



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΒΟΥΛΑΝΑΣ Α. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΒΕΒΑΙΩΜΕΝΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΧΑ-
ΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΑΡΙΣΤΗΝΟ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΑΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2017





ΒΟΥΛΑΝΑΣ Α. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΒΕΒΑΙΩΜΕΝΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΧΑ-
ΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΑΡΙΣΤΗΝΟ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΑΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέποντες

Αναπληρωτής Καθηγητής Κώστας Βουδούρης
Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, ΕΔΙΠ



© Δημήτριος Α. Βουλανάς, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας,
2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

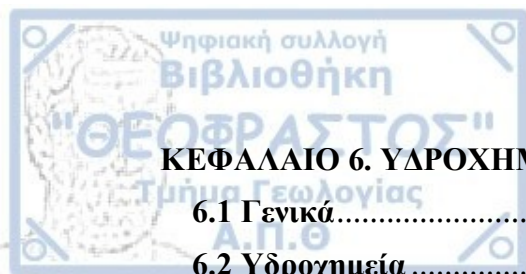
ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΒΕΒΑΙΩΜΕΝΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΧΑ- ΜΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ ΑΡΙΣΤΗΝΟ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ο-
λοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθή-
κευση 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 στους συγγραφείς.

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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1 Γενικά.....	2
1.2 Γεωθερμικοί Πόροι στην Ελλάδα	2
1.3 Γεωθερμικοί Πόροι στην Βόρεια Ελλάδα	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ –	
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ.....	6
2.1 Γενικά.....	6
2.2 Γεωλογική Δομή	6
2.3 Τεκτονικό Καθεστώς	10
2.4 Υδρογεωλογικές Συνθήκες	12
2.5 Γεωθερμικές Συνθήκες.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ -	
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ.....	17
3.1 Γενικά.....	17
3.2 Περίοδος 1988-1994.....	17
3.2.1 1988-1990.....	17
3.2.2 1993-1994 (Δημοσυνεταιριστική ΕΒΡΟΣ Α.Ε.-Κοινότητα Λουτρού). 18	
3.4 Περίοδος 2000-2005 (Ιδιώτες)	20
3.4.1 Γεώτρηση «ΔΗΜΗΤΡΑ» (DIM-P).....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ	
ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΑΑ-6Ρ.....	22
4.1 Γενικά.....	22
4.2 Διατρητικές Φάσεις	22
4.3 Δειγματοληψία και Κατασκευή Λιθολογικής Στήλης ΑΑ-6Ρ.....	26
4.4 Περιφραγματική Σωλήνωση και Τσιμέντωση	28
4.5 Διενέργεια Διαγραφιών (Logging).....	29
4.5 Τοποθέτηση Φιλτροσωλήνων, Τυφλών Σωλήνων και Χαλίκωση	31
4.6 Ανάπτυξη με Εισπίεση Αέρα (Airlift)	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ	
ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΑΑ-6Ρ	33
5.1 Γενικά.....	33
5.2 Προαντλήσεις στη γεώτρηση ΑΑ-6Ρ	36
5.3 Δοκιμαστική άντληση κατά βαθμίδες.....	38
5.4 Δοκιμαστική άντληση σταθερής παροχής.....	39



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ	41
6.1 Γενικά.....	41
6.2 Υδροχημεία	41
6.3 Έλεγχος Σχηματισμού Επικαθίσεων Ασβεστίτη	44
6.4 Γεωθερμομετρία	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΝΕΑ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	48
7.1 Γενικά.....	48
7.2 Μετρήσεις	48
7.3 Επεξεργασία Θερμομετρικών Δεδομένων.....	48
7.3.1 Γενικά	48
7.3.2 Διαγράμματα Γεωθερμικών Βαθμίδων Γεωτρήσεων Βεβαιωμένου	
Γεωθερμικού Πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης.....	48
7.3.3 Επιλογή Μεθόδου Γεωστατιστικής Επεξεργασίας.....	52
7.3.4 Αποτελέσματα-Συζήτηση	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	57
Ελληνική Περίληψη	60
Αγγλική Περίληψη (Abstract)	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	62
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	62
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	i



Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία, ανατέθηκε από τους διδάσκοντες του μαθήματος «Γεωθερμία» Αν. Καθηγητή Κων/νο Βουδούρη και Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, ΕΔΙΠ του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας Αρίστηνου Αλεξανδρούπολης, όπου γίνεται σημαντική προσπάθεια αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας από τον Δήμο Αλεξανδρούπολης. Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας υπήρξε στενή συνεργασία με τον ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ» και ειδικότερα με το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων που έχει αναλάβει τον σχεδιασμό των γεωτρήσεων, και συγκεκριμένα με τον υπεύθυνο γεωλόγο, Δρ. Πασχάλη Δαλαμπάκη.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των δεδομένων που προέκυψαν από την πρόσφατη γεωθερμική διερεύνηση στην περιοχή μελέτης και την ανόρυξη νέας, σχετικά μεγάλου βάθους, γεωθερμικής γεώτρησης. Περιλαμβάνονται επίσης και τα πιο σημαντικά αποτελέσματα των προγενέστερων ερευνών που έλαβαν χώρα στο γεωθερμικό πεδίο του Αρίστηνου.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έγινε παρακολούθηση όλων των σταδίων ανόρυξης, ανάπτυξης και δοκιμαστικής άντλησης της νέας γεώτρησης, συλλογή βιβλιογραφικών στοιχείων και δεδομένων καθώς και εκτεταμένη επεξεργασία τους με κατάλληλα εξειδικευμένα λογισμικά.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την Δρ. Μαρία Παπαχρήστου, για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, τις διορθώσεις και τα εποικοδομητικά σχόλιά της.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Πασχάλη Δαλαμπάκη, Γεωλόγο-Γεωθερμικό για τη δυνατότητα που μου παρείχε να παρακολουθήσω από κοντά τις εργασίες κατασκευής μιας γεωθερμικής γεώτρησης, για τις επιστημονικές συμβουλές του και την καθοδήγησή του, καθώς και τους υπόλοιπους ερευνητές του Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων του Ε.Λ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ» για τις χρήσιμες και πολυάριθμες συζητήσεις που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω το Γραφείο Ενέργειας του Δήμου Αλεξανδρούπολης για τη πολύτιμη και ευχάριστη φιλοξενία του.

Θεσσαλονίκη 11/7/2017

Βουλανάς Α. Δημήτριος (5093)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Ο όρος «Γεωθερμία», στη διεθνή βιβλιογραφία, αντιστοιχεί στον εφαρμοσμένο επιστημονικό κλάδο που απαρτίζεται από όλο φάσμα της έρευνας και περιλαμβάνει την μελέτη της γήινης ροής θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στα βαθύτερα, τον τρόπο τη κυκλοφορίας των υπόγειων θερμών ρευστών συνάμα με τις γεωλογικές συνθήκες, καθώς και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, μέχρι τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες ερευνητικές και παραγωγικές γεωτρήσεις (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004).

Η γεωθερμική ενέργεια είναι ένας φυσικός πόρος της Γης, που βρίσκεται στο εσωτερικό της ως θερμότητα, μία από τις πολυάριθμες φυσικές μορφές ενέργειας. Αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας υψηλής σημασίας, πλεονεκτώντας έναντι άλλων πηγών ενέργειας, ανανεώσιμων και μη, λόγω της άμεσης διαθεσιμότητάς της, του χαμηλού κόστους λειτουργίας & συντήρησης των μονάδων, των ελάχιστων έως μηδενικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της ικανότητάς της για την κάλυψη πολλών ενεργειακών αναγκών σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η μόνη προϋπόθεση για την εκμετάλλευσή της είναι να υπάρχουν οι κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες (οικονομικά βάθη ταμιευτήρων) σε συνδυασμό με αξιόλογες ποσότητες θερμικού φορτίου, ώστε να εξασφαλίζεται ένα συγκριτικό, ανταγωνιστικό και βιώσιμο οικονομικό αποτέλεσμα.

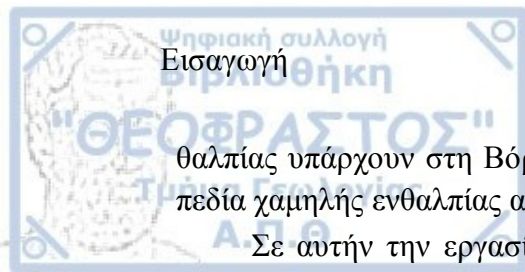
Κυριότερος στόχος της γεωθερμικής έρευνας είναι η εύρεση και η μελέτη των περιοχών με θετική γεωθερμική ανωμαλία, η διερεύνηση των γεωθερμικών συνθηκών και η εξεύρεση των κατάλληλων μεθόδων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας.

Η Ελλάδα, λόγω της γεωγραφικής της θέσης και κυρίως λόγω γεωτεκτονικού καθεστώτος, κατέχει αξιόλογο γεωθερμικό δυναμικό με σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης. Παρόλα αυτά όμως, μέχρι σήμερα, οι εφαρμογές της γεωθερμίας στην Ελλάδα είναι περιορισμένες και αφορούν αποκλειστικά τη χρήση ρευστών χαμηλής ενθαλπίας και την αβαθή γεωθερμία.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εκμετάλλευση των Α.Π.Ε. συμπεριλαμβανομένης της γεωθερμικής ενέργειας, αποτελεί έναν από τους κυριότερους στόχους παγκοσμίως και αφορά την παραγωγή θερμικής ενέργειας αλλά και την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

1.2 Γεωθερμικοί Πόροι στην Ελλάδα

Η αυξημένη ροή θερμότητας, εξαιτίας της έντονης τεκτονικής και του μαγματισμού, δημιούργησε θετικές θερμικές ανωμαλίες σε πολλές περιοχές της Ελλάδας, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που ξεπερνούν πολλές φορές τους $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Σημαντικά γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν επιβεβαιωθεί στο Ενεργό Ηφαιστειακό Τόξο του Νοτίου Αιγαίου, ενδείξεις για συστήματα μέσης εν-



Εισαγωγή

θαλπίας υπάρχουν στη Βόρεια Ελλάδα και σε νησιά του Βορείου Αιγαίου, ενώ τα πεδία χαμηλής ενθαλπίας αναπτύσσονται σε όλη σχεδόν την επικράτεια της χώρας.

Σε αυτήν την εργασία το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης (Θράκη, ΒΑ Ελλάδα). Τα γεωθερμικά πεδία της Βόρειας Ελλάδας παρουσιάζονται συνοπτικώς στο επόμενο υποκεφάλαιο.

1.3 Γεωθερμικοί Πόροι στην Βόρεια Ελλάδα

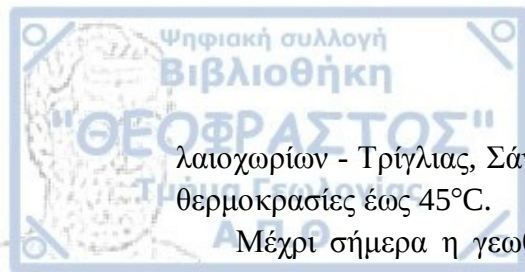
Στη Βόρεια Ελλάδα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός γεωθερμικών πεδίων (Σχ. 1) χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασία ρευστών 25-90°C. Οι γεωθερμικοί ταμιευτήρες στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκονται μικρό βάθος, της τάξεως των 30-500m, και αναπτύσσονται στις μεταορογενετικές λεκάνες της προαναφερθείσας περιοχής (π.χ. λεκάνη του Στρυμόνα, Ξάνθης-Κομοτηνής, Έβρου) και στη νήσο της Σαμοθράκης.

Σε μεγαλύτερα αλλά και πάλι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα βάθη, έως 2000m, οι γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες καθιστούν ικανή την ύπαρξη συστημάτων μέσης ενθαλπίας ($T=90-150^{\circ}\text{C}$), χωρίς αποκλείεται η προοπτική για την παρουσία ρευστών υψηλής ενθαλπίας.

Η θετικές γεωθερμικές ανωμαλίες στις λεκάνες της Βόρειας Ελλάδας δημιουργήθηκαν λόγω της αυξημένης ροής θερμότητας στην περιοχή που με τη σειρά της οφείλεται στην εκτατική τεκτονική και τις πρόσφατες (Τεταρτογενείς) και σχετικά ρηχές μαγματικές διεισδύσεις (Κολιός κ.ά., 2005).

Σύμφωνα με μια συντηρητική εκτίμηση των Φυτίκα και Ανδρίτσου (2004), μόνο από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις των γεωθερμικών πεδίων στην Ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη μπορεί να παραχθεί θερμική ισχύς μεγαλύτερη από 100MWt ετησίως. Αυτό σημαίνει σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων, δεδομένου ότι τα 100MWt αντιστοιχούν σε περισσότερους από 90000 ΤΙΠ (Τόνους Ισοδύναμου Πετρελαίου).

