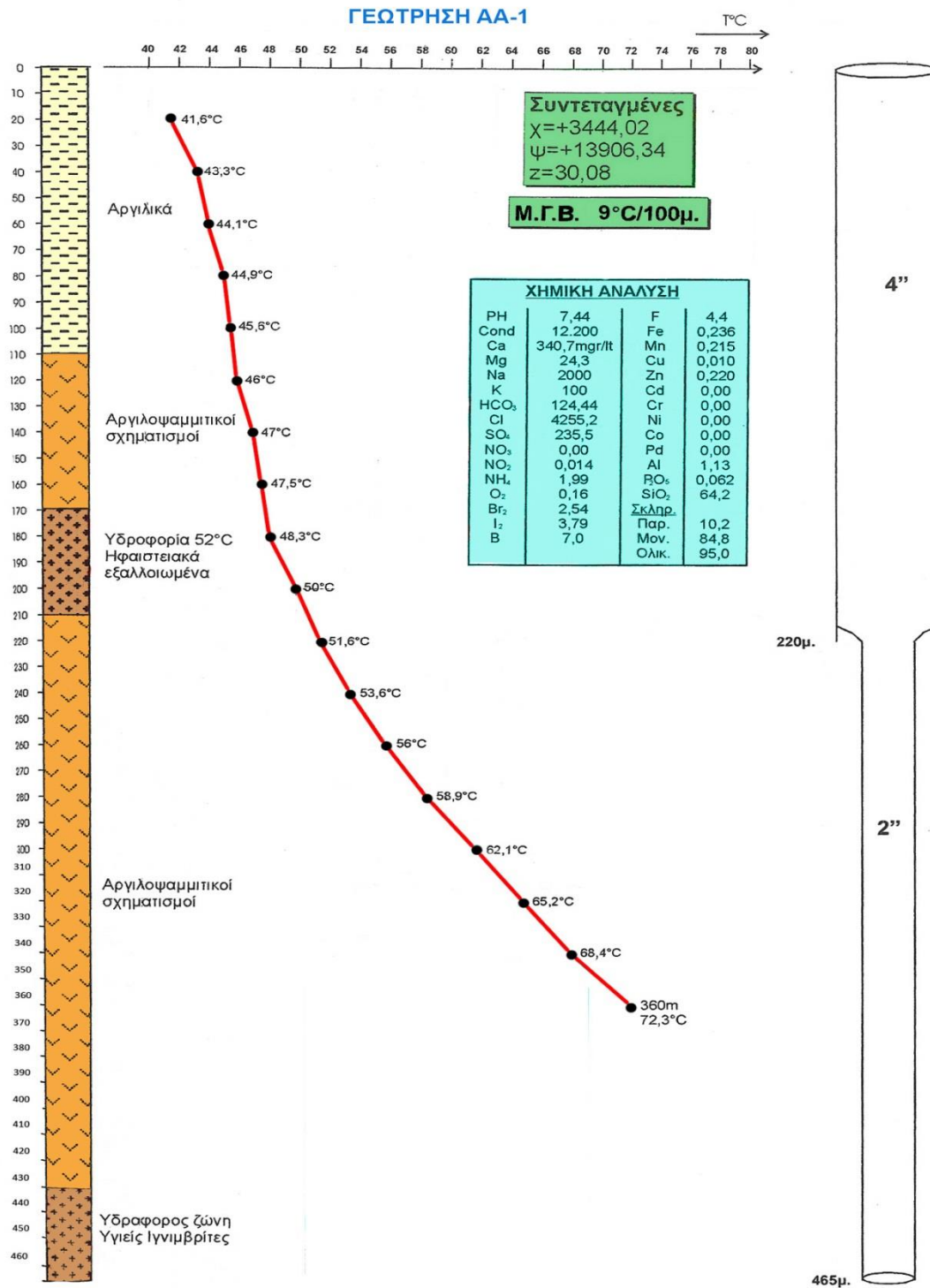
Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, οι γεωτρήσεις με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι οι AA-1, AA-3, και E-3 με θερμοκρασίες άνω των 70°C, και KO-1 η οποία σε βάθος 120 μέτρων παρουσιάζει θερμοκρασία 79 °C.

Από τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής, γνωρίζουμε ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή κυμαίνεται στους 15,35°C (Γελεγένης, 1996). Αυτό σημαίνει ότι η γεωθερμική βαθμίδα για την AA-1 είναι 4,6°C/100m, μέχρι το βάθος των 200m, ενώ αυξάνει σημαντικά από τα 200 m έως τα 360 m, όπου και παίρνει τιμή στους 14°C/100m. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα για την AA-1 είναι 9°C/100m. Ομοίως, για τη γεώτρηση AA-2 υπολογίζεται η τιμή στους 4,25°C/100m, για την AA-3 στους 20°C/100m, για την AA-4 στους 11°C/100m και για την AA-5 στους 4°C/100m. Αυξημένες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας συναντάμε στις γεωτρήσεις E-1 και E-3 με τιμή 27°C/100m, στην E-2 με τιμή 37°C/100m. Τέλος, τη μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει η KO-1, η όποια κυμαίνεται στους 45°C/100m.

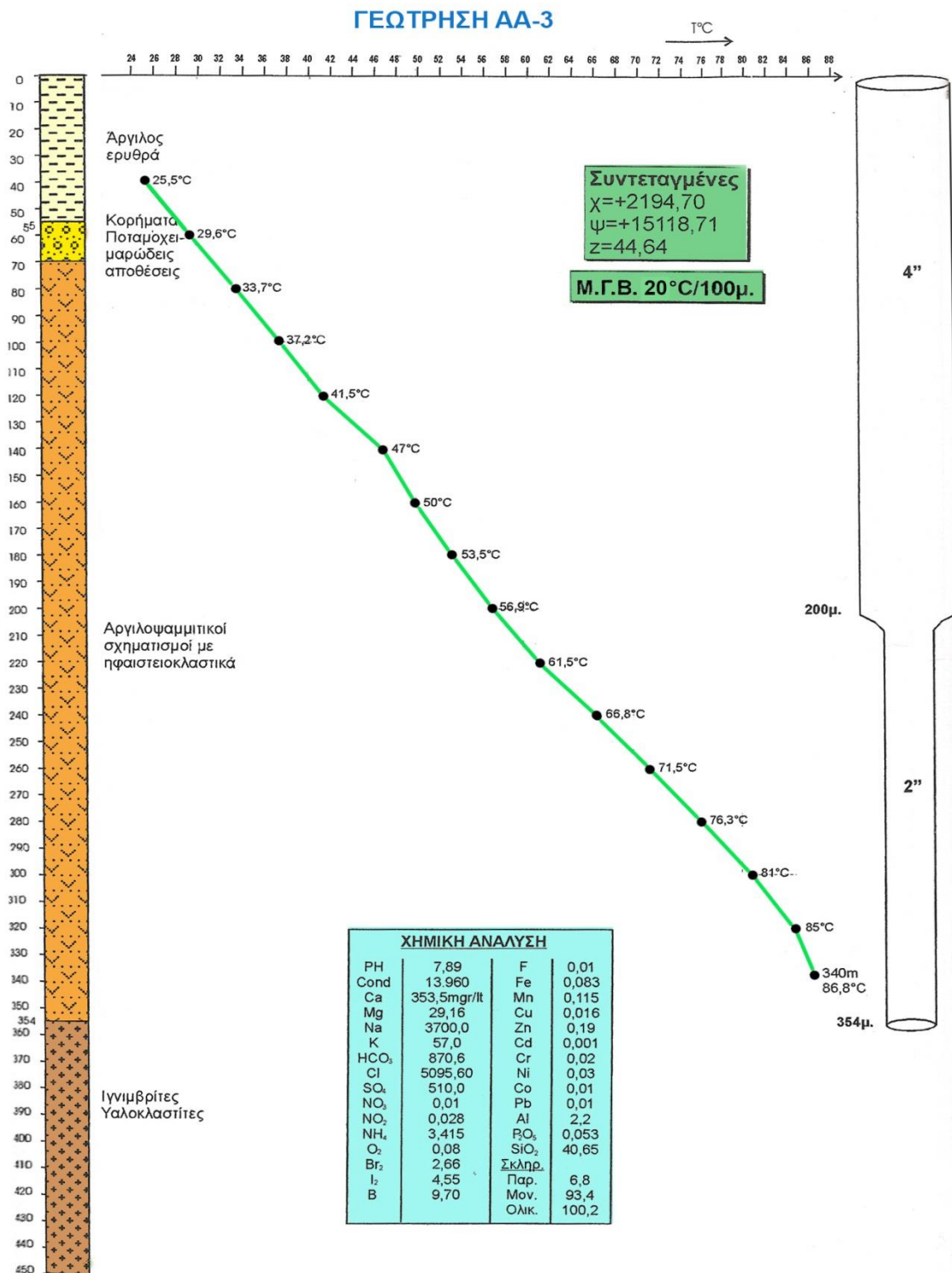
Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι η θερμοβαθμίδα είναι αρκετά μεγαλύτερη της μέσης, η οποία καθορίζεται στους 3°C/100m (Φυτίκας, Ανδρίτσος, 2004).

Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας, είναι όμως ενθαρρυντικές για την αξιοποίηση του ευρύτερου πεδίου. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι, εάν οι γεωτρήσεις αυτές συνεχιστούν σε βάθος, είναι ικανές να δώσουν υψηλότερες τιμές θερμοκρασιών.

