

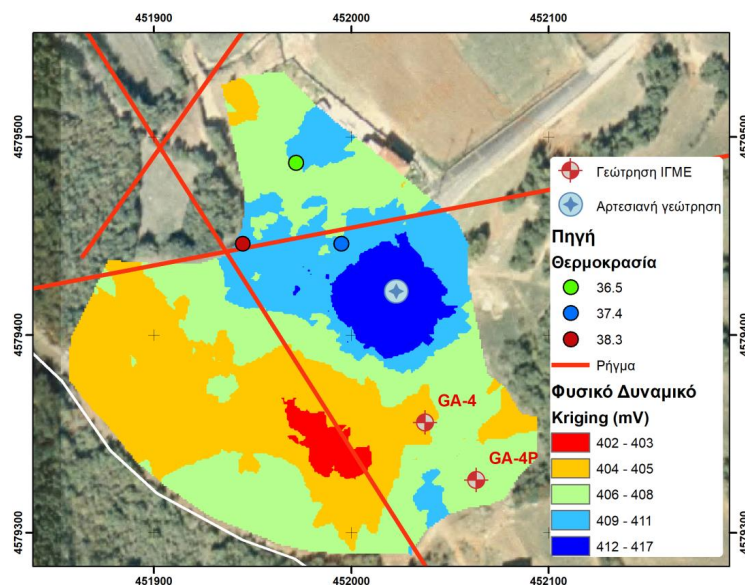
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΕΥΘΥΜΙΑ ΚΟΥΛΤΖΙΟΓΛΟΥ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΑΓΚΙΣΤΡΟΥ, ΣΕΡΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018





ΕΥΘΥΜΙΑ ΚΟΥΛΤΖΙΟΓΛΟΥ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 4891

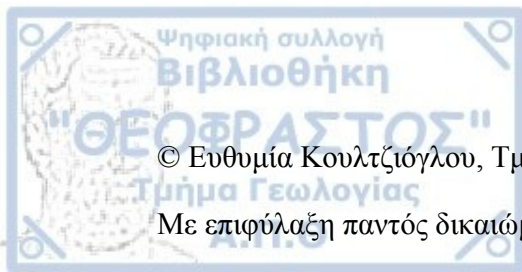
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΑΓΚΙΣΤΡΟΥ, ΣΕΡΡΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,

Εργαστήριο Εφ. Γεωφυσικής

Επιβλέπων Καθηγητής

Αν. Καθηγητής Βαργεμέζης Γεώργιος



© Ευθυμία Κουλτζιόγλου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ
ΑΓΓΙΣΤΡΟΥ,ΣΕΡΡΩΝ– Διπλωματική Εργασία

©Efthymia Koultzoglou, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2018

All rights reserved.

CONTRIBUTION OF SELF POTENTIAL MEASUREMENTS TO THE STUDY OF
MECHANISM OF AGGISTRO THERMAL SPRINGS– Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

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

Εικόνα Εξωφύλλου: Κατανομή τιμών φυσικού δυναμικού στην περιοχή πηγών Αγγίστρου

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	6
Πρόλογος	7
1 Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (SP)	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Μηχανισμοί Δημιουργίας Φυσικού Δυναμικού	10
1.2.1 Πιθανοί μηχανισμοί δημιουργίας φυσικού δυναμικού λόγω γεωθερμικής δραστηριότητας	16
1.2.2 Συμπεράσματα και αναμενόμενες τιμές φυσικού δυναμικού λόγω ροής θερμού νερού	22
1.3 Πηγές θορύβων και ποιότητα δεδομένων στην γεωθερμική έρευνα	25
1.4 Διατάξεις έρευνας	31
1.5 Εξοπλισμός	35
1.6 Εφαρμογές	36
2 Περιοχή Μελέτης	38
2.1 Γεωγραφική θέση και Γεωθερμία του Αγκίστρου	38
2.2 Γεωλογικά και γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής	40
2.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά Αγκίστρου	42
3 Πραγματοποίηση και επεξεργασία μετρήσεων υπαίθρου	45
3.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός	45
3.2 Ανάλυση, επεξεργασία και αποτελέσματα μετρήσεων	47
4 Συμπεράσματα	56
5 Βιβλιογραφία	57

Περίληψη

Η παρούσα εργασία γίνεται στα πλαίσια εκπόνησης διπλωματικής εργασίας, του προπτυχιακού μαθήματος τμήματος Γεωλογίας και τομέα Γεωφυσικής. Πραγματοεύεται την ανάλυση μιας μεθόδου εφαρμοσμένης γεωφυσικής και συγκεκριμένα της ηλεκτρικής μεθόδου του φυσικού δυναμικού με σκοπό την διερεύνηση του μηχανισμού λειτουργίας των γεωθερμικών πηγών Αγκίστρου στον νομό Σερρών.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η πλήρης κατανόηση λειτουργίας της μεθόδου του φυσικού δυναμικού γενικά αλλά και ειδικά η εφαρμογή της μεθόδου αυτής στην γεωθερμία, μία εφαρμογή που εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Σαν παράδειγμα της εφαρμογής αυτής παραθέτεται η έρευνα και η πραγματοποίηση μετρήσεων υπαίθρου με την συγκεκριμένη μέθοδο σε μία από τις ελληνικές περιοχές με την μεγαλύτερη παρουσία γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, το Άγκιστρο στον νομό Σερρών.

Αρχικά, η εργασία αυτή παρουσιάζει τους μηχανισμούς δημιουργίας του φυσικού δυναμικού περνώντας μετά στους μηχανισμούς αυτούς στην γεωθερμική έρευνα. Στην συνέχεια, αναλύει το κομμάτι της πραγματοποίησης των μετρήσεων, δίνοντας λεπτομέρειες σχετικά με τον εξοπλισμό αλλά και τις δυσκολίες-θορύβους που μπορεί να παρουσιαστούν. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια της μεθόδου του φυσικού δυναμικού στην γεωθερμική περιοχή του Αγκίστρου Σερρών και οδηγούν στην διατύπωση συμπερασμάτων σχετικά με τον μηχανισμό δημιουργίας των γεωθερμικών του πηγών.

Η συμβολή των δύο επιστημών, της γεωθερμίας και της γεωφυσικής, είναι πολύ σημαντική για την μελέτη των θερμών πηγών που αποτελούν σημείο ενδιαφέροντος για τον άνθρωπο, καθώς βοηθάει όχι μόνο στην σωστότερη εκμετάλλευσή τους αλλά και στην προστασία τους.



Abstract

The present project is outcome of the assignment of the Bachelor Thesis, a course of the school of geology and the department of geophysics. It has to do with the analysis of an applied geophysics method, in particular the electrical method of self-potential. The aim of this Thesis is the studying of the mechanism of Aggistro thermal springs.

The purpose of this Thesis is to study the contribution of the Self Potential method to geothermal survey. The outflow of the geothermal fluids at the thermal springs of Aggistro (Serres, Northern Greece) is examined by the self potential geoelectric method as a case study.

In the beginning of the Thesis, the mechanisms of self-potential generation are described while detailed description is attempted to the Sp anomalies related with geothermal activity. After that, the description of the springs and the existing information on the geology is given.

The final chapter of the dissertation is dedicated to the application of the method to the field. The planning of the fieldwork, the recording of the data and the processing that followed and finally the distribution of the self potential is presented in maps.

Positive SP anomalies are related with the upwards flow of the thermal fluid to the springs as well to the artesian well drilled in 2016.

Similarly, negative anomalies can be considered as areas where percolation of meteoric water is taking place.

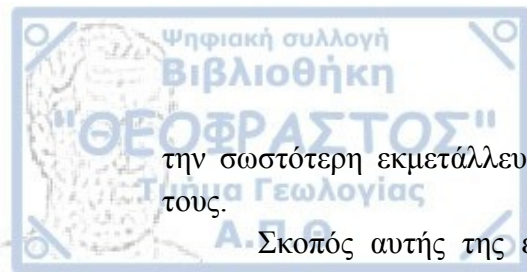
Taking account these two observations arised by SP data of this work, we can also point out the importance of the Sp geophysical method to the study of the mechanism of thermal springs since its contribution can help to the better exploitation of the geothermal energy in parallel to their protection.

Πρόλογος

Γεωφυσική διασκόπηση είναι η επιστήμη που μελετά τη δομή των εσωτερικών στρωμάτων του φλοιού της γης με την βοήθεια των γεωφυσικών μεθόδων, τις μετρήσεις αυτών και την εφαρμογή τους στους διάφορους νόμους της Φυσικής (Παπαζάχος, 1985). Οι γεωφυσικές μέθοδοι μετράνε φυσικές ποσότητες όπως το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου, την ένταση του πεδίου βαρύτητας, την ένταση του μαγνητικού ή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τους χρόνους διαδρομής των ελαστικών κυμάτων που παράγονται τεχνητά κ.α. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι δεν έχουν ενδιαφέρον οι μετρούμενες τιμές αυτές καθ'αυτές, αλλά οι μεταβολές τους, οι οποίες δημιουργούνται από τις ανωμαλίες της δομής του γήινου φλοιού και δηλώνουν ύπαρξη κοιτασμάτων (πετρελαιοφόρων ή μεταλλοφόρων), γεωθερμικών πεδίων, υδροφόρων οριζόντων κ.α.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι χωρίζονται σε σεισμικές, βαρυτομετρικές, μαγνητικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές. Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού που θα αναλυθεί παρακάτω ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους. Με τις μεθόδους αυτές αναλύονται μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της γης με σκοπό τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Οι μετρούμενες ποσότητες των ηλεκτρικών μεθόδων είναι η ηλεκτρική τάση και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτοί χωρίζονται ανάλογα με τις μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών σε αυτές που βασίζονται σε φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία και σε αυτές που εξαρτώνται από παραγόμενα τεχνητά ηλεκτρικά ρεύματα ή πεδία. Το φυσικό δυναμικό ανήκει στην πρώτη κατηγορία. Οι βασικές χρήσεις των ηλεκτρικών μεθόδων είναι η αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων καθώς χρησιμοποιούνται και στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία. Η χρήση των ηλεκτρικών μεθόδων και συγκεκριμένα της μεθόδου του φυσικού δυναμικού, στον προσδιορισμό ζωνών ή επιπέδων ενεργούς κυκλοφορίας γεωθερμικών ρευστών στο υπέδαφος είναι σημαντική και θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω.

Η Γεωθερμική ενέργεια προσπαθεί να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο εδώ και χιλιάδες χρόνια για διάφορους σκοπούς που ξεκίνησαν με λουτροθεραπευτικούς, αλλά εξελίχθηκαν στην χρήση της ενέργειας αυτής ως ανανεώσιμης για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, θέρμανσης κ.α. Από τους προϊστορικούς ήδη χρόνους, οι επιφανειακές εκδηλώσεις της γεωθερμικής ενέργειας (θερμές πηγές) συνδέοταν με διάφορες θεότητες της μυθολογίας. Έπειτα, κατά την αρχαιότητα έγινε λόγος για τις θεραπευτικές και υπερφυσικές ιδιότητες που πρόσφεραν οι θερμές πηγές και η χρήση του νερού τους όχι μόνο για ιαματικούς σκοπούς αλλά και για θρησκευτικούς. Καθώς περνούσαν τα χρόνια και εξελίσσονταν οι τεχνολογίες έγινε εφικτή η απόληψη της γεωθερμικής θερμότητας. Είναι, λοιπόν, κατανοητό πως η ανάγκη των ανθρώπων ανά το πέρασμα των αιώνων για την μελέτη των γεωθερμικών περιοχών και την εκμετάλλευσή τους μεγαλώνει. Συμβολή στη μελέτη αυτή είναι ο συνδυασμός των δύο επιστημών, της γεωθερμίας και της γεωφυσικής. Με τον συνδυασμό αυτό ενισχύεται η κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας των γεωθερμικών πηγών για



την σωστότερη εκμετάλλευση τους και την μεγαλύτερη διατήρηση και προστασία τους.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η πλήρης ανάλυση και κατανόηση της μεθόδου του φυσικού δυναμικού παραθέτοντας ένα παράδειγμα της εφαρμογής αυτής στην περιοχή του Αγκιστρου Σερρών για την διερεύνηση του μηχανισμού λειτουργίας των γεωθερμικών του πηγών. Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού είναι η αρχαιότερη ηλεκτρική μέθοδος και εντοπίζει επιτυχώς την ύπαρξη υπόγειων ροών. Η εφαρμογή του φυσικού δυναμικού στα επιφανειακά εδάφη, είναι εύκολη χωρίς ιδιαίτερο εξοπλισμό, έξοδα και γρήγορη στη λήψη δεδομένων.

1 Μέθοδος του Φυσικού Δυναμικού (SP)

1.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού αποτελεί την αρχαιότερη μέθοδο ηλεκτρικής διασκόπησης. Οι μετρήσεις της οφείλονται σε διαφορές δυναμικού φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων μεταξύ δύο σημείων επιφανειακά του εδάφους, οι οποίες παράγονται με ηλεκτροχημική δράση (Zlotnicki and Nishida, 2003). Οι ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού προέρχονται από διαφορετικούς μηχανισμούς που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση μεταλλοφόρων κοιτασμάτων, γεωλογικών χαρακτηριστικών, ροές υπόγειων νερών, γεωθερμικών πεδίων και υδροθερμικών συστημάτων. Οι μετρήσεις του ηλεκτρικού ρεύματος έχουν ένα ευρύ φάσμα, από μερικά mV σε 1 ή 2 V/Km, και η χωρική κατανομή τους σχετίζεται με το μέγεθος της πηγής που βρίσκεται σε βάθος μεταξύ των πρώτων εκατό μέτρων.

Στο παρελθόν, είχαν διεξαχθεί πολλές έρευνες για το φυσικό δυναμικό κυρίως στον τομέα της μεταλλευτικής έρευνας παρ'όλα αυτά η μέθοδος αυτή περιορίστηκε φέρνοντας στη θέση της την ανάπτυξη άλλων γεωφυσικών μεθόδων όπως σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές και βαρυτικές. Το γεγονός αυτό ήταν αναπάντεχο, λαμβάνοντας υπ'όψην πως η μέθοδος φυσικού δυναμικού αποτελεί μια μη διεισδυτική, γρήγορη και καθόλου ακριβή μέθοδο, με απαιτούμενο εξοπλισμό μόνο ένα βολτόμετρο και μερικά μη πολωμένα ηλεκτρόδια και πως συνήθως οι περιβαλλοντικές γεωφυσικές έρευνες είναι έρευνες χαμηλού προϋπολογισμού.

Δύο πιθανές αιτίες του περιορισμού της χρήσης της μεθόδου αυτής από τους γεωφυσικούς ερευνητές είναι ο ηλεκτρικός θόρυβος και οι δυσκολίες με την ερμηνεία. Οι γεωφυσικοί ερευνητές είναι εξοικειωμένοι με τις πηγές θορύβου του φυσικού δυναμικού όπως τα τελλουρικά ρεύματα, τις ηλεκτροπληξίες, τις τοπογραφικές συνέπειες που σχετίζονται με τα δυναμικά ροής, τα φωτοβολταϊκά δυναμικά και τις αλλαγές στη σύσταση του εδάφους, στην υγρασία και στη φυτοκάλυψη. Επιπλέον, προστίθενται στην λίστα της ανεπιθύμητης τάσης, θαμμένες χρήσεις, στερεωμένοι στο έδαφος φράχτες και άλλοι εξοπλισμοί, διαβρωμένα κομμάτια μετάλλου και άλλες ανθρωπογενείς πηγές.

Παρά όλους τους θορύβους, αποτελεσματικά φίλτρα εγκοπής 60 Hz σε σύγχρονα, εύχρηστα και ψηφιακά βολτόμετρα εξαλείφουν τον περισσότερο πολιτισμικό θόρυβο. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα επίπεδα σήματος του φυσικού δυναμικού είναι μία ή δύο τάξεις μεγέθους πάνω από τον θόρυβο του περιβάλλοντος (Nyquist and Corry, 2002).

Από το 1970, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού αναπτύχθηκε και πάλι ως μια σύγχρονη μέθοδος αναζήτησης για την περιγραφή της θερμικής κατάστασης των γεωθερμικών πεδίων. Αυτές οι μελέτες, ενθάρρυναν την εφαρμογή της μεθόδου στις μελέτες των ηφαιστειών. Μία συστηματική έρευνα μελέτης πεδίου φυσικού δυναμικού που διεξήχθη σε ένα ηφαίστειο της Χαβάης, το Kilauea, έδειξε έναν προφανή συσχετισμό μεταξύ των ανωμαλιών του φυσικού δυναμικού (μέχρι και 1000 mV) και των θερμικών περιοχών. Κατά συνέπεια, ακολούθησαν πολλές προσπάθειες

για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της δομής και της επαγωγής υδροθερμικών συστημάτων. Τέλος, επιτυχείς έρευνες που εφαρμόστηκαν σε ηφαίστεια προτείνουν ότι η παρακολούθηση των ανωμαλιών του φυσικού δυναμικού μπορεί να είναι μία αποτελεσματική μέθοδος για τον εντοπισμό των αλλαγών της θερμικής κατάστασης και για την απόκτηση πληροφοριών για την ανανεώσιμη υδροθερμική δραστηριότητα (Zlotnicki and Nishida, 2003).

1.2 Μηχανισμοί Δημιουργίας Φυσικού Δυναμικού

Οι ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού δημιουργούνται απο μια ποικιλία μηχανισμών και ανάλογα με τα αίτια δημιουργίας κατηγοριοποιούνται ως εξής (Nyquist and Corry, 2002):

Δυναμικά διάχυσης και μεμβράνης. Οι ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού συνδέονται με τις διαβαθμίσεις σε συγκεντρώσεις ιοντικών ειδών στο έδαφος που δημιουργούν δυναμικά διάχυσης. Ως αποτέλεσμα της διαφορετικής κινητικότητας των συμμετέχοντων ανιόντων και κατιόντων είναι η διαφορά στα ποσοστά διάχυσης που δημιουργεί ένα ηλεκτρικό δυναμικό εξαιτίας της γρηγορότερης κίνησης των ιόντων του ενός φορτίου που θα ξεπεράσουν τα ιόντα του αντίθετου φορτίου. Το προκύπτων ηλεκτρικό πεδίο είναι ακριβώς αυτό που χρειάζεται ώστε να επιταχύνει την αργή κίνηση των ιόντων και να διατηρήσει την ηλεκτρική ουδετερότητα. Το δυναμικό διάχυσης, που συμβολίζεται με E_d , δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$E_d = \frac{RT(I_a - I_c)}{nF} \ln(C_1/C_2)$$

Όπου I_a και I_c είναι οι κινητικότητες των ανιόντων και των κατιόντων αντίστοιχα, n το ηλεκτρικό φορτίο, R είναι η παγκόσμια σταθερά αερίου, T η απόλυτη θερμοκρασία, F η σταθερά Faraday και τέλος C_1 και C_2 είναι οι συγκεντρώσεις που δημιουργούν την διαβάθμιση διάχυσης. Γενικά, αυτός ο μηχανισμός μπορεί να δημιουργήσει ανωμαλίες τάξεως δεκάδων του millivolt και είναι απλά μια πηγή θορύβου στις περισσότερες έρευνες φυσικού δυναμικού.

Συχνά εμφανίζονται διαλυόμενες ουσίες NaCl μέσα σε φυσικούς ηλεκτρολύτες. Οι διαφορές στις συγκεντρώσεις του NaCl δημιουργούν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που παίζουν σημαντικό ρόλο στο logging πηγαδιών, γεωτρήσεων κτλ.

Θεωρώντας το 'δυναμικό σχιστολίθου' γνωστό από τις γεωφυσικές διαγραφίες γεωτρήσεων συμπεραίνεται το εξής:

Όταν ο σχιστόλιθος έρθει σε επαφή με έναν ψαμμίτη, θα δημιουργηθεί μία τάση κατά μήκος της επαφής, εξ' αιτίας της περατότητας του σχιστολίθου στα ιόντα Na αλλά όχι στα ιόντα Cl . Επομένως, η διάχυση του Na απο τον ψαμμίτη στον σχιστόλιθο θα δημιουργήσει μία δυναμική κλίση που τείνει να οδηγεί τα ιόντα Na πίσω στον ψαμμίτη. Η ισορροπία ανάμεσα στη διάχυση και στη μετανάστευση του ηλεκτρικώς

οδηγούμενο ιόντος δίνεται από την εξίσωση του Nernst, που είναι αυτή του δυναμικού διάχυσης χωρίς τις διαφορές στις κινητικότητες των ιόντων :

$$E_d = \frac{RT}{nF} \ln(C_1/C_2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος και των δύο δυναμικών, αυτού της διάχυσης και αυτού της μεμβράνης είναι ευθέως ανάλογα με την θερμοκρασία, οπότε η γεωθερμική δραστηριότητα βελτιώνει αυτές τις ανωμαλίες φυσικού δυναμικού.

Βιοηλεκτρικά Δυναμικά. Η ιοντική εκλεκτικότητα και η άντληση νερού από το έδαφος στις ρίζες των φυτών μπορεί να δημιουργήσουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού. Οι ρίζες είναι ιοντοεκλεκτικές μεμβράνες, οπότε είναι απροσδόκητο να παράγουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού. Οι βιοηλεκτρικές ανωμαλίες μπορεί να φτάσουν σε μετρήσεις εκατοντάδων του millivolt. Έχουν παρατηρηθεί στα πεδία απότομες αλλαγές φυσικού δυναμικού, όταν υπάρχει αλλαγή της βλάστησης. Αυτό, φυσικά, σχετίζεται συνήθως με αλλαγές στη σύσταση του εδάφους ή των υποκείμενων πετρωμάτων.

Δυναμικά ροής. Είναι επίσης γνωστά και ως 'ζήτα' ή 'δυναμικά ηλεκτροδιήθησης'. Τα δυναμικά ροής δημιουργούνται όταν το νερό ή άλλα ρευστά ρέουν μέσα σε άμμο, πορώδη πετρώματα, μοραίνες, βασάλτες κτλ. Σε περιοχές υψηλής βροχόπτωσης, απότομης τοπογραφίας και πορώδων πετρωμάτων, τα δυναμικά ροής μπορεί να έχουν τεράστιο εύρος. Στο ηφαίστειο Agadak, στη νήσο Adak, στην Αλάσκα, μετρήθηκε ανωμαλία φυσικού δυναμικού 2693 mV που αποδίδεται στα δυναμικά ροής.

Συχνά συναντούνται δυναμικά ροής σε έρευνες φυσικού δυναμικού για γεωθερμικές πηγές. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε για πρώτη φορά τον 19^ο αιώνα από τον Helmholtz, όπου αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός τριχωειδούς σωλήνα όταν αυτός διαρρέεται από ηλεκτρολύτη. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, E ($V m^{-1}$), κατά μήκος του αγωγού εκφράζεται με τον εξής τύπο:

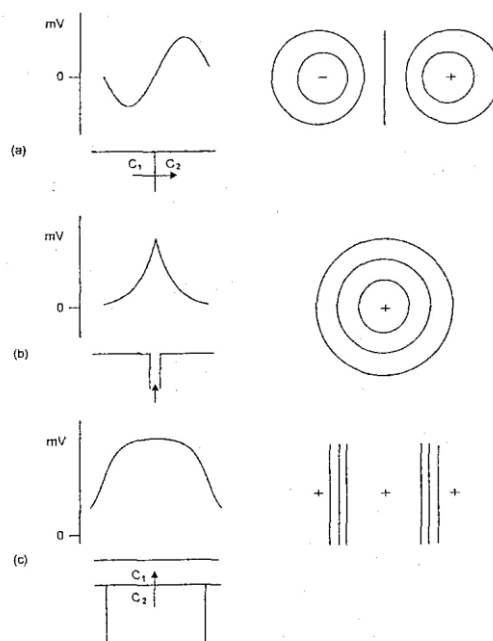
$$E = \frac{\epsilon \rho \zeta}{4\pi\mu} p$$

Όπου ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά του ηλεκτρολύτη ($F m^{-1}$), ρ η αντίσταση του (Ωm), ζ μία παράμετρος που εξαρτάται από τα τοιχώματα του τριχωειδούς και του ηλεκτρολύτη, p η βαθμίδα της πίεσης ($Pa m^{-1}$), και μ το δυναμικό ιξώδες του ηλεκτρολύτη ($Pa s$). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E έχει την ίδια κατεύθυνση με τη βαθμίδα της πίεσης και αντίθετη με τη ροή του ηλεκτρολύτη. Ο λόγος $\frac{\epsilon \rho \zeta}{4\pi\mu} = C$ ονομάζεται συντελεστής δυναμικού ροής και η τιμή του για τα υλικά της Γης φτάνει και μέχρι τα $1,3 \frac{mV}{KPa}$.

