



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ  
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ  
ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΛΜΥΡΟΥ**

*Δημήτριος Π. Βακράς*

**Αθήνα, Οκτώβριος 2016**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων: Ι. Κουμαντάκης, Ομότιμος Καθηγητής**



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	9
ABSTRACT .....	11
1.Εισαγωγή.....	13
1.1. Η προέλευση της γεωθερμικής ενέργειας .....	13
1.2. Γεωθερμικά πεδία .....	14
1.3. Προέλευση των γεωθερμικών ρευστών .....	16
1.4. Διαδικασία θέρμανσης των γεωθερμικών ρευστών.....	17
1.5. Κατηγορίες υδροθερμικών συστημάτων .....	18
1.5.1. Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η υγρή φάση .....	18
1.5.2. Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση .....	18
1.6. Γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας.....	19
1.7. Γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας .....	19
1.8. Συστήματα άντλησης γεωθερμικού ρευστού και διάθεσής του μετά τη χρήση .....	20
1.9. Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems) – Θερμά Ξηρά Πετρώματα (ΘΞΠ).....	21
2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας .....	25
2.1. Εισαγωγή .....	25
2.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.....	26
2.3. Τρόποι έρευνας γεωθερμικών πεδίων και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.....	28
2.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά το στάδιο ανάπτυξης των γεωθερμικών πεδίων .	29
2.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας.....	30
2.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας.....	31
2.6. Ανθρωπογενής σεισμικότητα κατά την εκτέλεση υδραυλικής θραύσης – Η περίπτωση της Βασιλείας Ελβετίας .....	32
2.7. Αντιμέτωπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας.....	34
2.8. Ελληνική Πολιτεία και γεωθερμικές εργασίες.....	34
3. Η Γεωθερμία στην Ελλάδα .....	36
3.1. Εισαγωγή .....	36
3.2. Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας .....	36

3.3. Γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας ν. Μήλου .....	40
3.4. Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας ν. Μήλου.....	41
3.4.1. Κινήσεις για αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της Μήλου .....	42
3.5. Το γεωθερμικό πεδίο της Νισύρου .....	43
4. Αβαθής γεωθερμία και εφαρμογές μικρής κλίμακας (γεωθερμικός εναλλάκτης) .....	46
4.1. Εισαγωγή .....	46
4.2. Γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας.....	47
4.3. Συστήματα κλειστού βρόχου .....	48
4.3.1. Συστήματα κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών .....	48
4.3.2. Συστήματα οριζόντιων γεωθερμικών εναλλακτών.....	49
4.4. Συστήματα ανοικτού βρόχου .....	50
4.5. Γεωθερμικό πεδίο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.....	52
4.6. Ο πάσσαλος θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτης.....	54
4.6.1. Η χρήση των πασσάλων θεμελίωσης για την ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος .....	54
4.6.2. Το πεδίο των πασσάλων θεμελίωσης κτιρίου ως γεωεναλλάκτης.....	54
5. Έρευνα γεωθερμικών πεδίων .....	58
5.1. Εισαγωγή .....	58
5.2. Σχεδιασμός και στρατηγικές έρευνας.....	58
5.3. Υδρολογικές παράμετροι στην έρευνα γεωθερμικών συστημάτων.....	59
5.3.1. Γεωλογικές, υδρολογικές και ορυκτολογικές μελέτες.....	60
5.4. Γεωχημικές μελέτες - γεωθερμομετρία .....	60
5.5. Γεωφυσικές μέθοδοι.....	61
5.5.1. Μετρήσεις θερμοκρασίας και θερμικής ροής .....	61
5.6. Δυσκολίες κατά την διεξαγωγή της προκαταρκτικής γεωθερμικής έρευνας στα πλαίσια της παρούσας εργασίας .....	64
6. Περιοχή μελέτης.....	66
6.1. Εισαγωγή .....	66
6.2. Υδρολογία της περιοχής.....	66
6.3. Κλιματικά- μετεωρολογικά δεδομένα .....	69
6.4. Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	70
6.4.1. Εισαγωγή.....	70
6.4.2. Υποπελαγονική ζώνη.....	71
6.4.3. Νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής.....	73

6.5. Τεκτονική .....	76
6.5.1. Εισαγωγή .....	76
6.5.2. Ρηξιγενής ζώνη Νέας Αγχιάλου .....	76
6.5.3. Κεντρικό- νότιο τμήμα της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης .....	78
6.6. Υδρογεωλογικές συνθήκες .....	80
6.6.1. Καρστικό υδροφόρο σύστημα Αλμυρού .....	80
6.6.2. Καρστικό υδροφόρο σύστημα Όθρυος .....	81
6.6.3. Υδροφόρο σύστημα της προσχωματικής λεκάνης Αλμυρού .....	81
6.6.4. Ανάγλυφο- υδρογραφικό δίκτυο .....	82
6.6.5. Υδρολιθολογία .....	82
6.6.6. Συστήματα τεταρτογενών ιζημάτων .....	82
6.6.7. Διακυμάνσεις της υπόγειας στάθμης των προσχωματικών υδροφορέων .....	88
6.7. Συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών της Λεκάνης .....	89
7. Παρουσίαση δεδομένων .....	91
7.1. Γενικά .....	91
7.2. Παρουσίαση θερμομετρήσεων .....	92
7.3. Θέση των γεωτρήσεων .....	95
7.4. Θέση ρηγμάτων .....	101
7.5. Ανάλυση και ερμηνεία των στοιχείων .....	105
7.6. Υδροχημική ανάλυση των δειγμάτων .....	110
7.6.1. Ταξινόμηση υπογείων νερών .....	110
7.6.2. Καταλληλότητα για άρδευση .....	112
7.6.3. Ηλικία νερών .....	115
8. Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	116
Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	119
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	121
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	124



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω τον ομότιμο καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Ιωάννη Κουμαντάκη για την επίβλεψη της εργασίας και την γενικότερη καθοδήγησή του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Απόστολο Αρβανίτη της Διεύθυνσης Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων του Ι.Γ.Μ.Ε. για τις υποδείξεις του και τη μεσολάβησή του για την παραχώρηση εκ μέρους του Ι.Γ.Μ.Ε. απαραίτητων δεδομένων. Ευχαριστώ τέλος όλα τα μέλη του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τομέα Γεωλογικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αλλά ιδιαιτέρως την Ελένη Βασιλείου για τις υποδείξεις της σχετικά με τα τεχνικά προγράμματα Η/Υ.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση σε επίπεδο προκαταρκτικής έρευνας, του πιθανού γεωθερμικού δυναμικού της υδρολογικής λεκάνης του Αλμυρού Βόλου.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών της γεωθερμικής ενέργειας. Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η προέλευση της γεωθερμικής ενέργειας, οι μορφές ρευστών οι οποίες μπορούν να τη μεταφέρουν, καθώς και οι τρόποι με τους οποίους μπορεί αυτή να αξιοποιηθεί.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την γεωθερμική ενέργεια, είτε αυτές έχουν να κάνουν με το στάδιο της έρευνας, την κατασκευή των εγκαταστάσεων αξιοποίησης, είτε τελικά με τη λειτουργία αυτής της εγκατάστασης για την εκμετάλλευσή της. Παρουσιάζονται επίσης, τρόποι αποφυγής και αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών αυτών επιπτώσεων.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με το γεωθερμικό δυναμικό στον ελληνικό χώρο, το οποίο είναι πολύ πλούσιο καθώς σε όλη την έκταση της χώρας συναντώνται πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Στην παρούσα διατριβή γίνεται ιδιαίτερη μνεία για τις περιπτώσεις των νήσων της Μήλου και της Νισύρου, όπου παρουσιάζεται έντονη γεωθερμική ανωμαλία με πεδία πολύ υψηλής ενθαλπίας και παροχής.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στην αβαθή γεωθερμία και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί αυτή να αξιοποιηθεί χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τον γεωθερμικό εναλλάκτη, γνωστό και ως γεωθερμική αντλία θερμότητας. Παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο επίσης η αρχή λειτουργίας του πασάλλου θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτη. Γίνεται τέλος περιγραφή της εγκατάστασης αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας αλλά και του γεωθερμικού πεδίου στα κτήρια Μεταλλειολόγων- Ηλεκτρολόγων στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας περιγράφεται η διαδικασία συγκέντρωσης και ανάλυσης των στοιχείων που απαιτούνται για τη κατανόηση και ερμηνεία του μηχανισμού της περιοχής μελέτης και γίνεται προσπάθεια να σχηματιστεί μια εικόνα όσο πιο κοντινή στην πραγματικότητα γίνεται αναφορικά με το πιθανό γεωθερμικό πεδίο στην λεκάνη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των σταδίων και των μεθόδων έρευνας στα πλαίσια της γεωθερμικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναλυτική περιγραφή των γεωλογικών, κλιματολογικών, υδρολογικών, και τεκτονικών χαρακτηριστικών της λεκάνης του Αλμυρού.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί και που αφορούν στοιχεία και αναλύσεις που προέρχονται από δειγματοληψίες υπαίθρου. Σε συνδυασμό με τα στοιχεία του προηγούμενου κεφαλαίου επιχειρείται να γίνει μια ανάλυση της εικόνας της περιοχής υπό το πρίσμα μιας πιθανής γεωθερμικής ανωμαλίας και να περιγραφεί ο μηχανισμός με τον οποίο αυτή μπορεί να εκδηλώνεται στην περιοχή.

Τέλος πραγματοποιείται εποπτική παρουσίαση των συμπερασμάτων από την προκαταρκτική αυτή αξιολόγηση της εικόνας της περιοχής μελέτης και γίνονται προτάσεις για την αποτελεσματική εστίαση μιας πιο συστηματικής έρευνας στο πιθανό γεωθερμικό πεδίο στον Αλμυρό Βόλου.

## **ABSTRACT**

This thesis aims to evaluate in a preliminary way, the tentative geothermal potential of the hydrogeological basin in Almyros, Volos.

The thesis comprises two parts. In the first part the thesis presents the characteristics of geothermal energy. The first chapter analyzes the origin of geothermal energy, the types of liquids that can carry it and the ways in which it can be used.

The next chapter deals with the environmental impacts of geothermal energy, whether they are related to the investigation phase or the construction and operation of the facilities that use it. Ways to prevent the aforementioned impacts are also presented in this chapter.

Chapter three covers the subject of the geothermal potential that is bountiful in Greece. Low enthalpy geothermal fields happen all over the country. This thesis specifically deals with the cases of the islands of Milos and Nisyros, where there is a strong geothermal anomaly with fields characterized by great enthalpy and flow.

Chapter four deals with shallow ground geothermal energy and analyzes the ways in which it can be utilized by means of the geothermal heat pump. This chapter also presents the concept of a foundation pile used as a geothermal heat pump. The chapter concludes with the description of the installation making use of the geothermal energy found in the field by the school of Metallurgy and Electrical Engineering in NTUA's Zografou campus.

The second part of the thesis focuses on the way that data, needed to understand and analyze the way in which the focus area works, were collected and processed. The goal was to create a model of the geothermal field supposed in the basin as true as possible.

The next chapter analyzes the stages and the methods employed when researching for geothermal potential.

Chapter six elaborates on the geological, climatological, hydrological and tectonic attributes of the Almyros basin.

The next chapter displays all the data that has been collected using field measurements and the results of hydrochemical analyses conducted in the lab. By connecting these with the information from the last chapter, the thesis tries to create a clear picture of the focus area, and describe the mechanism by which the speculated geothermal field manifests itself in the area.

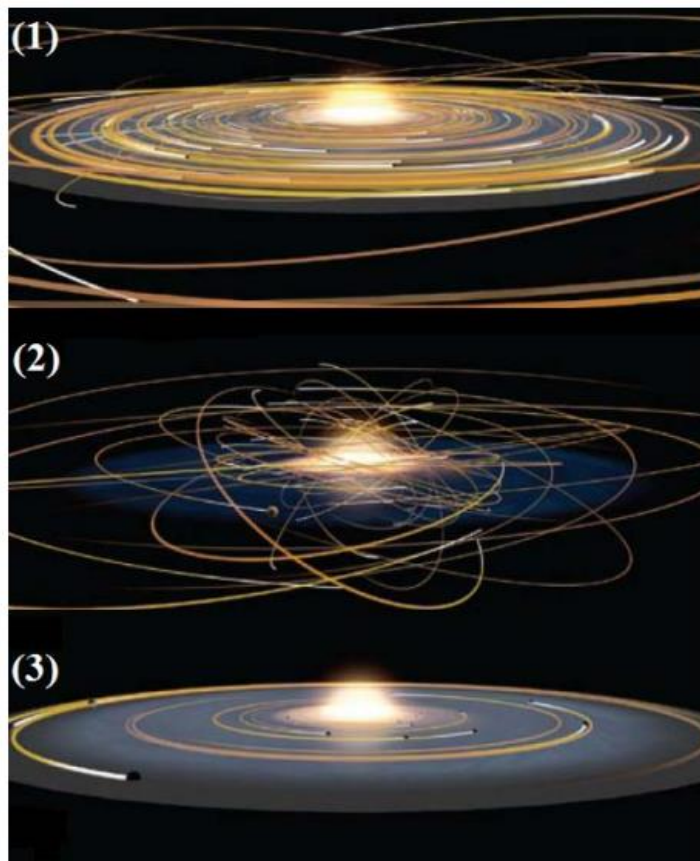
Finally, the thesis offers an overview of the conclusions reached hitherto in terms of the preliminary evaluation regarding the geothermal field and based on these, suggestions are made on how to better focus future investigative efforts in the Almyros basin.



## 1.Εισαγωγή

### 1.1. Η προέλευση της γεωθερμικής ενέργειας

Οι επιστήμονες υπολογίζουν ότι η Γη σχηματίστηκε πριν από πέντε δισεκατομμύρια χρόνια από τη σκόνη και τα αέρια που αποτελούσαν το πρωτογενές ηλιακό σύστημα. Καθώς η νέα Γη ωρίμαζε, η θερμότητα από την πρόσκρουση της ύλης που έπεφτε στην επιφάνειά της προκαλούσε πρόσθετη τήξη. Τα βαρύτερα υλικά (μέταλλα όπως σίδηρος και χαλκός) βυθίζονταν στον πυρήνα της, ενώ τα ελαφρύτερα βραχώδη υλικά σχημάτιζαν τους μανδύες και το φλοιό της. Τα χημικά ραδιενεργά στοιχεία, όπως ορισμένα ισότοπα ουρανίου, το θόριο κ.α. συγκεντρώθηκαν στο φλοιό της Γης με αποτέλεσμα η μεταστοιχείωσή τους να ελευθερώνει θερμότητα. Έτσι, η θερμότητα της Γης ήταν αποτέλεσμα τόσο της αρχικής θερμότητας των αερίων που την συνέστησαν, όσο και της αποσύνθεσης των ραδιενεργών στοιχείων επί 4,5 δισεκατομμύρια έτη. Η θερμοκρασία στα κέντρο της Γης εκτιμάται ότι είναι περίπου 3000 - 4200°C και η μέση τιμή της θερμικής ροής για όλη την επιφάνεια του πλανήτη είναι 60 mW/m<sup>2</sup> ή 1,5 μcal/sec/cm<sup>2</sup> (Τσελεπίδου, 2008).



Εικόνα 1. ΠΛΑΝΗΤΟΓΕΝΕΣΗ. Η συσσωμάτωση σκόνης και αερίων σχηματίζει δισεκατομμύρια πλανητιδίων χιλιομετρικής κλίμακας (1). Τα πλανητίδια συγκρούονται και συγχωνεύονται, σχηματίζοντας εμβρυακούς πρωτο-πλανήτες μεγέθους ανάλογου της Σελήνης και του Άρη. Σχετικά λίγοι σε αριθμό οι εμβρυακοί πλανήτες, κυριαρχούν στις αντίστοιχες τροχιακές τους ζώνες και ανταγωνίζονται για να προσελκύσουν το υπόλοιπο υλικό του πρωτοπλανητικού δίσκου. (2) Μερικά σώματα αυξάνονται υπέρμετρα σε μέγεθος και διαταράσσουν τις τροχιές των υπολοίπων, οπότε ακολουθεί μεγάλος αριθμός συγκρούσεων και συνενώσεων εμβρυακών πλανητών. (3) Το

υλικό του πρωτοπλανητικού δίσκου καταναλίσκονται και οι ολοκληρωμένοι πλανήτες κατασταλάζουν στις τελικές τους τροχιές. Πηγή: Α. Τζάνης: Σημειώσεις για την έρευνα γεωθερμικών πεδίων (2010)

Πρόσφατες παρατηρήσεις και θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι περί το 80% της παρατηρούμενης θερμικής ροής στην επιφάνεια της Γης είναι ραδιογενής, ενώ το υπόλοιπο 20% οφείλεται στη συμβολή της πρωτογενούς θερμότητας. Τα φυσικά (αυτοφυή) ραδιενεργά ισότοπα με πολύ μεγάλους χρόνους ημιζωής και συγκέντρωση επαρκή ώστε να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας είναι τα  $\delta^{235}\text{U}$ ,  $\delta^{238}\text{U}$ ,  $\delta^{232}\text{Th}$  και  $\delta^{40}\text{K}$ , τα οποία απαντώνται σε μετρήσιμες ποσότητες σε όλα σχεδόν τα πετρώματα (Τζάνης, 2010).

Η θερμότητα αυτή είναι γενικώς ισοκατανεμημένη, αλλά σε ορισμένες περιοχές (γεωθερμικά πεδία) παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση και ροή αυτής της θερμότητας.

## 1.2. Γεωθερμικά πεδία

Γεωθερμικές περιοχές είναι θεωρητικά εκείνες οι περιοχές που για διάφορες αιτίες διαθέτουν θερμική ροή και επομένως και γεωθερμική βαθμίδα υψηλότερη από τις μέσες τιμές (η μέση ροή είναι περίπου  $1,5 \text{ mcal/sec/cm}^2$  και η μέση βαθμίδα  $30^\circ\text{C}/1000 \text{ m}$ ). Οι περισσότερες από τις περιοχές αυτές είναι περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης, βύθισης των λιθοσφαιρικών πλακών, περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων και τέλος ηπειρωτικές περιοχές διόγκωσης. Δεν αρκεί όμως μόνο η θερμική ανωμαλία για να χαρακτηριστεί ένα πεδίο γεωθερμικό, αν κι άλλες συνθήκες όπως για παράδειγμα οι γεωλογικές δεν είναι ευνοϊκές. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι:

Γεωθερμικά πεδία είναι οι περιοχές στις οποίες οι συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ευνοϊκές. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

Οι προϋποθέσεις για την ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου είναι:

1) **Η πηγή θερμότητας.** Πρόκειται για μία μαγματική διείσδυση στο γήινο φλοιό, η οποία έχει θερμοκρασία της τάξης των  $600\text{-}1.200^\circ\text{C}$  και βρίσκεται σε βάθη μεταξύ  $3\text{-}10\text{ km}$ . Μόνο πρόσφατες μαγματικές διεισδύσεις μπορούν να αποτελέσουν εστίες θερμότητας. Οι παλιότερες διεισδύσεις έχουν ψυχθεί. Όλα τα γνωστά πεδία βρίσκονται σε περιοχές, όπου η ηφαιστειακή δράση εμφανίστηκε μετά το Μειόκαινο και κύρια κατά το Τεταρτογενές.

2) **Η τροφοδοσία με νερό.** Το 90% του νερού σε ένα γεωθερμικό υδροφόρο ορίζοντα προέρχεται από μετεωρικά κατακρημνίσματα ή/και θαλασσινό νερό. Το νερό μετεωρικής προέλευσης κατεισδύει μέσω ρηγμάτων σε βαθύτερους ορίζοντες, παραλαμβάνει θερμότητα από τα πετρώματα και ενδεχόμενα μικρές ποσότητες μαγματικού ατμού και αερίων, που διεισδύουν μέσω ρηγμάτων και ρωγμών από το υπόβαθρο, και στη συνέχεια ανέρχεται στην επιφάνεια.

Καθώς το θερμό νερό απομαστεύεται μέσω γεωτρήσεων ή μέσω φυσικών αναβλύσεων στην επιφάνεια, το υδρολογικό ισοζύγιο του γεωθερμικού συστήματος αποκαθίσταται ολικά ή μερικά με την εισροή νέων ποσοτήτων νερού από την επιφάνεια. Σε ορισμένα

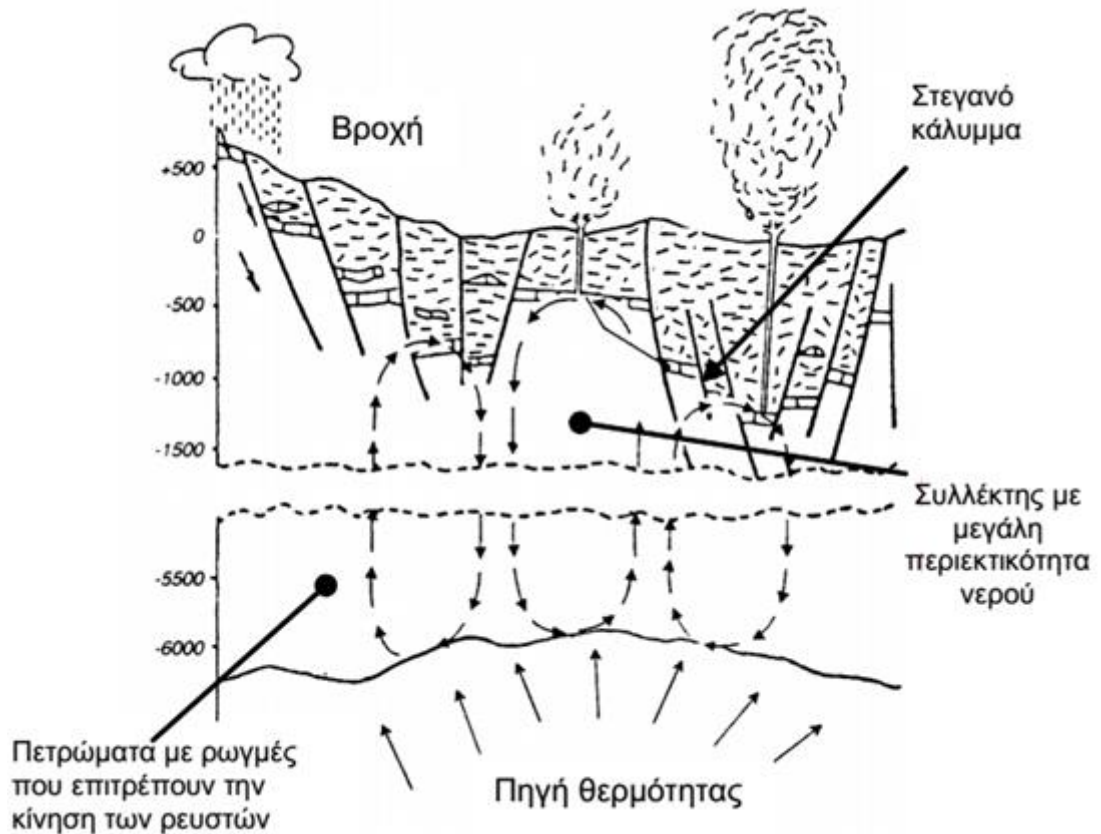
γεωθερμικά πεδία είναι δυνατόν να εντοπιστούν περιοχές ανατροφοδότησης με υδροπερατούς σχηματισμούς στην επιφάνεια, που επιτρέπουν την κατείσδυση ομβρίων υδάτων.

3) **Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας.** Πρόκειται για ένα λιθολογικό σχηματισμό που αποτελεί την υπόγεια αποθήκη νερού ή/και ατμού. Ο ταμιευτήρας πρέπει να διαθέτει σημαντικό πορώδες και διαπερατότητα που να επιτρέπει την κίνηση του υπόγειου νερού, ώστε μέσω γεωτρήσεων να είναι δυνατή μία ικανοποιητική παραγωγή γεωθερμικού ρευστού στην επιφάνεια.

Στην Ελλάδα οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες από γεωλογική άποψη βρίσκονται σε ηφαιστειακά και ηφαιστο-ιζηματογενή πετρώματα.

4) **Το κάλυμμα.** Λιθολογικός σχηματισμός πολύ χαμηλής διαπερατότητας (αργιλικά και ασβεστολιθικά πετρώματα), ο οποίος υπέρκειται του ταμιευτήρα. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία αρτεσιανών συνθηκών, αλλά και για την παγίδευση του ρευστού αποτρέποντας τη διαφυγή του στην επιφάνεια (Καρυδάκης 2005, Χρηστάνης 2001).

Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται όπως και οι γεωθερμικές ενεργειακές πηγές, σε υψηλής ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ), μέσης ( $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ) και χαμηλής ( $T < 90^{\circ}\text{C}$ ) ενθαλπίας. Είναι φανερό ότι τα πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι αποδοτικότερα από οικονομική και τεχνική άποψη. Το πλήθος όμως των πεδίων χαμηλής ενθαλπίας είναι πολύ μεγαλύτερο. Η απόδοση των γεωθερμικών πεδίων, όπως και όλων των γεωθερμικών πηγών, εξαρτάται από τη μέγιστη παροχή γεωθερμικού ρευστού που μπορεί να αντληθεί, χωρίς εξάντληση του θερμού υδροφορέα. Η παροχή αυτή εξαρτάται από τον όγκο και τη διαπερατότητα του αντίστοιχου υδροφόρου στρώματος. Το οικονομικό ενδιαφέρον είναι συνάρτηση του μεγέθους του πεδίου.



Εικόνα2. Σχηματική παράσταση γεωθερμικού πεδίου (Κίτσιος, 2009)

Όπως περιγράφηκε παραπάνω και όπως φαίνεται και στην παραπάνω σχηματική αναπαράσταση (Εικόνα 2), βασικό στοιχείο στο τρόπο λειτουργίας των γεωθερμικών πεδίων είναι τα ρευστά που κάθιστούν εφικτή την κυκλοφορία της θερμότητας και την ανάβυσή της στην επιφάνεια της Γης.

### 1.3. Προέλευση των γεωθερμικών ρευστών

Κύριο γεωθερμικό ρευστό είναι το νερό σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Το γεωθερμικό ρευστό περιέχει και άλλα στερεά ή αέρια συστατικά τα οποία μπορούν να είναι επιβλαβή και να δυσχεραίνουν τη θερμική εκμετάλλευση, αν και υπάρχουν φορές που δίνουν χρήσιμα παραπροϊόντα. Το γεωθερμικό νερό προέρχεται από:

α) Μετεωρικό νερό, δηλαδή νερό που πρόσφατα συμμετείχε στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία και κατείσδυσε μέχρι το θερμό υδροφορέα.

β) Ωκεάνιο νερό, που εισδύει στο φλοιό στις περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης.

γ) Νέο νερό, που προέρχεται από το μάγμα και δεν συμμετείχε προηγουμένως στην υδρόσφαιρα.

δ) Συγγενές νερό, δηλαδή απολιθωμένο νερό που εμπεριέχεται σε ιζήματα από το χρόνο εναπόθεσής τους.



ε) Μαγματικό νερό, δηλαδή νερό άλλων κατηγοριών (όχι νέο), που σε κάποια φάση αποτέλεσε μέρος του μάγματος.

στ) Μεταμορφικό νερό, που προκύπτει από την ανακρυστάλλωση υδρομεταλλικών ενώσεων κατά την διαδικασία της μεταμόρφωσης.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των σταθερών ισοτόπων του υδρογόνου και του οξυγόνου, το γεωθερμικό νερό έχει κυρίως μετεωρική προέλευση. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύθηκε με πειράματα, που αφορούν στην σύσταση του γεωθερμικού ρευστού. Το ωκεάνιο νερό αποτελεί την κύρια πηγή των υποθαλάσσιων γεωθερμικών συστημάτων, που βρίσκονται κοντά σε ωκεάνιες ράχες, αλλά και ορισμένων γεωθερμικών πεδίων, που βρίσκονται στην ξηρά (Τσελεπίδου, 2008).

#### **1.4. Διαδικασία θέρμανσης των γεωθερμικών ρευστών**

Όπως αναφέρθηκε το γεωθερμικό ρευστό έχει κυρίως μετεωρική προέλευση. Η θέρμανση του κρύου νερού των επιφανειακών στρωμάτων, που κατεισδύει και συγκεντρώνεται τελικά στον θερμό υδροφορέα, ακολουθεί μια από τις διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω:

α) Το νερό κατεισδύει μέσα από ρηγματώσεις μέχρι τον γεωθερμικό υδροφορέα. Εκεί θερμαίνεται με αγωγή. Πηγή θερμότητας είναι κάποιος μαγματικός όγκος που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος ή η γενική θερμική ροή της γης. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε γεωθερμικά συστήματα με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (μέχρι 150°C) και με υδροφορείς σχετικά μεγάλου βάθους.

β) Το νερό του υδροφορέα κατεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος μέσα από σχισμές και ρήγματα και πλησιάζει το μαγματικό όγκο, ο οποίος αποτελεί την πηγή θερμότητας. Κατά την κίνησή του αυτή το νερό θερμαίνεται και ανεβαίνει πάλι στο γεωθερμικό υδροφορέα, μέσο από άλλα ρήγματα, λόγω άνωσης. Δηλαδή στην περίπτωση αυτή η φυσική συναγωγή παίζει τον κύριο ρόλο στην θέρμανση του νερού. Όπως είναι φυσικό στα συναγωγικά υδροθερμικά συστήματα εμφανίζονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε μικρότερα βάθη σε σχέση με τα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας.

γ) Το μετεωρικό νερό κατεισδύει σε μεγάλο βάθος, θερμαίνεται συναγωγικά από κάποιο μαγματικό όγκο και βράζει. Ο υδρατμός που δημιουργείται, τροφοδοτεί τον υδροφορέα του γεωθερμικού πεδίου που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος. Οι απώλειες λόγω αγωγής από τα τοιχώματα του υδροφορέα αυτού ισοσταθμίζονται από τη συμπύκνωση μέρους του ατμού. Το συμπύκνωμα επιστρέφει στο βαθύτερο στρώμα ακολουθώντας τους μικρότερους πόρους αντίθετα με τον ατμό που κατά την άνοδό του ακολουθεί τις ευρύτερες διόδους.

Σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν, το γεωθερμικό ρευστό τείνει να κινηθεί προς την επιφάνεια του εδάφους μέσα από τις φυσικές διόδους του καλύμματος του υδροφορέα, λόγω υδραυλικού φορτίου και άνωσης. Αν φτάσει στην επιφάνεια σχηματίζει

θερμές πηγές ή ατμίδες, που αποτελούν χαρακτηριστικά καθοδηγητικά στοιχεία για τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων (Τσελεπίδου, 2008).

## **1.5. Κατηγορίες υδροθερμικών συστημάτων**

Τα υδροθερμικά συστήματα διακρίνονται σε δυο τύπους, ανάλογα με τη φάση του νερού που επικρατεί και καθορίζει την κατανομή της πίεσης στο θερμό υδροφορέα. Στον πρώτο τύπο κυριαρχεί η υγρή φάση, ενώ στον δεύτερο η αέρια.

### **1.5.1. Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η υγρή φάση**

Στον τύπο αυτό ανήκουν τα περισσότερα από τα γνωστά υδροθερμικά συστήματα. Οι γεωθερμικοί υδροφορείς των συστημάτων αυτών περιέχουν νερό σε υγρή κατάσταση. Είναι δυνατό να περιέχουν και λίγο ατμό με μορφή φυσαλίδων οι οποίες δεν καταργούν τη συνέχεια της υγρής φάσης. Οι φυσαλίδες αυτές εντοπίζονται στα αβαθέστερα τμήματα, όσο η πίεση είναι χαμηλότερη, δεδομένου ότι η κατανομή της είναι υδροστατική. Ο εξεταζόμενος τύπος υδροθερμικών συστημάτων περιλαμβάνει συστήματα χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας, στα οποία η θέρμανση του νερού ακολουθεί την διαδικασία α ή β της προηγούμενης ενότητας. Το νερό παραμένει σε υγρή κατάσταση και σε θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από 100°C, λόγω της μεγάλης πίεσης. Όταν το νερό αυτό ανεβαίνει μέσα από φυσικές διόδους ή σωλήνες γεωτρήσεων, συναντά μικρότερες πιέσεις και σε κάποιο βάθος αρχίζει να βράζει. Επομένως, το ποσοστό ατμού που παρέχουν γεωτρήσεις ή θερμές πηγές με θερμοκρασία μεγαλύτερη από 100°C, δεν είναι ενδεικτικό της κατάστασης που επικρατεί στον θερμό υδροφορέα. Από χημική άποψη, είναι χαρακτηριστική των ρευστών αυτών περιεκτικότητα τους σε χλωριούχα άλατα.

### **1.5.2. Συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση**

Στον τύπο αυτό ανήκουν τα υδροθερμικά συστήματα υψηλής ενθαλπίας τα οποία παράγουν ξηρό ατμό. Για το λόγο αυτό προσφέρονται ιδιαίτερα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στους υδροφορείς των συστημάτων αυτών εκτός από τον ατμό υπάρχει και νερό σε υγρή κατάσταση, ιδιαίτερα στους μικρούς πόρους και στις επιφάνειες των ρηγμάτων. Η παρουσία της υγρής φάσης δεν καταργεί τη συνέχεια της αέριας η οποία κυριαρχεί και καθορίζει την πίεση. Είναι χαρακτηριστικό ότι η πίεση στα συστήματα αυτά είναι πολύ μικρότερη από την υδροστατική και ομοιόμορφα κατανεμημένη. Τα υδροθερμικά συστήματα στα οποία κυριαρχεί η αέρια φάση, διακρίνονται σε δυο υποκατηγορίες που πήραν τα ονόματά τους από τα γνωστά γεωθερμικά πεδία Larderello και MonteAmiata. Τα γεωθερμικά πεδία τύπου Larderello είναι από τα πιο αποδοτικά, αλλά και από τα πιο σπάνια. Γνωστά συστήματα της ομάδας αυτής εκτός από το Larderello είναι το Matsukawa της Ιαπωνίας και τα Geysers της Καλιφόρνια. Παρέχουν ξηρό ατμό από μικρό βάθος με αρχική θερμοκρασία μεγαλύτερη από 200°C και πίεση 35 kg/cm<sup>2</sup> περίπου. Τα πεδία αυτά συνοδεύονται από επιφανειακές εκδηλώσεις όπως ατμίδες, ηφαίστεια λάσπης και όξινα εδάφη. Τα γεωθερμικά πεδία τύπου MonteAmiata περιέχουν ατμό μικρότερης

θερμοκρασίας (150°C περίπου), με μεγάλη περιεκτικότητα σε άλλα αέρια. Ο εντοπισμός τους είναι δύσκολος γιατί δεν συνοδεύονται από επιφανειακές εκδηλώσεις.



Εικόνα 3. Πεδιάδα Larderello της Ιταλίας (<http://www.consumerenergycenter.org>)

### 1.6. Γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας

Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας που παρέχεται από τα αντίστοιχα πεδία, χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση άρχισε από τα πεδία που παράγουν ξηρό ατμό. Η πρώτη μονάδα λειτουργήσε δοκιμαστικά στο Larderello το 1914 και έχει ισχύ 250 kW με κόστος συγκρίσιμο με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Σήμερα η εκμετάλλευση έχει επεκταθεί και σε πεδία τα οποία παράγουν θερμό νερό, ενώ η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς που το 1993 έφτανε τις 5.915,141 MW, σήμερα ξεπερνά τις 6.000 MW. Στην Ελλάδα υπάρχουν γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας που συνδέονται με το ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου. Πιο γνωστό παράδειγμα το νησιωτικό σύμπλεγμα Μήλου-Κίμωλου, που παρουσιάζει πρακτικό γεωθερμικό ενδιαφέρον που οφείλεται στο γεγονός πως πρόκειται για ηφαιστειακά νησιά του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου.

### 1.7. Γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας

Στις περιοχές της Γης με κανονική θερμοβαθμίδα, δηλαδή στο μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, η θερμοκρασία σε βάθος 2000m φθάνει στους 80°C. Επομένως όλοι οι υδροφορείς που υπάρχουν σε αυτό το βάθος αποτελούν γεωθερμικές πηγές χαμηλής ενθαλπίας. Για την εκμετάλλευσή τους απαιτούνται γεωτρήσεις μεγάλου βάθους. Γι' αυτό το κόστος κατασκευής και λειτουργίας είναι σχετικά μεγάλο. Πάντως σε ορισμένες χώρες γίνεται εκτεταμένη εκμετάλλευση των πηγών αυτών. Θα πρέπει να ληφθούν όμως υπόψη και οι τοπικές συνθήκες αφού η ενέργεια αυτού του είδους δεν μεταφέρεται μακριά και πρέπει η χρήση της να αναπτυχθεί επί τόπου (Stefansson, 1999). Κριτήρια αξίας μιας γεωθερμικής πηγής χαμηλής ενθαλπίας είναι το ποσό θερμίδων που παρέχει και η θερμοκρασία του παρεχόμενου νερού. Για το λόγο αυτό η ενέργεια που παράγεται από τις πηγές αυτές μετράται με βάση την ποσότητα πετρελαίου που υποκαθιστούν στη θέρμανση

κάποιου χώρου. Η μονάδα μέτρησης ονομάζεται TEP (ToneEquivalentPetrol = ισοδύναμο τόνου πετρελαίου).

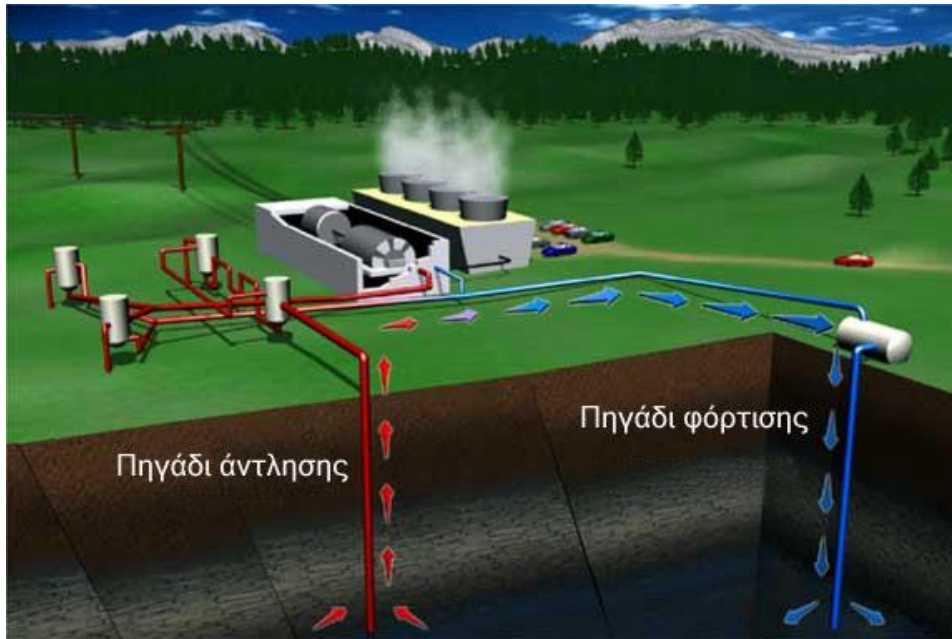
### **1.8. Συστήματα άντλησης γεωθερμικού ρευστού και διάθεσής του μετά τη χρήση**

Για την παραγωγή του γεωθερμικού νερού και την διάθεσή του μετά τη χρήση εφαρμόζονται τα παρακάτω συστήματα:

α) *Σύστημα με ένα πηγάδι άντλησης.* Μετά τη χρησιμοποίησή του το γεωθερμικό ρευστό διοχετεύεται στο επιφανειακό δίκτυο απορροής. Η λύση αυτή έχει μικρότερα αρχικό κόστος, αλλά και δημιουργεί κινδύνους:

- Εξάντλησης του υδροφορέα
- Καθιζήσεων τον εδάφους λόγω πτώσης τον υδραυλικού φορτίου
- Αλλοίωσης της θερμικής και χημικής ποιότητας των επιφανειακών νερών.

β) *Σύστημα με πηγάδια άντλησης και επαναφόρτισης (δίπολο),* όπου το νερό μετά τη χρησιμοποίησή του επαναφέρεται στον υδροφορέα με δεύτερο πηγάδι. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι κίνδυνοι που αναφέρθηκαν στο προηγούμενα σύστημα άντλησης. Επίσης γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου του εδαφικού σκελετού. Το κύριο μειονέκτημα εκτός του μεγαλύτερου αρχικού κόστους, είναι ο σχηματισμός ενός ψυχρού μετώπου γύρω από το πηγάδι φόρτισης το οποίο κινείται προς το πηγάδι άντλησης. Αν το μέτωπο αυτό διανύσει την απόσταση μεταξύ των πηγαδιών, η θερμική ισχύς πέφτει με τη θερμοκρασία τον αντλούμενου νερού. Η δυσμενής αυτή επίδραση μπορεί να περιοριστεί με κατάλληλο σχεδιασμό. Αλλωστε είναι δυνατή η αντιστροφή της ροής κατά τους θερμούς μήνες και η χρήση του συστήματος για κλιματισμό, εφόσον βέβαια οι θερμοκρασίες άντλησης και απόρριψης τον γεωθερμικού ρευστού το επιτρέπουν. Στις περισσότερες περιπτώσεις το δίπολο εφαρμόζεται και προτιμάται, παρά το γεγονός ότι απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και μεγαλύτερο αρχικό κόστος(Τσελεπίδου, 2008).



Εικόνα 4. Μοντέλο αξιοποίησης γεωθερμικού πεδίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δίπολο (Πηγή:<http://www.montaraventures.org>)

Παρόλα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης μιας εστίας γεωθερμικής ενέργειας χωρίς να προϋπάρχει κάποιο ρευστό ή ακόμα και ταμειευτήρας, έστω ξηρός που να διευκολύνει την ροή προς την επιφάνεια με τους τρόπους που περιγράφησαν παραπάνω. Αυτή είναι η περίπτωση της μεθόδου των Ενισχυμένων Γεωθερμικών Συστημάτων που μπορούν να αξιοποιήσουν την θερμότητα των Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων (ΘΞΠ).

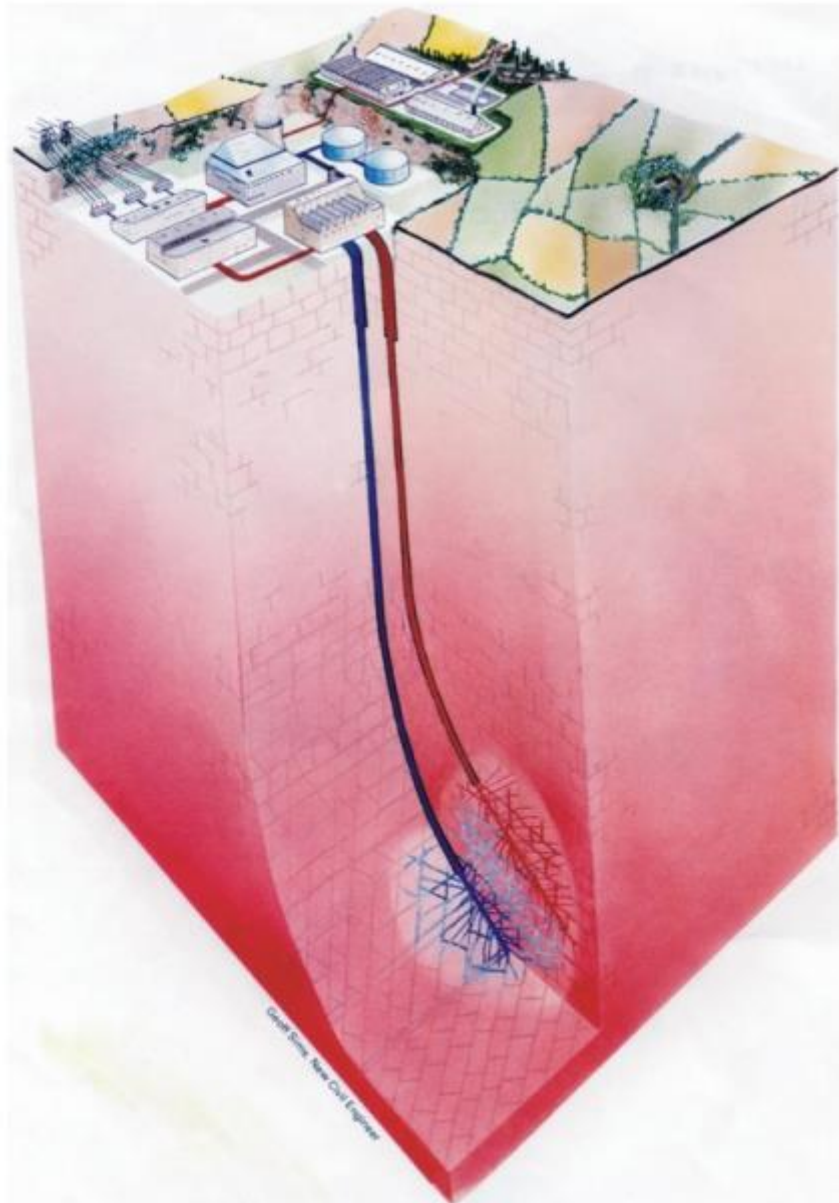
### 1.9. Ενισχυμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems) – Θερμά Ξηρά Πετρώματα (ΘΞΠ)

Σε όλες τις «φυσιολογικές» περιοχές των ηπείρων υπάρχει άφθονη γεωθερμική ενέργεια σε αρκετά μεγάλα βάθη, που είναι όμως προσπελάσιμα με την σημερινή τεχνολογία γεωτρήσεων. Επειδή στα βάθη αυτά τα φυσικά ενδιάμεσα ρευστά απουσιάζουν λόγω της πολύ μικρής διαπερατότητας των πετρωμάτων, η εξαγωγή ενέργειας (θερμότητας) από τέτοιες ΘΞΠ πηγές απαιτεί την δημιουργία τεχνητών συνθηκών κυκλοφορίας, τεχνητώς παρεχομένου ενδιάμεσου ρευστού. Γενικά εφαρμόζεται η τεχνική υδραυλικής θραύσης (hydraulic fracturing) ή διέγερσης (stimulation) των θερμών πετρωμάτων, ώστε να δημιουργούνται οι επιφάνειες ανταλλαγής θερμότητας. Κατ' αυτήν εισπίζεται στο πέτρωμα μέσω γεωτρήσεων ηλεκτρολύτης με θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του πετρώματος. Αυτός προκαλεί την δια πίεσης και συστολής θραύση των πετρωμάτων, συλλέγει την θερμότητα και ακολούθως αντλείται στην επιφάνεια από άλλες γεωτρήσεις (Τζάνης, 2010).