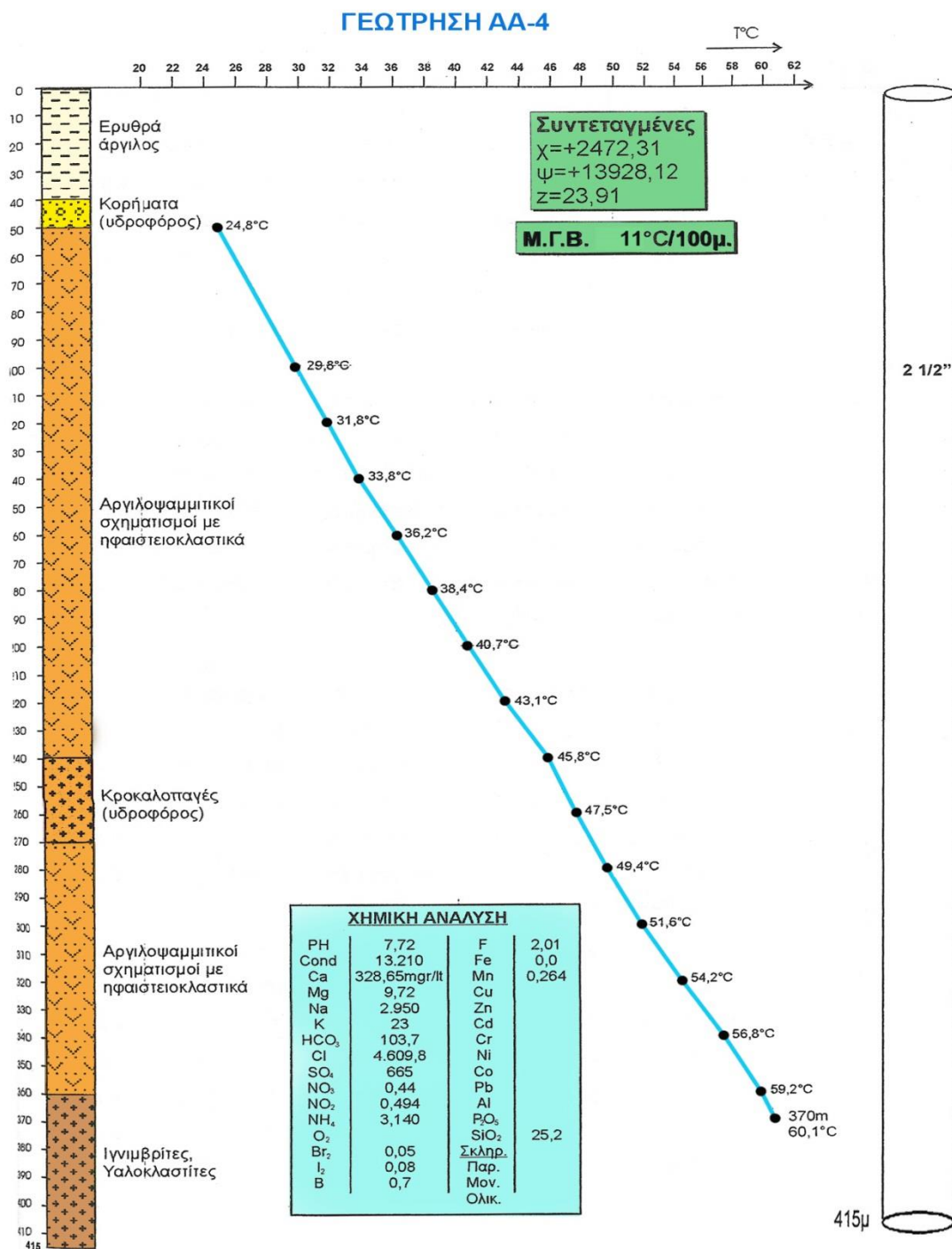
Παρακάτω παρατίθενται ως παράδειγμα τρεις από τις σημαντικότερες γεωτρήσεις της περιοχής με τις συντεταγμένες, τη χημική ανάλυση, τη στρωματογραφική στήλη και τις σωληνώσεις αυτών (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001), συμπληρωμένες με τη μέση γεωθερμική βαθμίδα (Μ.Γ.Β.) που υπολογίστηκε για την κάθε μια από τις παρακάτω γεωτρήσεις (Εικόνες 19, 20 & 21).



Εικόνα 19: Μεταβολή Θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος για την γεώτρηση ΑΑ-1. Δεξιά φαίνεται η στρωματογραφική στήλη, ενώ αριστερά οι σωληνώσεις της γεώτρησης.
 (Πηγή: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001, συμπληρωμένη με τη μέση γεωθερμική βαθμίδα και ψηφιακή επεξεργασία από τους συγγραφείς)



Εικόνα 20: Μεταβολή Θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος για την γεώτρηση ΑΑ-3. Δεξιά φαίνεται η στρωματογραφική στήλη, ενώ αριστερά οι σωληνώσεις της γεώτρησης.
 (Πηγή: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001, συμπληρωμένη με τη μέση γεωθερμική βαθμίδα και ψηφιακή επεξεργασία από τους συγγραφείς)



Εικόνα 21: Μεταβολή Θερμοκρασίας σε σχέση με το βάθος για την γεώτρηση ΑΑ-4. Δεξιά φαίνεται η στρωματογραφική στήλη, ενώ αριστερά οι σωληνώσεις της γεώτρησης
 (Πηγή: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001, συμπληρωμένη με τη μέση γεωθερμική βαθμίδα και ψηφιακή επεξεργασία από τους συγγραφείς)

14. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην ευρύτερη περιοχή εμφανίζονται γεωηλεκτρικοί ορίζοντες, ισχυρής αγωγιμότητας, που σχετίζονται άμεσα με το την ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 30° – 95°C , με υψηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα της τάξης των 10 gr/lit . Από τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας οριοθετείται η ζώνη τοπικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος, που διαμορφώνεται από θερμό υδροφόρο ορίζοντα μικρού σχετικά βάθους, επεκτεινόμενο Βόρεια του Αρίστηνου και μεταξύ των κύριων ρηγμάτων της περιοχής.

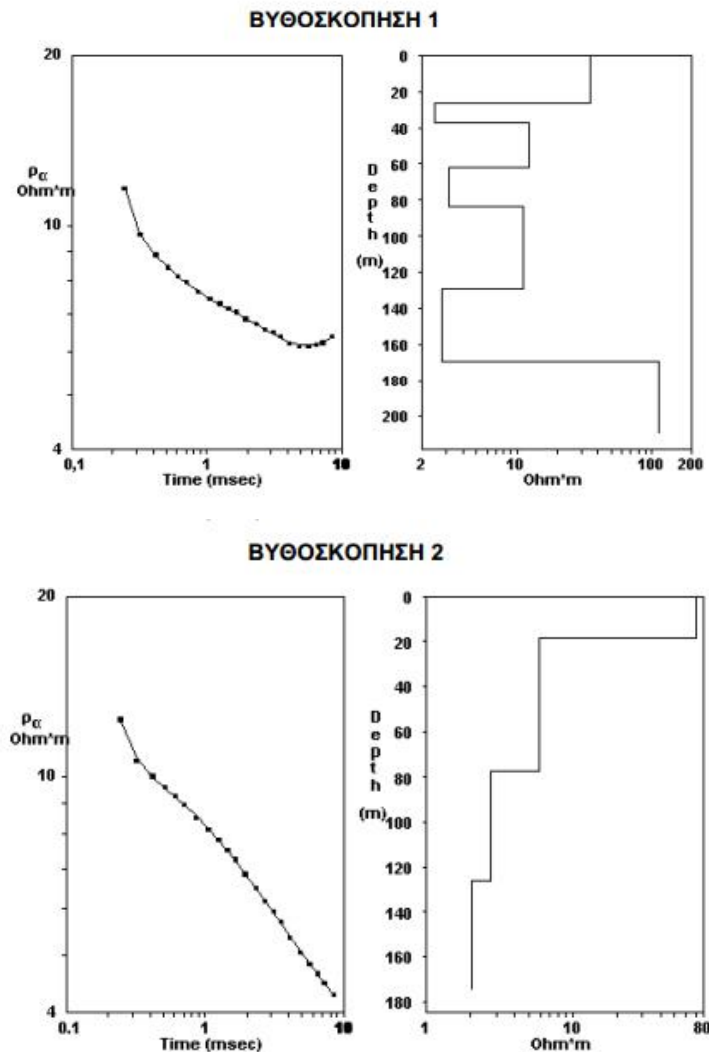
Στην ίδια περιοχή στο παρελθόν είχε πραγματοποιηθεί ανεξάρτητη γεωλογική – γεωφυσική μελέτη με τη χρήση ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων VES, (Κυριακίδης – Τσόκας, 1988), για τη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου. Σύμφωνα με αυτή, ορίστηκε ως πιθανός χώρος που περιέχει γεωθερμικό ρευστό μια περιοχή με BBD-NNA διεύθυνση, ακριβώς πάνω στο κυρίαρχο ρήγμα της περιοχής, όπως φαίνεται στον γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 22).



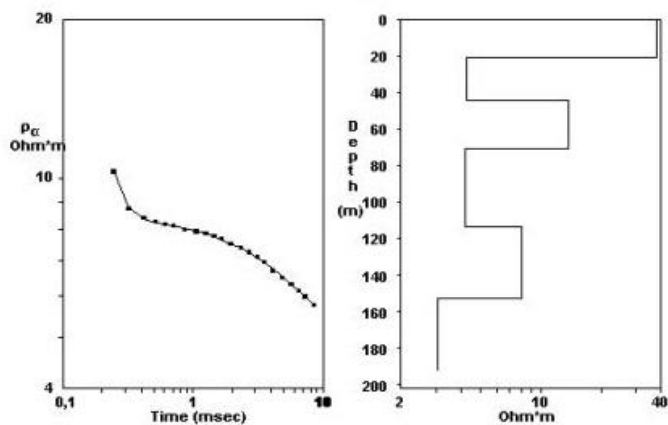
Εικόνα 22: Χάρτης και Υπόμνημα περιοχής γεωφυσικής έρευνας. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι ερευνητικές τομές και οι θέσεις των βυθοσκοπήσεων. (Πηγή: Κάρμης, κ.α. 2004)

Στη μελέτη αυτή είχαν πραγματοποιηθεί πέντε βυθοσκοπήσεις με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που το μέγιστο βάθος τους έφθασε τα 240 περίπου μέτρα.

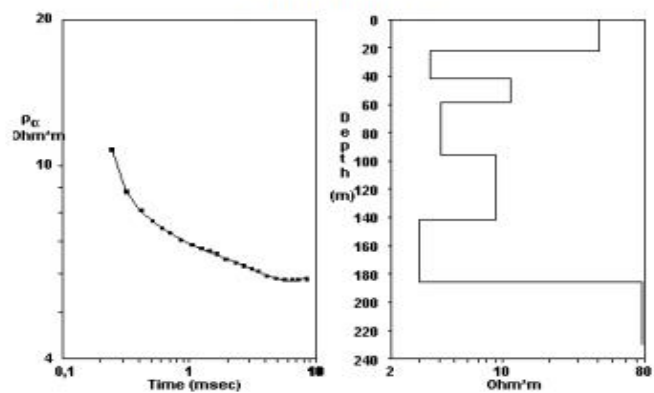
Η ερμηνεία των δεδομένων έγινε με αυτοματοποιημένη μέθοδο επιλογής στρωμάτων και παραμέτρων (Κάρμης, κ.α. 2004). Τα αποτελέσματα των αντιστροφών φαίνονται γραφικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2) .