Κάποια από τα πιο σημαντικά πεδία στη Βόρεια Ελλάδα βρίσκονται στο Ερατεινό – Χρυσούπολης (Καβάλα) και στο Νέο Εράσμιο (Ξάνθης) με ρευστά έως 70°C. Στη Νέα Κεσσάνη (Ξάνθης) τα θερμικά νερά έχουν θερμοκρασία μέχρι και 82°C. Στο Τυχερό του Έβρου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες (έως 37°C) αλλά οι παροχές είναι πολύ μεγάλες. Η ύπαρξη γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας επιβεβαιώθηκε και στις περιοχές της λίμνης Μητρικού και στις Σάππες (Έβρος) με $T=40^{\circ}\text{C}$. Στη Σαμοθράκη (Θέρμα) μία ρηχή γεώτρηση στο χώρο την ιαματικών λουτρών συνάντησε ρευστά με θερμοκρασία που ξεπερνά τους 100°C. Πολλά γεωθερμικά πεδία έχουν εντοπιστεί και επιβεβαιωθεί στη λεκάνη του Στρυμόνα με μέγιστη θερμοκρασία τους 75°C. Δυτικότερα, αναπτύσσονται τα γεωθερμικά πεδία Ν. Απολλωνίας και Λαγκαδά (Λεκάνη Μυγδονίας, Νομός Θεσ/νίκης) με θερμοκρασίες 58°C και 40°C, αντίστοιχα, καθώς και το γεωθερμικό πεδίο της Λεκάνης του Ανθεμούντα με θερμοκρασίες 25-40°C. Θερμά ρευστά έχουν εντοπιστεί και στην περιοχή της Νυμφόπετρας (39-44°C), πάλι στην περιοχή της Μυγδονίας Λεκάνης. Στην περιοχή της Χαλκιδικής έχουν αναγνωριστεί τα γεωθερμικά πεδία Ε-



λαιοχωρίων - Τρίγλιας, Σάνη - Αφύτου και Αγίας Παρασκευής στην Κασσάνδρα με θερμοκρασίες έως 45°C.

Μέχρι σήμερα η γεωθερμική ενέργεια των παραπάνω περιοχών αξιοποιείται κυρίως στον αγροτικό τομέα, για θέρμανση θερμοκηπίων, ξήρανση αγροτικών προϊόντων, υδατοκαλλιέργειες κ.λ.π. Τα γεωθερμικά ρευστά χρησιμοποιούνται για ιαματικούς σκοπούς στα πεδία Ν. Απολλωνίας, Λαγκαδά (Λεκάνη Μυγδονίας), Αγίας Παρασκευής (Χαλκιδική), Νιγρίτας, Άγγιστρου, Σιδηρόκαστρου (Νόμος Σερρών). Στη Λουτρόπολη της Νέα Απολλωνίας τα γεωθερμικά ρευστά χρησιμοποιούνται και για τη θέρμανση των κτιριακών εγκαταστάσεων.

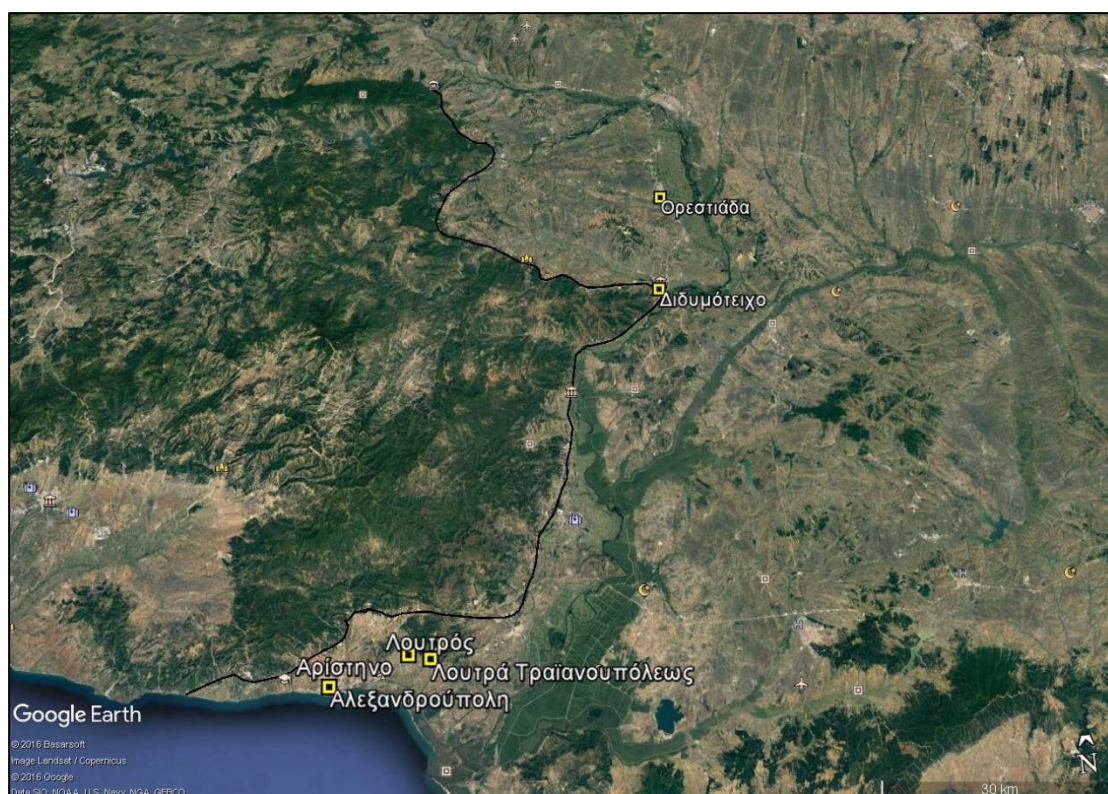


5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ – ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

2.1 Γενικά

Το γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας του Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης, βρίσκεται μεταξύ των χωριών Αρίστηνου και Δωρικού και τοποθετείται σε ένα μικρό μέρος της εκτεταμένης ιζηματογενούς λεκάνης του ποταμού Έβρου. Η λεκάνη του Έβρου μαζί με τη λεκάνη Ορεστιάδας αποτελούν τις ανατολικότερες Τριτογενείς λεκάνες των Εσωτερικών Ελληνίδων, καλύπτοντας συνολική έκταση άνω των 1.700 km² (Σχ. 2).



Σχήμα 2 - Δυτικά Όρια Λεκάνης Έβρου – Ορεστιάδας Εντός Ελληνικού Χώρου (μαύρη γραμμή)

Η λεκάνη του Έβρου έχει έκταση 700 km² και αναπτύσσεται στο επιηπειρωτικό και νότιο τμήμα της Ροδοπικής ζώνης. Τα δυτικά όρια της λεκάνης του Έβρου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Το μέγιστο πάχος των ιζημάτων της είναι 3km, τα οποία αποτέθηκαν ασύμφωνα είτε σε Μεσοζωϊκά πετρώματα είτε σε αμφιβολίτες, γνευσίους και οφειόλιθους της Ροδοπικής μάζας.

2.2 Γεωλογική Δομή

Στην περιοχή επικρατούν τα πετρώματα της Ροδοπικής μάζας (γνεύσιοι, αμφιβολίτες), ενώ η λεκάνη του Έβρου περιβάλλεται από πετρώματα της ενότητας της Άσπρης Βρύσης-Χορτιάτη της Περιροδοπικής γεωτεκτονικής ζώνης. Στα δυτικά η λεκάνη ορίζεται από το φυλλιτικό υπόβαθρο (Σειρά Μάκρης), αποτελούμενο

από σερικιτικούς και αργιλικούς σχιστόλιθους Ιουρασικής – Κρητιδικής ηλικίας. Στα βόρεια επικρατεί το ίδιο πετρολογικό καθεστώς με εμφάνιση πετρωμάτων της σειράς Μάρκης, αποτελούμενη κυρίως από Κρητιδικής ηλικίας αργιλικούς σχιστόλιθους, μάργες, χαλαζίτες και ανθρακικά πετρώματα. Σημαντική εξάπλωση παρουσιάζουν και οι διαβάσεις (δολερίτες, σπηλίτες) αποτελώντας το υπόβαθρο της Τριτογενούς λεκάνης (Μουντράκης, 2010).

Προς τα Νότια και μέχρι το θαλάσσιο χώρο αναπτύσσεται πλήρως όλη η ιζηματογενής λεκάνη, από τα παλαιότερα Παλαιογενή ιζήματα έως τις σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, με ενδιάμεσες παρεμβολές από μαγματικά επεισόδια υπό μορφή δόμων που συνοδεύονται από πυροκλαστικά (λατυποπαγή, ιγκνιμβρίτες), τα οποία διακόπτουν την ιζηματογενή αλληλουχία (Μουντράκης, 2010).

Η Τριτογενής ηφαιστειακή δραστηριότητα της περιοχής συνδέεται με έντονα γεωδυναμικά φαινόμενα, ως αποτέλεσμα της σύγκλισης της ωκεάνιας πλάκας του ωκεανού της Τηθύος με την Ευρασιατική (Μουντράκης, 2010). Η ηφαιστειότητα είναι ασβεσταλκαλικού τύπου έως υψηλού καλίου ασβεσταλκαλικού, με ορισμένες εμφανίσεις σωσωνιτικού χαρακτήρα. Έχει ηλικία από 20 έως 33 Ma, γεγονότα που υποδηλώνουν ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια (Christofides et al, 2004).

Η στενή σχέση μεταξύ ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων, τεκτονικής, ηφαιστειότητας και ιζηματογένεσης παίζει σημαντικό ρόλο στη γένεση και εγκαθίδρυση θερμικών ανωμαλιών και υδροθερμικών συστημάτων χαμηλής ή και υψηλής ενθαλπίας και γενικά δημιουργίας συνθηκών υψηλής ροής θερμότητας (Φυτίκας και Ανδρίτσος, 2004).

Στην περιοχή μεταξύ Αλεξανδρούπολης και Σουφλίου, τα ηφαιστειακά προϊόντα αποτελούνται κυρίως από πυροκλαστίτες, τόφφους και τοφφίτες που εναλλάσσονται με τα ιζήματα του Πριαμπονίου και του Ολιγοκαίνου, ενώ πολλοί ιγκνιμβρίτες συναντώνται κυρίως στην περιοχή της Δαδιάς (ΒΑ της Αλεξανδρούπολης). Στην εξωτερική πλευρά της λεκάνης τα πυροκλαστικά προϊόντα είναι λιγότερα, ενώ αυξάνουν οι λάβες και οι ηφαιστειακοί δόμοι, μερικοί από τους οποίους είναι ρυολιθικής σύστασης (Κολιός κ.ά, 2001).

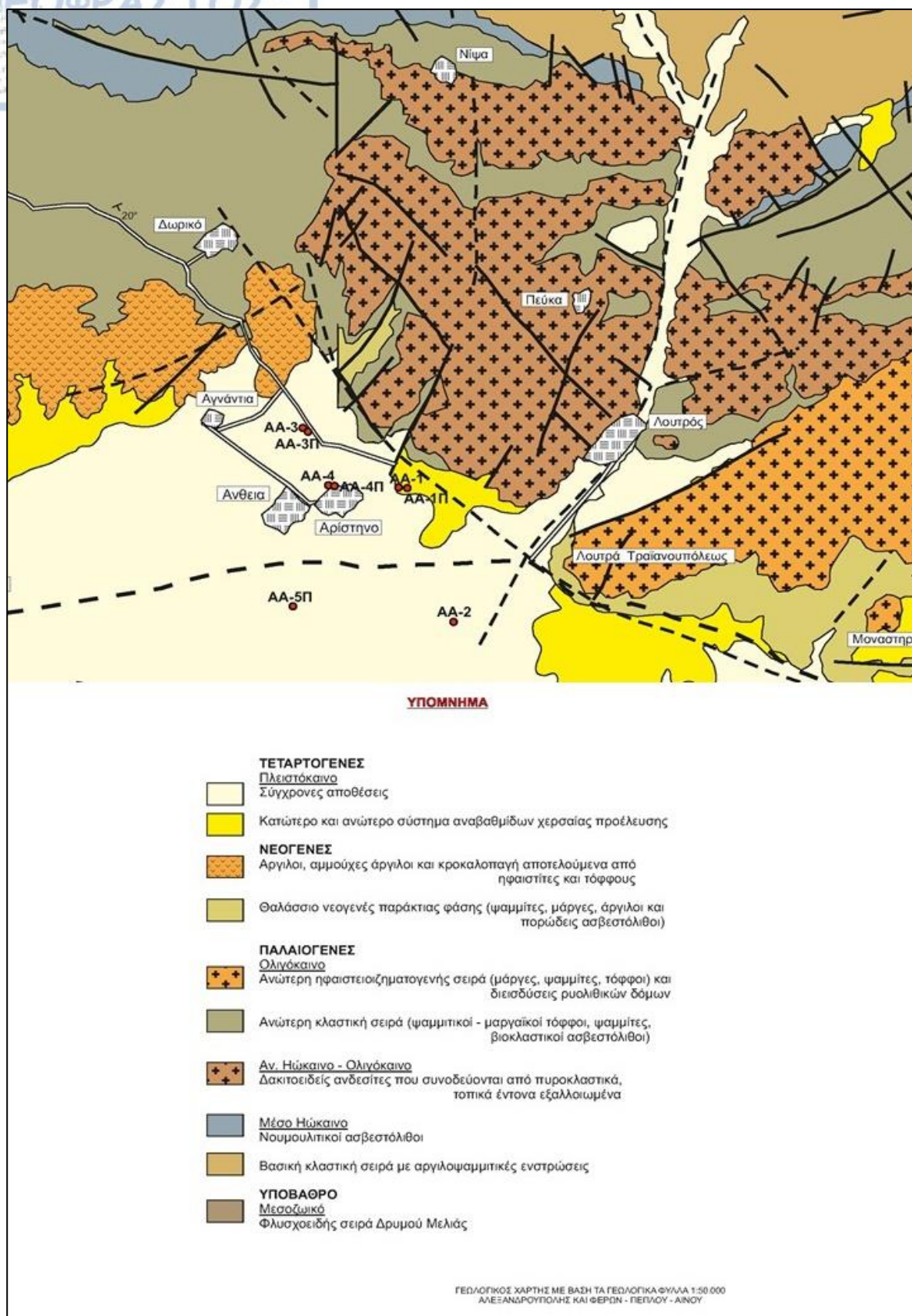
Πιο συγκεκριμένα, στο Μέσο-Άνω Ηώκαινο εμφανίζεται ηφαιστειακή – μαγματική δράση με οικοδομήματα ανδεσιτικής σύστασης ασβεσταλκαλικού τύπου, ρεύματα λάβας με άφθονες πυροκλαστικές αποθέσεις, κυρίως παράκτιες και εναέριες, όπως ιγκνιμβρίτες, τόφφοι, τοφφίτες και ηφαιστειακά λατυποπαγή, τοπικά έντονα εξαλλοιωμένα, μαζί με ορισμένα ανδεσιτικά πετρώματα του Πριαμπονίου, που εμφανίζονται στο ύψος της Δαδιάς και των Φερρών (Christofides et al, 2004). Στρωματογραφικά αποτελούνται από μία σειρά πυροκλαστικών στρωμάτων στο κατώτερο τμήμα και κροκαλοπαγή ηφαιστειακών υλικών που συνδέονται τοπικώς με λαχάρ. Στο ανώτερο τμήμα, οι ροές λάβας κυριαρχούν και υπέρκεινται μίας ιγκνιμβριτικής ακολουθίας. Αυτός ο τύπος ορογενετικής ηφαιστειότητας που διήρκεσε και σε όλο το Ολιγόκαινο, εναλλάσσεται με μολασσικά ιζήματα ψαμμιτομαργαϊκού και ασβεστοψαμμιτικού τύπου (Christofides et al, 2004).