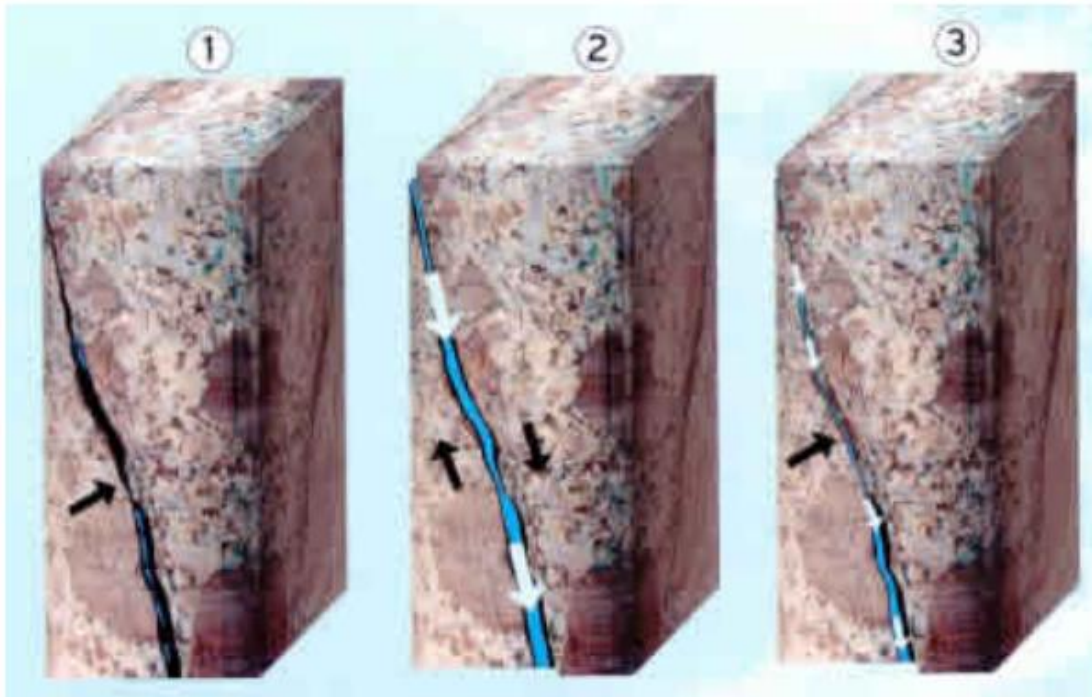
Κατά τον Rybach (1981), οι σπουδαιότερες αρχικές συνθήκες- προαπαιτούμενα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΘΞΠ είναι θερμοκρασία  $\geq 200^{\circ}\text{C}$  και πολύ μικρή υδραυλική διαπερατότητα ( $\leq 10^{-6}$  darcy). Συνεπώς, ένα ΘΞΠ χαρακτηρίζεται κυρίως από την φυσική (αρχική) του διαπερατότητα και την ενθαλπία. Ο προσδιορισμός της βαθιάς φυσικής διαπερατότητας με επιφανειακές μετρήσεις, είναι δύσκολη υπόθεση. Παρ' όλα αυτά, μία υφισταμένη δυνατότητα είναι η αντιστροφή δεδομένων σεισμικής διάθλασης (Rybach et al, 1978). Μία πρόσθετη δυνατότητα παρέχεται από τις βαθιές ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές βαθοσκοπήσεις, διότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το πορώδες και το ποσοστό (κλάσμα) ύδατος που περιέχουν. Προφανώς, η ανίχνευση ζωνών υψηλής ειδικής αντίστασης υπαγορεύει την ύπαρξη αντιστοιχών ζωνών χαμηλής υδραυλικής διαπερατότητας. Τοποθεσίες κατάλληλες για εκμετάλλευση ΘΞΠ ευρίσκονται στην περιφέρεια περιοχών προσφάτων μαγματικών διεισδύσεων (και των πιθανών συμπαρομαρτούντων υδροθερμικών συστημάτων).

Αξιόλογο δυναμικό επίσης υπάρχει σε παλαιούς μεγάλους πλουτωνίτες, καλυμμένους από παχέα στρώματα θερμομονωτικών ιζημάτων. Εάν η ραδιενεργός παραγωγή θερμότητας στους (γρανιτικούς κυρίως) πλουτωνίτες είναι της τάξης των  $4-8\mu\text{W}/\text{m}^3$ , η θερμοκρασία θα φθάσει τους  $200^{\circ}\text{C}$  σε βάθος 5-6 km, σε περιοχές κανονικής θερμικής ροής (Rybach et al, 1978). Οι γεωτρήσεις και η τοποθέτησή τους είναι ο σημαντικότερος παράγων εκμετάλλευσης των ΘΞΠ, και επειδή το κόστος τους αυξάνει σχεδόν εκθετικά με το βάθος, ιδίως σε περιοχές κρυσταλλικών πετρωμάτων, οι οικονομικές παράμετροι της εκμετάλλευσης ΘΞΠ εξαρτώνται αμέσως από την τοπική κατανομή θερμοκρασίας-βάθους.

Η χωροταξία και η διεύθυνση του εντατικού πεδίου στα βάθη ενδιαφέροντος φέρει επίσης ειδικό βάρος. Οι επιφάνειες θραύσης του πετρώματος διευθετούνται καθέτως προς την διεύθυνση του ελαχίστου κυρίου άξονος του ελλειψοειδούς τάσεων, οπότε καθίσταται προφανές ότι η γνώση του εντατικού πεδίου in situ συμβάλλει τα μέγιστα στον σχεδιασμό των γεωτρήσεων, ούτως ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία μεγάλων και αποτελεσματικών επιφανειών ανταλλαγής θερμότητας. Η επιτόπια γνώση του εντατικού πεδίου είναι επίσης απαραίτητη για την αποφυγή ανθρωπογενών σεισμών, που προκαλούνται από την έγχυση ρευστού στο πέτρωμα. Η επιπλέον πίεση είναι δυνατόν να ανεβάσει τις τάσεις αρκετά, ώστε να διευκολυνθεί η απελευθέρωση προϋπαρχουσών τεκτονικών τάσεων. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος κυκλοφορίας και ανταλλαγής θερμότητας εξαρτάται επίσης από τις επιτόπιες τάσεις. Η πίεση των εγχεομένων υγρών πρέπει να είναι τέτοια ώστε να κρατά τις τεχνητές ρωγμές ανοικτές. Από την άποψη αυτή επίσης, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην φυσική υδραυλική διαπερατότητα. Το περιβάλλον χαμηλής φυσικής διαπερατότητας είναι απαραίτητο ώστε να ελαχιστοποιείται η απώλεια των εγχυθέντων ρευστών εντός του ΘΞΠ (Τζάνης, 2010).



Εικόνα 5. Υδραυλική Θραύση. Η διαδικασία απόληψης θερμότητας από θερμά ξηρά πετρώματα για πρώτη φορά εφαρμόσθηκε πειραματικά στο Εθνικό Εργαστήριο Los Alamos, στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ το 1970. Στα συστήματα αυτού του τύπου, τόσο το ενδιάμεσο ρευστό όσο και ο γεωθερμικός ταμιευτήρας δημιουργούνται τεχνητά. Ηλεκτρολύτης εγχέεται υπό (μεγάλη) πίεση μέσω γεώτρησης εντός θερμού συμπαγούς πετρώματος, προκαλώντας την υδραυλική θραύση του. Ο ηλεκτρολύτης διαποτίζει αυτές τις τεχνητές ρωγμές, απάγοντας θερμότητα από το περιβάλλον πέτρωμα και παγιδεύεται εντός αυτού δεδομένης της χαμηλής υδραυλικής διαπερατότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το υδραυλικά θραυσμένο πέτρωμα λειτουργεί και ως φυσικός ταμιευτήρας. Μία δεύτερη γεώτρηση αργότερα διατρύπα αυτόν τον «ταμιευτήρα» και αντλεί το ρευστό από όπου εξάγεται η υπερβάλλουσα θερμότητά του. Το σύστημα λοιπόν απαρτίζεται από α) μία γεώτρηση που χρησιμοποιείται για υδραυλική θραύση, β) τον τεχνητό ταμιευτήρα, και, γ) την γεώτρηση άντλησης του θερμού ρευστού. (Πηγή: <http://www.geothermalenergy.org>)



Εικόνα 6. Η διαδικασία υδραυλικής θραύσης. Όλα τα πετρώματα έχουν φυσικές ρωγμές οι οποίες όταν δεν συντρέχουν λόγοι να κρατηθούν ανοιχτές αυτοσφραγίζονται με διάφορες διεργασίες θεραπείας (1). Η έγχυση ηλεκτρολύτη με θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερη από του πετρώματος προκαλεί διάνοιξη των ρωγμών λόγω τοπικής αύξησης της πίεσης και θερμικής συστολής και διάχυση του ρευστού μέσα στο πέτρωμα (2). Όταν παύσει η έγχυση (ανακουφισθεί η πίεση) οι ρωγμές τείνουν μεν να ανακάμψουν, αλλά τα έντονα διαταραγμένα τοιχώματά τους δεν κάνουν πλέον τέλεια επαφή και αφήνουν χώρο στο νερό να κυκλοφορήσει (3): Το πέτρωμα αποκτά επαγόμενη δευτερογενή διαπερατότητα. (Πηγή:<http://www.soultz.net/fr/>)



## **2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας**

### **2.1. Εισαγωγή**

Η γεωθερμική ενέργεια ανήκει στις φιλικότερες προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας και η αξιοποίησή της δεν επιβαρύνει όπως η καύση υδρογονανθράκων, ενώ δύναται να παρέχει ενέργεια για όσο θα τη χρειάζονται οι άνθρωποι. Αυτό βέβαια σε καμία περίπτωση δεν σημαίνει πως είναι εντελώς «αθώα» και σίγουρα μπορεί με κακούς χειρισμούς να αποτελέσει πηγή ρύπανσης και επιβάρυνσης του περιβάλλοντος.

Επίσης, ακόμα κι αν η γεωθερμική ενέργεια είναι συνολικά βιώσιμη, η εκμετάλλευσή της πρέπει ακόμα να παρακολουθείται για να αποφευχθεί η τοπική εξάντληση (Rybach, 2007). Οι τρεις αρχαιότερες τοποθεσίες αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας, στο Larderello, Wairakei, και τα Geysers έχουν βιώσει μείωση της παραγωγής λόγω της τοπικής εξάντλησης. Θερμότητα και νερό, αντλούνταν ταχύτερα από ό, τι ήταν δυνατό να αναπληρωθούν. Εάν η παραγωγή μειωνόταν και το νερό επανατροφοδοτούσε τις αποθήκες, αυτά τα πηγάδια θα μπορούσε θεωρητικά να ανακτήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους. Τέτοιες στρατηγικές μετριασμού έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή σε ορισμένες τοποθεσίες. Η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της γεωθερμικής ενέργειας έχει αποδειχθεί στο Lardarello στην Ιταλία από το 1913, στο Wairakei στη Νέα Ζηλανδία από το 1958, και στα Geysers στην Καλιφόρνια από το 1960.



Εικόνα 7. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα Geysers της Καλιφόρνια (Πηγή: Calpine Corporation)

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο για τα στάδια έρευνας, ανάπτυξης όσο και αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας και οι τρόποι για να αντιμετωπιστούν αυτές οι επιπτώσεις.

## 2.2. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας

Η επίδραση στο περιβάλλον από την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας εκτός από την ανάπτυξη του γεωθερμικού πεδίου κατά τα στάδια των γεωτρήσεων, που είναι περιορισμένη σε έκταση και χρόνο διακρίνεται σε :

- *Ατμοσφαιρική*, από την έκλυση των μη συμπυκνούμενων αερίων και των ατμών
- *Χημική*, από τα περιεχόμενα στο νερό άλατα (Εικόνα 8)
- *Θερμική*, από την απόρριψη ζεστού νερού σε επιφανειακούς αποδέκτες
- *Γεωλογική*, με την εμφάνιση εδαφικών καθιζήσεων, λόγω πτώσεως του υδραυλικού φορτίου (Πολύζου, 2007)



**Εικόνα 8. Αποθέσεις αλάτων από την επιφανειακή απορροή της θερμής πηγής στις Θέρμες Ξάνθης (Πηγή: commons.wikimedia.org).**

Από τα γεωθερμικά ρευστά απορρέουν διάφορα αέρια όπως κυρίως διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ). Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα που απελευθερώνεται από τα γεωθερμικά ρευστά περιορίζεται με την μετάπτωση των ανθρακικών σε οξυανθρακικά στο νερό των ωκεανών. Το μεθάνιο είναι ένα φυσικό προϊόν της αναερόβιας αποσύνθεσης στα τέλματα και πιθανά να προκαλεί ενόχληση ως προς την οσμή. Η αμμωνία ενώνεται τη στιγμή της συμπύκνωσης των ρευστών με το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα σχηματίζοντας το ανθρακικό αμμώνιο το οποίο συχνά παράγεται ως παραπροϊόν λιπάσματος το οποίο όμως εάν διοχετεύεται σε υδρορεύματα έχει τις ίδιες συνέπειες με την αλόγιστη χρήση λιπασμάτων. Το υδρόθειο εν μέρει οξειδώνεται σε θειικό οξύ στα γεωθερμικά απόβλητα. Μεγάλο όμως μέρος του φεύγει στην ατμόσφαιρα το οποίο οξειδώνεται και επιστρέφει στο έδαφος με τη μορφή τοξικού θειικού οξέος αποτελώντας το σημαντικότερο κίνδυνο ρύπανσης της ατμόσφαιρας από την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών.

Εκτός από τα αέρια, τα γεωθερμικά ρευστά φέρουν στο θερμό νερό ίχνη από τοξικές χημικές ουσίες όπως ο υδράργυρος, το αρσενικό, το βόριο και το αντιμόνιο τα οποία κατακρημνίζονται καθώς το νερό κρυσταλλώνει και μπορούν να προκαλέσουν περιβαλλοντική ρύπανση εάν απελευθερωθούν (Bargagli et al., 1997). Αυτός ο περιβαλλοντικός κίνδυνος έχει πλέον μειωθεί αισθητά καθώς οι σύγχρονες πρακτικές στην εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών επιβάλλουν την επανείσοδο των ψυχρών-αξιοποιημένων γεωθερμικών ρευστών στον γεωθερμικό ταμειυτήρα με σκοπό την τόνωση της παραγωγής. Στις άμεσες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται αντλίες και συμπιεστές οι οποίοι μπορεί να τροφοδοτούνται ενεργειακά με συμβατικά καύσιμα με

αποτέλεσμα η περιβαλλοντική αξία των άμεσων εφαρμογών της γεωθερμικής ενέργειας να εξαρτάται άμεσα από την ένταση των εκπομπών του συνεργαζόμενου ηλεκτρικού δικτύου. Η λειτουργία εργοστασίων εκμετάλλευσης γεωθερμικής ενέργειας μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις όπως στην περίπτωση του γεωθερμικού τομέα στο Wairakei στη Νέα Ζηλανδία (Lund, 2007) και στη Γερμανία (Waffel, 2008). Επίσης, ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα είναι ικανά να προκαλέσουν κατά την επανείσοδο νερού στο γεωθερμικό σύστημα σεισμούς της τάξεως των 3 –3.5 Richter λόγω υδραυλικής θραύσης (Deichmann et al., 2007). Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις αυτές είναι αντιμετωπίσιμες.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει ελάχιστες απαιτήσεις σε γλυκό νερό και έκταση γης. Οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν περίπου 3,5 τετραγωνικά χιλιόμετρα σε έκταση γης ανά 1GW παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις των αιολικών πάρκων που απαιτούν περίπου 12 τετραγωνικά χιλιόμετρα για την αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας, ενώ χρησιμοποιούν μόνο 20 λίτρα γλυκού νερού ανά MW/h σε σχέση με άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνική, άνθρακα, πετρέλαιο κ.α.)(Lund, 2007).

### **2.3. Τρόποι έρευνας γεωθερμικών πεδίων και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις**

Για την αναζήτηση και τον εντοπισμό γεωθερμικών πεδίων θα πρέπει να υπάρχουν θετικές ενδείξεις για την ύπαρξη ηφαιστειακών και πλουτώνιων πετρωμάτων. Τέτοιες ενδείξεις συναντώνται σε ηφαιστειογενείς περιοχές ή σε περιοχές που γειτνιάζουν με μαγματικές εστίες σε μικρό σχετικά βάθος από την επιφάνεια. Επιφανειακές εκδηλώσεις που πιστοποιούν την ύπαρξη θερμών πετρωμάτων σε μικρό σχετικά βάθος από την επιφάνεια είναι οι θερμομεταλλικές πηγές, οι οποίες είναι καθοδηγητικές για την αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων.

Τα στάδια έρευνας για την αναζήτηση ενός γεωθερμικού πεδίου περιλαμβάνουν τις εξής εργασίες:

1. Γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες.
2. Γεωχημικές έρευνες.
3. Γεωφυσικές έρευνες. Οι παράμετροι ενδιαφέροντος των σχηματισμών και οι μέθοδοι προσδιορισμού είναι:
  - Θερμοκρασία (θερμική έρευνα)
  - Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος)
  - Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος)
  - Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος)
  - Μαγνητική επιδεκτικότητα (μαγνητική μέθοδος)
4. Όρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων (Πολύζου, 2007)

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τα στάδια έρευνας των γεωθερμικών πεδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σύμφωνα με αυτόν, περιβαλλοντικές επιπτώσεις γίνονται αντιληπτές κατά το στάδιο των εργασιών που συνδέονται με τις γεωτρήσεις έρευνας (Y. Noorollahi and H. Yousefi 2003, Mary H. Dickson and Mario Fanelli 2004).

Πίνακας 1: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τα στάδια έρευνας των γεωθερμικών πεδίων

Στάδια έρευνας	Πιθανή Ενόγληση			Βαθμός επίδρασης				
	Έδαφος	Χλωρίδα	Πανίδα	Έδαφος	Νερό	Αέρας	Θόρυβος	Οπτική
Γεωλογικές & Υδρογεωλογικές Μελέτες	A	A	A	A	A	A	A	A
Γεωχημικές	A	A	A	A	A	A	A	A
Γεωφυσικές διασκοπήσεις								
Θερμική έρευνα	A	A	A	A	A	A	A	A
Γεωηλεκτρική & Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος	A	A	A	A	A	A	A	A
Σεισμική μέθοδος	A	A	X	A	A	A	X	A
Βαρυτομετρική μέθοδος	A	A	A	A	A	A	A	A
Μαγνητική μέθοδος	A	A	A	A	A	A	A	A
Ερευνητικές γεωτρήσεις								
Διάνοιξη ή επισκευή δρόμων	A-X	A-X	A-X	X	A	X	M	M
Κατασκευή γεωτρητικής εξέδρας & πλατείας	X	X	X	X	A	X	M	M
Όρυξη γεωτρήσεων								
Διάτρηση	M	X	X	M	X	M	Y	Y
Λάσπη διάτρησης	M	M	M	M	M	A	A	M
Εκρήξεις γεωτρήσεων (Εκπομπές Αερίων, εκτόξευση ρευστών)	M	M	M	M	M	M	Y	M
Χρήσεις γης	X	X	X	X	A	A	A	X

Σημείωση: A=Ανόπακτη, X=Χαμηλή, M=Μέτρια, Y=Υψηλή

#### 2.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά το στάδιο ανάπτυξης των γεωθερμικών πεδίων

Εφόσον τα αποτελέσματα της γεωθερμικής έρευνας είναι επαρκή και η μελέτη σκοπιμότητας έχει θετικά αποτελέσματα, ακολουθεί η ανάπτυξη της υποδομής που απαιτείται για την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών. Στο στάδιο αυτό εκτελούνται οι ακόλουθες εργασίες:

1. Όρυξη των γεωτρήσεων παραγωγής – και των γεωτρήσεων επανεισαγωγής (εάν αυτό έχει κριθεί απαραίτητο για τη διάθεση των γεωθερμικών ρευστών μετά την εκμετάλλευσή τους).
2. Κατασκευή του δικτύου άντλησης, μεταφοράς και τελικής διάθεσης (απόρριψης) των γεωθερμικών ρευστών.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τα στάδια ανάπτυξης των γεωθερμικών πεδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά το στάδιο ανάπτυξης των γεωθερμικών πεδίων**

Στάδια ανάπτυξης	Πιθανή Ενόχληση			Βαθμός επίδρασης				
	Εδαφος	Χλωρίδα	Πανίδα	Εδαφος	Νερό	Αέρας	Θόρυβος	Οπτική
<b>Γεωτρήσεις Παραγωγής και Επανεισαγωγής</b>								
Διάνοιξη ή επισκευή δρόμων	A-X	A-X	A-X	X	A	X	M	M
Διαμόρφωση γεωτρητικού εξοπλισμού	X	X	X	X	A	X	M	M
<b>Ορυξη γεωτρήσεων</b>								
Διάτρηση	M	X	X	M	X	M	Y	Y
Λάσπη διάτρησης	M	M	M	M	M	A	A	M
Εκρήξεις γεωτρήσεων (Εκπομπές Αερίων, εκτόξευση ρευστών)	M	M	M	M	M	M	Y	M
Δοκιμές Παραγωγής	X	X	X	M	M	M	A	A
<b>Αντλία ρευστών</b>								
Καθιζήσεις	M	A	A	M	A	A	A	A
Σεισμικότητα	X	A	A	X	A	A	A	A
Υδροθερμικές εκρήξεις	X	A	X	X	A	A	A	A
Κατασκευή δικτύου μεταφοράς	X-M	X-M	X-M	M	A	A	A	Y
Χρήσεις γης	X	X	X	X	A	A	A	X

Σημείωση: A=Ανόπακτη, X=Χαμηλή, M=Μέτρια, Y=Υψηλή

#### 2.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας

Ο πλέον συνήθης τρόπος αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας είναι η χρήση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τρεις βασικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής είναι: α) ξηρού ατμού (θερμοκρ. >180°C) β) στρόβιλοι υγρού ατμού (θερμοκρ. >150 °C) και γ) δυαδικού κύκλου με πτητικό ρευστό ή κύκλος Rankine με οργανικό ρευστό (θερμοκρ. >90 °C).

Από τους δύο πρώτους τύπους εγκαταστάσεων εκπέμπεται μόνο ατμός και μικρές ποσότητες αερίων. Ενώ στις εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου με πτητικό ρευστό δεν υπάρχουν εκπομπές αερίων προς την ατμόσφαιρα, δεδομένου ότι αποτελούν ένα κλειστό κύκλωμα.

Παρά το γεγονός ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη γεωθερμία έχει τις λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με άλλες μεθόδους, το γεγονός αυτό δεν την καθιστά εντελώς «αθώα». Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

	Πιθανή Ενόχληση			Βαθμός επίδρασης				
	Έδαφος	Χλωρίδα	Πανίδα	Έδαφος	Νερό	Αέρας	Θόρυβος	Οπτική
<b>Εργοστάσιο Ηλεκτροπαραγωγής</b>	M	M	M	M	A	M	Y	Y
<b>Εκπομπές Αερίων</b>								
Υδρόθειο (H <sub>2</sub> S)	M	M	M	X	M	M-Y	A	A
Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> )	M	A	M	X	M	M-Y	A	A
Αμμωνία (NH <sub>3</sub> )	X	X	X	X	X	X	A	A
Ραδόνιο (Rn)	X	X	X	X	X	X	A	A
Μεθάνιο (CH <sub>4</sub> )	X	X	X	X	X	X	A	A
Αρσενικό (As)	X	X	X	X	X	X	A	A
Υδράργυρος (Hg)	X	X	X	X	X	X	A	A
Βόριο (B)	M	M	M	X	X	X	A	A
<b>Υγρά απόβλητα</b>								
Τοξικά στοιχεία (B, Li, As, H <sub>2</sub> S, Hg, Rb, NH <sub>3</sub> )	M	M	M	Y	Y	A	A	M-Y
Θερμοκρασία	A	M	M	A	Y	A	A	A
<b>Στερεά Απόβλητα</b>	M	M	M	M	Y	A	A	M-Y
<b>Χρήσεις γης</b>	Y	M	M	Y	A	A	A	A

Σημείωση: A=Ανύπαρκτη, X=Χαμηλή, M=Μέτρια, Y=Υψηλή

## 2.5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας είναι ηπιότερη σε σχέση με την επιβάρυνση από τα ρευστά υψηλής ενθαλπίας.

Η περιεκτικότητα των ρευστών σε μη συμπυκνώσιμα αέρια είναι γενικά περιορισμένη, εκτός από μερικές περιπτώσεις όπου υπάρχουν ορισμένες ποσότητες CO<sub>2</sub>, όπως θα αναδειχθεί ακολούθως μέσω της ανάλυσης των επιπτώσεων ανά χρήση.

Προβλήματα καθιζήσεων ή δημιουργίας μικροσεισμικότητας δεν έχουν ποτέ καταγραφεί σε πεδία χαμηλής θερμοκρασίας.

Η θερμική επιβάρυνση είναι σαφώς μικρότερη, με την προϋπόθεση ότι τα νερά μετά τη χρήση τους έχουν θερμοκρασία μικρότερη από 30-35°C. Το κύριο περιβαλλοντικό πρόβλημα από τα ρευστά χαμηλής θερμοκρασίας εντοπίζεται στη διάθεση των νερών μετά την απόληψη του θερμικού φορτίου τους. Η επιφανειακή διάθεση (τεχνητές ή φυσικές λίμνες, χείμαρροι, ποταμοί, θάλασσα) αποτελεί τη φθηνότερη λύση και τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε από τις αρχές της αξιοποίησης της γεωθερμίας. Τρία προβλήματα σχετίζονται με τη λύση αυτή: α) η αυξημένη θερμοκρασία των νερών (θερμική ρύπανση), β) η σχετικά υψηλή περιεκτικότητα των νερών σε διάφορα συστατικά (As, H<sub>2</sub>S, B, βαρέα μέταλλα κτλ.) και γ) η θερμική εξάντληση του πεδίου με την πάροδο του χρόνου. Η διάθεση σε λίμνες, ποτάμια και χείμαρρους, λόγω της ευαισθησίας αυτών των οικοσυστημάτων, θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και ύστερα από εμπειριστατωμένη μελέτη, και με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι όροι διάθεσης των νερών στους συγκεκριμένους φυσικούς αποδέκτες (U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy 2004).

## **2.6. Ανθρωπογενής σεισμικότητα κατά την εκτέλεση υδραυλικής θραύσης – Η περίπτωση της Βασιλείας Ελβετίας**

Μια σημαντική και ιδιαίτερης όχλησης περιβαλλοντική επίπτωση είναι η ανθρωπογενής σεισμικότητα που συνδέεται συγκεκριμένα με τη διαδικασία της υδραυλικής θραύσης στην περίπτωση των Θερμών Ξηρών Πετρωμάτων.

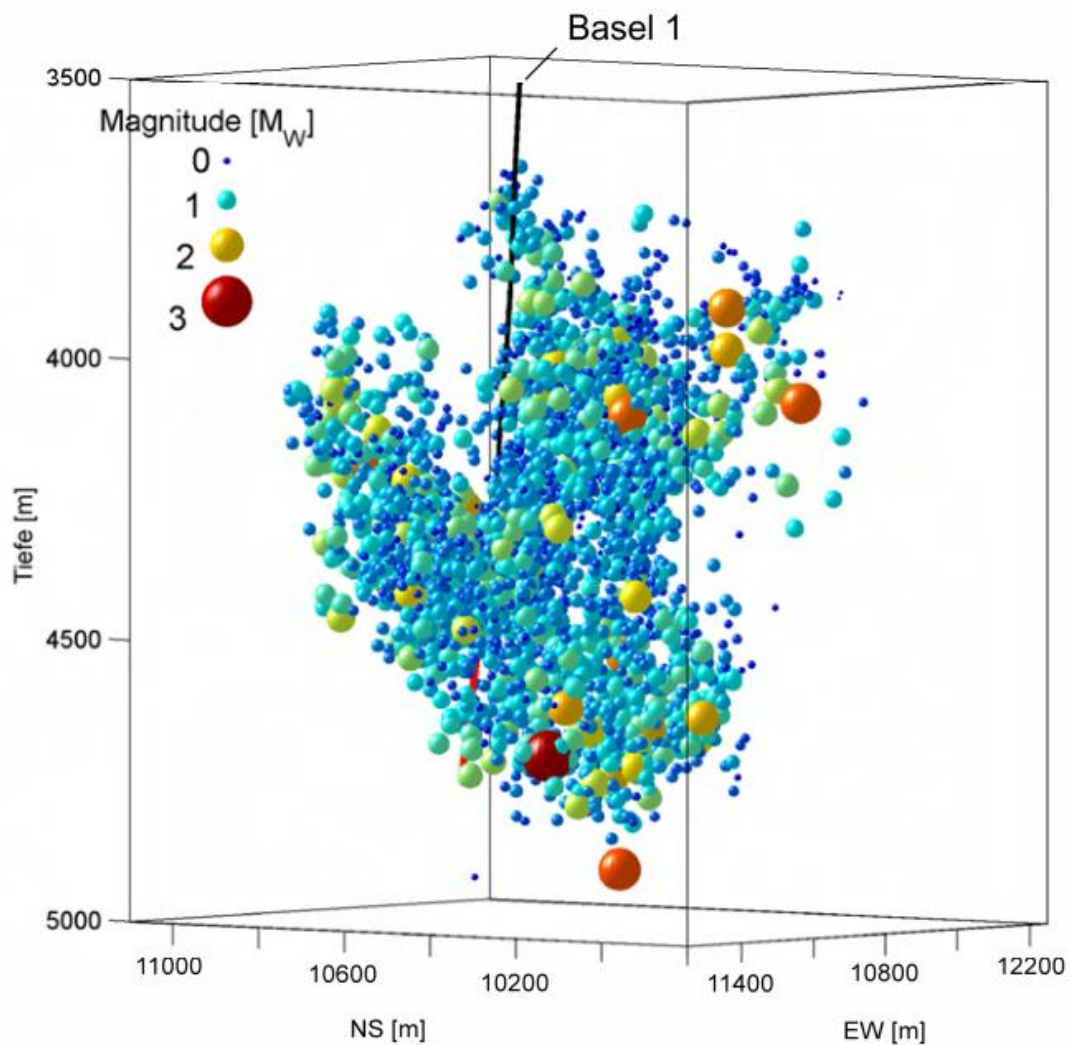
Η σεισμικότητα που προκλήθηκε από υδραυλική θραύση πετρώματος στη Βασιλεία της Ελβετίας οδήγησε στην αναστολή του προγράμματος Ενισχυμένων Γεωθερμικών Συστημάτων στα ΘΞΠ της περιοχής. Μελέτη κινδύνου λόγω σεισμών που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια είχε σαν αποτέλεσμα να εγκαταληφθεί το έργο το Δεκέμβριο του 2009.

Η πόλη της Βασιλείας στην Ελβετία βρίσκεται πάνω από ένα ιστορικά ενεργό ρήγμα και το μεγαλύτερο μέρος της πόλης είχε καταστραφεί σε σεισμό μεγέθους 6,5 Ρίχτερ το 1356. Το γεωθερμικό πρόγραμμα της Βασιλείας, παρόλο που είχε προβλέψει προσαρμογές στη λειτουργία του για την αντιμετώπιση του ενδεχομένου της ανθρωπογενούς σεισμικότητας, δεν είχε πραγματοποιήσει πλήρη έλεγχο αξιολόγησης του κινδύνου πριν την έναρξη της λειτουργίας του (Bromley, 2007).

Τα σεισμικά γεγονότα στην πόλη της Βασιλείας έφτασαν το οριακό σημείο των 2,9 Ρίχτερ, έξι μέρες μετά την έναρξη της κύριας δοκιμής παρά την προληπτική μείωση του ρυθμού έγχυσης νωρίτερα την ίδια μέρα (Dyer, 2008). Μέσα στον επόμενο μήνα καταγράφηκαν σεισμικά επεισόδια που ξεπερνούσαν τα 3 Ρίχτερ.

Συνολικά, ανάμεσα στο Δεκέμβριο του 2006 και τον Μάρτιο του 2007, τα έξι σεισμόμετρα που είχαν τοποθετηθεί σε γεωτρήσεις παρατήρησης κοντά στη γεώτρηση έγχυσης κατέγραψαν πάνω από 13500 επεισόδια που πιθανώς σχετίζονταν με το γεωθερμικό πρόγραμμα. Τα 200 μεγαλύτερα από αυτά είχαν ένταση που κυμαίνονταν από 0,7 – 3,4 Ρίχτερ. Από τα μεγαλύτερα σεισμικά επεισόδια προέκυψαν γύρω στις 2700 διεκδικήσεις αποζημιώσεων το ύψος των οποίων υπολογίζεται στα περίπου 7 εκ. δολάρια (GeoPowerBasel, 2009).





Εικόνα 9. Σύστημα σεισμικών επεισοδίων που προκλήθηκαν από τις αρχικές διαδικασίες έγχυσης της υδραυλικής θράυσης, Πηγή: Geothermal Explorers Ltd

Μετά από έρευνα που κράτησε τρία χρόνια, το πρόγραμμα Ενισχυμένης Γεωθερμιάς με ΘΞΠ της Βασιλείας εγκαταλήφθηκε το Δεκέμβριο του 2009. Η μελέτη που προέκυψε προέβλεπε πως η πόλη θα συνέχιζε να ταλαιπωρείται από μικρά σεισμικά επεισόδια αρκετές φορές το χρόνο για τα επόμενα 30 χρόνια που ήταν η διάρκεια ζωής του έργου.

## **2.7. Αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας**

Αν και η γεωθερμία θεωρείται μία ήπια μορφή ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές, η ιδιόζουσα φύση των γεωθερμικών ρευστών μπορεί να προκαλέσει επιδράσεις στο περιβάλλον όπως αναλυτικά έχει αναφερθεί.

Η τεχνολογία που είναι διαθέσιμη διεθνώς, μπορεί να συμβάλλει στην αντιμετώπιση των εκπομπών υδρόθειου, της απόρριψης αλμολοίπων, κλπ. Ταυτόχρονα έχουν θεσπιστεί παγκοσμίως κατάλληλοι περιβαλλοντικοί κανονισμοί που στηρίζουν την ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας. Θετικό είναι το γεγονός ότι οι περισσότερες από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να ελεγχθούν ή να περιοριστούν σε μεγάλο βαθμό (Πολύζου,2007).

## **2.8. Ελληνική Πολιτεία και γεωθερμικές εργασίες**

Πέρα από τη διαθέσιμη τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί διεθνώς για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη γεωθερμική ενέργεια, η Ελληνική Πολιτεία, στα τέλη του 2005, θέσπισε τον Κανονισμό Γεωθερμικών Εργασιών [Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Φ166/οικ20076/ΓΔΦΠ5258/329 (ΦΕΚ Β' 1530/7-11-2005)], μέσω του οποίου δίνονται σαφείς οδηγίες για τον τρόπο που πρέπει να διενεργούνται οι γεωθερμικές εργασίες, αλλά και όλα τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται, ώστε να αποφεύγονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο ως προς το φυσικό περιβάλλον όσο και ως προς την υγεία των πολιτών. Έχει θεσπίσει αυστηρούς κανόνες σε σχέση με τα περιβαλλοντικά όρια για την εκπομπή αερίων στην ατμόσφαιρα και τη διάθεση των αλμολοίπων στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, τα οποία έχουν προκύψει από σειρά κατευθυντήριων οδηγιών που έχει εκδώσει το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και έχουν κυρωθεί με νόμους και από το Ελληνικό Κράτος.

Για τον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> εφαρμόζεται η υγρή επανεισαγωγή των αερίων στον ταμειυτήρα. Οι εκπομπές H<sub>2</sub>S μπορούν να ελεγχθούν σχετικά εύκολα και να μειωθούν με πολλές μεθόδους, όπως με τη διεργασία Sretford, με δευτερογενή καθαρισμό και με τη διεργασία της καύσης και της έκπλυσης του παραγόμενου SO<sub>2</sub>. Σε ότι αφορά τα υπόλοιπα αέρια, επειδή εμφανίζονται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, συνήθως δεν δημιουργούν προβλήματα.

Μεγάλη ανησυχία από τη χρησιμοποίηση των ρευστών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, προέρχεται από τη διάθεση των νερών στους υδάτινους αποδέκτες, εξαιτίας των συστατικών όπως αρσενικό, βόριο, φθόριο. Επίσης, η απόρριψη ενός αλμολοίπου δημιουργεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, υδάτινη και θερμική ρύπανση. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται κυρίως με τη μέθοδο επανεισαγωγής των ρευστών στον ταμειυτήρα ή με φυσικοχημική επεξεργασία του αλμολοίπου πριν τη διάθεση του στον υδάτινο αποδέκτη.

Από την απόθεση των στερεών αποβλήτων, μπορεί να υπάρξουν επιπτώσεις στο έδαφος ή στο υπέδαφος, προερχόμενες από την τεχνολογία δέσμευσης του υδρόθειου και την απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων στο γεωθερμικό νερό ή από τον καθαρισμό των

σωληνώσεων από τις επικαθίσεις. Τα άλατα που περιέχονται στα γεωθερμικά ρευστά κρυσταλλώνονται, απομακρύνονται και ανακυκλώνονται.

Η έκταση που απαιτείται για την αξιοποίηση της γεωθερμίας είναι γενικά μικρότερη από την έκταση της γης που απαιτούν άλλες μορφές ενέργειας. Η χρήση γης για την ανάπτυξη της γεωθερμίας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τον περιορισμό της περιοχής των γεωτρήσεων (χρήση κατευθυνόμενων τεχνικών διάτρησης) και με την αύξηση της δυναμικότητας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας είναι ηπιότερη σε σχέση με την επιβάρυνση από τα ρευστά υψηλής ενθαλπίας. Το κύριο περιβαλλοντικό πρόβλημα από τα ρευστά χαμηλής ενθαλπίας εντοπίζεται στη διάθεση των νερών μετά την απόληψη της θερμότητάς τους. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται είτε με επανεισαγωγή των χρησιμοποιημένων ρευστών στον ταμιευτήρα ή με φυσικο-χημική διεργασία των αλμολοίπων από τα τοξικά συστατικά και απόθεσή τους σε επιφανειακούς αποδέκτες. Δηλαδή, οι ίδιες μέθοδοι που εφαρμόζονται μετά τη χρησιμοποίηση των γεωθερμικών ρευστών και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν προκύπτει ότι οι ενδεχόμενοι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την έρευνα, την ανάπτυξη και τη χρήση των γεωθερμικών ρευστών, μπορούν να αντιμετωπιστούν αξιοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει σήμερα η τεχνολογία. Επομένως, ο παράγοντας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων δεν θα πρέπει να δρα ανασταλτικά στην ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας. Όμως, απαιτείται κάθε φορά προσεκτική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου κατεργασίας και διάθεσης, ανάλογα με τη σύσταση του γεωθερμικού ρευστού και τις ιδιαιτερότητες των τοπικών συνθηκών (Πολύζου, 2007).

### 3. Η Γεωθερμία στην Ελλάδα

#### 3.1. Εισαγωγή

Η Ελλάδα, η Ιταλία και η Ισλανδία είναι τα μόνα ευρωπαϊκά κράτη με γεωθερμικά πεδία υψηλών θερμοκρασιών, κατάλληλα να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Το ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου, (Σουσάκι, Αίγινα, Μέθανα, Μήλος, Σαντορίνη, Κως, Νίσυρος) είναι μία μεγάλη θερμικά ανώμαλη περιοχή που δημιουργεί ιδανικές συνθήκες για πεδία υψηλών θερμοκρασιών. Στα γεωθερμικά πεδία της Μήλου και Νισύρου εκτιμάται δυναμικό 200 και 50 MWe αντίστοιχα.

Η Ελλάδα θεωρείται προνομιούχος χώρα όσον αφορά στην γεωθερμική ενέργεια. Υπάρχουν δύο πεδία υψηλής ενθαλπίας (Μήλος και Νίσυρος) και πολλά πεδία μέσης και χαμηλής ενθαλπίας: Μέθανα, Σουσάκι, Θερμοπύλες, Καμένα Βούρλα, Αιδηψός, Λέσβος, Δομοκός, περιοχή βυθίσματος Ανθεμούντος (Νότια της Θεσσαλονίκης) περιοχή Αλμωπίας και Μυγδονίας (Λαγκαδάς), περιοχή βυθίσματος Στρυμόνα, Νέα Κεσσάνη Ξάνθης, Σαμοθράκη, περιοχή Έβρου κ.α. Παρουσιάζονται λοιπόν για την Ελλάδα πολύ μεγάλες δυνατότητες για την αξιοποίηση της ήπιας αυτής μορφής ενέργειας με οικονομικά συμφέροντες όρους.

Στην Ελλάδα η αυξημένη ροή θερμότητας, λόγω της έντονης τεκτονικής και μαγματικής δραστηριότητας, δημιούργησε εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που πολλές φορές ξεπερνούν του 100°C/km. Σε κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες, η ενέργεια αυτή θερμαίνει σχετικά ρηχούς υπόγειους ταμειυτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100 °C.

#### 3.2. Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας

Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι διάσπαρτα στη νησιωτική και ηπειρωτική Ελλάδα. Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική, καθόσον αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό στο περιβάλλον, κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Στην Μήλο και Νίσυρο έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής (5 και 2 αντίστοιχα). Στην Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325 °C σε βάθος 1000 m και στην Νίσυρο 350° C σε βάθος 1500 m. Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MW, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται να είναι την τάξης των 200 και 50 MW αντίστοιχα. Για τις δύο αυτές περιπτώσεις γεωθερμίας στον ελληνικό χώρο θα γίνει εκτενής παρουσίαση σε επόμενο κεφάλαιο.

Στην Βόρεια Ελλάδα η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λπ. Στην λεκάνη του Στρυμόνα έχουν εντοπισθεί τα πολύ σημαντικά πεδία Θερμών-Νιγρίτας, Λιθότροπου-Ηράκλειας, Θερμοπηγής-Σιδηρόκαστρου και Αγγίστρου. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C, συνήθως αρτεσιανά και πολύ

καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στην Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο.

Στην πεδινή περιοχή του Δέλτα Νέστου έχουν εντοπισθεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία, στο Ερατεινό Χρυσούπολης και στο Ν. Εράσμιο Μαγγάνων Ξάνθης. Νερά άριστης ποιότητας μέχρι 70°C και σε πολύ οικονομικά βάθη παράγονται από γεωτρήσεις στις εύφορες αυτές πεδινές περιοχές. Στην Ν. Κεσσάνη και στο Πόρτο Λάγος Ξάνθης, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία, παράγονται νερά θερμοκρασίας μέχρι 82°C.

Στην λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά έχουν εντοπισθεί τρία πολύ ρηχά πεδία με θερμοκρασίες μέχρι 56°C. Στην Σαμοθράκη υπάρχουν ενθαρρυντικά στοιχεία καθώς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 100m συνάντησαν νερά της τάξης των 100°C.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500 m). Εντούτοις, αν εξετάσει κανείς την συνολική εγκατεστημένη ισχύ (σε MWt) των γεωθερμικών εφαρμογών στην Ελλάδα την δεκαετία 2002-2012 συμπεραίνει ότι ο μόνος τομέας που βελτιώθηκε σημαντικά είναι εκείνος των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

Οι δυνατότητες ενεργειακής αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών δεν είναι γνωστές στους κατοίκους πολλών περιοχών της Ελλάδας, εκτός από τη θέρμανση θερμοκηπίων που η εφαρμογή της είναι διαδεδομένη και στη χώρα μας. Σε διάφορες περιοχές της βόρειας Ελλάδας και στα νησιά του βορείου Αιγαίου έχουν εγκατασταθεί πάνω από 150 στρέμματα γεωθερμικών θερμοκηπίων, μέσω χρηματοδότησης από ευρωπαϊκά προγράμματα με ισχύ πλέον των 40 MWth. Πέραν των θερμοκηπίων γεωθερμική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί και για τηλεθέρμανση, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λ.π. Η γεωθερμική ενέργεια όμως έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια. Κάπως αργοπορημένα, το 1972, άρχισε η έρευνα των γεωθερμικών πηγών στην Ελλάδα.

Το 1976 - 1977 υπογράφηκε συμφωνία μεταξύ ΔΕΗ-ENEL για τεχνική και επιστημονική συνεργασία με στόχο την κατάρτιση αναπτυξιακών γεωθερμικών προγραμμάτων και λεπτομερών ερευνών και μελετών. Παράλληλα το Ι.Γ.Μ.Ε. με τη συμμετοχή (περιστασιακά) ξένων φορέων διεξήγαγε συστηματικές έρευνες σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος.

Κατά το 1980 - 1982 έγιναν από το Ι.Γ.Μ.Ε. για λογαριασμό της ΔΕΗ λεπτομερείς μελέτες σε 8 γεωθερμικές περιοχές. Την ίδια περίοδο γεωμετρήθηκαν 3 καινούργια πηγάδια (γεωτρήσεις) και ολοκληρώθηκαν οι εργασίες σε άλλα 2 παλιότερα στη Μήλο με πολύ επιτυχή και ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Στη Νίσυρο διανοίχτηκε γεώτρηση βάθους 1800m, οι δοκιμές παραγωγής έδειξαν την ύπαρξη ικανοποιητικού γεωθερμικού ταμειυτήρα πολύ υψηλής θερμοκρασίας (400°C). Έγιναν διανοίξεις γεωτρήσεων μικρού βάθους στην Νιγρίτα και σε περιοχή της Ξάνθης, τα δε παραγόμενα ρευστά θεωρήθηκαν κατάλληλα για θερμοκήπια. Την ίδια περίοδο εκπονήθηκε μελέτη για την θέρμανση των Σερρών με γεωθερμικά ρευστά (Κίτσιος, 2009).

Χάρη σε λαθεμένες στρατηγικές και άστοχες ενέργειες του παρελθόντος, δεν γίνεται εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων όπως της Μήλου, για περιβαλλοντικούς λόγους, τη

στιγμή που η σημερινή τεχνολογία και τεχνογνωσία μπορεί να επιλύσει προβλήματα εκμετάλλευσης του γεωθερμικού ρευστού, με ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον, σίγουρα λιγότερες από τις επιπτώσεις της καύσης πετρελαίου των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν στους ίδιους χώρους. Για το λόγο αυτό παραμένουν ανεκμετάλλευτα τα πεδία στη Μήλο και τη Νίσυρο, ενώ δεν έχουν ερευνηθεί μία σειρά άλλες ελπιδοφόρες περιοχές (Κίμωλος, Πολύαιγος, Κως, Γυαλί κ.α.).

Σε ό,τι αφορά στη γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας, σε προχωρημένο στάδιο έρευνας βρίσκονται η περιοχή Κεντρικής-Ανατολικής Μακεδονίας και εν μέρει η Θράκη. Ήδη σε ορισμένα από τα βεβαιωμένα πεδία (Νιγρίτα, Λαγκαδάς, Νέα Απολλωνία, Σιδηρόκαστρο, Νέα Κεσσάνη) έχει αρχίσει η εκμετάλλευση, κυρίως για θέρμανση θερμοκηπίων. Στις παραπάνω περιοχές εκτιμάται ότι υπάρχουν ακόμη μεγάλα περιθώρια έρευνας και πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες αξιοποίησης, ειδικότερα δε στην περιοχή της Θράκης, με πολύ ελπιδοφόρα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Από τους κρατικούς φορείς ΔΕΗ και Ι.Γ.Μ.Ε. για το 1983 υπήρχε σε γενικές γραμμές το εξής πρόγραμμα:

- Ολοκλήρωση των διαδικασιών για τη μελέτη, προμήθεια και εγκατάσταση πειραματικής γεωθερμοηλεκτρικής μονάδας ισχύος 2MW στη Μήλο. Εκτέλεση 2ης βαθιάς γεώτρησης στη Νίσυρο.
- Δοκιμές παραγωγής στη Μήλο και Νίσυρο. Έρευνα στο τεκτονικό βύθισμα Στρυμόνα και στη Λέσβο. Συμπλήρωση των εργασιών στη Ν. Κεσσάνη Ξάνθης.

Στα μελλοντικά σχέδια ήταν η εγκατάσταση ηλεκτρικής ισχύος 200 MW μέχρι το 2000. Προβλέφθηκε επίσης η ηλεκτροδότηση νησιών των Κυκλάδων με ηλεκτρικό ρεύμα από το σταθμό της Μήλου μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων, καθώς και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τη Μήλο προς την Στερεά Ελλάδα μέσω Καρύστου. Δυστυχώς όμως το πρόγραμμα αυτό εξ' αιτίας κακών χειρισμών έχει εγκαταλειφθεί.

Από τα προηγούμενα, καθώς και τα σχετικά αποτελέσματα υδρογεωλογικής και γεωθερμικής έρευνας που έχει αναπτυχθεί από το ΙΓΜΕ και ΚΑΠΕ καλύπτοντας όλη τη χώρα, εξάγεται το συμπέρασμα πως το διαθέσιμο γεωθερμικό δυναμικό είναι διάσπαρτο και ιδιαίτερα αξιόλογο.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται οι κυριότερες από τις 100 (περίπου) σημαντικές θερμές πηγές της χώρας με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες ρευστού και παροχές τους.