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται λόγω δυναμικού ροής, θεωρείται ότι οφείλεται στον συνδιασμό της σύνδεσης των ιόντων του ηλεκτρολύτη με τα

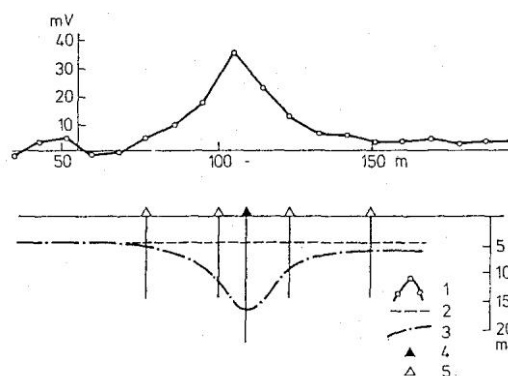
τοιχώματα του τριχωειδούς σωλήνα και των διαφορετικών ταχυτήτων ροής των θετικών και αρνητικών ιόντων. Η ανωμαλία μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με τη βαθμίδα της πίεσης. Θετική ανωμαλία αναμένεται με την ελάττωση υδροστατικής πίεσης.

Ικανή και αναγκαία συνθήκη για τη δημιουργία φυσικού δυναμικού λόγω ροής δεν είναι μόνο η ροή νερού εξαιτίας μιας βαθμίδας πίεσης, αλλά η ροή αυτή να συμβαίνει κατά μήκος ενός ορίου σχηματισμών με διαφορετικές ιδιότητες, άρα και διαφορετικό C . Στην παρακάτω εικόνα (σχήμα 1) παρουσιάζονται κάποια μοντέλα ροής:



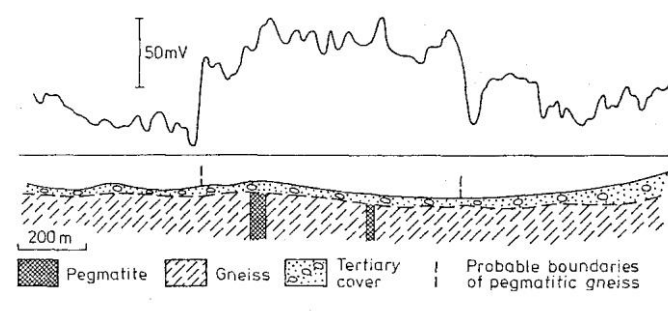
Σχήμα 1 Σχήματα ανωμαλιών φυσικού δυναμικού (προφίλ και χάρτες), σε συγκεκριμένες ροές. (a) Οριζόντια ροή, (b) Ροή σε πηγάδι, (c) Ροή κάθετη σε κατακόρυφο όριο. (D. S. Parasnis 1995).

Επιπροσθέτως, έχει γίνει χρήση των δυναμικών ροής με σκοπό την ανίχνευση σημείων διαρροών (πχ σε φράγματα), μη ορατών καρστικών σπηλαιων, πηγών, καθώς επίσης και για μελέτες των αποτελεσμάτων της άντλησης του στον υδροφορέα. (Σχήμα 2)



Σχήμα 2 Φυσικό δυναμικό οφειλόμενο σε άντληση. 1 Μετρούμενο φυσικό δυναμικό. 2 Υδροφόρος ορίζοντας πριν την άντληση. 3 Υδροφόρος ορίζοντας μετά την άντληση. (D. S. Parasnis 1995).

Προσρόφηση. Χαρακτηριστικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού τάξεως 20-40 mV δημιουργούνται πάνω από πηγματίτη και χαλαζία. Αίτια της δημιουργίας αυτής της ανωμαλίας είναι η προσρόφηση θετικών και αρνητικών ιόντων, αγνώστων όμως λεπτομερειών ενός τέτοιου ηλεκτροχημικού μηχανισμού. Παρατηρείται, επίσης, δημιουργία φυσικού δυναμικού πάνω από άργιλο, η οποία πιθανώς να κατατάσσεται στην συγκεκριμένη κατηγορία μηχανισμού δημιουργίας φυσικού δυναμικού. Παρακάτω παρατίθεται μία εικόνα (σχήμα 3) , στην οποία φαίνεται καθαρά η δημιουργία φυσικού δυναμικού εξ' αιτίας φλεβών πηγματίτη, που παρεισδύεται στα όρια του γνευσίου.



Σχήμα 3 Φυσικό δυναμικό λόγω ιοντικής απορρόφησης σε πηγματίτη. (D. S. Parasnis 1995).

Δυναμικά μεταλλευμάτων. Οι περισσότερες ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που έχουν αναφερθεί και μερικές από τις μεγαλύτερες ανωμαλίες αυτού, σχετίζονται με τα μεταλλευτικά κοιτάσματα, ιδίως με τα θαμμένα σουλφίδια, καθώς τα δυναμικά αυτά είναι ισχυρότερα κατά κανόνα σε ορυκτά όπως ο χαλκοπυρίτης και ο σιδηροπυρίτης. Έχουν αναφερθεί μετρήσεις της τάξεως των 2 V ή και μεγαλύτερες. Η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου του φυσικού δυναμικού έγινε, όπως προαναφέρθηκε, πάνω στη μεταλλευτική έρευνα. Αυτό είναι λογικό επακόλουθο εάν σκεφτεί κανείς πως το φυσικό δυναμικό οφείλεται σε φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα, μεταξύ διαλυμάτων και μεταλλευμάτων σε επαφή, που παράγονται με ηλεκτροχημική δράση.

Τα δυναμικά μεταλλευμάτων προέρχονται προφανώς από τις γεωχημικές αντιδράσεις οξείδωσης-αναγωγής (redox) , ισοδύναμες με το γαλβανικό στοιχείο που ορίζεται στην ηλεκτροχημεία. Οι Sato και Mooney (1960), πρότειναν ένα κλασσικό μοντέλο, που αναφέρεται ακόμη και σήμερα. Οραματίστηκαν ένα σουλφιδικό κοίτασμα μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα, όπου οι οξειδωτικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα πάνω από τον υδροφόρο, ενώ οι αναγωγικές κάτω από αυτόν, με το μέταλλευμα να συμπεριφέρεται σαν αδρανής αγωγός. Κατά αυτόν τον τρόπο, το πάνω και το κάτω μέρος του σουλφιδικού κοιτάσματος συμπεριφέρεται σαν δύο ημιστοιχεία ενός γαλβανικού στοιχείου. Το πάνω μέρος φορτίζεται αρνητικά και το κάτω μέρος θετικά. Ως απόκριση στο ηλεκτρικό φορτίο, τα ιόντα μεταναστεύουν διαμέσου των πόρων

των πετρωμάτων, περικλύοντας το σουλφιδικό σώμα του μεταλλεύματος. Οι μετρούμενη ανωμαλία του φυσικού δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους οφείλεται απλά στην πτώση της τάσης που δημιουργείται από την ροή ρεύματος μέσα στο πέτρωμα στο μοντέλο τους.

Αυτό το μοντέλο 'γεωμπαταρία' έχει επικρατήσει για περισσότερο από 40 χρόνια παρά τα μειονεκτήματά του, τα οποία είναι αναφορικά τα εξής:

Εύρος: Το μοντέλο Sato και Mooney δεν μπορεί να μετρήσει τάσεις μεγαλύτερες από περίπου 800 mV, βασισμένο στα δυναμικά των σουλφιδίων E_h , παρ'ότι έχουν αναφερθεί πολλές μετρήσεις πεδίων 1000 mV ή και μεγαλύτερες πάνω από σουλφίδια.

Διακυμάνσεις: Η μεταφορά ιόντων κατά μήκος των γραμμών πεδίου, σύμφωνα με το μοντέλο Sato και Mooney, απαιτεί εύλογα ομαλές διακυμάνσεις τάσεως, ενώ έχουν μετρηθεί στην επιφάνεια, στο υπέδαφος και από logging γεωτρήσεων μεγάλες διακυμάνσεις.

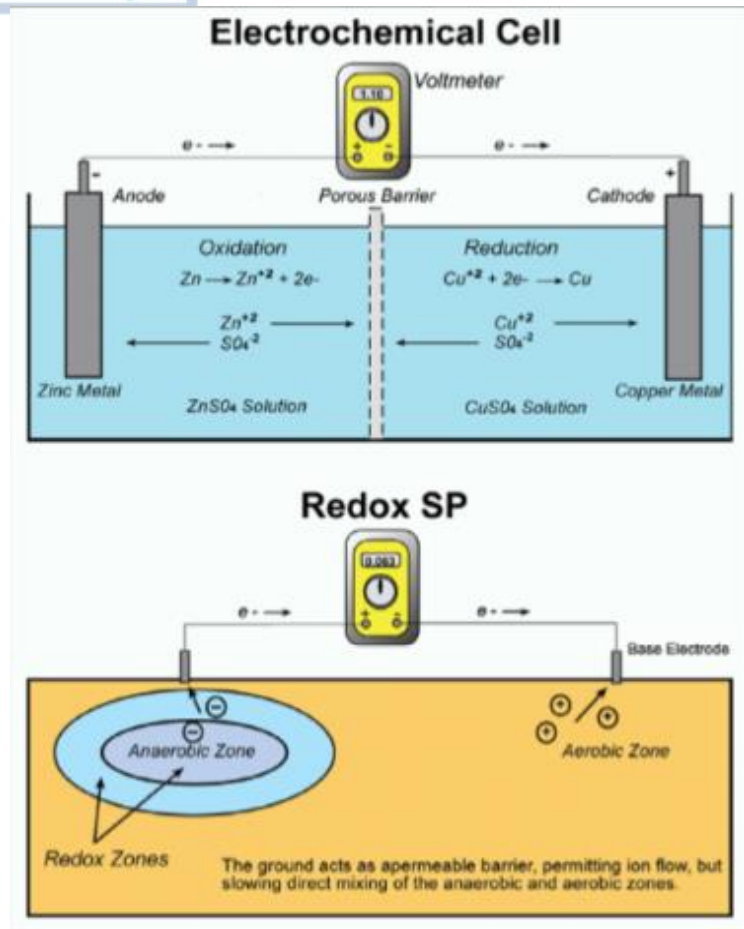
Ελλειψη θετικού πόλου: Μια γεωμπαταρία απαιτεί ένα θετικό και έναν αρνητικό πόλο. Τα δεδομένα από μετρήσεις φυσικού δυναμικού που έχουν γίνει στην επιφάνεια, στο υπέδαφος και σε γεωτρήσεις μέσα σε ένα μεταλλευτικό σώμα, δείχνουν να καταγράφουν σταθερά αρνητική ανωμαλία σχετικά με το σταθμό βάσης που βρίσκεται μακριά από το μεταλλευτικό σώμα.

Υδροφόρος ορίζοντας: Το μοντέλο Sato και Mooney δεν εξηγεί τις ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού που σχετίζονται με μεταλλευτικά σώματα τα οποία βρίσκονται ολοκληρωτικά κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, όπως κοιτάσματα πορφυριτικών σουλφιδίων, όπου δεν υπάρχει κάποιος αδρανείς κεντρικός αγωγός.

Σταθερότητα: Άμεσες μετρήσεις δείχνουν ότι οι ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που σχετίζονται με θαμμένα σουλφίδια είναι σταθερές για τουλάχιστον μια δεκαετία και πιθανότατα και στο πέρασμα των γεωλογικών χρόνων. Το ερώτημα που τίθεται είναι γιατί η γεωμπαταρία δεν αποφορτίζεται και γιατί οι τάσεις δεν κυμαίνονται μαζί με τον υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης, δεν έχουν παρατηρηθεί εποχικές μεταβολές τάσης. Η μεταφορά των ιόντων είναι βέβαιο ότι μειώνεται με την πτώση της θερμοκρασίας. Ανωμαλίες φυσικού δυναμικού μπορούν να βρεθούν και σε αρκτικές συνθήκες, στις οποίες πρακτικά η ιοντική μεταφορά δεν υφίσταται σε παγωμένο έδαφος.

Είναι γεγονός ότι, όπως αναφέρουν οι Sato και Mooney, οι ανωμαλίες του φυσικού δυναμικού πάνω από θαμμένα σουλφίδια οφείλονται στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις της χημείας, αλλά εκτιμάται ότι τα ηλεκτρόδια του φυσικού δυναμικού μετράνε μόνο την διαφορά δυναμικού οξειδοαναγωγής μεταξύ της βάσης και του περιπλανώμενου ηλεκτροδίου, και όχι την πτώση της τάσης που σχετίζεται με την αποφόρτιση της γεωμπαταρίας μέσω αντιστατικών πετρωμάτων. Με λίγα λόγια, όπως και σε ένα γαλβανικό στοιχείο, δεν μπορεί να ρέει κάποιο ρεύμα, εκτός αν τα ηλεκτρόδια του φυσικού δυναμικού τοποθετούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα όπου η διαφορά δυναμικού λόγω οξειδοαναγωγής επιτρέπει αυθόρμητες αντιδράσεις. Το καλώδιο μεταξύ των ηλεκτροδίων, και όχι το μεταλλευτικό σώμα, είναι αυτό που ολοκληρώνει το κύκλωμα μεταξύ των ζωνών οξείδωσης και αναγωγής (Σχήμα 4).

Αυτό εξηγεί την αιτία που υπάρχουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που σχετίζονται με πορφυριτικά και σφαλεριτικά μεταλλευτικά σώματα που είναι μη αγώγιμα.



Σχήμα 4 (Πάνω) Η διαφορά δυναμικού οξειδοαναγωγής μεταξύ δύο ημιστοιχείων ενός γαλβανικού στοιχείου καταγράφεται ως ηλεκτρική τάση. (Κάτω) Η ανάλογη κατάσταση στο πεδίο, όπου η διαφορά οξειδοαναγωγής μπορεί να παραχθεί, για παράδειγμα, από τον μεταβολισμό υδρογονανθράκων από βακτήρια.

Εάν ένα καλώδιο είναι συνδεδεμένο μεταξύ δύο υλικών σε ηλεκτρολυτική επαφή και το δυναμικό της οξειδοαναγωγής μεταξύ των υλικών είναι τόσο ώστε να αντιδρά αυθόρμητα, τότε παράγεται ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό δυναμικό.

Συμπερασματικά, όσων αφορά την προέλευση του δυναμικού μεταλλευμάτων, αν οι διαβαθμίσεις της οξειδοαναγωγής μπορούν να παράγουν μόνες τους μεγάλες ανωμαλίες φυσικού δυναμικού, τότε η μέθοδος φυσικού δυναμικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για την αποκατάσταση χώρου στην περιβαλλοντική γεωφυσική.

1.2.1 Πιθανοί μηχανισμοί δημιουργίας φυσικού δυναμικού λόγω γεωθερμικής δραστηριότητας

Παρ'ότι έχουν παρατηρηθεί ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που σχετίζονται με γεωθερμική δραστηριότητα, οι μηχανισμοί δημιουργίας τους δεν είναι απόλυτα κατανοητοί πάντα. Υπάρχουν σαφείς αποδείξεις ότι η υψηλή θερμοκρασία και η κυκλοφορία των υπόγειων ροών, χαρακτηριστικά των γεωθερμικών συστημάτων, είναι ικανά να παράγουν δυναμικά πεδία στην επιφάνεια που είναι συγκρίσιμα σε μήκος κύματος και σε εύρος με τις ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που παρατηρούνται στις γεωθερμικές περιοχές (Corwin and Hoover, 1979).

Έχουν διεκπερωθεί πολλές έρευνες σχετικά για την προέλευση των ανωμαλιών του φυσικού δυναμικού που βασίζονται σε ηλεκτροχημικές, θερμοηλεκτρικές και ηλεκτροκινητικές επιδράσεις. Ο Nourbehecht (1963) παρουσίασε μια θεωρητική πορεία για την κατανόηση αυτών των διεργασιών, που βασίζεται στη μη αναστρέψιμη θερμοδυναμική. Οι ροές J_i (όπως η θερμότητα, ο διαλύτης και το ηλεκτρικό ρεύμα) προκαλούνται από τις κινητήριες δυνάμεις X_j (όπως οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας, της πίεσης και του ηλεκτρικού δυναμικού). Έτσι, κάθε ροή μπορεί να εκφραστεί ως έναν γραμμικό συνδιασμό όλων των δυνάμεων (που ονομάζονται φαινομενολογικές σχέσεις ή θερμοδυναμικές εξισώσεις κίνησης) :

$$J_i = \sum L_{ij} X_j$$

Όπου L_{ij} είναι γενικευμένες αγωγιμότητες και ονομάζονται διασταυρούμενοι συντελεστές ζεύξης όταν $i \neq j$. Αυτές οι σχέσεις παρέχουν την βάση για μία ποσοτική αντιμετώπιση.

Οι μηχανισμοί της υψηλής θερμοκρασίας και της ροής των υπόγειων ρευστών που μπορούν να δημιουργήσουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού είναι οι εξής :

Θερμοηλεκτρική ζεύξη. Αν η βαθμίδα θερμοκρασίας διατηρείται, δια μέσου ενός δείγματος πετρώματος, μία ανάλογη βαθμίδα τάσεως θα εμφανιστεί στο δείγμα. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμοηλεκτρική ζεύξη και μπορεί να δημιουργηθεί από διαφορική θερμική διάχυση των ιόντων στο υγρό πόρου και των ηλεκτρονίων και των μεταφερόμενων ιόντων στον πυρήνα του πετρώματος, διαδικασία γνωστή ως επίδραση Soret (Heikes and Ure, 1961). Η αναλογία της τάσης στην διαφορά θερμοκρασίας $\Delta V / \Delta T$ ονομάζεται συντελεστής θερμοηλεκτρικής ζεύξης.

Θεωρώντας τα ζεύγη ροών θερμότητας J_T και πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος I_T που προκαλούνται από τις κινητήριες δυνάμεις: την βαθμίδα θερμοκρασίας ΔT και την βαθμίδα ηλεκτρικού δυναμικού ΔV , τα J_T και I_T εκφράζονται με τους εξής τύπους :

$$J_T = -\sigma \pi \Delta V - \lambda \Delta T$$

$$I_T = -\sigma \Delta V - \theta \Delta T$$

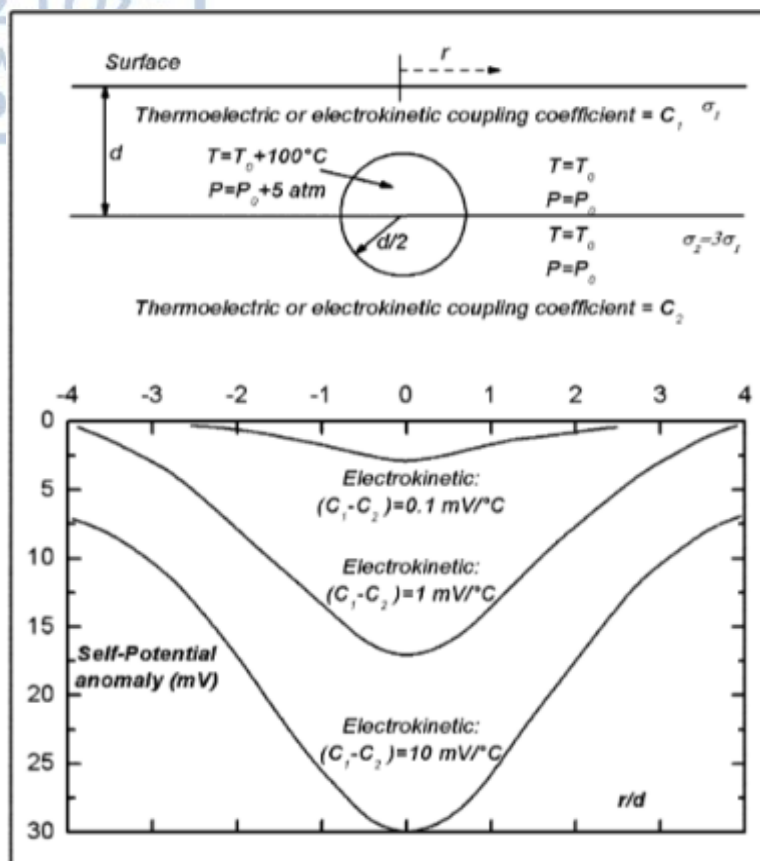
Όπου σ , λ , π και θ είναι αντίστοιχα οι ηλεκτρικές και θερμικές αγωγιμότητες, ο συντελεστής Peltier και θερμοηλεκτρικός συντελεστής. Ο πρώτος και δεύτερος όρος της πρώτης εξίσωσης δείχνει την ροή θερμότητας λόγω της επίδρασης Peltier και την θερμική αγωγιμότητα αντίστοιχα, ενώ στη δεύτερη εξίσωση οι δύο όροι αντιπροσωπεύουν την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος λόγω του νόμου του Ohm και την θερμοηλεκτρική επίδραση αντίστοιχα.

Ο Nourbehecht (1963) παρουσίασε διάφορα δεδομένα από μία ποικιλία τύπων πετρωμάτων και ο συντελεστής θερμοηλεκτρικής ζεύξης κυμαίνεται από -0.09 ως $+1.36 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, με μέσο όρο περίπου $0.27 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Από την άλλη, ο Dorfman (1977) μέτρησε τον συντελεστή αυτό από μία ποικιλία δειγμάτων ψαμμιτών, ασβεστολίθων και σερπεντινιτών, ο οποίος κυμαίνεται από 0.3 μέχρι $1.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Σε ένα σχετικό του πείραμα (Dorfman 1977), τοποθετήθηκε σημειακή πηγή θερμότητας 49°C κοντά στο κέντρο ενός ασβεστολιθικού μπλοκ διαστάσεων $2 \times 1 \times 1 \text{ m}$ και εμφανίστηκε άμεση παραγωγή δυναμικού πεδίου στην επιφάνεια εύρους $+20 \text{ mV}$ με επίκεντρο την πηγή θερμότητας. Σε άλλο πείραμα, ο Yamashita (1961) χρησιμοποιώντας δείγματα κρυσταλλικού πυρίτη και πυρίτη σε σκόνη, μέτρησε συντελεστή ζεύξης περίπου $-0.25 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Μία τεχνική που χρησιμοποιεί την έννοια της μη αναστρέψιμης θερμοδυναμικής για τον υπολογισμό του πεδίου φυσικού δυναμικού στην επιφάνεια που παράγεται από υπόγεια θερμοηλεκτρική ζεύξη, περιγράφεται από τον Nourbehecht (1963). Αυτή η προσέγγιση απαιτεί την παρουσία ενός συνόρου που ξεχωρίζει τις περιοχές με διαφορετικούς συντελεστές θερμοηλεκτρικής ζεύξης και διασχίζεται από ένα σώμα, σχετικό με το περιβάλλον του, αυξημένης θερμοκρασίας.

Ο Nourbehecht παραθέτει τις καμπύλες που δείχνουν το θερμοηλεκτρικό δυναμικό που παράγεται από μία σφαίρα ενιαίας αυξημένης θερμοκρασίας (1963). Σαν πρώτη προσέγγιση στο γεωθερμικό μοντέλο, θεωρείται μία θαμμένη σφαίρα κεντραρισμένη σε βάθος ίσο με τη διάμετρό της. Το κέντρο της διασχίζεται από ένα οριζόντιο όριο, διαχωρίζοντας ένα ανώτερο στρώμα αγωγιμότητας σ_1 από ένα άπειρο, βαθύ, κατώτερο στρώμα αγωγιμότητας $3\sigma_1$ (σχήμα 5). Σε αυτή την περίπτωση, το μέγιστο δυναμικό επιφάνειας είναι περίπου $0.15 [(C_1 - C_2) \Delta T] \text{ mV}$, όπου C_1 και C_2 είναι οι συντελεστές θερμοηλεκτρικής ζεύξης του ανώτερου και του κατώτερου στρώματος αντίστοιχα και ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της σφαίρας και του περιβάλλοντός της.