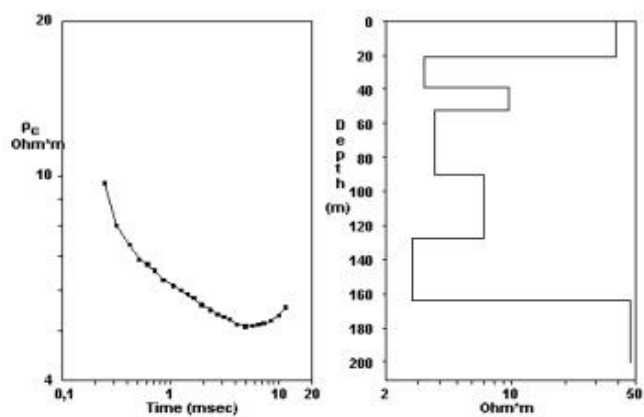
ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 3



ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 4



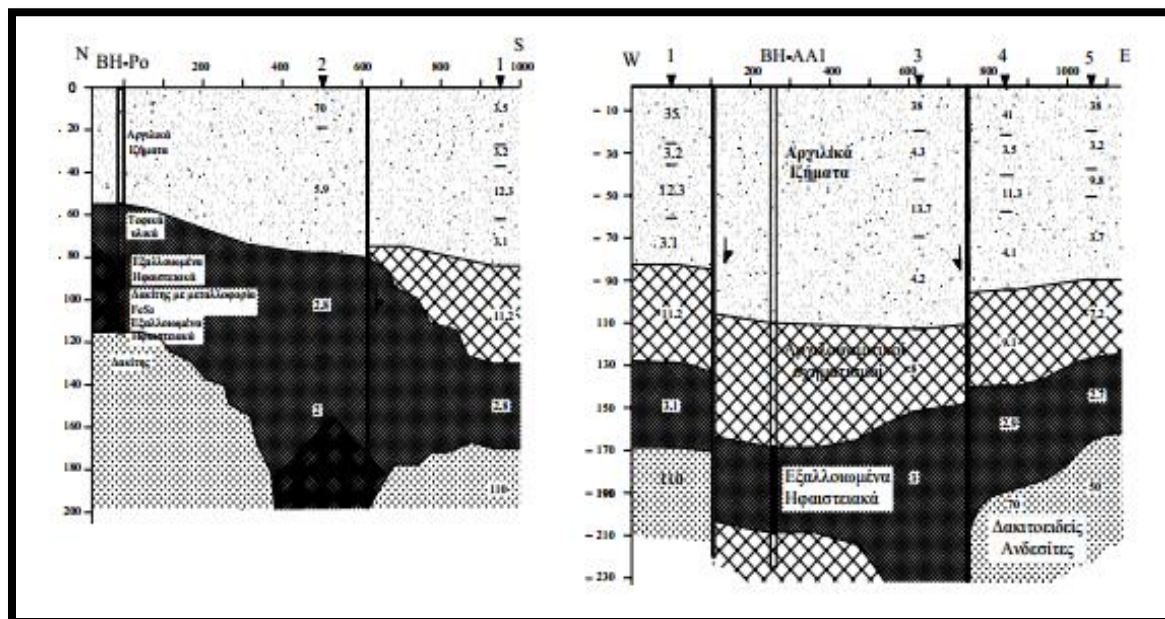
ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ 5



Σχήμα 2: Ερμηνεία Βυθοσκοπήσεων TEM 1-5 (Πηγή: Κάρμης, κ.α. 2004)

Από τα αποτελέσματα της ερμηνείας γίνονται αμέσως εμφανή τα κοινά χαρακτηριστικά των βυθοσκοπήσεων. Σε όλες τις θέσεις εμφανίζεται επιφανειακό στρώμα ειδικής αντίστασης 35-41 Ωm και πάχους 21-27 μέτρων. Υποκείμενοι αυτού εμφανίζονται εναλλαγές σχηματισμών μικρότερης αντίστασης. Το ενδιαφέρον και κυρίαρχο στοιχείο, που είναι κοινό σε όλες τις βυθοσκοπήσεις είναι η παρουσία ισχυρά αγώγιμου σχηματισμού (στρώμα 6), με παραπλήσιες τιμές αντίστασης περί τα 2-3 Ωm . Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από τόφφους και εξαλλοιωμένα ηφαιστειακά και έχει πάχος 40 περίπου μέτρα στις βυθοσκοπήσεις 1, 4 και 5 και υπέρκειται αντιστατικού υποβάθρου με αντίσταση μεγαλύτερη των 50 Ωm . Στις βυθοσκοπήσεις 2 και 3 δεν κατέστη δυνατό να ανιχνευθεί το αντιστατικό υπόβαθρο, το ηλεκτομαγνητικό σήμα παρέμεινε εγκλωβισμένο στο ισχυρά αγώγιμο μέσο του τελευταίου στρώματος, με επακόλουθο να περιορισθεί το βάθος διασκόπησης σε σχέση με τις θέσεις 1, 4 και 5 (Κάρμης, κ.α. 2004).

Στην παραπάνω έρευνα σχεδιάσθηκαν σε 2 τομές, εκ των οποίων η πρώτη διεύθυνσης Δ-Α περιλαμβάνει τις βυθοσκοπήσεις 1, 3, 4, 5 και τη γεώτρηση ΑΑ1 και η δεύτερη διεύθυνσης Β-Ν τις βυθοσκοπήσεις 2, 1 και τη γεώτρηση Π0 (Εικόνα 23). Από τις τομές διαφαίνεται η συμφωνία της γεωλογικής στρωματογραφίας των γεωτρήσεων με τη γεωηλεκτρική στρωματογραφία της TEM μεθόδου.



Εικόνα 23: Ερμηνευτικές τομές γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου (Κάρμης, κ.α., 2004)

Με διαπιστωμένη την αξιοπιστία της γεωφυσικής πληροφόρησης προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για το γεωθερμικό καθεστώς της περιοχής. Συγκεκριμένα, διαπιστώνεται η ύπαρξη θερμού υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ της γεώτρησης Π0, που επεκτείνεται ως τη θέση της βυθοσκόπησης 1, ακολουθείται στη γεώτρηση ΑΑ-1 και συνεχίζει πέραν της θέσης 3, του ρήγματος διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ ως τις θέσεις 4 και 5.

Τα δυο κύρια ρήγματα της περιοχής διεύθυνσης ΒΒΑ-ΝΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ, είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία τεκτονικού βυθίσματος (*grabben*) στην ενδιάμεση περιοχή και για την ανάπτυξη του ισχυρά αγωγίμου σχηματισμού, που συνδέεται με το θερμό υδροφόρο ταμιευτήρα των γεωτρήσεων ΑΑ-1 και Π0. Η ύπαρξη των ρηγμάτων κοντά στις θέσεις των βυθοσκοπήσεων 1 και 2 δικαιολογεί την αδυναμία προσδιορισμού αντιστατικού υποβάθρου στις θέσεις αυτές.

Τέλος να σημειωθεί ότι η μέθοδος των ηλεκτρικών βυθοσκοπήσεων δεν αποδείχθηκε ικανή να διαγνώσει το υπόβαθρο της περιοχής, λόγω του μικρού βάθους διασκόπησης, που ήταν αποτέλεσμα της μεγάλης αγωγιμότητας του υπεδάφους (Κάρμης, κ.α., 2004).

15. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της εργασίας, επιλέχθηκαν οι γεωτρήσεις εκείνες που είχαν τιμές μεγαλύτερες των 70 °C. Πρόκειται για τις γεωτρήσεις ΚΟ-1, Ε-3, ΑΑ-1, ΑΑ-3 και ΑΑ-4. Η παρακάτω ανάλυση στοχεύει στον προσδιορισμό της ποιότητας των γεωθερμικών ρευστών, έτσι ώστε να καταλάβουμε ποια προβλήματα μπορεί να αντιμετωπίσουμε κατά τη συνεχή λειτουργία των γεωτρήσεων αυτών. Τέτοια προβλήματα, συνήθως είναι είτε η απόθεση CaCO_3 στις σωληνώσεις, είτε η διάβρωση αυτών από διαβρωτικά στοιχεία.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) συγκεντρώσαμε τις τιμές από θερμοκρασία (T°C), Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (Σ.Δ.Α ή TDS) (mg/l)¹ (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001), και τέλος βάσει του τύπου $[\text{CaCO}_3] = 2,5[\text{Ca}^{+2}] + 4,1[\text{Mg}^{+2}]$ υπολογίσαμε την Ολική, Ανθρακική και μη Ανθρακική Σκληρότητα (f°).

Το νερό των γεωτρήσεων είναι υφάλμυρο, εφόσον το σύνολο των διαλυμένων αλάτων (Σ.Δ.Α ή TDS) κυμαίνεται σε τιμές μεγαλύτερες των 1000 mg/l και μικρότερες των 10.000 mg/l (Βουδούρης, 2009). Οι τιμές του pH κυμαίνονται μεταξύ 6,61 και 7,79. Πρόκειται, δηλαδή, για νερά ουδέτερα έως ελαφρώς αλκαλικά, με εξαίρεση τη γεώτρηση ΚΟ-1, της οποίας το νερό είναι ελαφρώς όξινο.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση νερών της περιοχής Αρίστηνου-Ανθειας (Πηγή: ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001 συμπληρωμένος με τιμές για την Σ.Δ.Α. και Ολική/Ανθρακική/Μη ανθρακική Σκληρότητα)

	ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΚΟ1	ΓΕΩΤΡΗΣΗ Ε- 3	ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΑΑ-1	ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΑΑ-3	ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΑΑ-4
T°C)	80	91	72,3	86,8	60,1
Αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	14.800	15.500	12.200	13.960	13.210
pH (εργαστηρίου)	6,61	7,04	7,44	7,89	7,72
Σ.Δ.Α (ή TDS) (mg/l)	8688	9775,2	7072,06	10603,76	8680,42
Ολική Σκληρότητα (f°)	8,32	14,9	9,5	10,2	8,6
Ανθρακική Σκληρότητα (f°)	8,125	5,635	1,02	0,68	0,85
Μη ανθρακική Σκληρότητα (f°)	1,993	8,767	8,48	9,34	7,75

¹ η μετατροπή από ppm σε mg/l , έγινε με τη βοήθεια του, <http://www.unitconversion.org/concentration-solution/milligrams-per-liter-to-parts-per-million-ppm-conversion.html>

Στους Πίνακες 3 και 4 παρατίθενται οι τιμές των Κατιόντων και των Ανιόντων, αντίστοιχα. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω και τον Πίνακα 2, συντάχθηκε ένας πίνακας, ο οποίος περιέχει τιμές για τον δείκτη κορεσμού Langelier (Saturation Index, SI) και τον δείκτη σταθερότητας Ryznar (Stability Index, StI) (Πίνακας 5), για τους οποίους θα γίνει αναφορά παρακάτω, και οι οποίοι δείχνουν την τάση που έχουν τα νερά για απόθεση CaCO_3 .

Πίνακας 3: Συγκέντρωση Κατιόντων για τις γεωτρήσεις ΚΟ-1, Ε-3, ΑΑ-1, ΑΑ-3, ΑΑ-4

KATIONTA (mg/l)					
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	ΚΟ-1	Ε-3	ΑΑ-1	ΑΑ-3	ΑΑ-4
Na^+	2780	3080	2000	3700	2950
K^+	138	148	100	57	23
Ca^{2+}	325	561	340,7	353,5	328,7
Mg^{2+}	4,86	21,38	24,3	29,16	9,72

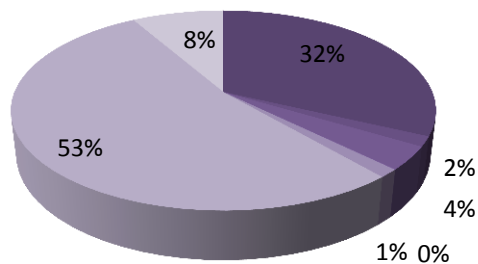
Πίνακας 4: Συγκεντρώσεις Ανιόντων για τις γεωτρήσεις ΚΟ-1, Ε-3, ΑΑ-1, ΑΑ-3, ΑΑ-4

ANIONTA (mg/l)					
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	ΚΟ-1	Ε-3	ΑΑ-1	ΑΑ-3	ΑΑ-4
HCO_3^-	115	216	124,4	870,6	103,7
Cl^-	4610	4960	4255,2	5095,6	4609,8
SO_4^{2-}	725	800	235,5	510	665
NO_3^-	0	0	0	0,01	0,44

Εν συνεχεία, βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων (Πίνακας 3 & 4), κατασκευάστηκαν κυκλικά διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν την εκατοστιαία (%) ποσοτική σύσταση σε (mg/l) των ιόντων Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} για κάθε μια από τις γεωτρήσεις.