Στο Ολιγόκαινο η ηφαιστειότητα εξελίσσεται και αναπτύσσεται νοτιότερα μια έντονη ρυολιθικού τύπου δραστηριότητα, με δόμους όξινης σύστασης, περλιτι-

κής υφής τόφφους και τοφφίτες. Προϊόντα της σειράς αυτής εντοπίστηκαν σε βάθη 400m σε ερευνητικές γεωτρήσεις του Ι.Γ.Μ.Ε (Κολιός κ.ά, 2001).

Στην περιοχή του Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης, όπως παρουσιάζεται στο γεωλογικό χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Φύλλο Φέρρες-Πέπλος-Αίνοος, 2001, κλίμακα: 1:50.000, Σχ. 3 και στο Σχήμα Π2.2.1 του Παραρτήματος) συναντώνται οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί, από τους νεότερους προς του παλαιότερους:

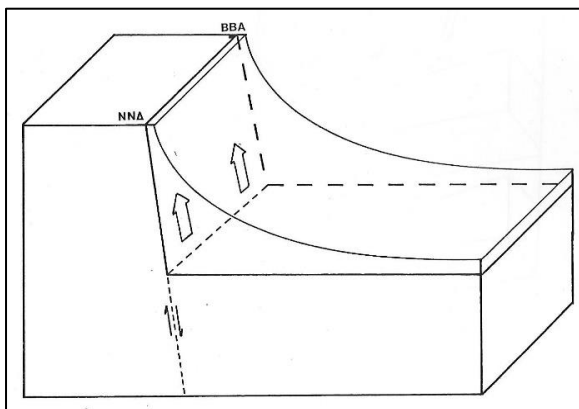
- Πλευρικά κορήματα: συνήθως συγκολλημένα, αποτελούμενα κυρίως από θραύσματα μαργαϊκού ασβεστόλιθου.
- Σύγχρονες αποθέσεις χειμάρρων – αλλούβια: κροκάλες, χαλίκια και κατά θέσεις άμμοι (Ολόκαινο)
- Κατώτερη βαθμίδα του κατώτερου συστήματος αναβαθμίδων: άργιλοι, αμμούχες άργιλοι, κροκάλες και χαλίκια (Ολόκαινο)
- Κατώτερο σύστημα αναβαθμίδων: Ερυθρές έως αργιλούχες άμμοι, με εναλλαγές στρωμάτων από κροκάλες και χαλίκια ή και διάσπαρτα χωρίς αργιλώδες κάλυμμα. Μερικές φορές παρατηρούνται διασταυρούμενες στρώσεις (Πλειστόκαινο χερσαία φάση)
- Παράκτια φάση Νεογενούς: Πορώδεις λευκοί ασβεστόλιθοι πλούσιοι σε κλαστικά υλικά, κατά θέσεις ωολιθικοί, ανοιχτόχρωμοι ψαμμίτες, μάργες, άργιλοι που επικάθονται επικλινώς σε παλαιότερα στρώματα ή ηφαιστίτες τριτογενούς ηλικίας (Ανώτερο Μειόκαινο)
- Μολασσικά ιζήματα: Εναλλαγές αργίλων μαργών και λεπτοψαμμιτών, ορίζοντες λιγνιτών και όξινων τόφφων, τοφφιδίων, υφάλμυρης φάσης (Ολιγόκαινο)
- Ρυόλιθοι: Κύρια μάζα, υαλώδης έως υποκρυσταλλική με μικρολιθικό ιστό και περλιτική ή ρευστική υφή (Ολιγόκαινο)
- Ψαμμιτομαργαϊκή - Πυροκλαστική φάση: Μάργες που εναλλάσσονται ή μεταβαίνουν σε ψαμμιτικές μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, σε ανώτερα τμήματα εμφανίζονται τόφφοι έως τοφφίτες, ενδιάμεσης ηφαιστειότητας, ορίζοντας στρωματογραφικά τη μετάβαση Πριαμπονίου - Ολιγόκαινου (Ανώτερο Ηώκαινο - Πριαμπόνιο)
- Δακτοειδής Ανδεσίτες Πριαμπονίου (Ηώκαινο)
- Ανδεσίτες Λουτησίου, Πριαμπονίου (Ηώκαινο)



Σχήμα 3 – Απόσπασμα από Γεωλογικού Χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε 2001 – Ευρύτερη Περιοχή Αρίστηνου Κλίμακα: 1:50.000 (Κόλλιος κ.ά, 2001)

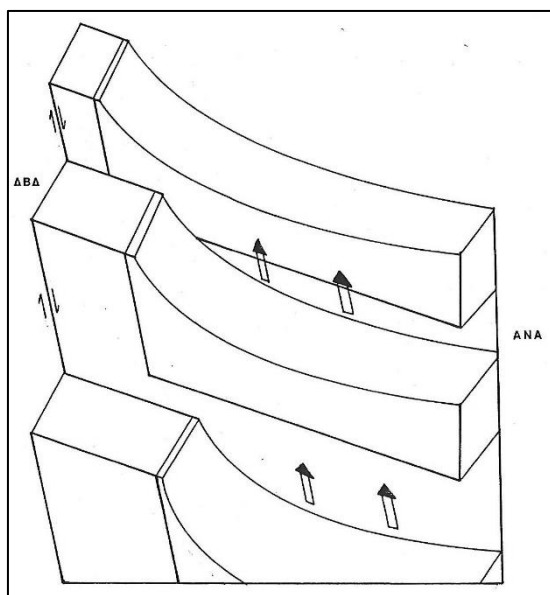
2.3 Τεκτονικό Καθεστώς

Κατά την Αλπική Ορογένεση, η μάζα της Ανατολικής Ροδόπης πτυχώθηκε σε δύο φάσεις: μία παλαιότερη δημιουργώντας Δ-ΒΔ πτυχές και μία νεότερη με μεγάλες ΒΒΔ-ΒΒΑ πτυχές. Μετά από αυτήν την παροξυσμική φάση των Αλπικών πτυχώσεων ακολούθησε έντονη εφελκυστική τεκτονική με δημιουργία κρασπεδικών ρηγμάτων που σχημάτισε τις λεκάνες του Έβρου (Κυριακίδης, Τσόκας 1989, Αγγελίδης 1989, Μουντράκης, 2010). Τα ρήγματα αυτά εκτείνονται



Σχήμα 4 - Πρώτο Σύστημα: ΒΒΑ-ΝΝΔ Ρήγματα (Κυριακίδης, Τσόκας 1989)

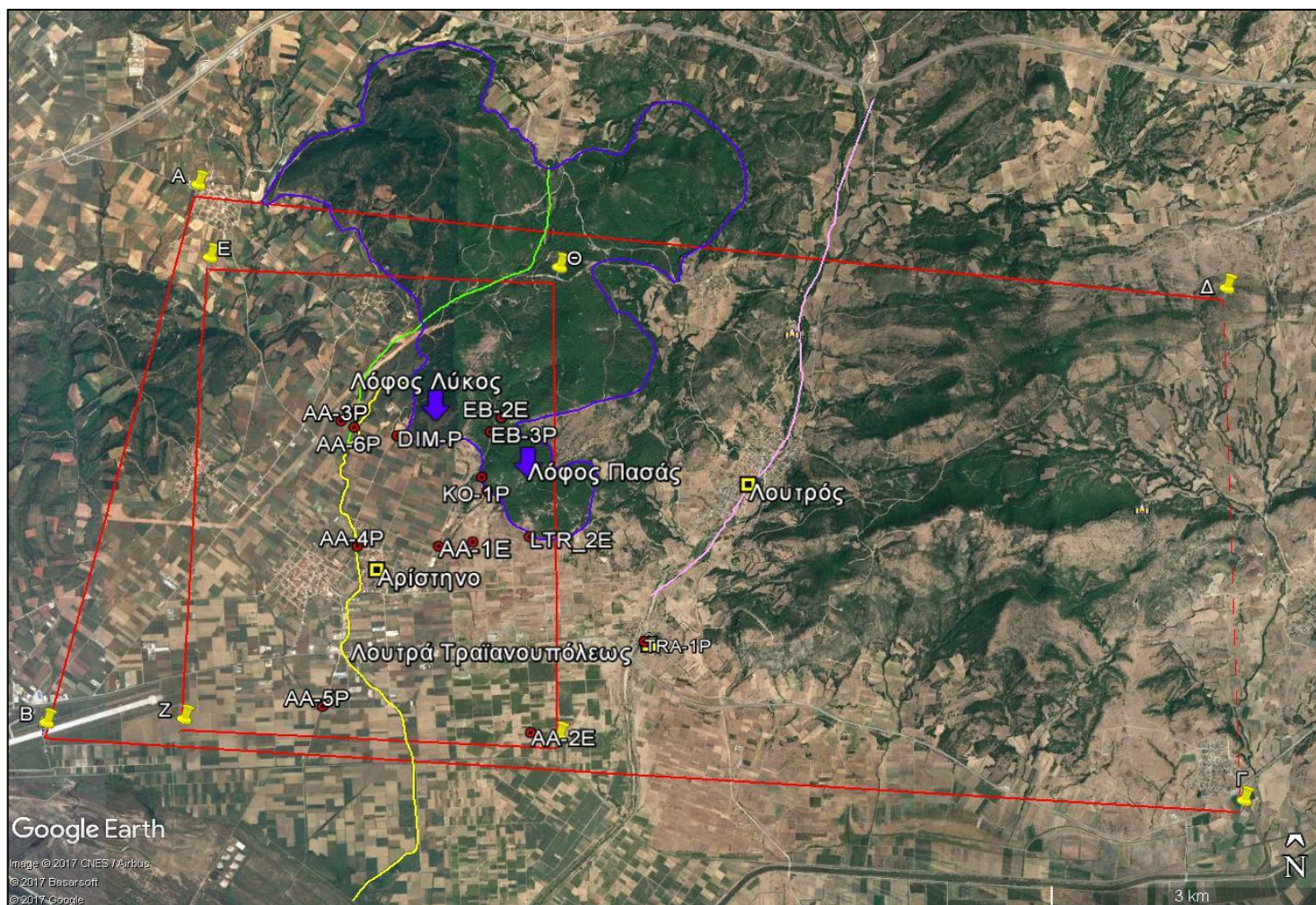
σε όλη την περιοχή μελέτης και ακολουθούν τα δύο συστήματα πτυχών έχοντας παράταξη ΒΒΑ-ΝΝΔ, ΒΑΑ-ΝΝΔ (Σχ. 4) σύμφωνα με την πρώτη πτύχωση, και ΔΒΔ-ΑΝΑ (Σχ. 5) σύμφωνα με τη δεύτερη. Τα ρήγματα διασταυρώνονται στην περιοχή των λουτρών της Τραϊανούπολης (Κυριακίδης, Τσόκας 1989, Αγγελίδης 1989). Η περιοχή Β και ΒΔ του χωριού Λουτρός (ΒΑ της Αλεξανδρούπολης) έχει ρηγματωθεί



Σχήμα 5 - Δεύτερο Σύστημα: ΔΒΔ-ΑΝΑ Ρήγματα (Κυριακίδης, Τσόκας 1989)

ισχυρά με αποτέλεσμα οι δακτιοειδείς ανδεσίτες, που διαπερνούν τις ιζηματογενείς ακολουθίες στο σύνολο τους, να παρουσιάζονται στην επιφάνεια με τη μορφή θόλων. Η μάζα τους φέρει περιορισμένης έκτασης τοπικά ρήγματα. Το πρώτο σύστημα ρηγμάτων εντοπίζεται ενδιάμεσα των λόφων Λύκος και Πασά που βρίσκονται Β και ΒΑ, αντίστοιχα, της περιοχής μελέτης (Σχ. 6). Το δεύτερο σύστημα (Σχ. 6) αποτελείται από ένα ή περισσότερα παράλληλα μεταπτωτικά ρήγματα που υπόκεινται των Μειοκαινικών και Πλειοπλειστοκαινικών ιζημάτων της περιοχής και παρουσιάζουν ανάπτυξη αρκετών χιλιομέτρων, ταπεινώνοντας μορφολογικά τη περιοχή νότια μέχρι τη

θάλασσα. Τα δύο αυτά συστήματα αποτελούν τη δίοδο ανόδου βαθύτερων γεωθερμικών ρευστών προς την επιφάνεια, όπως παρατηρείται στη περίπτωση των λουτρών της Τραϊανούπολης (Κυριακίδης, Τσόκας 1989, Αγγελίδης 1989).