Θεωρώντας μία μεγάλη τιμή του $(C_1 - C_2)$ ίση με $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ και με ΔT ίσο με 100°C , το μέγιστο δυναμικό είναι περίπου 15 mV . Από την άλλη, παίρνοντας μία πιο ρεαλιστική τιμή του $(C_1 - C_2)$ ίση με $0.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, το μέγιστο δυναμικό είναι περίπου 3 mV . Είναι φανερό ότι η πολικότητα της ανωμαλίας εξαρτάται από το πρόσημο του $(C_1 - C_2)$, γεγονός πολύ σημαντικό καθώς υποδεικνύει ότι οι θερμοηλεκτρικές ανωμαλίες μπορούν να είναι είτε θετικής είτε αρνητικής πολικότητας.

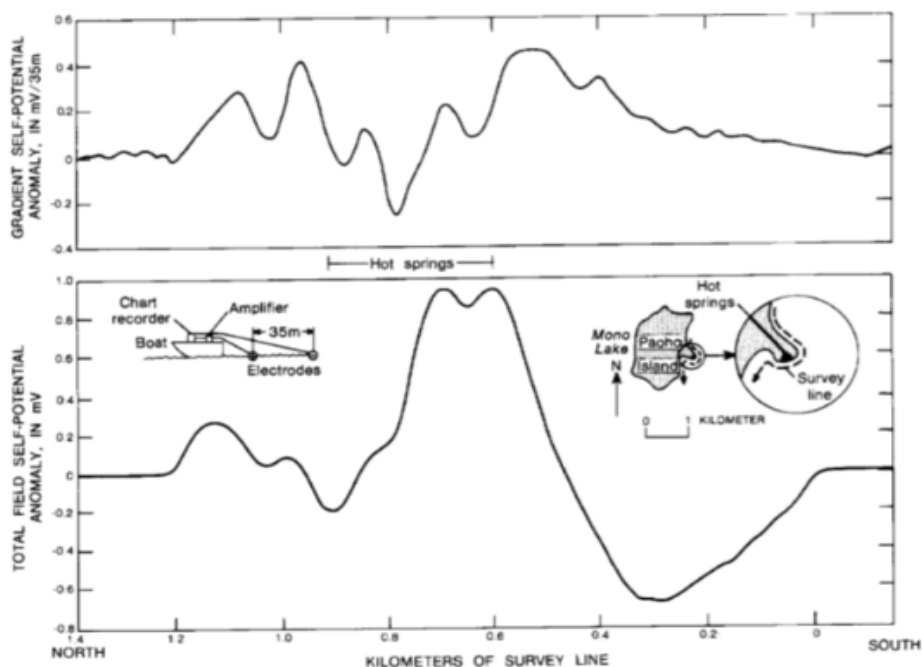


Σχήμα 5 Σφαιρικό μοντέλο για παραγωγή θερμοηλεκτρικού ή ηλεκτροκινητικού δυναμικού (κατά Nourbehecht, 1963). Το όριο σε βάθος d διαχωρίζει στρώματα διαφορετικής αντίστασης σ και συντελεστή ζεύξης C . Η σφαίρα βρίσκεται σε θερμοκρασία 100°C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_0 , και σε πίεση 5 atm πάνω από την πίεση περιβάλλοντος P_0 . Η πολικότητα της ανωμαλίας του φυσικού δυναμικού εξαρτάται από το πρόσημο της διαφοράς του συντελεστή ζεύξης $(C_1 - C_2)$.

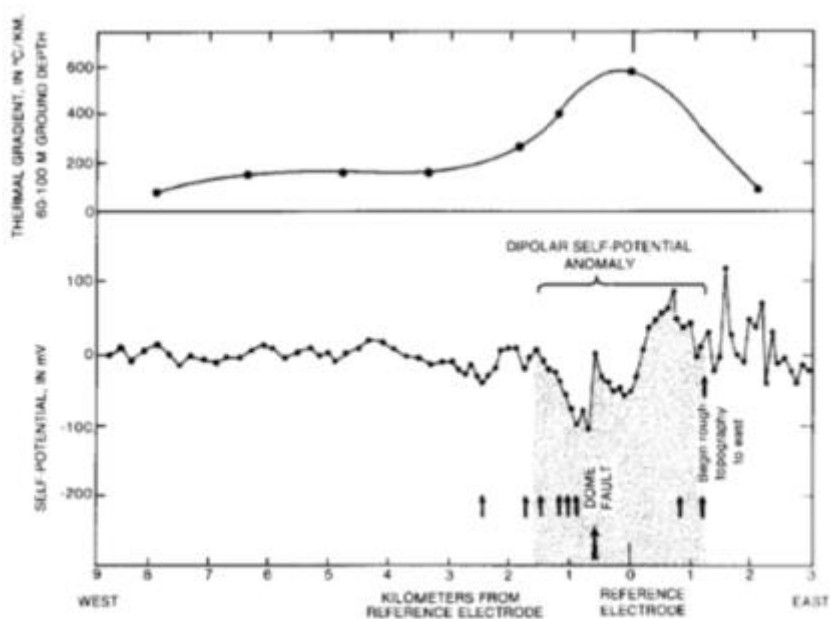
Οι ανωμαλίες που παράγονται από αυτό το μοντέλο είναι μικρότερου εύρους από το σύνηθες που εμφανίζεται στις γεωθερμικές περιοχές και είναι δύσκολο να ξεχωρίσουν από τον τυπικό θόρυβο υποβάθρου. Πιο συγκεντρωμένες περιοχές υψηλής θερμοκρασίας σε μικρό βάθος, όπως θερμικά ρευστά σε ζώνη ρήγματος, μπορούν να προκαλέσουν ανωμαλίες μικρότερου μήκους κύματος και μεγαλύτερου εύρους, που είναι πιο εύκολα εντοπίσιμες. Αν εντοπισθούν σε γεωθερμικές περιοχές λόγω θερμοηλεκτρικής ζεύξης, σχετικά μεγάλου μήκους κύματος (μερικά Km) και μεγάλου εύρους (50 mV και περισσότερο) ανωμαλίες, τότε είτε οι in-situ συντελεστές θερμοηλεκτρικής ζεύξης είναι μεγαλύτεροι από τους μετρούμενους στο εργαστήριο, είτε οι πηγές είναι διαφορετικής γεωμετρίας από το σφαιρικό μοντέλο που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό που αναμένεται από ποσοτικές αντιλήψεις πιθανών θερμοηλεκτρικών αποτελεσμάτων είναι οι μετρήσεις των in-situ συντελεστών θερμοηλεκτρικής ζεύξης στις γεωθερμικές περιοχές και η ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων για τον υπολογισμό του φυσικού δυναμικού στην επιφάνεια για περισσότερα ρεαλιστικά γεωθερμικά μοντέλα.

Συμπερασματικά, για την παραγωγή φυσικού δυναμικού λόγω υψηλής υπόγειας θερμοκρασίας υπάρχουν αρκετά παραδείγματα υπαίθρου. Έχουν γίνει

μετρήσεις σε θερμές πηγές (Leach hot springs/Nevada , Mono Lake , Roosevelt hot springs) που δείχνουν ότι τα όρια του φυσικού δυναμικού σχετίζονται με τα όρια των περιοχών με γνωστή ανωμαλία υψηλής θερμικής ροής (σχήματα 6 και 7). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τουλάχιστον ένα μέρος της ανωμαλίας αυτής παράγεται από θερμοηλεκτρική ζεύξη.



Σχήμα 6 Διαβάθμιση ανωμαλίας φυσικού δυναμικού στη λίμνη Mono, California, κοντά σε περιοχή θερμής πηγής στο νησί Paoha. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν κατά μήκος της επιφάνειας του νερού και το βάθος νερού ήταν περίπου 15 m.



Σχήμα 7 Θερμική διαβάθμιση και προφίλ φυσικού δυναμικού κατά μήκος του ρήγματος Dome, θερμές πηγές Roosevelt. Τα δεδομένα της θερμικής διαβάθμισης είναι από τους Sill και Bodel (1977). Τα βέλη υποδεικνύουν σημεία ρηγμάτων που χαρτογράφησαν οι Ward και Sill (1976) κατά μήκος της γραμμής του φυσικού δυναμικού.

Ηλεκτροκινητική ζεύξη. Η κίνηση του ρευστού μέσα σ'ένα πορώδες μέσο είναι γνωστό ότι παράγει μία διαβάθμιση ηλεκτρικού δυναμικού (γνωστή ως δυναμικό ροής που προαναφέρθηκε παραπάνω). Το δυναμικό αυτό παράγεται κατά μήκος της ροής λόγω της αντίδρασης της κίνησης του ρευστού στον πόρο με το ηλεκτρικό διπλό στρώμα στην επιφάνεια του πόρου. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως ηλεκτροκινητική ζεύξη (MacInnes, 1961). Το ζεύγος όγκος ροής J_E και πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος I_E εξαιτίας της διαβάθμισης ηλεκτρικού δυναμικού ΔE και της διαβάθμισης πίεσης πόρου ΔP εκφράζονται από τους εξής τύπους :

$$J_E = -(\kappa\epsilon\zeta/\eta)\Delta E - (K/\eta)\Delta P$$

$$I_E = -\kappa\sigma\Delta E - (\kappa\epsilon\zeta/\eta)\Delta P$$

Όπου σ , ϵ και η είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η διηλεκτρική σταθερά και το ιξώδες του ρευστού στον πόρο αντίστοιχα. Το κ και K είναι το πορώδες και η διαπερατότητα του μέσου, ενώ το ζ είναι η τάση μέσω του διπλού στρώματος Helmholtz. Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος την πρώτη εξίσωση αντιπροσωπεύουν την ροή του ρευστού εξαιτίας του ηλεκτρο-ωσμωτικού φαινομένου και του νόμου του Darcy αντίστοιχα. Όσον αφορά την δεύτερη εξίσωση, ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος εξαιτίας του νόμου του Ohm, ενώ ο δεύτερος όρος το ηλεκτροκινητικό δυναμικό. Οι συντελεστές του ηλεκτρο-ωσμωτικού και του ηλεκτροκινητικού φαινομένου είναι ίσοι, σύμφωνα με τις αμοιβαίες σχέσεις Onsager (de Groot and Mazur, 1962) .

Σε κατάσταση ισορροπίας ($I_E=0$), η εξίσωση παίρνει την απλή μορφή :

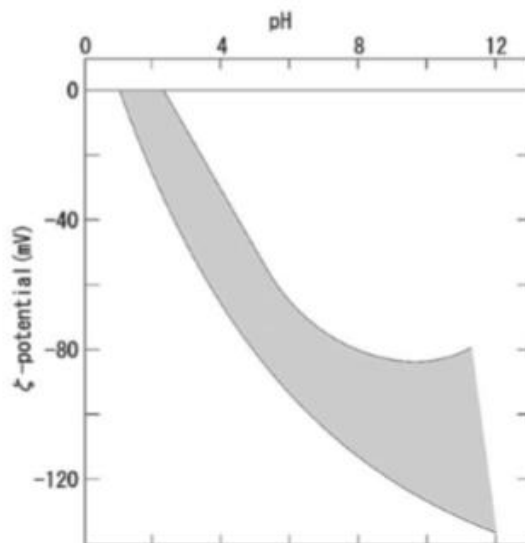
$$\Delta E/\Delta P = -\epsilon\zeta/\sigma\eta$$

Ο όρος $\Delta E/\Delta P$ ονομάζεται συντελεστής ηλεκτροκινητικής ζεύξης. Το δυναμικό ζ είναι σημαντική παράμετρος της ηλεκτροκινητικής ζεύξης. Καθώς το ζ μπορεί να πάρει θετική ή αρνητική τιμή, έτσι και το ΔE είτε αυξάνεται είτε μειώνεται κατά μήκος της ροής. Πολλές πειραματικές έρευνες έδειξαν ότι το δυναμικό ζ είναι συνήθως αρνητικό σε νερά με pH μεγαλύτερο του 2 και αυξάνεται αρνητικά όταν αυξάνεται το pH (Ishido and Mizutani, 1981) (σχήμα 8). Επιπρόσθετα, τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η απόλυτη τιμή του δυναμικού ζ αυξάνεται αρνητικά όταν η συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη μειώνεται και η θερμοκρασία αυξάνεται.

Σε γενικότερα πλαίσια, οι in-situ τιμές του δυναμικού ζ είναι δύσκολα υπολογίσιμες. Οι Jacques Zlotnicki και Yasunori Nishida (2003) παραθέτουν μερικές προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν τόσο στην ύπαιθρο αλλά και στο εργαστήριο για τον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου σε γεωθερμικές και ηφαιστειακές περιοχές. Έτσι, το ζ δυναμικό στην γεωθερμική περιοχή Takinoue (Iwate, Japan) , υπολογίστηκε μεταξύ -50 έως -100 mV από τις μετρήσεις των χρονικά μεταβαλλόμενων πεδίων φυσικού δυναμικού, που δημιουργήθηκαν από την ροή υπόγειου νερού κατά την διαδικασία άντλησης νερού. (Ishido et al., 1983; Oyamada et al., 1996; Jouniaux et al., 2000). Είναι αξιοσημείωτο, ότι στο υδρογραφικό δίκτυο της

συγκεκριμένης περιοχής, και μάλιστα στον υδροφόρο ορίζοντα με $\text{pH} \approx 8$ στους 200°C , οι πειραματικές τιμές του δυναμικού ζ ήταν περίπου -100mV . (Ishido and Mizutani, 1981).

Από την άλλη, οι Oyamada et al. (1996), υπολόγισαν το ζ δυναμικό, θεωρώντας σταθερή ροή υπόγειου θερμού νερού στην πηγή Kawayu (Hokkaido, Japan), συνδιάζοντας τις παρατηρούμενες ανωμαλίες φυσικού δυναμικού με τις in-situ υδροθερμικές παραμέτρους. Το εύρος των τιμών για το δυναμικό είναι -5 μέχρι -46mV . Οι τιμές αυτές είναι σαφώς μικρότερες από αυτές στο Takinoue, πράγμα αναμενόμενο και λογικό αν σκεφτεί κανείς την οξύτητα του υπόγειου νερού στην θερμή πηγή Kawayu με $\text{pH} \approx 2$.



Σχήμα 8 Η εξάρτηση του ζ δυναμικού με το pH για διάφορα πετρώματα και ορυκτά σε υδαρή κατάσταση. Τα δεδομένα βρίσκονται στο σκιαγραφούμενο μέρος. (Τροποποιημένο από τους Ishido and Mizutani, 1981)

Όπως με τον υπολογισμό του πεδίου φυσικού δυναμικού λόγω θερμοηλεκτρικής ζεύξης, έτσι και για αυτόν τον υπολογισμό λόγω ηλεκτροκινητικής ζεύξης, ο Nourbehecht (1963), παραθέτει μία τεχνική. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί την έννοια της μη αντιστρέψιμης θερμοδυναμικής για την περιγραφή του ζεύγους της διαβάθμισης πίεσης και δυναμικού. Επίσης, απαιτεί την διαβάθμιση της πίεσης να είναι παράλληλη στο όριο που διαχωρίζει περιοχές με διαφορετικό συντελεστή ηλεκτροκινητικής ζεύξης, έτσι ώστε το πεδίο του φυσικού δυναμικού στην επιφάνεια να αναπτύσσεται από την υπόγεια ροή των ρευστών (Corwin and Hoover, 1979).

Το μόνο ηλεκτροκινητικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά από τον Nourbehecht είναι μία θαμμένη σφαιρική πηγή πίεσης στρωμένη σε οριζόντιο μέσο. Αν και η σφαιρική πηγή δεν είναι αντιπροσωπευτική της οδηγούμενης δύναμης για τη ροή των ρευστών σε ένα γεωθερμικό σύστημα, έχει κατασκευαστεί για την σύγκριση πεδίων δυναμικού στην επιφάνεια που παράγονται από αυτό το μοντέλο με αυτών από το θερμοηλεκτρικό μοντέλο που προαναφέρθηκε. (σχήμα 5). Έτσι, για την ίδια κατανομή αντίστασης και γεωμετρίας με την θερμοηλεκτρική περίπτωση, το μέγιστο

δυναμικό στην επιφάνεια πάνω από το κέντρο της σφαίρα είναι περίπου $0.6[(C'_1 - C'_2) \Delta P] \text{ mV}$, όπου C'_1 και C'_2 είναι οι συντελεστές ηλεκτροκινητικής ζεύξης σε mV/atm του ανώτερου και του κατώτερου στρώματος αντίστοιχα, και ΔP είναι η διαφορά πίεσης κατά μήκος του ορίου της σφαίρας μετρημένο σε ατμόσφαιρες.

Για μία λογική τιμή του $(C_1 - C_2) = 10 \text{ mV/atm}$ και διαφορά πίεσης περίπου 5 atm , το μέγιστο δυναμικό πάνω από το κέντρο της σφαίρα είναι περίπου 30 mV , ή μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό στην θερμοηλεκτρική περίπτωση. Η πολικότητα της ανωμαλίας εξαρτάται από το πρόσημο του $(C_1 - C_2)$ και την κατεύθυνση της διαβάθμισης της πίεσης, οπότε και οι ανωμαλίες μπορεί να έχουν θετική ή αρνητική πολικότητα. Τέλος, για παρόμοια γεωμετρία, οι ανωμαλίες φυσικού δυναμικού που παράγονται από ηλεκτροκινητική ζεύξη αναμένονται να είναι μεγαλύτερες σε εύρος από αυτές που παράγονται από θερμοηλεκτρική ζεύξη.

1.2.2 Συμπεράσματα και αναμενόμενες τιμές φυσικού δυναμικού λόγω ροής θερμού νερού

Οι μηχανισμοί θερμοηλεκτρικής και ηλεκτροκινητικής ζεύξης παράγουν ανωμαλίες φυσικού δυναμικού συγκρίσιμες με αυτές που παρατηρούνται στις γεωθερμικές περιοχές. Ένα θέμα άξιο αναφοράς είναι ότι το μέγεθος και η πολικότητα των ανωμαλιών του φυσικού δυναμικού που παράγονται από θερμοηλεκτρική και ηλεκτροκινητική ζεύξη, δεν εξαρτώνται μόνο από τις παραμέτρους της πηγής (θερμοκρασία, πίεση, γεωμετρία), αλλά από το μέγεθος και τις διαφορές των συντελεστών ζεύξης. Συνεπώς, ακόμα και αν υπάρχουν σημαντικές υπόγειες διαβαθμίσεις θερμοκρασίας και πίεσης σε μια περιοχή, δεν θα παραχθεί μετρήσιμη ανωμαλία φυσικού δυναμικού εκτός κι αν οι συντελεστές ζεύξης και οι διαφορές τους κατά μήκος των ορίων είναι επαρκώς μεγάλες. Επιπλέον, ακόμη κι αν είναι παρούσες οι οδηγούμενες δυνάμεις (θερμοκρασία και πίεση), η συμβολή της καθεμίας στην ανωμαλία είναι αυτή που θα καθορίσει το σχετικό μέγεθος των συντελεστών ζεύξης και της διαφοράς τους. Αυτά τα μεγέθη, μπορεί να διαφέρουν όχι μόνο από την μια γεωθερμική περιοχή στην άλλη, αλλά και από σημείο σε σημείο στην ίδια περιοχή. Επομένως, είναι απαραίτητη η γνώση των in-situ συντελεστών ζεύξης πριν από την σύγκριση μεταξύ της θερμοηλεκτρικής ή ηλεκτροκινητικής συμβολής στην ανωμαλία φυσικού δυναμικού. (Corwin and Hoover, 1979)

Σε όλο τον κόσμο έχουν γίνει πολλές μετρήσεις ανωμαλιών φυσικού δυναμικού σε διάφορες γεωθερμικές περιοχές και οι Corwin και Hoover (1979) παραθέτουν το εύρος που κυμαίνεται από 50 mV ως 2 V , από τουλάχιστον 13 διαφορετικές περιοχές. Στις μετρήσεις αυτές δεν παρατηρήθηκε κάποιο σταθερό μοτίβο στις ανωμαλίες, αλλά οι πιο απότομες τιμές, συχνά σχετίζονται με ρήγματα που παίζουν τον ρόλο αγωγών για τα θερμά νερά και των ευρείας κλίμακας ανωμαλιών που συμπίπτουν με τις περιοχές αυξημένης θερμής ροής. Οι ανωμαλίες μικρού μήκους κύματος και μεγάλου εύρους που σχετίζονται με ρήγματα σε γεωθερμικές περιοχές, παράγονται από τα αβαθή, υψηλής θερμοκρασίας ρευστά σε

ζώνες ρήγματος, ενεργώντας μέσω ενός απο τους μηχανισμούς θερμοηλεκτρικής ή ηλεκτροκινητικής ζεύξης. Από την άλλη, τα πεδία μεγάλου μήκους κύματος που παράγονται από βαθύτερες πηγές μπορούν να παρουσιάσουν τοπικά απότομες διαβαθμίσεις πάνω από πλευρικά αντιστατικά όρια κοντά στην επιφάνεια όπως ρήγματα ή επαφές.

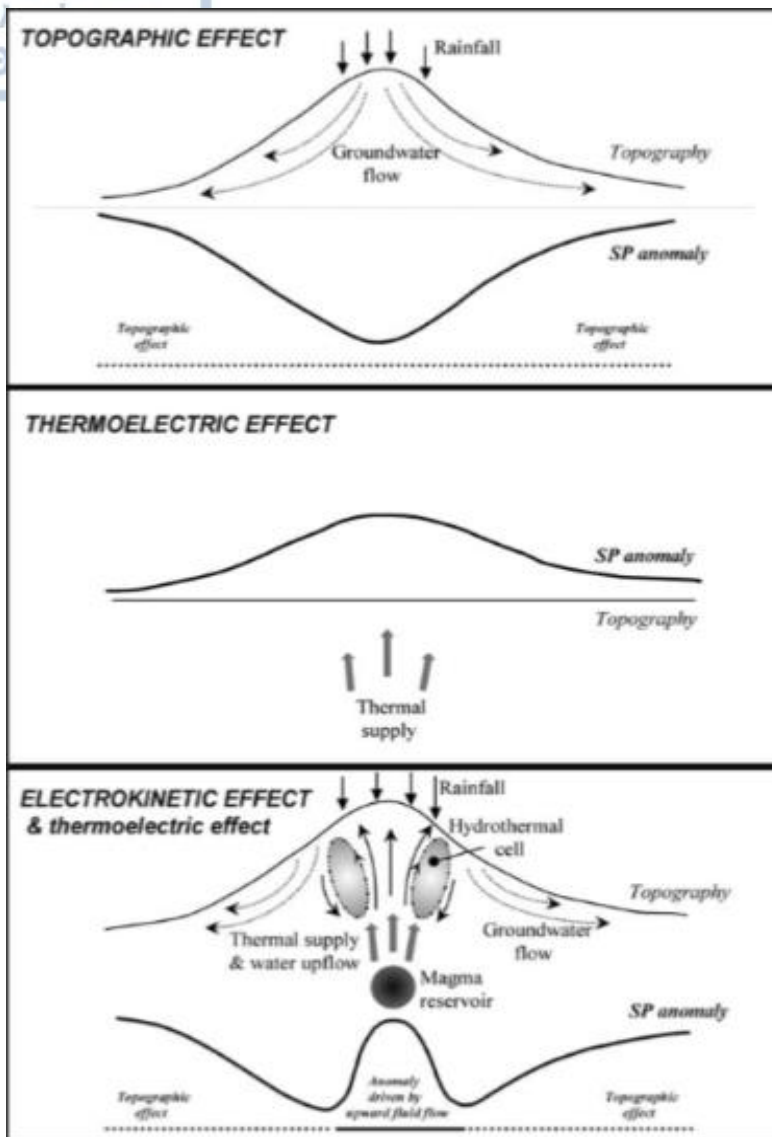
Από όλα τα προαναφερθέντα, είναι προφανές ότι μία χρήση της μεθόδου του φυσικού δυναμικού στην γεωθερμική έρευνα είναι να εντοπίζει ρήγματα που ελέγχουν την ροή και τα θερμά ρευστά (διπολική ανωμαλία). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναγνωριστική τεχνική στην εύρεση περιοχών με υψηλή θερμική ροή, όπου οι περίπου ίδιες τιμές ανωμαλιών φυσικού δυναμικού διακόπτονται από απότομες διαβαθμίσεις, χαρακτηριστικά των ζωνών ρηγμάτων ή επαφών.(Corwin and Hoover,1979).