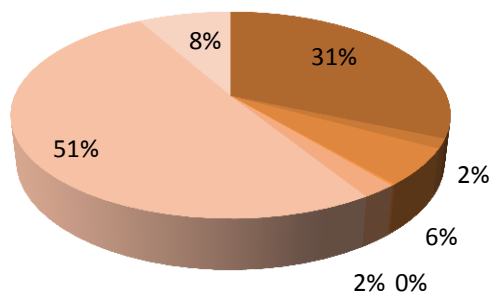
Γεώτρηση ΚΟ-1

■ Na ■ K ■ Ca ■ Mg ■ HCO₃ ■ Cl ■ SO₄



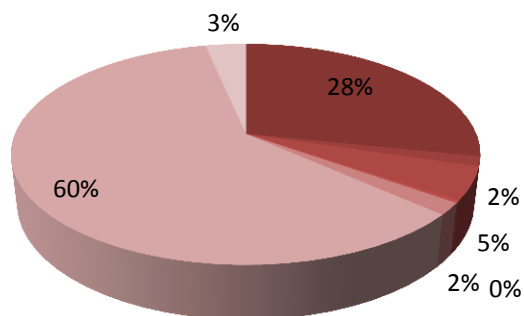
Γεώτρηση Ε-3

■ Na ■ K ■ Ca ■ Mg ■ HCO₃ ■ Cl ■ SO₄

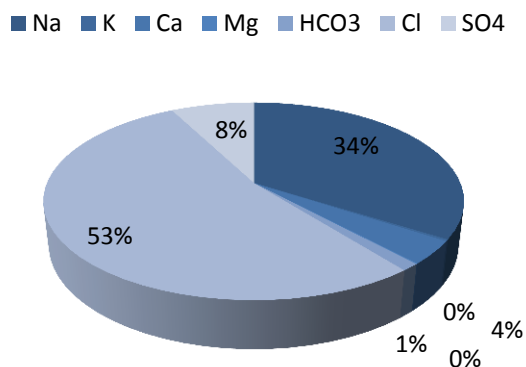


Γεώτρηση ΑΑ-1

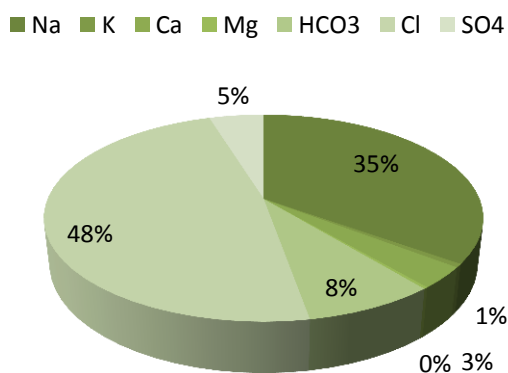
■ Na ■ K ■ Ca ■ Mg ■ HCO₃ ■ Cl ■ SO₄



Γεώτρηση AA-4



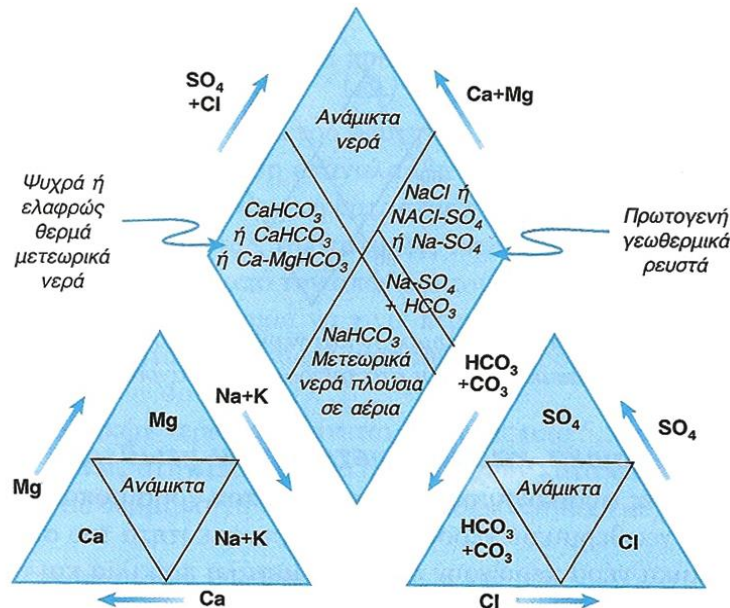
Γεώτρηση AA-3



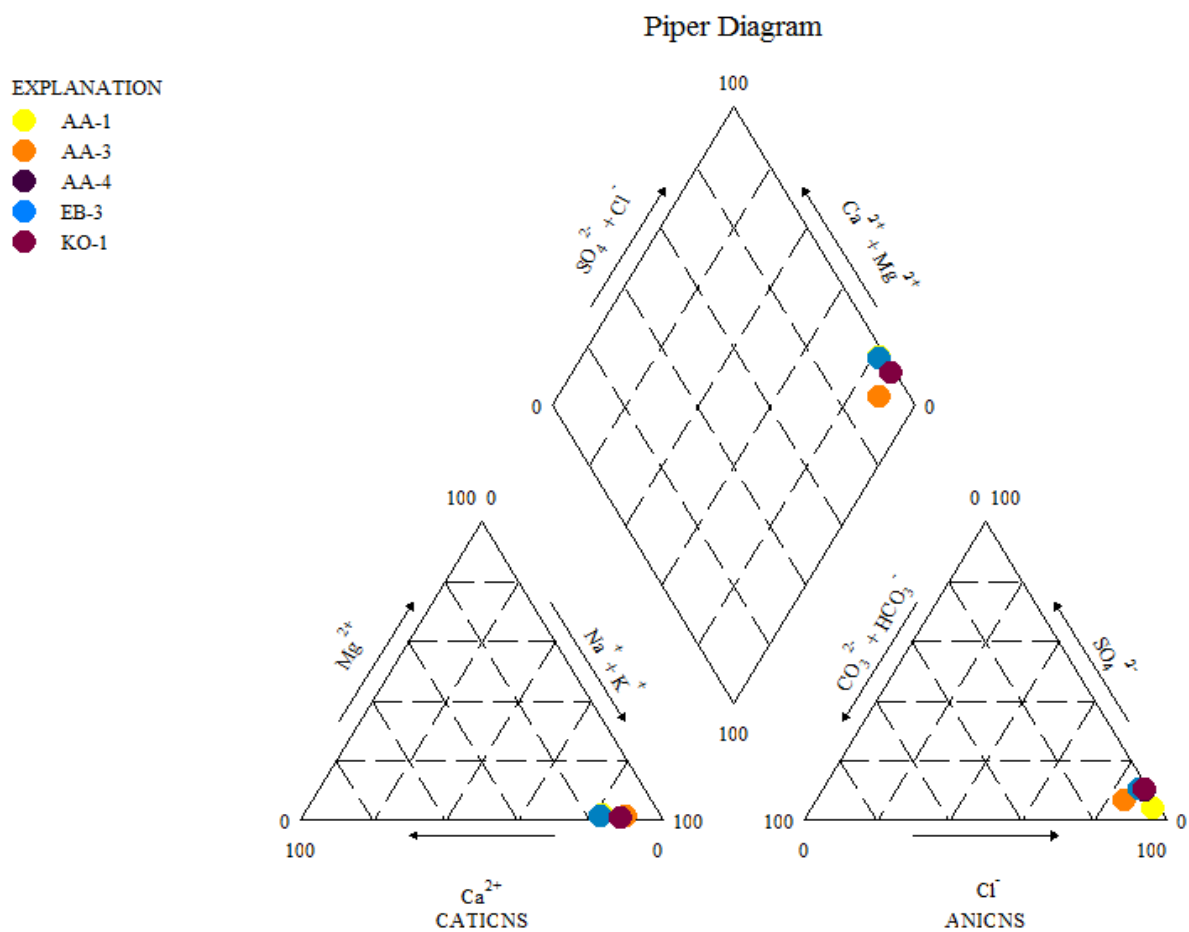
Σχήμα 3: Κυκλικά διαγράμματα που απεικονίζουν την εκατοστιαία ποσοτική σύσταση σε % mg/l των ιόντων Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} των νερών των γεωτρήσεων της περιοχής Αρίστηνου - Άνθειας (Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, ΙΓΜΕ, Κολιός 2001)

Το τριγωνικό διάγραμμα του Piper (1944) είναι μια γραφική μέθοδος, η οποία αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή συστήματα ταξινόμησης στη γεωθερμική και υδρογεωλογική έρευνα. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις σχετικές συγκεντρώσεις των στοιχείων Na+K, Mg, Ca, Cl, SO₄ και HCO₃+CO₃ σε ένα γεωθερμικό ρευστό. Οι συγκεντρώσεις των ιόντων μετατρέπονται από ppm ή mg/l σε meq/l (χιλιοστοϊσοδυνάμων) και απεικονίζονται πάνω στο διάγραμμα ως ποσοστά. Στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος προβάλλονται τα κατιόντα, ενώ η προβολή των ανιόντων γίνεται στο δεξιό τμήμα του διαγράμματος. Ο συνδυασμός των ποσοστών κατιόντων και ανιόντων, προβάλλεται στον κεντρικό ρόμβο (Φυτίκας, Ανδρίτσος 2004).

Από την προβολή των στοιχείων στο τριγωνικό διάγραμμα Piper (Εικόνα 24) και τη συσχέτιση αυτών με το τριγωνικό διάγραμμα (Σχήμα 5), προκύπτει ότι τα νερά των γεωτρήσεων KO-1, E-3, AA-1, AA-3 και AA-4 είναι τύπου Na-Cl, με υψηλή περιεκτικότητα σε SO₄. Επίσης, χαρακτηρίζονται ως πρωτογενή γεωθερμικά ρευστά.



Σχήμα 4: Τριγωνικό διάγραμμα για τον προσδιορισμό των χημικών τύπων των νερών. (Πηγή: Φυτίκας, Ανδρίτσος, 2004)



Εικόνα 24: Διάγραμμα Piper για τις γεωτρήσεις AA-1, AA-3, AA-4, EB-3 και KO-1 (Πρόγραμμα GW-Chart).