**Πίνακας 5. Ορισμένες θερμές πηγές της Ελλάδας και οι χαρακτηριστικές τιμές τους (Πηγή: [www.igme.gr](http://www.igme.gr)).**

*Χαρακτηριστικά γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασία ρευστών μεγαλύτερη από 40°C*

Περιοχή	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	Βεβαιωμένο δυναμικό (m <sup>3</sup> /h)	Πιθανό δυναμικό (m <sup>3</sup> /h)	TDS (g/L)	Κύρια συστατικά νερών
<b>ΘΡΑΚΗ</b>						
Αρίστηνο Έβρου	30	80-92	400	1000	12	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub>
Θερμά Σαμοθράκης	1	80-100	100	400	28,5	Cl, Na, HCO <sub>3</sub> , Ca
N. Εράσμιο-Μάγγανα	15	56-65	400	1000	1	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub>
N. Κεσσάνη Ξάνθης	15	45-81	250-400	1000	4,5	Cl, Na, HCO <sub>3</sub> , Ca
Νότια Κομοτηνής	30	40	450	1000	12	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub>
Τραϊανούπολη Έβρου	>2	42-52	150	500	8,6	Cl, Na, Ca, SO <sub>4</sub>
<b>ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ</b>						
Αγγιστρο Σερρών	5	48	300	1000	0,26	HCO <sub>3</sub> , Na, Ca
Ελαιοχώρια Χαλκ.	30	33-42	1000	2000	1,5	
Ηράκλεια Σερρών	16	40-60	400	1000	3,5	HCO <sub>3</sub> , Na, Ca,
Λαγκαδάς Θεσ.	6	33-40	300	1000	1,1	Na, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub>
N. Απολλωνία Θεσ.	4	40-56	400	600	1,0	Na, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub>
Νιγρίτα Σερρών	10	40-63	400	1000	1,0-2,4	HCO <sub>3</sub> , Na, Ca, Mg
Νυμφόπετρα Θεσ.	2	39-46	200	500	1,2	Na, SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub>
Σιδηρόκαστρο Σερρών	10	35-75	200	1000	1,0-1,2	HCO <sub>3</sub> , Na, Ca, SO <sub>4</sub>
Τράγιλος Σερρών	30	40-60	300	1000	1,0-	HCO <sub>3</sub> , Na, Ca
Χρυσούπολη - Ερατεινό	40	70-90	400	2000	6-8	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
<b>ΝΗΣΙΑ ΑΙΓΑΙΟΥ κ.ά.</b>						
Άργεννος Λέσβου	-	86	800	1500	12	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub> , K
Κίμωλος	4	25-70	200	500	40	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
Μήλος	50	40-100	>300	2000	10-50	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
Νένητα Χίου	5	25-80	150	500	4-5	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
Νίσυρος	-	25-95	100	500	30	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
Πολιχνίτος Λέσβου	10	67-92	400	1000	10	Na, Cl, Ca, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub>
Σαντορίνη	10	25-70	-	500	5-30	Na, Cl, SO <sub>4</sub>
Στύψη/Καλλονή Λέσβου	10	42-95	200	2000	1-5	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub>
Σουσακί Κορινθίας	8	60-76	450	1000	45-49	Na, Cl, Ca, SO <sub>4</sub>

Σχετικά με εκμετάλλευση στην Ελλάδα επιφανειακών ψυχρών νερών πολύ χαμηλής ενθαλπίας, αξίζει να μνημονευθεί η μοναδική ίσως εφαρμογή στη νήσο Άνδρο, όπου πειραματικό θερμοκήπιο θερμαίνεται με την αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου επαρκούς ποσότητας νερού σταθερής θερμοκρασίας περίπου στους 20°C με τη χρήση αντλίας θερμότητας και οι ερευνητικές εφαρμογές του Ε.Μ.Π. στο Κορωπί και στο Ζωγράφου (η περίπτωση του συστήματος Ζωγράφου θα αναλυθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί το έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ιδιωτικών εφαρμογών ψύξης/θέρμανσης κτιρίων σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Για τις εγκαταστάσεις αυτές δεν υπάρχουν προς το παρόν συγκεντρωτικά στοιχεία (Κίτσιος, 2009).

### 3.3. Γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας ν. Μήλου

Στη ν. Μήλο του νομού Κυκλάδων έχει εντοπιστεί το πρώτο γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας στη χώρα. Παράλληλα διαπιστώθηκε, από τις ερευνητικές εργασίες του ΙΓΜΕ, ότι σε ολόκληρο το νησί αναπτύσσεται ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας μέχρι του βάθους των 200 μέτρων περίπου, στο οποίο αδιαπέραστοι λιθολογικοί σχηματισμοί το διαχωρίζουν από το υψηλής ενθαλπίας πεδίο που εντοπίζεται σε μεγαλύτερα βάθη. Τόσο από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες του ΙΓΜΕ όσο και νεώτερες της ΜΗΛΟΣ Α.Ε. περιχαράσσεται ένα βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας, ενώ ολόκληρο το νησί αποτελεί ένα πιθανό πεδίο.

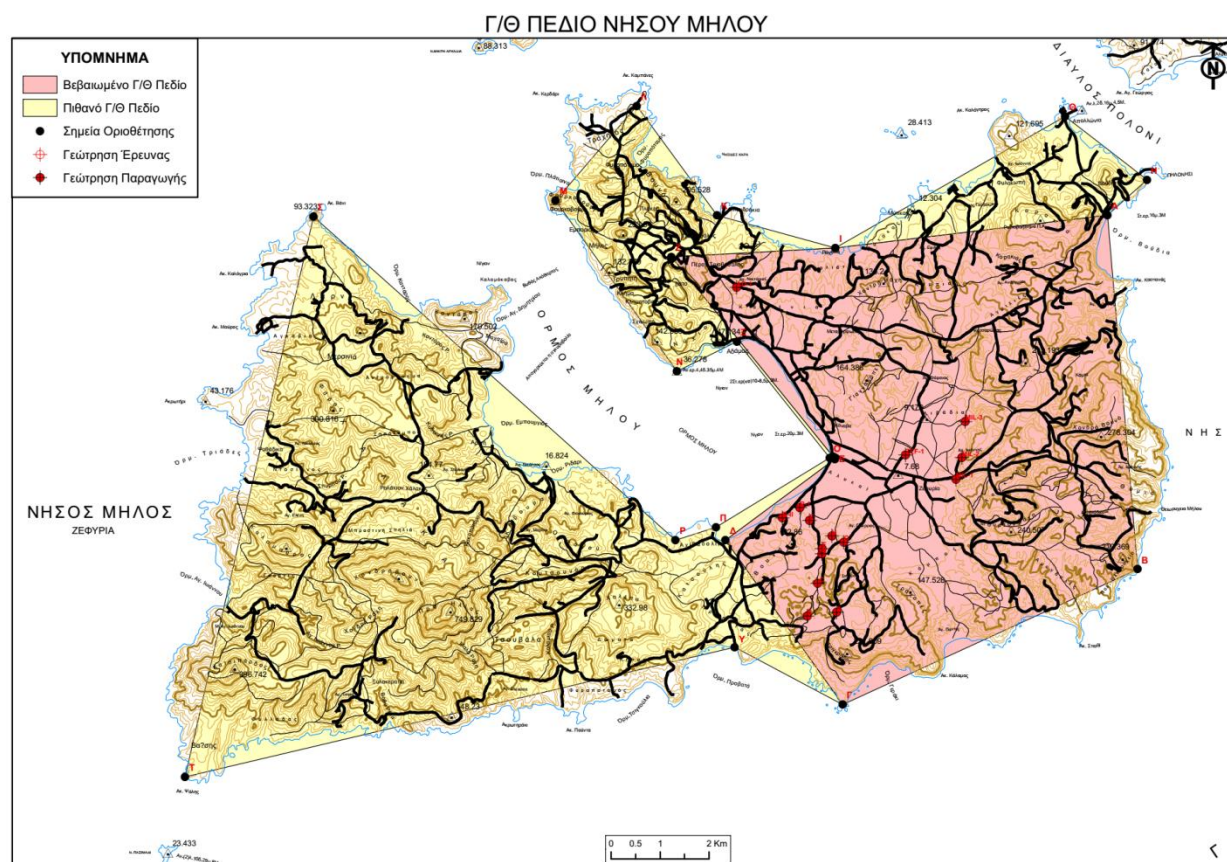
Τα χαρακτηριστικά του **βεβαιωμένου πεδίου** έχουν ως εξής:

- Έκταση 63 Km<sup>2</sup>
- Θερμοκρασία 60- 99 °C
- Βάθος ταμειυτήρα: 50 - 200 m
- Παροχή: 750 m<sup>3</sup>/h

Τα χαρακτηριστικά του **πιθανού πεδίου** έχουν ως εξής:

- Έκταση 87 Km<sup>2</sup>

Στον ακόλουθο χάρτη παρουσιάζεται η χωροθέτηση του πεδίου (πιθανού και βεβαιωμένου)



**Εικόνα 10. Γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας Μήλου (Πηγη: ΙΓΜΕ – Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων)**



### 3.4. Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας ν. Μήλου

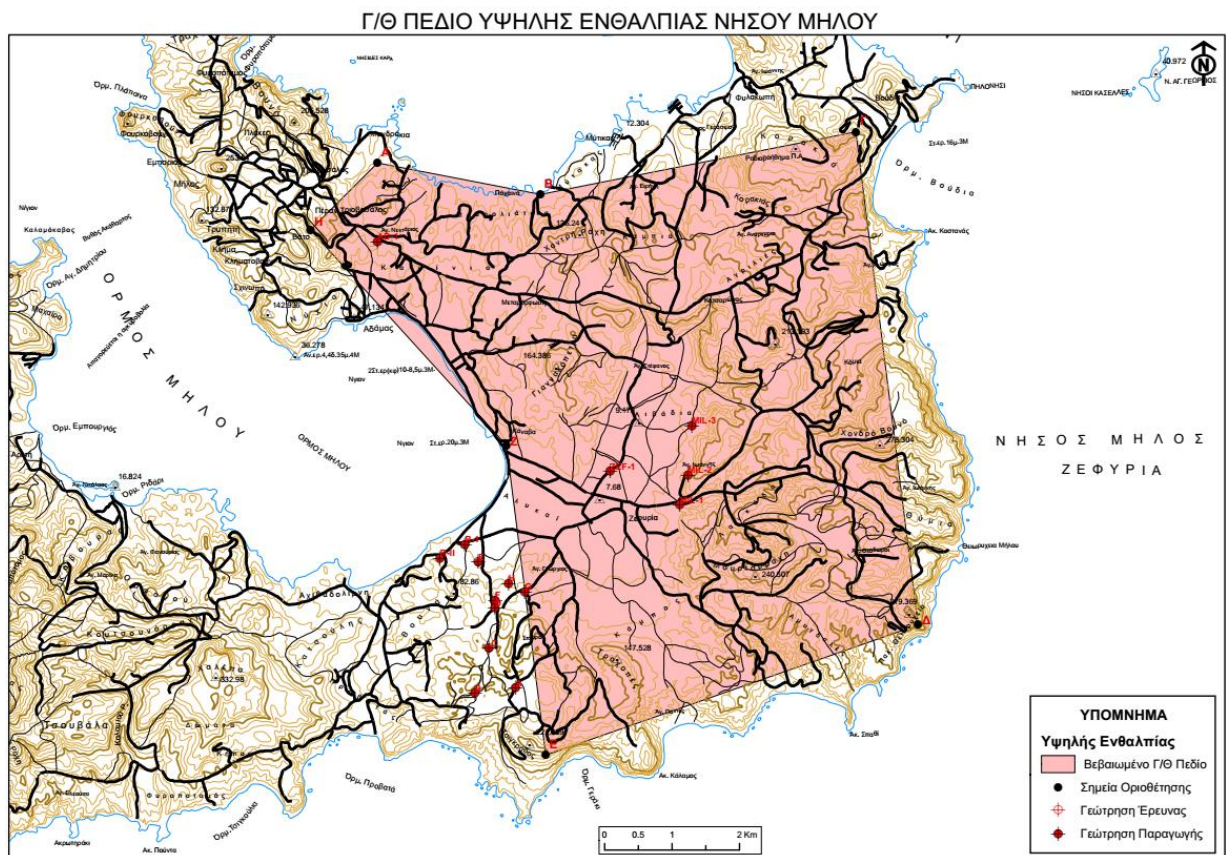
Το γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας της Μήλου ερευνήθηκε σε πρώτη φάση από το ΙΓΜΕ τη δεκαετία του 1970 με την εκτέλεση διαφόρων μεθόδων επιφάνειας μεταξύ των οποίων τη διάνοιξη 48 αβαθών γεωτρήσεων προσδιορισμού της γεωθερμικής βαθμίδας. Στη συνέχεια η ΔΕΗ διάνοιξε πέντε βαθιές γεωτρήσεις έρευνας – παραγωγής και εκτέλεσε δοκιμές παραγωγής.

Κατά τη δεκαετία του 1980 εγκαταστάθηκε εκεί και λειτούργησε για λίγο, σε πειραματική βάση, μικρή πιλοτική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 1,8 MWe. Η βιομηχανική αξιοποίηση δεν προχώρησε λόγω αντίθεσης των κατοίκων.

Τα χαρακτηριστικά του **βεβαιωμένου αυτού πεδίου** έχουν ως εξής :

- Έκταση 50 Km<sup>2</sup>
- Θερμοκρασία (στον πυθμένα των γεωτρήσεων) 280- 320 °C
- Βάθος ταμειυτήρα: 1000 - 1380 m.
- Παραγωγή: 339 ton/h ρευστού εκ των οποίων 200 ton/h κεκορεσμένου ατμού και 139 ton/h θερμού νερού.
- Πίεση: 11 – 29 ATM.

Στον χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται η χωροθέτηση του βεβαιωμένου πεδίου:



**Εικόνα 11. Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας Μήλου (Πηγή: ΙΓΜΕ – Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων)**

#### **3.4.1. Κινήσεις για αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της Μήλου**

Μετά τον εντοπισμό του ιδιαίτερα υψηλού γεωθερμικού δυναμικού της Μήλου, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, ξεκίνησε την κατασκευή σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το νησί της Μήλου και το ευρύ νησιωτικό σύμπλεγμα.

Ωστόσο, η κύρια γεώτρηση ορύχθηκε στην περιοχή της Ζεφυρίας, πολύ κοντά στη μεγαλύτερη πόλη του νησιού, τον Αδάμαντα, όπου είχε μόλις ξεκινήσει η τουριστική ανάπτυξη. Επιπλέον, η αρνητική εμπειρία του κοινού από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις (το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού είχε ήδη υποστεί επιδράσεις από την τοπική μεταλλευτική δραστηριότητα), είχε σαν αποτέλεσμα τη σφοδρή αντίδραση των κατοίκων ως προς το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής, με το απλό σύνθημα «σε καμία περίπτωση!»

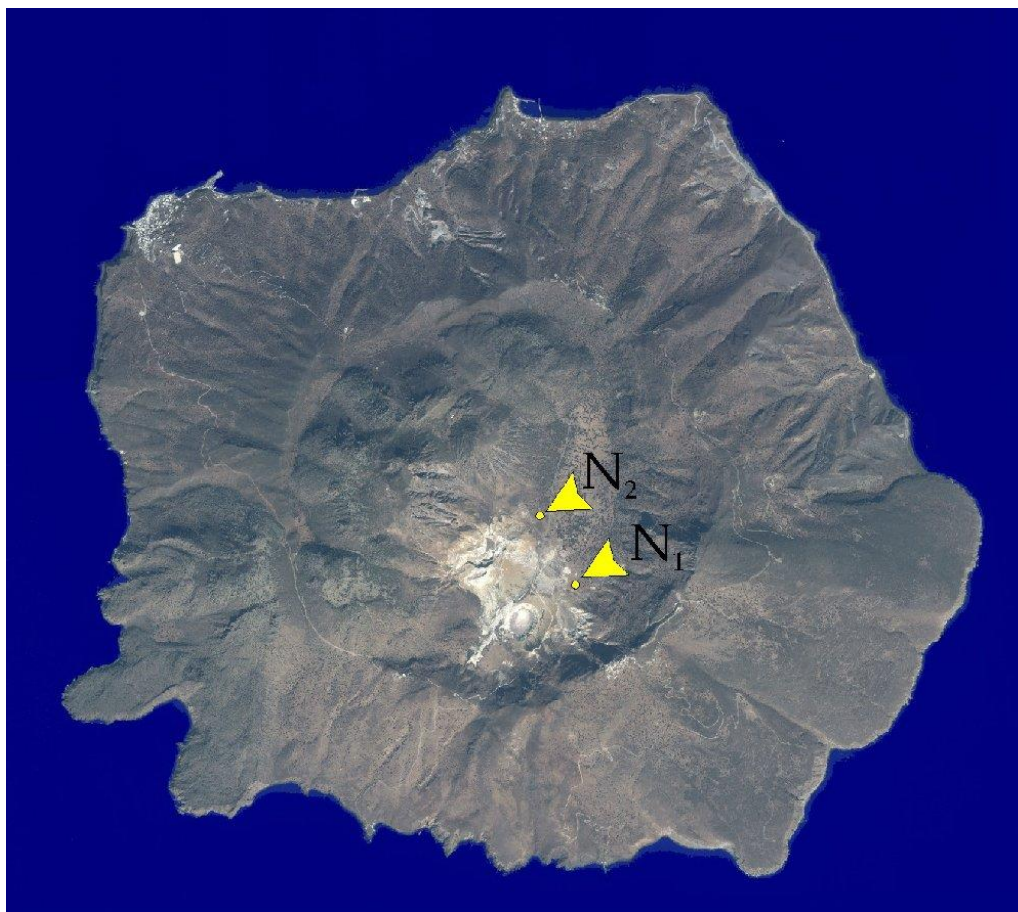
Αιτίες της αρνητικής τοποθέτησης του κοινού ήταν η ιδιαίτερα επιβαρυμένη ατμόσφαιρα, οφειλόμενη στην ανεξέλεγκτη διαρροή υδρόθειου και άλλων επικίνδυνων αερίων από τη γεώτρηση, τη ρύπανση των επιφανειακών νερών (βρόχινο νερό και νερό υδατοδεξαμενών) με αρσενικό και θειικά ιόντα και την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων υγρών και στερεών αποβλήτων στον όρμο της Αγίας Κυριακής.

Αποτέλεσμα των ανωτέρω επιπτώσεων, ήταν η δημιουργία έντονων διαμαρτυριών, με συγκεντρώσεις και απεργίες, οι οποίες διήρκεσαν 2 περίπου χρόνια (1987-1989) και οδήγησαν στην επιβολή παύσης λειτουργίας του πιλοτικού σταθμού.

Μέχρι και σήμερα, 20 περίπου χρόνια μετά, οι αρνητικές αντιδράσεις των κατοίκων δεν έχουν επιλυθεί (Πολύζου, 2007).

### 3.5. Το γεωθερμικό πεδίο της Νισύρου

Η ύπαρξη των αμιδίων και των θερμών πηγών, της ενεργής ηφαιστειότητας και των υδροθερμικών ιστορικών κρατήρων, έθεσαν τη Νίσυρο στους πρώτους στόχους της γεωθερμικής έρευνας του ΙΓΜΕ αρχικά και της ΔΕΗ κατόπιν, στη δεκαετία του '70. Οι έρευνες για την διαπίστωση γεωθερμικής ανωμαλίας στο ηφαίστειο της Νισύρου ξεκίνησαν το 1973 από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) της Ελλάδος με την εκτέλεση εννέα ερευνητικών γεωτρήσεων βάθους περίπου 70 μέτρων (Χρηστάνης, 2003). Διαπιστώθηκε η ύπαρξη μεγάλης θερμικής ανωμαλίας που χαρακτηρίζεται από γεωθερμική βαθμίδα έως και 20 φορές μεγαλύτερη της μέσης γήινης γεωθερμικής (περίπου έως 60°C/m). Την περίοδο 1983-1984 η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) πραγματοποίησε μία γεωτρητική έρευνα στο χώρο της καλδέρας του ηφαιστείου της Νισύρου για την διερεύνηση του δυναμικού του γεωθερμικού της πεδίου με σκοπό την αξιοποίησή του κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πραγματοποιήθηκαν δύο βαθιές γεωτρήσεις (N1 και N2) σε βάθος περίπου 1800 και 1550 μέτρων αντιστοίχως που επιβεβαίωσαν την ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας (Geotermica Italiana, 1983, 1984).

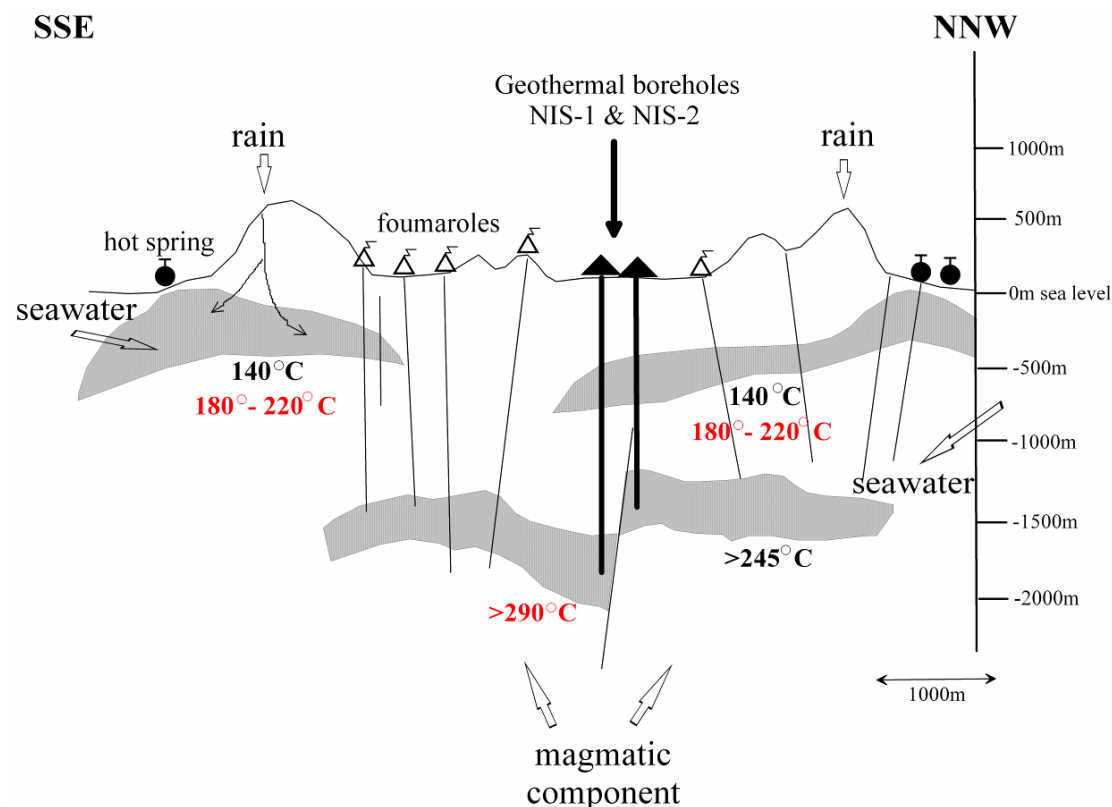


Εικόνα 12. Άποψη της Νισύρου όπου σημειώνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων N1 και N2 (Πηγή: [www.igme.gr](http://www.igme.gr)).

Το Σεπτέμβριο του 1981 φάνηκε η δυναμική κατάσταση στην οποία βρίσκεται σήμερα το ηφαίστειο της Νισύρου, με την «περιπέτεια» της πρώτης δοκιμής παραγωγής στην

γεώτρηση N1. Το γεωθερμικό ρευστό που παράχθηκε σε ελάχιστα λεπτά ξεπέρασε την πίεση των 45 ατμοσφαιρών καταστρέφοντας το πιεσόμετρο, ξεπέρασε το όριο του θερμομέτρου (400°C) και χρειάστηκε να γίνει σε μισή ώρα εισαγωγή 40.000 λίτρων θαλασσινού νερού με πίεση 75 ατμοσφαιρών, για να μπορέσει να ελεγχθεί η κατάσταση. Στις 6 ώρες που η γεώτρηση ήταν σε παραγωγή αποτέθηκαν από το γεωθερμικό ρευστό πάνω από 120 τόνοι θειούχων και χλωριούχων αλάτων (ΙΓΜΕ, 2008).

Αποτέλεσμα ήταν η αστοχία της βαθιάς γεώτρησης N1 (1800 μέτρα) (Χρηστάνης, 2003). Κατά την διατρητική διαδικασία εντοπίστηκαν δύο ταμιευτήρες σε βάθη περίπου 1400-1800 μέτρα για τον βαθύτερο και περίπου στα 400-700 μέτρα για τον ρηχό ταμιευτήρα (Geotermica Italiana, 1983,1984). Η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών που μετρήθηκε στον βαθύτερο γεωθερμικό ταμιευτήρα φτάνει τους 290°C (Marinelli et al., 1983) αλλά υπολογίζεται ότι είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (>350°C) (Geotermica Italiana, 1983, 1984) καθώς η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού φαίνεται να ήταν επηρεασμένη από τη μίξη με το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιήθηκε κατά την διατρητική διαδικασία (Chiodini et al., 1993). Στο ρηχό ταμιευτήρα οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν κυμαίνονται μεταξύ 65-75°C (Geotermica Italiana, 1983, 1984). Από τα ιστοπικά και γεωθερμομετρικά δεδομένα των θερμών νερών της Νισύρου προκύπτει ότι το γεωθερμικό σύστημα της Νισύρου αποτελείται από δύο γεωθερμικούς ταμιευτήρες.



Εικόνα 13. Τροποποιημένο σχηματικό υδρολογικό μοντέλο της υποεπιφανειακής ροής των θερμών ρευστών στο ηφαίστειο της Νισύρου από τους Kavouridis et al., (1999). Στο γεωθερμικό σύστημα της Νισύρου λαμβάνει χώρα μίξη μεταξύ του θαλασσινού νερού (seawater), του μετεωρικού νερού (meteoric water, rain), των μαγματικών συστατικών (magmatic component) και των θερμών ατμών με πιθανή τη συμμετοχή και υπόγειου κρύου νερού. Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση του μετεωρικού νερού, την διείσδυση του θαλασσινού και τη συμμετοχή των μαγματικών συστατικών στο υδροθερμικό σύστημα της Νισύρου. Οι τεφρές περιοχές αντιστοιχούν

στους υποεπιφανειακούς ταμιευτήρες του γεωθερμικού συστήματος της Νισύρου. Με μαύρου χρώματος κείμενο υποδεικνύονται οι αντίστοιχες θερμοκρασίες των ταμιευτήρων ενώ οι αρχικές θερμοκρασίες του θερμού συστατικού που συμμετείχε στη μίξη υποδεικνύονται με κόκκινου χρώματος κείμενο (Ζούζιας, 2011).

Ο βαθύτερος ταμιευτήρας βάθους 1400-1800 μέτρων αποτελείται από γεωθερμικά ρευστά τα οποία είναι αποτέλεσμα της μίξης περίπου 40% από το πρωτογενές γεωθερμικό ρευστό (PGL) (Brombach et al. 2003) και 60% από το τοπικό θαλασσινό νερό. Αυτά τα γεωθερμικά ρευστά του βαθύτερου ταμιευτήρα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, παρουσιάζουν θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350°C, ωστόσο, από υπολογισμούς προκύπτει μία ελάχιστη θερμοκρασία των 245°C για τα συγκεκριμένα ρευστά που είναι το αποτέλεσμα μίξης πρωτογενών γεωθερμικών ρευστών και τοπικού θαλασσινού νερού. Ο βαθύτερος ταμιευτήρας φιλοξενεί θερμό νερό υψηλής ενθαλπίας το οποίο ψύχεται αδιαβατικά και χάνοντας τους ατμούς του ανέρχεται σε μία ζώνη χαμηλότερης ενθαλπίας. Αυτή η ζώνη χαμηλότερης ενθαλπίας είναι ο ρηχός ταμιευτήρας του γεωθερμικού συστήματος της Νισύρου που εντοπίζεται σε βάθος έως 500 μέτρων. Τα γεωθερμικά ρευστά του ρηχού ταμιευτήρα είναι το αποτέλεσμα της μίξης των γεωθερμικών ρευστών του βαθύτερου ταμιευτήρα (δηλαδή των πρωτογενών γεωθερμικών ρευστών και του τοπικού θαλασσινού νερού), με τοπικό θαλασσινό νερό, μετεωρικό νερό ή/και ψυχρό υπόγειο νερό. Όπως αναφέραμε ήδη οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν για το ρηχό ταμιευτήρα της Νισύρου κυμαίνονται μεταξύ των 65-75°C (Geotermica Italiana, 1983, 1984), ωστόσο από γεωθερμομετρικά δεδομένα υπολογίστηκαν θερμοκρασίες της τάξεως των 90 – 140°C για τον ρηχό ταμιευτήρα όπου η αρχική θερμοκρασία του θερμού συστατικού της μίξης (γεωθερμικά ρευστά του βαθύτερου ταμιευτήρα) κυμαίνεται μεταξύ των 180 και 220°C και η θερμοκρασία των ατμών που αποχωρίζονται από αυτό υπολογίζονται περίπου στους 225°C.

Από γεωλογικής άποψης, η Νίσυρος εμφανίζει ιδανικές συνθήκες για την ύπαρξη και εκμετάλλευση ενός γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας καθώς διαθέτει μία εστία θερμότητας (ψυχόμενος μαγματικός θάλαμος), υπάρχει κάθετη διαπερατότητα που επιτρέπει την κατείσδυση και διείσδυση του μετεωρικού και θαλασσινού νερού, υπάρχει ικανό στεγανό κάλυμμα όπως αποδεικνύεται και από την εκδήλωση φρεατικών εκρήξεων και υπάρχουν υδροπερατοί σχηματισμοί (ταμιευτήρες) σε οικονομικά εκμεταλλεύσιμα βάθη (Geotermica Italiana, 1983, 1984). Από δοκιμαστικές αντλήσεις προέκυψε για την γεώτρηση NIS2 συνολικά παροχή ρευστών της τάξεως των 50t/h από τα οποία ο ατμός είναι 23t/h (Χρηστάνης, 2003).

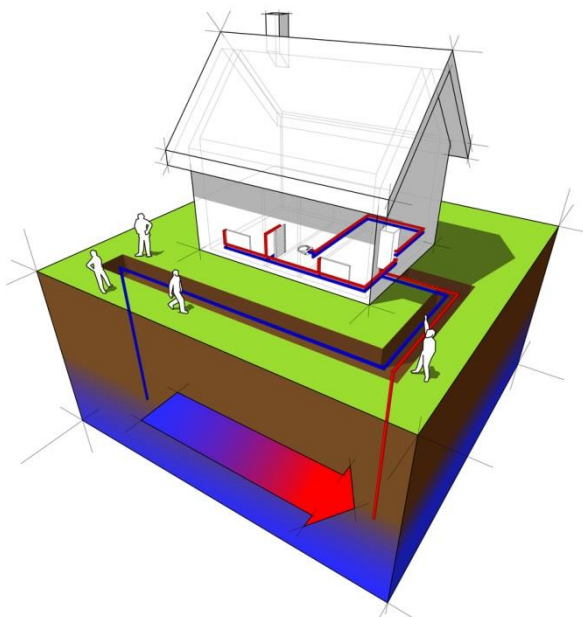
Προκαταρκτικές εκτιμήσεις για το γεωθερμικό δυναμικό του πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου το υπολογίζουν στα 40MW (Χρηστάνης, 2003), ωστόσο το πρόγραμμα έχει ανασταλεί και μέχρι σήμερα καμία περαιτέρω διαδικασία δεν έχει προχωρήσει για την αξιοποίησή του. Έχοντας ως δεδομένο την ύπαρξη δύο γεωθερμικών ταμιευτήρων, ενός ρηχού (0-500 μέτρα) και ενός βαθύτερου (1400-1800 μέτρα) με αντίστοιχες θερμοκρασίες 90 – 140°C και μεγαλύτερες των 245°C συμπεραίνουμε ότι τα ρευστά του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου μπορούν να αξιοποιηθούν για όλο το φάσμα των πιθανών εφαρμογών, αλλά ενδείκνυνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## 4. Αβαθής γεωθερμία και εφαρμογές μικρής κλίμακας (γεωθερμικός εναλλάκτης)

### 4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει λόγος για την αβαθή γεωθερμία και τις δυνατότητες αξιοποίησής της, οι οποίες είναι πολύ προσιτές και αποτελούν ίσως την πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας. Κατά την χρήση αυτή λαμβάνονται (ή και απορρίπτονται) ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού στα πρώτα 100 m από την επιφάνεια της γης ή με την κυκλοφορία υπόγειων νερών ή νερών από λίμνες, ποτάμια και τη θάλασσα.

Η θερμοκρασία στο έδαφος σε βάθος μεγαλύτερο από 6 μέτρα είναι περίπου ίση με τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα στο ίδιο γεωγραφικό πλάτος στην επιφάνεια. Ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, η θερμοκρασία κάτω από τα 6 μέτρα από την επιφάνεια της Γης διατηρείται σχεδόν σταθερή μεταξύ των 10 και 16 ° C, εάν ο χώρος δεν διαταράσσεται από την παρουσία μιας αντλίας θερμότητας. Σαν ένα ψυγείο ή κλιματιστικό, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν μια αντλία θερμότητας εκμεταλλεύομενα την παραπάνω ιδιότητα του εδάφους για να αναγκάσουν τη μεταφορά θερμότητας από το έδαφος.



Εικόνα14. Βασική αρχή λειτουργίας γεωθερμικού εναλλάκτη

Οι αντλίες θερμότητας μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα από ένα ψυχρό χώρο σε ένα θερμό χώρο, ενάντια στη φυσική διεύθυνση της ροής, ή μπορεί να ενισχύσουν τη φυσική ροή της θερμότητας από τη θερμή περιοχή σε ένα ψυχρό χώρο. Βασικό στοιχείο της αντλίας θερμότητας είναι ένας βρόχος από σωληνώσεις οι οποίες διαρρέονται από ψυκτικό υγρό που αντλείται μέσω ενός κύκλου ψύξης-συμπίεσης ατμού που κινεί τη θερμότητα.

## 4.2. Γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, γνωστά ως γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας, αποτελούνται από μια ή περισσότερες αντλίες θερμότητας οι οποίες συνδυάζονται με κατάλληλες διατάξεις με σκοπό την αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου των υπεδαφικών σχηματισμών ή/και των υπογείων νερών. Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία θέρμανσης, η αντλία θερμότητας αφαιρεί θερμότητα από το υπέδαφος ή τον υπόγειο ταμειυτήρα που αξιοποιείται ως πηγή θερμότητας και την αποδίδει στο κτίριο. Στις περιόδους ψύξης, η αντλία θερμότητας λειτουργεί κατά σχετικά αντίστροφη διαδικασία προκειμένου να αφαιρεθεί θερμότητα από το κτίριο και να αποδοθεί στο υπέδαφος ή στον υπόγειο ταμειυτήρα που αξιοποιείται ως αποθήκη θερμότητας.

Το υπόγειο νερό και το υπέδαφος, ως πηγές ή αποθήκες θερμότητας, υπερτερούν σημαντικά σε σχέση με τον αέρα, αφού έχουν καθ'όλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους σταθερή θερμοκρασία. Η παρατηρούμενη σταθερότητα οφείλεται στη θερμοχωρητικότητα του εδάφους και του υπογείου νερού, που «αποσβένει» τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ενώ σε καμία περίπτωση δεν υποδηλώνει την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου.

Ωστόσο, μια έννοια συνδεδεμένη με την ανανεωσιμότητα ενός ενεργειακού πόρου είναι η αιεφορία. Η ανανεωσιμότητα αποτελεί ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η αιεφορία περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται οποιοσδήποτε φυσικός πόρος, σχετίζεται με την ορθολογική διαχείριση των πόρων και χαρακτηρίζεται από κάποια μορφή ισορροπίας (Axelsson, Stefansson, & Xu, 2002). Η βιώσιμη αξιοποίηση του υπεδάφους και των υπογείων νερών ως πηγής και αποθήκης θερμότητας, προϋποθέτει τη διατήρηση στα πλαίσια ενός ετήσιου κύκλου λειτουργίας, μιας ισορροπίας μεταξύ της αφαιρούμενης και αποδιδόμενης από και προς το υπέδαφος ενέργειας αντίστοιχα. Η έντονη φόρτιση ή αποφόρτιση της υπεδαφικής αποθήκης ως αποτέλεσμα της μη τήρησης του παραπάνω ισοζυγίου σε ένα ετήσιο κύκλο λειτουργίας, μπορεί να καταστήσει ένα γεωθερμικό σύστημα αντλιών θερμότητας, μη παραγωγικό από τα πρώτα κιόλας χρόνια της λειτουργίας του (Berdal, Souyri, & Achard, 2007).

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην αποδοτική χρήση μιας αντλίας θερμότητας, είναι η εξασφάλιση πηγής θερμότητας, που να παρέχει θερμική ενέργεια με σταθερή ισχύ και σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της.

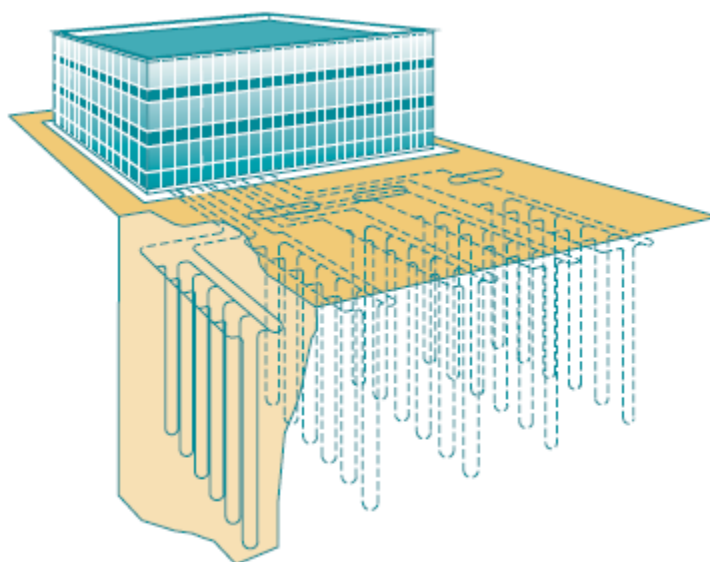
Τόσο από οικονομική, όσο και από περιβαλλοντική άποψη, βέλτιστος κύκλος λειτουργίας είναι εκείνος, κατά τον οποίο απάγεται το μέγιστο δυναμικά ποσό θερμότητας  $Q_{th}$  με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση έργου  $W$ . Ο λόγος  $Q_{th}/W$  ονομάζεται συντελεστής απόδοσης - Coefficient of Performance (COP), είναι αδιάστατος αριθμός και αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέγεθος στις αντλίες θερμότητας (Παπαθεοδώρου, 2011).

### 4.3. Συστήματα κλειστού βρόχου

Τα γεωθερμικά συστήματα αντλιών θερμότητας κλειστού βρόχου, αναφέρονται σε συστήματα που αποτελούνται από την αντλία θερμότητας και τη σύνδεσή της με ένα κλειστό δίκτυο πλαστικών αγωγών στο υπεδάφος (γεωθερμικοί εναλλάκτες ή γεωεναλλάκτες). Η αξιοποίηση του θερμικού περιεχομένου του υπεδάφους γίνεται με ανακυκλοφορία νερού ή αντιψυκτικού στο κλειστό δίκτυο αγωγών. Τα συστήματα αυτά διαχωρίζονται περαιτέρω σε κάθετα και οριζόντια, ανάλογα με τη γεωμετρία του υπόγειου εναλλάκτη.

#### 4.3.1. Συστήματα κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών

Στα συστήματα κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών (Εικόνα 15), ένα κλειστό δίκτυο αγωγών μικρής διαμέτρου είναι τοποθετημένο εντός μιας ή περισσότερων γεωτρήσεων (κάθετοι γεωεναλλάκτες) με τυπικά βάθη από 50m έως 200m. Το υλικό κατασκευής των αγωγών είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE).



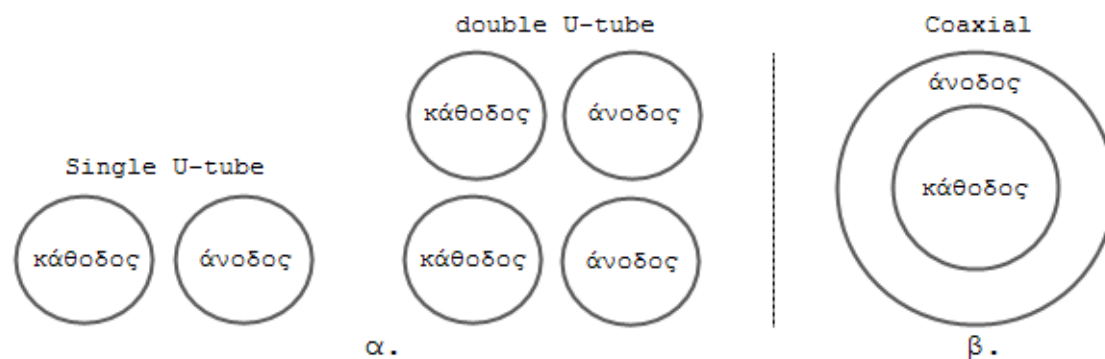
**Εικόνα 15. Απεικόνιση συστήματος κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών (πηγή: RETScreen)**

Προκειμένου να βελτιωθεί η μεταφορά θερμότητας μεταξύ εδάφους και κυκλοφορούντος ρευστού, στο κενό των γεωτρήσεων, μετά την τοποθέτηση των αγωγών, χρησιμοποιείται πληρωτικό υλικό με κύρια βάση μπετονίτη ή τσιμέντο. Η χρήση πληρωτικού υλικού παρέχει παράλληλα προστασία στο δίκτυο των αγωγών έναντι της διαβρωτικής δράσης ορισμένων συστατικών του υπογείου νερού.

Οι δυο κύριοι τύποι κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών είναι οι τύπου U (U-tube) και οι ομοαξονικοί (Concentric ή Coaxial). Στους γεωεναλλάκτες τύπου U, εντός της γεώτρησης τοποθετείται ζεύγος ευθύγραμμων αγωγών, οι οποίοι συνδέονται στον πυθμένα της με καμπή 180 μοιρών σχηματίζοντας έτσι ενιαίο αγωγό τύπου U. Εντός μιας γεώτρησης δύνανται να τοποθετηθούν περισσότερα του ενός ζεύγη αγωγών, με τον διπλού U κάθετο γεωεναλλάκτη να αποτελεί την πλέον διαδεδομένη επιλογή (Παπαθεοδώρου, 2011).



Οι ομοαξονικού τύπου γεωεναλλάκτες αποτελούνται από δύο ευθύγραμμους ομοαξονικούς αγωγούς διαφορετικής διαμέτρου. Το σκέλος καθόδου του ρευστού αποτελεί ο εσωτερικός αγωγός, ενώ το κυκλοφορούν ρευστό μεταφέρεται στην επιφάνεια διαμέσου του κενού μεταξύ των αγωγών. Το υλικό κατασκευής των αγωγών είναι πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE).



Εικόνα 16. Τύποι γεωεναλλακτών ανάλογα με τη διάταξη των αγωγών στη γεώτρηση

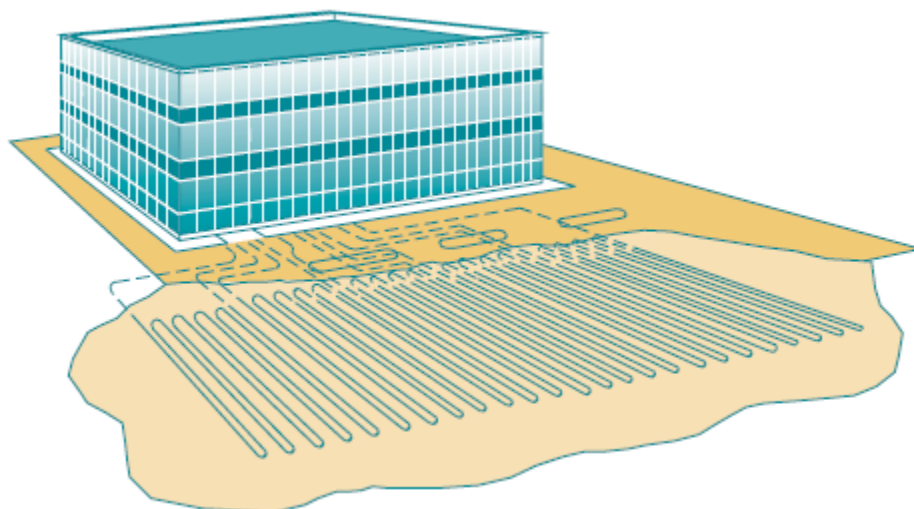
Τα πλεονεκτήματα των κάθετων γεωθερμικών εναλλακτών, ως άμεση απόρροια της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους είναι τα εξής:

- Απαιτείται ελάχιστη εδαφική έκταση για την εγκατάστασή τους
- Έχουν μεγαλύτερη και σταθερότερη απόδοση σε σχέση με τους οριζόντιους γεωθερμικούς εναλλάκτες καθώς η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σχεδόν σταθερή στη διάρκεια του έτους
- Απαιτούν μικρότερο μήκος αγωγών σε σχέση με τα συστήματα οριζόντιου γεωεναλλάκτη, επομένως μικρότερη αντλητική ενέργεια

Το σημαντικό κόστος για την κατασκευή των γεωτρήσεων συνιστά το μεγάλο μειονέκτημά τους σε σχέση με τα οριζόντια συστήματα γεωεναλλακτών. Επιπλέον, η έλλειψη ολοκληρωμένων σχεδιαστικών εργαλείων για την ακριβή διαστασιολόγησή τους οδηγεί συχνά σε υπερεκτιμήσεις του απαιτούμενου βάθους γεωτρήσεων, ανεβάζοντας το συνολικό κόστος σε ακόμα υψηλότερα επίπεδα (Παπαθεοδώρου, 2011).

#### 4.3.2. Συστήματα οριζόντιων γεωθερμικών εναλλακτών

Τα συστήματα οριζόντιων γεωεναλλακτών (Εικόνα 17) αποτελούνται από δίκτυο θερμοπλαστικών αγωγών σε οριζόντια διάταξη και συνήθη βάθη της τάξεως των 2m.



**Εικόνα 17. Απεικόνιση συστήματος οριζόντιων γεωθερμικών εναλλακτών (πηγή: RETScreen)**

Η βασική τους διαφοροποίηση σε σχέση με τα συστήματα κάθετων γεωεναλλακτών συνίσταται στη γεωμετρία του δικτύου των αγωγών και στην οριζόντια διαστρωμάτωσή τους στο υπέδαφος. Βασικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η ευκολία της κατασκευής, καθώς απαιτούνται εκσκαφές μικρού βάθους για την τοποθέτησή τους.

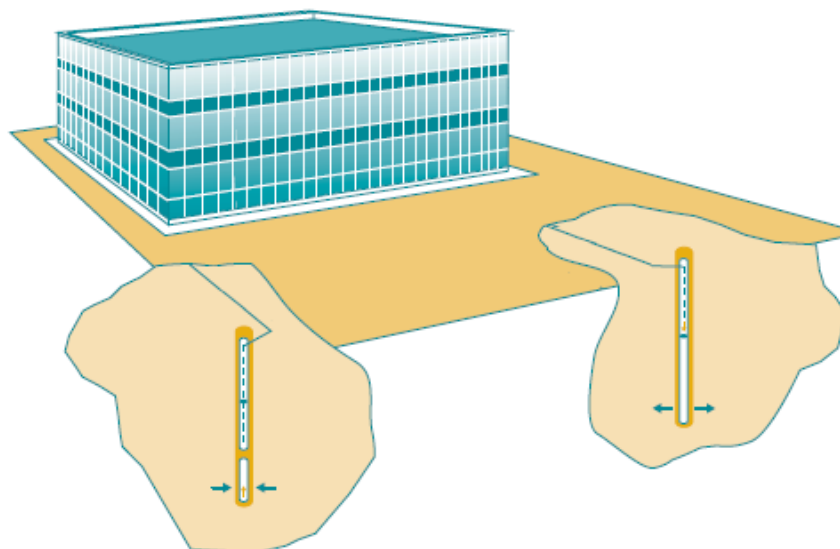
Ωστόσο, η μεγάλη έκταση που απαιτείται για την εγκατάστασή τους περιορίζει το εύρος εφαρμογής τους σε περιοχές με σημαντική διαθέσιμη εδαφική έκταση. Επιπλέον, το συνολικό απαιτούμενο μήκος αγωγών, επομένως και η αναγκαία αντλητική ισχύς, είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε συστήματα κάθετης διαμόρφωσης, ενώ η μεγαλύτερη επίδραση των καιρικών συνθηκών στα πρώτα μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους καθιστά τη θερμική αποθήκη συγκριτικά ασταθή.

Σε μια προσπάθεια μείωσης της απαιτούμενης εδαφικής έκτασης για την εγκατάστασή τους, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διατάξεις για το υπόγειο δίκτυο αγωγών με χαρακτηριστική αυτή της σπειροειδούς διάταξης όπου οι αγωγοί είναι διαμορφωμένοι σε spiral.

#### **4.4. Συστήματα ανοικτού βρόχου**

Τα συστήματα ανοικτού βρόχου (Εικόνα 18) ήταν τα πιο διαδεδομένα συστήματα μέχρι την πρόσφατη ανάπτυξη των κλειστών συστημάτων. Το κύριο τεχνικό χαρακτηριστικό τους είναι η εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου υπόγειων υδροφορέων μέσω υδρογεωτρήσεων.