Άλλη μία εφαρμογή της μεθόδου του φυσικού δυναμικού σε συνδυασμό με την ροή του υπόγειου νερού, είναι η χρήση της για την εκτίμηση του ηφαιστειο-υδρολογικού περιβάλλοντος στα ηφαίστεια (Zlotnicki and Nishida, 2003).

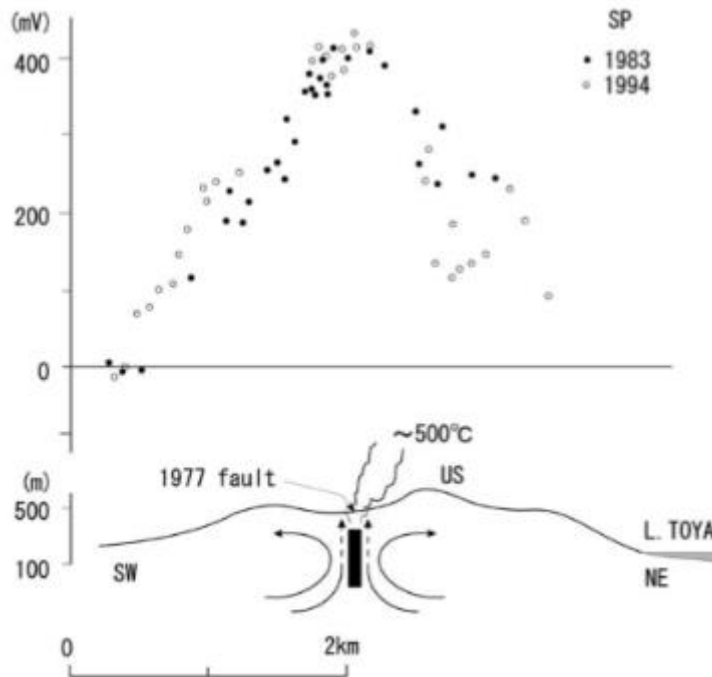
Πρόσφατες πειραματικές και θεωρητικές έρευνες έδειξαν ότι μικρές ανωμαλίες παράγονται από την χημική διάχυση ή το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, ενώ μεγαλύτερες ανωμαλίες μπορεί να σχετίζονται με το ηλεκτροκινητικό φαινόμενο λόγω υδροθερμικής κυκλοφορίας σε ένα πορώδες μέσο. Η παρακολούθηση των ανωμαλιών φυσικού δυναμικού, μπορεί να περιγράψει αλλαγές στην θερμική κατάσταση και να δώσει πληροφορίες για την εξέλιξη της υδροθερμικής δραστηριότητας.

Οι ανωμαλίες φυσικού δυναμικού μπορούν να πάρουν θετικές ή αρνητικές τιμές. Ποιές είναι, όμως, οι αναμενόμενες τιμές στις γεωθερμικές πηγές όπου υπάρχει ανωδική ροή του νερού ; (όπως στην περιοχή μελέτης που θα αναφερθεί παρακάτω). Λαμβάνοντας υπόψη, έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε πολλά ηφαίστεια με ανάλογη συμπεριφορά θερμών υπόγειων πηγών, διεξάχθηκε το εξής συμπέρασμα: αναμένονται θετικές ανωμαλίες λόγω ύπαρξης έντονης ανωδικής ροής θερμού υπόγειου νερού.(ηφαίστεια Piton de la Fournaise, Etna, Kilauea, Soufriere and Usu) (σχήμα 9, σχήμα 10) (Zlotnicki and Nishida, 2003).

Παρ'όλα αυτά, έχουν παρατηρηθεί και κάποιες αρνητικές ανωμαλίες, που συμπαιρένεται ότι οφείλονται στο νερό βροχής που κατεισδύει από τις περατές και θραυστιγενείς επιφάνειες του πετρώματος. Συνυπάρχοντες αρνητικές και θετικές ανωμαλίες έχουν βρεθεί επίσης σε μερικά ηφαίστεια. Αυτές οι ανωμαλίες οφείλονται στον συνδυασμό των νερών που κατεισδύουν με την υδροθερμική κυκλοφορία και την ανωδική ροή υπόγειου θερμού νερού.



Σχήμα 9 Κύριες ανωμαλίες φυσικού δυναμικού σε ηφαίστεια. Πάνω: τοπογραφικό φαινόμενο, Μέση: Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, Κάτω: ηλεκτροκινητικό μαζί με τοπογραφικό φαινόμενο. (Zlotnicki et al., 1998).



Σχήμα 10 Αποτελέσματα από επανελλημένες μετρήσεις φυσικού δυναμικού τις χρονιές 1983 και 1996 στο ηφαίστειο Usu, Hokkaido, Japan. (τροποποιημένες από τον Nishida et al. 1996). Η σταθερή μπάρα αντιπροσωπεύει το εισχωρούμενο μάγμα από τη έκρηξη του ηφαιστείου το 1977. Οι ροές των ρευστών και των ατμών αντιπροσωπεύονται σχηματικά από σταθερές και διακεκομμένες καμπύλες με βελόκια,αντιστοίχως.

1.3 Πηγές θορύβων και ποιότητα δεδομένων στην γεωθερμική έρευνα

Έρευνες φυσικού δυναμικού που πραγματοποιούνται για την αναζήτηση αγωγίων μεταλλευμάτων συχνά δυσκολεύονται από τα επίπεδα υψηλού θορύβου και την αναπαραγωγιμότητα των φτωχών δεδομένων. Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν την μέθοδο αυτή στην απόκτηση κακής φήμης. Επιπλέον, συνδυάζονται τα προβλήματα και στις γεωθερμικές έρευνες, όπου το χωρικό μήκος κύματος της ανωμαλίας τείνει να είναι πολύ μεγαλύτερο και το εύρος της μικρότερο από ότι στα τυπικά αβαθή αγωγή μεταλλευτικά κοιτάσματα. Οι μεγάλες έρευνες που απαιτούνται για την σκιαγράφηση των γεωθερμικών περιοχών δημιουργούν λάθη λόγω της απόκλιση των τελλουρικών ρευμάτων, τον ερπυσμό και τον τυπικό γεωλογικό θόρυβο μεγέθους ± 5 ως $\pm 10 \text{ mV}$, που παρεμβαίνει στον εντοπισμό ανωμαλιών ίσου μεγέθους. Οι διαδικασίες έρευνας, όπως η σταδιακή εξέλιξη των μικρών διπολικών μετρήσεων (τεχνική 'leapfrog') ή η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο νερό για την βελτίωση της επαφής εδάφους, είναι επαρκείς για την ανίχνευση των μικρών μήκους κύματος και μεγάλου εύρους ανωμαλιών, όπως αυτές των τυπικών μεταλλευτικών κοιτασμάτων. Εντούτοις, οι διαδικασίες αυτές οδηγούν σε αθροιστικά

λάθη όταν χρησιμοποιούνται σε μεγάλες εκτενείς έρευνες. Για την απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων σε μεγάλης κλίμακας έρευνες φυσικού δυναμικού χρειάζονται κάποιες προφυλάξεις. Οι πηγές θορύβων και τα λάθη που δημιουργούνται σε τέτοιου είδους έρευνες αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω. (Corwin και Hoover, 1979).

Τελλουρικά ρεύματα. Τελλουρικά ρεύματα μεγάλης περιόδου παράγονται από παροδικές διακυμάνσεις γήινου μαγνητικού πεδίου τάξεως μεγέθους ίσο με μερικά εκατοντάδες mV/km πάνω από αντιστατικά εδάφη (Keller and Frischknecht, 1966). Η τελλουρική αυτή δραστηριότητα είναι μεταξύ περιόδου 10 και 40 sec , αν και υπάρχει σημαντική ενέργεια μεγαλύτερης περιόδου. Καθώς, πραγματοποιούνται μετρήσεις φυσικού δυναμικού, είναι δυνατόν να συμβούν σημαντικές διακυμάνσεις περιόδου 10 έως 40 sec που θα δημιουργήσουν διαδοχικές κορυφές και κοιλάδες, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν κατά μέσο όρο ώστε να δώσουν την λογική προσέγγιση της πραγματικής τιμής. Διακυμάνσεις με περίοδο μεγαλύτερη από ένα λεπτό είναι δυσκολότερο να αναγνωριστούν κατά τη διάρκεια των τυπικών μετρήσεων περιόδου μικρότερης από ένα λεπτό. Αυτό το γεγονός μπορεί λανθασμένα να θεωρηθεί χωρική διακύμανση. Μία εκτίμηση του επιπέδου της μεγάλης περιόδου τελλουρικής δραστηριότητας, μπορεί να δοθεί από την καταγραφή τελλουρικών διακυμάνσεων κατά μήκος ενός ακίνητου διπόλου σε περιοχή έρευνας. Βέβαια, να σημειωθεί ότι οι ποσοτικές διορθώσεις των δεδομένων μπορούν να γίνουν μόνο εαν η προφανής αντίσταση της γης κάτω και από το σταθερό δίπολο αλλά και από το σημείο έρευνας είναι γνωστά για περίοδο ίση με την καταγραφόμενη διακύμανση.

Οι τελλουρικές διακυμάνσεις γενικά δεν δημιουργούν σοβαρά προβλήματα σε σχετικά αγωγίμες κοιλάδες όσο σε ορεινές περιοχές, όπου οι αντιστάσεις συνήθως είναι υψηλές, οι έμμεσες διακυμάνσεις αντίστασης είναι περισσότερο επιφανείς και η διεύθυνση των ρευμάτων μπορεί να ποικίλει σημαντικά. Ακόμη και κάτω από ιδανικές γεωλογικές συνθήκες, οι μετρήσεις φυσικού δυναμικού που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια μαγνητικών καταγίδων μπορεί να αποφέρουν πολύ υψηλά επίπεδα θορύβου

Δυναμικά ροής. Όπως προαναφέρθηκε, η ηλεκτροκινητική ζεύξη είναι ένας από του μηχανισμούς που η γεωθερμική δραστηριότητα παράγει ανωμαλίες φυσικού δυναμικού. Τα δυναμικά που παράγονται από την ροή μη θερμικών υπόγειων νερών αποτελούν πηγή θορύβου στη γεωθερμική έρευνα και μπορεί να είναι η κύρια αιτία διακυμάνσεων σχετικών με τα τοπογραφικά φαινόμενα που παρατηρούνται πολλές φορές στα δεδομένα φυσικού δυναμικού. (Williams et al, 1976; Poldini, 1939).

Αγώγιμα μεταλλευτικά κοιτάσματα. Τα κοιτάσματα χαλκοπυρίτη, πυρίτη, χαλκοσίτη, μαγνητίτη κοβελίτη και γραφίτη είναι γνωστά για την παραγωγή ανωμαλιών φυσικού δυναμικού που έχουν σχεδόν πάντα αρνητική πολικότητα πάνω από την κορυφή του κοιτάσματος. Οι ανωμαλίες έχουν εύρος περίπου ίσο με 100 mV

και το πλάτος τους σπανίως ξεπερνά τα μερικά εκατοστά μέτρα.(Sato and Mooney, 1960). Οι Sato και Mooney, πρότειναν έναν μηχανισμό, που προαναφέρθηκε και στον οποίο το αγωγίμο μεταλλευτικό κοίτασμα χρησιμοποιείται ως 'μονοπάτι' για τα ηλεκτρόνια ώστε να περάσουν πάνω διαμέσου του κοιτάσματος. Συνεπώς, η μεταφορά των ηλεκτρονίων γίνεται από το αναγωγικό περιβάλλον στο βάθος προς το οξειδωτικό περιβάλλον πάνω από το κοίτασμα. Η σχετική ροή των ιόντων στο υπόγειο νερό μέσα στο γήινο περιβάλλον του κοιτάσματος, παράγει και την παρατηρούμενη ανωμαλία. Η περίπτωση αυτή των αγωγίμων μεταλλευμάτων παρατηρούνται συχνά και στις γεωθερμικές περιοχές και λειτουργούν ως πηγή θορύβου σε γεωθερμικές έρευνες, καθώς αποκλίνουν από τον στόχο και σκοπό της συγκεκριμένης έρευνας.

Πολιτιστική δραστηριότητα. Τα απομακρυσμένα ρεύματα που παράγονται από πολιτιστική δραστηριότητα είναι ένα σοβαρό πρόβλημα στις κατοικημένες περιοχές. Αυτά τα ρεύματα μπορεί να παράγονται από τα ηλεκτρικά καλώδια, την γείωση ρεύματος, την οξείδωση σωληνών ή θαμμένων μεταλλικών σκουπιδιών, την δράση συστημάτων προστασίας για την οξείδωση σωληνών και άλλες γεωφυσικές δραστηριότητες στην περιοχή μελέτης. Τα ρεύματα μπορεί να είναι σταθερά ή να παίρνουν μορφές ημιτονοειδών σειρών ή τετραγωνικών κυμάτων ή ανώμαλων διακυμάνσεων και μπορούν να φτάσουν σε εύρος δεκάδων ή εκατοντάδων mV/km σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 km από την πηγή.(Hoogervorst, 1975). Η χρήση της παρακολούθησης των τελλουρικών διπόλων καθώς και προσεκτικές παρατηρήσεις για πιθανές πηγές απομακρυσμένων ρευμάτων, είναι σημαντικές για την αποφυγή των λαμβανόμενων τάσεων που παράγονται από τέτοια ρεύματα όπως αυτά του φυσικού δυναμικού της φύσης.

Αντιστατικές διακυμάνσεις και ανομοιόμορφη τοπογραφία. Οι θερμοηλεκτρικές και ηλεκτροκινητικές διαδικασίες, που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δρουν ουσιαστικά ως υπόγειες πηγές ρευμάτων. Τα επιφανειακά δυναμικά πεδία που παράγονται από αυτές τις πηγές, επηρεάζονται από την υπόγεια κατανομή της αντίστασης. Έτσι, το πεδίο φυσικού δυναμικού που παράγεται από γεωθερμικές πηγές είναι πιθανόν να παραμορφωθεί από αντιστατικές αλλαγές κατά μήκος ρηγμάτων ή επαφών που δεν είναι θερμικώς ενεργές. Σε μερικές περιπτώσεις αυτές οι διακυμάνσεις φυσικού δυναμικού μπορεί να χρησιμεύσουν στην δομική χαρτογράφηση, αλλά πρέπει να ληφθούν με προσοχή και να μην μπερδεύονται με ανωμαλίες που παράγονται από πραγματική θερμική δραστηριότητα. Επιπροσθέτως, και τα ρεύματα που παράγονται από τελλουρική δραστηριότητα επηρεάζονται από την κατανομή της αντίστασης, δημιουργώντας διακυμάνσεις στο επιφανειακό δυναμικό πεδίο. Οι διακυμάνσεις της αντίστασης κοντά στην επιφάνεια μπορεί επίσης να ευθύνεται για κάποιον μεγάλο εύρους, μικρού μήκους κύματος θόρυβο που τοποθετείται πάνω από ανωμαλίες φυσικού δυναμικού μεγαλύτερου μήκους κύματος στην γύρω περιοχή των γεωθερμικών πηγών.

Κάτι που επηρεάζει εξίσου τα επιφανειακά δυναμικά πεδία με παραμόρφωση της ροής των ρευμάτων είναι η ανομοιόμορφη τοπογραφία.(Grant and West, 1965).

Αυτό συμβαίνει διότι η αντίσταση κοντά στην επιφάνεια μπορεί να αλλάζει σημαντικά από σημείο σε σημείο σε ανομοιόμορφη τοπογραφία και έτσι γίνεται δύσκολος ο διαχωρισμός των τοπογραφικών και των αντισταστικών φαινομένων.

Ηλεκτροχημικά φαινόμενα. Διακυμάνσεις στην χημεία εδάφους, στην θερμοκρασία ή στην περιεχόμενη υγρασία πιθανώς να λειτουργούν ως θόρυβοι υποβάθρου στα δεδομένα φυσικού δυναμικού. Τέτοιες περιβαλλοντικές διακυμάνσεις επηρεάζουν τα 'μη πολικά' ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις πεδίου και έχουν ως αποτέλεσμα μη αναπαραγωγική πώλωση και ερπυσμό. Εργαστηριακές έρευνες και δεδομένα πεδίου δείχνουν πως διαφορετικοί τύποι ηλεκτροδίων μπορεί να ανταποκρίνονται διαφορετικά στις χημικές αλλαγές του εδάφους και στην αλλαγή της περιεχόμενης υγρασίας και θερμοκρασίας. Συνεπώς, είναι επιθυμητό να αναφέρεται ο τύπος ηλεκτροδίου που χρησιμοποιείται για κάθε έρευνα μαζί με τα αποτελέσματα της έρευνας.

Ηλεκτροχημικοί πυρήνες συγκέντρωσης. Τα δυναμικά που παράγονται από χημικούς πυρήνες συγκέντρωσης μπορούν να φτάσουν τις τιμές μερικών εκατοντάδων mV (MacInnes, 1961). Παρ'όλα αυτά, οι τιμές αυτές εμφανίζονται μόνο με γυμνά μεταλλικά ηλεκτρόδια, καθώς οι υγρές επαφές των μη πολωμένων ηλεκτροδίων παράγουν ανάλογα δυναμικά και περιορίζουν το συνολικό δυναμικό του πυρήνα σε μερικές δεκάδες του mV. (Corwin, 1976a).

Μολονότι τα ηλεκτροχημικά δυναμικά περιορίζονται σε μερικές δεκάδες του mV, συνηθίζουν να κρύβουν μικρές, μεγάλου μήκους κύματος ανωμαλίες που μπορεί να είναι γεωθερμικού ενδιαφέροντος. Η επίδρασή τους μπορεί να μειωθεί από την προσεκτική επιλογή του χώρου των ηλεκτροδίων σε ομοιόμορφες συνθήκες εδάφους, φιλτράρωντας τα δεδομένα πεδίου για την μείωση των μικρού μήκους κύματος διακυμάνσεις ή και πιθανά από την μέτρηση των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους σε κάθε τοποθετημένο ηλεκτρόδιο για μελλοντική διόρθωση δεδομένων. Ο σχεδιασμός νέων βελτιωμένων ηλεκτροδίων, όπως η χρήση διπλού ηλεκτρολυτικού θαλάμου για μεγαλύτερη χημική απομόνωση του στοιχείου του ηλεκτροδίου από το έδαφος, μπορεί επίσης να βοηθήσει στην μείωση της ηλεκτροχημικής επίδρασης.

Υγρασία εδάφους και τοποθέτηση των ηλεκτροδίων σε νερό. Αλλαγές στο περιεχόμενο υγρασίας του εδάφους συχνά οδηγούν σε αλλαγές φυσικού δυναμικού με τα ηλεκτρόδια στο νερό του εδάφους να αντιδρούν περισσότερο θετικά. (Poldini, 1939). Παρόμοιες διακυμάνσεις δημιουργούνται από την συνηθισμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο νερό με σκοπό την βελτίωση ηλεκτρικής επαφής με το έδαφος. Οι αλλαγές του δυναμικού λόγω της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στο νερό γενικά δεν επηρεάζουν αρνητικά την μέτρηση της αντίστασης αλλά μπορεί να αλλοιώσουν σοβαρά τα δεδομένα φυσικού δυναμικού.

Κατά συνέπεια, η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στο νερό μπορεί να οδηγήσει στην συνεχή αλλαγή του δυναμικού των ηλεκτροδίων και η κατάργηση των αποτελεσμάτων της, οδηγεί στην βελτίωση της σταθερότητας και αναπαραγωγιμότητας στις μετρήσεις φυσικού δυναμικού. Αυτό πρακτικά συμβαίνει

στις έρευνες 'leapfrog', όπου εγκάρσια της διεύθυνσης συμβαίνουν θετικά αθροιστικά λάθη, εξαιτίας της πρόσφατης τοποθέτησης σε νερό του μπροστινού ηλεκτροδίου. Φυσικές αλλαγές στην υγρασία του εδάφους πρέπει να σημειώνονται προσεκτικά στο πεδίο με την συνειδητοποίηση ότι μπορεί να είναι η αιτία των αλλαγών φυσικού δυναμικού μεγέθους μερικών δεκάδων mV.

Πόλωση ηλεκτροδίων και ερπυσμός. Ένα ψευδές δυναμικό (πόλωση) θα μετρηθεί σε ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων εάν ο ηλεκτρολύτης ή μια πορώδη επαφή του μετρούμενου ηλεκτροδίου 'μολυνθεί' με χημικά είδη που δεν παρουσιάζονται υπό φυσιολογικές συνθήκες στον ηλεκτρολύτη ή εάν η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη ή το περιεχόμενο υγρασίας της πορώδους επαφής διαφέρει. Η πόλωση μπορεί να εμφανιστεί ξαφνικά, για παράδειγμα μετά από την επαφή του ηλεκτροδίου που κάνει τις μετρήσεις με ένα διάλυμα υπόγειου νερού υψηλής συγκέντρωσης ή μπορεί να εκφραστεί σαν ερπυσμός, όταν η πορώδη επαφή ενός ηλεκτροδίου σταθερής βάσης αποξηραθεί ή απορροφήσει ιόντα υπόγειου νερού για περισσότερο χρόνο μιας περιόδου. Ο ερπυσμός, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί, κατά τη διάρκεια μιας και μόνο μέτρησης καθώς η θερμοκρασία, η υγρασία και οι χημικές ουσίες του ηλεκτροδίου προσαρμόζονται στις τιμές του εδάφους. Ελαττώνοντας τον χρόνο παραμονής ενός ηλεκτροδίου στο έδαφος, μειώνεται και η 'μόλυνση' του. Συνεπώς, οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιούνται όσο τον δυνατόν γρηγορότερα, με την ελάχιστη τιμή μέτρησης να ελέγχεται από το επίπεδο της τελλουρικής δραστηριότητας. Συνήθως χρειάζονται μόλις μερικά δευτερόλεπτα ώστε ένα ηλεκτρόδιο να 'βολευτεί', με οποιοδήποτε ερπυσμό μετά από αυτό το χρονικό διάστημα να πραγματοποιείται στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά μήκος των διακυμάνσεων των τελλουρικών ρευμάτων και των χρονικών διακυμάνσεων των απομακρυσμένων ρευμάτων, η πόλωση και ο ερπυσμός αποτελούν την μεγαλύτερη πηγή μη αναπαραγωγιμότητας στις περισσότερες μετρήσεις φυσικού δυναμικού.

Αν η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη στο μετρούμενο ηλεκτρόδιο διαφέρει από αυτήν της πηγής, δημιουργείται ένα δυναμικό στο ζεύγος αυτών των ηλεκτροδίων. Ο συντελεστής θερμοκρασίας για κορεσμένα ηλεκτρόδια χαλκού-θεικού χαλκού είναι περίπου 0.5 mV/°C. (Ewing, 1939 ; Poldini, 1939). Αντίστοιχα, για ηλεκτρόδια αργύρου-θεικού αργύρου είναι λιγότερο του μισού της τιμής αυτής. (Corwin and Conti, 1973). Η συνδυασμένη πόλωση και ο ερπυσμός που δημιουργείται από τέτοιες διαφορές θερμοκρασίας, από 'μόλυνση' ηλεκτρολύτη ή πορώδους επαφής και από αποξήρανση πορώδους επαφής, μπορεί να καθορίζονται κατά την διάρκεια μιας έρευνας, από περιοδικές μετρήσεις τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου της πηγής, που διατηρείται σε μία λεκάνη διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Έτσι, το ηλεκτρόδιο της πηγής διατηρεί ένα σχετικά σταθερό δυναμικό εφόσον η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή. Η διαδικασία αυτή, επιτρέπει την πραγματοποίηση διορθώσεων πόλωσης και ερπυσμού στα δεδομένα. Καθώς αυτές οι διορθώσεις μπορεί να φτάσουν και την τιμή των 20 mV, η παραμέλησή τους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά λάθη.