Ο δείκτης Langelier (SI) υπολογίζει την τάση που έχει το νερό να αποθέσει ή να διαλύσει ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), στις συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας. Το νερό όταν έχει την τάση απόθεσης είναι υπερκορεσμένο σε ανθρακικά άλατα, ενώ όταν παρουσιάζει τάση διάλυσης, είναι ακόμη ακόρεστο. Μαθηματικά, η τάση απόθεσης εκφράζεται με θετική τιμή του δείκτη και η τάση διάλυσης με αρνητική, ενώ η μηδενική τιμή δείχνει ισορροπία.

Ο δείκτης Langelier (SI), ενώ έχει προέλθει από θεωρητικές μελέτες, παρουσιάζει δύο βασικές ατέλειες και συγκεκριμένα είναι μόνο ποιοτικός και δεν δίνει ένδειξη για το πόσο αποθετικό είναι το συγκεκριμένο νερό. Δηλ. είναι δυνατόν νερό με τιμή δείκτη 1,5 να είναι λιγότερο αποθετικό από νερό με τιμή δείκτη 1,8. Στις αρνητικές τιμές του δείκτη έχουμε τάση διάλυσης ή οποία συνδέεται μεν, αλλά δεν συμβαδίζει υποχρεωτικά και με την τάση διάβρωσης.



Εικόνα 25: Διάγραμμα Δείκτη Σταθερότητας Ryznar
(Πηγή: http://www.arvanitakis.com/images/ryznar_2.JPG)

Ο δείκτης Ryznar (StI) από την άλλη μεριά, είναι εμπειρικός και δίνει ποσοτικά δεδομένα (Εικόνα 22).

Πιο συγκεκριμένα, για $6,5 < \text{StI} < 7$ το νερό θεωρείται ότι βρίσκεται σε σχετική ισορροπία με το ανθρακικό ασβέστιο, για $\text{StI} > 8$ το νερό τείνει να διαλύσει το στερεό CaCO_3 και τέλος για $\text{StI} < 6,5$ το νερό έχει τάση απόθεσης.

Αναλυτικότερα , τώρα, οι δείκτες Langelier και Ryznar υπολογίζονται από τους τύπους (Βουδούρης, 2009):

$$\text{SI} = \text{pH} - \text{pH}_s, \text{ για τον δείκτη LANGEIER (Saturation Index)}$$

και

$$\text{StI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}, \text{ για τον δείκτη RYZNAR (Stability Index)}$$

Όπου pHs (simulated pH), είναι μία θεωρητική τιμή, υπολογιζόμενη από τα δεδομένα της ανάλυσης του νερού του συστήματος και pH είναι η τιμή pH του συστήματος.

Στην πράξη, νερά τα οποία έχουν δείκτη Langelier μεταξύ $-0,5$ και $+0,5$ δεν θα εμφανίσουν σημαντικές ιδιότητες διάλυσης ή απόθεσης αντίστοιχα. Νερό με δείκτη Langelier κάτω από $-0,5$ τείνει να εμφανίσει σημαντικά αυξημένη ικανότητα απόθεσης, ενώ νερά πάνω από $+0,5$ τείνουν να εμφανίσουν σημαντικά αυξημένη διάλυση του CaCO_3 .

Από τα αποτελέσματα του δείκτη Langelier (Πίνακας 5), παρατηρείται ότι η γεώτρηση ΚΟ-1 παρουσιάζει τάση διάλυσης. Η τάση αυτή δεν παρουσιάζει έντονα φαινόμενα, εφόσον η αρνητική τιμή του δείκτη έχει ελάχιστη απόκλιση από το 0, που όπως προαναφέρθηκε δηλώνει τάση ισορροπίας. Όσον αφορά στις γεωτρήσεις Ε-3, ΑΑ-1, ΑΑ-3 και ΑΑ-4, αυτές παρουσιάζουν τάση απόθεσης και μάλιστα αυξημένη, εφόσον ο δείκτης Langelier είναι μεγαλύτερος από $+0,5$.

Πίνακας 5: Δείκτες Κορεσμού Langelier και Δείκτες Σταθερότητας Ryznar για τις γεωτρήσεις ΚΟ-1, Ε-3, ΑΑ-1, ΑΑ-3, ΑΑ-4.²

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ Langelier	ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ Ryznar
ΚΟ-1	-0.045	+6,7
Ε-3	+0.75	+5,5
ΑΑ-1	+0,81	+5,82
ΑΑ-3	+2,31	+3,27
ΑΑ-4	+0,86	+6,0

Σύμφωνα με τις τιμές του δείκτη Ryznar που έχουν υπολογιστεί και σε συνδυασμό με το διάγραμμα Ryznar (Εικόνα 22), συμπεραίνεται ότι για την γεώτρηση ΑΑ-3 η απόθεση θα πραγματοποιηθεί σε χαμηλή θερμοκρασία, ενώ στις γεωτρήσεις Ε-3, ΑΑ-1 και ΑΑ-4 θα πραγματοποιηθεί σε υψηλή θερμοκρασία. Διαφέρουν τα αποτελέσματα για την γεώτρηση ΚΟ-1, για την οποία προβλέπεται διάβρωση σε υψηλή θερμοκρασία.

Καταλήγουμε ότι, από τους Δείκτες κορεσμού Langelier και δείκτες σταθερότητας Ryznar φαίνεται ότι υπάρχει γενικότερα τάση απόθεσης CaCO_3 .

²Οι υπολογισμοί γίνανε με την βοήθεια του <http://www.lenntech.com/calculators/langelier/index/langelier.htm> και <http://www.lenntech.com/calculators/ryznar/index/ryznar.htm>

Σχετικά με τον υπολογισμό των ιοντικών λόγων, αυτός αποσκοπεί στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την προέλευση του νερού, τη διαδρομή που ακολουθεί και τις γεωχημικές διεργασίες που υφίσταται. Ως λόγος ιόντων ορίζεται, ο λόγος της περιεκτικότητας των υπόγειων νερών σε ένα ορισμένο ιόν, προς την περιεκτικότητα αυτών σε κάποιο άλλο ιόν. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται ως μονάδες μέτρησης είναι meq/l.

Οι κυριότεροι ιοντικοί λόγοι είναι οι εξής (Σούλιος, 2006):

- **Mg/Ca**: δείχνει εάν το νερό προέρχεται από ασβεστολιθικά ή μαγνησιούχα πετρώματα
- **Na/Cl**: σχετίζεται με την υφαλμύρωση ή την ύπαρξη υπολειμμάτων θαλάσσιων αλάτων
- **Na/K**: δείχνει εάν το νερό είναι θαλασσινό ή βρόχινο ή εάν υπάρχει περιοχή εμπλουτισμού υδροφορέων.
- **Cl/SO₄⁺²**: σχετίζεται με την υφαλμύριση και την ύπαρξη υπολειμματικών αλάτων στους υδροφορείς.
- **(Ca+Mg)/(Na+K)**: σχετίζεται με την τροφοδοσία του υπόγειου νερού.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τους ιοντικούς λόγους για τις γεωτρήσεις της παρούσας εργασίας, μετατρέψαμε τις τιμές των ιόντων, ανιόντων και κατιόντων, από mg/l σε meq/l (Πίνακας 6 & Πίνακας 7) σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{meq} = (\text{mg} * \text{σθένος} / \text{ατομικό βάρος})$$

Πίνακας 6: Συγκεντρώσεις κατιόντων Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺² σε meq/l

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (meq/l)	KO-1	E-3	AA-1	AA-3	AA-4
Na ⁺	120,9	134	87	160,9	128,3
K ⁺	3,5	3,8	2,6	1,5	0,6
Ca ⁺²	16,2	28,1	17	17,7	16,4
Mg ⁺²	0,3	1,8	2	2,4	0,8

Πίνακας 7: Συγκεντρώσεις ανιόντων HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{-2}

ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (meq/l)	KO-1	E-3	AA-1	AA-3	AA-4
HCO_3^-	1,9	3,5	2	14,26	1,7
Cl^-	124,2	140	120	144	130
SO_4^{-2}	15,1	16,6	4,9	10,6	13,9

Πίνακας 8: Ιοντικοί Λόγοι για τις γεωτρήσεις KO-1, E-3, AA-1, AA-3 και AA-4

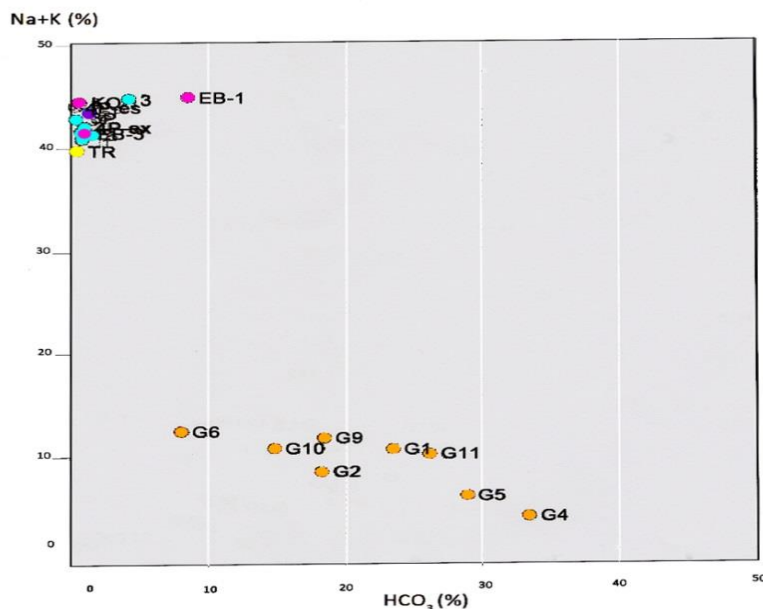
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΙΟΝΤΙΚΟΙ ΛΟΓΟΙ	KO-1	E-3	AA-1	AA-3	AA-4
Mg/Ca	0,01	0,06	0,12	0,14	0,05
Na/Cl	0,97	0,96	0,73	1,12	0,99
Na/K	34,15	35,2	34	110,2	217,4
Cl/ SO_4^{+2}	8,23	8,42	24,5	13,5	9,34
(Ca+Mg)/(Na+K)	0,014	0,22	0,21	0,12	0,13

Οι ιοντικοί λόγοι αφορούν στα υπόγεια νερά, τα οποία δεν είναι κατ' ανάγκη θερμά. Παρόλα αυτά, συγκρίνοντας την ήδη γνωστή ταξινόμηση των λόγων αυτών με τις τιμές εκείνες που θα προκύπτουν για τα γεωθερμικά ρευστά μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την ποιότητα των νερών αυτών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 8, για την περιοχή έρευνας ισχύουν τα εξής:

- **Mg/Ca:** επειδή ο λόγος είναι μικρότερος του 0,5 – 0,7 το νερό των γεωτρήσεων αυτών αντιστοιχεί σε νερό από ασβεστολιθικούς υδροφορείς.