Σχήμα 6 - Πιθανό & Βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης. Αναγράφονται οι θέσεις των γεωτρήσεων του βεβαιωμένου πεδίου (Κίτρινη γραμμή: Τσάιρ Ρέμα, Πράσινη γραμμή και νότιο τμήμα της κίτρινης: Ρήγμα BBA-NNΔ, Ροζ γραμμή: Ρήγμα BAA/BBA-NNΔ, Εντός μοβ γραμμής περικλείονται ο ηφαιστειακός δόμος

2.4 Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο 12^ο Υδατικό Διαμερίσματα της Ελλάδας (Σχ. 7).



Σχήμα 7 - Τα υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδος. Η λεκάνη του Έβρου ανήκει στο 12ο, όπως αυτό περι-
κλείεται από πορτοκαλί γραμμή. Με το κόκκινο αναγράφεται η θέση της περιοχής μελέτης (Τροποποιημέ-
νο από ΥΠΕΚΑ)

Οι κύριοι υδροφορείς της λεκάνη του Έβρου αναπτύσσονται εντός των Τριτογενών και Τεταρτογενών ιζημάτων της περιοχής αλλά και μέσα στα ηφαιστειακά πετρώματα, εξαιτίας του μεγάλου βαθμού κατακερματισμού τους.

Οι ανδεσίτες ηλικίας Λουτισίου – Πριαμπονίου (Αν. Ηώκαινο) και οι δακτοειδείς ανδεσίτες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα των ηφαιστειακών εμφανίσεων της περιοχής και παρουσιάζουν μία πολύ σημαντική ζώνη εξαλλοιώσεως (Αγγελίδης, 1989, Κολιός κ.ά., 2001). Οι υποκείμενοι αυτής της ζώνης ηφαιστίτες παρουσιάζουν σημαντικό δευτερογενές πορώδες λόγω διακλάσεων (Αγγελίδης, 1989, Κολιός κ.ά., 2001).

Οι ρυόλιθοι, ο δεύτερος κυρίαρχος ηφαιστειακός σχηματισμός της περιοχής, είναι έντονα κατακερματισμένοι, παρουσιάζοντας πλούσια υδροφορία που εκδηλώνεται με την παρουσία των πηγών στην περιοχή της Τραϊνούπολης. Το παραπάνω έχει διαπιστωθεί και στην περιοχή Φυλακτού από γεωτρήσεις εντός του συστήμα-

τος των ρυολίθων με παροχές $>200 \text{ m}^3/\text{h}$ (Δαλαμπάκης 1995, Γεωθερμική έρευνα περιοχής Φυλακτού Ν. Έβρου; Προφορική Επικοινωνία).

Οι ψαμμίτες και οι αργιλομαργαϊκοί σχηματισμοί της μολλασικής φάσης ηλικίας Ολιγοκαίνου έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αργιλικό υλικό με αποτέλεσμα να είναι υδατοστεγείς, εκτός από τις θέσεις που έχουν πολύ μικρότερη περιεκτικότητα σε άργιλο. Σε αυτούς τους δύο σχηματισμούς αναπτύσσονται ορισμένοι επιφανειακοί υδροφορείς περιορισμένης έκτασης.

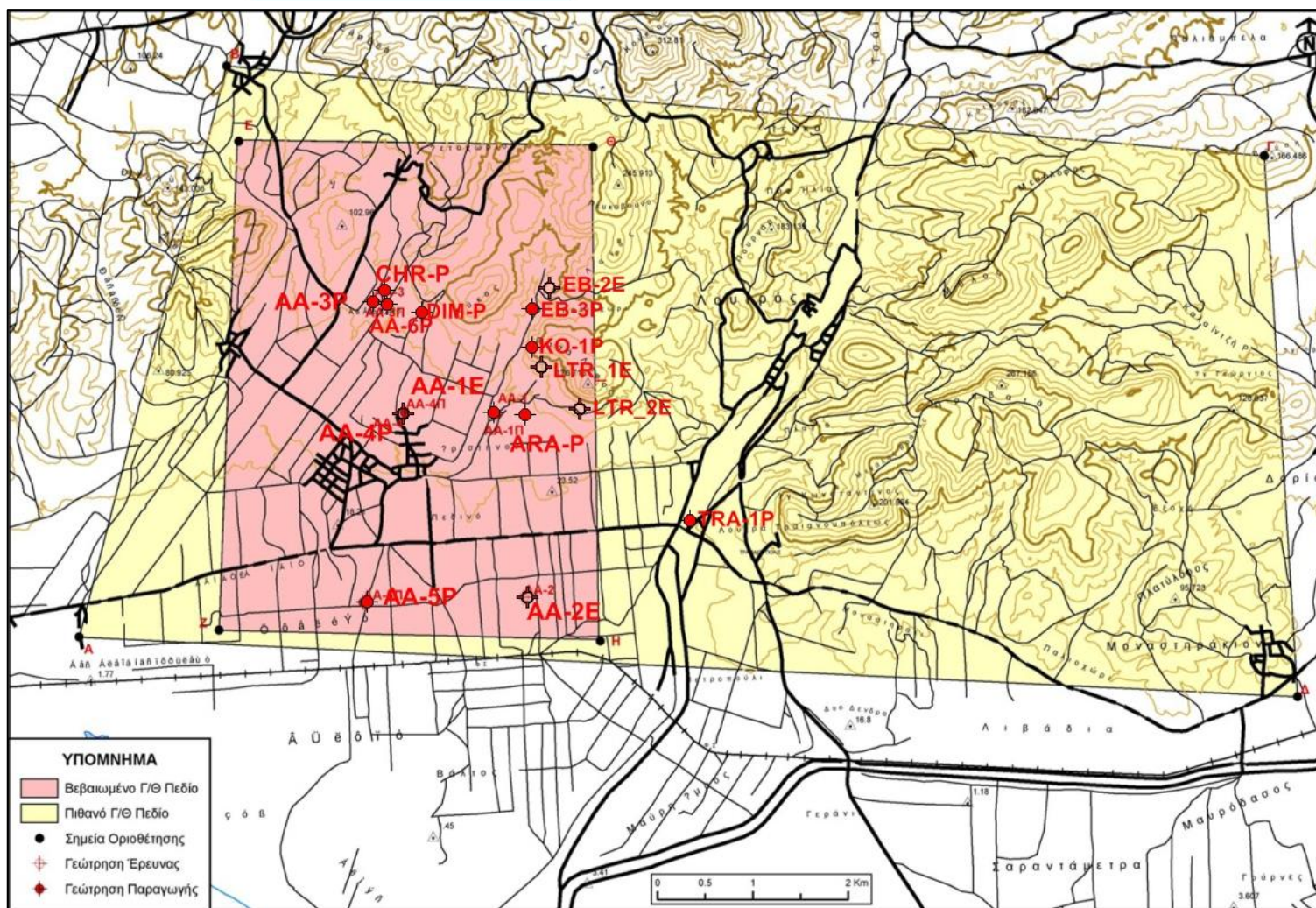
Οι πορώδεις λευκοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Ανώτερου Μειοκαίνου είναι υδατοπερατοί, εκτός των οριζόντων εκείνων που φέρουν αργιλομαργαϊκό υλικό.

Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του Αρίστηνου σχηματίζουν επιφανειακούς υδροφόρους και τροφοδοτούνται με την απευθείας κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, είτε μέσω των προαναφερθέντων ρηγμάτων είτε με διήθηση των υδάτων παροδικών χείμαρρων (Αγγελίδης κ.ά, 1989).

Η υπό μελέτη περιοχή αποστραγγίζεται επιφανειακά κυρίως από ένα επιφανειακό ρέμα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ, ονόματος Τσάιρ Ρέμα, και από άλλα παράλληλα ρέματα μικρότερης έκτασης. Το Τσάιρ Ρέμα (Σχ. 6) παρουσιάζει μεγάλες παροχές και μεγάλες ταχύτητες ροής κατά την χειμερινή περίοδο ενώ κατά τη θερινή είναι εντελώς ξηρό (Αγγελίδης κ.ά, 1989).

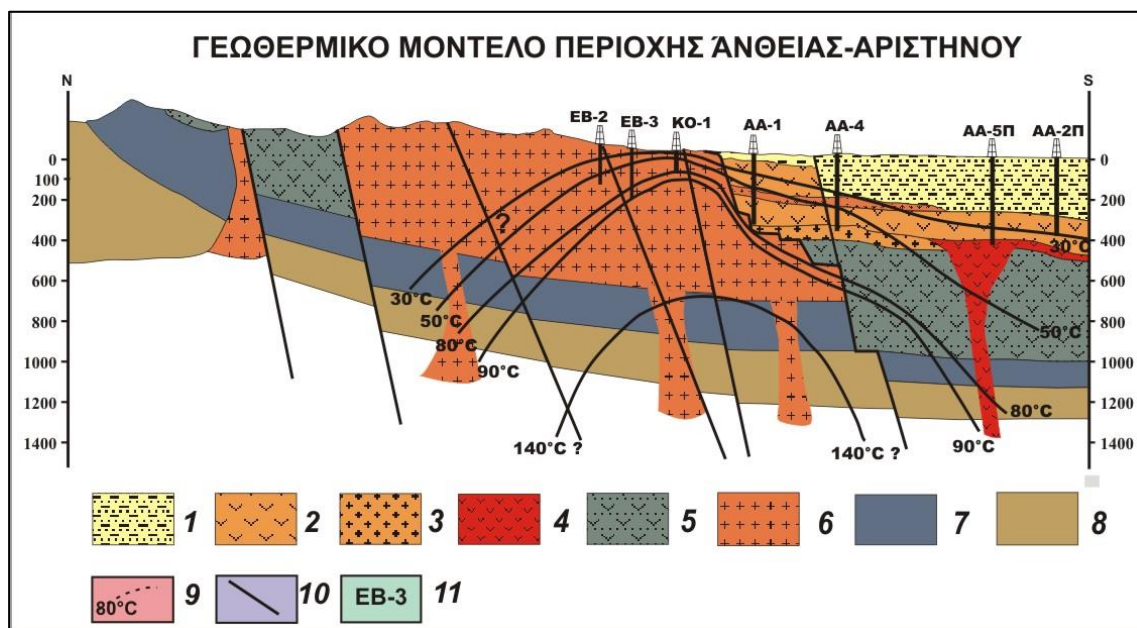
2.5 Γεωθερμικές Συνθήκες

Η περιοχή μελέτης της διπλωματικής εργασίας βρίσκεται εντός του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας Αρίστηνου–Αλεξανδρούπολης και έχει έκταση περίπου 10 km^2 . Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο καταλαμβάνει συνολική έκταση 20 km^2 και το πιθανό 60 km^2 (Σχ. 6,8), οι συντεταγμένες αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.5.1 του Παραρτήματος. Αποτελεί ένα από σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα. Τα κυριότερα γεωθερμικά δεδομένα για την περιοχή προέρχονται από την εκτεταμένη έρευνα του Ι.Γ.Μ.Ε κατά την περίοδο 1999-2001, καθώς και τη γεωθερμική έρευνα και τα έργα που υλοποιεί ο Δήμος Αλεξανδρούπολης από το 2012 έως σήμερα με την επιστημονική ευθύνη του Ινστιτούτου Εδαφοϋδατικών Πόρων του ΕΛ.Γ.Ο “ΔΗΜΗΤΡΑ”.



Σχήμα 8 - Γεωθερμικό Πεδίο Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης με τοποθετημένες τις γεωτρήσεις (ΑΒΓΔ: Πιθανό, ΕΖΗΘ: Βεβαιωμένο, Τροποποιημένο από ΙΓΜΕ, 2007

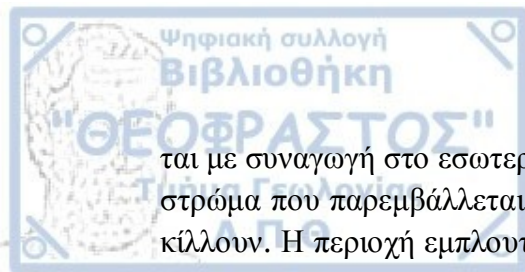
Το γεωθερμικό ενδιαφέρον της περιοχής αρχικά εντοπίστηκε στον χώρο της θερμής πηγής της Τραϊανούπολης, από την οποία ανέβλυζε θερμό νερό με θερμοκρασία 50°C (η πηγή έκλεισε λόγω αυτό-έμφραξης). Οι ευνοϊκές γεωθερμικές συνθήκες συνδέονται με την ύπαρξη κατάλληλων υδροφόρων στρωμάτων ικανών να φιλοξενήσουν τα θερμά ρευστά, την ενεργό τεκτονική και τη διείσδυση μαγματικών σωμάτων σε μικρά βάθη, η οποία προκαλεί αναθόλωση των ισόθερμων καμπυλών προς την επιφάνεια και τη δημιουργία θετικής γεωθερμικής ανωμαλίας (Σχ. 9). Η εισχώρηση αυτών έγινε κατά τον Τριτογενή εφελκυσμό που ακολούθησε την προγενέστερη συμπίεση (Μουντράκης, 2010).