Διαδικασία μέτρησης. Είναι προφανές ότι πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή η απόκτηση αναπαραγωγικών και με σημασία δεδομένων του φυσικού δυναμικού. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μετρήσεις δυναμικού επηρεάζονται από την ποιότητα του ηλεκτροδίου που έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Αυτή η επίδραση είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη απλή αλλαγή στην κυκλοφορία της αντίστασης που σχετίζεται με την σύνθετη αντίσταση του μετρούμενου οργάνου. Έτσι, πρέπει η αντίσταση του ηλεκτροδίου επαφής να ελέγχεται σε κάθε σταθμό και να γίνεται προσπάθεια για να εξακριβωθεί η καλή επαφή εδάφους για να παραμείνει η κυκλοφορία της αντίστασης όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη από σταθμό σε σταθμό. Εφόσον η μέτρηση της αντίστασης πολώνει τα ηλεκτρόδια από το οδηγούμενο ρεύμα που περνάει μέσα από αυτά, θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων του φυσικού δυναμικού και σε όσο το δυνατόν συντομότερο χρόνο.

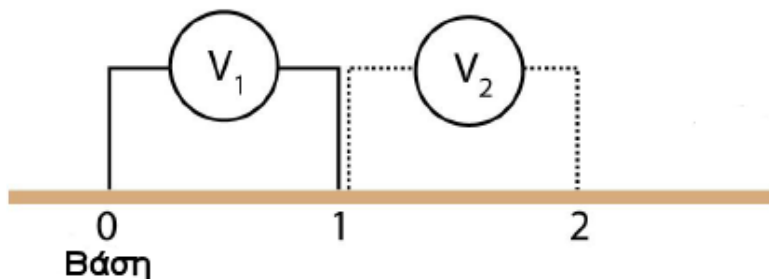
Δυναμικά που παράγονται από τελλουρικά ρεύματα πρέπει να παρακολουθούνται ώστε να εξασφαλισθεί ότι δεν παρερμηνεύονται ως χωρικές ανωμαλίες. Συχνοί έλεγχοι πολωμένων ηλεκτροδίων και ερπυσμού είναι σημαντικοί, ειδικά όταν χρησιμοποιείται η διάταξη βαθμίδας (η οποία θα αναφερθεί παρακάτω). Όταν παρουσιάζονται τόσες πολλές προσθήκες, μικρά λάθη μπορεί να συγκεντρώσουν μεγάλες τιμές. Η πραγματοποίηση τέτοιων ερευνών σε κλειστό κύκλο δεν παρέχει τον απόλυτο έλεγχο σε πιθανά αθροιστικά λάθη, καθώς η πόλωση ενός ζεύγους ηλεκτροδίων μπορεί να αλλάξει το μέγεθος και την πολικότητα από μέτρηση σε μέτρηση. Σε αυτού του είδους τις έρευνες, η εναλλαγή του πρώτου με του επόμενου ηλεκτροδίου βοηθάει στην μείωση των αθροιστικών λαθών εξαιτίας της πόλωσης του ηλεκτροδίου. Τα λάθη πόλωσης επηρεάζουν επίσης τα δεδομένα έρευνας 'ολικού πεδίου'. Αλλά καθώς οι πετυχημένες μετρήσεις δεν προστίθενται όπως στη διάταξη βαθμίδας, το λάθος κάθε μέτρησης περιορίζεται στην μέγιστη τιμή της πόλωσης. Αν οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιούνται με προσοχή και η επίδραση της πόλωσης, του ερπυσμού, των τελλουρικών και απομακρυσμένων ρευμάτων δικαιολογούνται, τότε οι περισσότερες μετρήσεις φυσικού δυναμικού είναι αναπαραγωγικές με περίπου $\pm 5 mV$, ακόμα κι αν πραγματοποιήθηκαν ανά τα χρόνια.(Parasnis,1970).

Φυσικά, τα αναπαραγωγικά δεδομένα δεν είναι απαραίτητα σημαντικά όσον αφορά μόνο την γεωθερμική δραστηριότητα. Η πιθανότητα ότι οι μετρήσεις έχουν επηρεαστεί από μη θερμική υπόγεια ροή, αγωγή μεταλλευτικά κοιτάσματα, απομακρυσμένα ρεύματα(και άλλα πολιτιστικά φαινόμενα) ή υγρασία εδάφους και χημικές αλλαγές πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Αυτές οι επιδράσεις μπορούν να ελαττωθούν με την λογική επιλογή των διαδρομών της έρευνας, την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, την προσεκτική παρακολούθηση και καταγραφή του τύπου και της κατάστασης του εδάφους και τις συνθήκες τοπικής γεωλογίας, βλάστησης και τοπογραφίας.

1.4 Διατάξεις έρευνας

Οι διατάξεις έρευνας που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση δεδομένων πεδίου φυσικού δυναμικού ποικίλουν. Παρ'ότι όλες οι διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία, η ευπάθειά τους σε τυχαία και συστηματικά λάθη διαφέρει. Ακολουθεί η περιγραφή των πιο κοινών διατάξεων έρευνας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Για όλες τις διατάξεις έρευνας ο κανόνας πολικότητας φυσικού δυναμικού απαιτεί τον αρνητικό σταθμό του βολτόμετρου να είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο βάσης του σταθμού και τον θετικό σταθμό με το ηλεκτρόδιο μέτρησης. (Corwin, 1990)

Διάταξη βαθμίδας. Ονομάζεται επίσης και διάταξη διπόλου, leapfrog (Parasnis, 1966; Telford et al, 1976). Χρησιμοποιεί δύο ηλεκτρόδια και ένα συνδετικό καλώδιο σταθερού μήκους ίσο με την απόσταση των δύο σταθμών μέτρησης. Το βολτόμετρο συνδέεται μεταξύ του ενός ηλεκτροδίου και του τέλους από το συνδεδεμένο καλώδιο. Μετά την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, η διάταξη μετακινείται μπροστά κατά μήκος της έρευνας, με το τελευταίο ηλεκτρόδιο να καταλαμβάνει την θέση του προηγούμενου προπορευόμενου ηλεκτροδίου. Η αναστροφή του τελευταίου με το πρώτο ηλεκτρόδιο μεταξύ των μετρήσεων (τεχνική leapfrog), βοηθάει στην μείωση αθροιστικού λάθους εξαιτίας της πόλωσης ηλεκτροδίου. Η διάταξη βάσης παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 11.



Σχήμα 11 Διάταξη βαθμίδας (L.Marescot)

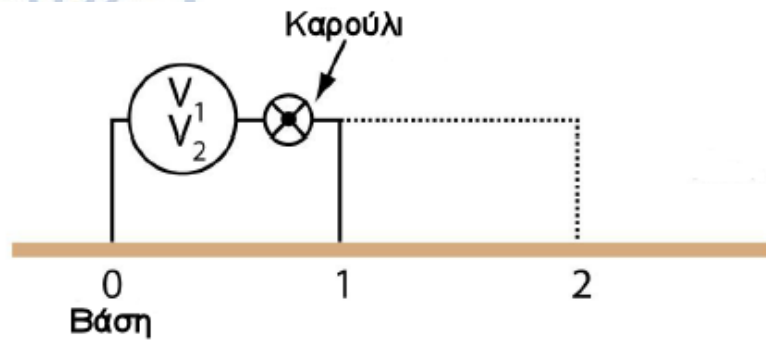
Η απόκτηση της τιμής φυσικού δυναμικού γίνεται από την διαδοχική προσθήκη ξεχωριστών διπολικών μετρήσεων. Η πολικότητα πρέπει να παρατηρείται προσεκτικά ώστε να υπολογίζεται σωστά το ολικό πεδίο φυσικού δυναμικού. Για την διατήρηση της κατάλληλης πολικότητας, ο αρνητικός πόλος πρέπει πάντα να είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο που ακολουθεί και ο θετικός στο προπορευόμενο. Κάποιες φορές, οι ενδείξεις πρέπει να αντιπροσωπεύουν την συνιστώσα της βαθμίδας του ολικού πεδίου φυσικού δυναμικού, στην διεύθυνση της τομής έρευνας και αυτό συμβαίνει όταν το μήκος του διπόλου είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος της ανωμαλίας. (Parasnis, 1966).

Η διάταξη βαθμίδας προσφέρει πολλά λειτουργικά πλεονεκτήματα. Το σχετικά μικρού μήκους καλώδιο μειώνει την έκθεση σε δαγκωματιές ζώων ή βανδαλισμούς και μπορεί να μετακινηθεί γρήγορα για την αποφυγή καταστροφών λόγω οχημάτων. Το μικρό καλώδιο, που δεν χρειάζεται να μαζευτεί ακολουθώντας τις διαδρομές της έρευνας ξανά, γλιτώνει πολύ χρόνο. Τέλος, είναι πολύ εύκολο και γρήγορο να εξεταστεί λεπτομερώς την μόνωση του καλωδίου για οποιαδήποτε βλάβη και αν χρειάζεται να γίνει επιδιόρθωση ή αντικατάστασή του.

Αυτή η διάταξη έχει επίσης μερικά λειτουργικά και αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα ποιότητας δεδομένων. Η αποτελεσματική συλλογή δεδομένων απαιτεί δύο άτομα (και μερικές φορές και δύο οχήματα), ενώ άλλες τεχνικές έρευνας μπορούν να πραγματοποιηθούν αποτελεσματικά από ένα άτομο στο πεδίο. Επίσης, το σύρσιμο του καλωδίου στο έδαφος μεταξύ των σταθμών αυξάνει την πιθανότητα βλαβών μόνωσης.

Το πιο σημαντικό όμως μειονέκτημα στη διάταξη βαθμίδας είναι η τεράστια ευαισθησία του στις ψευδείς ανωμαλίες που παράγονται από αθροιστικά λάθη. Οι λανθασμένες μετρήσεις γίνονται λόγω των φαινομένων επαφής εδάφους, της πόλωσης ηλεκτροδίου και τα χρονικά μεταβαλλόμενα δυναμικά. Η επίδραση της πόλωσης ηλεκτροδίου μπορεί να μειωθεί με την χρήση της διαδικασίας leapfrog, αλλά οι άλλοι δύο παράγοντες λανθασμένων μετρήσεων είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν ή να διορθωθούν. Αυτοί οι παράγοντες προσθέτουν ένα τυχαίο λάθος σε κάθε τιμή μέτρησης και επειδή οι τιμές αυτές αθροίζονται κατά την διαδικασία άθροισης των δεδομένων, τα λάθη συσσωρεύονται σε σημαντικά επίπεδα. Αν η μέτρηση περιλαμβάνει κάποιο λάθος σταθερής πόλωσης, τότε το λάθος αυτό θα συσσωρευτεί ακόμα γρηγορότερα.

Διάταξη σταθερής βάσης. Είναι η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην πραγματοποίηση των μετρήσεων στην παρούσα έρευνα, που θα αναλυθεί παράτω, στην περιοχή Αγκίστρου Σερρών. Ονομάζεται αλλιώς και διάταξη ολικού πεδίου και περιλαμβάνει μία σταθερή βάση ηλεκτροδίου, ένα καρούλι που μεταφέρει το μεγάλο μήκους συνδεδεμένου καλωδίου και ένα κινούμενο ηλεκτρόδιο μέτρησης. (Parasnis, 1966; Corwin and Butler, 1989). Συνήθως η πιο πρακτική χρήση αυτής της διάταξης είναι η σύνδεση του εξωτερικού καλωδίου στην βάση ηλεκτροδίου και η μεταφορά του καρουλιού με τα πόδια ή με όχημα από σταθμό σε σταθμό. Ο θετικός πόλος του βολτόμετρου συνδέεται με το ηλεκτρόδιο μέτρησης και ο αρνητικός με το καλώδιο και αυτό στην βάση ηλεκτροδίου. Οι σταθμοί μέτρησης είναι συνήθως προκαθορισμένοι και είναι σημειωμένοι στο καλώδιο ή χρησιμοποιείται μία φορητή συσκευή επιθυμητής απόστασης-μέτρησης. Η διάταξη σταθερής βάσης σχηματικά παρουσιάζεται στο σχήμα 12.



Σχήμα 12 Διάταξη σταθερής βάσης (L.Marescot)

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι πολλά. Επειδή το καλώδιο δεν σέρνεται στο έδαφος κατά την διάρκεια της ανάπτυξής του ή όταν μαζεύεται, το μήκος του καλωδίου δεν περιορίζεται λόγω τριβής ή εμποδίων όπως στην διάταξη με σταθερό καρούλι. Αυτό το πλεονέκτημα είναι σημαντικό στην απόκτηση ποιοτικών δεδομένων, καθώς επιτρέπει τον μέγιστο αριθμό μετρήσεων απευθείας από την σταθερή βάση ηλεκτροδίου και επιπλέον μειώνει την συσσώρευση λαθών. Όταν κριθεί αναγκαίο για την λειτουργικότητα της έρευνας να υπάρχουν περισσότεροι από ένας σταθμός βάσης, τότε η εγκατάσταση πολλαπλών σημείων σύνδεσης βοηθάει στην μείωση των λαθών μεταξύ των σταθμών βάσης.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της διάταξης σε σύγκριση με την διάταξη βαθμίδας είναι το χαμηλότερο επίπεδο αθροιστικού λάθους. Παρ'οτι, οι παράγοντες που δημιουργούν τα αθροιστικά λάθη υπάρχουν σε κάθε μέτρηση, τα λάθη δεν συσσωρεύονται όπως συμβαίνει στην διάταξη βαθμίδας. Αντιθέτως, είναι σχετικά εύκολο να υπολογιστεί το μέγεθος της πόλωσης του ηλεκτροδίου και τα χρονικά μεταβαλλόμενα λάθη και να αφαιρεθούν από τις μετρήσεις. Συνεπώς, η αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων που αποκτούνται από την διάταξη σταθερής βάσης θεωρείται γενικά καλύτερη από αυτήν της διάταξης βαθμίδας και η πιθανότητα απόκτησης ψευδών ανωμαλιών είναι μικρότερη.

Άλλα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης συμπεριλαμβάνουν την ευελιξία της τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και την ευκολία στην επανάληψη των μετρήσεων σε διάφορους σταθμούς ενδιαφέροντος για την απόκτηση επιπρόσθετων δεδομένων και λεπτομερέστερων αναλύσεων των περιοχών ανωμαλίας. Τέλος, οι έρευνες με αυτήν την διάταξη μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς όχημα και από ένα μόνο άτομο.

Από την άλλη, στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται το πρόβλημα της μεταφοράς του καλωδίου σε επικίνδυνο και δυσβατό έδαφος, η ανάγκη για το μάζεμα του καλωδίου και η ευπάθεια του μεγάλου του μήκους στη δημιουργία βλαβών από οχήματα, ζώα ή βανδαλισμούς. Επίσης, ο έλεγχος του καλωδίου για διάφορες βλάβες μπορεί να είναι κουραστικός λόγω των μερικών εκατοντάδων ή χιλιάδων μέτρων μήκους του. Όταν επιτρέπεται, μπορεί να γίνει χρήση καλωδίου μιας χρήσης για την ελάττωση μερικών από αυτών των προβλημάτων. Ελαφρύ μαγνητικό καλώδιο

μονωμένο με εύκαμπτη επίστρωση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό.

Όταν εφαρμόζεται σωστά η διάταξη σταθερής βάσης παρέχει δεδομένα υψηλής ποιότητας σε σχετικά χαμηλό κόστος. Παρ'ότι το κόστος εξοπλισμού και διατήρησής του είναι υψηλότερο από αυτο της διάταξης βαθμίδας, το κόστος των μετρήσεων είναι συγκρίσιμο και η ποιότητα των δεδομένων πολύ καλύτερη. Έτσι, η διάταξη σταθερής βάσης προτιμάτε σε σχέση με την διάταξη βαθμίδας, εκτός αν το έδαφος είναι εξαιρετικά δύσκολο ή υπάρχει υψηλή πιθανότητα βλάβης του καλωδίου.

Πολυκάναλη διάταξη. Είναι παρόμοια με την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση δικτύου φυσικού δυναμικού.(Koester et al., 1985). Σε αυτήν την διάταξη ένα ηλεκτρόδιο εγκαθίσταται σε κάθε σταθμό μέτρησης και όλα αυτά τα ηλεκτρόδια συνδέονται με έναν σταθμό βάσης μέσω ενός καλωδίου πολλαπλών αγωγών. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με την διαδοχική σύνδεση του κάθε ηλεκτροδίου με τον μετρητή του σταθμού βάσης ηλεκτροδίου ή με την χρήση ενός συστήματος πολυκάναλης καταγραφής δεδομένων. Αν το καλώδιο πολλαπλών αγωγών δεν χρησιμοποιείται, τότε οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με τις διαδικασίες βαθμίδας ή σταθερής βάσης.

Ένα πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η ευκολία στην επανάληψη των μετρήσεων με σκοπό τον έλεγχο των χρονικών μεταβολών και η ευκολία εφαρμογής τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων όπως το φιλτράρισμα με σκοπό την αφαίρεση αυτών των μεταβολών. Όπως και με την διάταξη σταθερής βάσης, έτσι και με αυτήν μειώνονται τα αθροιστικά λάθη με την χρήση μεμονωμένων ερευνών στο σταθμό βάσης. Επίσης, ο ερπυσμός μπορεί να παρακολουθείτε και οι μετρήσεις να γίνουν αφού σταθεροποιηθούν οι τιμές. Σε αυτό το σημείο θέτετε το εξής ερώτημα, εάν οι αρχικές μετρήσεις ηλεκτροδίου ή οι καταγραφόμενες τιμές μετά τον ερπυσμό δίνουν καλύτερα αποτελέσματα δυναμικού σε σχέση με την πηγή ενδιαφέροντος.

Τα μειονεκτήματα της πολυκάναλης διάταξης περιλαμβάνουν το κόστος εξοπλισμού που είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με τις άλλες δύο διατάξεις, την σχετικά μη ευέλικτη διάταξη και απόσταση των σταθμών μέτρησης και την δυσκολία της μέτρησης αρχικής και τελικής πόλωσης ηλεκτροδίου για την διόρθωση των σφαλμάτων πόλωσης.

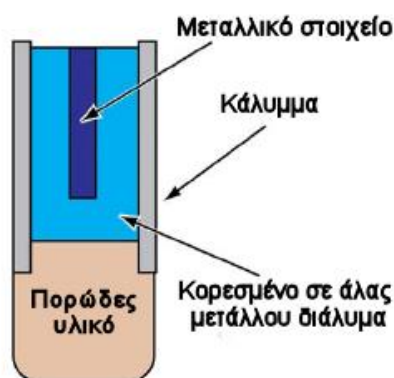
Οι αποστάσεις των σταθμών μέτρησης εξαρτάται από το αναμενόμενο μήκος κύματος της ανωμαλίας. Όπως και σε άλλα γεωφυσικά δυναμικά πεδία, το μήκος κύματος της ανωμαλίας εξαρτάται από την διάταξη, το μέγεθος και το βάθος της θαμμένης πηγής της ανωμαλίας. Για την εκτίμηση των αναμενόμενων μήκων κύματος των ανωμαλιών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές μοντελοποίησης των ανωμαλιών φυσικού δυναμικού που παράγεται από απλές γεωμετρικές πηγές.

1.5 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικού δυναμικού με την χρήση της διάταξης βαθμίδας είναι τα ηλεκτρόδια, το συνδεδεμένο καλώδιο, ένας μετρητής (συνήθως βολτόμετρο) και ένα εργαλείο εκσκαφής για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων σε κατάλληλο βάθος. Αντίστοιχα για την διάταξη σταθερής βάσης ο επιπλέον εξοπλισμός που απαιτείται είναι ένα πολύ μεγαλύτερου μήκους συνδεδεμένο καλώδιο και ένα καρούλι για την μεταφορά του καλωδίου. Και τέλος για την πολυκάναλη διάταξη ο εξοπλισμός περιλαμβάνει περισσότερα ηλεκτρόδια και ένα καλώδιο πολλαπλών αγωγών και ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων. Σε αντίθεση με άλλους γεωφυσικούς εξοπλισμούς, αυτός του φυσικού δυναμικού δεν είναι διαθέσιμος στο εμπόριο και πρέπει να συναρμολογηθεί από τον χρήστη (Corwin,1990).

Η απόδοση των ηλεκτροδίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά πόλωσης και ερπυσμού. Η 'πόλωσης' ορίζεται ως το μετρούμενο δυναμικό σε συγκεκριμένο χρόνο μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων, απουσία κάποιου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, και ο όρος 'ερπυσμός' αναφέρεται στην χρονική μεταβολή της τιμής πόλωσης.

Μολονότι τα ατόφια ατσάλινα ηλεκτρόδια (Parasnis,1966) και τα ατσάλινα επιστρωμένου χαλκού ηλεκτρόδια (Koester et al.,1984) έχουν χρησιμοποιηθεί σε μετρήσεις πεδίου φυσικού δυναμικού, έχει διαπιστωθεί ότι τα μη πολωμένα ηλεκτρόδια δίνουν περισσότερο αναπαραγωγικά δεδομένα. (Parasnis,1966; Corwin and Butler, 1989). Αυτά τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από ένα μεταλλικό στοιχείο, βυθισμένο σε ένα διάλυμα άλατος του μετάλλου, με μία πορώδη επαφή μεταξύ του διαλύματος και του εδάφους. (Ives and Janz, 1961). Το σχήμα του μη πολούμενου ηλεκτροδίου παρουσιάζεται παρακάτω. (σχήμα 13).



Σχήμα 13 Μη πολούμενο ηλεκτρόδιο (L.Marescot).

Τα επίπεδα θορύβου υψηλής συχνότητας ηλεκτροδίου στην κλίμακα του microvolt είναι σημαντικοί παράγοντες για άλλες γεωφυσικές εφαρμογές όπως αυτή των μαγνητοτελλουρικών μετρήσεων. Αντιθέτως, στις μετρήσεις φυσικού δυναμικού η πόλωση ηλεκτροδίου και ο ερπυσμός είναι σημαντικοί παράγοντες και εξαρτώνται από περιβαλλοντικές μεταβολές όπως η θερμοκρασία, το περιεχόμενο υγρασίας του

εδάφους και η χημεία. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις και μετρήσεις πεδίου για να βρεθεί η αντίδραση του κάθε τύπου πολούμενου ηλεκτροδίου σε αυτές τις μεταβολές. Οι μετρήσεις συμπεριέβαλαν τους εξής τύπους ηλεκτροδίων : χαλκού-θειούχου χαλκού, αργύρου-χλωριούχου αργύρου, μολύβδου-χλωριούχου μολύβδου, ψευδαργύρου-θειούχου ψευδαργύρου και καδμίου-χλωριούχου καδμίου. (Ewing,1939 ; Semenov,1974 ; Morrison et al.,1979a, 1979b).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, έδειξαν ότι παρά το γεγονός πως διαφορετικοί τύποι ηλεκτροδίων αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο στις περιβαλλοντικές αλλαγές των παραμέτρων, κάτω από τις περισσότερες συνθήκες, αυτές οι αντιδράσεις δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα σφαλμάτων και θορύβου των μετρήσεων φυσικού δυναμικού. (Morrison et al., 1979b). Σε συνθήκες μόνο υπερβολικών διακυμάνσεων στην θερμοκρασία ή στην χημεία του εδάφους, μπορεί να αξίζει η χρήση διαθέσιμων εμπορικών ηλεκτροδίων με διπλό ηλεκτρολυτικό θάλαμο για αυξανόμενη μόνωση εδάφους ή την εγκατάσταση θερμομέτρων απευθείας στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα.

Οι άξιοι προσοχής παράγοντες για το βολτόμετρο που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις φυσικού δυναμικού είναι η ανάλυση, το εύρος, η σύνθετη αντίσταση εισόδου, η απόρριψη παρεμβολών εναλλασσόμενου ρεύματος και η καταλληλότητα για χρήση πεδίου. Είναι επιθυμητό να υπάρχει ικανότητα μέτρησης της αντίστασης επαφής του ηλεκτροδίου.

Η μέτρηση και η καταγραφή της αντίστασης επαφής ηλεκτροδίου σε κάθε σταθμό είναι σημαντική. Αυτή η μέτρηση διαβεβαιώνει ότι δεν υπάρχουν κενά στο συνδεδεμένο καλώδιο, ότι η αντίσταση επαφής είναι αρκετά χαμηλή ώστε να αποφευχθεί η φόρτιση της μετρούμενης κυκλοφορίας και ότι οι συνθήκες επαφής εδάφους είναι σχετικά ομοιόμορφες από σταθμό σε σταθμό. Αν η μετρούμενη τάση φυσικού δυναμικού είναι σχετικά μεγάλη, τα ρεύματα που παράγονται από την κυκλοφορία του εδάφους μπορεί να είναι τόσο μεγάλα ώστε να πωλώνουν σημαντικά την μετρούμενη αντίσταση και μερικές φορές ακόμα και να δίνουν αποτελέσματα αρνητικής αντίστασης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πρέπει να πραγματοποιηθεί μία αντίστροφη μέτρηση αντίστασης και ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων θα δίνει περίπου την πραγματική τιμή της αντίστασης.