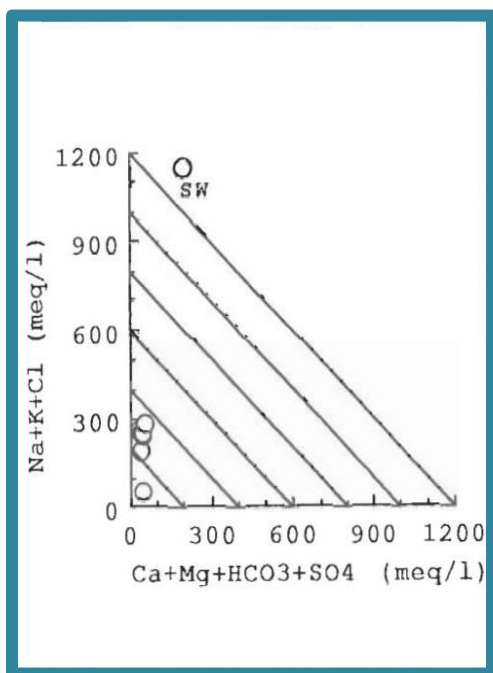
- **Na/Cl:** ο λόγος των γλυκών νερών κυμαίνεται στο εύρος τιμών $\text{Na/Cl} = 0,876 \pm 10\%$, για κανονικό υπόγειο νερό, $\text{Na/Cl} < 0,876 \pm 10\%$ όταν υπάρχει υφαλμύρωση του υδροφορέα (διείσδυση θάλασσας ή υπολείμματα θαλάσσιων αλάτων) και $\text{Na/Cl} > 1$ όταν πρόκειται για νερό που προέρχεται από αλκαλικά πυριγενή. Εφόσον η μέση τιμή του λόγου Na/Cl κυμαίνεται στα 0,95, συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για νερά, τα οποία είναι αποτέλεσμα υφαλμύρωσης του υδροφορέα.
- **Na/K:** σε περιοχές εμπλουτισμού παίρνει τιμές 12-25 ενώ σε περιοχές εκφόρτισης 45-70. Επίσης, στο θαλασσινό νερό ο λόγος αυτός ισούται με 46 και στο βρόχινο ισούται με 10. Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές συμπεραίνουμε ότι τα νερά αφορούν ανάμειξη βρόχινου και θαλάσσιου νερού, καθώς επίσης και το γεγονός ότι στην περιοχή πραγματοποιείται εμπλουτισμός και εκφόρτιση σε ίδιες περίπου αναλογίες.
- **Cl/SO₄:** όλες οι τιμές των γεωτρήσεων είναι μεγαλύτερες από πέντε, οπότε συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για χλωριούχο νερό.
- **(Ca+Mg)/(Na+K):** οι τιμές του λόγου αυτού είναι μικρότερες της μονάδας, άρα πρόκειται για παλιά νερά στα κατάντη τμήματα του υδροφορέα ως προς την κατεύθυνση ροής και δηλώνει περιοχή χωρίς συνεχή τροφοδοσία.

Diagram Langelier - Ludwing



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Langelier – Ludwing για τις γεωτρήσεις της περιοχής της Τραϊανούπολης (Πηγή δεδομένων: Κολιός 2001, ψηφιακή επεξεργασία από τους συγγραφείς)

Στο διάγραμμα Langelier – Ludwing (Διάγραμμα 2) φαίνεται ότι υπάρχουν δύο ομάδες διαλυμάτων. Μια με αυξημένη συγκέντρωση Na+K και μια δεύτερη με αυξημένη συγκέντρωση HCO₃. Στην τελευταία ανήκουν οι αρδευτικές γεωτρήσεις της περιοχής (G1, G2, G4 κ.ο.κ.).



Σύμφωνα με την τριγωνική τομή της πυραμίδας Langelier – Ludwing (Εικόνα 26), παρατηρούμε ότι η σταδιακή μετατόπιση του χημικού χαρακτήρα συνοδεύεται από μια σταθερή αύξηση της αλατότητας.

Το δείγμα E-1 [Na-SO₄-(HCO₃)] δεν βρίσκεται στην προέκταση της γραμμής των θερμών νερών που τείνουν προς τον θαλάσσιο πόλο. Προκύπτει λοιπόν ότι για τους δύο τύπους νερών δεν υπάρχει ο ίδιος γενετικός δεσμός και ότι υπάρχει μια διαδικασία εμπλουτισμού σε υδατικά θειικά στα νερά της E-1 (Πουτούκης, Ντότσικα 1998).

Εικόνα 26: Τριγωνική Πυραμίδα Langelier - Ludwig. Με κύκλο απεικονίζονται οι γεωτρήσεις της περιοχής. (Πηγή: Πουτούκης, Ντότσικα 1998)

Ο εμπλουτισμός μόνο σε SO_4 και όχι σε Ca μπορεί να αποδοθεί στην πιθανή αφαίρεση του Ca από το διάλυμα, λόγω καθίζησης του ασβεστίτη. Η υψηλή του θερμοκρασία οφείλεται στον υποκείμενο ταμιευτήρα, που με αγωγή θερμαίνει τον υπερκείμενο υδροφόρο (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

Γενικότερα, όσο τα διαλύματα θερμαίνονται τόσο τείνουν να αλλάξουν τον υδροχημικό τους τύπο από $\text{Na} - \text{SO}_4$ σε $\text{Na} - \text{Cl}$, καθώς μετακινούνται προς τον θαλάσσιο πόλο. Όσο αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα, η χημική σύσταση του νερού αλλάζει με σταθερή αύξηση της αλμυρότητας.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως τα επιφανειακότερα νερά με χημικό τύπο $\text{Na} - \text{SO}_4$ είναι μετεωρικής προέλευσης, που η μεταλλοποίησή τους οφείλεται σε φαινόμενα υδρόλυσης αργιλοπυριτικών ορυκτών. Αντίθετα, τα θερμά διαλύματα υψηλότερης θερμοκρασίας, τύπου $\text{Na} - \text{Cl}$ είναι αποτέλεσμα ανάμειξης μετεωρικού νερού και ενός βαθύτερου διαλύματος, υφάλμυρης σύστασης (ΙΓΜΕ, Κολιός, 2001).

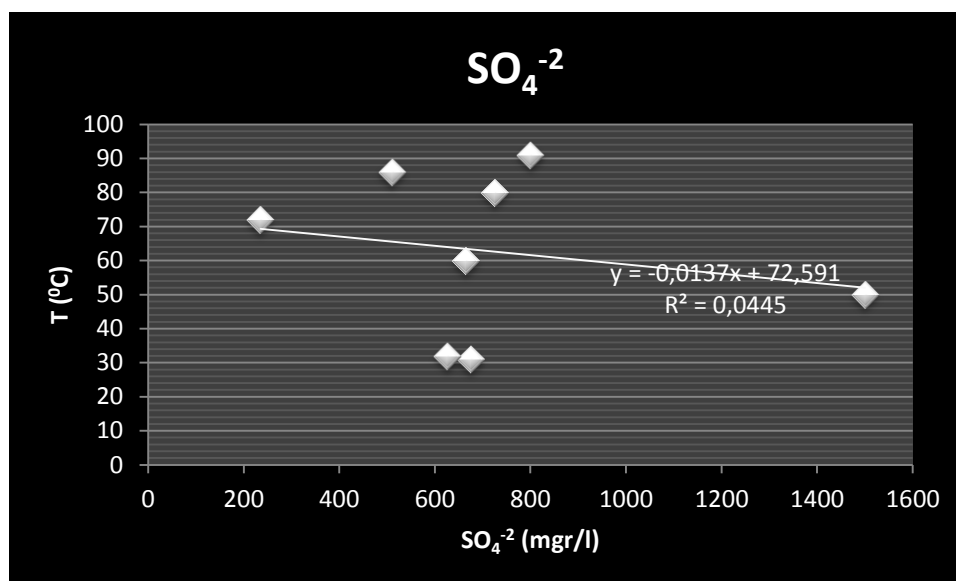
Τέλος, σύμφωνα με την υδρογεωχημική μελέτη των Πουτούκη - Ντότσικα (1998) επιβεβαιώθηκε η συμμετοχή θαλασσινού νερού στο γεωθερμικό σύστημα, σε ποσοστό περίπου 23%. Επίσης, ισοτοπικά δεδομένα έδειξαν ότι πρόκειται για πολύ παλιά νερά, των οποίων η τροφοδοσία έγινε σε περιόδους που επικρατούσε ψυχρότερο κλίμα από το σημερινό.

Εφαρμόζοντας, το γεωθερμόμετρο SiO_2 , Na/K , Na-K-Ca , K/Mg , Li/Mg και Na/Li προκύπτουν θερμοκρασίες μέχρι 90°C για την πηγή Τραϊανούπολης, ενώ για τα δείγματα υψηλής θερμοκρασίας το γεωθερμόμετρο Na/K δίνει θερμοκρασίες ως 140°C (Δ. Πουτούκης, Ε. Ντότσικα 1998).

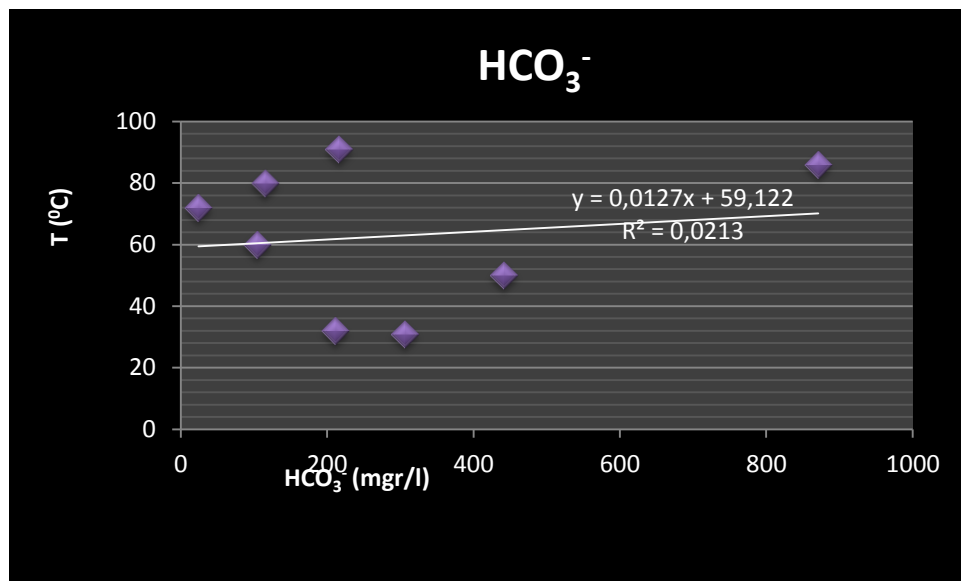
Πίνακας9: Γεωθερμόμετρα SiO_2 , Na/K , Na-K-Ca , K/Mg , Li/Mg και Na/Li για τις γεωτρήσεις E1, E3, K, K-1, E3-1, E3-2, TR (Πηγή δεδομένων: Δ. Πουτούκης, Ε. Ντότσικα 1998)

Γεωθερμόμετρα	E1	E3	KO	KO-1	E3-1	E3-2	TR
SiO_2	85	113	125	128		128	94
Na/K	68	118	122	133	132	131	136
Na/K/Ca	115	178	154	184	195	170	157
Li/Mg			119			146	140
Na/Li			84			130	135