Σχήμα 9 - Υδροθερμικό μοντέλο του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης (1: Ερυθροί άμμοι, αργιλικό άμμοι, χαλίκια, κροκάλες, λατύπες (Πλειστόκαινο), 2: Αργίλοι, Χαλίκια και Κροκάλες ηφαιστειακής προέλευσης (Μειόκαινο), 3: Εξαλλοιωμένοι άμμοι, μάργες και λεπτομερείς ψαμμίτες, όξινοι τόφφοι (Ολιγόκαινο), 4: Ρυόλιθοι (Ολιγόκαινο), 5: Ασβεστοαρενίτες Νίψας, τόφφοι και τοφφίτες (Άνω Ηώκαινο), 6: Ανδεσιτικοί θόλοι (Άνω Ηώκαινο), 7: Νουμουλιτικοί ασβεστόλιθοι (Μέσω Ηώκαινο), 8: Σειρά αργιλικών μαργών (Μέσω Ηώκαινο), 9: Ισόθερμες καμπύλες οροφής υποβάθρου, 10: Ρήγματα, 11: Γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής) (Κολιός, κ.ά. 2001, τροποποιημένο από Δαλαμπάκη κ.ά. 2013 ως προς την μορφή των ισόθερμων καμπυλών)

Το υδραυλικό σύστημα της περιοχής αποτελείται από δύο γεωθερμικούς ταμιευτήρες που βρίσκονται στους εξαλλοιωμένους ηφαιστειακούς σχηματισμούς και στους πυροκλαστίτες αντίστοιχα, με τους δεύτερους να εμφανίζουν σημαντικό δευτερογενές πορώδες λόγω έντονου τεκτονισμού.

Ο ρηχότερος ταμιευτήρας αναπτύσσεται στο βάθος των 180-200m με θερμοκρασία ρευστού 50-53°C, ενώ ο βαθύτερος αναπτύσσεται σε βάθη μεταξύ 250 και 400m, εντός των πυροκλαστικών υλικών, με θερμοκρασίες από 30°C (ψυχρά όρια) έως 97°C (κεντρικό τμήμα). Οι δύο αυτοί ταμιευτήρες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω συστημάτων ρηγματώσεων, με το βαθύτερο υδροφορέα να τροφοδοτεί τον ρηχότερο με θερμότερα ρευστά. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω του συστήματος κρασπεδικών ρηγμάτων, ενώ τα υπόλοιπα ρήγματα μικρότερης έκτασης διαχέουν το ρευστό σε μεγαλύτερη έκταση εντός του ρηχότερου υδροφορέα. Η μεταφορά της θερμότητας γίνε-



ται με συναγωγή στο εσωτερικό των δύο υδροφορέων, ενώ με αγωγή στο αδιαπέρατο στρώμα που παρεμβάλλεται μεταξύ αυτών, με τις διαστάσεις του τελευταίου να ποικίλλουν. Η περιοχή εμπλουτισμού του συστήματος πιθανώς τοποθετείται βορειότερα στην ορεινή Ροδόπη και νοτιότερα στη θάλασσα του Αιγαίου ενώ η τροφοδοσία γίνεται είτε απευθείας είτε διαμέσου ρηγμάτων (Kolios et al, 2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

3.1 Γενικά

Η γεωθερμική έρευνα στο πεδίο του Αρίστηνου ξεκίνησε στη δεκαετία του 1980 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Οι πρώτες ερευνητικές δραστηριότητες έλαβαν χώρα στην περιοχή μεταξύ των οικισμών Άνθειας και Αρίστηνου. Η πρώτη φάση άρχισε το 1988 και ολοκληρώθηκε το 1994 με την κατασκευή 6 γεωτρήσεων, δύο εκ των οποίων ήταν παραγωγικές. Η δεύτερη και πιο σημαντική ερευνητική φάση αφορά στην περίοδο 1999-2000, κατά την οποία κατασκευάστηκαν συνολικά 8 γεωτρήσεις (4 έρευνας και 4 παραγωγής) από το Ι.Γ.Μ.Ε. Η τρίτη φάση (2012 έως σήμερα) περιλαμβάνει σειρά εργασιών προς την κατεύθυνση της αξιοποίησης του πεδίου, με την κατασκευή νέων γεωτρήσεων είτε από ιδιώτες (3 γεωτρήσεις παραγωγής) είτε από τον Δήμο Αλεξανδρούπολης (επιφανειακή έρευνα και μία γεώτρηση παραγωγής). Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά αυτές οι φάσεις καθώς και ορισμένα από τα δεδομένα των γεωτρήσεων της κάθε φάσης, όπου αυτά ήταν δυνατόν να ανακτηθούν (προφορική επικοινωνία). Οι θέσεις όλων των γεωτρήσεων απεικονίζονται στα Σχήματα 6,8.

3.2 Περίοδος 1988-1994

Κατά την περίοδο 1988-1994 εκπονήθηκαν οι πρώτες επιφανειακές γεωλογικές και γεωθερμικές έρευνες, οι οποίες κατέληξαν στη χωροθέτηση και ανόρυξη γεωτρήσεων έρευνας-παραγωγής στο χώρο μεταξύ των λόφων Λύκος και Πασά. Η περίοδος αυτή περιλαμβάνει επίσης την κατασκευή μίας παραγωγικής γεώτρησης (ΚΟ-1Ρ) για λογαριασμό ιδιώτη, καθώς και τέσσερις ερευνητικές γεωτρήσεις και μία παραγωγική (ΕΒ-1Ε, ΕΒ-2Ε, ΕΒ-3Ρ, LTR-1Ε, LTR-2Ε) από τη Δημοσυνεταιριστική εταιρία ΕΒΡΟΣ Α.Ε. (1993-1994). Οι παραπάνω γεωτρήσεις έχουν βάθη από 100 έως 250m.

Στις γεωτρήσεις αυτές έγιναν συστηματικές δειγματοληψίες και θερμομετρήσεις, και αποτυπώθηκαν τα θερμοκρασιακά και στρωματογραφικά προφίλ. Στις γεωτρήσεις ΚΟ-1Ρ και ΕΒ-3Ρ έγιναν συστηματικές δοκιμές παραγωγής και πλήρης γεωχημική μελέτη.

3.2.1 1988-1990

3.2.1.1 Γεώτρηση «ΚΟΝΔΥΛΗΣ» (ΚΟ-1Ρ)

Η πρώτη γεωθερμική γεώτρηση κατασκευάστηκε το 1988 από ιδιώτες, οι οποίοι προχώρησαν στη συνέχεια στην πρώτη εκμίσθωση γεωθερμικού χώρου στην περιοχή. Με τη γεώτρηση αυτή αποκαλύφθηκε το σημαντικό θερμοενεργειακό προϊόν που βρίσκεται αποθηκευμένο εντός των ηφαιστειοκλαστικών σχηματισμών του Ολιγοκαίνου.

Η γεώτρηση έφθασε σε βάθος 140m και η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών μετρήθηκε στους 82°C. Έγινε δοκιμαστική άντληση 48 ωρών, από την



οποία προέκυψε ότι η γεώτρηση μπορεί να αποδώσει $18\text{m}^3/\text{h}$ με την προαναφερθείσα θερμοκρασία. Η θέση στην οποία κατασκευάστηκε η γεώτρηση KO-1P βρίσκεται πάνω σε ζώνη έντονης τεκτονικής δραστηριότητας, με τα ρήγματα των δύο κύριων διευθύνσεων να διασταυρώνονται, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες ανόδου των γεωθερμικών ρευστών.

3.2.2 1993-1994 (Δημοσυνεταιριστική ΕΒΡΟΣ Α.Ε.-Κοινότητα Λουτρού)

Την περίοδο αυτή εκμισθώνονται δύο περιοχές και κατασκευάζονται οι γεωτρήσεις της Δημοσυνεταιριστικής εταιρίας ΕΒΡΟΣ Α.Ε (EB-1E, EB-2E, EB-3P) και οι γεωτρήσεις της τότε Κοινότητας Λουτρού (LTR-1E και LTR-2E). Οι γεωτρήσεις αυτές ανορύχθηκαν στο χώρο των ηφαιστειακών και ηφαιστειοιζματογενών λόφων «Πασά» και «Λύκος» και ήταν όλες ερευνητικές εκτός από την EB-3P που είναι παραγωγική. Μετά την κατασκευή τους εκτελέστηκαν συστηματικές θερμομετρήσεις στο εσωτερικό τους με στόχο τον προσδιορισμό της γεωθερμικής βαθμίδας.

3.2.2.1 Γεωτρήσεις LTR_1E, LTR_2E

Στις γεωτρήσεις LTR_1E και LTR_2E δεν υπήρξε η δυνατότητα διάτρησης του αργιλικού καλύμματος με αποτέλεσμα οι δύο γεωτρήσεις να εγκαταλειφθούν χωρίς να σωληνωθούν. Έγινε συστηματική θερμομέτρηση έως το τελικό βάθος, 100m και 140m αντίστοιχα.

3.2.2.2 Γεωτρήσεις EB-1E, EB-2E, EB-3P

Οι γεωτρήσεις EB-1E, EB-2E και EB-3P έφθασαν σε βάθη 118, 180 και 252m αντίστοιχα. Στη γεώτρηση EB-1E παρουσιάζεται για πρώτη φορά η ύπαρξη ενός ανώτερου, περιορισμένης έκτασης, γεωθερμικού ταμιευτήρα με θερμοκρασία ρευστού της τάξης των $50-52^\circ\text{C}$ και εκμεταλλεύσιμη παροχή περίπου $15-18\text{m}^3/\text{h}$. Η γεώτρηση EB-2E, η οποία κατασκευάστηκε στο βορειότερο σημείο του χώρου έρευνας αυτής της περιόδου, έχει βάθος 180m, το οποίο όμως αποδείχτηκε μικρό για την επαρκή διάτρηση του ρηχότερου ταμιευτήρα. Το τελευταίο, σε συνδυασμό με τη φτωχή παραγωγικότητα του διατρηθέντος τμήματος του ρηχού ταμιευτήρα, όπως διαπιστώθηκε από το air-lift, αποτυπώνει την τάση βύθισης του γεωθερμικού συστήματος προς τα βόρεια, κάτι το οποίο έχει αποδειχθεί ότι συμβαίνει και προς τα νότια όσο απομακρυνόμαστε από το σύμπλεγμα των ηφαιστειακών θόλων Πασά και Λύκος. Η γεώτρηση EB-3P διαπέρασε όλους τους αργιλοποιημένους ηφαιστειακούς σχηματισμούς και στη συνέχεια τα πυροκλαστικά και ηφαιστειοκλαστικά προϊόντα της ολιγοκαινικής ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η γεώτρηση ανορύχθηκε μέχρι τα πρώτα μέτρα του βαθύτερου γεωθερμικού ταμιευτήρα. Η θερμοκρασία του ρευστού μετά από 48ωρη άντληση μετρήθηκε στους 92.2°C με εκμεταλλεύσιμη παροχή της τάξης των $40\text{m}^3/\text{h}$. Η EB-1E σήμερα είναι καταστραμμένη.

3.3 Περίοδος 1999-2000 (Ι.Γ.Μ.Ε)

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών, το ΙΓΜΕ σχεδίασε την ανόρυξη συνολικά 8 γεωτρήσεων (4 ερευνητικών και 4 παραγωγικών), εντός του χώρου που μετά την ολοκλήρωση της έρευνας, οριοθετήθηκε ως βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα δεδομένα των γεωτρήσεων της φάσης αυτής (Κολιός κ.ά, 2001).

3.3.1 Γεώτρηση AA-1E

Η γεώτρηση AA-1E σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μέχρι το βάθος των 470m, στο νοτιοδυτικό τμήμα της υπό μελέτης περιοχής, σε μία ζώνη υψηλής γεωθερμικής βαθμίδας, όπως αποδείχτηκε μετά από συστηματικές θερμομετρήσεις. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα διαμορφώνεται σε 16°C/100m, τιμής πολύ υψηλότερη της μέσης γήινης (3.3°C/100m).

3.3.2 Γεώτρηση AA-2E

Η γεώτρηση αυτή βάθους 410m κατασκευάστηκε στη νοτιότερη ζώνη του γεωθερμικού πεδίου για τη διαπίστωση των νότιων θερμικών ορίων της υπό μελέτης περιοχής. Κατά την κατασκευή της διατρήθηκαν αργίτικοί Νεογενείς σχηματισμοί, αργιλοψαμμιτικές σειρές του Μειοκαίνου, ενώ μετά το βάθος των 390m διαπεράστηκαν βιογενείς ασβεστολιθικοί σχηματισμοί.