Τέλος, όσον αφορά τον εξοπλισμό των μετρήσεων φυσικού δυναμικού, μπορεί να δημιουργηθεί ένα τελλουρικό σύστημα για την καταγραφή των χρονικά μεταβαλλόμενων δυναμικών στην γή, τα οποία μπορεί λανθασμένα να θεωρηθούν ως χωρικές μεταβολές. Ο εξοπλισμός αυτού του συστήματος αποτελείται από έναν καταγραφέα, ηλεκτρόδια και ένα συνδεδεμένο καλώδιο. Για την άριστη κατανόηση των διευθύνσεων των τελλουρικών ρευμάτων, είναι καλό να χρησιμοποιηθεί μία ορθογωνική διάταξη ηλεκτροδίων και ένας καταγραφέας δύο καναλιών.

1.6 Εφαρμογές

Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για μεταλλευτικούς σκοπούς. Με το πέρασμα του χρόνου άρχισε όμως να

χρησιμοποιείται και σε περιβαλλοντικές και μηχανικές εφαρμογές όπως για την περιγραφή υπόγειων ροών σε δοκιμές άντλησης (E. Rizzo, B. Suski, A. Revil, 2004), την εύρεση εγκοίλων ή σπηλαίων, την παρακολούθηση υπόγειας ροής με σκοπό την εύρεση πιθανών διαρροών σε φράγματα, την μελέτη υδροφόρου ορίζοντα κ.α.

Άλλες εφαρμογές της μεθόδου του φυσικού δυναμικού είναι επίσης στην αρχαιομετρία και στην πρόβλεψη σεισμών.

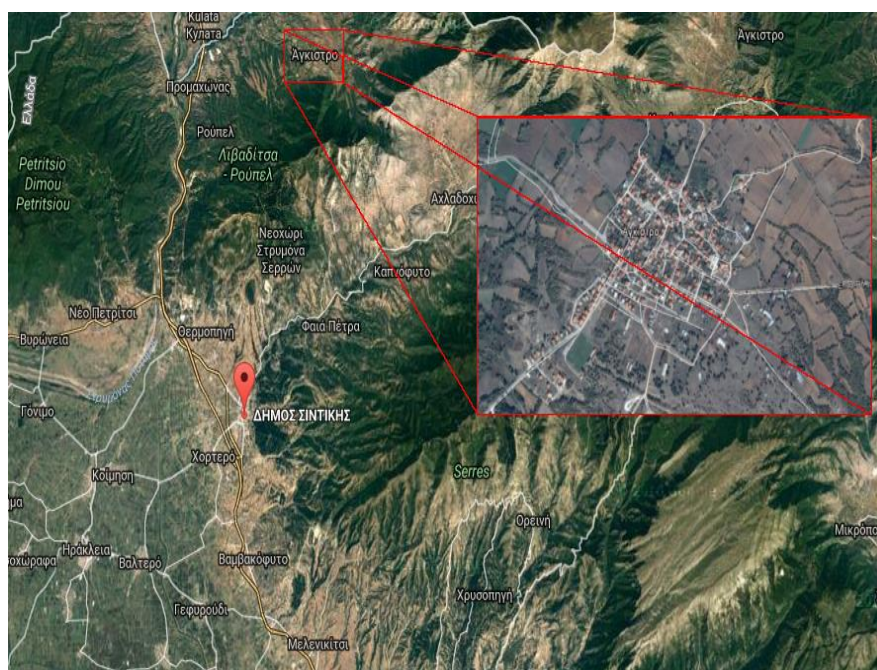
Μία τελευταία εφαρμογή της μεθόδου αυτής με αξιόπιστα αποτελέσματα είναι η χρήση της στη γεωθερμία και συγκεκριμένα για γεωθερμικές έρευνες (Corwin and Hoover, 1979), για την ανίχνευση υπόγειων θερμικών ανωμαλιών και γεωθερμικών πεδίων (Γ. Αποστολόπουλος, Ι. Λούης, Ε. Λάγιος, 1997), για την μελέτη των μορφολογικών χαρακτηριστικών σε ηφαίστεια (Zlotnicki and Nishida, 2003), κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η εφαρμογή της μεθόδου για την διερεύνηση των γεωθερμικών πηγών στην περιοχή του Αγκίστρου Σερρών και για την έρευνα των ανωμαλιών φυσικού δυναμικού που αναμένονται στις πηγές θερμού νερού, όπου υπάρχει ανωδική ροή, παραθέτοντας αντίστοιχους χάρτες.

2 Περιοχή Μελέτης

2.1 Γεωγραφική θέση και Γεωθερμία του Αγκίστρου

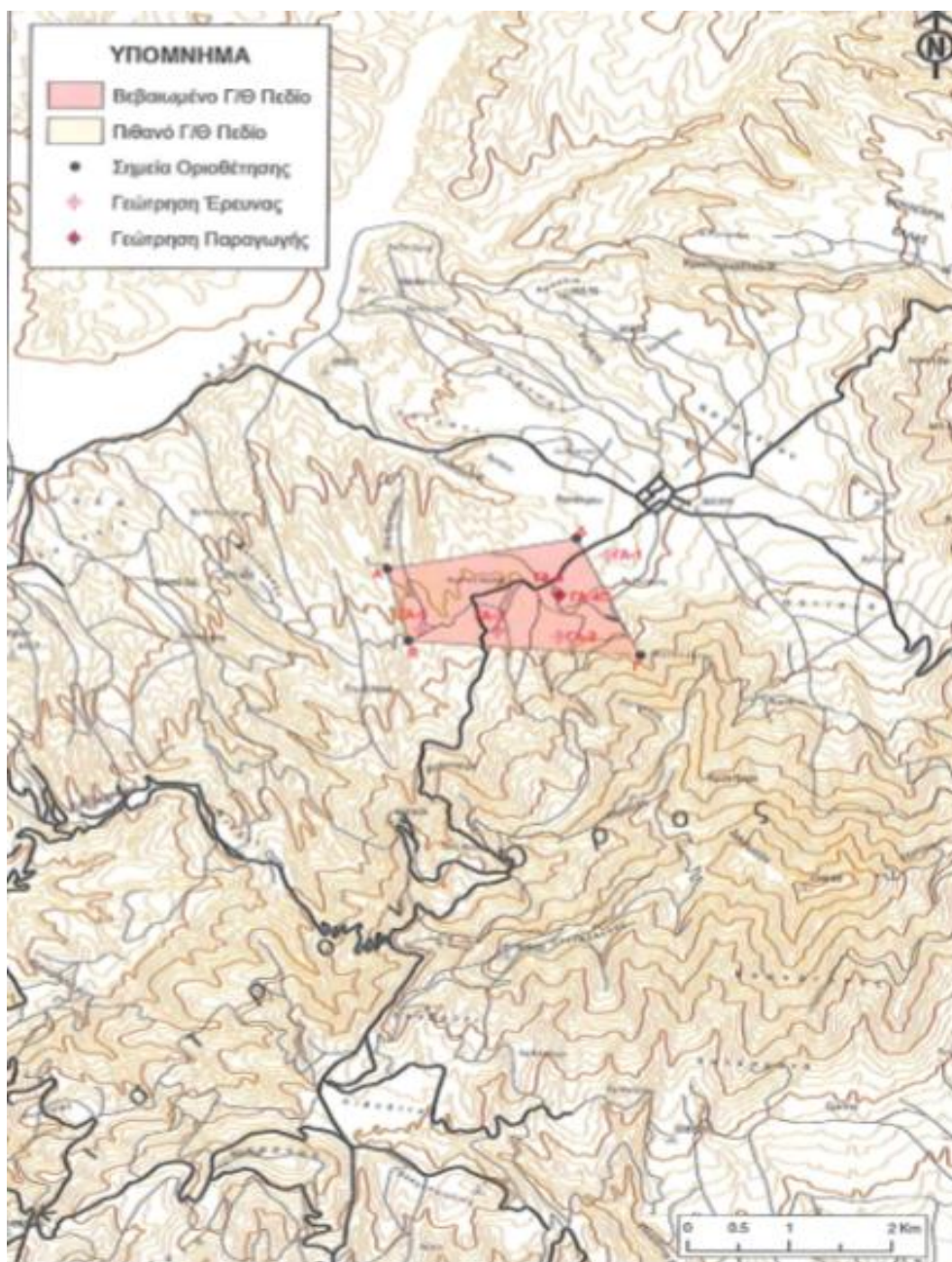
Το Άγκιστρο, η περιοχή της μελέτης, ανήκει στον νομό Σερρών και συγκεκριμένα στον Δήμο Σιντικής. Είναι αξιοσημείωτο, πως ο νομός Σερρών αποτελεί σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο την περιοχή με την μεγαλύτερη παρουσία γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας ($T < 100^{\circ}\text{C}$). Η περιοχή του Αγκίστρου τοποθετείται γεωγραφικά στα Ελληνοβουλγαρικά σύνορα και είναι χτισμένη στους βόρειους πρόποδες του ομώνυμου όρους Άγκιστρο. Αποτελεί το βορειότερο χωριό των Σερρών και βρίσκεται σε υψόμετρο 180 μέτρων και σε απόσταση από τον Προμαχώνα μόλις 7km, ενώ 33 km Βόρεια-Βορειοδυτικά των Σερρών. Είναι διάσημο για τις ιαματικές του πηγές και το φυσικό του λουτρό που αποτελεί το παλαιότερο στον ελληνικό χώρο και που ονομαζόταν κάποτε 'λουτρό Τσιγγέλι' (όπως η παλιά ονομασία του σημερινού όρους Άγκιστρο). Το λουτρό έχει δημιουργηθεί λόγω της δράσης της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας ($\sim 40^{\circ}\text{C}$). Παρακάτω παραθέτεται η γεωγραφική εικόνα της περιοχής Αγκίστρου μέσα από τον χάρτη του Google Earth. (σχήμα 14).



Σχήμα 14 Η περιοχή του Αγκίστρου μέσα από τον χάρτη του Google Earth

Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), πραγματοποίησε έρευνες για την περιγραφή του γεωθερμικού πεδίου του Αγκίστρου και εντόπισε το αναμεόμενο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας. Συγκεκριμένα, για τις έρευνες αυτές εκτελέστηκαν 5 γεωτρήσεις έρευνας και 1 γεώτρηση έρευνας-

παραγωγής με σκοπό τον προσδιορισμό της θερμοβαθμίδας, της στρωματογραφίας και των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η έκταση του πεδίου είναι $1,5 \text{ km}^2$, η θερμοκρασία του γεωθερμικού ταμιευτήρα είναι $40-48^\circ\text{C}$, το βάθος του ταμιευτήρα είναι $100-300\text{m}$ και η παροχή $80 \text{ m}^3/\text{h}$. Η χωροθέτηση του πεδίου παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη (σχήμα 15).



Σχήμα 15 Γεωθερμικό πεδίο Αγκίστρου-Σερρών. (ΙΓΜΕ-Διεύθυνση γεωθερμίας και θερμομεταλλικών υδάτων)

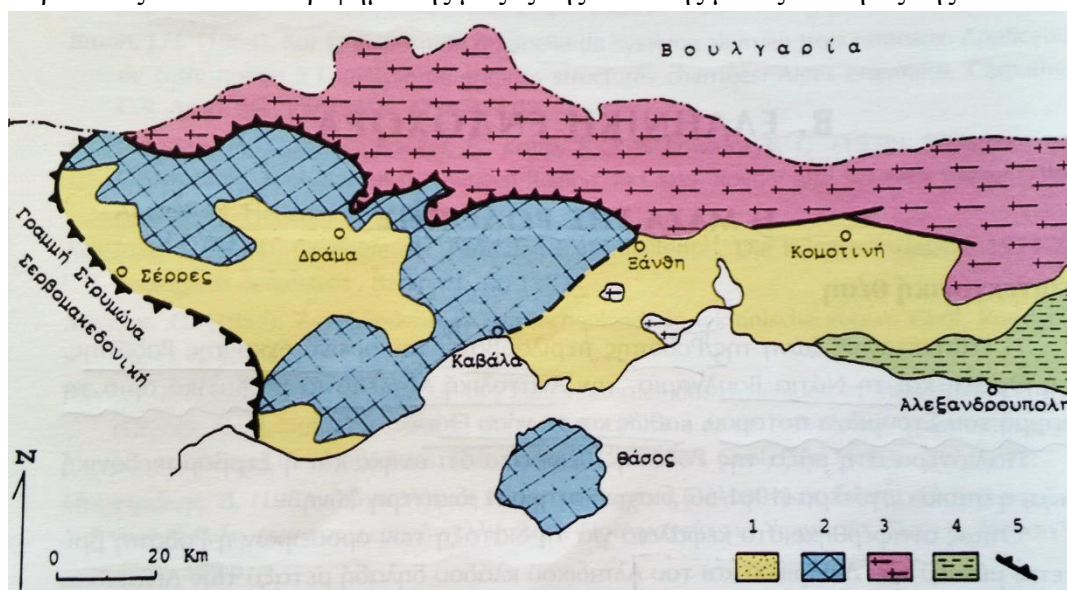
Τα γεωθερμικά ρευστά του ταμιευτήρα τροφοδοτούνται μέσω ρηγμάτων του υποβάθρου και λόγω της απουσίας αξιόλογου στεγανού καλύμματος, δημιουργείται μίξη κρύων και ζεστών υδροφόρων και κατά συνέπεια διακύμανση θερμοκρασιών. (Γ. Καρυδάκης, Ν. Ανδρίτσος, Μ. Φυτίκας, 1999).

2.2 Γεωλογικά και γεωτεκτονικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής

Η περιοχή του Αγκίστρου, όπως προαναφέρθηκε ανήκει στην μάζα της Ροδόπης και μάλιστα στο δυτικό όριο με την Σερβομακεδονική. Γεωτεκτονικά ανήκει στην λεκάνη του Στρυμώνα, η οποία αποτελεί μία τυπική μετα-ορογενετική λεκάνη. Στο όριο των δύο ζωνών έχει διαπιστωθεί εφίπλευση της Σερβομακεδονικής πάνω στην μάζα της Ροδόπης, η οποία χρονολογείται κατά το Ολιγόκαινο και στην οποία οφείλεται η δημιουργία της λεκάνης. Εντούτοις, νεώτερες απόψεις (Καρυστιναίος, 1984), ισχυρίζονται πως στο όριο των δύο ζωνών δεν υπάρχει εφίπλευση, αλλά ότι αποτελεί ρήγμα οριζόντιας συστροφικής μετατόπισης. Αυτό δημιουργεί τοπικές εφίπλευσεις (στις ζώνες συμπίεσης) και τοπικά βυθίσματα (στις ζώνες εφελκυσμού), που εξηγούν τις τοπικές μεταβολές που παρατηρούνται στην επαφή, αλλά και την δημιουργία της κοιλάδας του Στρυμώνα.

Όσον αφορά τώρα την κάθε μάζα ξεχωριστά και ξεκινώντας από την μάζα της Ροδόπης, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η μάζα αυτή χωρίζεται σε δύο τεκτονικές ενότητες. Η μία είναι η ανώτερη τεκτονική ενότητα του Σιδηρόνερου, η οποία αποτελεί την παλαιότερη ενότητα πετρωμάτων και τοποθετείται γεωγραφικά βόρεια κατά μήκος των ελληνοβουλγαρικών συνόρων. Η ενότητα αυτή αποτελείται από αμφιβολίτες, ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους, λεπτές ενστρώσεις μαρμάρων και μιγματίτες.

Η δεύτερη ενότητα είναι η κατώτερη τεκτονική ενότητα Παγγαίου, η οποία είναι νεώτερη ενότητα πετρωμάτων και βρίσκεται στη δυτική, νοτιοδυτική Ροδόπη. Η ενότητα αυτή αποτελεί το υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και αποτελείται από έναν κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες, έναν μεσαίο ορίζοντα μαρμάρων μεγάλου πάχους και έναν ανώτερο με εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων. (Papanikolaou & Panagopoulos, 1981). Στο σχήμα 16 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της μάζας της Ροδόπης με τις ενότητές της.



Σχήμα 16 Σκαρίφημα Ροδοπικής μάζας. 1: μεταλικά ιζήματα, 2: ενότητα Παγγαίου, 3: ενότητα Σιδηρόνερου, 4: σχηματισμοί Περιροδοπικής ζώνης, 5: γραμμή επώθησης (Μουντράκης, 2010)

Είναι άξιο αναφοράς, πως στην μάζα Ρίλα-Ροδόπης έχει βρεθεί η ύπαρξη όξινων πυριγενών πετρωμάτων, πλουτωνιτών και ηφαιστιτών, ηλικίας Ηωκαίνου-Ολογοκαίνου. Οι κυριότεροι πλουτωνίτες είναι μοσχοβιτικοί, βιοτιτικοί και κεροσιλβικοί γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες, χαλαζιακοί μονζονίτες και διορίτες. Αντίστοιχα, οι ηφαιστίτες αποτελούνται από ρυόλιθους, ανδεσίτες, δακίτες και δολερίτες. Στο σχήμα 17 παρουσιάζεται ένας χάρτης με αυτές τις πλουτωνικές και ηφαιστειακές εμφανίσεις.



Σχήμα 17 Πλουτωνικές και ηφαιστειακές εμφανίσεις στον ευρύτερο χώρο μάζας Ρίλα-Ροδόπη (Μουντράκης, 2010)

Η Σερβομακεδονική μάζα από την άλλη, χωρίζεται και αυτή σε δύο μεγάλες ενότητες πετρωμάτων. Την ανώτερη και νεότερη ενότητα Βερτίσκου και την αρχαιότερη και κατώτερη ενότητα των Κερδυλλίων. Η ενότητα του Βερτίσκου γεωγραφικά βρίσκεται στα δυτικά της ενότητας των Κερδυλλίων και συνίσταται από μία ακολουθία μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και λεπτών στρωμάτων μαρμάρου. Οι ανώτεροι ορίζοντες της ενότητας συνίστανται από μεταγάββρους-μεταδιαβάσεις και ορθοαμφιβολίτες, που δημιουργήθηκαν από μεταμόρφωση βασικών πυριγενών πετρωμάτων.

Η ενότητα των Κερδυλλίων με συνολικό πάχος περίπου 3000 μέτρα συνίσταται από γενέσιους, αμφιβολίτες, αμφιβολιτωμένους εκλογίτες και μάρμαρα.

2.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά Αγκίστρου

Η περιοχή του Αγκίστρου βρίσκεται γεωλογικά στην επαφή της Σερβομακεδονική με την μάζα της Ροδόπης. Η επαφή αυτή οριοθετείται από την 'γραμμή Στρυμόνα' και την εφίπλευση των βιοτιτικών γνευσίων της Σερβομακεδονικής πάνω στη σειρά μαρμάρων, σχιστολίθων, σιπολινών και βιοτιτικών γνευσίων της Ρίλα-Ροδόπης. Η τεκτονική δομή της περιοχής, επηρεάστηκε από αυτήν την 'γραμμή' και δημιούργησε δύο κύριες ρηξιγενείς δομές: την Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ και την Α.ΒΑ-Δ.ΝΔ. Η πρώτη ρηξιγενής δομή αποτελεί το γεωτεκτονικό όριο των ζωνών της Σερβομακεδονικής και της Ροδόπης και χαρακτηρίζεται από δύο κανονικά ρήγματα που ευθύνονται για αμφίδρομη κυκλοφορία. Με την κυκλοφορία αυτή, εννοείται η κατείσδυση ψυχρών νερών σε βάθος και η άνοδος θερμών ρευστών προς την επιφάνεια. Όσον αφορά την δεύτερη ρηξιγενή δομή, η οποία είναι νεότερη και σχεδόν κάθετη στην πρώτη, χαρακτηρίζεται από δύο υποπαράλληλα μεταπτωτικά ρήγματα που συγκλίνουν και καμπυλώνονται προς τα βόρεια, αποτελεί το όριο της υπόγειας διάχυσης του θερμού υδροφορέα, καθώς επίσης βοηθάει την άνοδο και την εκδήλωση των γεωθερμικών ρευστών. Η ανάβλυση των θερμών πηγών γεωγραφικά τοποθετείται στην νοτιοδυτικότερη διαστράυρωση των ρηξιγενών αυτών δομών.

Είναι γνωστό πως η δημιουργία θερμού υδροφορέα απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού. Η παροχή των πηγών Αγκίστρου είναι πολύ μεγάλη σε περιόδους αυξημένων κατακρημνισμάτων, παρ'όλα αυτά σε περιόδους ξηρασίας μπορεί να ελαττωθεί σημαντικά ή και να διακοπεί εντελώς. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως το θερμό νερό είναι μικρής ηλικίας.

Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σημαντικές για την κατανόηση του μηχανισμού ανάβλυσης του συστήματος θερμών πηγών Αγκίστρου. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι πρόκειται για ένα ρηχό θερμό υδροφόρο σύστημα που εκδηλώνεται επιφανειακά σε συγκεκριμένο χώρο με ανιούσες-καρστικές-ρηγματογενείς πηγές. (Ελληνική Θερμαλιστική Εταιρεία, 2008).

Όσον αφορά το κομμάτι των γεωλογικών σχηματισμών, σύμφωνα με γεωλογική χαρτογράφηση που πραγματοποιηθήκε στην περιοχή Αγκίστρου και με σειρά από τους παλαιότερους προς τους νεότερους, παραθέτονται οι εξής σχηματισμοί (σχήμα 18, 19 και 20) :

Σχιστόλιθοι-Γνεύσιοι. Συγκεκριμένα, πρόκειται για διμαρμαρυγικοί σχιστογενέσιοι με απλιτικές φλέβες έντονα κατακερματισμένους.

Ασβεστόλιθοι-Μάρμαρα. Οι ασβεστόλιθοι είναι λευκοί, παχυστρωματώδεις με σχιστολιθικές παρενστρώσεις και έντονα κατακερματισμένοι.

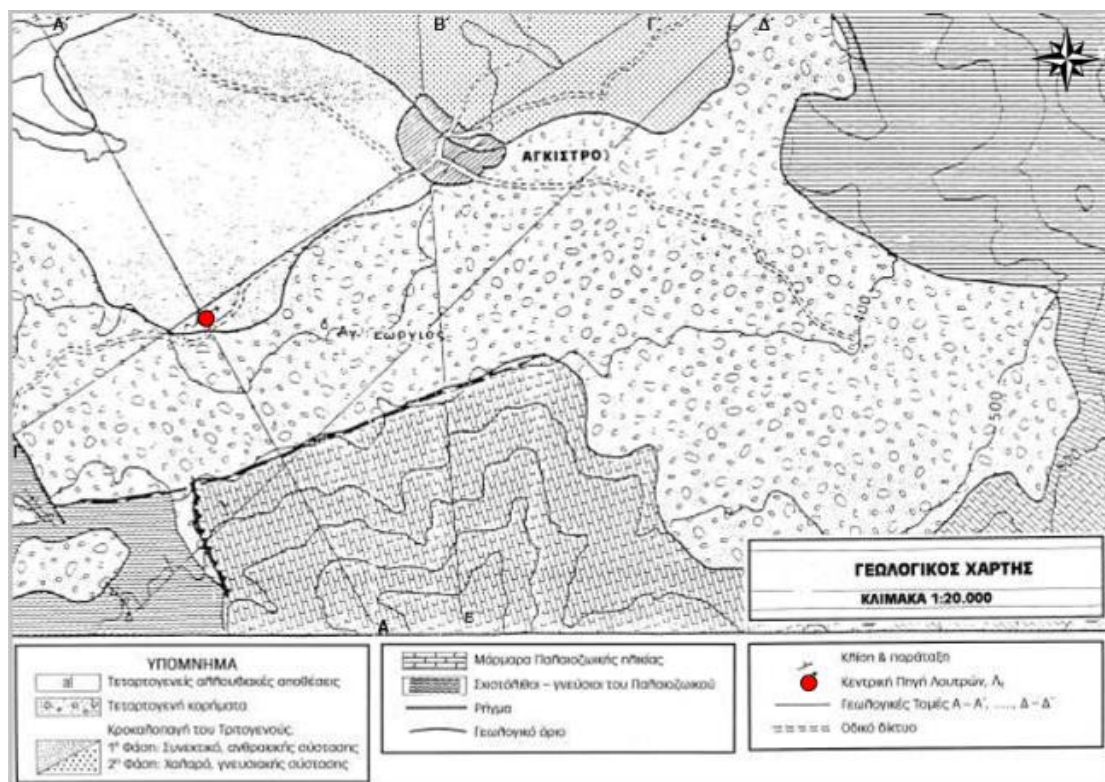
Κροκαλοπαγή. Δύο αποθετικών φάσεων Τριτογενούς ηλικίας. Η πρώτη φάση έχει υποστεί διαγένεση και αποτελείται από ασβεστιτικής σύστασης κροκάλες με αμμώδες συνδετικό υλικό. Η δεύτερη φάση χαρακτηρίζεται από εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών.