Σε ένα τυπικό γεωθερμικό σύστημα ανοικτού βρόχου χρησιμοποιείται μια γεώτρηση για την άντληση του υπεδαφικού νερού και μια δεύτερη γεώτρηση για την επανεισαγωγή του στον ταμιευτή. Η σύνδεσή τους με το πρωτεύον κύκλωμα των αντλιών θερμότητας γίνεται με χρήση ενός κεντρικού εναλλάκτη θερμότητας.



**Εικόνα 18: Απεικόνιση γεωθερμικού συστήματος ανοικτού βρόχου (πηγή: RETScreen)**

Τα παραπάνω συστήματα παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υπεδαφικού νερού από και προς τις υδρογεωτρήσεις. Σημαντικές προϋποθέσεις για την εφαρμογή των εν λόγω συστημάτων αποτελούν:

- η ύπαρξη εκτεταμένων υδροφορέων θερμοκρασίας 15-20 °C,
- σχετικά υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα (της τάξης των 10<sup>-3</sup> m/sec) προκειμένου να εξασφαλίζεται ικανοποιητική παροχή,
- σχετικά υψηλή υδροστατική στάθμη, για εύκολη άντληση του ρευστού,
- η απαίτηση καλής χημικής σύστασης του υπεδαφικού νερού (χαμηλή συγκέντρωση σιδήρου) για την αποφυγή προβλημάτων, όπως διάβρωση της γεώτρησης (Παπαθεοδώρου, 2011).

Η θερμοκρασιακή σταθερότητα της ενεργειακής πηγής εξασφαλίζει υψηλό βαθμό απόδοσης, ενώ το κόστος τους ανά μονάδα ισχύος είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο σε συστήματα κλειστού βρόχου. Ωστόσο, πέρα του περιορισμού της εφαρμογής τους μόνο σε περιοχές με διαθέσιμους υδροφόρους ορίζοντες, οι εκάστοτε τοπικοί περιβαλλοντικοί περιορισμοί μπορούν να εμποδίσουν την κατασκευή τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συντελεστής απόδοσης των αντλιών θερμότητας εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία στην οποία αντλείται (λειτουργία θέρμανσης) ή απορρίπτεται (λειτουργία ψύξης) θερμότητα από και προς την υπεδαφική πηγή/αποθήκη αντίστοιχα. Έτσι, πέρα από την τελική ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση της υπεδαφικής πηγής/αποθήκης, η οποία και καθορίζει τη λειτουργική βιωσιμότητα ενός συστήματος σε βάθος χρόνου, εξαιρετικά σημαντική είναι η αξιολόγηση της περιοδικής μεταβολής της απόδοσης του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια ενός ετήσιου κύκλου λειτουργίας.

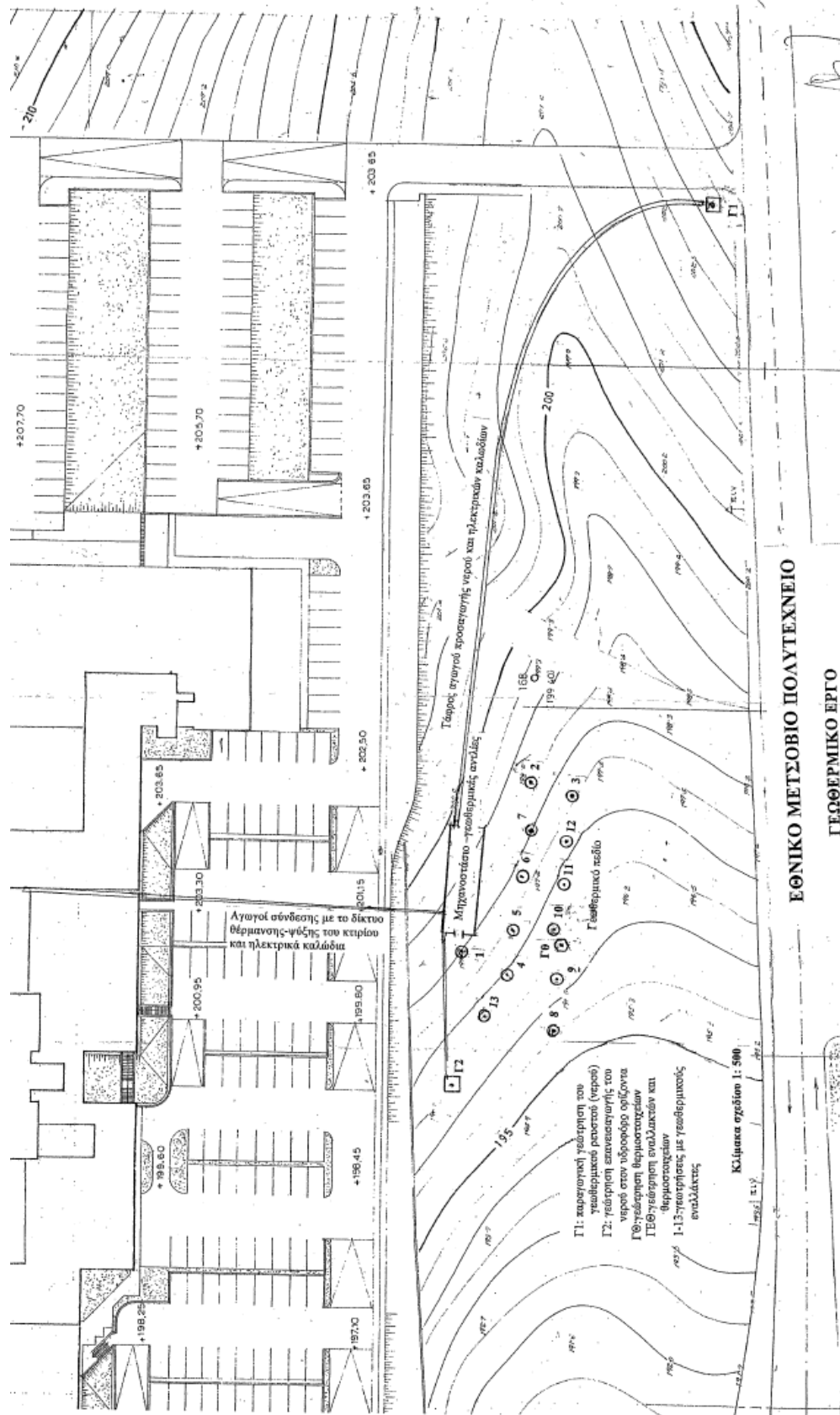
#### 4.5. Γεωθερμικό πεδίο Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Μια εφαρμογή Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας κλειστού βρόχου κατακόρυφης διάταξης έχει πραγματοποιηθεί στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Η εγκατάσταση εκμετάλλευσης της ομαλής γεωθερμίας στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου και συγκεκριμένα η κάλυψη των αναγκών ψύξης και θέρμανσης του κτιρίου Μεταλλειολόγων – Ηλεκτρολόγων Β' Φάσης αξιοποιεί υβριδικά τόσο την θερμοαποθηκευτική ικανότητα των πετρωμάτων, όσο και τη θερμότητα που εμπεριέχεται στο υπόγειο νερό η άντληση του οποίου γίνεται από βάθος 267 μέτρων.

Στο ευρύτερο γεωθερμικό πεδίο διανοίχθηκαν δύο υδρογεωτρήσεις, η μία (Γ1) παραγωγική και η άλλη (Γ2) επανεισαγωγής του νερού. Συγκεκριμένα:

- Η υδρογέωτρηση Γ1 φτάνει σε βάθος 267 μέτρα και η παροχή της ανέρχεται στα 33,5  $\mu^3/\omega$ . Είναι σωληνωμένη με γαλβανισμένους σωλήνες διαμέτρου 8 ιντσών και στη γεώτρηση έχει εγκατασταθεί υποβρύχια αντλία 75 hp, η οποία υδροδοτεί το γεωθερμικό σύστημα με το απαιτούμενο γεωθερμικό ρευστό. Τα πετρώματα που διέτρησε το γεωτρώπανο από πάνω προς τα κάτω είναι τα εξής: 0-5μ χαλαρά υλικά αργίλων και ψηφίδων, 5-30μ συγκολλημένα λατυποπαγή με ογκόλιθους, 30-125μ αργιλικό ασβεστιτικό σχιστόλιθοι και από 125μ και κάτω μάρμαρα.
- Η υδρογέωτρηση Γ2 φτάνει σε βάθος 250 μέτρων, είναι σωληνωμένη με γαλβανισμένους σωλήνες διαμέτρου 8 ιντσών. Τα πετρώματα που διατρήθηκαν από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι τον πυθμένα είναι τα εξής: 0-45μ ασθενώς συγκολλημένα γωνιώδη θραύσματα μαρμάρου (ψηφίδες) με μικρό ποσοστό αργίλου, 45-214μ κυρίως μαύροι αργιλικό σχιστόλιθοι με λίγες παρεμβολές λεπτοπλακωδών μαρμάρων και από τα 214 μέτρα έως το τέλος της γεώτρησης συμπαγές μάρμαρο. Η παροχή της γεώτρησης ανέρχεται στα 13-15  $\mu^3/\omega$  λόγω της συμπαγούς δομής των μαρμάρων. Στη γεώτρηση αυτή επανεισέρχεται το νερό στον υδοφόρο ορίζοντα μετά τη χρήση του ως γεωθερμικού υγρού.

Στο κυρίως γεωθερμικό πεδίο διανοίχθηκαν δεκατρείς ασωλήνωτες γεωτρήσεις βάθους 90-95μ δηλαδή συνολικά 1200μ γεωτρήσεων. Σε κάθε γεώτρηση έχουν εισαχθεί δύο πλαστικοί σωλήνες διαμέτρου 32 χλστ και αντοχής 16 at σε σχήμα U, οι οποίοι λειτουργούν ως γεωθερμικοί εναλλάκτες και καταλήγουν στο μηχανοστάσιο. Έτσι το συνολικό μήκος των γεωθερμικών εναλλακτών ανέρχεται στα 5300 μέτρα περίπου. Τα κενά των γεωτρήσεων πληρώθηκαν με ένεμα μπεντονίτη. Στην εικόνα 19 που ακολουθεί φαίνεται η διάταξη των γεωτρήσεων.



Εικόνα 19. Διάταξη των γεωτρήσεων σε κάτοψη (Πηγή: Αρχείο Ι. Κουμαντάκη)

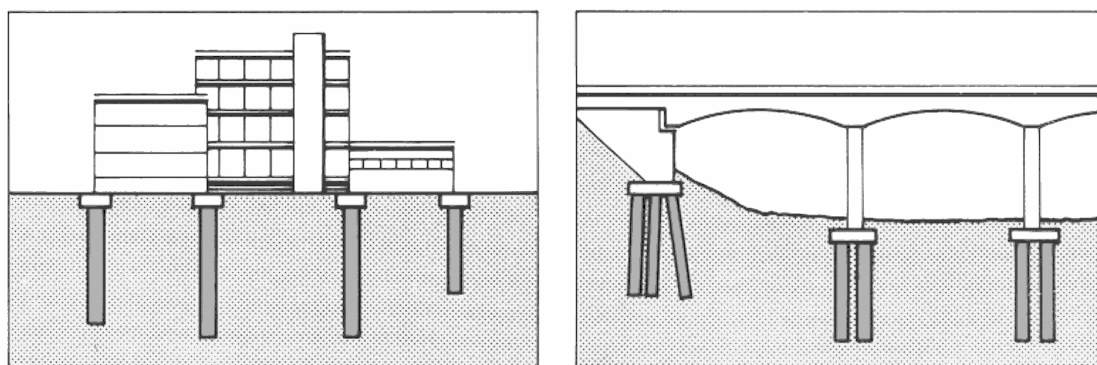
## 4.6. Ο πάσσαλος θεμελίωσης ως γεωεναλλάκτης

### 4.6.1. Η χρήση των πασσάλων θεμελίωσης για την ανταλλαγή θερμότητας με το έδαφος

Η ιδέα της αξιοποίησης των πασσάλων θεμελίωσης για τη σύζευξή τους με τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού των κτιρίων διερευνάται συστηματικά στην Αυστρία, στην Ελβετία και στη Γερμανία από τα μέσα της δεκαετίας του '80. Στο σώμα των πασσάλων θεμελίωσης ενσωματώνονται βρόχοι σωλήνων, μέσω των οποίων είναι δυνατή η ανταλλαγή θερμότητας με το ίδιο το σώμα τους και με το έδαφος που τους περιβάλλει. Στη σχετική βιβλιογραφία της αρχικής αυτής φάσης παρουσιάζεται η τεχνική κατασκευής των πασσάλων – γεωεναλλακτών, των Energy Piles όπως επικράτησε να ονομάζονται και οι πρώτες εφαρμογές της στη Βόρεια Ευρώπη. Περίπου μια δεκάδα συστημάτων με πασσάλους – γεωεναλλάκτες είχε εγκατασταθεί μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90 στην Ελβετία και στην Αυστρία. Ωστόσο ερευνητές αναφέρουν (Nagano et al, 2005) ότι η ιδέα της χρήσης των πασσάλων θεμελίωσης για τη θέρμανση και τον κλιματισμό των κτιρίων είχε διατυπωθεί στην Ιαπωνία ήδη από το 1962. Έμφαση στη χώρα αυτή δόθηκε στους χαλυβδοπασσάλους – γεωεναλλάκτες που προτάθηκαν και δοκιμάστηκαν από το 1994 (Morino&Oka, 1994).

### 4.6.2. Το πεδίο των πασσάλων θεμελίωσης κτιρίου ως γεωεναλλάκτης

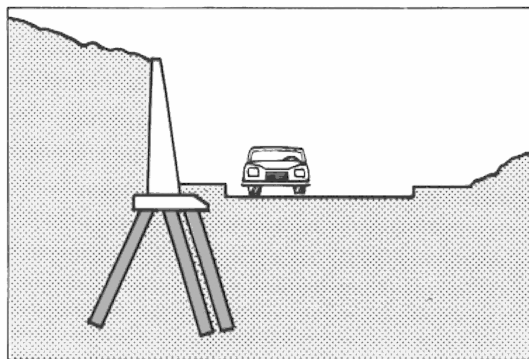
Από την ενεργειακή πλευρά, με την ενσωμάτωση δικτύων σωλήνων στους πασσάλους θεμελίωσης κτιρίων, όπου αυτοί απαιτείται να κατασκευαστούν, επιδιώκεται η θερμική ενεργοποίηση της ίδιας της θεμελίωσης και της περιοχής του εδάφους που βρίσκεται κάτω από το κτίριο.



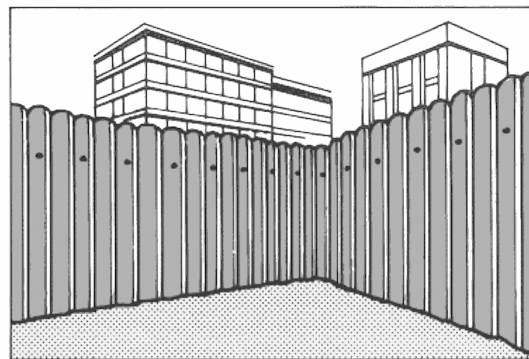
α. απλοί πάσσαλοι

β. ομάδες πασσάλων

Εικόνα 20α. Τυπικές εφαρμογές πασσάλων (Καββαδάς, 2005)



γ. κατά μήκος πασσάλωση



δ. πασσαλοδιάφραγμα

Εικόνα 20β. Τυπικές εφαρμογές πασσάλων (Καββαδάς, 2005)

Στόχος είναι η βελτιωμένη λειτουργία των εγκαταστάσεων θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων. Οι εκτεταμένες και ιδιαίτερα δαπανηρές εργασίες που έτσι κι αλλιώς θα λάβουν χώρα στο υπέδαφος για τη θεμελίωση ενός κτιρίου δίνουν την ευκαιρία να κατασκευαστεί, κάτω από το κτίριο, κάτι αντίστοιχο με το πεδίο των κατακόρυφων βρόχων σε γεωτρήσεις (κατακόρυφες γεωτρήσεις - boreholes).

Από την άποψη του τρόπου της θερμικής ενεργοποίησης του εδάφους, τα συστήματα των γεωεναλλακτών γενικά μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα συστήματα στα οποία στον γεωεναλλάκτη, δηλαδή στην θερμικά ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους, κυριαρχεί ο μηχανισμός της θερμικής αναγέννησής της. Αυτό συμβαίνει σε συστήματα με μία μόνο φάση λειτουργίας, δηλαδή κατά βάση στα συστήματα που λειτουργούν μόνο για τη θέρμανση των κτιρίων. Στα συστήματα αυτά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους απορροφάται θερμότητα από το έδαφος. Μέρος αυτής της θερμότητας ανακτάται στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους από τις εισροές θερμότητας από τις συνορεύουσες περιοχές. Μετά το πέρας της περιόδου θέρμανσης τα συστήματα αυτού του τύπου τίθενται εκτός λειτουργίας για μεγάλη περίοδο. Έτσι η περιοχή του ενεργοποιημένου εδάφους αναγεννιέται θερμικά, με τη μετάδοση της θερμότητας από τις περιοχές εκτός των ορίων της (επιφάνεια του εδάφους, περιοχές του υπεδάφους σε επαφή με την περιοχή του γεωεναλλάκτη). Τυπικό παράδειγμα τέτοιων συστημάτων είναι αυτά των οριζόντιων γεωεναλλακτών που αναπτύσσονται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το μεγαλύτερο τμήμα των εκρών θερμότητας από την ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους που απαιτείται για την κάλυψη των απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση, προέρχεται κυρίως από την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται στην επιφάνεια του εδάφους (Μπόζης, 2011).

Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα συστήματα που σε ετήσια βάση αξιοποιούν την ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους κυρίως ως αποθήκη θερμότητας. Θερμότητα που απορρίπτεται στην ενεργοποιούμενη περιοχή του εδάφους κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου (ψύξη στο κτίριο), δεν απομακρύνεται εύκολα έξω από την περιοχή, αλλά αποθηκεύεται σε αυτήν και χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου (θέρμανση στο κτίριο). Κρίσιμο ζήτημα εδώ είναι η σχέση μεταξύ των απαιτήσεων του κτιρίου σε θέρμανση και σε ψύξη. Όταν οι διαφορές των απαιτήσεων αυτών είναι μεγάλες,

υπάρχει μια βαθμιαία άνοδος ή πτώση της θερμοκρασίας από χρονιά σε χρονιά, που μπορεί να καταστήσει τη λειτουργία του συστήματος αντιοικονομική.

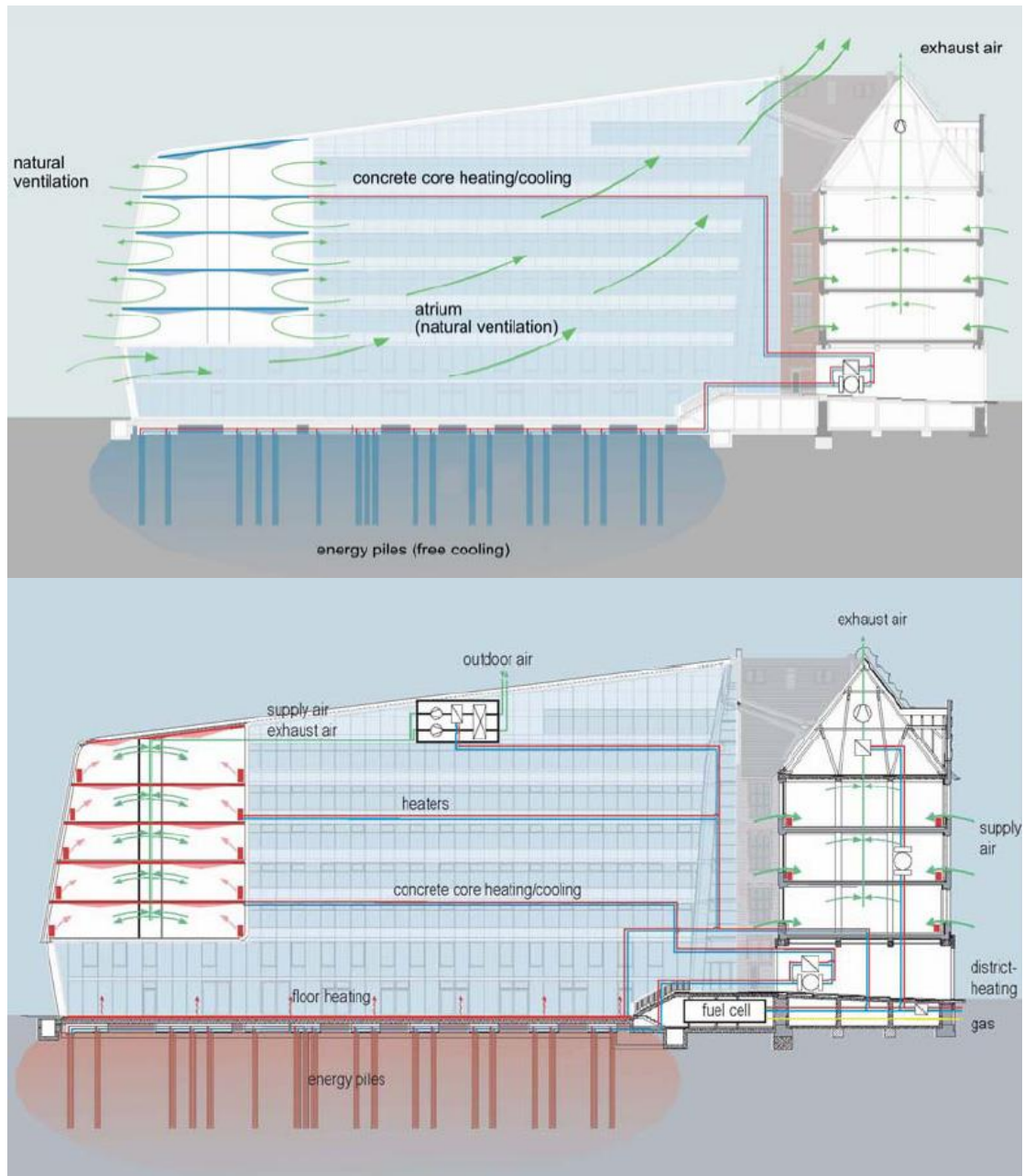
Οι παραπάνω βασικές αρχές είναι αυτές που αναγνωρίζει κανείς στη λειτουργία όλων των συστημάτων γεωεναλλακτών, είτε αυτά είναι πάσσαλοι – γεωεναλλάκτες είτε κοινές κατακόρυφες γεωτρήσεις. Οι σημαντικότερες διαφορές των πεδίων πασσάλων – γεωεναλλακτών από τα πεδία των κατακόρυφων γεωτρήσεων είναι:

- Το σημαντικότερο κόστος στην κατασκευή πεδίων κατακόρυφων γεωεναλλακτών είναι το κόστος ανόρυξης των γεωτρήσεων (drilling) και πλήρωσής τους (grouting). Στην περίπτωση των πεδίων πασσάλων – γεωεναλλακτών, οι εργασίες αυτές είναι τμήμα της κατασκευής της ίδιας της θεμελίωσης του κτιρίου.
- Το πεδίο των πασσάλων – γεωεναλλακτών βρίσκεται ακριβώς κάτω από το κτίριο. Δεν καταλαμβάνει δηλαδή πρόσθετη επιφάνεια εδάφους έξω από το κτίριο που στην πλειονότητα των περιπτώσεων απαιτεί ένα πεδίο κατακόρυφων γεωτρήσεων.
- Ο πάσσαλος γεωεναλλάκτης είναι μια διαφορετική διάταξη εναλλαγής θερμότητας με το έδαφος. Έχει πολύ μεγαλύτερη διάμετρο από μια κατακόρυφη γεώτρηση, πολλαπλές σωληνώσεις σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους και μεγάλη θερμική μάζα συγκεντρωμένη μέσα από αυτές.
- Η λογική σχεδίασης των συστημάτων που θα συζευχθούν με πεδία πασσάλων – γεωεναλλακτών είναι διαφορετική από αυτήν των κατακόρυφων γεωτρήσεων. Στα πεδία πασσάλων γεωεναλλακτών το μέγιστο μήκος ανάπτυξής τους και ο όγκος του ενεργοποιούμενου εδάφους είναι δεδομένα από τη μελέτη της θεμελίωσης του κτιρίου. Αναζητείται σε γενικές γραμμές η διαστασιολόγηση ενός συστήματος που θα αξιοποιεί με τον αποδοτικότερο οικονομικά τρόπο το δεδομένης έκτασης πεδίο γεωεναλλακτών. Στα πεδία των κατακόρυφων γεωτρήσεων η λογική είναι κατά κανόνα αντίστροφη: με δεδομένες τις ανάγκες ενός κτιρίου (φορτία και καταναλώσεις), αναζητούνται οι διαστάσεις του πεδίου των γεωεναλλακτών που θα τις καλύπτουν με οικονομικά αποδεκτό τρόπο (Μπόζης, 2011).



Εικόνα 21. Οι βρόχοι σωληνών και ο σπλισμός σε έγχυτο πάσσαλο -γεωεναλλάκτη. Φωτογραφία της διατομής και σχέδιο όψης καθ' ύψος (Widerin, 2009).





Εικόνα 22. Το σύστημα αξιοποίησης των πασσάλων – γεωεναλλακτών κατά τη περίοδο ψύξης (επάνω) και την περίοδο θέρμανσης (κάτω) του κτιρίου Energieforum στο Βερολίνο (Schnürer et al.).

## 5. Έρευνα γεωθερμικών πεδίων

### 5.1. Εισαγωγή

Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί οι βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας και τα γενικότερα χαρακτηριστικά των γεωθερμικών πεδίων. Στη συνέχεια η εργασία θα καταπιαστεί με το πώς ερευνώνται τα γεωθερμικά πεδία και με τις μεθόδους που εφαρμόζονται για να προσδιοριστεί το μέγεθός τους.

### 5.2. Σχεδιασμός και στρατηγικές έρευνας

Σκοπός και στόχος της εφαρμοσμένης έρευνας επί των γεωθερμικών συστημάτων είναι η ανίχνευση και εντοπισμός συγκεντρώσεων θερμότητας σε περιοχές προσπελάσιμες και αξιοποιήσιμες με τα σημερινά τεχνικά μέσα. Αντικείμενα της έρευνας είναι:

1. Ο εντοπισμός γεωθερμικών φαινομένων και πεδίων.
2. Η αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης των πεδίων, i. με εκτίμηση της ποσότητας και μεγέθους των επιφανειακών εκφορτίσεων των γεωθερμικών ρευστών και, ii. με εκτίμηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.
3. Η εκτίμηση του μεγέθους των συστημάτων.
4. Ο προσδιορισμός της ακριβούς φύσης των συστημάτων και πεδίων (π.χ. ξηρού ατμού, υγρού ατμού, διφασικά, ΘΞΠ [Θερμά Ξηρά Πετρώματα] κ.λπ.).
5. Ο εντοπισμός παραγωγικών ζωνών.
6. Ο προσδιορισμός της ενθαλπίας των ρευστών που θα παράγονται από τις γεωτρήσεις.
7. Ο σχηματισμός τράπεζας πληροφοριών που θα χρησιμεύσει σε μελλοντική παρακολούθηση της απόκρισης του πεδίου στην εκμετάλλευση.
8. Η εκτίμηση και αξιολόγηση της πιθανής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την εκμετάλλευση.
9. Η απόκτηση γνώσεων σχετικών με τοπικές ιδιαιτερότητες που πιθανόν να δυσκολέψουν την ανάπτυξη και εκμετάλλευση (π.χ. χαμηλό pH, πιθανότητα κατολισθήσεων ή επαγόμενης σεισμικότητας, περιεκτικότητα σε οξειδωτικά αέρια κ.ά.).

Οι ερευνητικές εργασίες πρέπει να σχεδιασθούν, ώστε να είναι μάλλον κατάλληλες για το προς μελέτη γεωθερμικό σύστημα. Εκτός από την περίπτωση των εξειδικευμένων, αμιγώς ακαδημαϊκών μελετών, τα αντικείμενα έρευνας είναι όλα τα προαναφερθέντα αλλά η σχετική σπουδαιότητα και προτεραιότητα κάθε αντικειμένου θα εξαρτηθεί από έναν αριθμό παραμέτρων που επηρεάζουν ολόκληρο το ερευνητικό πρόγραμμα. Για παράδειγμα, η εκτίμηση του μεγέθους της γεωθερμικής ενεργειακής πηγής έχει μικρή σημασία όταν αυτή πρόκειται να αξιοποιηθεί για εφαρμογές μικρής κλίμακας, οι οποίες

προφανώς απαιτούν πολύ λιγότερη θερμική ενέργεια από όση εκφορτίζεται με φυσικό τρόπο. Εάν η θερμική ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για περιφερειακή θέρμανση, οπότε και απαιτούνται σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, η στόχευση ρευστών υψηλής ενθαλπίας είναι άσκοπη (Τζάνης, 2010).

Ένα από τα αντικείμενα ενός ερευνητικού προγράμματος είναι ο προσδιορισμός της ακριβούς φύσης του πεδίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η προκαταρκτική γεωχημική αναγνώριση θα δώσει ικανοποιητικές απαντήσεις σ' αυτό το πρόβλημα.

Η τοπογραφία της περιοχής έρευνας θέτει περιορισμούς, όχι μόνον στο πλήθος των τόπων όπου είναι δυνατή η παρατήρηση, δειγματοληψία ή μέτρηση, αλλά επίσης επηρεάζει την επιλογή των εφαρμόσιμων γεωφυσικών μεθοδολογιών.

Η τοπογραφία επιδρά σημαντικότερα στην ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων, αν και υπάρχει δυνατότητα σχετικών διορθώσεων για τις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους. Παρ' όλα αυτά, εάν το ανάγλυφο είναι πολύ τραχύ, οι ηλεκτρικές και σεισμικές κυρίως μέθοδοι είναι πολύ δύσκολο να διορθωθούν, με αποτέλεσμα να δίδουν αμφιλεγόμενα αποτελέσματα. Η πυκνή δασοκάλυψη περιορίζει την εφαρμογή σεισμικών μεθόδων, λόγω του θορύβου που δημιουργείται όταν φυσά ισχυρός άνεμος.

Άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το κλίμα, που είναι δυνατόν να περιορίσει τον διαθέσιμο για εργασίες υπαίθρου χρόνο, ή και να καθορίσει την εποχή πραγματοποίησής τους. Υπάρχουν μέθοδοι έρευνας (π.χ. ορισμένες γεωχημικές) που επηρεάζονται απαγορευτικώς από τις κλιματικές συνθήκες συγκεκριμένων εποχών, ενώ και αρκετές γεωφυσικές μέθοδοι και όργανα, κυρίως ηλεκτρικά και ηλεκτρομαγνητικά, δεν αποδίδουν τα αναμενόμενα κάτω από συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες.

Η εμπειρία και κατάρτιση του προσωπικού που πραγματοποιεί, επεξεργάζεται και ερμηνεύει τις μετρήσεις υπαίθρου είναι ιδιαιτέρως σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού του ερευνητικού προγράμματος. Κυρίως, πρέπει να κατανοείται ότι η στρατηγική έρευνας που θα επιλεγεί πρέπει να έχει στόχο την εύρεση θερμότητας σε προσπελάσιμη και χρησιμοποιήσιμη μορφή και, όπως τονίζεται από τους Combs και Muffler (1973), οι πλέον χρήσιμες μέθοδοι δεν είναι απαραίτητες αυτές που απεδείχθησαν πλέον επιτυχείς στην έρευνα πετρελαίου ή μεταλλευμάτων.

### **5.3. Υδρολογικές παράμετροι στην έρευνα γεωθερμικών συστημάτων**

Αν και η χωροταξία των γεωθερμικών συστημάτων ελέγχεται από την περιφερειακή γεωλογία, τα χαρακτηριστικά τους που αποτελούν αντικείμενο έρευνας είναι κυρίως υδρολογικά φαινόμενα, τα οποία εξαρτώνται τόσο από την πηγή θερμότητας, όσο και από την φύση του ενδιαμέσου ρευστού και την υδροπερατή διαδρομή μέσω της οποίας τούτο οδεύει. Συνεπώς οι μέθοδοι έρευνας και διασκόπησης θα πρέπει να είναι ικανές να ανιχνεύουν, αμέσως ή εμμέσως, την παρουσία ανωμάλως υψηλών θερμοκρασιών, υπογείων ρευστών και μεταβολών της υδραυλικής διαπερατότητας.

### **5.3.1. Γεωλογικές, υδρολογικές και ορυκτολογικές μελέτες**

Οι γεωλογικές μελέτες, υπό την ευρύτερη έννοιά τους, παίζουν έναν σημαντικό ρόλο σε όλες τις φάσεις γεωθερμικής έρευνας και ανάπτυξης, από τον αρχικό προσδιορισμό των γεωθερμικά αξιόλογων περιοχών, μέχρι τα τελικά στάδια αξιολόγησης των γεωτρήσεων και παρακολούθησης των γεωλογικών αποτελεσμάτων της εκμετάλλευσης. Ο στόχος της γεωλογικής μελέτης στο προκαταρκτικό στάδιο είναι να εκτιμήσει την πιθανότητα της άντλησης του γεωθερμικού ρευστού σε χρησιμοποιήσιμες ποσότητες. Εκτός αν υπάρχει κάποιος αποχρών διαχειριστικός λόγος, η επιλογή των περιοχών λεπτομερούς μελέτης θα γίνει με βάση αυτήν την προκαταρκτική γεωλογική αξιολόγηση.

Η προκαταρκτική χημική ανάλυση των εκφορτιζόμενων ρευστών θα δώσει πληροφορίες ενδεικτικές των φυσικών συνθηκών που επικρατούν στο ερευνούμενο σύστημα.

Η αναγνώριση της περιφερειακής γεωλογίας και τεκτονικής είναι σημαντική, εφόσον βοηθά στον καθορισμό της έμφασης που θα δοθεί στα επόμενα στάδια λεπτομερούς έρευνας.

Η μελέτη των υδροθερμικών αποθέσεων και εξαλλοιώσεων γύρω από τις επιφανειακές θερμικές εκδηλώσεις μπορεί να δώσει μια ένδειξη της ηλικίας του συστήματος και περίπου εάν υπήρξε περισσότερο ή λιγότερο ενεργό στο παρελθόν. Χρήσιμη είναι η μελέτη και συσχέτιση των επιφανειακών θερμικών εκδηλώσεων με την γεωλογία, την τοπογραφία και την ενεργό τεκτονική, από τις οποίες συνηθέστατα ελέγχονται.

Τέλος σύνηθες αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης γεωθερμικών πεδίων είναι οι εδαφικές καθιζήσεις. Η αναγνώριση ασθενών σχηματισμών με την βοήθεια γεωμηχανικών αναλύσεων των πυρήνων των γεωτρήσεων μπορεί, εφόσον υπάρχει καλή χωρική κατανομή των γεωτρήσεων, να επιτρέψει στον προσδιορισμό των περιοχών που πιθανόν να επηρεασθούν. Η μέτρηση άλλων φυσικών παραμέτρων, όπως η πυκνότητα, ειδική αντίσταση, μαγνητικές ιδιότητες κ.ά. στα δείγματα των πυρήνων είναι επίσης χρήσιμη διότι παρέχει στοιχεία για την επαναξιολόγηση των γεωφυσικών ερευνών και ερμηνειών, και την βελτίωση των θεωρητικών προτύπων δομής και λειτουργίας του υπό διερεύνηση γεωθερμικού συστήματος και πεδίου. Μέσω του ρόλου τους στην παροχή των στοιχείων για τη βελτίωση των προηγούμενων ερμηνειών, οι γεωλογικές μελέτες συμβάλλουν στην διερεύνηση ενός πεδίου σε όλα τα στάδια εξέλιξης της έρευνας (Τζάνης, 2010).

### **5.4. Γεωχημικές μελέτες - γεωθερμομετρία**

Στα πρώτα στάδια της διερεύνησης ενός γεωθερμικού πεδίου, η ανάλυση δειγμάτων από θερμά και ψυχρά επιφανειακά ύδατα, πηγές, και ατμίδες μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για αρκετά χαρακτηριστικά του συστήματος, με αρκετά μικρό κόστος. Μεταξύ των σπουδαιότερων εξ αυτών περιλαμβάνεται και η εκτίμηση των υπεδαφικών θερμοκρασιών, χωρίς δαπανηρές γεωτρήσεις.

Με γεωχημικές μεθόδους είναι επίσης δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων περί του τύπου του συστήματος (π.χ. ατμού ή υγρό), της προέλευσης των ρευστών, του γεωλογικού και ορυκτολογικού περιβάλλοντος του συστήματος, καθώς και περί πιθανών προβλημάτων της διαδικασίας εκμετάλλευσης (π.χ. αποφράξεις ή διαβρώσεις των σωλήνων). Οι ποιοτικές

αυτές πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γνώμονας για τον περαιτέρω σχεδιασμό και ανάπτυξη των ερευνών. Οι μέγιστες υπεδαφικές θερμοκρασίες στις οποίες υποβάλλονται τα γεωθερμικά ρευστά αποτυπώνονται στις αναλογίες ιόντων και σταθερών ισοτόπων των διαλελυμένων υλικών, αλλά και τουίδιου του διαλύτη (νερού).

### 5.5. Γεωφυσικές μέθοδοι

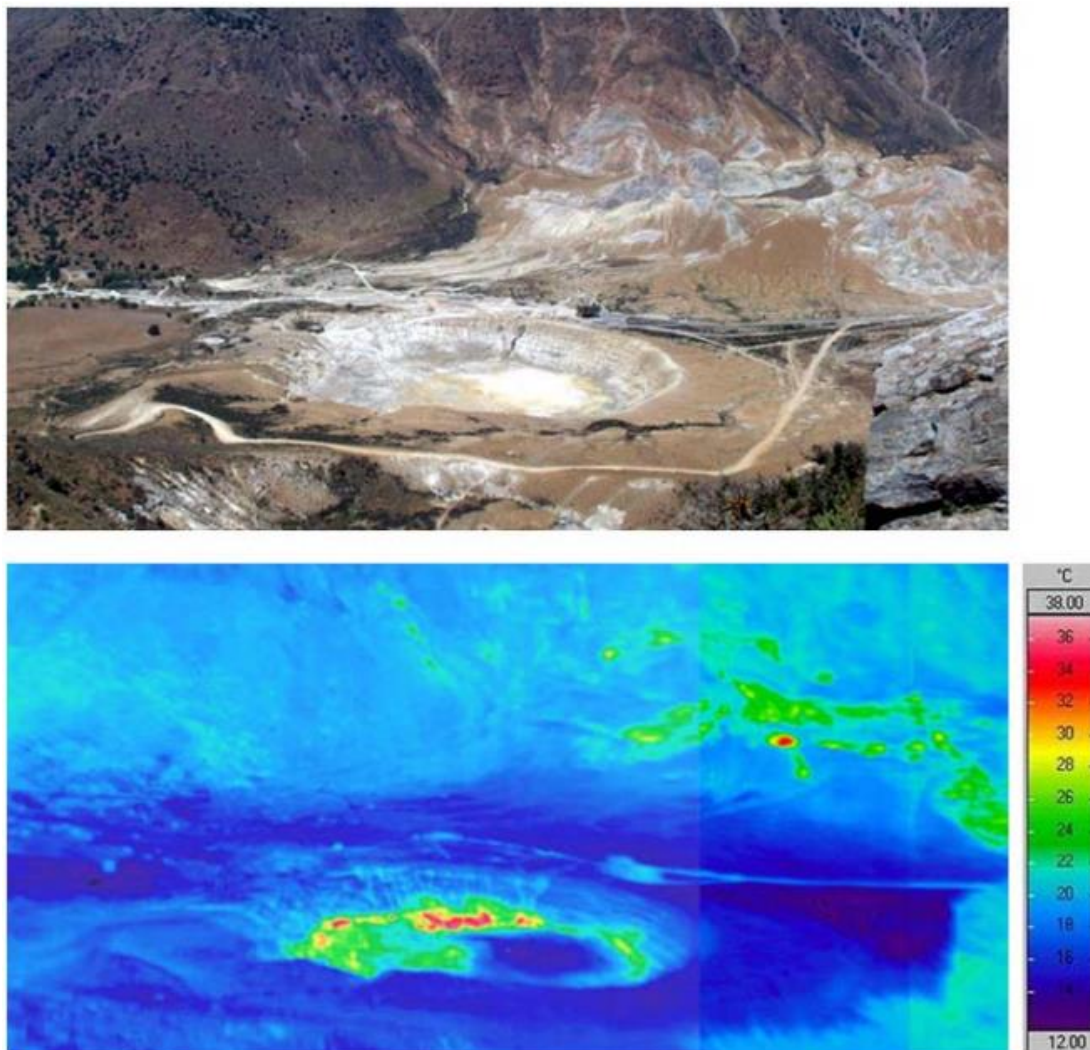
Τα γεωθερμικά συστήματα αποτελούν συνισταμένη πολύπλοκων γεωλογικών και υδρολογικών φαινομένων. Είναι σπανιότατο αν όχι αδύνατο το να επιτευχθεί ικανοποιητικός προσδιορισμός των παραμέτρων εκμετάλλευσής τους με μία, ή έστω και λίγες τεχνικές και μεθοδολογίες έρευνας. Η ερευνητική διαδικασία απαιτεί την συμβολή γεωλόγων, υδρολόγων, γεωχημικών, γεωφυσικών και τεχνολόγων γεωτρήσεων, καθένας από τους οποίους αναθεωρεί και επαναξιολογεί τα αποτελέσματά του, υπό το φως των ανακαλύψεων των συνερευνητών του.

Η συνεισφορά των παραδοσιακών μεθόδων δεν εξαντλείται στο διερευνητικό στάδιο. Χρησιμοποιούνται επίσης και στο στάδιο της παραγωγής. Μικροσεισμικές μελέτες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των επαγόμενων από την υδραυλική θραύση διαρρήξεων σε ΘΞΠ και της όλης πορείας της παραγωγής, στην παρακολούθηση και μελέτη της πιθανής επαγομένης σεισμικότητας (ανθρωπογενείς σεισμοί) λόγω της εκμετάλλευσης. Μικροβαρυτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ολικής απώλειας μάζας των συστημάτων λόγω άντλησης ρευστών και την απόκριση των πεδίων στην εκμετάλλευση, συμπεριλαμβανομένων και των πιθανών τοπικών γεωδυναμικών ανισορροπιών που είναι δυνατόν να προκύψουν από την εκμετάλλευση (κίνδυνος καθιζήσεων, κατολισθήσεων κ.λπ.). Είναι γεγονός ότι οι γεωφυσικές μεθοδολογίες συχνά προσφέρουν πληροφορία συγκρίσιμη με αυτή των γεωτρήσεων, με πολύ μικρότερο κόστος. Πρέπει όμως να γίνει κατανοητό ότι καμία ειδική μεθοδολογία ή τεχνική δεν αποτελεί πανάκεια ή είναι γενικώς εφαρμοστέα. Οι εφαρμόσιμες μεθοδοί πρέπει να επιλέγονται με προσοχή, ώστε να είναι προσαρμοσμένες στις εκάστοτε συνθήκες (Τζάνης, 2010).

#### 5.5.1. Μετρήσεις θερμοκρασίας και θερμικής ροής

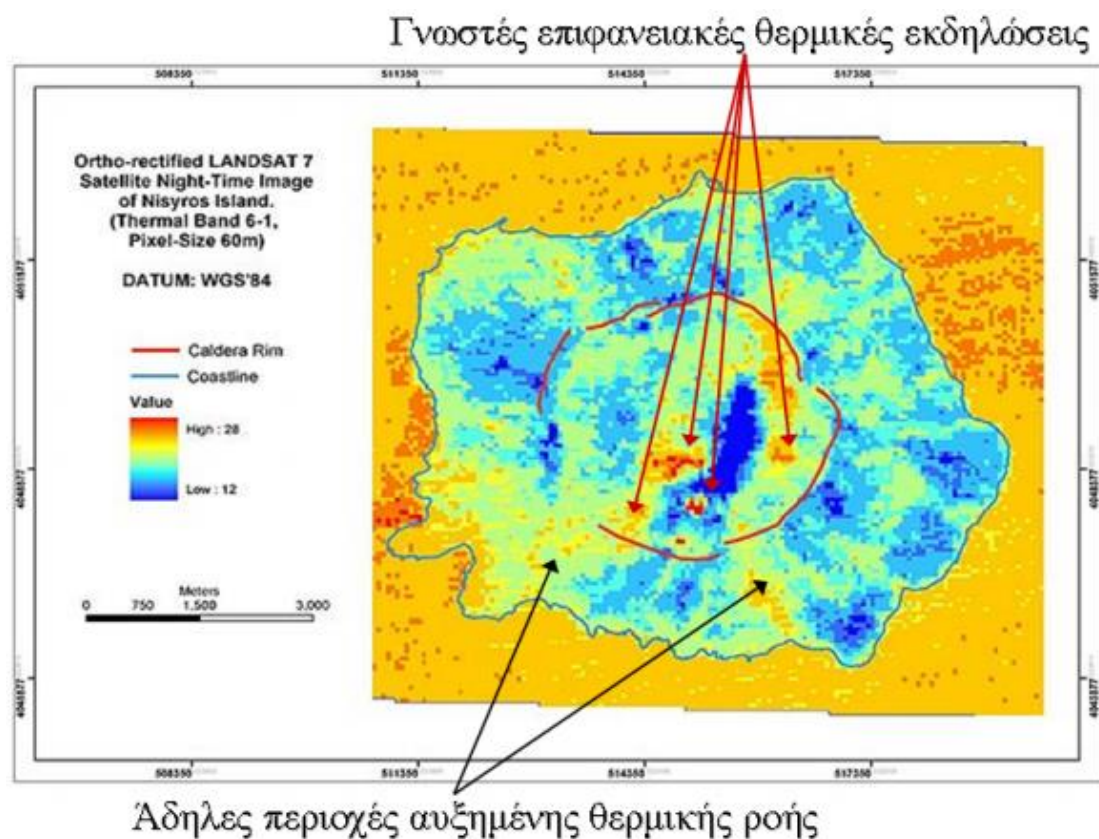
Τα γεωθερμικά πεδία χαρακτηρίζονται από επιφανειακή θερμική ροή πολλαπλάσια της μέσης παγκοσμίου τιμής των  $63\text{mW/m}^2$ . Η μέτρηση του φαινομένου αυτού συνεπώς αποτελεί απαραίτητο στοιχείο κάθε γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος και, παρέχει πληροφορίες και ενδείξεις περί της έκτασης του γεωθερμικού συστήματος και του θερμικού δυναμικού του. Οι White (1969) και Dickinson (1976) έδειξαν ότι σε γεωθερμικές εκδηλώσεις και εκμεταλλεύσεις μεγάλης κλίμακος, αναμένονται τιμές μέχρι και αρκετές χιλιάδες φορές μεγαλύτερες της κανονικής (μέσης). Οι σύγχρονες μέθοδοι τηλεπισκόπησης στην περιοχή του υπερύθρου, από αέρος ή διαστήματος, συμβάλλουν στην ταχεία αναγνώριση περιοχών ανωμάλως υψηλής θερμικής ροής (γεωθερμογραφία). Οι περισσότερες δημοσιευθείσες μελέτες έχουν γίνει με χρήση σαρωτών υπερύθρου (infrared scanners) οι οποίοι ανιχνεύουν την ακτινοβολούμενη παρά την ανακλώμενη ενέργεια, στις

ζώνες (μηκών κύματος) 3μ-5μ και 8μ-14μ, και περιορίζονται στην απεικόνιση περιοχών με θερμοκρασία σαφώς ανώτερη της περιβάλλουσας (Εικόνα 23).



Εικόνα 23. Απεικόνιση με σύγχρονο ψηφιακό θερμικό εικονολήπτη. Επάνω: Ημερήσια φωτογραφία ορατού φάσματος του κρατήρα φρεατικής έκρηξης Στέφανος, στην καλδέρα της Νισύρου. Κάτω: Υπέρυθρη νυκτερινή φωτογραφία του κρατήρα ληφθείσα από ίδιο σημείο. Διακρίνονται καθαρά οι θέσεις των ατμίδων και η ένταση της δραστηριότητάς τους κατά την στιγμή της λήψης, τόσο στην περίμετρο της βάσης του κρατήρα όσο και στα πρηνή του παρακείμενου υψώματος Προφήτης Ηλίας. Πηγή: <http://www.remsenslab.geol.uoa.gr/> (Εργαστήριο Τηλεανίχνευσης του ΕΚΠΑ)

Με κατάλληλο έλεγχο και επαλήθευση επί του εδάφους (ground-truth measurements), είναι αμέσως δυνατή η συσχέτιση των τηλεανιχνευομένων θερμών ζωνών με περιοχές υψηλής θερμικής ροής. Η σπουδαιότητα της υπερύθρου τηλεπισκόπησης έγκειται στην δυνατότητά της να ανιχνεύει ταχύτατα, άγνωστες προηγουμένως θερμές εστίες σε δυσπρόσιτες, δύσβατες ή και ανεξερεύνητες περιοχές.