3.3.3 Γεώτρηση AA-3P

Η γεώτρηση AA-3P έφτασε στα 360m και βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της υπό μελέτης περιοχής, σε μία ζώνη υψηλής γεωθερμικής βαθμίδας, όπως εκ των υστέρων αποδείχτηκε. Η συγκεκριμένη γεώτρηση αντλήθηκε για πρώτη φορά από τον Δήμο Αλεξανδρούπολης το 2013. Η ελάχιστη εκμεταλλεύσιμη παροχή είναι της τάξης των 90-100m³/h, με θερμοκρασία ρευστού τους 89°C και μέγιστη πτώση στάθμης 23m. Οι παραγωγικές δυνατότητες της γεώτρησης ενδέχεται να είναι πολύ μεγαλύτερες και για το λόγο αυτό έχει προγραμματιστεί νέα δοκιμαστική άντληση εντός του 2017. Η μέση τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας υπολογίστηκε σε 21°C/100m, πολύ υψηλότερη της γήινης.

3.3.4 Γεώτρηση AA-4P

Η γεώτρηση AA-4P βρίσκεται στο βορειοδυτικό όριο του Αρίστηνου, σε μία ζώνη ενδιάμεσης γεωθερμικής βαθμίδας. Έχει βάθος 440m, υδρομαστεύει μόνο τον βαθύτερο ταμιευτήρα και η θερμοκρασία στον πυθμένα της μετρήθηκε στους 64°C, διαμορφώνοντας μια μέση γεωθερμική βαθμίδα (11.5°C/100m), αρκετά υψηλότερης της γήινης.

3.3.5 Γεώτρηση ΑΑ-5Ρ

Η γεώτρηση αυτή κατασκευάστηκε στη νοτιότερη ζώνη του γεωθερμικού πεδίου για τη διαπίστωση των θερμικών ορίων της υπό μελέτης περιοχής. Η γεώτρηση είναι τηλεσκοπικού τύπου, έχοντας βάθος 415m. Ως το βάθος των 360m κυριαρχούν αμμούχοι και αργιλικοί σχηματισμοί, ενώ πιο κάτω κυρίως ηφαιστειοκλαστίτες ιγκνιμβριτικής – τοφφικής προέλευσης με ελάχιστα ηφαιστειοκλαστικά καθώς και όξινοι ηφαιστίτες ρυολιθικής σύστασης. Η θερμοκρασία στο βάθος φθάνει τους 32.5°C, διαμορφώνοντας τη μέση γεωθερμική βαθμίδα στους 4.5°C/100m, ελαφρώς υψηλότερη της γήινης.

3.4 Περίοδος 2000-2005 (Ιδιώτες)

3.4.1 Γεώτρηση «ΔΗΜΗΤΡΑ» (DIM-P)

Κατασκευάστηκε το 2005 από ιδιώτη με στόχο την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών σε εγκαταστάσεις SPA. Η θέση της βρίσκεται 1000m ανατολικά της γεώτρησης ΑΑ-3Ρ, στους πρόποδες του ηφαιστειακού θόλου Λύκος. Το τελικό βάθος της γεώτρησης είναι 270m και η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 73°C. Δεν έγινε εφικτή η διάτρηση των σχηματισμών του κύριου και βαθύτερου ταμιευτήρα. Παραγωγικά η γεώτρηση αποδίδει 10-15 m³/h με θερμοκρασία 60-65°C. Το αρχικό επενδυτικό σχέδιο δεν προχώρησε προς υλοποίηση. Η γεώτρηση σήμερα είναι σε καλή κατάσταση, επισκέψιμη και η πλέον πρόσφατη (2016) θερμομέτρησή της έγινε από τον ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ».

3.4.2 Γεώτρηση «ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗΣ» (CHR-P)

Κατασκευάστηκε το 2003-2004 εντός ιδιόκτητου αγροτεμαχίου, 250m βορειότερα της γεώτρησης ΑΑ-3Ρ, σε βάθος 180m με στόχο τη διερεύνηση αξιοποίησης του ανώτερου ταμιευτήρα. Μετρήθηκε θερμοκρασία 53°C, η οποία είναι 3°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο αντίστοιχο βάθος της γεώτρησης ΑΑ-3Ρ, γεγονός που υποδεικνύει σημαντικότερη γεωθερμική ανωμαλία στην περιοχή ΒΑ της ΑΑ-3Ρ. Κατά την διάρκεια νέων αντλητικών δοκιμών, η γεώτρηση απέδωσε 20 m³/h, γεγονός που επιβεβαιώνει αντίστοιχες αντλητικές δοκιμές του ίδιου ταμιευτήρα σε άλλες γεωτρήσεις (π.χ. ΑΑ-1Ρ).

3.4.3 Γεώτρηση «ΑΡΑΜΠΑΤΖΗ» (ARA-P)

Κατασκευάστηκε το 2005 από ιδιώτη εντός ιδιόκτητου αγροτεμαχίου, 350m ανατολικότερα της γεώτρησης ΑΑ-1Ρ. Πρόκειται για τη βαθύτερη γεώτρηση στο πεδίο, σε βάθος 480m. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε στον πυθμένα της γεώτρησης είναι 83°C, γεγονός που αποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση δεν κατάφερε να διατρήσει τον κύριο παραγωγικό ταμιευτήρα, ο οποίος στη θέση της ερευνητικής γεώτρησης ΑΑ-1Ε βρίσκεται σε μικρότερο βάθος (430-450m). Νέα θερμομέτρηση το 2016 έδειξε θερμοκρασία πυθμένα στους 90°C. Από το τελευταίο συμπεραίνεται πως το γεωθερμικό σύστημα βυθίζεται σταδιακά προς τα ανατολικά με όριο το σημαντικό ρήγμα ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης.

3.5 Περίοδος 2012-σήμερα (Δήμος Αλεξανδρούπολης)

Η περίοδος αυτή περιλαμβάνει την προσπάθεια αξιοποίησης της γεωθερμίας από το Δήμο Αλεξανδρούπολης αλλά και προσέλκυσης επενδυτικού ενδιαφέροντος. Έχει ήδη γίνει ανόρυξη μίας βαθιάς γεώτρησης (ΑΑ-6Ρ), ενώ προγραμματίστηκε και η μελλοντική ανόρυξη 2 γεωτρήσεων επανεισαγωγής, οι οποίες θα δέχονται τα ρευστά των γεωτρήσεων ΑΑ-3Ρ και ΑΑ-6Ρ, μετά τη θερμική τους εκμετάλλευση. Έχει επίσης σχεδιαστεί το δίκτυο διανομής των γεωθερμικού ρευστών και για αστική και αγροτική (θερμοκηπιακή) τηλεθέρμανση (Έργο Αξιοποίησης γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης 2016 από Δήμο Αλεξανδρούπολης).

3.5.1 Γεώτρηση ΑΑ-6Ρ

Πρόκειται για τη γεώτρηση που κατασκευάστηκε το 2016 από τον Δήμο Αλεξανδρούπολης και αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Ανορύχθηκε εντός του δημόσιου αγροτεμαχίου του Αετοχωρίου, 160m ανατολικότερα της γεώτρησης ΑΑ-3Ρ. Πρόκειται για τη δεύτερη βαθύτερη γεώτρηση στο πεδίο σε βάθος 408m. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε στον πυθμένα της γεώτρησης είναι 83.8°C, γεγονός που αποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση δεν κατάφερε να διατηρήσει ικανοποιητικά τον κύριο παραγωγικό ταμιευτήρα, ο οποίος στη θέση της ΑΑ-3Ρ βρίσκεται σε μικρότερο βάθος (354m). Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε κατά την άντληση ήταν 97.7°C. Η υψηλότερη θερμοκρασία του ρευστού κατά την άντληση μπορεί να εξηγηθεί είτε λόγω σταδιακής πλευρικής μεταφοράς γεωθερμικού ρευστού από πολύ πιο θερμές ζώνες μέσω κυρίως διαρρήξεων (κίνηση από ανατολικά προς δυτικά), είτε από ανοδική κίνηση θερμότερων μαζών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΑΑ-6Ρ

4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι εργασίες κατασκευής και ανάπτυξης της γεωθερμικής παραγωγικής γεώτρησης ΑΑ-6Ρ στο πεδίο Αρίστηνου. Η γεώτρηση είναι τηλεσκοπικού τύπου και η κατασκευή της έγινε σε 3 διατρητικές φάσεις μέχρι το τελικό βάθος των 408m. Η 1^η διάτρηση έγινε μέχρι τα 30m (διάμετρος 26"), η 2^η μέχρι τα 120m (διάμετρος 17 1/2") και η 3^η μέχρι τα 408m (διάμετρος 14").

Ακολούθησε η διενέργεια διαγραφιών, για την εκτίμηση του πάχους, της θέσης του και της υδροφορίας κάθε στρώματος, τοποθέτηση της τελικής σωλήνωσης, χαλίκωση και τσιμέντωση στο ανώτερο τμήμα της γεώτρησης.

Οι προδιαγραφές της γεώτρησης καθορίστηκαν από τον Δρ. Πασχάλη Δαλαμπάκη, ερευνητή του ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ» και τον Δημήτρη Κασκαμπάνη, Γεωλόγο του Δήμου Αλεξανδρούπολης. Η γεώτρηση είχε αρχικά προδιαγραφεί με στόχο το βάθος των 500m, ο οποίος τελικά δεν επετεύχθη λόγω τεχνικών δυσκολιών.

4.2 Διατρητικές Φάσεις

Οι τρεις διατρητικές φάσεις έγιναν διαδοχικά, όπως περιγράφονται παρακάτω:

1^η Φάση: Διάτρηση των πολύ επιφανειακών χαλαρών σχηματισμών έως τα 30m με αρχική διάμετρο τρίφτερου κοπτικού άκρου 17 1/2" (Σχ. 9) και διεύρυνση με διάμετρο 26". Ακολούθησε η τοποθέτηση του 1^{ου} περιφραγματικού σωλήνα διαμέτρου 26" στο διάστημα 0-30m, τοποθέτηση προσωρινού σωλήνα εισπίεσης ενέματος στα 30m και τέλος τσιμέντωση έως τα ~30m (1^η τσιμέντωση).



Σχήμα 9 - Τρίφτερο Κοπτικό Άκρο

- **2^η Φάση:** Διάτρηση από τα 30m έως τα 120m με τρίκωνο κοπτικό άκρο (Σχ. 10) διαμέτρου 17 1/2" και διεύρυνση με κοπτικό άκρο διαμέτρου 23" (Σχ. 11). Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε ο 2^{ος} περιφραγματικός σωλήνας διαμέτρου 23" στο διάστημα 0-120m, ο πιεζομετρικός σωλήνας 1 1/2" σε βάθος 114m, ο μόνιμος σωλήνας εισπίεσης ενέματος στα 120m και τέλος έγινε τσιμέντωση έως τα ~120m (2^η τσιμέντωση).



Σχήμα 10 - Τρίκωνο Κοπτικό Άκρο (Απλό)



Σχήμα 11 – Διευρυντήρες διαφόρων διαμέτρων

- **3^η Φάση:** Διάτρηση με απλό τρίκωνο κοπτικό άκρο από τα 120m έως το τελικό βάθος 408m κατά τμήματα: το πρώτο από τα 120m μέχρι τα 300m με αρχική διάμετρο 8 5/8" και διεύρυνση με διευρυντικά τρίκωνα κοπτικά άκρα διαμέτρου

17 1/2" και το δεύτερο από 300m έως το τελικό βάθος με αρχική διάμετρο 8 5/8" και διεύρυνση με διευρυντήρα διαμέτρου 14".

Η ανόρυξη έγινε με τη μέθοδο της υδραυλικής περιστροφικής διάτρησης με κανονική κυκλοφορία πολτού (μείγμα Na-μοντμοριλονίτη/νερού, Σχ. 12) με τη χρήση υδραυλικού γεωτρύπανου (Σχ. 13, 14).