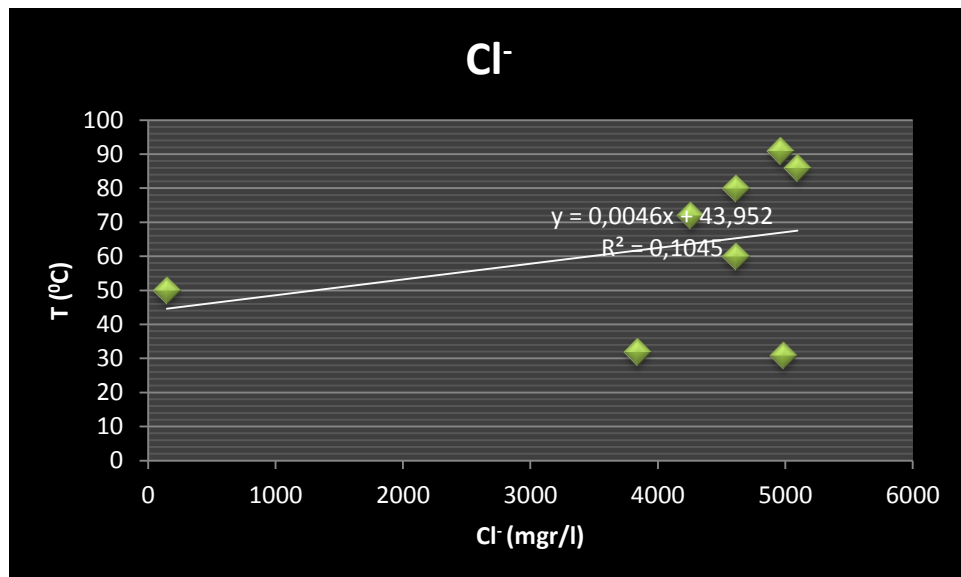
Στα παρακάτω δυαδικά διαγράμματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ σε σχέση με τη θερμοκρασία (T) για τα νερά των γεωτρήσεων AA-1, AA-2, AA-3, AA-4, KO-1, E-1, E-2 και E-3. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων υπολογίστηκαν οι συντελεστές προσδιορισμού (R^2).



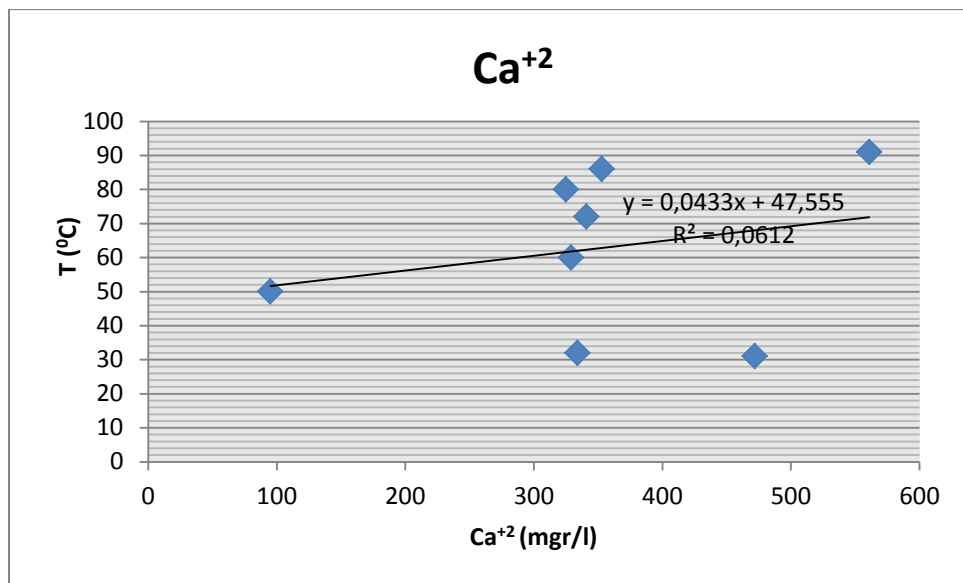
Διάγραμμα 3: Μεταβολή της περιεκτικότητας SO_4^{-2} (mg/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία (Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



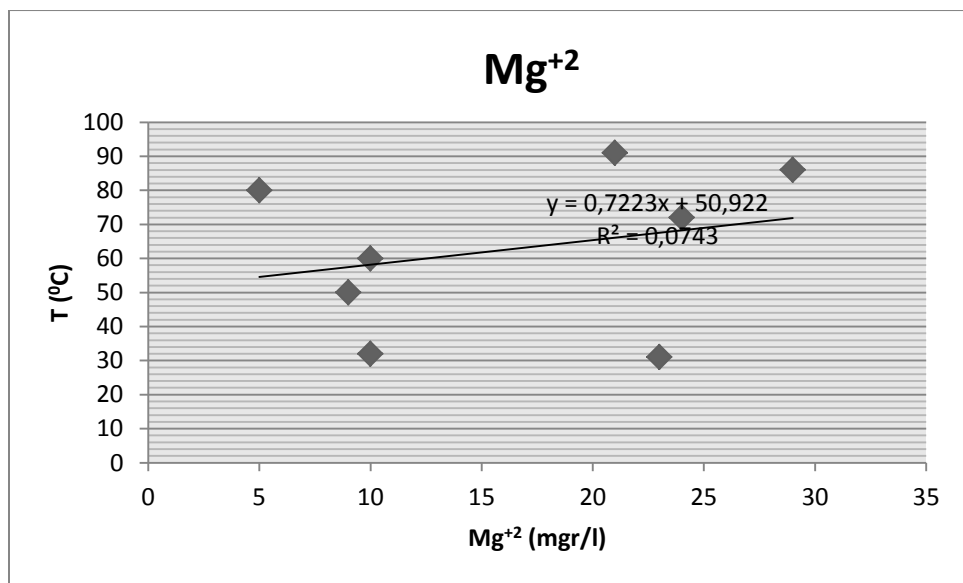
Διάγραμμα 4: Μεταβολή της περιεκτικότητας HCO_3^- (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



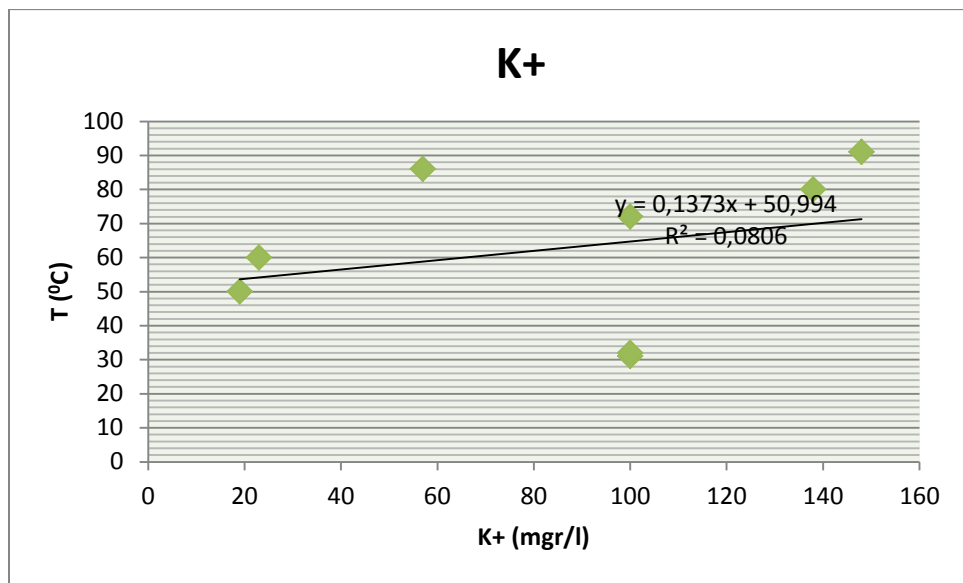
Διάγραμμα 5: Μεταβολή της περιεκτικότητας Cl^- (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



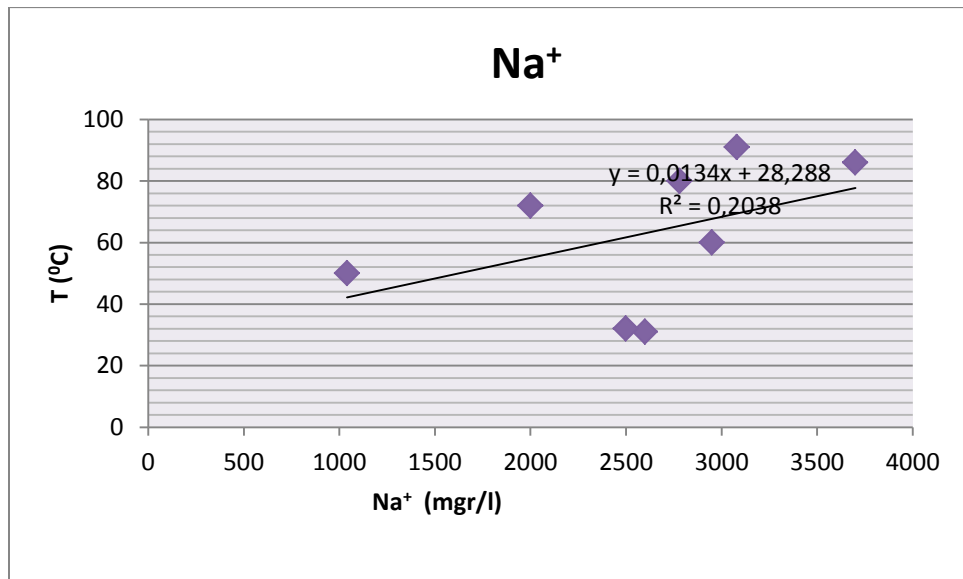
Διάγραμμα 6: Μεταβολή της περιεκτικότητας Ca⁺² (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



Διάγραμμα 7: Μεταβολή της περιεκτικότητας Mg⁺² (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



Διάγραμμα 8: Μεταβολή της περιεκτικότητας K⁺ (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)



Διάγραμμα 9: Μεταβολή της περιεκτικότητας Na⁺ (mgr/l) σε σχέση με τη θερμοκρασία
(Πηγή δεδομένων: Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αρίστηνου – Άνθειας, Ν. Κολιός 2001)

Οι τιμές για κάθε ένα από τα ιόντα δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 10: Συντελεστής συσχέτισης επί τις εκατό (%) Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-

	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
R^2	0,045	0,0213	0,1045	0,0612	0,0743	0,0806	0,2038
R	0,21	0,15	0,32	0,25	0,27	0,28	0,45

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα η διασπορά των προβαλλόμενων σημείων είναι σημαντική, συνεπώς ο συντελεστής συσχέτισης δεν κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Για να πούμε ότι υπάρχει καλή συσχέτιση θα πρέπει το R^2 να είναι μεγαλύτερο από 0,5 (ή 50%). Εφόσον ο συντελεστής προσδιορισμού δεν ξεπερνάει την τιμή 0,5 για καμία από τις γεωτρήσεις, συνάγεται ότι δεν υπάρχει καλή συσχέτιση, υποδηλώνοντας ότι η χημική σύσταση των νερών της περιοχής δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

16. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δυτικά των Λουτρών Τραϊανούπολης στην πεδινή και λοφώδη περιοχή Άνθειας- Αρίστηνου- Αετοχωρίου, στη λεκάνη του Έβρου, εντοπίζεται ένας χώρος γεωθερμικού ενδιαφέροντος έκτασης 20 Km², όπου σε βάθος 360 m αναπτύσσεται ένας γεωθερμικός ταμιευτήρας, με θερμοκρασίες άνω των 86 °C.