Πλευρικά κορήματα. Κλαστικές αποθέσεις ηλικίας Τεταρτογενούς. Πρόκειται στην ουσία από μάρμαρα και σχιστολίθους που βρέθηκαν στην θέση αυτήν εξαιτίας

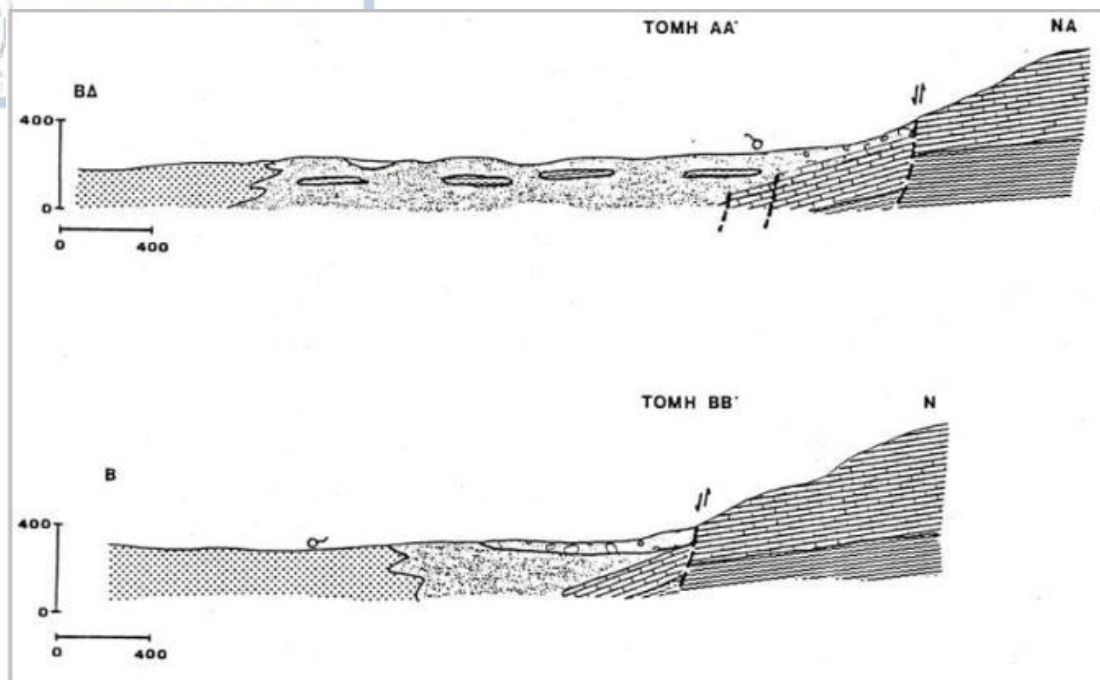
βαρυτικών ολισθήσεων. Στα κορήματα αυτά υπάρχει αναμεμειγμένο και αργιλικό υλικό.

Αλλουβιακές αποθέσεις. Η σύσταση των αλλουβιακών αποθέσεων αποτελείται από αργίλους, άμμους, ψηφίδες και διάφορα προϊόντα αποσάθρωσης. Τα υλικά αυτά είναι ποταμοχειμάρρεια και υλικιάς Τεταρτογενούς, ενώ βρέθηκαν στη περιοχή κατά την απόθεση λόγω απότομης μείωσης της ταχύτητας ροής του ρεύματος μεταφοράς.

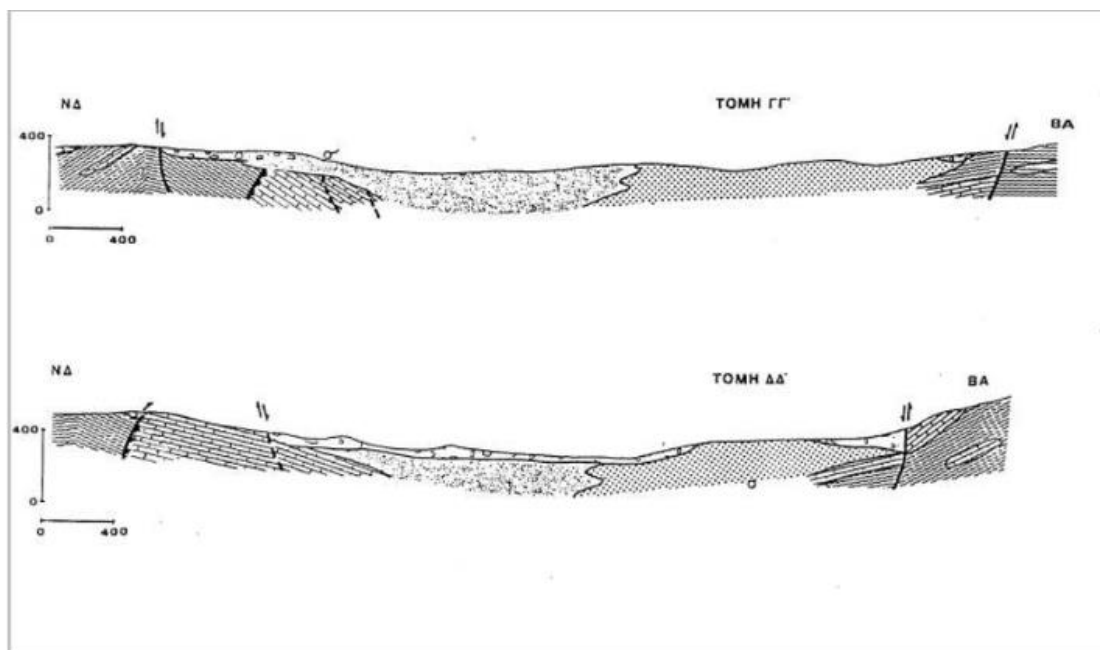
Τα ρήγματα της περιοχής που φτάνουν μέχρι μεγάλο βάθος, σε συνδυασμό με τα τεταρτογενή ιζήματα που συνθέτουν ένα περατό κάλυμμα, βοηθούν στην διάχυση της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών και την ελευθερία κινήσεως τους με αποτέλεσμα την ανάμιξη με ψυχρά και αβαθή υπόγεια νερά.



Σχήμα 18 Γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής του Αγκίστρου



Σχήμα 19 Γεωλογική τομή του χάρτη του σχήματος 16

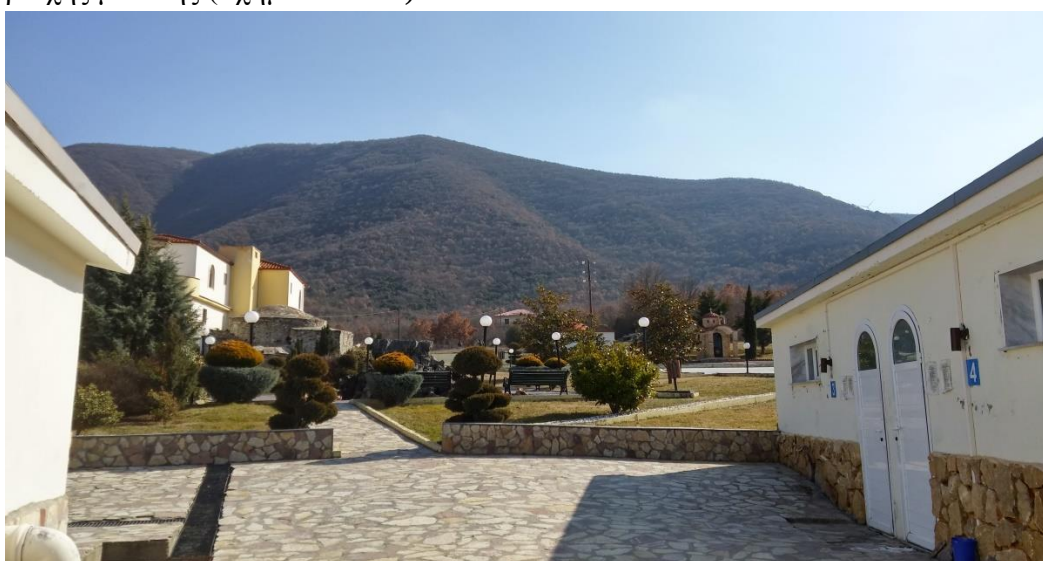


Σχήμα 20 Γεωλογική τομή του χάρτη του σχήματος 16

3 Πραγματοποίηση και επεξεργασία μετρήσεων υπαίθρου

3.1 Μετρήσεις και εξοπλισμός

Βασικές αναφορές για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στην περιοχή μελέτης είναι η διάταξη έρευνας που χρησιμοποιήθηκε και ο εξοπλισμός. Έτσι, οι μετρήσεις φυσικού δυναμικού έγιναν με διάταξη σταθερής βάσης, η οποία έχει αναλυθεί παραπάνω, και ο εξοπλισμός συνίσταται από δύο ηλεκτρόδια μολύβδου-χλωριούχου μολύβδου ($Pb/PbCl_2$), εκ των οποίων το ένα τοποθετήθηκε ως σταθμός βάσης και το άλλο ήταν κινούμενο στους διάφορους σταθμούς μέτρησης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν ένα καρούλι, ένα μεγάλο μήκους καλώδιο, ένα βολτόμετρο ως όργανο μέτρησης της αντίστασης, καθώς και μία συσκευή GPS χειρός, στην οποία καταχωρήθηκαν οι μετρήσεις και η ακριβής τοποθεσία με βάση την όδευση που ακολουθήθηκε. Το ηλεκτρόδιο βάσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων ήταν θαμμένο σε απομακρυσμένη περιοχή από πηγές θορύβου και σε σκιερό σημείο για την αποφυγή των αλλαγών θερμοκρασίας. Στην διάταξη βάσης, υπήρχε επίσης σε όλη την διάρκεια της όδευσης μόνιμη σύνδεση του ηλεκτροδίου βάσης με το καλώδιο, ενώ στο κινούμενο ηλεκτρόδιο υπήρχε κάθε φορά απευθείας σύνδεση με το όργανο μέτρησης σε κάθε σημείο της όδευσης. Στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκαν 142 μετρήσεις σε 142 διαφορετικά σημεία. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω σε πίνακα που δημιουργήθηκε μέσω του προγράμματος Microsoft Excel 2010 και φαίνονται οι ακριβείς συντεταγμένες του κάθε σημείου, η μέτρηση του φυσικού δυναμικού και το υψόμετρο. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGIS με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την πραγματοποίηση χαρτών, πάνω στους οποίους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του φυσικού δυναμικού. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες του εξοπλισμού και της περιοχής μελέτης (σχήμα 21 – 24).



Σχήμα 21 Ξενοδοχειακή μονάδα των Θερμών λουτρών Αγκίστρου κοντά στην περιοχή των μετρήσεων



Σχήμα 22 Ο εξοπλισμός (βολτόμετρο, ηλεκτρόδια, καρούλι, καλώδιο, γεωλογικό σφυρί).



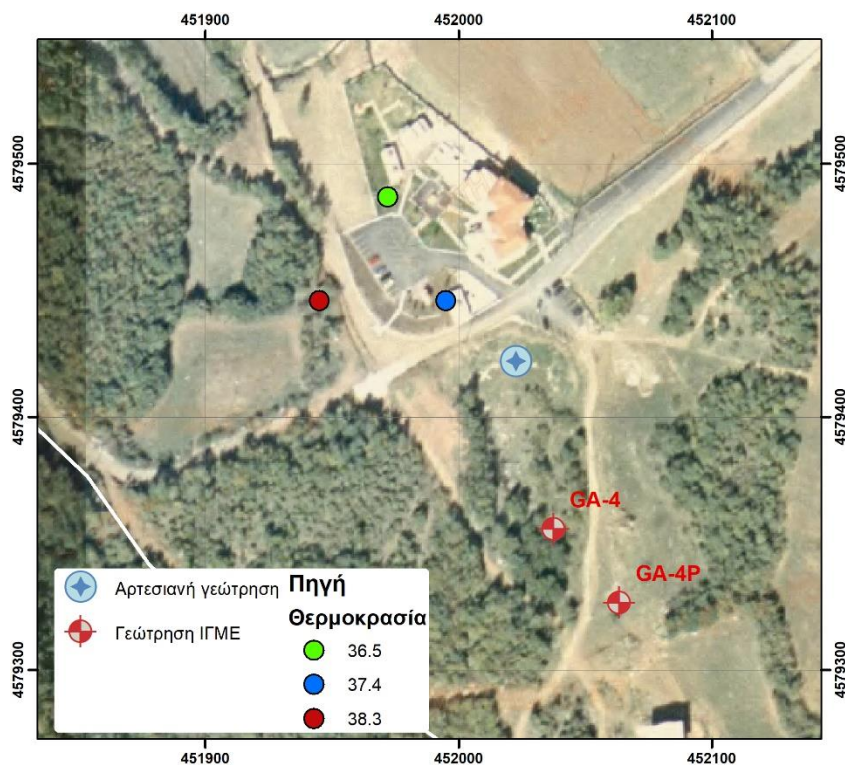
Σχήμα 23 Το κινούμενο ηλεκτρόδιο κατά την διάρκεια της μέτρησης.



Σχήμα 24 Γεώτρηση αρτεσιανισμού στην περιοχή μετρήσεων Αγκίστρου Σερρών.

3.2 Ανάλυση, επεξεργασία και αποτελέσματα μετρήσεων

Όπως προαναφέρθηκε στην περιοχή μελέτης Αγκίστρου Σερρών πραγματοποιήθηκαν 142 μετρήσεις φυσικού δυναμικού. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χάρτες, ο πρώτος με τα στοιχεία της περιοχής (σχήμα 25), ενώ ως αντιπρόθεση ο δεύτερος χάρτης είναι ακριβώς ο ίδιος με επιπρόσθετα τα σημεία μέτρησης χαραγμένα πάνω στον χάρτη (σχήμα 26)



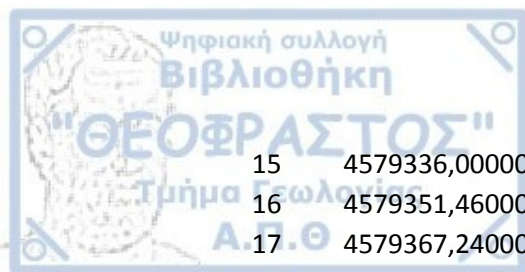
Σχήμα 25 Χάρτης με τα στοιχεία της περιοχής μελέτης



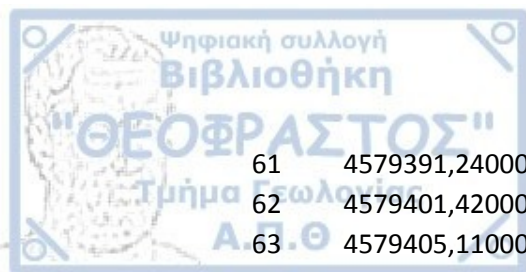
Σχήμα 26 Χάρτης της περιοχής με σημειωμένα τα 142 σημεία μέτρησης φυσικού δυναμικού.

Επιπροσθέτως, παρατίθεται παρακάτω ο αναλυτικός πίνακας των 142 μετρήσεων φυσικού δυναμικού στην περιοχή Αγκίστρου, ο οποίος επεξεργάστηκε με το πρόγραμμα Microsoft Excel 2010 :

RECNUM	LAT	ID	LON	ALTITUDE	LONGNAME
1	4579317,1300000	001	452077,6900000	290,2	403
2	4579313,6300000	002	452068,5800000	290,4	416
3	4579313,1400000	003	452060,5300000	291,2	416
4	4579309,1100000	004	452049,1300000	292,4	410
5	4579301,5700000	005	452038,2600000	292,8	407
6	4579289,0400000	006	452029,7700000	294,5	409
7	4579289,1600000	007	452015,7200000	294,8	406
8	4579289,3100000	008	451997,1800000	294,3	404
9	4579290,5900000	009	451979,9900000	294,5	409
10	4579294,0800000	010	451963,9200000	296,4	412
11	4579300,2700000	011	451948,7500000	296,9	417
12	4579307,8600000	012	451929,0400000	296,7	415
13	4579315,0600000	013	451918,3000000	296,0	395
14	4579324,5300000	014	451904,7800000	295,5	398



15	4579336,0000000	015	451890,9900000	293,6	405
16	4579351,4600000	016	451878,8700000	293,1	401
17	4579367,2400000	017	451864,5200000	293,6	407
18	4579378,1100000	018	451856,5600000	291,6	410
19	4579365,0300000	019	451868,8100000	293,8	406
20	4579366,5500000	020	451896,9500000	292,4	403
21	4579355,4500000	021	451906,8800000	293,3	414
22	4579347,7800000	022	451919,9400000	293,6	400
23	4579337,3300000	023	451935,1800000	294,3	412
24	4579325,0100000	024	451935,3300000	296,0	411
25	4579337,6000000	025	452094,1300000	285,6	401
26	4579328,6500000	026	452085,1300000	289,2	390
27	4579328,7100000	027	452074,3800000	289,7	412
28	4579328,9400000	028	452064,3500000	289,5	418
29	4579320,4000000	029	452048,1100000	290,7	406
30	4579321,3700000	030	452035,1500000	291,9	402
31	4579330,9000000	031	452022,2500000	290,9	398
32	4579340,6200000	032	452013,0600000	290,7	405
33	4579355,1500000	033	452005,8100000	289,0	401
34	4579368,9600000	034	451994,2200000	287,3	400
35	4579364,8000000	035	451982,0100000	289,0	401
36	4579354,3600000	036	451980,3600000	290,7	401
37	4579341,6000000	037	451983,0400000	291,4	402
38	4579333,4700000	038	451978,2600000	293,1	404
39	4579322,6500000	039	451962,8600000	295,2	402
40	4579312,8300000	040	451951,4900000	296,4	400
41	4579334,3300000	041	451985,0600000	291,2	404
42	4579383,6000000	042	451986,5800000	283,7	402
43	4579391,2000000	043	451971,7800000	283,5	405
44	4579382,2600000	044	451959,8800000	284,2	399
45	4579380,4900000	045	451944,6200000	284,7	404
46	4579380,4100000	046	451926,4200000	285,4	404
47	4579380,3900000	047	451907,7400000	287,3	400
48	4579381,0300000	048	451889,6700000	287,6	402
49	4579391,2200000	049	451879,2400000	285,9	406
50	4579397,8100000	050	451866,7000000	287,3	403
51	4579398,5800000	051	451857,8200000	290,9	406
52	4579358,9700000	052	452093,8900000	280,8	407
53	4579359,6900000	053	452086,2700000	281,8	407
54	4579360,4700000	054	452075,6200000	283,0	404
55	4579360,8800000	055	452059,2600000	283,7	404
56	4579360,5400000	056	452046,0200000	283,5	404
57	4579361,9200000	057	452031,9500000	282,3	404
58	4579367,6400000	058	452016,1900000	282,8	405
59	4579373,8400000	059	452025,9900000	279,9	408
60	4579385,8500000	060	452011,9500000	280,3	407



61	4579391,2400000	061	452003,8100000	281,8	416
62	4579401,4200000	062	451988,3700000	280,3	408
63	4579405,1100000	063	451975,2700000	277,5	407
64	4579407,8500000	064	451966,7800000	277,2	400
65	4579407,1600000	065	451956,0300000	276,5	412
66	4579409,3700000	066	451940,7600000	277,9	406
67	4579411,5900000	067	451927,2400000	279,6	409
68	4579414,2900000	068	451907,9600000	279,6	403
69	4579417,9400000	069	451891,3500000	278,7	406
70	4579428,4100000	070	451882,2100000	276,7	400
71	4579437,8500000	071	451877,2000000	276,5	406
72	4579435,9600000	072	451923,0500000	275,8	417
73	4579440,8900000	073	451938,8500000	273,9	402
74	4579428,0200000	074	451932,9000000	275,8	403
75	4579373,5900000	075	452078,0400000	274,6	407
76	4579380,4300000	076	452069,0000000	279,1	405
77	4579380,0000000	077	452059,3300000	281,1	405
78	4579380,7400000	078	452045,1700000	276,5	409
79	4579389,7200000	079	452034,1500000	274,1	405
80	4579396,4400000	080	452018,3400000	273,4	405
81	4579406,5000000	081	452009,0600000	272,9	410
82	4579416,1400000	082	451995,8300000	273,6	417
83	4579419,3300000	083	451980,5600000	272,2	408
84	4579422,5700000	084	451961,5200000	273,4	412
85	4579425,3100000	085	451945,1400000	274,3	410
86	4579437,5500000	086	451953,3900000	271,9	412
87	4579455,3200000	087	451945,0700000	270,0	404
88	4579471,2200000	088	451946,1100000	268,8	403
89	4579486,0000000	089	451942,7100000	266,6	409
90	4579498,7500000	090	451940,0700000	266,2	403
91	4579513,5600000	091	451937,7200000	265,0	403
92	4579526,1100000	092	451934,2200000	263,8	410
93	4579530,9700000	093	451946,4100000	262,6	404
94	4579519,3400000	094	451949,9400000	263,0	403
95	4579507,2800000	095	451953,5000000	264,0	406
96	4579491,9900000	096	451956,4800000	265,2	405
97	4579478,6400000	097	451959,5300000	266,9	406
98	4579453,4700000	098	451956,9900000	269,1	409
99	4579439,9500000	099	451966,5700000	271,7	422
100	4579434,3200000	100	451973,8800000	273,1	404
101	4579445,5300000	101	451976,2800000	270,3	410
102	4579450,7600000	102	451985,9900000	270,5	404
103	4579454,7800000	103	451994,5400000	270,7	400
104	4579443,9400000	104	451988,7800000	271,2	408
105	4579437,0400000	105	451983,3300000	271,9	418
106	4579432,1700000	106	451992,5100000	271,9	411

107	4579428,5100000	107	452004,8800000	272,4	414
108	4579432,6700000	108	452012,3800000	271,5	420
109	4579423,3100000	109	452004,2900000	273,6	398
110	4579427,7800000	110	452012,8600000	273,4	417
111	4579427,6600000	111	452022,3000000	272,7	423
112	4579424,8100000	112	452030,1800000	272,9	415
113	4579420,4400000	113	452020,4200000	273,6	423
114	4579416,5000000	114	452013,7500000	274,1	428
115	4579408,7300000	115	452014,7900000	275,3	412
116	4579412,4800000	116	452020,0100000	275,5	418
117	4579415,3300000	117	452027,9600000	275,5	418
118	4579422,3700000	118	452036,3900000	274,3	409
119	4579429,2600000	119	452045,5800000	273,1	404
120	4579435,7100000	120	452050,7800000	271,9	404
121	4579445,6200000	121	452059,5500000	271,0	404
122	4579457,8500000	122	452053,2500000	271,0	404
123	4579446,9700000	123	452042,4400000	271,5	404
124	4579428,4100000	124	452058,8900000	272,9	404
125	4579449,7900000	125	452017,2500000	271,9	400
126	4579465,0900000	126	451993,8400000	270,0	400
127	4579473,8700000	127	451980,0900000	269,1	404
128	4579484,8800000	128	451972,2100000	267,9	412
129	4579492,1300000	129	451964,3900000	267,4	415
130	4579503,6000000	130	451960,4100000	266,9	411
131	4579517,9900000	131	451955,6800000	266,2	404
132	4579527,7100000	132	451954,4100000	265,4	406
133	4579532,9800000	133	451965,0500000	265,2	403
134	4579520,3800000	134	451967,8100000	265,9	403
135	4579513,3700000	135	451974,9100000	266,4	420
136	4579504,1500000	136	451967,6200000	266,2	400
137	4579509,5200000	137	451989,4700000	267,4	412
138	4579499,8600000	138	452002,4800000	267,6	410
139	4579489,4500000	139	452015,5700000	268,8	410
140	4579435,8600000	A72	451903,9400000	275,5	403
141	4579421,2200000	Ref	452120,3000000	222,4	407
142	4579418,5800000	Ref!	452116,8300000	278,9	399

Όπου LAT και LON είναι οι συντεταγμένες των σημείων, ID είναι ο αριθμός μέτρησης, ALTITUDE είναι το υψόμετρο σε μέτρα και LONGNAME η μέτρηση φυσικού δυναμικού σε mV. Πρώτη παρατήρηση αυτού του πίνακα είναι ότι οι ανωμαλίες φυσικού δυναμικού παρουσιάζουν μικρή διακύμανση, με υψηλότερη τιμή αυτή των 428 mV και χαμηλότερη 390 mV. Η διακύμανση αυτή παρ'ότι είναι μικρή, είναι σημαντική και όπως θα φανεί παρακάτω οφείλεται στις διαφορές γεωθερμικών και γεωλογικών στοιχείων του αντίστοιχου σημείου.