Σχήμα 12 - Λάκκοι παρασκευής του γεωτρητικού πολτού για την καθίζηση των τριμμάτων. Κάτω δεξιά διακρίνονται τα στελέχη του γεωτρυπάνου



Σχήμα 13 – Γενική άποψη των μηχανικών μερών του υδραυλικού γεωτρυπάνου. Διακρίνονται ο κινητήρας ισχύος (αριστερά) και η διάταξη της αντλίας επανακυκλοφορίας του πολτού (δεξιά)



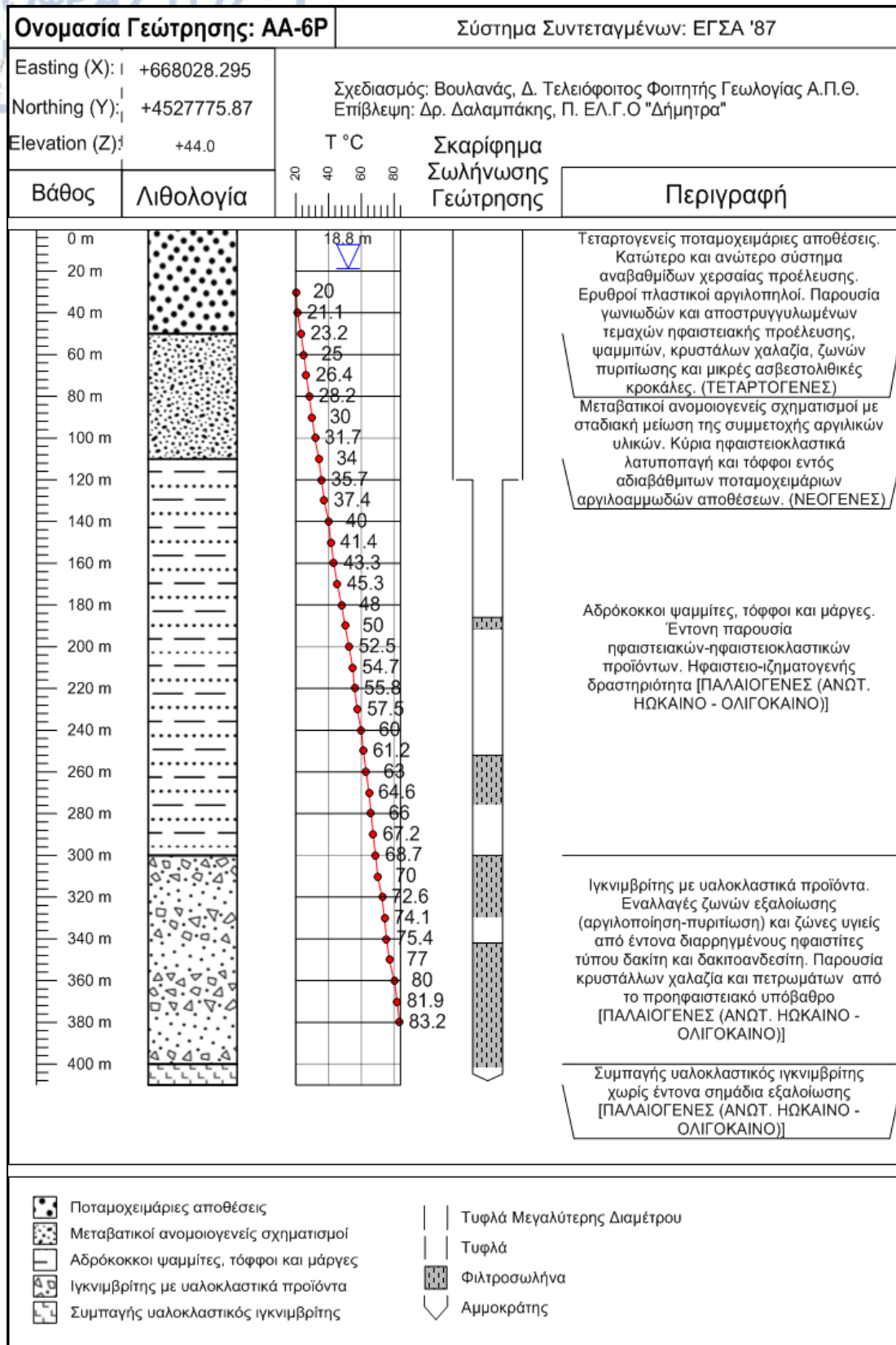
Σχήμα 14 - Ικρίωμα του γεωτρύπανου κατά τη φάση τοποθέτησης του 2ου Περιφραγματικού Σωλήνα

4.3 Δειγματοληψία και Κατασκευή Λιθολογικής Στήλης ΑΑ-6Ρ

Κατά τη διάρκεια των διατρήσεων έγινε συστηματική δειγματοληψία των τριμμάτων του επιστρεφόμενου πολφού της γεώτρησης ανά στέλεχος (6m) και αποθήκευσή τους σε πλαστικά σακουλάκια (Σχ. 15). Έγινε πετρογραφική μακροσκοπική αναγνώριση και περιγραφή των σχηματισμών που διατρήθηκαν χρησιμοποιώντας λούπα μεγέθυνσης X140 (Σχ. Π4.3.1). Η λιθολογική στήλη της γεώτρησης και η συνοπτική περιγραφή των διατρηθέντων σχηματισμών περιλαμβάνονται στο Σχήμα 16.



Σχήμα 15 - Τρίμματα Ποταμοχειμάρων Αποθέσεων



Σχήμα 16 - Λιθοστρωματογραφική Στήλη Γεώτρησης ΑΑ-6Ρ, Θερμομέτρηση 2016 και σκαρίφημα της σωλήνωσης της γεώτρησης

4.4 Περιφραγματική Σωλήνωση και Τσιμεντώση

Μετά τη διάτρηση των πρώτων χαλαρών σχηματισμών έως τα 30m, για την τοποθέτηση του 1^{ου} περιφραγματικού σωλήνα διαμέτρου 26", έγινε εισπίεση ενέματος (τσιμεντοπολτού) μέσω προσωρινού σωλήνα 2". Ομοίως, αμέσως μετά την τοποθέτηση του 2^{ου} περιφραγματικού σωλήνα διαμέτρου 23", έγινε εισπίεση ενέματος έως τα 120m με χρήση μόνιμου σωλήνα διαμέτρου 2" (Σχ. 17, 18, 19). Στον δεύτερο περιφραγματικό προσαρτήθηκε ο πιεζομετρικός σωλήνας διαμέτρου 2" (Σχ. 17). Μετά το πέρας της 2^{ης} τσιμεντώσης, έγινε διάτρηση του υπόλοιπου τμήματος της γεώτρησης από τα 120m μέχρι τα 408m.



Σχήμα 17 - Τοποθέτηση 2ου Περιφραγματικού Σωλήνα (Αριστερά: Σωλήνας Ενέματος, Δεξιά: Πιεζόμετρο)

Η τσιμεντώση έγινε μεταξύ των περιφραγματικών σωλήνων και των τοιχωμάτων της γεώτρησης με σκοπό την εξασφάλιση της σταθεροποίησης αλλά και της στεγανότητας της γεώτρησης και την αποφυγή ανεξέλεγκτης εισόδου υδάτων από την επιφάνεια ή από ρηχούς ψυχρούς υδροφόρους.



Σχήμα 18 - Διαδικασία Ενεμάτωσης



Σχήμα 19 - Ενεμάτωση διαμέσου δύο περιφραγματικών σωλήνων με χρήση ελαστικού αγωγού εισπίεσης ενέματος

4.5 Διενέργεια Διαγραφιών (Logging)

Για την εκτίμηση και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών και των φυσικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που συνάντησε η υπό περιγραφή γεώτρηση (ΑΑ-6Ρ), διενεργήθηκαν διαγραφίες ακτινοβολίας γ, φυσικού δυναμικού, ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την χρήση δύο ευαίσθητων κεφαλών. Οι διαγραφίες εκπονήθηκαν από την εταιρία Geotech Georesources Technology Ltd (Σχ. 20).

Η διαγραφή φυσικού δυναμικού γίνεται για τον προσδιορισμό των περατών στρωμάτων, των κατακόρυφων ορίων τους, της ειδικής αντίστασης του νερού εντός των πόρων των γεωλογικών σχηματισμών και του όγκου της αργίλου που φέρουν τα περατά στρώματα. Το τελευταίο μπορεί να εκτιμηθεί και από την διαγραφή ακτινοβολίας γ.



Σχήμα 20 - Το συνεργείο μετρήσεων της Geotech Georesources Technologies Ltd

Η διαγραφία ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας γίνεται για την εύρεση των θερμών υδροφόρων οριζόντων, τον εντοπισμό περατών στρωμάτων και τον υπολογισμό του πορώδους κάθε γεωλογικού σχηματισμού.

Κατά τη διενέργεια των διαγραφιών, πρώτα έγινε η καθέλκυση της ευαίσθητης κεφαλής ELOG, η οποία μετράει την ηλεκτρική αντίσταση και το φυσικό δυναμικό. Στη συνέχεια, κατελκύθηκε η ευαίσθητη κεφαλή Temperature Conductivity (Σχ. 21) που μετράει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία. Οι προδιαγραφές αυτών των δύο οργάνων παρατίθενται στους Πίνακες Π4.5.1-2 του Παραρτήματος.



Σχήμα 21 - Προετοιμασία εκτέλεσης της διαγραφίας Αγωγιμότητας-Θερμοκρασίας

Η καθέλκυση των δύο ευαίσθητων κεφαλών έγινε με την βοήθεια μηχανοκίνητου βαρούλκου (Σχ. 22). Οι μετρηθείσες τιμές καταγράφονταν παράλληλα με την καθέλκυση των κεφαλών σε σύστημα Η/Υ.



Σχήμα 22 - Μηχανοκίνητο Βαρούλκο Καθέλκυσης Ευαίσθητων Κεφαλών

Με βάση τα αποτελέσματα και την ερμηνεία των διαγραφιών, εντοπίστηκε υδροφορία στα διαστήματα 186-192m, 252-276m, 300-330m και 342-402m. Το πρώτο υδροφόρο στρώμα θεωρείται μικρής δυναμικότητας και σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας (50-52°C), τα δύο ενδιάμεσα πιθανής υδροφορίας (τα φίλτρα τοποθετήθηκαν σε αυτές τις θέσεις με σκοπό την αύξηση την παροχής της γεώτρησης) ενώ το βαθύτερο είναι σημαντικού δυναμικού τόσο σε θερμοκρασία όσο και σε πάχος (μεγάλη ικανότητα απόδοσης ποσότητας ρευστού). Η θερμοκρασία μετρήθηκε αρχικά μέσα στον πολύ επανακυκλοφορίας της γεώτρησης, γεγονός που δικαιολογεί τη μέτρηση των 66.3°C στον πυθμένα της (κατάσταση μη θερμοκρασιακής ισορροπίας του συστήματος).

4.5 Τοποθέτηση Φιλτροσωλήνων, Τυφλών Σωλήνων και Χαλίκωση

Η τοποθέτηση των φιλτροσωλήνων και τυφλών σωλήνων έγινε με βάση την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των διαγραφιών και την πετρογραφική παρατήρηση των τριμμάτων του επιστρεφόμενου πολτού της γεώτρησης. Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι του τύπου των γεφυρωτών σχισμών (Σχ. 23). Η τοποθέ-



Σχήμα 23 - Φιλτροσωλήνες Γεφυρωτών Σχισμών από Β. Λιαρρομάτη ΑΒΕΕ (<http://www.liarommatis.gr> || Προσπελάστηκε στις 24/6/2017)

τηση των φίλτρων έγινε στα διαστήματα 186-192m, 252-276m που αντιστοιχούν σε αδρόκοκκους ψαμμίτες, τόφφους και μάργες και στα διαστήματα 300-330m, 342-402m για την υδρομάστευση του ιγκνιμβρίτη.

Η χαλίκωση αποσκοπεί στην αύξηση της ενεργής ακτίνας της γεώτρησης με την δημιουργία ζώνης αυξημένου πορώδους μεγαλύτερου από εκείνου του υδροφόρου στρώματος, στη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης, στη ελάττωση της ταχύτητας εισόδου του νερού, στην αποφυγή δημιουργίας τυρβώδους ροής και στην ελάττωση του ποσού των αιωρούμενων υλικών που εισέρχονται στη γεώτρηση. (Βουδούρης, 2017).

Το χαλικόφιλτρο που τοποθετήθηκε μεταξύ της τελικής σωλήνωσης της γεώτρησης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης αποτελείται από διαβαθμισμένες κροκάλες διαμέτρου 3-5 cm, κυρίως από μεταμορφωμένα και ηφαιστειακά πετρώματα (Σχ. 24).

Το τελικό σκαρίφημα της γεώτρησης ΑΑ-6Ρ παρουσιάζεται στο Σχήμα Π4.5.1 του Παράρτημα.



Σχήμα 24 - Χαλίκια για χρήση στο Χαλικόφιλτρο

4.6 Ανάπτυξη με Εισπίεση Αέρα (Airlift)

Ο καθαρισμός και η ανάπτυξη της γεώτρησης έγινε με τη μέθοδο airlift (Σχ. 25) και τη χρήση κατάλληλου αεροσυμπιεστή, διαμέσου στήλης ανάπτυξης διαμέτρου 4" και στήλης εμφύσησης διαμέτρου 1.5". Αρχικά η εμφύσηση του αέρα έγινε ανά στέλεχος από τον πυθμένα προς τα πάνω. Ο καθαρισμός της γεώτρησης όμως δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς, πιθανότατα διότι η μη αναμενόμενη υψηλή θερμοκρασία προκάλεσε κροκίδωση των σωματιδίων του Να-μοντμοριλονίτη του πολτού προκαλώντας την πλαστικοποίηση του πολτού στα τοιχώματα της γεώτρησης (Vryzas et al, 2016). Τελικά, η διαδικασία επαναλήφθηκε άλλες δύο φορές με ανάστροφη εμφύσηση αέρα από τα ανώτερα τμήματα της γεώτρησης έως τον πυθμένα, μέχρι τον τελικό και επιτυχή καθαρισμό της γεώτρησης.



Σχήμα 25 - Διάταξη Airlift. Διακρίνονται οι δύο εξαγωγές του μίγματος νερού-αέρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΑΑ-6Ρ

5.1 Γενικά

Μετά τον επιτυχή καθαρισμό της γεώτρησης τοποθετήθηκε το προσωρινό αντλητικό σύστημα κατακόρυφου άξονα τύπου πομόνας (Σχ. 26, 27) για τη διενέργεια δοκιμαστικών αντλήσεων (κατά βαθμίδες και σταθερής παροχής). Για την κίνηση του άξονα χρησιμοποιήθηκε έγινε με τη χρήση εξωτερικός ντιζελοκινητήρας ισχύος 200 HP (Σχ. 28).