Εικόνα 24. Θερμική απεικόνιση με σύγχρονο δορυφορικό θερμικό σαρωτή. Θερινή νυκτερινή υπέρυθρη φωτογραφία της Νισύρου από τον σαρωτή του δορυφόρου LANDSAT-7. Η θαλάσσια περιοχή φαίνεται θερμότερη (~ 20-25°C) λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας της θάλασσας. Στην επιφάνεια της χέρσου διακρίνονται σαφέστατα τόσο οι γνωστές επιφανειακές ατμικές και λοιπές θερμικές εκδηλώσεις, όσο και άδηλες κατά τα άλλα περιοχές αυξημένης τοπικής θερμικής ροής που σχετίζονται με την ηφαιστειότητα και το γεωθερμικό σύστημα. Πηγή: <http://www.remsenslab.geol.uoa.gr/>

Κατά την διάρκεια επίγειων διασκοπήσεων, η θερμοκρασία μετράται, α) εντός πολύ ρηχών γεωτρήσεων (1-2m) οπότε οι μετρήσεις επηρεάζονται πολύ από τις καιρικές συνθήκες, βλάστηση κ.λπ. και, β) εντός βαθύτερων γεωτρήσεων (>15m) ώστε να ελαχιστοποιούνται τέτοιες επιδράσεις. Στην δεύτερη περίπτωση, η γεώτρηση οφείλει να είναι δειγματοληπτική, ιδίως σε γεωλογικώς πολύπλοκες περιοχές, ώστε να διευκολύνεται η εργαστηριακή μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων. Μετρήσεις λαμβάνονται σε διάφορα βάθη εντός των γεωτρήσεων, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της θερμοβαθμίδας. Οι περισσότερες δημοσιευθείσες μελέτες θερμοβαθμίδας και θερμικής ροής, βασίζονται σε μετρήσεις θερμοκρασίας εντός γεωτρήσεων βάθους από 15 ως άνω των 100 μέτρων, διότι θεωρείται ότι μόνον έτσι είναι δυνατόν να αποφευχθούν οι εξωγενείς επιδράσεις και να καταστούν αξιόπιστα τα αποτελέσματα (Τζάνης, 2010).

## **5.6. Δυσκολίες κατά την διεξαγωγή της προκαταρκτικής γεωθερμικής έρευνας στα πλαίσια της παρούσας εργασίας**

Πολλές από τις αντιξοότητες και δυσκολίες που περιγράφονται παραπάνω και που είναι πιθανό να συναντήσει κανείς κατά τη συλλογή δεδομένων υπαίθρου, οδήγησαν σε αναθεωρήσεις της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, ως περιοχή έρευνας είχε επιλεχθεί ο οικισμός Κυψέλη στον Δήμο Σοφάδων του νομού Καρδίτσας καθώς σε γειτονικούς οικισμούς είχαν μετρηθεί υψηλές θερμοκρασίες στο νερό γεωτρήσεων άρδευσης και στα πλαίσια ενός προγράμματος καταγραφής και αξιολόγησης των γεωθερμικών πεδίων της χώρας που πραγματοποιεί το ΙΓΜΕ, στάλθηκε συνεργείο στην περιοχή μελέτης για συλλογή στοιχείων. Καθώς επρόκειτο για μία προκαταρκτική έρευνα και αφού δεν υπήρχε προϋπολογισμός για διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων, θα αξιοποιούνταν το πυκνό ιδιωτικό δίκτυο υδρογεωτρήσεων της περιοχής που χρησιμοποιείται για την άρδευση των αγροτικών εκτάσεων.

Στα πλαίσια της συνεργασίας με το ΙΓΜΕ για τη εύρεση δεδομένων για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, συμμετείχα στην τριήμερη αυτή αποστολή με σκοπό να πραγματοποιήσω θερμομετρήσεις και να συλλέξω δείγματα νερού από τις γεωτρήσεις για να πραγματοποιηθεί αργότερα υδροχημική ανάλυση των δειγμάτων στο εργαστήριο, γεγονός που απαιτούσε τη διήθησή τους για την απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων και την οξίνιση των δειγμάτων με ισχυρό οξύ για τη συντήρηση του χημικού τους χαρακτήρα τους για να μπορούν να αναλυθούν για μέταλλα αργότερα στο εργαστήριο.

Η πρώτη δυσκολία που συναντήθηκε ήταν αρχικά το γεγονός πως για την προσέγγιση των γεωτρήσεων απαιτούνταν όχημα με τετρακίνηση καθώς έπρεπε να χρησιμοποιηθούν αγροτικές οδοί, οι οποίες λόγω πρόσφατης πολυήμερης έντονης βροχόπτωσης δυσχέραιναν ακόμη περισσότερο την πορεία.

Στην συνέχεια και επειδή η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε στα τέλη Σεπτεμβρίου και σε περίοδο που όπως αναφέρθηκε είχε προηγηθεί έντονη βροχόπτωση, αλλά που ούτως ή άλλως οι αγρότες σταματάνε την άρδευση, η πλειονότητα των γεωτρήσεων είχαν σταματήσει να αντλούνται και είχαν αφαιρεθεί οι ιμάντες που δίνουν κίνηση στην αντλία. Στις ελάχιστες περιπτώσεις που δεν είχαν αφαιρεθεί ακόμα, δεν ήταν δυνατό να λειτουργήσει η αντλία καθώς κατά τη διάρκεια της προαναφερθείσας κακοκαιρίας, κεραυνοί είχαν βλάψει το τριφασικό δίκτυο που τροφοδοτούσε τις ηλεκτρικές αντλίες με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η δειγματοληψία.

Τελικά από τις σχεδόν 250 γεωτρήσεις που απογράφηκαν στην αποστολή αυτή, συγκεντρώθηκαν μόλις 4 δείγματα τα οποία προφανώς δεν ήταν αρκετά για τη δημιουργία βάσης δεδομένων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την έλλειψη στοιχείων για τα βάθη των γεωτρήσεων οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικής περιοχής μελέτης, για την οποία θα ήταν διαθέσιμα επαρκή στοιχεία.

Η επόμενη περιοχή που θεωρήθηκε κατάλληλη ως περιοχή μελέτης ήταν η Καλαμπάκα. Για την περιοχή αυτή έγινε μια αρχική συγκέντρωση και επεξεργασία βιβλιογραφικών πηγών, αλλά ενώ είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις και αναλύσεις στην περιοχή από την



αντίστοιχη υπηρεσία, τα στοιχεία αυτά δεν μπορούσαν να δημοσιοποιηθούν την περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας. Έτσι έπρεπε για μία ακόμα φορά να αναζητηθεί καινούργια περιοχή διερεύνησης στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε να είναι η λεκάνη του Αλμυρού Μαγνησίας.

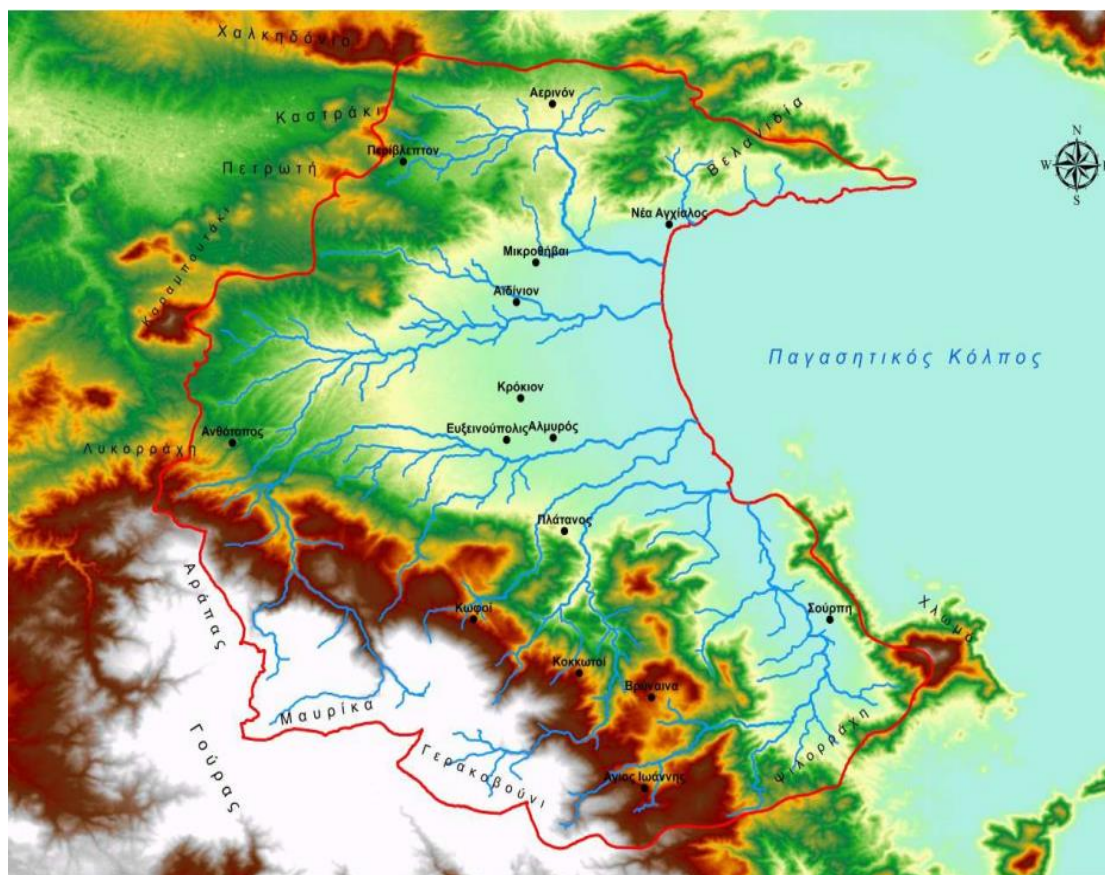
## 6. Περιοχή μελέτης

### 6.1. Εισαγωγή

Η λεκάνη Αλμυρού, με την ευρύτερή της έννοια, αποτελείται από το υδροφόρο σύστημα της προσχωματικής λεκάνης Αλμυρού με τις κύριες υπολεκάνες της (υπολεκάνη Ευξεινούπολης και υπολεκάνη Σούρπης) και περιβάλλεται από ανθρακικά πετρώματα, στα οποία αναπτύσσονται δύο καρστικά υδροφόρα συστήματα. Πρόκειται για το καρστικό υδροφόρο σύστημα Αλμυρού και το καρστικό υδροφόρο σύστημα της Όθρυς. Η συνολική της έκταση είναι 817 km<sup>2</sup> και η περίμετρός της 179km. Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου της υπολεκάνης είναι άλλοτε δενδριτική και άλλοτε παράλληλη. Από τη μορφολογική ανάλυση της περιοχής προκύπτει πως η μορφή του αναγλύφου οφείλεται καταρχήν στην τεκτονική-νεοτεκτονική δράση που παρατηρείται σε αυτήν από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, με την επαναδραστηριοποίηση πολλών ρηγμάτων κατά το Τεταρτογενές, και δευτερευόντως στις κλιματολογικές συνθήκες και στη διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων. Χαρακτηριστικό επίσης της λεκάνης του Αλμυρού είναι η σχετική βύθιση του ανατολικού τμήματος της λεκάνης σε σχέση με το δυτικό, λόγω νεοτεκτονικών δυνάμεων. Αναφορικά με το υδρογραφικό δίκτυο προκύπτει ότι ο κύριος κλάδος είναι 6ης τάξης με διεύθυνση Α-Δ. Σύμφωνα με τον Γαλανάκη (1997), αλλά και από την παραπάνω ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά, προκύπτει πως η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου της υπολεκάνης ελέγχεται από την πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα ρηγμάτων.

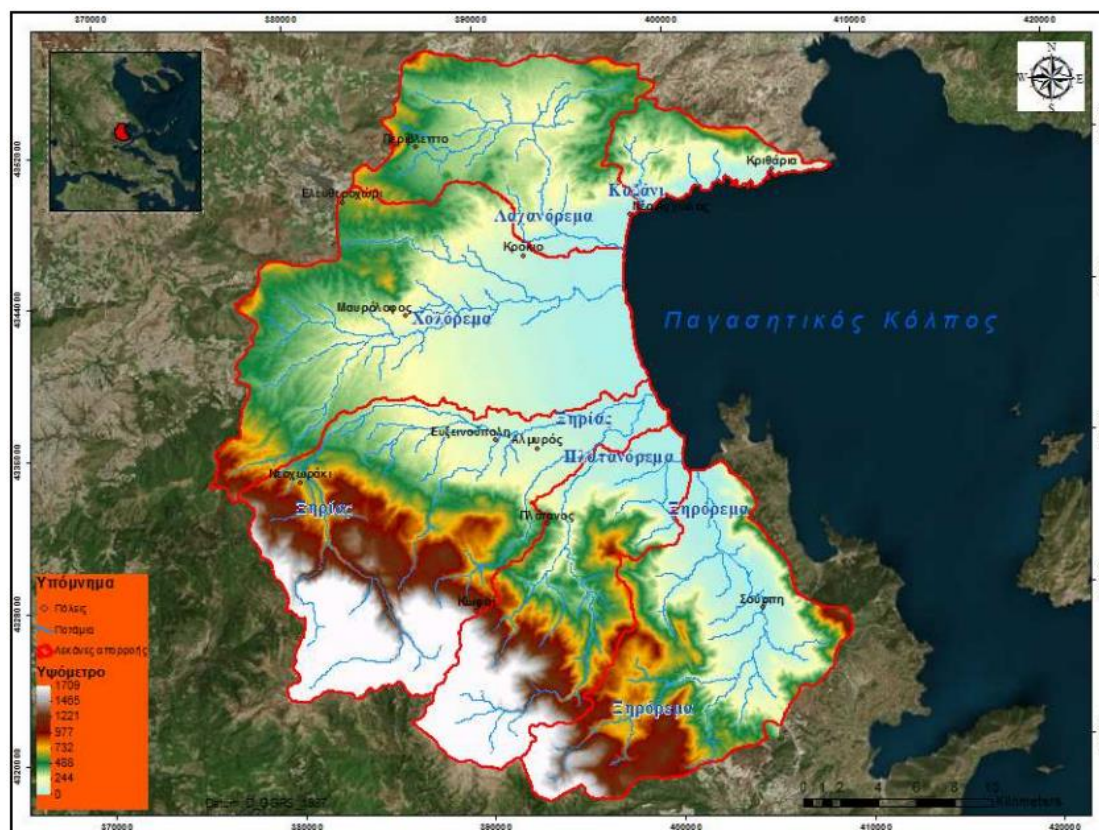
### 6.2. Υδρολογία της περιοχής

Η λεκάνη του Αλμυρού έχει έκταση 817km<sup>2</sup>, περίμετρο 179 km και μέσο υψόμετρο 374 m. Απαντάται στην νοτιοανατολική Θεσσαλία. Η δυτική ημιορεινή και χαμηλού ανάγλυφου χερσαία περιοχή της λεκάνης αποτελεί τμήμα του ενιαίου βυθίσματος Αλμυρού-Παγασητικού, το οποίο αναπτύσσεται με διεύθυνση Α-Δ. Τα υπόλοιπα 2/3 του βυθίσματος καλύπτονται ανατολικά από τα νερά του Παγασητικού κόλπου, σε βάθη μέχρι και 100m. Ο υδροκρίτης της λεκάνης ορίζεται στα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά από την κορυφή Βελανιδιά (532m), το Χαλκηδόνιο όρος (724m), τις Πόρτες (645m), το Καστράκι (518m) και την Πετρωτή (518m) (Εικόνα 25). Δυτικά διέρχεται από το όρος Καραμπουτάκι (793m) και συνεχίζει στις κορυφές του όρους Όθρυς και συγκεκριμένα από την οροσειρά του Γούρα με την κορυφή Αράπας (1290 m), στα χαμηλότερα και βόρεια αυτής από την Λυκορράχη (865m). Συνεχίζοντας προς τα νοτιοδυτικά διατρέχει την κορυφή Μαυρίκα (1552m), ενώ ανατολικότερα συναντά το μεγαλύτερο υψόμετρο της λεκάνης την κορυφή Γεροβούνι στα 1709m. Προς την Σούρπη οριοθετείται από την Ψιλορράχη (440m) και στα πιο ανατολικά από το Χλωμό όρος με υψόμετρο 894m (Γαϊτανόπουλος, 2014).



Εικόνα 25. Η μορφολογία και η έκταση της υδρολογικής λεκάνης του Αλμυρού (Γαϊτανόπουλος, 2014)

Ουσιαστικά η περιοχή λόγω της έκτασης της και της ποικίλης μορφολογίας της, διακρίνεται σε επιμέρους υδρολογικές λεκάνες. Οι υπολεκάνες αυτές καθορίζονται από τα υδατορέματα που τις διατρέχουν, το σύνολο των οποίων εκβάλουν στο Παγασητικό κόλπο, και λαμβάνουν την ονομασία τους από τα αντίστοιχα ρέματα. Πιο συγκεκριμένα στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 26) απεικονίζονται οι 6 υπολεκάνες της περιοχής με τις αντίστοιχες ονομασίες τους καθώς και τα ρέματα 3ης τάξης και άνω, που τις διατρέχουν.



Εικόνα 26. Οι υπολεκάνες του Αλμυρού και οι κύριοι κλάδοι τους (Γαϊτανόπουλος, 2014)

Παρακάτω (πίνακας 6) παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών (έκταση και περίμετρος) και η υδρολογική τους τάξη.

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά των υπολεκανών

Υπολεκάνη	Έκταση (Km <sup>2</sup> )	Περίμετρος (Km)	Υδρολογική τάξη
Καζάνι	35	33,4	4 <sup>η</sup>
Λαχανόρεμα	107	54,4	6 <sup>η</sup>
Χολόρεμα	209,5	79,5	5 <sup>η</sup>
Ξηριά	197	77	5 <sup>η</sup>
Πλατανόρεμα	120	60	5 <sup>η</sup>
Ξηρόρεμα	148,5	63,5	5 <sup>η</sup>

Οι παραπάνω υπολεκάνες ομαδοποιούνται και εντάσσονται σε δύο μεγαλύτερες ξεχωριστές υδρολογικές ενότητες. Την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης, στην οποία εντάσσονται οι πέντε πρώτες υπολεκάνες και την υπολεκάνη της Σούρπης στην οποία ανήκει η υπολεκάνη του Ξηρορέματος. Η γενική διεύθυνση της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης είναι από ανατολικά προς δυτικά, μήκους 20km περίπου και πλάτους μικρότερου των 15km, ενώ η υπολεκάνη της Σούρπης έχει μήκος 10km, πλάτος 5km με μεγάλο άξονα που έχει διεύθυνση βόρειο / βορειοδυτική – νότιο / νοτιοανατολική.

Η λεκάνη του Αλμυρού χαρακτηρίζεται από την παρουσία ελαφριάς κυμάτωσης διεύθυνσης περίπου βορειοδυτικής–νοτιοανατολικής. Η μορφολογία της λεκάνης διαμορφώνεται

κυρίως από τη διαβρωτική δράση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Γενικά παρατηρείται η παρουσία εποχιακών χειμάρρων, εκτός του χειμάρρου Χολόρρεμα που είναι ο μεγαλύτερος και ο οποίος εκρέει σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Δυτικά απαντώνται λόφοι, οι οποίοι αποτελούν τους πρόποδες του όρους της Όθρυος. Χαρακτηριστική είναι τέλος η παρουσία καρστικού ανάγλυφου, ενώ και η καρστική διάβρωση της περιοχής κρίνεται αρκετά προχωρημένη. Στην περιοχή υπάρχουν εκτεταμένα καρστικά έγκοιλα (Μεντζαφού, 2004). Αναφέρεται τέλος η παρουσία στην περιοχή δύο λιμνών που ονομάζονται Ζιρέλια ή Ζιλέρια, οι οποίες ήταν γνωστές από την αρχαιότητα, λόγω του σχήματος και της έκτασής τους, ως Οφθαλμοί του Διός. Η δημιουργία τους έχει απασχολήσει πολύ τους ερευνητές και έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες για την ερμηνεία τους. Συγκεκριμένα υπάρχει η άποψη ότι οι συγκεκριμένες λίμνες αποτελούν δύο δολίνες (Καραγεωργίου, 1962), δύο εμβρυώδη ηφαίστεια τύπου maare (Μαρίνος, 1963, 1965) ή ότι προέκυψαν από τον συνδυασμό τεκτονικής δράσης και κατακρήμνισης καρστικών εγκοίλων (Γαλανάκης, 1997).

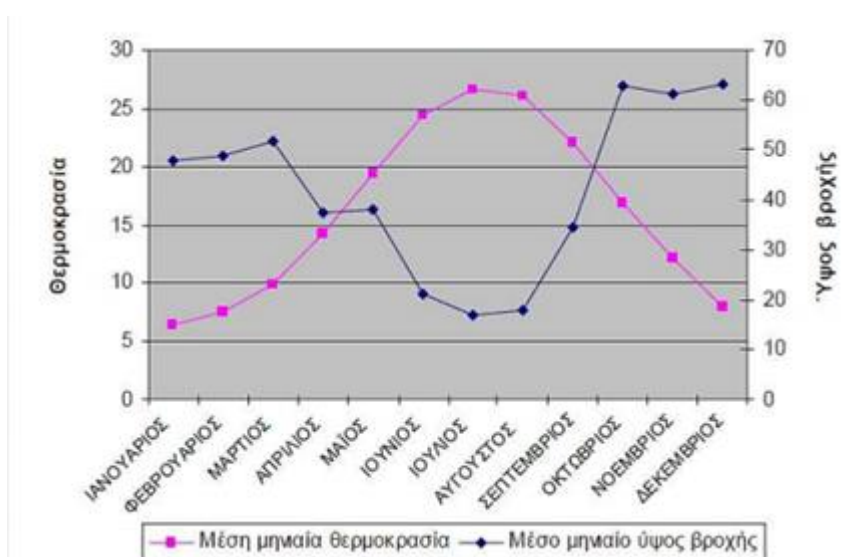
### 6.3. Κλιματικά- μετεωρολογικά δεδομένα

Η περιοχή γενικά χαρακτηρίζεται, από το τυπικό ηπειρωτικό κλίμα της Θεσσαλίας, το οποίο είναι ηπιότερο, σε σχέση με άλλες περιοχές από πλευράς θερμοκρασιών. Οι κλιματολογικές συνθήκες μεταβάλλονται προοδευτικά σεμεσογειακές προς το ανατολικό τμήμα, που βρέχεται από τον όρμο του Αλμυρού. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 16.2°C, με μέση Ιανουαρίου 6.4°C και Ιουλίου 26.7°C, ενώ η μέση μέγιστη υγρασία είναι 67%. Οι βροχοπτώσεις δεν θεωρούνται υψηλές και είναι σχετικά ανισοκατανομημένες στις διάφορες εποχές του έτους. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 502.8 mm, ενώ στον ορεινό όγκο της Όθρυος υπολογίζεται περίπου στα 800mm. Παρακάτω στον πίνακα 7 παρουσιάζονται μεταξύ άλλων τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής όπως μετρήθηκαν στον μετεωρολογικό σταθμό της Αγκιάλου για την περίοδο 1956-1992.

**Πίνακας 7. Μέσες τιμές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (1956-1992)**

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΑ ΜΗΝ. ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	ΗΜΕΡΕΣ ΒΡΟΧΗΣ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΗΜΕΡΕΣ ΠΑΓΕΤΟΥ	ΗΜΕΡΕΣ ΧΑΛΑΖΙΟΥ	ΗΜΕΡΕΣ ΧΙΟΝΙΟΥ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	47,8	12,0	77,0	6,9	/	1,8
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	49,0	12,8	75,0	5,0	/	1,5
ΜΑΡΤΙΟΣ	51,7	12,1	75,0	3,0	/	0,7
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	37,4	9,4	70,0	0,1	0,1	/
ΜΑΙΟΣ	38,2	7,5	65,0	/	0,2	/
ΙΟΥΝΙΟΣ	21,2	5,8	56,0	/	0,1	/
ΙΟΥΛΙΟΣ	17,0	3,8	52,0	/	0,1	/
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	17,8	2,4	53,0	/	0,1	/
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	34,6	6,3	62,0	/	0,1	/
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	62,7	9,5	69,0	/	/	/
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	61,3	10,2	75,0	0,6	0,1	0,1
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	63,3	12,3	76,0	3,1	/	0,9
ΕΤΟΣ	502,8	104,1	67,0	18,7	0,8	5,0

Σημειώνεται ότι από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο παρουσιάζεται η υγρότερη περίοδος του έτους. Το μέγιστο μέσο ύψος βροχής και η μεγαλύτερη υγρασία παρατηρείται το Δεκέμβριο, ενώ το ελάχιστο μέσο ύψος βροχής και η μικρότερη υγρασία τον Ιούλιο. Σύμφωνα με το ομβροθερμικό διάγραμμα του μετεωρολογικού σταθμού της Αγχιάλου (Εικόνα 27), προκύπτει ότι η ξηροθερμική περίοδος διαρκεί τέσσερις μήνες περίπου, ξεκινώντας από τον Μάιο και φθάνοντας έως τις αρχές Σεπτεμβρίου κάθε έτους.



Εικόνα 27. Ομβροθερμικό διάγραμμα μετεωρολογικού σταθμού Αγχιάλου(Γαϊτανόπουλος, 2014)

## 6.4. Γεωλογία της περιοχής μελέτης

### 6.4.1. Εισαγωγή

Γεωτεκτονικά, η περιοχή μελέτης τοποθετείται στον ευρύτερο χώρο της Πελαγονικής, η οποία εμφανίζεται ως μια επιμήκης ζώνη, ΒΒΔ-ΝΝΑ διεύθυνσης, που αρχίζει από τη Νότια Γιουγκοσλαβία και διαμέσου των ορεινών συγκροτημάτων Βόρα, Βαρνούντα, Βέρνου, Άσκιου, Πιερίων, Πηλίου και Ανατολικής Όθρυος φτάνει μέχρι τη Β. Εύβοια και τα νησιά Σκιάθο, Σκόπελο και Σκύρο.

Η Πελαγονική ζώνη στην περιοχή έρευνας αποτελείται, από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους σχηματισμούς από:

- α) Το αλπικό υπόβαθρο
- β) Τους σχιστόλιθους
- γ) Τους ασβεστιτικούς σχιστόλιθους και τα υπερβασικά πετρώματα

### **α) Το αλπικό υπόβαθρο**

Τα πετρώματα του κρυσταλλοσχιστώδους υποβάθρου καταλαμβάνουν πολύ μεγάλη έκταση στην Πελαγονική και αποτελούν το κύριο δομικό στοιχείο της ζώνης. Στην περιοχή παρουσιάζονται βόρεια της Νέας Αγχιάλου και παρουσιάζουν μεγάλη έκταση. Αποτελούνται από σχιστόλιθους, περιδοτίτες-σερπεντινίτες (ab-sch). Είναι βαθυπράσινοι μέχρι καστανοπράσινοι και παρουσιάζουν μέγιστο πάχος 100m. Επίσης παρουσιάζονται και γνεύσιοι-σχιστογνεύσιοι (gn). Αυτοί πολλές φορές συνοδεύονται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και μάρμαρα σημαντικού πάχους και από κερατόλιθους-χαλαζίτες καστανοκίτρινους. Μέγιστο πάχος αυτών είναι τα 300m περίπου. Η ηλικία των σχηματισμών είναι Παλαιοζωική (Κατσικάτσος κ.α., 1983, Κίλιας και Μουντράκης, 1988 Brunn, 1956, Aubouin, 1959).

### **β) Οι σχιστόλιθοι**

Τα σχιστολιθικά πετρώματα της περιοχής εντοπίζονται βορειοδυτικά του χωριού Μικροθήβες. Είναι κυρίως χλωριτικοί, σερικιτικοί και επιδοιτικοί, έντονα πτυχωμένοι σχιστόλιθοι με κατά τόπους ενστρώσεις κρυσταλλικών ασβεστολίθων, σιπολινών, σιπολινομαρμάρων και κυανότεφρων μαρμάρων. Το πάχος τους κυμαίνεται στα 400m περίπου και η ηλικία τους είναι Ιουρασική.

### **γ) Οι ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και τα υπερβασικά πετρώματα**

Εντοπίζονται δυτικά των Μικροθηβών αποτελούνται από ασβεστιτικούς σχιστολίθους, πηλίτες, ψαμμίτες ασβεστιτικούς κατά θέσεις, ασβεστολίθους παρασινωπούς και κοκκινωπούς λεπτοστρωματώδεις, και λατυποπαγή. Κατά θέσεις παρεμβάλλονται κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Τα υπερβασικά πετρώματα αποτελούνται από σερπεντινίτες, περιδοτίτες και δουνίτες και υπόκεινται των ανωκρητιδικών ασβεστολίθων. Η ηλικία των σχηματισμών είναι Ανωτέρου Αλβίου-Κενομανίου.

## **6.4.2. Υποπελαγονική ζώνη**

Η Υποπελαγονική ζώνη στην περιοχή έρευνας αποτελείται, από τους παλαιότερους προς τους νεώτερους σχηματισμούς από (Μαρίνος κ.α, 1957, Μουντράκης, 1985):

- α) Παλαιοζωικά πετρώματα του Περμίου
- β) Κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους Τριαδικού-Ιουρασικού
- γ) Τη σχιστοκερατολιθική διάπλαση και τους οφιόλιθους
- δ) Τους επικλυσιογενείς ασβεστόλιθους
- ε) Τον φλύσχη

### **α) Τα Παλαιοζωικά πετρώματα του Περμίου**

Τα πετρώματα αυτά (P) παρουσιάζονται στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης της Σούρπης. Βρίσκονται σε απόσταση 1km περίπου από το χωριό Δρυμώνας και 3.5km από την Σούρπη. Οι σχηματισμοί αυτοί συνίστανται από γραουβάκες, κροκαλοπαγή, χαλαζίτες, σχιστόλιθους, μάργες, κερατοφυρικούς πράσινους τόφφους, οφιόλιθους και στρώματα ή τράπεζες μαύρων ασβεστολίθων, κατά τόπους μεταμορφωμένα σε φυλλίτες, σχιστολίθους,

διμαρμαρυγιακούς γνευσίους και μαύρα ή λευκά μάρμαρα. Η ηλικία των σχηματισμών αυτών είναι Πέρμια.

### **β) Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Τριαδικού-Ιουρασικού**

Οι σχηματισμοί αυτοί παρουσιάζονται κύρια στο νότιο και δυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας (RJ-Dk, RJ-k). Παρουσιάζουν μια επιμήκη ανάπτυξη απόρροια των τεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση και εντοπίζονται κοντά στα χωριά Σούρπη, Αγία Τριάδα, Δρυμώνας, Πλάτανος και Άγιος Ιωάννης. Αποτελούνται από ασβεστολίθους, συμπαγείς, λευκούς έως μαύρους, δολομίτες κατά τόπους μεταμορφωμένους σε μάρμαρα.

### **γ) Η σχιστοκερατολιθική διάπλαση και οι οφιόλιθοι**

Ο πιο βασικός σχηματισμός της Υποπελαγονικής ζώνης είναι η σχιστοκερατολιθική διάπλαση (Kr-o-sh, J-sch). Αυτή συνίσταται από λεπτόκοκκα ιζήματα δηλαδή κόκκινους, πράσινους, μαύρους αργλικούς σχιστόλιθους, ραδιολαριτικούς κερατόλιθους, μάργες, λεπτόκοκκους ψαμμίτες, πηλίτες, αργιλοπηλίτες, παρεμβολές λεπτόκοκκων πελαγικών ασβεστολίθων. Τα ιζήματα αυτά βρίσκονται σε συνεχείς εναλλαγές και συγκροτούν μια σειρά αρκετού πάχους που αντιπροσωπεύει ιζηματογένεση πελαγική – ωκεάνια. Μέσα στη σχιστοκερατολιθική διάπλαση βρίσκονται συχνά παρεμβαλλόμενα – συμπτυχωμένα μικρά και μεγάλα οφιολιθικά σώματα γι' αυτό και το σύνολο ονομάζεται «σχιστοκερατολιθική διάπλαση». Αυτή παρουσιάζεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής και εμφανίζεται και κατά τόπους μεταμορφωμένη. Η ηλικία της είναι Τριαδική – Ιουρασική (ΙΓΜΕ, 2010).

### **δ) Ασβεστόλιθοι και επικλυσιογενείς ασβεστόλιθοι**

Παρουσιάζονται στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής. Είναι ανοιχτότεφροι έως τεφροκύανοι μέσο-έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι. Μερικές φορές παρουσιάζονται δολομιτωμένοι (Ksk). Κατά την ορογένεση του Άνω Ιουρασικού – Κάτω Κρητιδικού πτυχώθηκαν και αναδύθηκαν οι εσωτερικές ζώνες με αποτέλεσμα να χερσεύσουν. Κατά το Μέσο – Άνω Κρητιδικό ακολούθησε επίκλυση της θάλασσας με την ασύμφωνη τοποθέτηση επικλυσιογενών ιζημάτων πάνω στα προϋπάρχοντα ανθρακικά πετρώματα των Τριαδικοϊουρασικών καλυμμάτων, ή στους οφιολίθους και στα συνοδά τους πελαγικά ιζήματα. Η επίκλυση μπορεί να θεωρηθεί ότι άρχισε από το Κενομάνιο – Τουρόνιο του Μέσου Κρητιδικού, αλλά σε ορισμένες περιοχές άρχισε αργότερα κατά το Σαντώνιο ή Μαιστρίχτιο του Άνω Κρητιδικού (Mercier, 1968). Τα επικλυσιογενή ιζήματα του Μέσου – Άνω Κρητιδικού αποτέθηκαν με ασυμφωνία πάνω στα προϋπάρχοντα πετρώματα. Τα ιζήματα αυτά (Kr-o-k, Kr-o-c) παρουσιάζονται στο βόρειο τμήματα της λεκάνης, βόρεια του χωριού Νέα Αγχίαλος, καθώς επίσης και στα βορειοδυτικά της περιοχής. Χαρακτηριστικές εμφανίσεις τους επίσης παρουσιάζονται στο νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας. Πρόκειται για πλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με Radiolites, και συμπαγείς ασβεστολίθους με Hippurites.

### **ε) Ο φλύσχης**

Συνίσταται από αργλικούς ψαμμίτες, αργλικούς σχιστόλιθους, κροκαλοπαγή και ασβεστόλιθους. Παρουσιάζεται κατά τόπους ημιμεταμορφωμένος σε φυλλίτες και





Συνοπτικά στην ευρύτερη περιοχή έρευνας συναντούνται:

**Σχηματισμοί της Πελαγονικής:**

- α) Αλπικό υπόβαθρο
- β) Σχιστόλιθοι
- γ) Ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι και τα υπερβασικά πετρώματα

**Σχηματισμοί της Υποπελαγονικής:**

- α) Παλαιοζωικά πετρώματα του Περμίου
- β) Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Τριαδικού-Ιουρασικού
- γ) Σχιστοκερατολιθική διάπλαση και τους οφιόλιθοι
- δ) Επικλυσιγενείς ασβεστόλιθοι
- ε) Φλύσχης

Αναφορικά με τη στρωματογραφική διάρθρωση των μεταλπικών ιζημάτων της περιοχής προκύπτουν τα παρακάτω (Γαλανάκης, 1997):

α) Στην περιοχή απαντούνται νεογενή ιζήματα απολιθωματοφόρα και λιγνιτοφόρα (μάργες) τα οποία και είναι λιμναίας προέλευσης που ανήκουν στο Κάτω Πλειόκαινο.

β) Η ιζηματογένεση ήταν συνεχής σε όλη τη διάρκεια του Ανωτέρου Πλειοκαίνου με την απόθεση υποκίτρινων αργιλικών μαργών, διακοπτόμενη κατά μικρά χρονικά διαστήματα ημιξηρασίας και χέρσωσης.

γ) Κατά το Πλειστόκαινο επικρατεί ιζηματογένεση κλαστικών υλικών, κυρίως ποτάμιας και ποταμοχερσαίας προέλευσης. Η λιθολογική σύσταση των ιζημάτων αυτών συχνά διαφέρει από θέση σε θέση με γρήγορες πλευρικές μεταβάσεις.

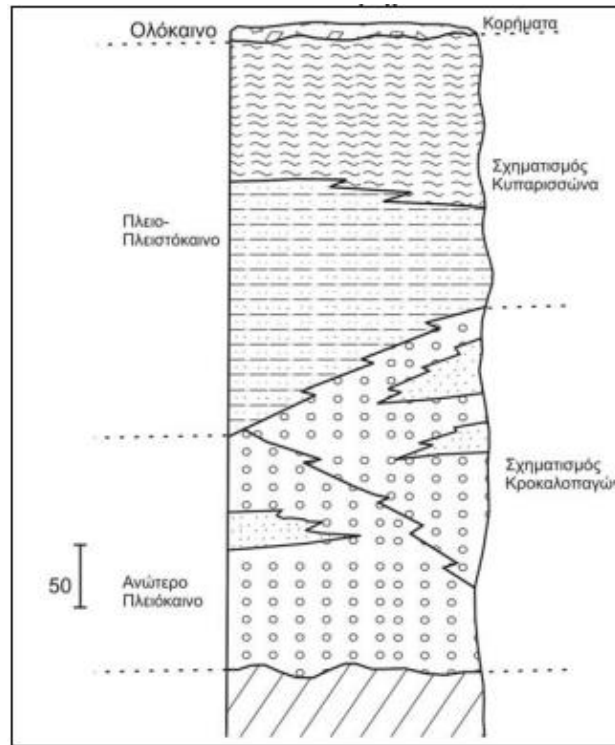
Στην εικόνα 30 παρουσιάζεται λιθοστρωματογραφική στήλη που δείχνει τη στρωματογραφική διάρθρωση ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού. Αναφορικά με τις τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή προκύπτουν τα παρακάτω (Γαλανάκης, 1997):

α) Με το τέλος του Μεσοαλπικών πτυχώσεων του Τριτογενούς που έδρασαν στη ήδη αναδυόμενη οροσειρά της Πελαγονικής και προκάλεσαν λεπιώσεις των σχηματισμών (Μουντράκης, 1985) αρχίζει η δράση κανονικών ρηγμάτων ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης και η δημιουργία των νεογενών-τεταρτογενών λεκανών.

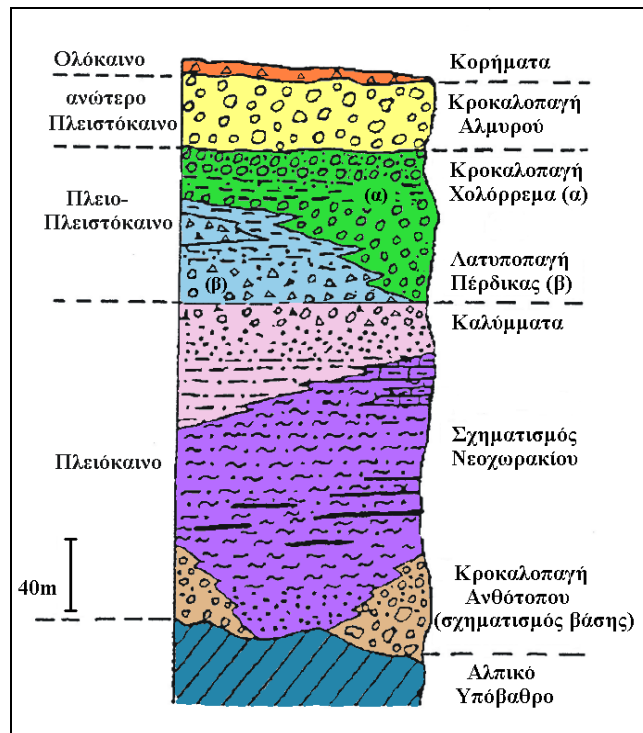
β) Κατά το Ανώτερο Μειόκαινο και λίγο πριν την απόθεση των λιμναίων Κάτω Πλειοκαινικών ιζημάτων εκδηλώθηκε εκτεταμένη εφελκυστική φάση παραμόρφωσης, η διεύθυνση της οποίας είναι ΒΑ-ΝΔ. Αυτή η φάση είναι υπεύθυνη για τη δράση των κανονικών ρηγμάτων με κύρια διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ και τη δημιουργία των πρώτων λεκανών ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, όπως του Αλμυρού- Παγασητικού.

γ) Οι ρηξιγενείς δομές που εξελίσσονται από το Πλειο-Πλειστόκαινο μέχρι σήμερα δρουν υπό το καθεστώς ενός νέου πεδίου εφελκυστικών τάσεων του οποίου η διεύθυνση είναι

ΒΒΔ-ΝΝΑ έως Β-Ν. Οι εφελκυστικές αυτές δυνάμεις δημιούργησαν μεγάλα κανονικά ρήγματα των οποίων η κύρια διεύθυνση είναι ΑΒΑ-ΔΝΔ έως Α-Δ (ΙΓΜΕ, 2010).



Εικόνα 29. Λιθοστρωματογραφική στήλη της υπολεκάνης Ευξεινούπολης και Σούρπης.



Εικόνα 30. Λιθοστρωματογραφική στήλη της λεκάνης του Αλμυρού (Γαλανάκης, 1997 με προσθήκες από Α. Μεντζαφού)

## 6.5. Τεκτονική

### 6.5.1. Εισαγωγή

Τα τεκτονικά δεδομένα της περιοχής μελέτης όπως αυτά προσδιορίστηκαν από γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ και από στοιχεία του Γαλανάκη (1997) υποδεικνύουν πως η μορφολογία του βορείου περιθωρίου της λεκάνης είναι ομαλή και γενικά χαμηλή. Η ένωση των ιζημάτων που πληρούν τη λεκάνη αυτή, με αυτά που έχουν αποθεθεί στο νότιο περιθώριο του Θεσσαλικού κάμπου υποδηλώνει ότι υπήρχε επικοινωνία με το νότιο-ανατολικό περιθώριο της Θεσσαλίας (Γαλανάκης, 1997). Στην περιοχή αυτή δεσπόζει και το σεισμικό ρήγμα του βορείου περιθωρίου (περιοχή Μικροθηβών-Νέας Αγχιάλου). Το κεντρικό και νότιο τμήμα της λεκάνης βρίσκεται υπό την δράση του ρήγματος που τοποθετείται εντός του ρέματος Ξηριάς. Το νότιο περιθώριο δεν φαίνεται να ορίζεται καθαρά από ρήγματα περιθωρίου (τεκτονική επαφή προνεογενούς υποβάθρου καινεογενών-τεταρτογενών αποθέσεων), μεγάλα όμως κανονικά ρήγματα παράλληλα στο νότιο περιθώριο παρατηρούνται κυρίως εντός του αλπικού υποβάθρου τα οποία έχουν δημιουργήσει χαρακτηριστικές μορφοτεκτονικές δομές οι οποίες είναι δείκτες της νεοτεκτονικής τους δράσης. Νότια και ανατολικά της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης και με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ εκτείνεται η μικρή υπολεκάνη της Σούρπης η οποία ορίζεται από κανονικά ρήγματα παράλληλα στον άξονά της (ΙΓΜΕ, 2010).

### 6.5.2. Ρηξιγενής ζώνη Νέας Αγχιάλου

Αποτελεί την πιο εντυπωσιακή ρηξιγενή γραμμή. Βρίσκεται σε στενή γενετική σχέση με άλλες μικρότερες τόσο στα νεογενή-τεταρτογενή ιζήματα όσο και στους σχηματισμούς του αλπικού υποβάθρου, γι' αυτό και χαρακτηρίζεται σαν μια ρηξιγενής ζώνη. Το ρήγμα αυτό εντοπίστηκε, μελετήθηκε και χαρτογραφήθηκε μετά τη σεισμική ακολουθία που έλαβε χώρα στην περιοχή κατά τον Ιούλιο του 1980 γιατί συνδέθηκε άμεσα με τη σεισμική αυτή δραστηριότητα (Parazachos et al., 1983). Στη συνέχεια τη ρηξιγενή αυτή ζώνη χαρτογράφησαν και μελέτησαν διάφοροι ερευνητές Caruto (1990) και Mountrakis et al. (1993), όπου την παρακολούθησαν έως τα Φάρσαλα. Ο Caruto (1996), επανέρχεται στη ρηξιγενή αυτή ζώνη και μελετά την επίδραση αυτής επί του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής.

Η ρηξιγενής αυτή ζώνη κανονικών ρηγμάτων που ορίζει το βόρειο περιθώριο του βυθίσματος του Αλμυρού, παρουσιάζει μια ασθενή δράση στη περιοχή του Πηλίου με κατεύθυνση N75° έως N90°. Προς τα δυτικά διασχίζει υποθαλάσσια τον Παγασητικό κόλπο, τέμνει τα χωριά Νέα Αγχιάλος και Μικροθήβες και προεκτείνεται ακόμα δυτικότερα έως τα Φάρσαλα δείχνοντας ότι έχει ένα συνολικό μήκος περίπου 50km. Η μορφολογία των πρηνών του ρήγματος στην περιοχή της Ν. Αγχιάλου- Μικροθηβών εμφανίζεται ομαλή, ενώ δυτικότερα προς την Ερέτρια δεν εντοπίζονται συχνά οι ρηξιγενείς επιφάνειες αυτού. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανόν στη λιθολογία των σχηματισμών που επηρεάζει, γιατί οι περιοχές που διέρχεται η ζώνη δομούνται από σχιστογενέσιους, περιδοτίτες, νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα, οπότε οι κατοπτρικές επιφάνειες υπόκεινται γρήγορα σε διάβρωση και εξομάλυνση. Ο πιθανός χρόνος έναρξης της λειτουργίας αυτής της ζώνης μπορεί να θεωρηθεί το Κατώτερο Πλειστόκαινο γιατί επηρεάζει τα πλειστοκαινικά ιζήματα της

περιοχής με μικρά ρήγματα συνιζηματογενούς χαρακτήρα (Γαλανάκης, 1997). Επίσης επηρεάζονται άμεσα τα ηφαιστειακά πετρώματα του Κατωτέρου Πλειστοκαίνου που βρίσκονται εντός της ζώνης του ρήγματος, και οι χερσαίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις. Τη δράση της ρηξιγενούς ζώνης της Νέας Αγχιάλου και του πεδίου των τάσεων που επηρεάζει τη συγκεκριμένη περιοχή έχουν μελετήσει οι Caruto (1990), Mountrakis et al. (1993), Γαλανάκης (1997). Βάσει των παραπάνω ερευνών καθώς επίσης και παρατηρήσεων υπαίθρου, παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία αναφορικά με τη γένεση και τον μηχανισμό λειτουργίας της παραπάνω ζώνης.

α) Βορειοδυτικά της πόλης της Νέας Αγχιάλου η επαφή των Κρητιδικών ασβεστολίθων μετα πλευρικά κορήματα, των οποίων η ηλικία τοποθετείται στη Βούρμα περίοδο, είναι τεκτονική εξαιτίας του κανονικού ρήγματος της Ν. Αγχιάλου. Οι επιφάνειες του ρήγματος που εντοπίζονται πάνω στους ασβεστολίθους είναι αρκετά διαβρωμένες με τη διεύθυνσή τους να κυμαίνεται μεταξύ  $B 55^{\circ}A$  έως  $B 80^{\circ}A$ , ενώ οι κλίσεις τους  $70^{\circ}$  έως  $80^{\circ}$  προς Ν.

β) Δυτικότερα αυτής της περιοχής και βόρεια του χωριού Μικροθηβες οι ποταμοχερσαίες αποθέσεις του Κατώτερου Πλειοκαίνου, επηρεάζονται από τη ρηξιγενή ζώνη του ρήγματος της νέας Αγχιάλου. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι τα ιζήματα αυτά να κατακερματίζονται στη περιοχή αυτή από πολλά παράλληλα μικρά ομοθητικά και αντιθητικά ρήγματα (Μυριούνης, 2008).