Η ύπαρξη του πεδίου αυτού οφείλεται στο συνδυασμό έντονης τεκτονικής δράσης, ασβεσταλκαλικού τύπου ηφαιστειότητας ηλικίας Α. Ολιγοκαίνου, και ύπαρξης υπόγειου υδροφορέα σε χαμηλό βάθος.

Από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις επιβεβαιώνεται η ζώνη γεωθερμικού ενδιαφέροντος, η οποία επεκτείνεται Βόρεια του Αρίστηνου και μεταξύ των κύριων ρηγμάτων της περιοχής. Το κύριο ενδιαφέρον εντοπίζεται σε σχηματισμό, ο οποίος αποτελείται από τόφφους και εξαλλοιωμένα ηφαιστειακά με πάχος περίπου 40 m, συναντάται σε βάθος περίπου 130 m και παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές ειδικής αντίστασης της τάξης 2-3 Ωm. Το γεωθερμικό ρευστό που πληροί τον υδροπερατό σχηματισμό των εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών των δυο γεωτρήσεων βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με το βαθύ θερμό υδροφορέα που εντοπίσθηκε σε βάθος 430 μέτρων στη γεώτρηση AA-1.

Οι τιμές των γεωθερμικών βαθμίδων κυμαίνονται από 4,5°C/100m για τις γεωτρήσεις που βρίσκονται προς το Νότο και αυξάνονται σημαντικά προς τα Βόρεια, με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 20° C/100m έως 47° C/100m.

Η αγωγιμότητα των γεωθερμικών ρευστών κυμαίνεται μεταξύ 12.200 και 14.800 μS/cm, ενώ το pH μεταξύ 6,61 και 7,89. Το σύνολο διαλυμένων αλάτων είναι περίπου 10gr/l. Με βάση τα διαγράμματα Piper η πλειονότητα των νερών των γεωτρήσεων είναι Na-Cl υδροχημικού τύπου με υψηλή περιεκτικότητα SO₄. Τέλος, εμπεριέχουν υψηλό ενεργειακό φορτίο λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της μεγάλης παροχής των πρώτων γεωτρήσεων έρευνας – παραγωγής.

Από την αξιολόγηση των δεικτών κορεσμού Langelier και σταθερότητας Ryznar φαίνεται ότι τα ρευστά αυτά παρουσιάζουν τάσεις απόθεσης περίσσειας CaCO₃. Οι διαβρωτικές τάσεις των ρευστών οφείλονται κυρίως στην υψηλή περιεκτικότητα ιόντων Na-Cl και δεν πρέπει να θεωρηθούν αμελητέες. Όσον αφορά όμως τις γεωτρήσεις παραγωγής, αυτές οι δύο τάσεις (απόθεσης-διάβρωσης) μπορεί να λειτουργήσουν ανταγωνιστικά ώστε να υπάρχει προστασία των σωληνώσεων από επικαθίσεις ασβεστίτη.

Στην περιοχή κύριου γεωθερμικού ενδιαφέροντος και σε βάθος 200 m περίπου, αναπτύσσεται γεωθερμικό σύστημα με θερμοκρασίες 50°C και την ίδια χημική σύσταση. Ο υδροφορέας αυτός εντοπίζεται μόνο στο χώρο βόρεια του Αρίστηνου και ανατολικά αυτού, με πιθανή ανάπτυξη μέχρι το χώρο των Λουτρών. Είναι επίσης πιθανό να βρίσκεται σε υδραυλική επαφή και να τροφοδοτείται μέσω ρηγμάτων από τον υπερκείμενο και υψηλότερης θερμοκρασίας ταμιευτήρα. Νοτιότερα και στα βαθύτερα της λεκάνης οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες με θερμοκρασίες ως 32° C αναπτύσσονται στη βάση των Νεογενών σχηματισμών και σε βάθος άνω των 350 m. Παρουσιάζουν την ίδια χημική σύσταση και μάλλον βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία.

Με βάση τα γεωχημικά γεωθερμόμετρα και τις ισορροπίες της διαλυτότητας φαίνεται ότι θερμοκρασίες της τάξης των 140° C, είναι πιθανές να αποτελούν τις αρχικές θερμοκρασίες του γεωθερμικού ρευστού. Με βάση τη γεωθερμική βαθμίδα της περιοχής, είναι πολύ πιθανό ρευστά αυτού του τύπου να βρίσκονται σε βάθος άνω των 600 m, πιθανώς μέσα σε παλαιότερα αρκοζικού τύπου ιζήματα της μολασσικής σειράς που στη νοτιότερη περιοχή θα πρέπει να αναπτύσσονται σε βάθος της τάξεως των 1000 m, αλλά με θερμοκρασίες μικρότερες των 80° C.

Εν κατακλείδι, η γεωθερμική ενέργεια της περιοχής, ως μια ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολλαπλά σε διάφορες εφαρμογές όπως για παράδειγμα η χρήση για θέρμανση κτηρίων, χρήση των ρευστών σε τουριστικές εγκαταστάσεις ή ακόμη και για αγροτικούς σκοπούς. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνονται πολλοί ωφέλιμοι για την κοινωνία στόχοι όπως, η εξοικονόμηση ενέργειας για τη θέρμανση κτηρίων, θερμοκηπίων και άλλων αγροτικών καλλιεργειών, υδατοκαλλιεργειών ως και λειτουργία εγκαταστάσεων θεραπείας (π.χ. λουτρά Τραϊανούπολης), ξήρανση αγροτικών προϊόντων και άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Δεδομένου του πλούσιου και σημαντικού γεωθερμικού ενδιαφέροντος της περιοχής, η ανάπτυξη της γεωθερμίας θα μπορούσε να αποτελέσει ένα μέσο για την οικονομική άνθηση της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Η εξασφάλιση του δικαιώματος κυριότητας και εκμετάλλευσης του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου από τον Δήμο αποτελεί ένα ενθαρρυντικό γεγονός για την εκμετάλλευση και την ενεργειακή ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



ΑΡΙΣΤΕΡΑ: γεώτρηση ΑΑ-1 , ΔΕΞΙΑ: γεώτρηση ΑΑ-1 Π



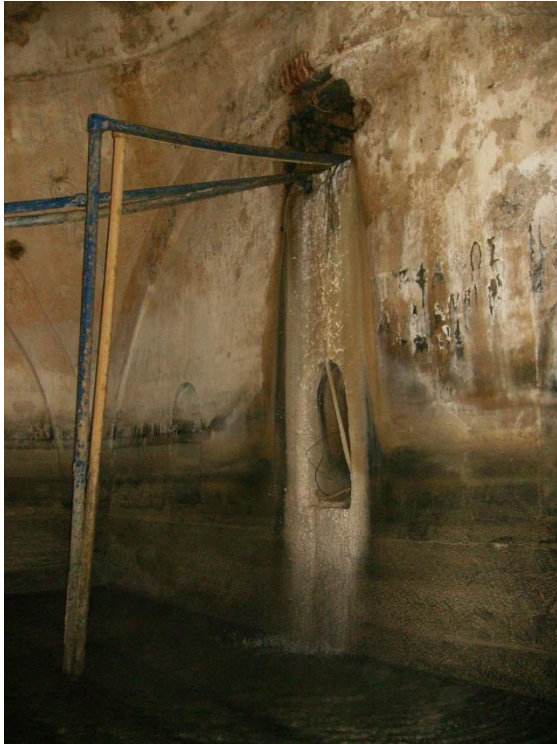
ΑΡΙΣΤΕΡΑ: γεώτρηση ΑΑ-3, ΔΕΞΙΑ: γεώτρηση ΑΑ-3Π



ΑΡΙΣΤΕΡΑ: γεώτρηση ΑΑ-4, ΔΕΞΙΑ: γεώτρηση ΑΑ-4Π



Γεώτρηση των ιαματικών λουτρών Τραϊανούπολης



Αριστερά φαίνεται το εσωτερικό των λούτρων της Τραϊανούπολης (Χάνα) με τις σωληνώσεις, και δεξιά φαίνονται οι αντλίες των σωληνώσεων



Εξωτερικό Χάνας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουδούρης Κ. (2009), «Υδρογεωλογία περιβάλλοντος. Υπόγεια νερά και περιβάλλον», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Γελεγένης Γ. (1996), ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ, «Αξιοποίηση γεωτρήσεων ΕΒ3 και ΚΟ1 γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου, Νομού Έβρου (τεχνικό – οικονομική προμελέτη).
- Κάρμης Π., Βαργεμέζης Γ., Παπαδόπουλος Η., Τσούρλος Π. (2004), «Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος παροδικών πεδίων στην έρευνα του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου Αλεξ/πολης», Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Θεσσαλονίκης, Τόμος XXXVI/3.
- Κολιός Ν. (2001), «Γεωθερμική έρευνα περιοχής Αριστήνου-Άνθειας Ν. Έβρου». Αδημοσίευτη Τεχνική έκθεση ΙΓΜΕ.
- Μενδρινός Δ. Καρύτσας Κ. (2005), «Γεωθερμία, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εμπειρία ΚΑΠΕ» Επιθεώρηση μεταλλευτικής-γεωτεχνικής και μεταλλουργικής επιστήμης. Τόμος 15.
- Μουντράκης Δ. (2010), «Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας», University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος Β., Παπαζάχος Κ. (2008), «Εισαγωγή στη Γεωφυσική», ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Πουτούκης Δ., Ντότσικα Ε. (1998), «Συμβολή της ισοτοπικής υδρολογίας και της υδρογεωχημίας στη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου Ν. Έβρου» Πρακτικά 8^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Πάτρας, Τόμος XXXII/4.
- Σούλιος Γ. (2006), «Γενική Υδρολογία» Τόμος Τέταρτος, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Τζάνης Α. (2010), «Σημειώσεις για την έρευνα γεωθερμικών πεδίων» Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος
- Φυτίκας Μ. & Ανδρίτσος Ν. (2004), «Γεωθερμία», Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Φυτίκας Μ., Χατζηγιάννης Γ., Κολιός Ν., Αρβανίτης Α., Κουτσινός Σ., (2007), «Παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από τα γεωθερμικά ρευστά μέσω και χαμηλών θερμοκρασιών στην Ελλάδα», Ινστιτούτο Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης, Ημερίδα Α.Π.Ε.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- http://www.arvanitakis.com/gr/c/Ryznar_gr.htm
- <http://old.igme.gr/geothermal-fields2007.pdf>
- <http://www.alexpolis.gr/default.asp?static=101&id=3551>
- <http://imarinakiss.webs.com/geothermal.pdf>
- <http://www.lenntech.com/>