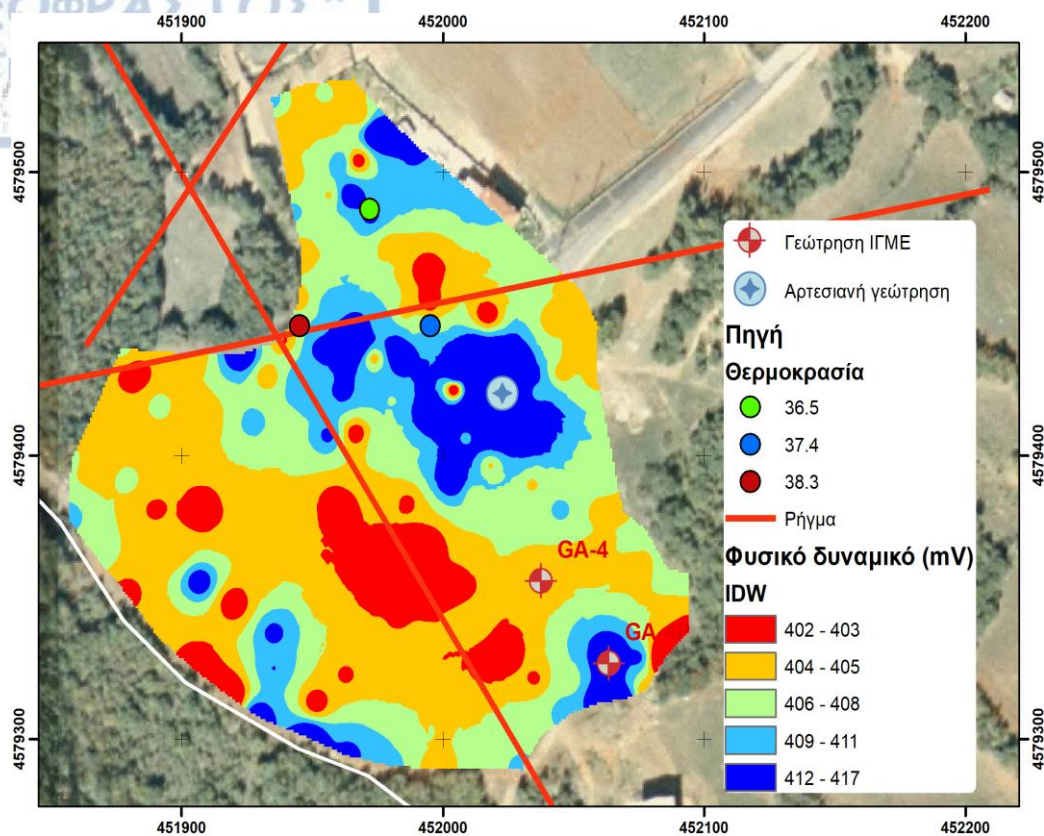
Περνώντας τώρα στην επεξεργασία αυτών των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArcGIS για την δημιουργία χαρτών με σκοπό την προβολή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Οι μετρήσεις φυσικού δυναμικού, επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με τρεις διαφορετικούς τρόπους παρεμβολής του συγκεκριμένου προγράμματος, παρουσιάζοντας ο καθένας με ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Παρεμβολή είναι η πρόβλεψη της τιμής για πυρήνες μιας ψηφιακής εικόνας που πραγματοποιείται από περιορισμένο αριθμό δείγματος σημείου δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη άγνωστων τιμών για οποιοδήποτε δεδομένο γεωγραφικού σημείου όπως υψόμετρο, βροχόπτωση, χημικές συγκεντρώσεις, επίπεδα θορύβου κ.α.

Διαθέσιμες μέθοδοι παρεμβολής είναι οι εξής:

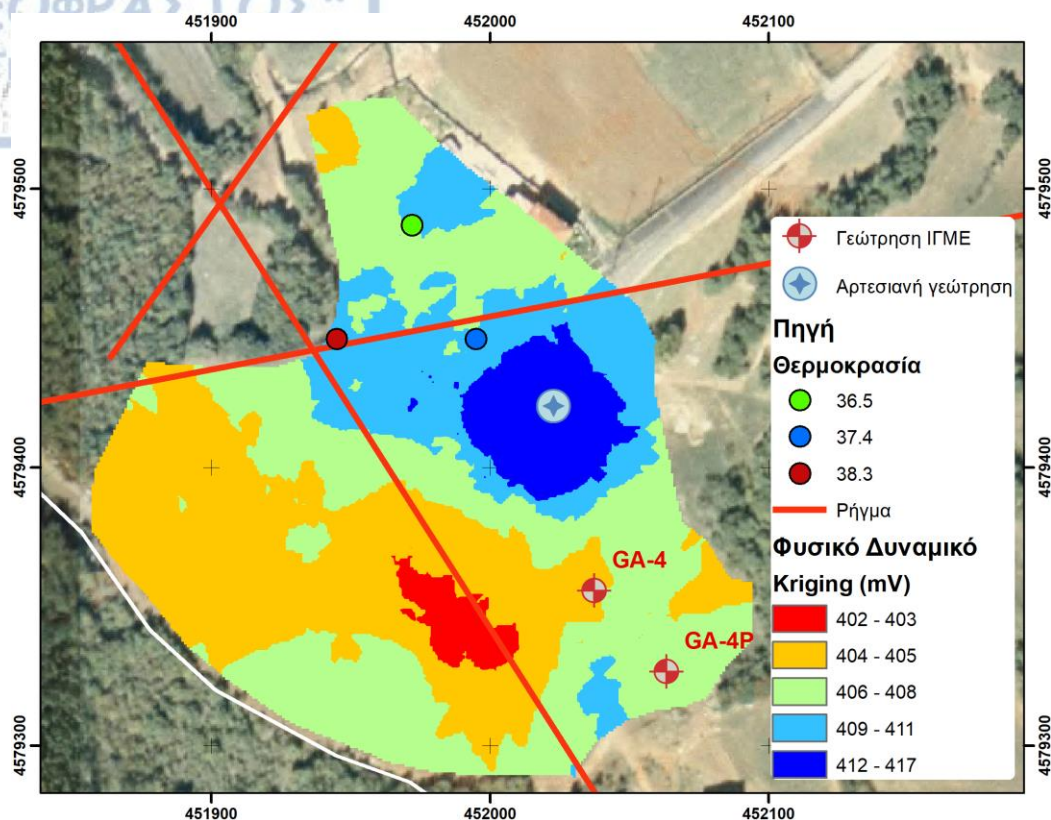
- **Inverse Distance Weighted (IDW).** Η μέθοδος αυτής της παρεμβολής υπολογίζει τις τιμές των πυρήνων από τον μέσο όρο του σημείου δείγματος των δεδομένων στην γειτονική περιοχή κάθε πυρήνα επεξεργασίας. Όσο πιο κοντά είναι ένα σημείο στο κέντρο του πυρήνα που υπολογίζεται, τόσο μεγαλύτερη επιρροή έχει στην διαδικασία υπολογισμού μέσου όρου.
- **Kriging.** Η παρεμβολή αυτή είναι μία ανεπτυγμένη γεωστατιστική διαδικασία που παράγει μία υπολογιζόμενη επιφάνεια από ένα διασκορπισμένο σύνολο σημείων με τιμές z . Πριν την επιλογή της καλύτερης μεθόδου παρεμβολής για την απόδοση μιας επιφάνειας, πρέπει να πραγματοποιείται μία διεξοδική έρευνα χωρικής συμπεριφοράς για το φαινόμενο που αντιπροσωπεύουν οι τιμές z , ειδικά στην μέθοδο Kriging.
- **Natural neighbor.** Αυτή η μέθοδος παρεμβολής, βρίσκει το κοντινότερο υποσύνολο καταχωρούμενων δειγμάτων στο σημείο αναφοράς και δίνει έμφαση σε αυτό, βασισμένη σε ανάλογες περιοχές με παρεμβαλλόμενες τιμές.

Σύμφωνα με αυτές τις τρεις παρεμβολές παραθέτονται τα αποτελέσματα των δεδομένων στην περιοχή μελέτης από τις μετρούμενες τιμές φυσικού δυναμικού (σχήμα 27, 28 και 29).



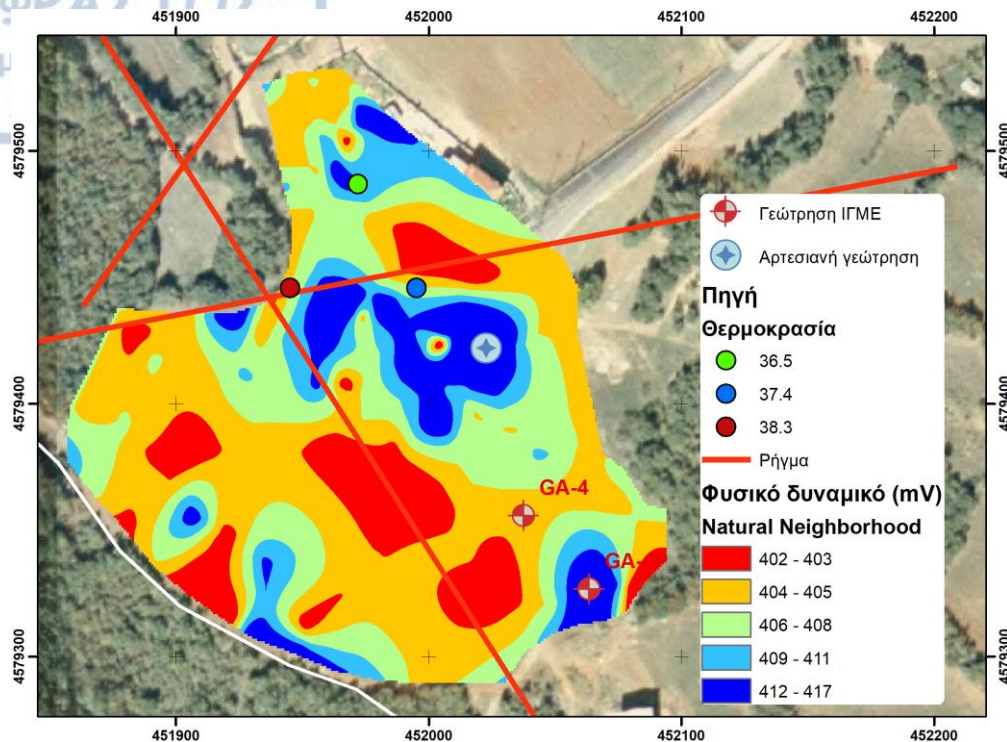
Σχήμα 27 Αποτελέσματα μετρήσεων με την μέθοδο παρεμβολής IDW

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την μέθοδο παρεμβολής IDW. Συγκεκριμένα, φαίνεται η περιοχή που μετρήθηκε με χρωματική διακύμανση ανάλογα με τις αντίστοιχες τιμές φυσικού δυναμικού, όπου το κόκκινο χρώμα δείχνει τις χαμηλότερες τιμές, ενώ το μπλε τις υψηλότερες. Παρατηρείται πως οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώνονται κυρίως γύρω από τις γεωτρήσεις και τις γεωθερμικές πηγές, σε σημεία δηλαδή που υπάρχει ανοδική ροή θερμού νερού. Μεγαλύτερη μάλιστα συγκέντρωση θετικών ανωμαλιών παρατηρείται γύρω από την αρτεσιανή γεώτρηση, όπου η ανοδική ροή θερμού νερού είναι ακόμη εντονότερη. Συνεπώς, όπως ήταν αναμενόμενο οι θετικές ανωμαλίες φυσικού δυναμικού εντοπίστηκαν σε περιοχές με υψηλή θερμική ροή.



Σχήμα 28 Αποτελέσματα μετρήσεων με την μέθοδο παρεμβολής Kriging

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με την μέθοδο παρεμβολής Kriging. Και σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται η μετρούμενη περιοχή με χρωματική διακύμανση ανάλογα με τις τιμές του φυσικού δυναμικού με το κόκκινο χρώμα να δείχνει την χαμηλότερη και το μπλε την υψηλότερη τιμή. Είναι ξεκάθαρες οι διαφορές με την προηγούμενη παρεμβολή, καθώς εδώ φαίνεται μεγαλύτερη συγκέντρωση των υψηλών τιμών φυσικού δυναμικού γύρω από την αρτεσιανή γεώτρηση και τις πηγές και όχι τόσο στις άλλες δύο γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ. Αυτή η μέθοδος δίνει μεγαλύτερη έμφαση στην θετική ανωμαλία του φυσικού δυναμικού λόγω της αρτεσιανής γεώτρησης, δηλαδή λόγω της ανοδικής ροής θερμού νερού. Σε γενικότερα πλαίσια, όμως, οι δύο μέθοδοι παρεμβολής δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα.



Σχήμα 29 Αποτελέσματα μετρήσεων με την μέθοδο παρεμβολής Natural neighbor

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την τελευταία μέθοδο παρεμβολής Natural Neighbor. Για άλλη μια φορά φαίνεται η περιοχή των μετρήσεων με χρωματικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις τιμές φυσικού δυναμικού και συγκεκριμένα το κόκκινο χρώμα να δείχνει την μικρότερη, ενώ το μπλε την μεγαλύτερη τιμή. Σε αυτήν την μέθοδο παρεμβολής, διακρίνονται αρκετές ομοιότητες με την πρώτη μέθοδο (IDW). Οι συγκεντρώσεις των υψηλών τιμών φυσικού δυναμικού κατανέμονται γύρω από τις γεωτρήσεις και τις πηγές συμπαιρόνοντας για ακόμη μία φορά τις θετικές ανωμαλίες σε σχέση με την ανοδική ροή θερμού νερού. Όσον αφορά τις χαμηλότερες τιμές φυσικού δυναμικού, είναι πιθανόν να οφείλονται σε κατεισδύσεις νερού λόγω βροχόπτωσης. Άλλο ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα παρατήρησης, όλων των μεθόδων παρεμβολής, είναι ότι κατά μήκος των ρηγμάτων που αποτελούν διαδρόμους για την ροή του νερού, υπάρχουν τόσο υψηλές όσο και χαμηλότερες τιμές φυσικού δυναμικού.

4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την έρευνα φυσικού δυναμικού που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή Αγκίστρου Σερρών, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα.

Καταρχήν, αποδείχτηκε πως η μέθοδος φυσικού δυναμικού είναι μία αξιόπιστη μέθοδος εφαρμοσμένης γεωφυσικής, όχι μόνο όσον αφορά τις μεταλλευτικές έρευνες αλλά και τις γεωθερμικές έρευνες. Αυτό, επιβεβαιώθηκε με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία συμπίπτουν με τα αναμενόμενα βάση βιβλιογραφικής έρευνας. Είναι μία εύκολη, ανέξοδη και γρήγορης εφαρμογής μέθοδος που πρέπει να χρησιμοποιείται λόγω της ευρέως φάσματος εφαρμογής της.

Όσον αφορά, την διερεύνηση του μηχανισμού λειτουργίας των γεωθερμικών πηγών, συμπαιρένεται ότι αναμένεται υψηλή τιμή θετικής ανωμαλίας σε σημεία πηγών και γεωτρήσεων θερμών νερών λόγω της ανοδικής ροής του νερού.

Επιπλέον, επειδή τα ρήγματα είναι σημεία περατότητας για το νερό και μεταφέρουν το νερό σε βάθος μπορεί να επηρεάσουν τις τιμές φυσικού δυναμικού όπου αυτά υπάρχουν. Έτσι, μπορεί να γίνει μια πιθανή πρόβλεψη ρήγματος ανάλογα με τις τιμές των ανωμαλιών. Στη περίπτωση της περιοχής μελέτης, μπορεί να γίνει η υπόθεση ύπαρξης ενός ρήγματος αχαρτογράφητου στην περιοχή της πηγής με θερμοκρασία 36.5 °C (βλέπε σχήμα 27, 28, 29).

5 Βιβλιογραφία

- Apostolopoulos G., Louis I., Lagios E.**, 1997, The self – potential method in the geothermal exploration of Greece, *Geophysics*, vol. 62, no 6.
- Corry, C. E.**, 1985, Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization: *Geophysics*, 50, 1020-1034.
- Corwin, R. F.**, 1990, The Self-Potential Method for Environmental and Engineering Applications, *Investigations in Geophysics No. 5*, Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of exploration Geophysicists.
- Corwin, R. F.**, 1976a, Self-potential exploration for geo- thermal reservoirs: *Proc., 2nd C.N. Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources*. San Francisco, CA. U.S. Government Print. Of., Washington, D.C., v. 2, p. 937-945.
- 1976b, Offshore use of the self-potential method: *Geophys. Prosp.* v. 24, no. 1, p. 79-90.
- Corwin, R. F., and Conti, U.**, 1973. A rugged silver-silver chloride electrode for field use: *Rev. Sci. Instrum.*, v. 44, no. 6, p. 70X-71 1.
- Corwin, R. F., and Hoover, D. B.**, 1979, The self potential method in geothermal exploration : *Geophysics*, 44, 226-245
- Corwin R. F., and Butler, D. K.**, 1989, Geotechnical applications of the self-potential method, Rept 3 : Development of self-potential interpretation techniques for seepage detection : *Tech. Rep. REMR-GT-6*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC
- Dorfman, M. H., Oskay, M. M., and Gaddia, M. P.**, 1977, Self-potential profiling-a new technique for determination of heat movement in a thermal oil recovery field: Preprint: presented at 52nd ann. meet., SPE of AIME, Denver, CO.
- Ewing, S.**, 1939, The copper-copper sulfate half-cell for measuring potentials- in the earth: *Am. Gas Assoc. Proc.* 624.
- Fytikas, M., Andritsos, N., Karydakis, G., Kolios, N., Mendrinou, D., and Papachristou, M. (2000)**. Geothermal exploration and development activities in Greece during 1995-1999, *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.*, pp. 199-208.
- Grant, F. S., and West. G. F.**, 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*: New York. McGraw-Hill Book Co., Inc
- Heikes, R. R., and Ure, R. W.**, 1961. *Thermoelectricity: Science and engineering*: New York. Interscience.
- Hoegervorath, G. H. T. C.**, 1975, Fundamental noise affecting signal-to-noise ratio of resistivity surveys: *Geophys. Prosp.*, v. 23. no. 2, p. 380-390
- Ives, D. J. G., and Janz, G. J.**, 1961, *Reference electrodes* : Academic Press Inc.
- Ishido, T. and Mizutani, H.**, 1981, 'Experimental and Theoretical Basis of Electrokinetic Phenomena in Rock-Water Systems and its Applications to Geophysics', *J. Geophys. Res.* 86, 1763.
- Journiaux, L., Bernard, M. L., and Pozzi, J. P.**, 2000, 'Streaming Potential in Volcanic Rocks from Mount Pelée', *J. Geophys. Res.* 105, 8319.

Karydakīs, F., Arvanītis, A., Andritsos, N., and Fytikas M. (2005). Low enthalpy geothermal fields in the Strymon basin (Northern Greece), Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, 1-12.

Keller, G. V., and Frischknecht, F. C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting: New York. Pergamon Press.

Koester, J. P., Butler, D. K., Cooper, S. S., and Llopis, J. L., 1984, Geophysical investigations in support of Clearwater Dam comprehensive seepage analysis : U.S. Army Corps of Engrs. Waterways Experiment Station Misc. Paper GL-84-3.

MacInnes. D. A., 1961, The principle\ of electrochemistry: New York, Dover Publishing Co

Mareshcot L., Electrical Surveying: Self Potential method, Swiss federal institute of technology Zurich.

Morrison, H. F., Corwin, R. F., Harding, R., and de Moully, G., 1979a , Interpretation of self-potential data from geothermal areas : Semi-annual technical progress rep., April 30, USGS contract #14-08-0001-16546, Univ. of Calif., Berkeley.
-1979b, Interpretation of self-potential data from geothermal areas : Semi-annual technical progress rep., Sept.30, USGS contract #14-08-0001-16546, Univ. of Calif., Berkeley

Nourbehecht, B., 1963, Irreversible thermodynamic effects in inhomogeneous media and their application in certain geoelectric problems: Ph.D. thesis, M.I.T.

Nyquist, J. E., and Corry , C. E., 2002, Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics. The Leading Edge, 21(5), 446-451.

Oyamada, A., Oshima, H., Nishida, Y., Goto, A., and Furukawa, H., 1996, 'Self-Potential Studies in Volcanic Areas (4). An Attempt to Estimate the In-Situ Value of t

Parasnis. D. S., 1966, Mining geophysics: New York, Elsevier.

-1970, Some recent geoelectric measurements in the Swedish sulfide ore fields illustrating scope and limitations of the methods concerned: Mining and Ground-water Geophy.. 1967, Geol. Survey of Canada, Ottawa, Econ. Geol. rep. no. 26, p. 290-301

Poldini, E., 1939, Geophysical exploration by spontaneous polarization methods: Mining magazine, v. 60, p. 22-27.

Rizzo E., Suski B., Revil A., Self-potential signals associated with pumping test experiments, Journal of geophysics research, vo. 109, 2004.

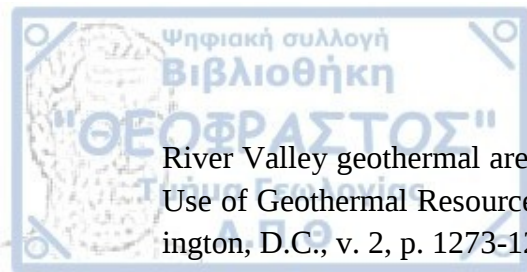
Sato, M., and Mooney, H. M., 1960, The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials: Geophysics, v. 25, no. I, p. 226-249.

Semenov, A. S., 1974, Electrical prospecting with the method of the natural electric field: Leningrad, Nedra.

Sill, W. R., and Bodell, J., 1977, Thermal gradients and heat flow at Roosevelt Hot Springs: ERDA Technical rep., Vo. 77-3, Contract EY-76-S-07-1601, Univ. of Utah, Salt Lake City, Utah.

Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, Applied geophysics : Cambridge Univ. Press

Williams. P. L., Mabev, D. R., Zohdy, A. A. R., Acker- mann, H., Hoover, d. B , Pierce, K.-L., and Oriel, S. S., 1976, Geology and geophysics of the southern Raft



River Valley geothermal areas, Idaho, USA: Proc. 2nd U.N. Symp. on the Devel. and Use of Geothermal Resources, San Francisco, CA. U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., v. 2, p. 1273-1282

Zlotnicki, J. and Nishida, Y., 2003, Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes , Surveys in geophysics 24 : 291-338

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ελληνική Θερμαλιστική Εταιρεία, 2008, Υδρογεωλογική-Γεωλογική μελέτη για την αναγνώριση της θερμής πηγής Αγγίστρου Σερρών ως Ιαματικής.

Μουντράκης, Δ. Μ., 2010, Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας, Θεσσαλονίκη: UNIVERSITY STUDIO PRESS.

Παπαζάχος Βασίλης Κ., 1996, Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.

Φυτίκας, Μ. , Ανδρίτσος, Ν. , 2004, Γεωθερμία, Θεσσαλονίκη : Εκδόσεις Τζιόλα.