γ) Στο χώρο που αναπτύσσονται οι βασαλτικές λάβες της περιοχής (βόρεια των Μικροθηβών) διακρίνεται ένα μικρό τεκτονικό βύθισμα που οφείλεται στη ρηξιγενή ζώνη της Ν. Αγχιάλου. Το μικρό αυτό βύθισμα έχει αναπτυχθεί μεταξύ του μεγάλου κανονικού ρήγματος που οριοθετεί το βόρειο περιθώριο της λεκάνης του Αλμυρού με διεύθυνση  $A-\Delta$  και κλίση προς νότο και ενός δευτερεύοντος αντιθητικού με κλίση κατοπτρικής επιφάνειας προς βορρά. Ο ηφαιστειακός αυτός σχηματισμός εκτός από τα  $ABA-\Delta N\Delta$  ρήγματα της μεγάλης ρηξιγενούς ζώνης της Ν. Αγχιάλου τέμνεται και από ρήγματα ρηξιγενούς ζώνης που έχουν διεύθυνση  $BBD-NNA$ . Τα ρήγματα αυτά εντοπίζονται κατά μήκος του Λαχανορέμματος και βορειοανατολικά των Μικροθηβών, ενώ επηρεάζουν και τα κροκαλοπαγή που υπόκεινται των ηφαιστειακών υλικών. Το σύστημα ( $ABA-\Delta N\Delta$  και  $BBD-NNA$ ) των ρηγμάτων που δρα σ' αυτό το χώρο ταυτίζεται με ένα από τα δύο συστήματα που αναφέρει ο Δούτσος (1979) και Caruto (1990), Caruto and Pavlides (1994) για την ανατολική Θεσσαλία και έχουν άμεση σχέση με την παλαιογεωγραφική διαμόρφωση και την ιζηματολογική εξέλιξη σ' αυτή τη λεκάνη από το Ανώτερο Μειόκαινο μέχρι σήμερα.

δ) Η παρουσία επίσης του μεγάλου κανονικού ρήγματος που διέρχεται ανατολικά των Μικροθηβών με διεύθυνση  $BBD-NNA$  και κλίση προς τα ανατολικά δείχνει ότι συνδέεται με τη ρηξιγενή γραμμή που ορίζει το ανατολικό περιθώριο της μικρής λεκάνης της Σούρπης, ενώ έχει άμεση σχέση με την επιμήκη τοποθέτηση των ηφαιστειακών υλικών σχεδόν παράλληλα στη ρηξιγενή αυτή γραμμή. Ο Fytikas et al. (1985) προσδιορίζει την εμφάνιση του μεγαλύτερου πάχους των ηφαιστειακών υλικών στη συμβολή των δύο ρηξιγενών ζωνών.

ε) Ανατολικά της Ν. Αγχιάλου παρατηρείται ανάλογο φαινόμενο με το προηγούμενο, όπου στη συμβολή των δύο ρηξιγενών ζωνών, έχουμε άνοδο στην επιφάνεια λάβας βασαλτικής σύστασης και μικρής έκτασης ονομαζόμενο και σαν ηφαίστειο του Πορφυρίωνα.

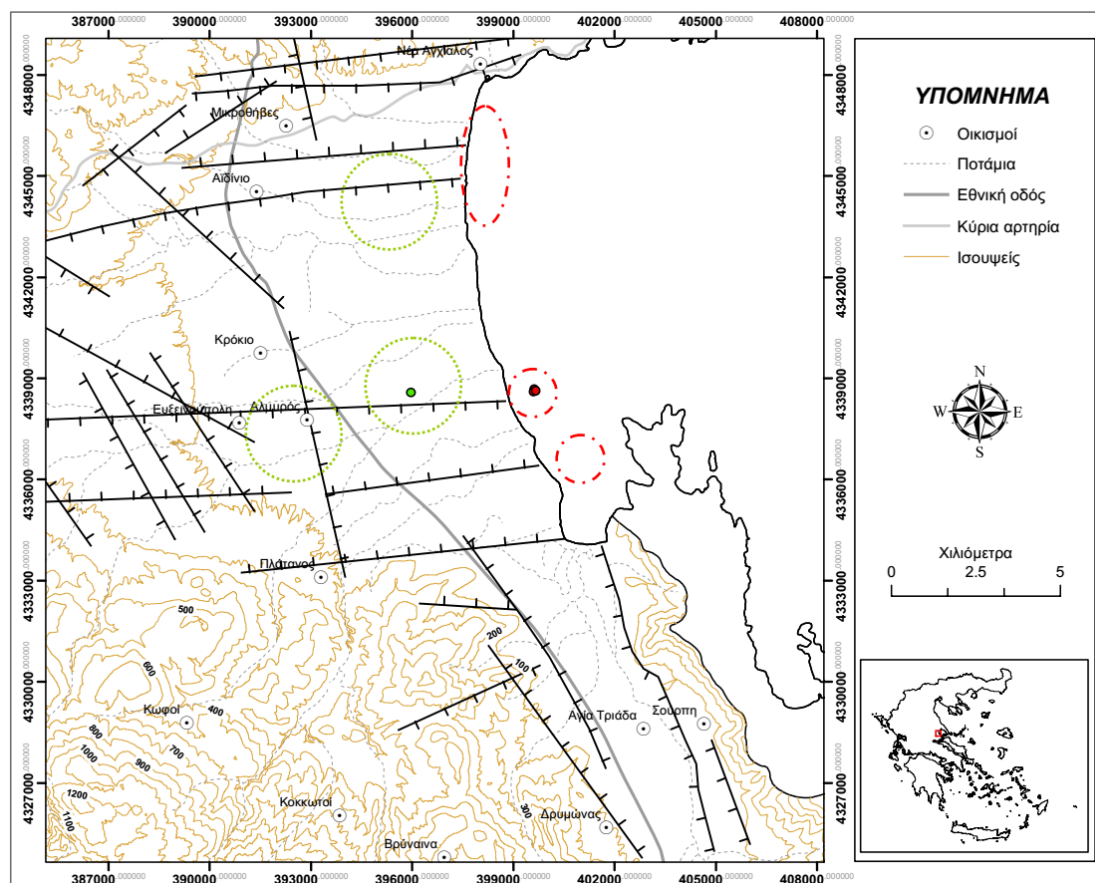
### **6.5.3. Κεντρικό- νότιο τμήμα της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης**

Στην περιοχή του νότιου και κεντρικού τμήματος της λεκάνης του Αλμυρού έχει διαπιστωθεί η παρουσία δύο διαγωνίως τεμνομένων μεγάλων κανονικών ρηγμάτων. Η διεύθυνση του ενός είναι ΒΔ-ΝΑ και του άλλου Α-Δ περίπου. Χαρακτηριστικές επιφανειακές εκδηλώσεις των ρηγμάτων αυτών με έντονο ανάγλυφο δεν εντοπίζονται διότι αυτά τέμνουν κυρίως τα χαλαρά νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής με αποτέλεσμα οι κατοπτρικές τους επιφάνειες να έχουν εξομαλυνθεί ή να έχουν καλυφθεί από τα νεότερα ποταμοχερσαία υλικά (Γαλανάκης, 1997). Στην περιοχή παρουσιάζονται οι παρακάτω τεκτονικές ενδείξεις (Γαλανάκης, 1997):

α) Η πρώτη τεκτονική γραμμή με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ έως ΒΔ-ΝΑ τοποθετείται περίπου ένα χιλιόμετρο νοτιοδυτικά της πόλης του Αλμυρού, και εκτείνεται προς το χωριό Αργιλοχώρι. Τα ρήγματα της τεκτονικής αυτής γραμμής τέμνουν κυρίως τις μάργες του Πλειοκαίνου, ενώ κάποια από αυτά τέμνουν και τα τεταρτογενή ιζήματα της περιοχής καταλήγοντας στην επιφάνεια. Ο Γαλανάκης (1997) πραγματοποιώντας μετρήσεις στην περιοχή διαπίστωσε πως παρατηρείται μια φάση επέκτασης με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, που χαρακτηρίζει το πεδίο των τάσεων που επικρατούσε κατά τη διάρκεια του Πλειοκαίνου. Επίσης από γεωτρήσεις που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ (Γιακούπης και Αραπογιάννης, 1987) στη λεκάνη του Αλμυρού για την έρευνα λιγνιτικών κοιτασμάτων, διαπιστώθηκε πως το δάπεδο του κοιτάσματος του λιγνίτη κατά μήκος και εκατέρωθεν του ρήγματος εμφανίζει μετάπτωση κατά 200m προς τα ανατολικά. Από τα παραπάνω προκύπτει πως η τεκτονική δράση της διεύθυνσης ΒΒΔ- ΝΝΑ έχει αρχίσει τουλάχιστον μετά το Κατώτερο Πλειόκαινο και είναι υπεύθυνη για τη σημερινή θέση των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Ακόμη σε θέσεις όπου διασταυρώνονται οι διακλάσεις και οι διαρρήξεις, που έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ με άλλες που έχουν διεύθυνση περίπου Α-Δ, φαίνεται ότι μετατοπίζονται ελαφρά οι πρώτες από τις δεύτερες. Η παρατήρηση αυτή σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα ρήγματα με διεύθυνση περίπου Α-Δ είναι τα πλέον πρόσφατα στο χώρο του βορείου Αιγαίου, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρηξιγενής γραμμή με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ είναι η παλαιότερη αυτής που έχει διεύθυνση Α-Δ. Γενικά λοιπόν κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς οι δύο αυτές ρηξιγενείς γραμμές επηρεάζουν ταυτόχρονα τη λεκάνη του Αλμυρού.

β) Στην ευρύτερη περιοχή του χωριού Ανθότοπος, έχουν εντοπισθεί τρία συστήματα κανονικών μικρορηγμάτων που επιδρούν τόσο επί των λευκών μαργών ηλικίας Κατωτέρου Πλειοκαίνου, όσο και επί των Κάτω-Μέσο Πλειστοκαινικών κροκαλοπαγών που καλύπτουν τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Τα συστήματα των ρηγμάτων που έχουν διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, ΒΒΑ-ΝΝΔ, εντοπίζονται εντός των Πλειστοκαινικών ιζημάτων, ενώ το σύστημα με διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΝΔ τέμνει και τις αποθέσεις του Κατωτέρου-Μέσου Πλειστοκαίνου. Γύρω από την περιοχή του χωριού Νεοχωράκι εντοπίζονται μικρές κατοπτρικές επιφάνειες με διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΝΔ πάνω στους ασβεστόλιθους του Κρητιδικού, αλλά και εντός των Πλειοκαινικών μαργών που αποτελούν υπολείμματα του μεγάλου ρήγματος που ελέγχει το νότιο περιθώριο της λεκάνης του Αλμυρού. Η συνέχεια του ρήγματος αυτού προς τα

ανατολικά, που ορίζει το νότιο περιθώριο της λεκάνης του Αλμυρού, δεν εμφανίζεται επιφανειακά διότι καλύπτεται από τα νεώτερα κροκαλοπαγή και τα πλευρικά κορήματα του Ανωτέρου Τεταρτογενούς. Ακόμα αναλυτικότερα το ρήγμα αυτό έχει εντοπισθεί ύστερα από έρευνες της υποθαλάσσιας γεωλογίας του ΙΓΜΕ και επηρεάζει τα Ολοκαινικά ιζήματα που έχουν αποθεθεί εντός του Παγασητικού κόλπου. Τα μικρότερα ρήγματα που εντοπίζονται νοτιότερα του χωριού Νεοχωράκι και εντός των ασβεστολίθων του Κρητιδικού είναι παράλληλα στο μεγάλο ρήγμα του νότιου περιθωρίου της λεκάνης του Αλμυρού. Χαρακτηριστικό μορφοτεκτονικό στοιχείο αυτών είναι ότι οι επιφάνειες αυτές έχουν αναπτυχθεί παράλληλα στη νοητή γραμμή του συγκεκριμένου ρήγματος. Ένα ακόμα πρόσθετο στοιχείο που μπορεί να τεκμηριώσει την παρουσία και τη δράση του ρήγματος που οριοθετεί το νότιο περιθώριο της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης είναι ο τρόπος σχηματισμού των δύο μικρών λιμνών νοτιοδυτικά της πόλης του Αλμυρού. Οι δύο κυκλικές λίμνες με την ονομασία Ζιζέρια, μελετήθηκαν αρχικά από τους Μαρίνο και Παπάκη (1965), και βρίσκονται σε υψόμετρο περίπου 130m από την στάθμη της θάλασσας και έχουν σχηματισθεί εντός των νεογενών αποθέσεων (μάργες). Η δυτική λίμνη που είναι και η μεγαλύτερη έχει έκταση περίπου 45 στρέμματα, και ένα μέγιστο βάθος που μπορεί να φτάσει τα 11m, ενώ η ανατολική καταλαμβάνει έκταση 32 στρεμμάτων και το μέγιστο βάθος μπορεί να φτάσει τα 10m. Τα όσα περιγράφησαν παραπάνω φαίνονται σχηματικά στον ακόλουθο χάρτη (Εικόνα 31).



Εικόνα 31. Ρήγματα στη λεκάνη του Αλμυρού (Μυριούνης, 2008)

## 6.6. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Στην ευρύτερη περιοχή Αγκιάλου, Αλμυρού και Σούρπης αναπτύσσονται τρία υδροφόρα συστήματα

- Το καρστικό υδροφόρο σύστημα Αλμυρού
- Το καρστικό υδροφόρο σύστημα της Όθρυος και
- Το υδροφόρο σύστημα της προσχωματικής λεκάνης Αλμυρού

### 6.6.1. Καρστικό υδροφόρο σύστημα Αλμυρού

Βορειοδυτικά της πόλης του Αλμυρού και βορειοανατολικά του χωριού Μαυρόλοφος, στο βουνό Πόρτα, εμφανίζονται ανθρακικά πετρώματα μεγάλης δυναμικότητας. Στην επαφή της ανθρακικής μάζας με τα μεταλλικά ιζήματα διανοίχτηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε. υδρογέωτρηση το 1982 (ΥΓ-3/82), παροχής 120 m<sup>3</sup>/h, για την ύδρευση της πόλης του Αλμυρού, η οποία χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Χαρακτηριστικό αυτού του σχηματισμού είναι το γεγονός ότι είναι προστατευμένος, καθώς περικλείεται από αδιαπέρατα στο σύνολό τους



πετρώματα όπως φλύσχης, υπερβασικά πετρώματα και γνευσίοι. Από τα στοιχεία της υπόγειας στάθμης στην υδρογεώτρηση του Ι.Γ.Μ.Ε. (ΥΓ-3/82), που εκμεταλλεύεται το καρστικό υδροφόρο σύστημα, και από τους πιεζομετρικούς χάρτες της προσχωματικής υπολεκάνης της Ευξεινούπολης προκύπτει μια υπόγεια τροφοδοσία από τα ανθρακικά πετρώματα προς τους μεταλλικούς σχηματισμούς.

### **6.6.2. Καρστικό υδροφόρο σύστημα Όθρυος**

Παρουσιάζεται νότια της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης. Πρόκειται για ασβεστόλιθους πλακώδεις έως συμπαγείς, ηλικίας Ανωτέρου Κρητιδικού. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται διερρηγμένοι και έντονα καρστικοποιημένοι. Ωστόσο, παρατηρείται μείωση της δυναμικότητας των καρστικών αυτών υδροφορέων κινούμενοι από ανατολικά προς τα δυτικά. Αυτό οφείλεται, όπως αποδείχθηκε από σειρά υδρογεωτρήσεων που διανοίχτηκαν στην επαφή των ασβεστόλιθων με τα μεταλλικά ιζήματα από το Ι.Γ.Μ.Ε. (γεωτρήσεις ΥΓ-1/82, ΥΓ-4/83, ΥΓ-5/83), στη σταδιακή πλήρωση των καρστικών εγκοίλων από ανατολή προς δύση με ερυθρογαίες (terra rosa και ασβεστίτη). Ανατολικά του ορεινού όγκου της Όθρυος ωστόσο, τα καρστικά έγκοιλα και οι διακλάσεις δεν είναι πληρωμένα, με συνέπεια την εμφάνιση σημαντικής υδροφορίας στα ανθρακικά πετρώματα του Τριαδικού – Ιουρασικού. Στην περιοχή αυτή γεωτρήσεις ιδιοκτησίας του ΤΟΕΒ, παρουσιάζουν παροχές της τάξης των 300m<sup>3</sup>/h περίπου, οι οποίες και χρησιμοποιούνται για την άρδευση των τοπικών καλλιεργειών (ΙΓΜΕ, 2010).

Χαρακτηριστική περίπτωση της δυναμικότητας του συστήματος αποτελεί η εμφάνιση της καρστικής πηγής της Κεφάλωσης (ΠΚ) νότια του χωριού Πλάτανος, η οποία παρουσιάζει συνεχή ροή και ιδιαίτερα υψηλές παροχές. Χαρακτηριστικό αυτού είναι η σχετική απουσία υδρογεωτρήσεων στην περιοχή με δεδομένο ότι η άρδευση των τοπικών καλλιεργειών γίνεται με αυλάκια και με αντλητικούς μηχανισμούς χρησιμοποιώντας νερό από την πηγή. Η πηγή Κεφάλωση εντοπίζεται στο νότιο τμήμα της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης, αναβλύζει σε υψόμετρο 26,5 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και σε απόσταση 3250m από την ακτή. Η παροχή της υπόκειται σε έντονες διακυμάνσεις, ανάλογα με την εποχή, και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσει τα 5.500 m<sup>3</sup>/h (Μυριούνης, 2004).

### **6.6.3. Υδροφόρο σύστημα της προσχωματικής λεκάνης Αλμυρού**

Η περιοχή χωρίζεται μορφολογικά σε δύο κύριες υπολεκάνες. Την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης και την υπολεκάνη της Σούρης. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή διακρίνονται σε: αδιαπέρατους (φλύσχης, κρυσταλλοσχιστώδη και ηφαιστειακά), ημιπερατούς (νεογενή ιζήματα) και σε υδροπερατούς σχηματισμούς (τεταρτογενή ιζήματα και καρστικοί ασβεστόλιθοι).

#### **6.6.4. Ανάγλυφο- υδρογραφικό δίκτυο**

Σύμφωνα με τον Γαλανάκη (1997) το ανάγλυφο της λεκάνης του Αλμυρού οφείλεται κυρίως στην τεκτονική δράση ενεργών ρηγμάτων που δραστηριοποιούνται στην περιοχή από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, με επαναδραστηριοποίηση πολλών εξ αυτών κατά το Τεταρτογενές, και δευτερευόντως στις κλιματικές συνθήκες και στη διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων. Κύριο χαρακτηριστικό της λεκάνης του Αλμυρού είναι η σχετική βύθιση του ανατολικού τμήματος της λεκάνης σε σχέση με το δυτικό, που επέτρεψε τη διατήρηση του χερσαίου τμήματός της. Η διαφορική αυτή τεκτονική κίνηση, επέτρεψε σύμφωνα με το Γαλανάκη, (1997):

- Στο δυτικό τμήμα της λεκάνης το ανάγλυφο να είναι εντονότερο σε σύγκριση με το ανατολικό.
- Να παρουσιάζεται έντονη κατά βάθος διάβρωση των ρεμάτων δυτικά, ιδιαίτερα στο βόρειο τμήμα του ορεινού όγκου της Όθρυος. Η έντονη αυτή κατά βάθος διάβρωση σταματά απότομα στην επαφή με τα μεταλλικά ιζήματα του νοτίου περιθωρίου της λεκάνης του Αλμυρού, περιοχή από την οποία παρατηρείται η διάβρωση νότια στο τέμαχος που ανέρχεται και η απόθεση υλικών βόρεια, στο τέμαχος που κατέρχεται.
- Νοτιοδυτικά της λεκάνης, από το χωριό Νεοχωράκι ως την πόλη του Αλμυρού να παρατηρούνται ποτάμιες αναβαθμίδες, κατά μήκος του ρέματος του Ξεριά.
- Να παρουσιάζεται εναπόθεση αλλουβιακών αποθέσεων από τα ρέματα ανατολικά της λεκάνης. Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής είναι δενδριτική και παράλληλης μορφής, ενώ πολύ συχνά παρατηρείται ρηξιγενής μορφή (Γαλανάκης,1997).

#### **Υδρογεωλογικές συνθήκες**

Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών, είναι συνάρτηση της λιθολογικής σύστασης, της κοκκομετρίας (κοκκώδεις σχηματισμοί), του βαθμού διαγένεσης και του τεκτονισμού που έχουν υποστεί (Δημόπουλος, 1983). Καθορίζεται κυρίως από το πορώδες, ειδικότερα το ενεργό πορώδες και την υδραυλική αγωγιμότητα.

#### **6.6.5. Υδρολιθολογία**

Παρακάτω αναλύεται η υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών που επηρεάζουν τις υδρογεωλογικές συνθήκες της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης και την υπολεκάνη της Σούρπης. Η ανάλυση αυτή βασίσθηκε στα λιθολογικά – γεωλογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που παρουσιάζονται στην περιοχή.

#### **6.6.6. Συστήματα τεταρτογενών ιζημάτων**

Τα τεταρτογενή ιζήματα καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα της υπολεκάνης της Ευξεινούπολης. Αποτελούνται από τους σχηματισμούς του Αλμυρού και του Χολορέματος,

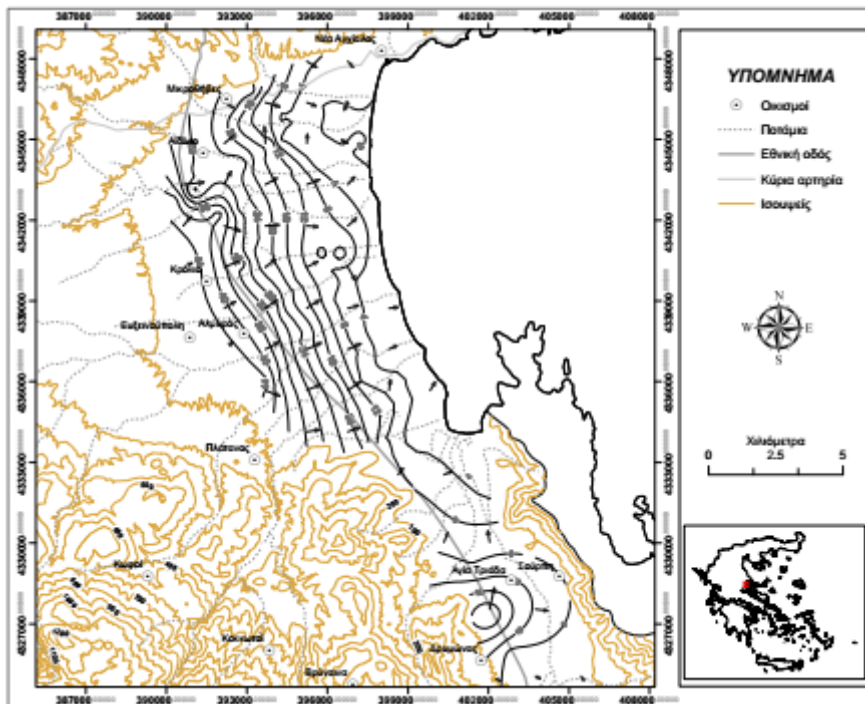
και το μεγαλύτερο μέρος των σχηματισμών της Σούρπης. Γενικά μπορούν να χαρακτηριστούν ως υδροπερατοί σχηματισμοί. Η τροφοδοσία των ιζημάτων αυτών πραγματοποιείται κύρια από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και τοπικά από τους ανθρακικούς όγκους της Όθρυος. Η δυναμικότητα των υδροφόρων στρωμάτων που αναπτύσσονται στα ιζήματα αυτά είναι περιορισμένη και ελέγχεται κύρια από το πάχος τους και από τη λιθολογική τους σύσταση.

#### **Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των προσχωματικών υδροφόρων στρωμάτων**

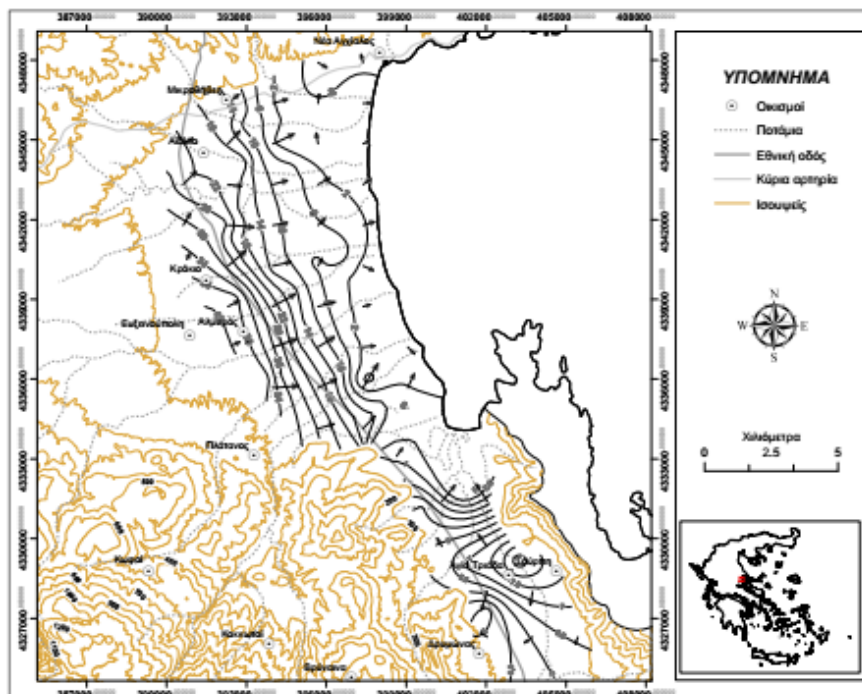
Για τον προσδιορισμό των υδρογεωλογικών συνθηκών των υδροφόρων στρωμάτων της λεκάνης του Αλμυρού, απαιτείται ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Λέγοντας γεωμετρικά χαρακτηριστικά αναφερόμαστε στη βάση, το πάχος και την οροφή των υδροφόρων στρωμάτων. Για το σκοπό αυτόν πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη απογραφή γεωτρήσεων στις υπολεκάνες Ευξεινούπολης και Σούρπης. Κατά την απογραφή των γεωτρήσεων έγινε προσπάθεια εύρεσης και λιθολογικών τομών τα οποία και θα επέτρεπαν να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων στρωμάτων (Μυριούνης, 2008).

#### **Προσχωματικοί υδροφόροι υπολεκάνης Ευξεινούπολης**

Στον προσχωματικό υδροφορέα της λεκάνης Αλμυρού (υπολεκάνη Ευξεινούπολης) αναπτύσσονται επάλληλα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση διαφορετικών πιεζομετρικών επιφανειών. Οι χάρτες των ισοπιεζομετρικών καμπυλών που παρατίθενται στη συνέχεια, αφορούν τη γενική εικόνα της αθροιστικής πιεζομετρίας όλων των επιμέρους υπό πίεση υδροφόρων στρωμάτων (Μυριούνης, 2008). Για την κατασκευή των πιεζομετρικών χαρτών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kriging. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για την περίοδο του Μαΐου 2005, Σεπτεμβρίου 2005, Απριλίου 2006, Σεπτεμβρίου 2006. Κύρια χαρακτηριστικά της μορφολογίας της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι η κυματοειδής μορφή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών, με συγκλίνουσες και αποκλίνουσες γραμμές ροής (Castany, 1963, 1968), η παραλληλία αυτών, και η διαφοροποίηση κατά περιοχές της μεταξύ τους απόστασης, δηλαδή η μεταβολή της υδραυλικής κλίσης των υδροφόρων στρωμάτων. Κατά την περίοδο του Μαΐου του 2005 (Εικόνα 32) η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 0 έως 44 m σε απόλυτο υψόμετρο, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές της κατά μήκος της παραλίας. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στα δυτικά τμήματα της περιοχής. Η κύρια διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού στο βόρειο τμήμα γίνεται προς τα ανατολικά-νοτιοανατολικά. Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής η ροή του υπόγειου νερού έχει διεύθυνση προς τα ανατολικά, ενώ κινούμενοι προς τα νότια η ροή των υδάτων είναι από τα δυτικά-νοτιοδυτικά προς τα ανατολικά-βορειοανατολικά. Κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2005 (Εικόνα 33) η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή κυμαίνεται από -2 έως +42 m σε απόλυτο υψόμετρο, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές της κατά μήκος της παραλίας. Η ύπαρξη αρνητικών πιεζομετρικών φορτίων εντοπίζεται στα περιθώρια της περιοχής, στο βόρειο και στο νότιο τμήμα αυτής και φτάνει σε απόσταση 2800m από την ακτή στο βόρειο τμήμα και 1100m για το νότιο τμήμα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρινσης σε αυτές τις περιοχές.



Εικόνα 32. Πιεζομετρικός χάρτης Μαΐου 2005 (Μυριούνης, 2008)



Εικόνα 33. Πιεζομετρικός χάρτης Σεπτεμβρίου 2005(Μυριούνης, 2008)

Αναφορικά με τη μορφολογία των καμπυλών παρουσιάζονται δύο άξονες σύγκλισης στο βόρειο και στο νότιο τμήμα της περιοχής, οι οποίοι και ταυτίζονται με τους άξονες επιφανειακής απορροής του Λαχανορέματος και του Πλατανορέματος. Έτσι τα δύο ρέματα αυτά φαίνεται να αποστραγγίζουν τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα.

Η τροφοδοσία των υπογείων νερών της περιοχής με βάση τη μορφολογία των ισοπιεζομετρικών καμπυλών και τις γραμμές ροής πραγματοποιείται στα βόρεια και νότια τμήματα της περιοχής από τους καρστικούς όγκους της περιοχής, ενώ στο κεντρικό τμήμα η τροφοδοσία πραγματοποιείται από τα νεογενή και τεταρτογενή ιζήματα και από την περιοδική ροή των ρεμάτων της περιοχής. Η υδραυλική κλίση για την περίοδο του Απριλίου του 2006 (Εικόνα 34) κυμαίνεται από 1.14 % στα βόρεια τμήματα της περιοχής σε 0.72 % κινούμενοι προς τα νότια της περιοχής, ενώ όσο κινούμαστε προς τα δυτικά η τιμή της είναι 1.5 % και μειώνεται όσο κινούμαστε προς την ακτή. Στα νότια τμήματα της περιοχής οι υδραυλικές κλίσεις είναι μικρές, της τάξης του 0.3 %.

Η υδραυλική κλίση έχει τιμές στα βόρεια τμήματα και στα κεντρικά τμήματα της περιοχής που κυμαίνονται γύρω στο 0.8 %, ενώ παρουσιάζει μικρότερες τιμές κινούμενοι προς τα παράλια. Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, στην περιοχή του αεροδρομίου της Νέας Αγχιάλου παρουσιάζονται οι χαμηλότερες υδραυλικές κλίσεις 0.2 %. Στο νότιο τμήμα της περιοχής οι κλίσεις είναι κατά μέσο όρο 0.8 % με τάση να μειώνονται προς τα παράλια.

Αναφορικά με τη μορφολογία των πιεζομετρικών καμπυλών αυτές παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με την περίοδο του Μαΐου του 2005. Επίσης στο κεντρικό τμήμα της περιοχής παρουσιάζεται μια τοπική πύκνωση των πιεζομετρικών καμπυλών, γεγονός που αποτυπώνεται και στο χάρτη της περιόδου του Μαΐου 2005. Αυτό οφείλεται στη λιθολογική σύσταση των στρωμάτων της εκεί περιοχής, καθώς σε εκείνη την περιοχή παρουσιάζονται με το μικρότερο πάχος τους. Κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2006 (Εικόνα 35) η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή κυμαίνεται από -2 έως 34 m σε απόλυτο υψόμετρο, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές της κατά μήκος της παραλίας. Η ύπαρξη αρνητικών πιεζομετρικών φορτίων εντοπίζεται, και σε αυτήν την περίπτωση, στο βόρειο και στο νότιο τμήμα αυτής και φτάνει σε απόσταση 3000m από την ακτή στο βόρειο τμήμα και 1100m για το νότιο τμήμα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρισης στις εκεί περιοχές (Μυριούνης, 2008).



μορφολογία των πιεζομετρικών καμπυλών αυτές παρουσιάζονται με παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους. Επίσης στο βόρειο τμήμα της περιοχής παρουσιάζεται ένας κώνος πτώσης στάθμης, ο οποίος και παρουσιάζει αρνητικό πιεζομετρικό φορτίο, ενδεικτικό της υπεράντλησης των υπόγειων νερών που παρουσιάζονται στην περιοχή. Γενικώς στην περιοχή παρατηρείται μια υποχώρηση της στάθμης του υπόγειου νερού, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στις αυξημένες αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής.

#### **Προσχωματικοί υδροφορείς Σούρπης**

Αναφορικά με τους προσχωματικούς υδροφόρους που αναπτύσσονται στην περιοχή της Σούρπης η πιεζομετρική κατάστασή τους εμφανίζεται στους χάρτες που προηγήθηκαν και σχολιάστηκαν για την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης. Κατά την περίοδο του Μαΐου του 2005 η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 3 έως 10 m σε απόλυτο υψόμετρο, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές κατά μήκος της παραλίας. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στα δυτικά τμήματα της περιοχής. Η κύρια διεύθυνση της ροής του υπόγειου νερού, για την περίοδο αυτή, είναι από το κεντρικό τμήμα της περιοχής προς την παραλία, καθώς επίσης και προς το νότιο και ανατολικό τμήμα. Επίσης οι υδραυλικές κλίσεις κινούμενοι προς τα παράλια είναι πολύ μικρές, της τάξης του 0.17%, ενώ νοτιότερα αυτές έχουν μέση τιμή 0.4 %.

Αναφορικά με τη μορφολογία των καμπυλών παρουσιάζεται ένα ύβωμα στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, βόρεια του χωριού Δρυμώνας, η ύπαρξη του οποίου δικαιολογείται από την παρουσία ρηγμάτων που τέμνουν τον υποκείμενο υπό πίεση καρστικό υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος εξαιτίας του υψηλού πιεζομετρικού του φορτίου ανεβάζει την υπόγεια στάθμη του και τροφοδοτεί τα ιζήματα της γύρω περιοχής. Κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2005 η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 0 έως 9m, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές της κατά μήκος της παράκτιας ζώνης. Στην περιοχή της Σούρπης παρουσιάζεται το φαινόμενο της αντιστροφής της κίνησης του υπογείου νερού, καθώς η κίνησή του πραγματοποιείται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Αυτό το γεγονός πιστεύεται ότι οφείλεται στην παρουσία διασταυρούμενων ρηγμάτων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, που δημιουργούν συνθήκες υποαρτεσιανισμού του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα και διαμορφώνοντας με το υψηλότερο πιεζομετρικό του φορτίο από το αντίστοιχο των υπερκείμενων χαλαρών ιζημάτων τις συνθήκες τροφοδοσίας που επικρατούν στην περιοχή. Με την πτώση της στάθμης του υπογείου νερού κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου ελαττώνεται και η τροφοδοσία των ιζημάτων από τα δυτικά. Επίσης η τροφοδοσία των ιζημάτων πραγματοποιείται από μια περιοχή βόρεια του χωριού της Σούρπης, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ρηγμάτων διεύθυνσης ABA – ΔΝΔ, όσο και ΒΒΔ- ΝΝΔ τα οποία και έχουν διαμορφώσει προνομιακούς διαδρόμους κίνησης του υπόγειου νερού στην περιοχή. Αναφορικά με τις υδραυλικές κλίσεις αυτές είναι της τάξης του 0.22 % στο παραλιακό τμήμα της περιοχής, ενώ στα νότια τμήματα αυτής είναι πολύ πιο μικρές, της τάξης του 0.06 %.

Για τον Απρίλιο του 2006 παρατηρούνται και εδώ υβώματα με κλειστές πιεζομετρικές καμπύλες στις ίδιες σχετικά θέσεις που εντοπίστηκαν και στους πιεζομετρικούς χάρτες του

2005, με διεύθυνση ροής προς όλες σχεδόν τις διευθύνσεις. Το γεγονός αυτό πιστοποιεί την ερμηνεία που δώθηκε παραπάνω, την παρουσία δηλαδή ρηγμάτων διεύθυνσης ABA -NNA που τέμνουν τον υποκείμενο καρστικό υδροφορέα με το υψηλότερο πιεζομετρικό φορτίο και την ολόπλευρη σχεδόν τροφοδοσία των υπερκείμενων ιζημάτων τοπικά. Οι στάθμες για την περίοδο αυτή παρουσιάζονται πιο χαμηλές (1 – 9m) σε σχέση με την περίοδο του Μαΐου του 2005, γεγονός το οποίο και έρχεται σε συμφωνία με τις συνθήκες τροφοδοσίας στην περιοχή, καθώς η πτώση της στάθμης του υπογείου νερού έχει ως αποτέλεσμα η τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων να πραγματοποιείται τόσο από τα ανατολικά όσο και από τα δυτικά. Επίσης η υδραυλική κλίση παρουσιάζει μέση τιμή στο παράκτιο τμήμα 0.13 %, στο κεντρικό τμήμα τιμή 0.23 %, και στο νότιο τμήμα τιμή 0.44 %. Το Σεπτέμβριο του 2006 η πιεζομετρική στάθμη στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται από 1 έως 9m, παρουσιάζοντας τις χαμηλότερες τιμές της κατά μήκος της παραλίας. Η τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων πραγματοποιείται από τα ανατολικά τμήματα της περιοχής, από το ύψωμα, το οποίο και έχει διαπιστωθεί και σε προηγούμενες περιόδους, στην περιοχή της Σούρπης. Αναφορικά με τις υδραυλικές κλίσεις αυτές είναι της τάξης του 0.15 % στο παραλιακό τμήμα της περιοχής, ενώ στα νότια τμήματα αυτής παρουσιάζονται μεγαλύτερες της τάξης του 0.43 %. Για τον Απρίλιο του 2006 παρατηρείται πως η τροφοδοσία των ιζημάτων της περιοχής πραγματοποιείται από τα ανατολικά. Και για αυτήν την περίοδο παρουσιάζονται τα υβώματα των ισοπιεζομετρικών καμπυλών στις ίδιες θέσεις στην περιοχή της Σούρπης και βορειότερα. Οι στάθμες για την περίοδο αυτή παρουσιάζονται πιο χαμηλές (1 – 8m) σε σχέση με την περίοδο του Απριλίου του προηγούμενου έτους, γεγονός το οποίο και έρχεται σε συμφωνία με τις φαινόμενες συνθήκες τροφοδοσίας στην περιοχή. Επίσης η υδραυλική κλίση παρουσιάζει μέση τιμή στο παράκτιο τμήμα και στο νότιο τμήμα 0.23 %, ενώ στο κεντρικό τμήμα παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές 0.28 %. Το γενικότερο φαινόμενο το οποίο παρατηρείται στην περιοχή είναι οι χαμηλές στάθμες που εντοπίζονται στο παράκτιο τμήμα αυτής, κύρια τις περιόδους του Σεπτεμβρίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση φαινομένων θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή που οδηγεί στην αλμύριση του γλυκού υπόγειου νερού και των εδαφών της περιοχής (Μυριούνης, 2008).

#### **6.6.7. Διακυμάνσεις της υπόγειας στάθμης των προσχωματικών υδροφορέων**

Κάθε διακύμανση της τιμής της απόλυτης πιεζομετρικής στάθμης, δείχνει τον τρόπο με τον οποίο αποκρίνεται ο υδροφορέας στις εκάστοτε υδρογεωλογικές αλλαγές. Επίσης, οι αλλαγές της πιεζομετρικής στάθμης, σε μηνιαία, ετήσια ή υπερετήσια βάση περιέχουν πληροφορίες για το καθεστώς διαχείρισης των υπόγειων νερών της εκάστοτε περιοχής.

#### **Προχωματικοί υδροφορείς Ευξεινούπολης**

Οι παρατηρούμενες πτώσεις της στάθμης του υπογείου νερού είναι συνάρτηση του πλήθους των γεωτρήσεων, της αντλούμενης ποσότητας νερού, της κατανομής των κατακρημνισμάτων, των τοπικών μεταβολών των υδραυλικών παραμέτρων και των γεωμετρικών στοιχείων των υδροφορέων. Η μέση ετήσια πτώση στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων για το έτος 2005 κυμαίνεται από 0 έως 16m. Οι μεγαλύτερες πτώσεις στάθμης (10 – 12m) παρουσιάζονται στο βόρειο τμήμα της περιοχής, καθώς επίσης και στο νότιο



στην περιοχή ανατολικά του Πλατάνου. Αντίθετα οι χαμηλότερες παρατηρούνται στο παράκτιο τμήμα της περιοχής.

Για το έτος 2006 η μέση ετήσια πτώση στάθμης των υδροφόρων κυμαίνεται από 2 έως 12m. Κατά το έτος αυτό οι μεγαλύτερες πτώσεις παρατηρούνται στο βόρειο και στο νότιο τμήμα της περιοχής, καθώς επίσης και στο κεντρικό της τμήμα. Γενικότερα παρατηρείται μείωση της πτώσης της στάθμης κατά το έτος 2006 γεγονός που οφείλεται στην αύξηση των βροχοπτώσεων, για το έτος αυτό κατά 15% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, βάση στοιχείων του βροχομετρικού σταθμού της Νέας Αγχιάλου. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εμφάνιση αρνητικής στάθμης κύρια κατά τις περιόδους του Σεπτεμβρίου. Οι αρνητικές αυτές στάθμες παρουσιάζονται μεγαλύτερες κατά το έτος 2006. Επίσης διαπιστώνεται ότι οι αρνητικές στάθμες παρουσιάζονται και τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος), ενδεικτικό της υπεράντλησης που παρουσιάζεται στην περιοχή. Το γεγονός αυτό είναι δυνατό να οδηγήσει στην εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρισης στην περιοχή. Στην περιοχή δυτικά του αεροδρομίου της Νέας Αγχιάλου παρουσιάζονται μεγαλύτερες στάθμες οι οποίες και κυμαίνονται κατά μέσο όρο από 20 έως 30m. Γενικά και γι' αυτήν την περιοχή παρουσιάζεται μια πτωτική τάση της στάθμης του υπόγειου νερού με το χρόνο, παρόλο που παρουσιάζονται μεγαλύτερες βροχοπτώσεις κατά τα έτη 2006 και 2007. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην αύξηση των αντλούμενων ποσοτήτων που χρησιμοποιούνται για τις αρδευτικές ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής (ΙΓΜΕ, 2010).

### **6.7. Συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών της Λεκάνης**

- Γεωτεκτονικά η λεκάνη της περιοχής έρευνας, αποτελείται από πετρώματα της Υποπελαγονικής ζώνης. Ανήκει στην ενότητα της ανατολικής Όθρυος-Χλωμού.
- Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ως επί το πλείστον είναι αμεταμόρφωτοι ως ελαφρά μεταμορφωμένοι. Ηλικιακά αντιστοιχούν σε γεωλογικές ενότητες του Τριαδικού–Ιουρασικού, Κρητιδικού, Παλαιογενούς, Νεογενούς και Τεταρτογενούς.
- Τα μεγάλα ποσοστά Αλλούβιων σχηματισμών στο Τεταρτογενές και στο Ανώτερο Κρητιδικό δείχνουν την ταχύτητα δημιουργίας των σχηματισμών και κατά προέκταση τη γεωλογική αστάθεια και τις έντονες εδαφικές διεργασίες που επικρατούσαν.
- Η γενική διεύθυνση κίνησης του υπογείου νερού είναι από δυτικά προς ανατολικά με τελικό αποδέκτη τη θάλασσα.
- Βορειοδυτικά των Μικροθηβών οι γραμμές ροής υποδηλώνουν την ύπαρξη υδραυλικής επικοινωνίας με τους γειτονικούς σχηματισμούς. Με βάση τη λιθολογία των σχηματισμών βόρεια η τροφοδοσία της λεκάνης του Αλμυρού μπορεί να θεωρηθεί ότι πραγματοποιείται από τους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους.
- Δυτικά των Μικροθηβών διακρίνεται μια μικρή τροφοδοσία των Τεταρτογενών αποθέσεων από τους Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους.
- Δυτικά της λεκάνης του Αλμυρού οι γραμμές ροής υποδηλώνουν την ύπαρξη μικρής τροφοδοσίας των Τεταρτογενών σχηματισμών από το σχηματισμό του φλύσχη.

- Νοτιοδυτικά της υπολεκάνης της Σούρπης διακρίνεται υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των Ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων και των Μεταλπικών σχηματισμών.
- Τέλος η συγκλινική μορφή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών βόρεια της λεκάνης ερμηνεύεται με την αποδοχή ύπαρξης ενός άξονα αποστράγγισης με διεύθυνση ανατολή–δύση.
- Η ζώνη αποστράγγισης ταυτίζεται με τη διεύθυνση του Χολορέματος και υποδεικνύει επικοινωνία μεταξύ των ασβεστόλιθων δυτικά και ανατολικά της λεκάνης και των Ολοκαινικών αποθέσεων. (Χουλιάρας, 2014)

## 7. Παρουσίαση δεδομένων

### 7.1. Γενικά

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στοιχεία που βρέθηκαν από διάφορες πηγές και τα οποία παρέχουν τα δεδομένα που χρειάζονται κατά την αξιολόγηση σε προκαταρκτικό στάδιο έρευνας για την πιθανότητα ύπαρξης ενός γεωθερμικού πεδίου. Τα στοιχεία αυτά περιέχουν δεδομένα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις και πηγές στην περιοχή της λεκάνης του Αλμυρού Μαγνησίας.

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα που μετρήθηκαν είναι η θερμοκρασία νερού στην έξοδο του αντλητικού συστήματος ή της πηγής (σε περίπτωση αρτεσιανισμού), το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμοκρασία αέρα. Επίσης μετρήθηκε η στάθμη του νερού στη γεώτρηση, ενώ λήφθηκαν και δείγματα νερού για την πραγματοποίηση υδροχημικής ανάλυσης στο εργαστήριο.

Ενδείξεις για το βάθος στο οποίο έχουν διανοιχθεί οι γεωτρήσεις σημειώθηκαν με προφορική μαρτυρία όταν υπήρχε η ευκαιρία καθώς δεν ήταν συνήθως δυνατή η μέτρηση με ίδια μέσα του βάθους των γεωτρήσεων. Το ίδιο έγινε και με πληροφορίες για τη διάμετρο της γεώτρησης και το είδος του αντλητικού συστήματος.

Πρέπει να σημειωθεί πως τα στοιχεία συλλέχθηκαν από αρκετές διαφορετικές πηγές και ως εκ τούτου παρουσιάζουν σημαντική ανομοιογένεια ως προς την πληρότητά τους. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη ομάδα δεδομένων προέρχεται από το έργο «Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπογείων νερών και των υδροφόρων συστημάτων της χώρας (Κ.Ε. 7.3.2.1.), Υποέργο 6: Υπόγειο Υδατικό Δυναμικό Θεσσαλίας (Υ.Δ. 08) – Απογραφή σημείων ύδατος» που πραγματοποιήθηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε. στα πλαίσια του Γ' ΚΠΣ «Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα».

Η επόμενη μεγάλη ομάδα στοιχείων αποτελείται από μετρήσεις που πραγματοποίησε στα πλαίσια της διπλωματικής της εργασίας «Υδρογεωλογικό Καθεστώς Λεκάνης Αλμυρού Βόλου», για το μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ι. Κουμαντάκη, η Α. Μεντζαφού.

Στοιχεία επίσης πάρθηκαν από το έργο του Ι.Γ.Μ.Ε. «Δίκτυο Παρακολούθησης Υπόγειων Νερών Ελλάδος» και τη μελέτη «Γεωθερμική Διερεύνηση Ανατολικής Θεσσαλίας» που συνέταξαν οι Βακαλόπουλος Π., Αρβανίτης Α. κ.ά.

Χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων που συγκεντρώθηκε, έγινε προσπάθεια να αποτυπωθούν διάφορες πτυχές και πλευρές της λεκάνης του Αλμυρού, ώστε να επιτευχθεί τελικά να περιγραφεί και να εξηγηθεί ο «μηχανισμός» του σύνθετου συστήματος που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης.

## 7.2. Παρουσίαση θερμομετρήσεων

Αρχικά αξιοποιήθηκε η ομάδα δεδομένων που έδινε τη θερμοκρασία του νερού που αντλείται από τις γεωτρήσεις. Όπως φαίνεται και από τη λίστα των δεδομένων, σε αρκετές από τις γεωτρήσεις έγιναν επανειλημμένες μετρήσεις σε διαφορετικές περιόδους, με αποτέλεσμα να έχουμε για την ίδια γεώτρηση θερμοκρασιακές μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση. Παρατηρώντας όμως πιο κοντά την ταλάντωση της τιμής της θερμοκρασίας μέσα στο έτος για τις διαφορετικές γεωτρήσεις, βλέπουμε πως υπάρχει μια συνέπεια και μια ταύτιση για την εποχή στην οποία σημειώνονται οι υψηλές και αντίστοιχα οι χαμηλές θερμοκρασίες. Παρακάτω (Πίνακας 8) φαίνονται κάποιες μετρήσεις θερμοκρασίας για τις γεωτρήσεις Α1, Γ112, Γ33, Γ70 και ΥΓ2/82 με τις αντίστοιχες ημερομηνίες στις οποίες έγινε η καταγραφή.

Πίνακας 8. Θερμομετρήσεις σε 5 γεωτρήσεις στη διάρκεια του έτους

A1	10- Σεπ- 08	20- Σεπ- 06	24- Μαΐ -06	21- Ιουν -06	11- Ιουν -08	23- Μαΐ -07	25- Οκτ- 08	12- Οκτ- 05	20- Απρ- 05	14- Φεβ -07	22- Φεβ -06	09- Φεβ -05
T(°C)	20,2	19,6	19,5	19,2	18,5	18,2	17,7	17,3	17	16,1	15,4	15

Γ112	14- Ιουν -05	10- Σεπ- 08	10- Ιουν -08	20- Ιουν -06	23- Μαΐ -06	22- Μαΐ -07	19- Απρ- 05	24- Οκτ- 08	11- Οκτ- 05	21- Φεβ -06	13- Φεβ -07	08- Φεβ -05
T(°C)	22	20,1	19,4	18,7	18,6	18,5	17,8	17,5	17,3	17	16	15,6

Γ33	20- Ιουν -06	15- Ιουλ -13	09- Σεπ- 08	10- Ιουν -08	14- Ιουν -05	22- Μαΐ -07	02- Μαρ -15	08- Απρ- 13	19- Απρ- 05	13- Φεβ -07	02- Δεκ- 13	08- Φεβ -05
T(°C)	20,4	20,4	19,8	19,1	18,9	17,9	17,6	17,4	17	16,6	16,4	15,1

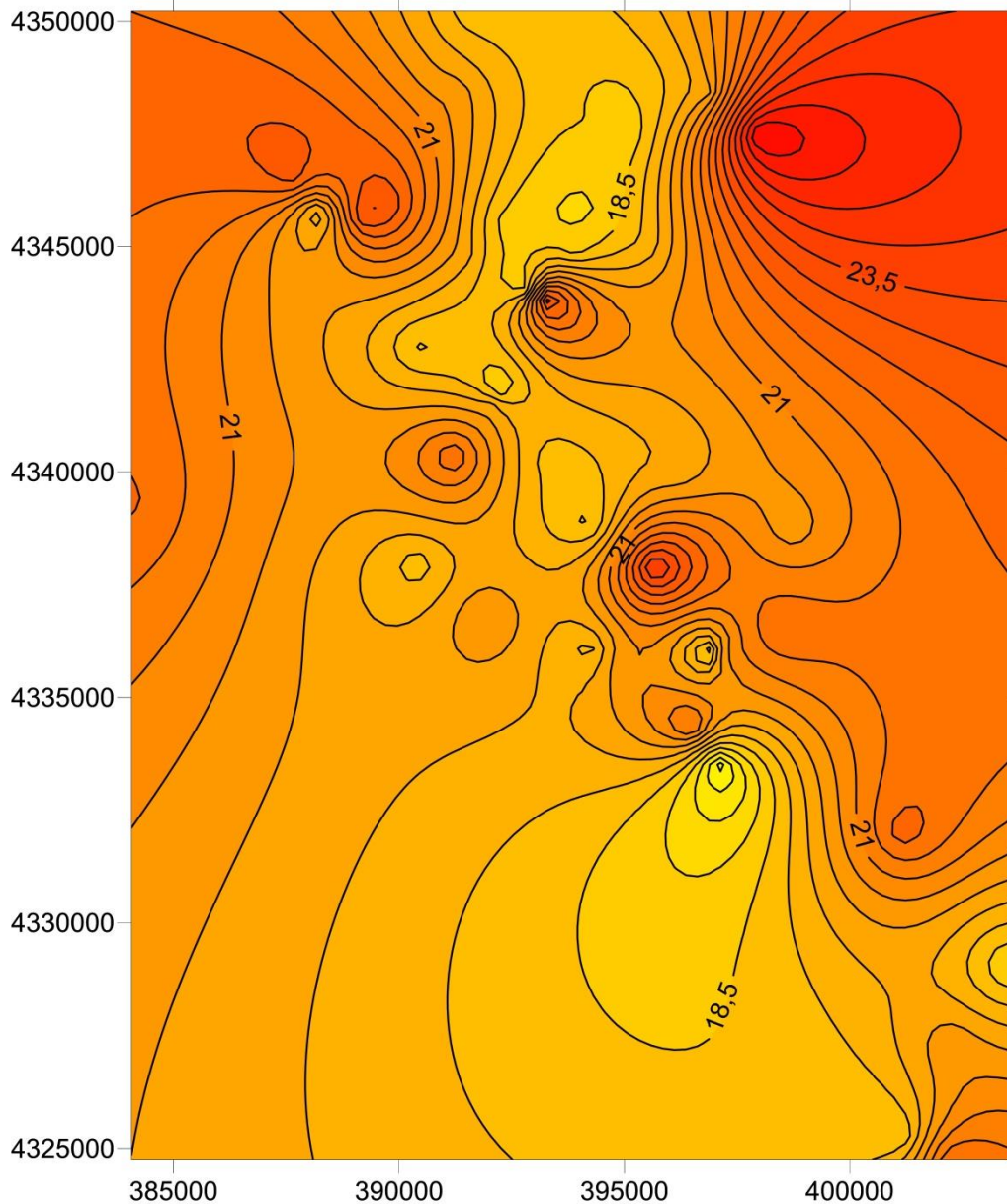
Γ70	27- Ιουλ -07	09- Ιουν -15	30- Ιουλ -08	14- Μαΐ -08	10- Μαΐ -07	15- Ιουλ -14	30- Ιαν- 07	12- Οκτ- 07	24- Νοε- 15	03- Δεκ- 13	11- Φεβ -14	03- Μαρ -15
T(°C)	23,4	20,8	19,6	19,2	19,1	19,1	18,8	18,6	18,4	16,9	13,6	11,5

ΥΓ2/ 82	09- Σεπ- 08	10- Ιουν -08	14- Ιουν -05	20- Ιουν -06	23- Μαΐ -06	22- Μαΐ -07	19- Απρ- 05	21- Φεβ -06	11- Οκτ- 05	13- Φεβ -07	24- Οκτ- 08	08- Φεβ -05
T(°C)	18,5	17,3	17	17	16,7	16,6	16,5	15,8	15,6	15,1	15	13,8

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα φαίνεται πως οι υψηλές θερμοκρασίες μετρούνται με σημαντική συνέπεια στο τέλος του καλοκαιριού και το μήνα Σεπτέμβριο, ενώ αντίστοιχα οι χαμηλότερες το χειμώνα και κυρίως το μήνα Φεβρουάριο. Θεωρώντας ως δεδομένο πως η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία των υπογείων

νερών και συνδυάζοντας την παραπάνω παρατήρηση με το γεγονός πως η ταλάντωση της θερμοκρασίας του νερού ταυτίζεται με το πέρασμα από την υγρή στη ξηρή περίοδο για την περιοχή, συμπεραίνουμε πως η πτώση της θερμοκρασίας κατά την υγρή περίοδο οφείλεται στην ανάμειξη των υπογείων νερών με το ψυχρά κατακρημνίσματα που κατεισδύουν στον υδροφόρο. Η ανάμειξη αυτή είναι πολύ μικρή κατά την ξηρή περίοδο, οπότε θα θεωρηθεί ότι οι μετρήσεις αυτής της περιόδου είναι πιο αντιπροσωπευτικές της πραγματικής θερμοκρασίας των υπογείων νερών. Οπότε σε κάθε περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η υψηλότερη θερμοκρασία που μετρήθηκε κατά τους ξηρούς μήνες για την δημιουργία σχημάτων και διαγραμμάτων. Όπου αυτό δεν είναι δυνατόν θα χρησιμοποιηθεί η μέτρηση άλλης περιόδου και θα ληφθεί το γεγονός αυτό υπόψιν κατά την αξιολόγηση των στοιχείων.

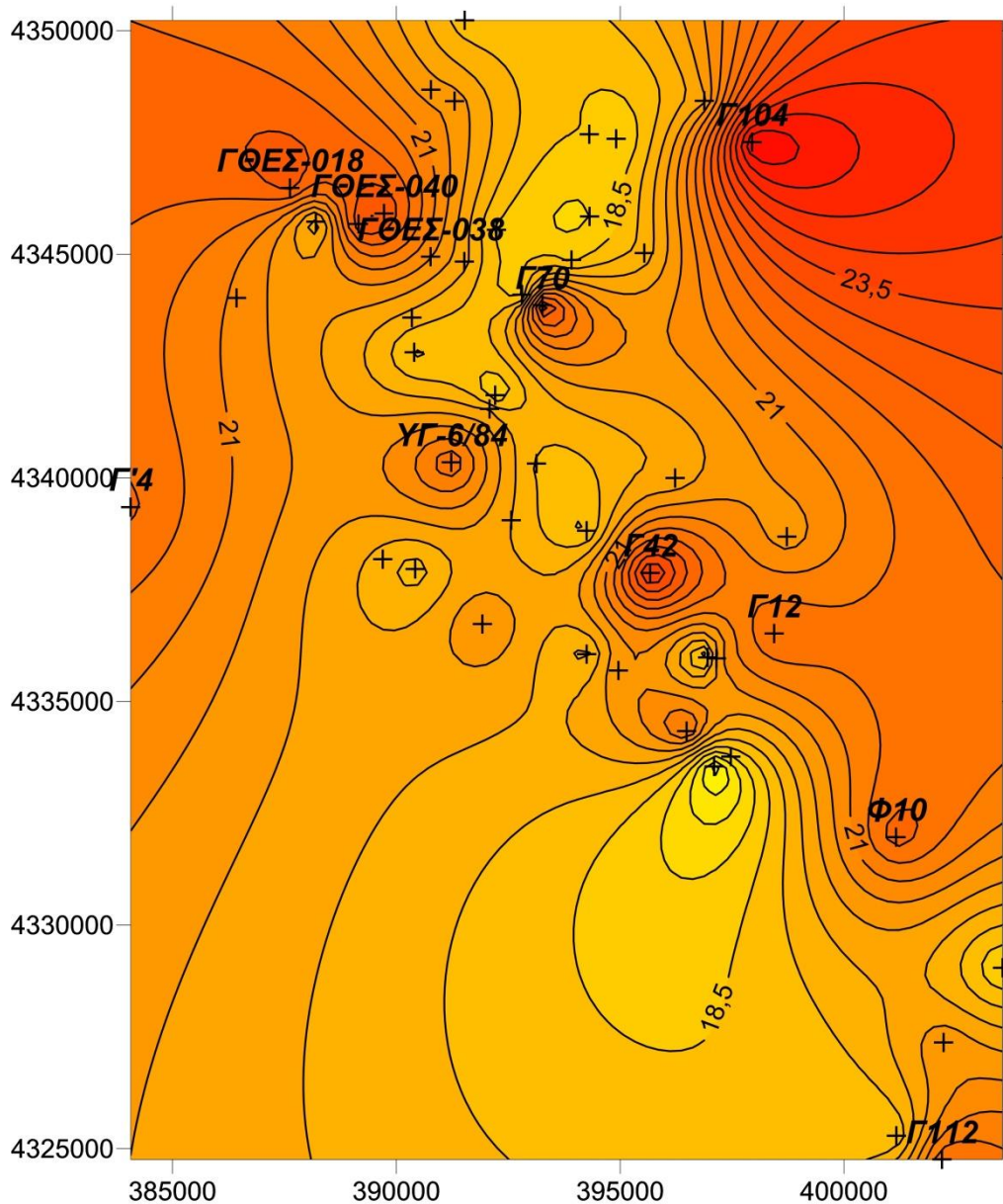
Με βάση την παραπάνω παραδοχή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την απογραφή των γεωτρήσεων σε συνδυασμό με τις θερμοκρασιακές τους μετρήσεις και με τη βοήθεια του προγράμματος Surfer v.11 της εταιρείας Golden Software, Inc. παράχθηκε το παρακάτω διάγραμμα ισοθέρμων καμπυλών (Εικόνα 36). Το σύνολο των γεωτρήσεων έχει διανοιχθεί σε βάθη από 100 έως 200 μέτρα οπότε γίνεται η παραδοχή πως αντλούν από τον ίδιο υδροφόρο και πως η εικόνα που προκύπτει είναι ενδεικτική του καθεστώτος που επικρατεί στην περιοχή.



Εικόνα 36. Διάγραμμα ισοθέρμων καμπυλών

Στην προηγούμενη εικόνα φαίνονται χαρακτηριστικά κάποιες εστίες υψηλότερης θερμοκρασίας νερού σε σχέση με τις περιβάλλουσες μετρήσεις. Οι θερμοκρασίες των δειγμάτων αυτών φανερώνουν νερό χαμηλής ενθαλπίας, όμως αν ληφθεί υπόψη το μικρό βάθος των γεωτρήσεων και άλλες παράμετροι που θα αναλυθούν παρακάτω κατά περίπτωση καταλαβαίνει κανείς πως υπάρχει κάποια ανωμαλία στη γεωθερμική βαθμίδα η οποία αξίζει να μελετηθεί και να εξηγηθεί.

Ακολουθεί το προηγούμενο διάγραμμα ισοθέρμων στο οποίο (Εικόνα 37) αυτή την φορά φαίνονται οι γεωτρήσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι οποίες αποτελούν εστίες των ανωμαλιών καθώς και μία γεώτρηση η οποία εμφάνισε σημαντικά αυξημένη θερμοκρασία νερού (ΓΘΕΣ-038,  $T=30,2^{\circ}\text{C}$ ), αλλά η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε κατά τη χάραξη των ισοθέρμων καμπυλών καθώς αντλούσε νερό από μεγαλύτερο βάθος σε σχέση με τις υπόλοιπες γεωτρήσεις.



Εικόνα 37. Διάγραμμα ισοθέρμων καμπυλών με σημειωμένες τις χαρακτηριστικές γεωτρήσεις

### 7.3. Θέση των γεωτρήσεων

Στη συνέχεια μεταφέρθηκαν οι γεωτρήσεις στον χάρτη του προγράμματος Google Earth για να υπάρξει μια πιο άμεση εικόνα του δικτύου τους. Στον πίνακα 9 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Αποτελούνται από τον κωδικό, τις συντεταγμένες και το υψόμετρο των γεωτρήσεων, ενώ συνοδεύονται από τις θερμοκρασιακές μετρήσεις και από το βάθος της κάθε γεώτρησης όπου αυτή η πληροφορία ήταν διαθέσιμη.

Πίνακας 9. Συντεταγμένες και θερμοκρασίανερού των γεωτρήσεων

ΚΩΔΙΚΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΘΕΡΜ. ΝΕΡΟΥ(°C)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)	X COORD	Y COORD
A1	/	20,2	2	398726	4338686
Γ108	/	17,9	54	392207,3	4341851
Γ110	/	18,4	42	394252,1	4338818
Γ111	/	19,6	16	396230,8	4339997
Γ112	/	22	112	402186,8	4324759
Γ113	/	19,5	58	392566,6	4339049
Γ114	/	20,5	28	397153,9	4335959
Γ12	150	22	11	398440	4336517
Γ17	120	17,9	16	403539	4329044
Γ2	120	20,5	51	394961	4335688
Γ33	150	20,4	38	402223	4327377
Γ42	/	24,3	16	395672,7	4337875
Γ5	120	21,8	36	396486	4334337
Γ61	150	20,6	64	391925	4336733
Γ70	110	23,4	35	393262	4343860
ΠΚ	/	18	20	397472,2	4333768
ΥΓ2/82	/	18,5	171	401171	4325289
Φ10	164	22,3	6	401165	4331967
ΓΘΕΣ-040	200	23	118	389729	4345913
ΓΘΕΣ-078	120	20,2	/	390770	4348679
ΓΘΕΣ-079	200	20,3	/	391300	4348425
ΓΘΕΣ-069	150	18,4	/	392235	4345543
ΓΘΕΣ-065	110	18,5	/	394310	4347681
ΓΘΕΣ-064	100	17,9	/	394912	4347578
ΓΘΕΣ-039	/	19,7	/	391518	4344833
ΓΘΕΣ-066	120	18	/	394314	4345843
ΓΘΕΣ-067	/	18,3	/	393911	4344872
ΓΘΕΣ-003	200	18,7	/	391525	4350230
ΓΘΕΣ-019	165	19	/	388204	4345725
ΓΘΕΣ-018	200	22,8	/	387628	4346483
Γ'1	/	19,2	15	395539	4345022
Γ'2	/	19,6	53	392080,5	4341539
Γ'3	/	18,9	44	393127,8	4340321
Γ'4	/	22,1	208	384067,6	4339347
Γ2*	/	18,8	61	394248,1	4336059
Γ13B	/	17,9	20	396951,6	4335986
Γ57	/	19,3	84	389693,7	4338178
Γ58	/	18,7	133	390424,4	4337959
Γ67	100	18,4	46	390400	4342805
Γ78	/	23	122	389157,9	4345679
Γ83	98	19,3	68	390351,3	4343585
Γ90	/	19,9	64	396878,5	4348431

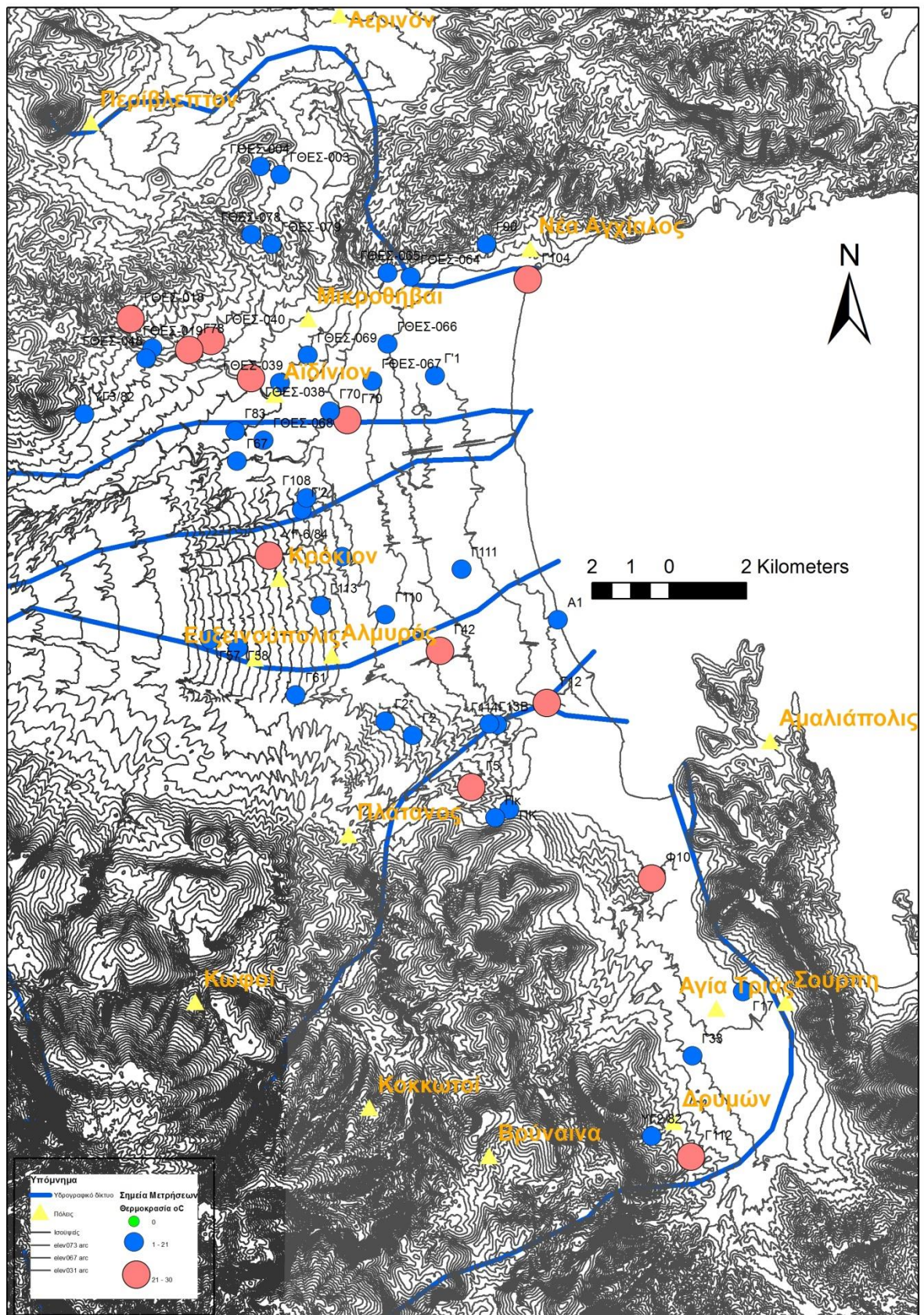


## 7. Παρουσίαση δεδομένων

---

ΚΩΔΙΚΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΒΑΘΟΣ(m)	ΘΕΡΜ. ΝΕΡΟΥ(°C)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ(m)	X COORD	Y COORD
Γ104	/	26,1	8	397950,2	4347506
ΥΓ3/82	/	20,9	161	386430,1	4344023
Πκ	/	16,2	/	397100,1	4333550
ΥΓ-6/84	203	22	69	391228,1	4340346
ΓΘΕΣ-038	250	30,2	87	390763	4344942

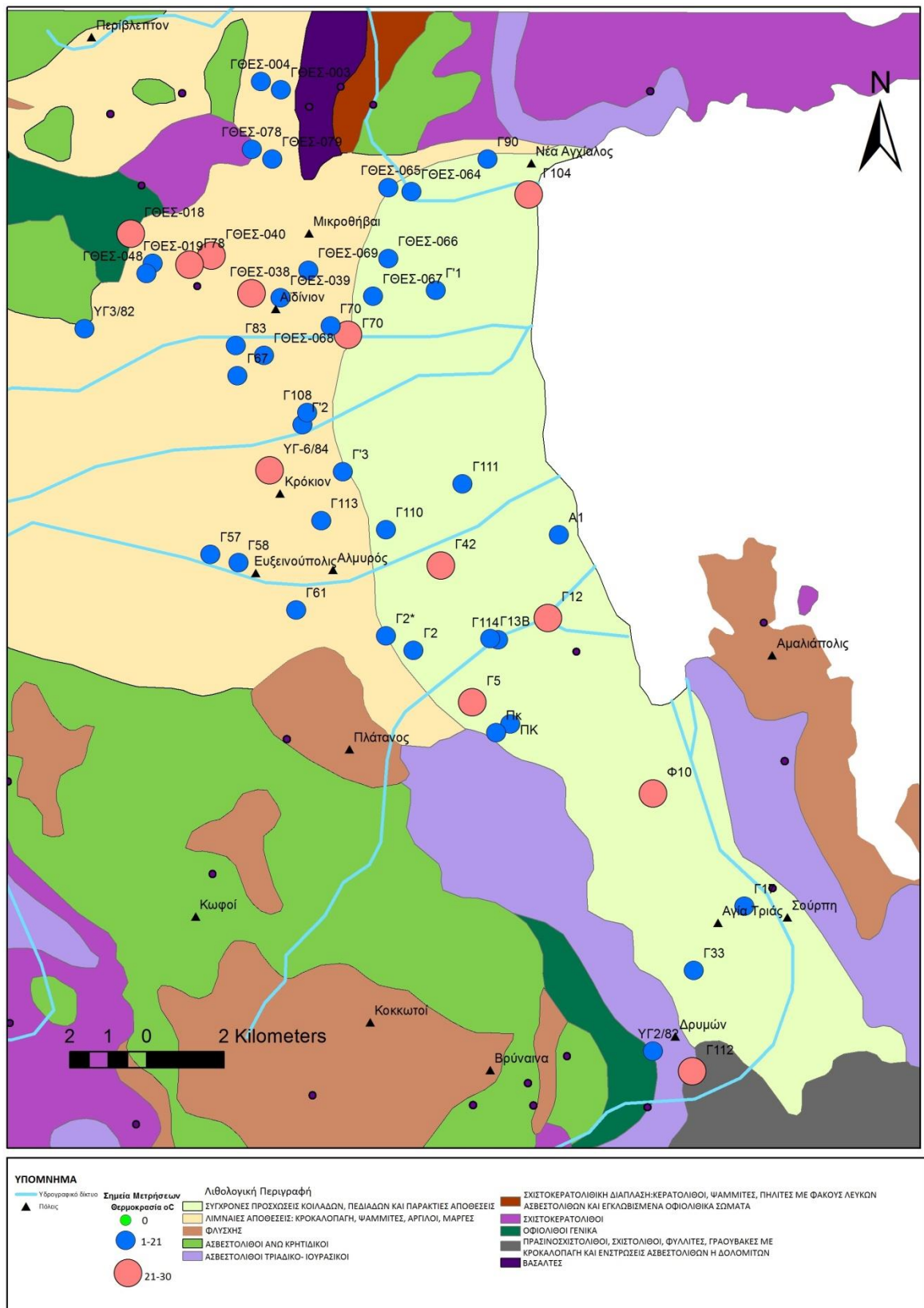
Στον τοπογραφικό χάρτη (Εικόνα 38) που ακολουθεί φαίνονται οι θέσεις των γεωτρήσεων.



Εικόνα 38. Τοπογραφικός χάρτης λεκάνης Αλμυρού με τις θέσεις των γεωτρήσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων πάνω στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής. Ο χάρτης αυτός παράχθηκε από τα 4 γεωλογικά φύλλα που συνθέτουν την περιοχή με τη χρήση του προγράμματος ArcGIS.

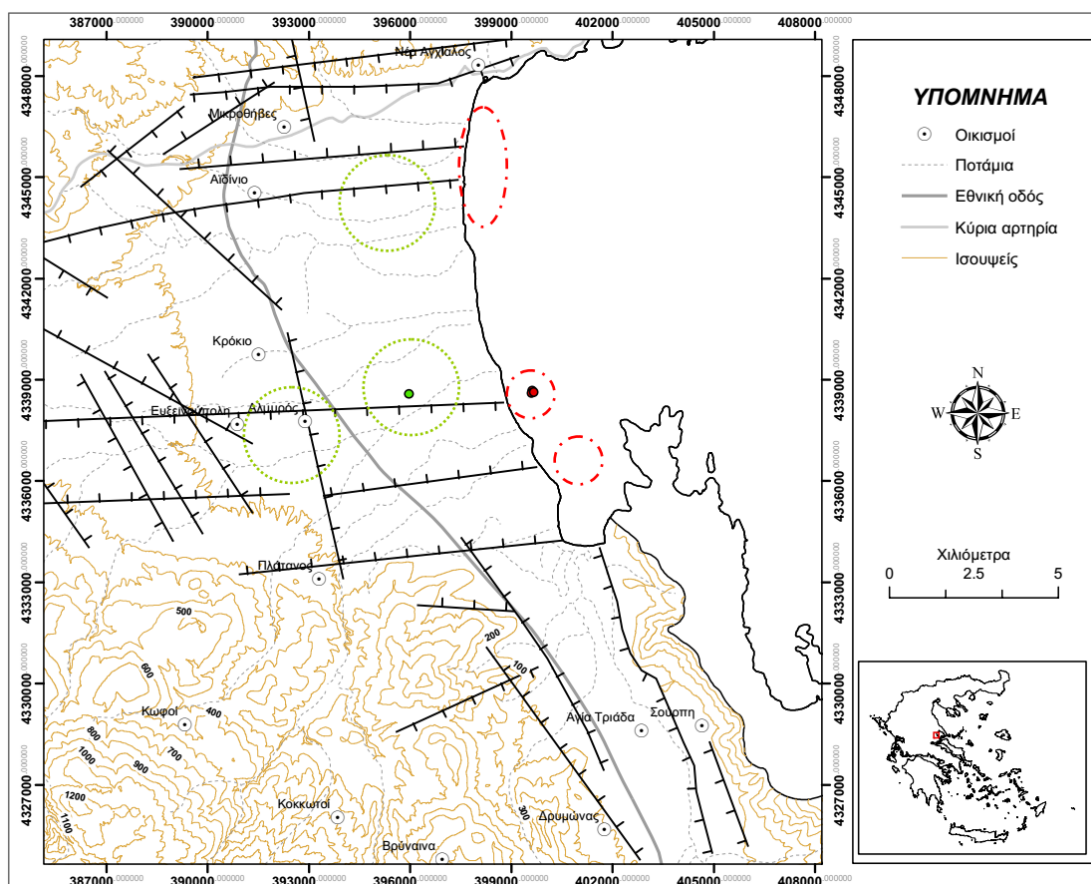
Καθώς η χαρτογράφηση του κάθε φύλλου είχε γίνει από διαφορετικό ερευνητή και κατά πάσα πιθανότητα σε διαφορετική χρονική περίοδο, υπήρχε στα όρια ένωσης των φύλλων σημαντική ασυμφωνία ή οποία εκφραζόταν ως ασυνέχεια στους εδαφικούς σχηματισμούς η οποία δεν ήταν πραγματική. Το τελικό αποτέλεσμα μετά την ενοποίηση των φύλλων φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 39).



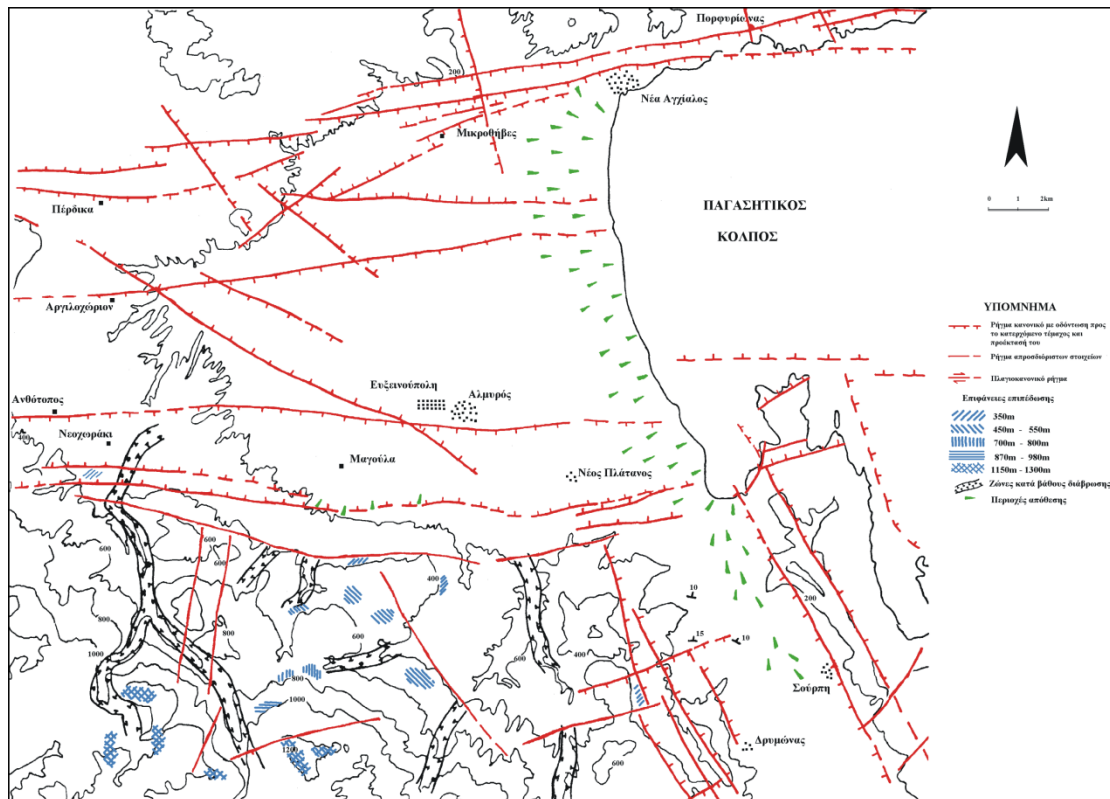
Εικόνα 39. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Αλμυρου στον οποίο διακρίνονται και οι θέσεις των γεωτρήσεων

### 7.4. Θέση ρηγμάτων

Κατά τη διερεύνηση κάποιας γεωθερμικής ανωμαλίας, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η τεκτονική της περιοχής, καθώς οι δύο εμφανίσεις συσχετίζονται άμεσα. Με βάση αυτή την αρχή και χρησιμοποιώντας τους χάρτες ρηγμάτων που φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 40 και Εικόνα 41) και που σχεδίασαν ο Χ. Μυριούνης και η Α. Μεντζαφού (βασισμένη στη μελέτη του Γαλανάκη) αντίστοιχα μεταφέρθηκαν οι γραμμές των ρηγμάτων στις δορυφορικές εικόνες του προγράμματος Google Earth, για να υπάρχει άμεση εποπτεία της σχετικής θέσης των γεωτρήσεων και των ρηγμάτων.



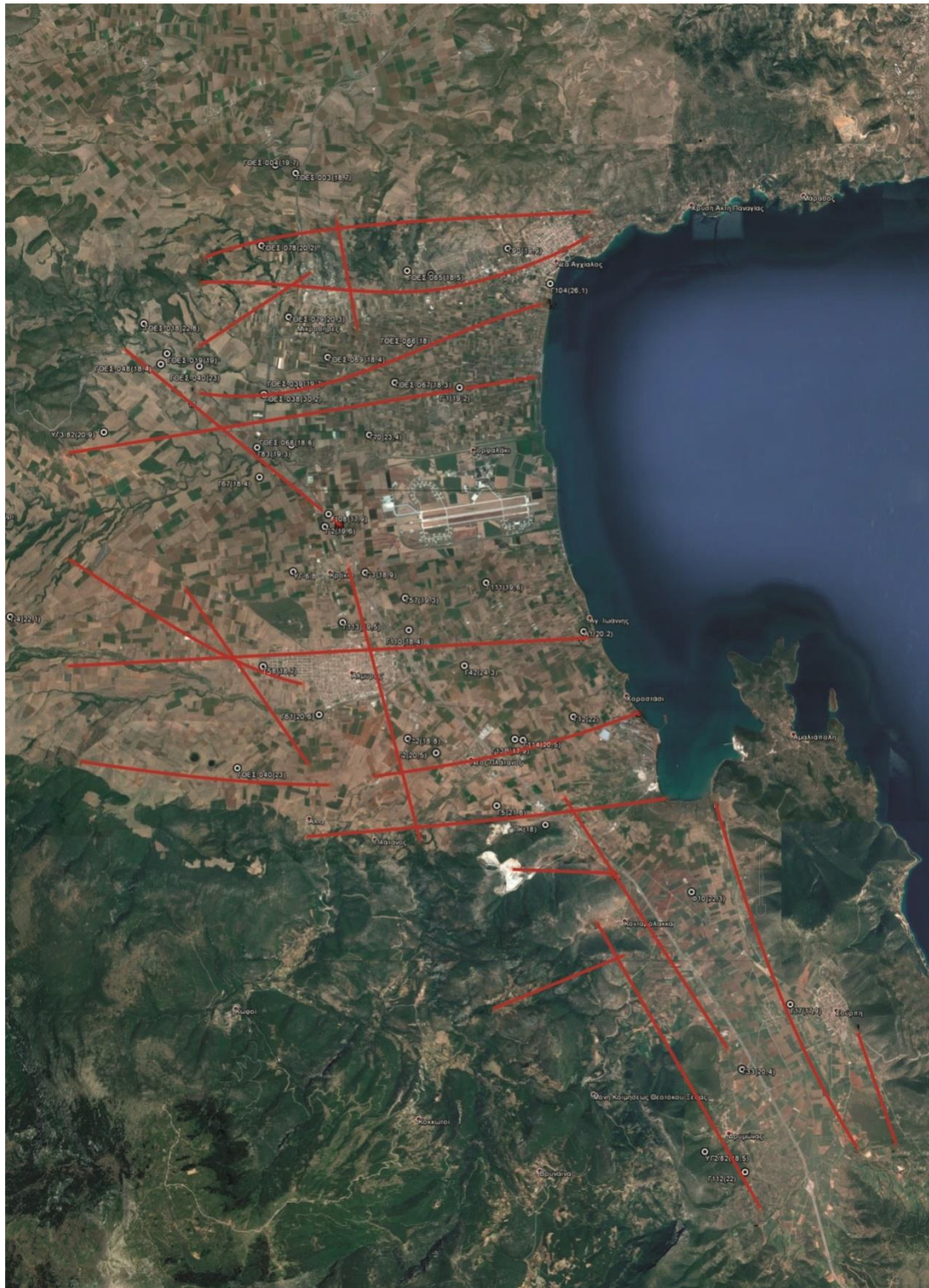
Εικόνα 40. Τεκτονικός χάρτης της λεκάνης του Αλμυρού (Μυριούνης, 2008)



**Εικόνα 41. Τεκτονικός χάρτης της λεκάνης του Αλμυρού (Μεντζαφού, 2004)**

Οι συντεταγμένες που έχουν γραφτεί ως τώρα αναφέρονται στο ΕΓΣΑ '87 (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987) και έγινε η μετατροπή τους σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος με τη βοήθεια της διαδικτυακής σελίδας της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού ([web.gys.gr](http://web.gys.gr)). Ακολούθως χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα αυτά για να τοποθετηθούν οι γεωτρήσεις στις δορυφορικές εικόνες, όπως αυτές παρέχονται από το πρόγραμμα Google Earth της Google Inc.

Για τη μεταφορά της εικόνας των ρηγμάτων στην εικόνα της περιοχής στην οποία ήδη είχαν σημειωθεί οι θέσεις των γεωτρήσεων, έγινε γεωαναφορά στον τεκτονικό χάρτη με χρήση του προγράμματος QGIS (που είναι ένα δωρεάν Open Source Geographic Information System) ούτως ώστε να βρεθούν οι συντεταγμένες των άκρων των ρηγμάτων, οι οποίες μετά από αντίστοιχη μετατροπή με τις συντεταγμένες των γεωτρήσεων τοποθετήθηκαν στην τελική εικόνα 42. Οι λήψεις από το πρόγραμμα Google Earth ενώθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Photoshop της εταιρείας Adobe Systems Inc., ενώ με το ίδιο πρόγραμμα σχεδιάστηκαν στο χάρτη τα ίχνη των ρηγμάτων της περιοχής.



Εικόνα 42. Δορυφορική άποψη της λεκάνης Αλμυρού με θέσεις γεωτρήσεων και ρήγματα

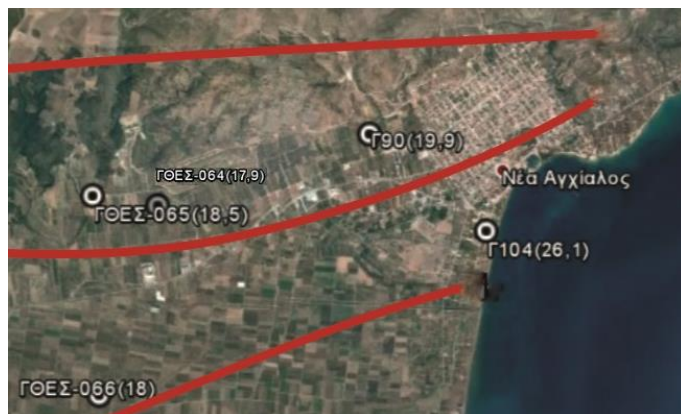




### 7.5. Ανάλυση και ερμηνεία των στοιχείων

Έχοντας συγκεντρώσει τα παραπάνω στοιχεία και έχοντας σχηματίσει τις απαιτούμενες εικόνες, περνάμε στην αξιολόγηση και ερμηνεία της κατάστασης που παρουσιάζεται. Συγκεκριμένα έχουν θεωρηθεί ως χαρακτηριστικές και άξιες ανάλυσης και ερμηνείας οι γεωτρήσεις **Γ104**, **ΓΘΕΣ-018**, **ΓΘΕΣ-038**, **ΓΘΕΣ-040**, **Γ70**, **ΥΓ-6/84**, **Γ42**, **Γ12**, **Φ10** λόγω των σχετικά υψηλών θερμοκρασιακών μετρήσεων που παρουσίασαν.

#### Γεώτρηση Γ104:



Η γεώτρηση αυτή παρουσίασε σημαντικά υψηλή θερμοκρασία νερού (26,1°C) για τα δεδομένα της περιοχής. Υπάρχει έλλειψη στοιχείων σχετικά με το βάθος στο οποίο είχε διανοιχθεί η συγκεκριμένη γεώτρηση. Θεωρώντας όμως πως τα βάθη των πιο κοντινών γεωτρήσεων [ΓΘΕΣ-065 (110m), ΓΘΕΣ-066 (120m), ΓΘΕΣ-064 (100m)] μπορούν να αποτελέσουν δείκτη για το βάθος στο οποίο θα έπρεπε να φτάσει μια γεώτρηση για να συναντήσει υδροφόρα στρώματα στην περιοχή αυτή κοντά στην πόλη της Νέας Αγχιάλου μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα πως το βάθος της γεώτρησης είναι ενδεχομένως κοντά στα 120 μέτρα. Θεωρώντας αληθή αυτή την υπόθεση και γνωρίζοντας πως η μέση γεωθερμική βαθμίδα είναι 3 βαθμοί Κελσίου ανά 100 μέτρα η τιμή της θερμοκρασίας είναι 6,3 βαθμούς Κελσίου πάνω από την αναμενόμενη τιμή για γεώτρηση τέτοιου βάθους. Ακόμα και αν η αρχική υπόθεση για το βάθος της γεώτρησης θεωρηθεί πολύ συντηρητική, η θερμοκρασία συνεχίζει να αποτελεί ένδειξη γεωθερμικής ανωμαλίας.

Παρατηρώντας τον χάρτη μπορεί κανείς να παρατηρήσει την γειτνίαση της τοποθεσία της γεώτρησης με τα δύο ρήγματα της Ν. Αγχιάλου με διεύθυνση Α-Δ τα οποία φαίνονται να ελέγχουν την παροχή της συγκεκριμένης γεώτρησης και που κατά πάσα πιθανότητα είναι υπεύθυνα για την αυξημένη θερμοκρασία του νερού που παρέχεται, μέσω ενός μηχανισμού που επιτρέπει την ανάβλυση των γεωθερμικών νερών και την ανάμειξή τους με τον υδροφόρο που αντλείται.

Γεώτρηση ΓΘΕΣ-018:



Η γεώτρηση αυτή παρουσιάζει μια κάπως υψηλή θερμοκρασία ( $22,8^{\circ}\text{C}$ ) για την περιοχή. Όμως λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι αντλεί νερό από βάθος 200 μέτρων και προσαρμόζοντας για την μέση γεωθερμική βαθμίδα, βλέπουμε πως η τιμή της θερμοκρασίας είναι κατά 0,6 βαθμούς Κελσίου πάνω από την αναμενόμενη τιμή.

Δίνεται όμως πως η θερμομέτρηση έγινε τον μήνα Απρίλιο, δηλαδή κατά την υγρή περίοδο όταν όπως έχει αναφερθεί η ανάμειξη των υπογείων νερών με τα κρύα επιφανειακά ύδατα κατά την άντληση, διαστρεβλώνει την πραγματική θερμοκρασία. Λαμβάνοντας αυτό υπ' όψιν μπορεί να θεωρηθεί πως μια μέτρηση κατά το τέλος της ξηρής περιόδου θα έδινε τιμή θερμοκρασίας αρκετά υψηλότερη από την αναμενόμενη λόγω της βαθμίδας.

Η γεωθερμική αυτή ανωμαλία δείχνει να ελέγχεται από το ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που καταλήγει κοντά στο αεροδρόμιο, αλλά και από το ρήγμα Δύσης – Ανατολής της Ν. Αγχιάλου.

Γεώτρηση ΓΘΕΣ-038:



Η γεώτρηση αυτή παρουσιάζει την υψηλότερη θερμοκρασία νερού ( $30,2^{\circ}\text{C}$ ) από όλες τις καταγεγραμμένες γεωτρήσεις και με βάθος στα 250 μέτρα η τιμή της είναι κατά  $6,5^{\circ}\text{C}$  πάνω από την αναμενόμενη τιμή λόγω κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας. Η μέτρηση αυτή συνιστά κάποια ίσως σημαντική γεωθερμική ανωμαλία η οποία δείχνει να συνδέεται με την ενδεχόμενη γεωθερμική ανωμαλία της προηγούμενης γεώτρησης με την οποία βρίσκονται και σε μικρή απόσταση.

Και πάλι η τεκτονική φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο για την παρατηρούμενη θερμοκρασία καθώς η γεώτρηση αυτή βρίσκεται πολύ κοντά και επηρεάζεται από το ρήγμα με διεύθυνση Δ-ΝΑ που καταλήγει κοντά στην πόλη της Ν. Αγχιάλου, αλλά ενδεχομένως και από το ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ που καταλήγει κοντά στο αεροδρόμιο.

Γεώτρηση ΓΘΕΣ-040:



Η γεώτρηση αυτή αντλεί από βάθος 200 μέτρων και μετρήθηκε σε αυτή θερμοκρασία 23 βαθμών Κελσίου. Έτσι αυτή παρουσιάζει τιμή υψηλότερη κατά 0,8°C από την αναμενόμενη λόγω της μέσης θερμοκρασιακής βαθμίδας. Η απόκλιση αυτή δεν είναι σημαντική, όμως αν εξεταστεί υπό το πρίσμα της ανάλυσης των δύο προηγούμενων γεωτρήσεων, μπορεί να θεωρηθεί πως επιβεβαιώνει την ύπαρξη μιας ενδεχόμενης γεωθερμικής ανωμαλίας στην περιοχή. Η γεώτρηση αυτή βρίσκεται στην περιοχή που διασταύρωνονται τα ρήγματα που αναφέρθηκαν για τις δύο προηγούμενες γεωτρήσεις.

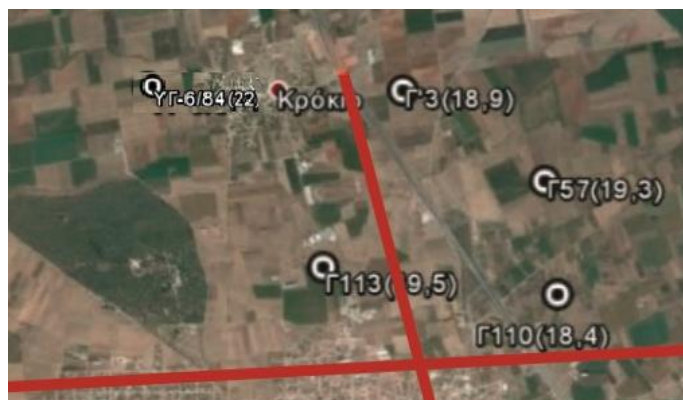
Γεώτρηση Γ70:



Η γεώτρηση αυτή παρουσίασε υψηλή θερμοκρασία της τάξεως των 23,4°C και δεδομένου πως το βάθος γεώτρησης είναι στα 110 μέτρα, μπορεί να υπολογιστεί πως η θερμοκρασία αυτή ξεπερνάει την αναμενόμενη κατά 3,9°C. Η μέτρηση αυτή είναι αξιόλογη ένδειξη κάποιας γεωθερμικής διεργασίας στην περιοχή και θα πρέπει να σημειωθεί για περαιτέρω εξέταση.

Η ανωμαλία αυτή φαίνεται να οφείλεται και αυτή στη τεκτονική της περιοχής, καθώς βρίσκεται σε άμεση γειννίαση με το ρήγμα διεύθυνσης Δ-Α που περνάει πάνω από το αεροδρόμιο.

Γεώτρηση ΥΓ-6/84:



Η υδρογεώτρηση αυτή που βρίσκεται έξω από τον οικισμό του Κροκίου έχει διανοιχθεί σε βάθος 203 μέτρων, οπότε η θερμοκρασία των 22°C που μετρήθηκε είναι ακριβώς αυτή που θα περιμέναμε λόγω της επίδρασης της μέσης γεωθερμικής βαθμίδας. Κατ'επέκταση δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον ως προς πιθανό γεωθερμικό δυναμικό.

Επίσης, δεν φαίνεται να επηρεάζεται από κάποιο γνωστό ενεργό ρήγμα, γεγονός που επιβεβαιώνει την παραπάνω κρίση καθώς έχουμε παρατηρήσει μέχρι τώρα τη συσχέτιση των υψηλότερων θερμοκρασιών με την τεκτονική.

Γεώτρηση Γ42:



Στη γεώτρηση αυτή μετρήθηκε υψηλή για την περιοχή θερμοκρασία νερού (24,3°C), αλλά δεν υπάρχει πληροφορία για το βάθος στο οποίο είχε διανοιχθεί η γεώτρηση. Οι πιο κοντινές γεωτρήσεις με γνωστό βάθος είναι οι γεωτρήσεις Γ12 και Γ2 με βάθη 120μ και 150μ αντίστοιχα. Αν θεωρηθεί πως τα βάθη αυτά είναι ενδεικτικά για το βάθος του υδροφόρου και πως η γεώτρηση Γ12 που είναι πιο κοντά στην παραλιακή ζώνη είναι

βαθύτερη λόγω ίσως της θαλάσσιας διείσδυσης που παρουσιάζει η περιοχή, θα μπορούσε να υποτεθεί πως το βάθος της γεώτρησης Γ42 είναι περίπου στα 120 μέτρα.

Σε αυτή την περίπτωση η θερμοκρασία υπερβαίνει τη φυσιολογική κατά 4,5°C. Το γεγονός πως η γεώτρηση βρίσκεται στο κατερχόμενο τέμαχος του ρήγματος με διεύθυνση Δ-Α που διέρχεται πάνω από την πόλη του Αλμυρού τείνει να επιβεβαιώσει την ύπαρξη της γεωθερμικής ανωμαλίας που υποτέθηκε.

#### Γεώτρηση Γ12:



Η γεώτρηση αυτή όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έχει βάθος 150 μέτρα οπότε βρίσκεται 1,3°C πάνω από τη θερμοκρασία που θα είχε το νερό λόγω της μέσης γεωθερμικής βαθμίδας. Ωστόσο η μέτρηση πραγματοποιήθηκε τον μήνα Απρίλιο, στο τέλος της περιόδου βροχών, οπότε το νερό της βροχής που κατεισδύει είναι λογικό να έχει αραιώσει και να έχει ψύξει το νερό του υδροφόρου κατά την ανάμειξή τους.

Άρα το νερό της γεώτρησης πρέπει να είναι σημαντικά πιο θερμό, γεγονός που υποστηρίζεται και από την ύπαρξη του εκτεταμένου ρήγματος διεύθυνσης Δ-Α που διέρχεται κάτω από την πόλη του Αλμυρού και ελέγχει την συγκεκριμένη γεώτρηση.

#### Γεώτρηση Φ10:



Η γεώτρηση αυτή με θερμοκρασία νερού 22,3 βαθμών Κελσίου και βάθος 164 μέτρα παρουσιάζει θερμοκρασία κατά 1,2°C υψηλότερη του κανονικού. Ίσως δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική ανωμαλία στην γεωθερμική ροή, αλλά είναι άξιο λόγου το ότι και

αυτή συνδέεται με ένα ρήγμα, και συγκεκριμένα το ρήγμα με διεύθυνση Β-Ν που διέρχεται Δυτικά της Σούρπης.

## 7.6. Υδροχημική ανάλυση των δειγμάτων

Σε αρκετά από τα δείγματα των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε υδροχημική ανάλυση για να βρεθεί ο υδροχημικός χαρακτήρας του νερού που αντλούνταν. Σε μερικές από τις γεωτρήσεις υπάρχουν πολλαπλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Τα στοιχεία που μετρήθηκαν ήταν:

- pH
- Αγωγιμότητα
- $\text{Ca}^{++}$
- $\text{Mg}^{++}$
- $\text{Na}^+$
- $\text{K}^+$
- $\text{HCO}_3^-$
- $\text{Cl}^-$
- $\text{SO}_4^-$

Αν και δεν υπάρχει κάποια γενικά αποδεκτή ταξινόμηση των γεωθερμικών νερών, συχνά τα γεωθερμικά νερά διαχωρίζονται σε σχέση με το κυρίαρχο ανιόν, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 10 (Henley et al, 1984). Στα γεωθερμικά συστήματα νερού ο συνηθέστερος τύπος που συναντάται σε κάποιο βάθος είναι τα χλωριούχα νερά, με συγκεντρώσεις που φτάνουν τα 10000 mg/L (Ellis & Mahon, 1977). Σπανιότερα, η συγκέντρωση μπορεί να φτάσει τα 12000 mg/L (Φυτίκας, 2008).

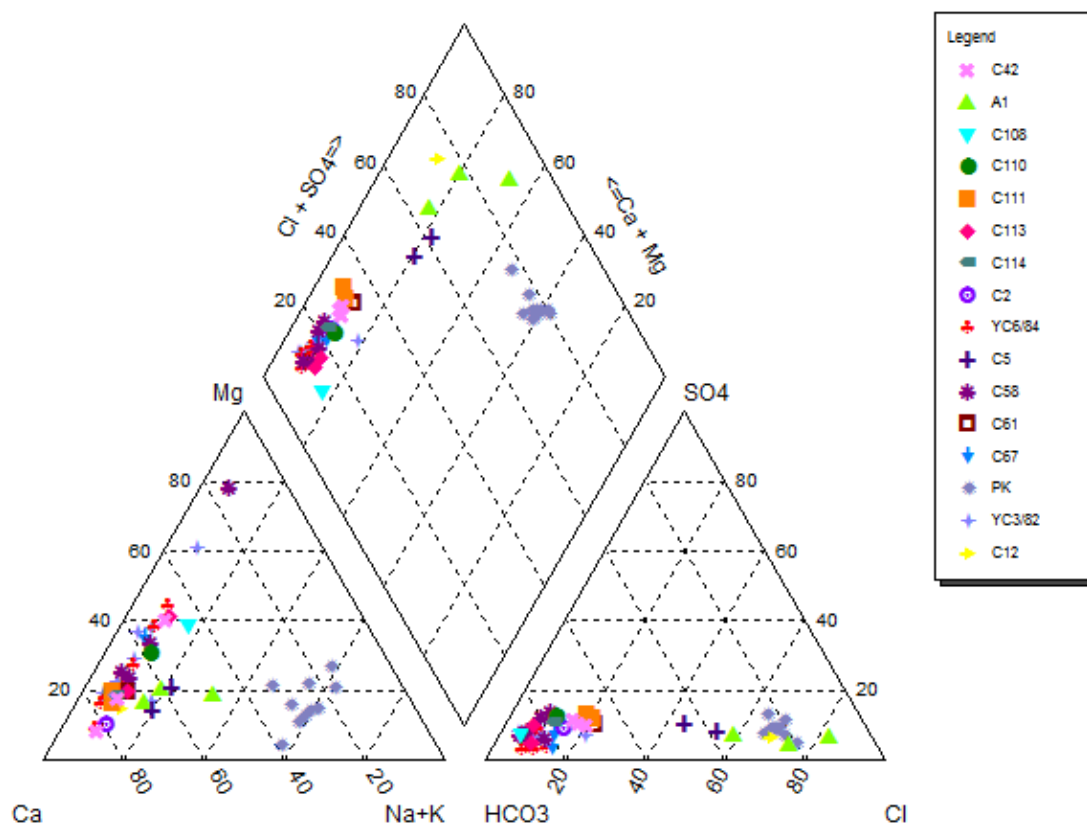
**Πίνακας 10. Σύνοψη των διαφόρων τύπων νερού στα γεωθερμικά συστήματα**

Τύπος νερού	Περιοχή PH	Κύρια ιόντα
Υπόγεια	6-7,5	λίγα $\text{HCO}_3$
Πλούσια σε χλωριόντα	4-9	Cl, λίγα $\text{HCO}_3^-$
Πλούσια σε χλωριόντα-ανθρακικά	7-8,5	Cl, $\text{HCO}_3^-$
Πλούσια σε θειικά ιόντα	1-3	$\text{SO}_4^{2-}$ , λίγα Cl
Πλούσια σε θειικά-χλωριόντα	1-5	Cl, $\text{SO}_4^{2-}$
Πλούσια σε όξινα ανθρακικά	5-7	$\text{HCO}_3^-$
Αραιά χλωριούχα	6,5-7,5	Cl, λίγα $\text{HCO}_3^-$

### 7.6.1. Ταξινόμηση υπογείων νερών

Με τη χρήση του προγράμματος Aquachem της Waterloo Hydrogeologic, βρέθηκε ο τύπος του νερού για κάθε ένα από τα δείγματα για τα οποία είχε γίνει χημική ανάλυση. Παρακάτω (Εικόνα 43) φαίνεται το διάγραμμα Piper που προέκυψε και στο οποίο φαίνεται εποπτικά ο

χαρακτήρας νερού για το κάθε δείγμα. (Οι κωδικοί των γεωτρήσεων στο υπόμνημα γράφτηκαν με λατινικούς χαρακτήρες καθώς το Aquachem δεν αναγνωρίζει ελληνικούς.)



Εικόνα 43. Διάγραμμα Piper με τα δείγματα των γεωτρήσεων

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, η πλειονότητα των δειγμάτων βρέθηκε να προέρχεται από νερά ασβεστούχα οξυανθρακικά, που είναι κάτι αναμενόμενο με το ασβέστιο να προέρχεται πιθανότατα από τα ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή το υπόγειο νερό. Τα όξινα ανθρακικά ιόντα αποτελούν το επικρατέστερο ανιόν στα γλυκά υπόγεια νερά και προέρχονται από το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και από την οργανική αποσύνθεση που λαμβάνει χώρα στο έδαφος. Πηγή  $\text{HCO}_3^-$  είναι επίσης διάλυση ανθρακικών πετρωμάτων από το νερό.

Τα νερά από την πηγή Κεφάλωση είναι συστηματικά με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων και χαρακτηρίζονται γενικά ως νατριούχα χλωριούχα. Οι τιμές συγκέντρωσης αυτές το καθιστούν ακατάλληλο για πόση και όπως θα φανεί και από το διάγραμμα Wilcox στη συνέχεια ακατάλληλο για άρδευση, τουλάχιστον χωρίς διόρθωση.

Επίσης τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 εμφάνισαν υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων, γεγονός που εξηγείται από την εγγύτητα της πηγής Κεφάλωση, τα νερά της οποίας λόγω της μεγάλης της παροχής χρησιμοποιούνται για την άρδευση της περιοχής και φαίνονται να έχουν ρυπάνει τα νερά της γεώτρησης Γ5. Τα νερά της γεώτρησης Γ5 είναι επίσης ασβεστούχα. Παρατηρούμε τέλος πως τα δείγματα των γεωτρήσεων Α1 και Γ12 παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων, αντίστοιχες με αυτές της πηγής Κεφάλωση, με ένα δείγμα της γεώτρησης Α1 να εμφανίζει την μέγιστη συγκέντρωση από όλα τα δείγματα. Η ύπαρξη των χλωριόντων στα νερά αυτών των γεωτρήσεων

οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην υφαλμύριση του παράκτιου υδροφόρου λόγω του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης που εμφανίζεται στην περιοχή εξαιτίας της υπεράντλησης των υδάτων για άρδευση. Στον ακόλουθο πίνακα 11 φαίνεται ο λεπτομερής υδροχημικός χαρακτήρας κάθε δείγματος.

Πίνακας 11. Τύπος νερού ανά γεώτρηση

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΤΥΠΟΣ ΝΕΡΟΥ	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Τύπος νερού	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	Τύπος νερού
ΥΓ3/82	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	A1	Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-HCO <sub>3</sub>	Γ67	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	A1	Ca-Na-Cl
ΥΓ3/82	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ67	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	A1	Ca-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Mg-Ca-HCO <sub>3</sub>	Γ67	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ12	Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ58	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ2	Ca-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-HCO <sub>3</sub>	Γ58	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ5	Ca-Na-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ58	Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ5	Ca-Na-Cl-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-HCO <sub>3</sub> -Cl	Γ58	Ca-HCO <sub>3</sub>	Γ61	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -Cl
ΥΓ3/82	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ58	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	Γ108	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ3/82	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl	Γ110	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ111	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ111	Ca-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ113	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ113	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ114	Ca-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Mg-Cl	Γ42	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ42	Ca-HCO <sub>3</sub>
ΥΓ6/84	Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	ΠΚ	Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>	Γ42	Ca-HCO <sub>3</sub>

### 7.6.2. Καταλληλότητα για άρδευση

Με τη χρήση του ίδιου προγράμματος δημιουργήθηκε ακόμη το διάγραμμα Wilcox που φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 45). Το διάγραμμα αυτό αποτελεί μία σημαντική μέθοδο ελέγχου της καταλληλότητας του αρδευτικού νερού σε σχέση με τη φύση και τις ιδιότητες των καλλιεργούμενων εδαφών. Χρησιμοποιεί το δείκτη S.A.R. και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.). Με βάση το διάγραμμα αυτό μπορούν να διακριθούν οι εξής κατηγορίες αρδευτικού νερού:



A: **C1-S1**. Ποιότητα καλή.

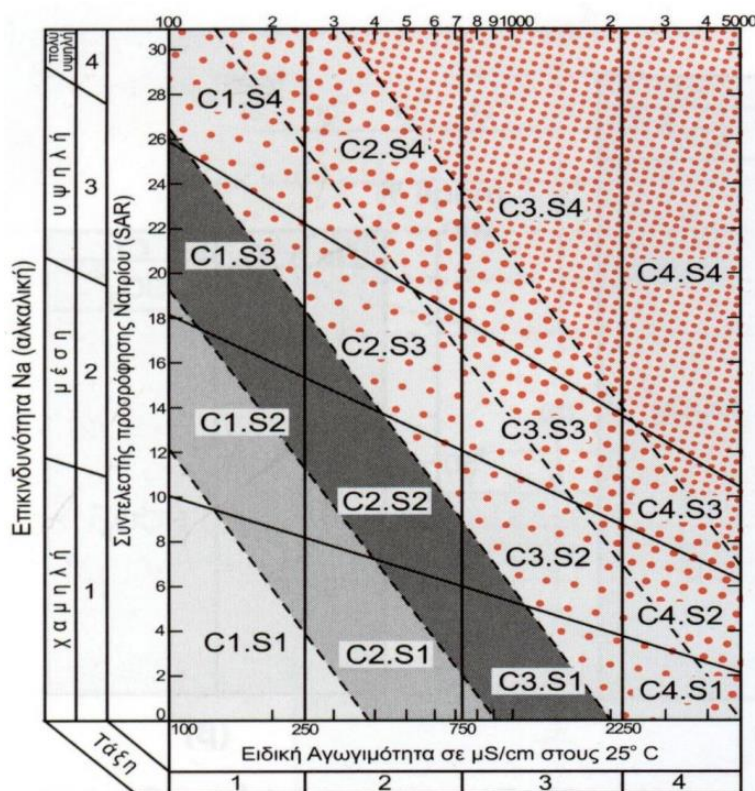
B: **C1-S2, C2-S1**. Ποιότητα καλή έως μέτρια. Το νερό πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και επίσης με επιφύλαξη για ευαίσθητα φυτά.

Γ: **C1-S3, C2-S2, C3-S1**. Ποιότητα μέτρια έως πολύ μέτρια. Μπορεί να χρησιμοποιείται παίρνοντας μέτρα προφύλαξης. Το έδαφος πρέπει να αποστραγγίζεται καλά ή πρέπει να προστίθεται σε αυτό γύψος.

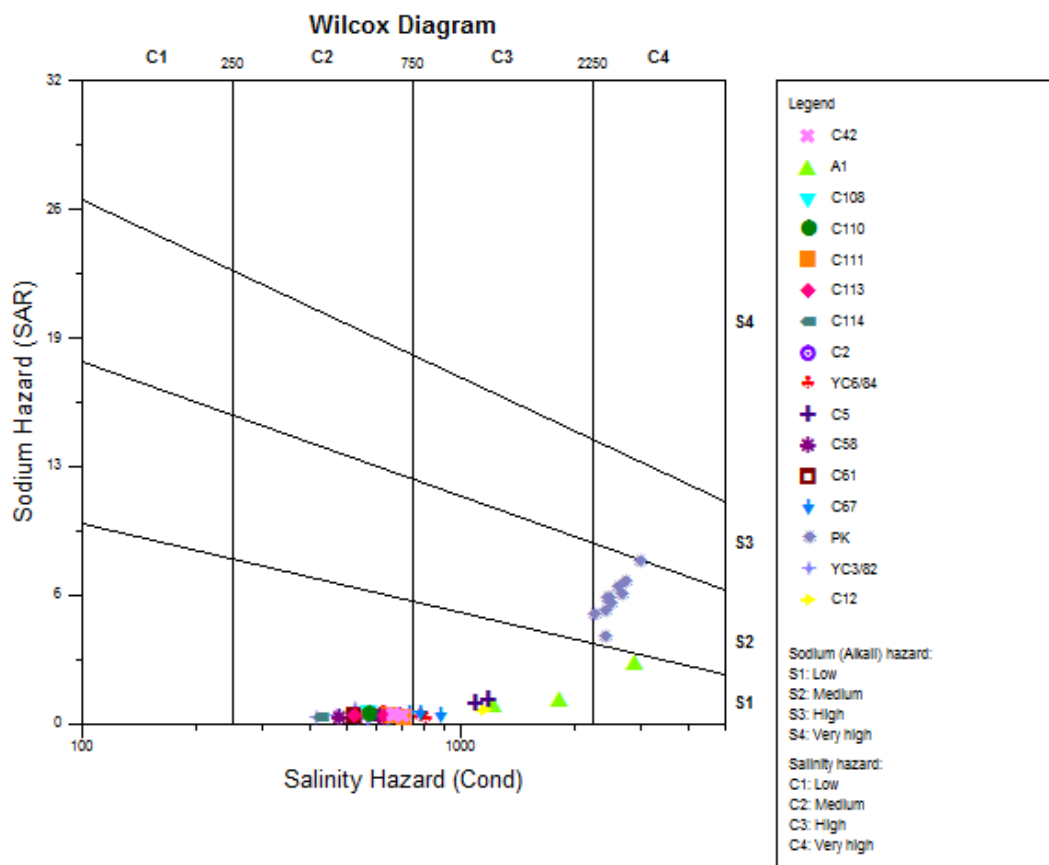
Δ: **C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1**. Ποιότητα πολύ μέτρια έως κακή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ευαίσθητα φυτά, ούτε γενικά για βαριά εδάφη. Μπορεί να χρησιμοποιείται με μέτρα προφύλαξης σε ελαφρά εδάφη που αποστραγγίζονται καλά ή να προστίθεται γύψος.

E: **C2-S4, C3-S3, C4-S2**. Ποιότητα κακή. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται παρά μόνο για ανθεκτικά φυτά σε ελαφρά εδάφη καθώς αποστραγγιζόμενα, με προσθήκη γύψου.

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



Εικόνα 44. Κατάταξη καταλληλότητας για άρδευση με βάση τα χαρακτηριστικά του νερού



**Εικόνα 45. Διάγραμμα Wilcox με τα δείγματα από τις γεωτρήσεις**

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η πλειονότητα των δειγμάτων κατατάσσονται στην κατηγορία καταλληλότητας C2-S1 που αντιστοιχεί σε νερά καλής έως μέτριας ποιότητας, με κάποια από αυτά να περνάνε στην αμέσως χειρότερη κατηγορία C3-S1 στην οποία ανήκουν νερά μέτριας έως πολύ μέτριας ποιότητας.

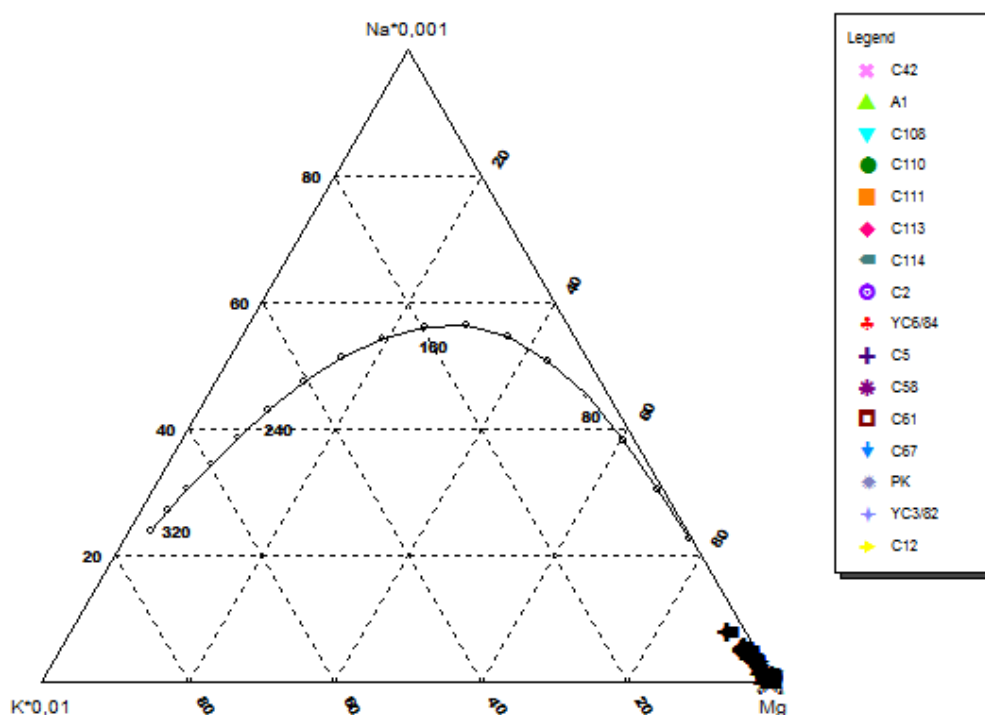
Τα δείγματα της γεώτρησης A1 αποκλείουν αρκετά από την μεγάλη ομάδα των δειγμάτων, ενώ ένα από τα τρία δείγματα της γεώτρησης πέφτει στην κατηγορία C4-S1 στην οποία εντάσσονται νερά πολύ μέτριας έως κακής ποιότητας και θα πρέπει να παρθούν μέτρα προφύλαξης για τη χρήση του για άρδευση.

Χαρακτηριστικό τέλος είναι το γεγονός πως όλα τα δείγματα από την πηγή Κεφάλωσης ανηκούν στην κατηγορία C4-S2 με νερά κακής ποιότητας λόγω της υψηλής τους αλατότητας και θα έπρεπε να αποφεύγεται η χρήση τους για άρδευση.

Αντ'αυτού, όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, καθώς η πηγή αυτή είναι ιδιαίτερα παραγωγική τα νερά της χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την άρδευση της γύρω αγροτικής περιοχής.

### 7.6.3. Ηλικία νερών

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το τριγωνικό διάγραμμα Giggenbach, το οποίο υπολογίζει θεωρητικά την παλαιότητα των υδάτων με βάση τις αναλογίες κοινών ιόντων που υπάρχουν συνήθως σε όλα τα νερά εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με τα πετρώματα. Η ισορροπία των στοιχείων αυτών δείχνει τον χρόνο που έχει βρεθεί το νερό σε επαφή με τα πετρώματα καθώς το νάτριο αλληλεπιδρά με πολύ αργό ρυθμό, το κάλιο με μέτριο ρυθμό και το μαγνήσιο με αρκετά ταχύ. Έτσι χαρακτήρας νατριούχος – καλιούχος δείχνει βαθιά ισορροπία που συνδέεται συνήθως και με υψηλή θερμοκρασία, ενώ χαρακτήρας καλιούχος – μαγνησιούχος υποδηλώνει νέα ισορροπία που αντιστοιχεί συνήθως και σε χαμηλή θερμοκρασία. Το τρίγωνο Na-K-Mg ορίζει το επίπεδο ισορροπίας χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση ανάμεσα στους λόγους Na/1000, K/100 και την τετραγωνική ρίζα της συγκέντρωσης του Mg (Han et al, 2009).



Εικόνα 46. Τριγωνικό διάγραμμα Giggenbach

Όπως φαίνεται όλα τα δείγματα βρίσκονται στο πεδίο των μη ώριμων νερών, το οποίο σημαίνει ότι τα συγκεκριμένα ρευστά δεν έχουν παραμείνει αρκετό χρόνο στο υπέδαφος ώστε να έρθουν σε ισορροπία με τα ορυκτά που υπάρχουν στον υπόγειο ταμιευτήρα.

## 8. Συμπεράσματα –Προτάσεις

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν έγινε ανάλυση διαφόρων πτυχών της λεκάνης του Αλμυρού και συνθέτοντας τις επιμέρους όψεις προκύπτει μια εικόνα για την περιοχή η οποία περιγράφεται παρακάτω.

Συνδυάζοντας τη μορφολογία της περιοχής μελέτης με την τεκτονική αλλά και την υδρογεωλογία όπως αυτή αναλύθηκε στην εργασία, προκύπτει ότι η λεκάνη του Αλμυρού μπορεί να διακριθεί σε δύο υπολεκάνες: βόρεια την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης και νότια την υπολεκάνη της Σούρπης. Στη ζώνη επαφής των δύο αυτών υπολεκάνων υπάρχει νεοτεκτονικό ρήγμα, η διαφορική κίνηση των τεμαχών του οποίου ευθύνεται για την ανύψωση της υπολεκάνης της Σούρπης σε σχέση με την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης.

Η μορφή του ανάγλυφου της περιοχής του Αλμυρού που παρατηρείται σήμερα οφείλεται πρωτίστως στην τεκτονική δράση που εμφανίζεται σε αυτήν από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, με την επαναδραστηριοποίηση πολλών ρηγμάτων κατά το Τεταρτογενές, και δευτερευόντως στις κλιματολογικές συνθήκες και στη διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων.

Αναφορικά με τα υπόγεια νερά στη λεκάνη του Αλμυρού, διαπιστώνεται πως υδροφόροι απαντώνται σχεδόν σε όλα τα πετρώματα, καθώς είτε λόγω λιθολογίας, είτε λόγω τεκτονικής καταπόνησης έχουν δημιουργηθεί πολλοί ταμειυτήρες. Συγκεκριμένα στις τεταρτογενείς αποθέσεις συναντώνται φρεάτιοι υδροφόροι ορίζοντες. Οι νεογενείς αποθέσεις θεωρούνται, λόγω της μεγάλης συμμετοχής αργιλικού υλικού ημιπερατές και δημιουργούνται έτσι και άλλοι, υπό πίεση, υδροφόροι ορίζοντες. Παράλληλα, σε προνομιακές θέσεις παρατηρούνται υδροφορίες και στον φλύσχη. Οι ασβεστόλιθοι, τόσο της επίκλυσης, όσο και του Ιουρασικού είναι περατοί έως πολύ περατοί, στο βόρειο τμήμα, όμως, της Όθρυος οι υδροφορίες είναι πολύ περιορισμένες, λόγω της πλήρωσης των καρστικών εγκοίλων και διακλάσεων με αργιλικό υλικό και terrarossa. Τέλος οι οφιόλιθοι, οι λάβες και τα περμικά πετρώματα εμφανίζουν τοπικά υδροφορίες εξαιτίας της μεγάλης τεκτονικής καταπόνησης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία δευτερογενούς πορώδους.

Τα νερά όπως προέκυψε από υδροχημικές αναλύσεις είναι ουδέτερα προς βασικά, κατά κύριο λόγο ανθρακικά, με ιόντα ασβεστίου, μαγνησίου και νατρίου να βρίσκονται σε μεγάλη συγκέντρωση κατά περίπτωση.

Από τις μετρήσεις θερμοκρασίας των νερών αυτών που έγιναν σε διάφορες γεωτρήσεις που καλύπτουν όλη την έκταση της λεκάνης, παρατηρήθηκαν σε συγκεκριμένες γεωτρήσεις θερμοκρασίες που ξεπερνούν αυτήν που αναμένεται λόγω κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας. Οι αναλογικά υψηλές αυτές τιμές φαίνεται να συνδέονται και να ελέγχονται από την άμεση γειτνίαση με ένα ή παραπάνω από τα ρήγματα της περιοχής. Οι μετρήσεις και ο μηχανισμός αυτής της συσχέτισης ο οποίος δείχνει να λειτουργεί συστηματικά, οδηγούν στην υπόθεση ενός γεωθερμικού πεδίου στην λεκάνη του Αλμυρού, το οποίο όμως λόγω του σχετικά μικρού βάθους των γεωτρήσεων ή και του μεγάλου βάθους του ίδιου να μην επιτρέπει έντονες επιφανειακές εκδηλώσεις. Στη μία περίπτωση, όπου μετρήθηκε

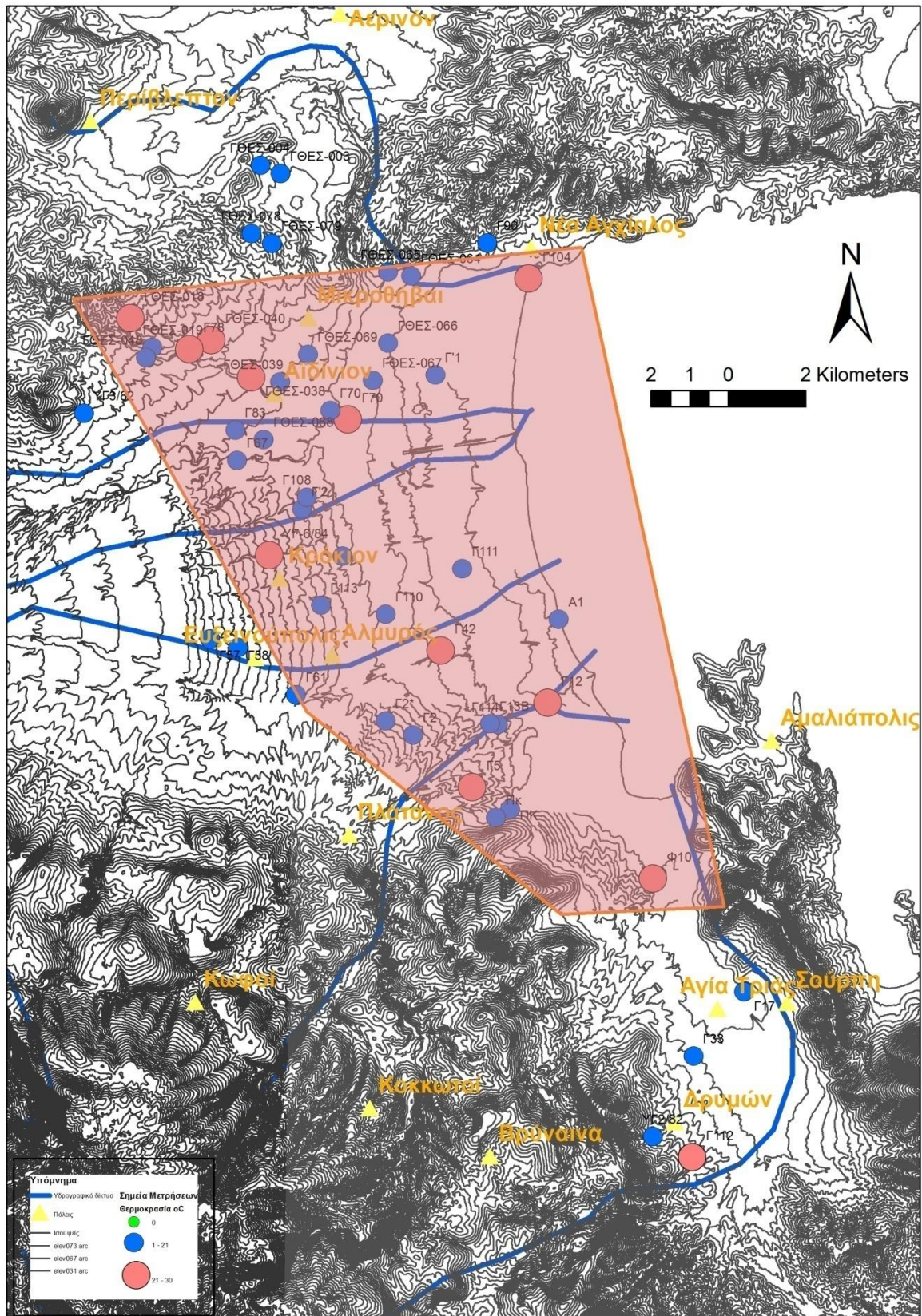
Θερμοκρασία σε μεγαλύτερο βάθος (ΓΘΕΣ-038) αυτή ήταν σημαντικά υψηλότερη, γεγονός που υποστηρίζει την υπόθεση για ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου.

Οι χημικές αναλύσεις συμφωνούν με την παραπάνω υπόθεση σε δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Η μία είναι η περίπτωση της πηγής Κεφάλωση η οποία εμφανίζει πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων σε κάθε της δείγμα και είναι γνωστή για τα υφάλμυρα νερά της. Η εξήγηση της θαλάσσιας διείσδυσης δεν φαίνεται να είναι επαρκής, καθώς η πηγή βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο 26,5 μέτρων και σε απόσταση 3,25 χιλιομέτρων από την θάλασσα. Μια πιθανή εξήγηση θα ήταν πως εξαιτίας της έντονης παρουσίας ρηγμάτων στην περιοχή, πραγματοποιείται ανάμειξη του θερμού νερού από το πεδίο που προτείνεται με το νερό κάποιου ρηχού ψυχρού υδροφόρου και είναι η ανάμειξη αυτή η οποία φορτίζει με  $\text{Cl}^-$  το νερό αφού τα γεωθερμικά ρευστά είναι πλούσια σε χλωριόντα, αλλά και που χαμηλώνει τη θερμοκρασία του.

Στην περίπτωση της γεώτρησης ΓΘΕΣ-038, η πολύ υψηλή θερμοκρασία του νερού της συνδυάζεται με το γεγονός του χαμηλού λόγου  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  και  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  που αποτελούν χαρακτηριστικό των γεωθερμικών ρευστών για να υποστηρίξουν την ύπαρξη ενός γεωθερμικού πεδίου σε βάθος μεγαλύτερο από αυτό των περισσότερων γεωτρήσεων στη λεκάνη.

Συμπερασματικά, οδηγούμαστε να θεωρήσουμε αρκετά πιθανό πως στην περιοχή αυτή της Μαγνησίας υπάρχει γεωθερμικό ενδιαφέρον, παρά το γεγονός πως δεν υπάρχουν έντονες επιφανειακές εκδηλώσεις θερμών πηγών, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην ανάμειξη των θερμών νερών με επιφανειακά ψυχρά σε συνδυασμό με το μεγάλο (σε σχέση με τις γεωτρήσεις) βάθος του πιθανού πεδίου.

Λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική κατανομή των σημείων που παρουσίασαν ενδιαφέρον, όπως αυτό αναλύθηκε νωρίτερα στην εργασία, παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 47) η πιθανή έκταση του γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας που φαίνεται να βρίσκεται στην περιοχή.



Εικόνα 47. Πιθανό γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας της λεκάνης Αλμυρού Βόλου

## Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μιας προκαταρκτικής αξιολόγησης με δεδομένα και στοιχεία που είναι διαθέσιμα σε ένα τέτοιο στάδιο της γεωθερμικής έρευνας. Τα στοιχεία αυτά δεν μπορούν να δώσουν μια πλήρη εικόνα και αποτελούν απλές ενδείξεις. Όμως ο συνδυασμός τους έδειξε πως υπάρχει πραγματικά κάποιο ενδιαφέρον ως προς την ύπαρξη γεωθερμίας στην περιοχή όπως αυτή προτείνεται και από την παραπάνω εικόνα.

Στο πλαίσιο αυτό προτείνονται πιο ενδελεχείς έρευνες, με τις μεθόδους και τα εργαλεία που έχουν παρουσιαστεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας. Προτείνεται συγκεκριμένα να γίνει εστίαση στις περιοχές της γεώτρησης ΓΘΕΣ-038 η οποία παρουσίασε σημαντικά υψηλή θερμοκρασία και που υπέδειξε το γεγονός πως πρέπει η έρευνα να γίνει σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό των γεωτρήσεων άρδευσης, και στην περιοχή της πηγής Κεφάλωση η οποία φαίνεται να παρουσιάζει υφάλμυρα νερά λόγω της υδραυλικής της επικοινωνίας με το πιθανό γεωθερμικό πεδίο.

Συστηματικές έρευνες σε αυτά τα σημεία φαίνονται να είναι η ιδανική επόμενη κίνηση στη διαδικασία επιβεβαίωσης της ύπαρξης του γεωθερμικού πεδίου. Αναφορικά με τον τύπο έρευνας, η εφαρμογή χημικών γεωθερμομέτρων δεν είναι κατάλληλη, αφού όπως φάνηκε στο διάγραμμα Gigggenbach τα ρευστά δεν είναι σε ισορροπία με τα ορυκτά του υπόγειου ταμιευτήρα (μη ώριμα νερά).

Ιδανικά θα μπορούσε να γίνει διάνοιξη βαθύτερων γεωτρήσεων στα σημεία που έχουν υποδειχθεί με σκοπό να υπολογιστεί η γεωθερμική βαθμίδα και να βρεθεί ενδεχομένως η παραγωγική ικανότητα του πεδίου και το μέγεθος του ταμιευτήρα.

Μέθοδοι όπως η υπέρυθρη φωτογράφιση που παρουσιάστηκε νωρίτερα, δεν θα έχουν αποτέλεσμα, αφού όπως αναφέρθηκε δεν υπάρχουν επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας.

Τέλος θα πρέπει να πραγματοποιηθούν υδροχημικές αναλύσεις οι οποίες θα έχουν πιο ευρύ φάσμα έρευνας. Συγκεκριμένα, καθώς τα γεωθερμικά νερά λόγω της υψηλής τους θερμοκρασίας έχουν πιο έντονη αλληλεπίδραση με τα πετρώματα με τα οποία έρχονται σε επαφή, εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ελάσσονα στοιχεία όπως το πυρίτιο, το βόριο, το φθόριο και το στρόντιο σε σχέση με τα μη γεωθερμικά νερά. Ψάχνοντας για ίχνη αυτών των στοιχείων μπορεί να εντοπιστούν ποια νερά είναι γεωθερμικά ή έχουν υποστεί ανάμειξη με τέτοια.





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Γαϊτανόπουλος Α., Γεωμορφολογική Μελέτη της Υδρολογικής Λεκάνης του Ρέματος Ξήρια και των Λιμνών Ζερέλια με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και Δορυφορικών Δεδομένων, Μεταπτυχιακή εργασία, ΑΠΘ Τμήμα Γεωλογίας, (2014)

Γαλανάκης Δ., Νεοτεκτονική δομή και στρωματογραφία των Νεογενών– Τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού- Παγασητικού, Πηλίου, Διαύλου Ωρέων- Τρικερίου και Μαλιακού, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, (1997)

Διακογιάννης Γ., Χωροθέτηση μονάδων παραγωγής Ενέργειας από Γεωθερμία. Προτάσεις για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της Ελλάδας, (2014)

Ζούζιας Δ., Διδακτορική διατριβή, Αειφόρος Ανάπτυξη του ηφαιστείου της Νισύρου και νέα ηφαιστειολογικά χαρακτηριστικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής και με την συμβολή της Τηλεπισκόπησης, Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών, (2011)

ΙΓΜΕ, Καταγραφή και Αποτίμηση των Υδρογεωλογικών Χαρακτήρων των Υπογείων Νερών και των Υδροφόρων Συστημάτων της Χώρας (Γ' Κ.Π.Σ.), Υδρολογική Μελέτη Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, (2010)

Κίτσιος Δ., Παραμετροποίηση Ενεργειακής Συμπεριφοράς Κάθετου Γεωθερμικού Εναλλάκτη, (2009)

Μπόζης Δ., Ο Πάσσαλος Θεμελίωσης ως Γεωεναλλάκτης - Διερευνήσεις για τη θερμική του συμπεριφορά, Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ Σ. Μηχανολόγων Μηχανικών, (2011)

Μεντζαφού Α., Υδρογεωλογικό Καθεστώς Λεκάνης Αλμυρού Βόλου, Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ Σ. Πολιτικών Μηχανικών, (2004)

Μυριούνης Χ., Υδρογεωλογική και Υδροχημική Διερεύνηση των Υπόγειων Νερών της Παράκτιας Ζώνης της Υδρολογικής Λεκάνης Αλμυρού Μαγνησίας, Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ Τμήμα Γεωλογίας, (2008)

Πολύζου Ο., Γεωθερμία-Βιώσιμη Ανάπτυξη και Τοπικές Κοινωνίες, Διδακτορική διατριβή Σ.Μ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., (2007)

Παπαθεοδώρου Ν., Προσομοίωση Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας με τη Χρήση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας Συμβατικής και Νέας Τεχνολογίας, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ Σ. Μ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, (2011)

Τζάνης Α., Σημειώσεις για την Έρευνα Γεωθερμικών Πεδίων, ΕΚΠΑ Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, (2010)

Τσελεπίδου Κ., Βελτιστοποίηση Διαχείρισης Γεωθερμικών & Υπογείων Υδατικών Πόρων Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών μηχανικών, (2008)

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

Φυτίκας Μ., Γεωθερμία και Τυποποίηση, (2008)

Caputo R., Geological and structural study of the recent and active brittle deformation of the Neogene-Quaternary basins of Thessaly (Central Greece). Ph.D. Thesis. (unpubl.), University of Thessaloniki, (1990)

Caputo R., Inference of a seismic gap from geologic data: Thessaly and surroundings (Central Greece) as a case study. *Ann. di Geofisica*, 38, (1995)

Dickson, M.H. and Fanelli, M. (Editors), *Geothermal Energy*, Wiley, John & Sons, (1995)

Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J. *Chemistry and Geothermal Systems*. Academic Press, London, (1977)

Fytikas, M. Geothermal situation in Greece. *Geothermics*, 17, (1987)

Han, D.M. et al., Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin, (2009)

Henley, R.W. and Ellis, A.J., Geothermal systems ancient and modern, a geochemical review. *Earth Sci. Reviews*, 19, (1983)

Lindal, B. Industrial and other applications of geothermal energy. In *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, (1973)

Lund, John W., "Characteristics, Development and utilization of geothermal resources", (2007)

Nicholson, K. *Geothermal Fluids – Chemistry and Exploration Techniques*, Springer Verlag, Heidelberg, (1993)

Owen, L.B., Michels D.E. *Geochemical Engineering Reference Manual*. DOE/SF/11520-T1, Salt Lake City, (1984)

Papazachos B.C., Panagiotopoulos R.G., Tsapanos M., Mountrakis D. & Dimopoulos G.Ch., A study of the 1980 summer seismic sequence in the Magnesia region of the central Greece, *Geophys. J. Reach. Soc.*, 75, (1983)

Rafferty, Kevin, "An Information Survival Kit for the Prospective Residential Geothermal Heat Pump Owner", (1997)

Turcotte, D. L.; Schubert, G., "4", *Geodynamics* (2 ed.), Cambridge, England, UK: Cambridge University Press, (2002)

*Heat Pumps, Energy Management and Conservation Handbook*, (2008)



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας αποτελεσμάτων χημικών αναλύσεων (συγκεντρώσεις σε mg/l)

stationID	pH	COND	Ca++	Mg++	Na+	K+	HCO3-	Cl-	SO4-
A1	7,1	1825	205.0	42.6	73.6	4.8	221.0	437	38
A1	7,2	2908	277.0	66.6	212.7	5.5	174.0	805	91.5
A1	7,7	1218	172.3	26.8	48.5	4.3	273.4	273.01	46.75
Γ108	7,6	574	60.9	32.1	25.3	1.6	375.9	14.18	24.02
Γ110	7,5	574	72.1	22.9	15.6	1.6	250.2	23.05	31.22
Γ111	7,4	647	102.6	13.6	13.8	1.6	238.0	39	34.58
Γ111	7,5	715	105.8	17.0	12.3	0.4	249.0	45.38	35
Γ113	7,3	628	56.9	29.2	14.6	0.9	278.0	17.4	11.7
Γ113	7,5	522	78.6	13.6	13.8	1.6	278.3	14.18	24.98
Γ114	7,4	426	64.1	9.7	8.7	0.4	189.2	17.37	20.8
Γ12	7,3	1147	163.5	19.5	29.9	1.6	173.3	269.47	33.62
Γ2	7,2	641	99.4	7.8	14.8	0.9	250.2	29.43	23
Γ42	7,4	704	103.0	14.6	15.8	0.9	264.0	45.4	27.9
Γ42	7,9	668	113.0	6.3	14.3	0.9	271.0	41.1	30.4
Γ42	8	670	69.4	33.8	16.9	0.9	282.5	37.94	34.8
Γ5	7,4	1100	136.0	17.8	47.8	1.6	248.0	145	43.2
Γ5	7,9	1196	134.2	29.2	58.3	1.3	240.4	199.97	40.6
Γ58	7,2	613	82.6	17.5	13.3	0.9	291.0	24.8	15.1
Γ58	7,3	480	73.8	16.5	8.1	0.8	231.9	14.18	26.42
Γ58	7,4	628	68.9	24.8	13.8	0.9	297.0	13.5	20.8
Γ58	7,6	622	18.6	59.3	10.7	0.4	261.2	19.15	35.5
Γ58	7,7	688	110.0	17.0	13.3	0.9	383.0	13.5	22.9
Γ61	7,4	522	77.8	13.1	13.8	1.6	201.4	39	24.02
Γ67	7,6	888	111.4	40.9	16.4	1.7	427.1	47.16	13.2
Γ67	7,8	730	102.6	35.3	18.9	2.4	427.1	42.55	31.22
Γ67	7,8	779	74.5	44.8	18.6	1.7	414.9	39	/
ΠΚ	7,2	2476	152.0	31.6	322.0	9.1	323.0	567	101
ΠΚ	7,2	2442	133.9	34.5	312.7	9.1	324.6	544.2	93
ΠΚ	7,4	2500	184.0	12.2	308.1	9.6	355.0	580	102
ΠΚ	7,5	2608	122.6	43.8	344.9	14.9	302.7	670.12	57.64
ΠΚ	7,6	2250	101.0	56.9	272.9	8.6	357.6	510.6	76.8
ΠΚ	7,7	2740	155.5	49.1	390.8	13.7	384.4	737.5	96.1
ΠΚ	7,7	2990	110.8	81.9	459.8	11.3	387.5	796.7	169
ΠΚ	7,7	2400	156.0	60.8	251.0	9.1	345.0	555	154
ΠΚ	7,7	2399	152.0	46.2	303.5	9.1	336.0	603	107
ΠΚ	8,1	2660	77.0	82.2	340.0	11.7	388.0	620	87.9
ΥΓ3/82	7,3	540	61.7	25.8	10.5	0.9	275.0	17.4	14.3
ΥΓ3/82	7,4	660	102.6	13.6	10.3	0.8	336.8	17.7	21.6
ΥΓ3/82	7,4	470	69.7	13.1	11.0	0.4	240.0	18.8	15.2
ΥΓ3/82	7,4	575	35.3	41.8	9.7	0.9	287.0	18.1	18.6

stationID	pH	COND	Ca++	Mg++	Na+	K+	HCO3-	Cl-	SO4-
ΥΓ3/82	7,5	610	100.2	16.1	11.5	0.8	349.0	14.2	16.3
ΥΓ3/82	7,5	417	59.3	16.5	8.3	0.8	225.8	14.18	19.21
ΥΓ3/82	7,6	570	85.8	13.1	9.2	0.8	296.6	14.2	14.4
ΥΓ3/82	7,6	570	102.6	15.6	8.0	0.8	344.2	14.2	19.2
ΥΓ3/82	7,7	475	74.6	14.1	8.9	0.4	262.4	18.08	18.3
ΥΓ3/82	7,73	528	82.6	13.1	26.8	1.3	274.6	48.57	21.1
ΥΓ3/82	7,8	640	80.2	30.6	8.0	0.8	347.8	10.6	24
ΥΓ6/84	7	700	86.6	22.4	13.8	0.8	322.2	21.3	12
ΥΓ6/84	7,1	692	69.7	30.6	12.8	0.9	297.0	29.2	10
ΥΓ6/84	7,2	626	76.2	21.4	20.2	1.3	314.0	26.9	/
ΥΓ6/84	7,2	704	100.2	18.0	15.8	0.9	360.0	26.2	10
ΥΓ6/84	7,4	630	99.4	15.1	13.8	0.8	317.3	17.7	24
ΥΓ6/84	7,4	810	123.4	18.5	13.8	0.8	405.2	21.3	32.7
ΥΓ6/84	7,4	791	139.0	9.2	15.6	1.3	420.0	22.3	10
ΥΓ6/84	7,6	600	78.6	13.1	12.6	1.2	240.4	23	/
ΥΓ6/84	7,7	680	128.3	16.1	11.5	0.8	405.2	17.7	23.1
ΥΓ6/84	7,8	622	67.7	38.9	14.3	0.9	339.9	20.92	28.8