Σχήμα 26 - Τοποθέτηση της κεφαλής της πομόνας



Σχήμα 27 – Κεφαλή του προσωρινού αντλητικού συγκροτήματος κατά την άντληση



Σχήμα 28 - Ντιζελοκινητήρας ισχύος 200HP

Οι δοκιμαστικές αντλήσεις διεξήχθησαν την περίοδο από 19/09/2016 έως 21/10/2016 και υλοποιήθηκαν σε τρεις κύριες φάσεις: προάντληση τριών σταδίων, άντληση κατά βαθμίδες και δοκιμές παραγωγής σταθερής παροχής μεγάλης διάρκειας.

Η διαδικασία προάντλησης μπορεί να θεωρηθεί και ως το τελικό στάδιο ανάπτυξης της γεώτρησης και έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της κατάστασης του νερού της γεώτρησης (διαυγές ή όχι), την εκτίμηση της απόδοσης της γεώτρησης υπό καθεστώς αυξανόμενων στροφών της αντλίας, καθώς την εκτίμηση της μεταβολής και της μέγιστης θερμοκρασίας του αντλούμενου ρευστού, ώστε να προσδιοριστεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά της αντλίας.

Πραγματοποιήθηκε μια μακρά σειρά δοκιμών προάντλησης εξαιτίας της αδυναμίας άμεσου καθαρισμού της γεώτρησης και ενεργοποίησης των βαθύτερων παραγωγικών σχηματισμών (κύριος ταμιευτήρας). Παράλληλα, υπήρξαν σημαντικές καθυστερήσεις, εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων τεχνικών προβλημάτων (κυρίως λόγω θραύσης κυρίως του άξονα της αντλίας ή/και των κουζινέτων).

Η προαντλητική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαδοχικές φάσεις, διάρκειας 120 ωρών η κάθε μία. Στον χρόνο αυτό συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος αναμονής για τις αναγκαίες επιδιορθώσεις της αντλητικής διάταξης. Έγινε προσπάθεια σταδιακής αύξησης των στροφών της αντλίας, κατά τη διάρκεια των οποίων μετρήθηκαν παροχές από $\sim 30\text{m}^3/\text{h}$ έως $\sim 70\text{m}^3/\text{h}$.

Η διαδικασία των βηματικών αντλήσεων έγινε σε τέσσερις βαθμίδες. Εξαιτίας τεχνικών δυσκολιών δεν επετεύχθη αύξηση της παροχής πέραν των $70\text{m}^3/\text{h}$, με αποτέλεσμα την αδυναμία εκτίμησης της κρίσιμης παροχής για τη συγκεκριμένη γεώτρηση. Έως και τη μέγιστη επιτευχθείσα παροχή των $65\text{-}70\text{m}^3/\text{h}$, η καμπύλη της σωρευτικής αύξησης της στάθμης σε συνάρτηση με την αύξηση της παροχής, δεν παρουσιάζει καθαρή γραμμική αύξηση. Η παροχή των $70\text{m}^3/\text{h}$ κατέστη αδύνατο να διατηρηθεί σταθερή πέραν ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος (περί του ενός λεπτού), εξαιτίας αφενός της επαναλαμβανόμενης θραύσης του άξονα της αντλίας στις

πολύ υψηλές στροφές και αφετέρου λόγω της μη αναμενόμενης υψηλής θερμοκρασίας του αντλούμενου ρευστού, η οποία ανήλθε σταδιακά έως τους 97.7°C. Σημειώνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία που είχε μετρηθεί στην περιοχή ήταν 92.3°C στη γεώτρηση ΕΒ-3Ρ. Στη γειτονική γεώτρηση ΑΑ-3Ρ (σε απόσταση 150m και αντίστοιχου βάθους με την ΑΑ-6Ρ) η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 89.3°C.

Η δοκιμαστική άντληση σταθερής παροχής 45 m³/h (Σχ. 29) έγινε μετά την ολοκλήρωση της άντλησης κατά βαθμίδες. Η παροχή αυτή επιλέχθηκε ώστε να είναι εντός των ορίων αντοχής του αντλητικού συγκροτήματος, και να μη δημιουργηθούν εκ νέου τεχνικές αστοχίες. Σκοπός των δοκιμαστικών αντλήσεων μακράς διάρκειας και σταθερής παροχής είναι η εκτίμηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα (Τ- μεταβιβαστικότητα, k- υδραυλική αγωγιμότητα, S- συντελεστής εναποθήκευσης).



Σχήμα 29 - Αντληση Σταθερής Παροχής (στο κέντρο διακρίνεται η διάταξη στην έξοδο της κεφαλής της γεώτρησης)

Η πτώση της στάθμης κατά τη διάρκεια της άντλησης μετρήθηκε με ηλεκτρικό σταθμήμετρο (Σχ. Π5.1.1) μέσα στον πιεζομετρικό σωλήνα της γεώτρησης. Η παροχή μετρήθηκε στην ειδική διάταξη (Σχ. 29, 30) στην έξοδο της κεφαλής της αντλίας, η οποία αποτελούνταν από μεταλλικούς αγωγούς διαμέτρου 100mm. Στον αγωγό αυτό προσαρτήθηκε φλαντζωτό υδρόμετρο υψηλών θερμοκρασιών γλυκερίνης διαμέτρου 100mm της εταιρείας *Madalene* (Σχ. Π5.1.2). Κάθετα στον κύριο μεταλλικό αγωγό τοποθετήθηκε δεύτερος μεταλλικός αγωγός μήκους 1m, αντίστοιχης διαμέτρου 100mm, με τον οποίο η παροχή μετρούνταν και ογκομετρικά σε μεταλλική δεξαμενή χωρητικότητας 250lt (Σχ. 30).



Σχήμα 30 – Διάταξη Σωλήνων στην έξοδο της κεφαλής της γεώτρησης (κάτω αριστερά διακρίνεται η μεταλλική δεξαμενή χωρητικότητας 250lt)

Τέλος, κατά τη διάρκεια της άντλησης πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή της θερμοκρασίας του αντλούμενου γεωθερμικού ρευστού στην κεφαλή της γεώτρησης με ψηφιακό θερμομέτρο ακίδας Pt1000 της DELTA ohm (Σχ. Π5.1.3). Οι λειτουργικές προδιαγραφές του θερμομέτρου παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.5.1.1 του Παραρτήματος.

5.2 Προάντλησεις στη γεώτρηση ΑΑ-6Ρ

Α. Περίοδος: 19/9/2016 - 26/9/2016

Βάθος τοποθέτησης της αντλίας: 80m

Διάρκεια προάντλησης: 120 ώρες

Η προάντληση με παροχή $40\text{m}^3/\text{h}$ είχε στόχο τον σταδιακό καθαρισμό (ανάπτυξη) της γεώτρησης και την παρατήρηση της συμπεριφοράς αντλίας. Η μη αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους 90°C προκάλεσε κατά πάσα πιθανότητα τον σχηματισμό κρούστας μπεντονίτη στα τοιχώματα της γεώτρησης, όπως και εντός του χαλικοφίλτρου (Vryzas et al, 2016). Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση των διακένων και δραματική αύξηση των μη γραμμικών απωλειών του φορτίου, στο επίπεδο των φιλτροσωλήνων.

Κατά διαδικασία προάντλησης το νερό της γεώτρησης δεν κατέστη δυνατόν να διανύσει, όπως παρατηρήθηκε στα ληφθέντα δείγματα με τον βαθμονομημένο κώνο καθίζησης Imhoff (Σχ. Π5.2.1). Η στάθμη του νερού της γεώτρησης σταθεροποιήθηκε στα 50m βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η περαιτέρω αύξηση της παροχής δεν κατέστη δυνατή λόγω αδυναμίας αύξησης των στροφών της αντλίας.

Η θραύση του ανοξείδωτου άξονα διαπιστώθηκε σε δύο σημεία, στην αρχή και στο τέλος των επιμέρους τμημάτων του (3m το καθένα), ενώ παράλληλα διαπιστώθηκε σταδιακή φθορά μερικών κουζινέτων, λόγω της τριβής που προκλήθηκε από την

διαφορική διαστολή των δύο συστατικών της καταθλιπτικής στήλης (κουζινέτων και άξονα, Σχ. 31, 32). Ακολούθησε αντικατάσταση των τμημάτων του άξονα, προστέθηκαν τρία στελέχη των 3m στην καταθλιπτική στήλη και αποφασίστηκε η επανεκκίνηση της προαντλητικής διαδικασίας με τοποθέτηση της αντλίας αρχικά στα 90m. Στο στάδιο αυτό η τελική θερμοκρασία του ρευστού μετρήθηκε στους 92°C.



Σχήμα 31 - Θραυσμένο Κουζινέτο



Σχήμα 32 - Θραυσμένος Άξονας Αντλίας

Β. Περίοδος: 26/9/2016 - 01/10/2016

Βάθος τοποθέτησης της αντλίας: 90m

Διάρκεια προάντλησης: 120 ώρες

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης προαντλητικής φάσης έγινε εξαγωγή της στήλης και λεπτομερής έλεγχος των συστατικών μερών της αντλίας. Στη συνέχεια, το αντλητικό συγκρότημα τοποθετήθηκε σε βάθος 90m, θεωρώντας ότι η στήλη νερού πάνω από την αντλία θα ήταν αρκετή ώστε να αποφευχθούν τυχόν φαινόμενα σπηλαίωσης από την έντονη εξάτμιση του νερού λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, καθώς και η απότομη πτώση της στάθμης σε παροχές μεγαλύτερες από 50 m³/h.

Συνεχίστηκε η προάντληση με τη στάθμη στη γεώτρηση να έχει σταθεροποιηθεί στα 60m μετά από δύο ώρες άντλησης. Το εξερχόμενο ρευστό συνέχισε να είναι θολό, με θερμοκρασία 95°C και περιεκτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων μεγαλύτερη από 10%. Η αντλία λειτούργησε ομαλά για ~70 ώρες. Στη συνέχεια υπήρξε εκ νέου θραύση του άξονα και θραύση δύο κουζινέτων. Μετά την αποκατάσταση των βλαβών, η στήλη επανατοποθετήθηκε στα 110m και η προάντληση συνεχίστηκε για άλλες 50 ώρες χωρίς να επιτευχθεί ο στόχος της πλήρους διαύγασης του νερού.

Γ. Περίοδος: 03/10/2016 - 08/10/2016

Βάθος τοποθέτησης της αντλίας: 90 και 110m

Διάρκεια προάντλησης: 120 ώρες

Η προάντληση επαναλήφθηκε για άλλες 80 ώρες με διαφορετικές παροχές από 50 m³/h ως και 70 m³/h. Και σε αυτή τη φάση, η παροχή των 70 m³/h επετεύχθη στιγμιαία. Η μέγιστη πτώση στάθμης που καταγράφηκε ήταν 75m. Η θερμοκρασία προς το τέλος της προάντλησης έλαβε την μέγιστη τιμή των 97.7°C.

Στο τέλος των προαντλήσεων το νερό εξήλθε διαυγές με περιεκτικότητα αιωρούμενων στερεών <1‰.

Μετά το τέλος των προαντλήσεων έγινε τοποθέτηση νέου άξονα στην αντλία και αποφασίστηκε να συνεχιστούν για κάποιο διάστημα αντλητικές δοκιμές με αποκλειστικό σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του αντλητικού συγκροτήματος. Μετά από συνολική διάρκεια λειτουργίας 40 ωρών με σταδιακά αυξανόμενες στροφές, η αντλία είχε ικανοποιητική απόδοση, οπότε αποφασίστηκε να αρχίσει άμεσα η άντληση κατά βαθμίδες.

5.3 Δοκιμαστική άντληση κατά βαθμίδες

Κατά τη φάση αυτή εκτελέστηκαν τέσσερις βαθμίδες δοκιμαστικών αντλήσεων διάρκειας δύο ωρών η καθεμία, με παροχές 30 m³/h, 40 m³/h, 50m³/h και 63-65 m³/h αντίστοιχα. Η μέγιστη πτώση στάθμης καταγράφηκε στην τέταρτη βαθμίδα και έφτασε στα 74.44m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Στα γραμμοσκιασμένα πλαίσια στον Πίνακα Π5.3.1 του Παραρτήματος, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της 3^{ης} βαθμίδας, κατά την οποία παρατηρήθηκε αναστροφή της πτώσης στάθμης (δηλ. άνοδος). Συγκεκριμένα, μετά το 25^ο λεπτό άντλησης, η στάθμη ανέβηκε κατά σχεδόν 2.4m. Στην 4^η βαθμίδα η πτώση στάθμης ακολουθεί ομαλή πορεία, πιθανότατα λόγω της επίτευξης θερμοκρασιακής ισορροπίας του συστήματος.

Η πτώση στάθμης και η ειδική παροχή ανά βαθμίδα παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα. Στην περίπτωση της 3^{ης} βαθμίδας οι τιμές θεωρούνται αξιόπιστες μόνο έως την χρονική στιγμή έναρξης αναστροφής της στάθμης.

Πίνακας 1 - Συγκεντρωτικός Πίνακας Παροχής-Πτώσης Στάθμης Step-Ειδικής Παροχής

Παροχή (m ³ /h)	30	40	50	65
Πτώση Στάθμης Step (m)	30.35	12.7	7.24	4.74
Ειδική Παροχή (m ² /h)	0.99	3.15	6.91	13.71

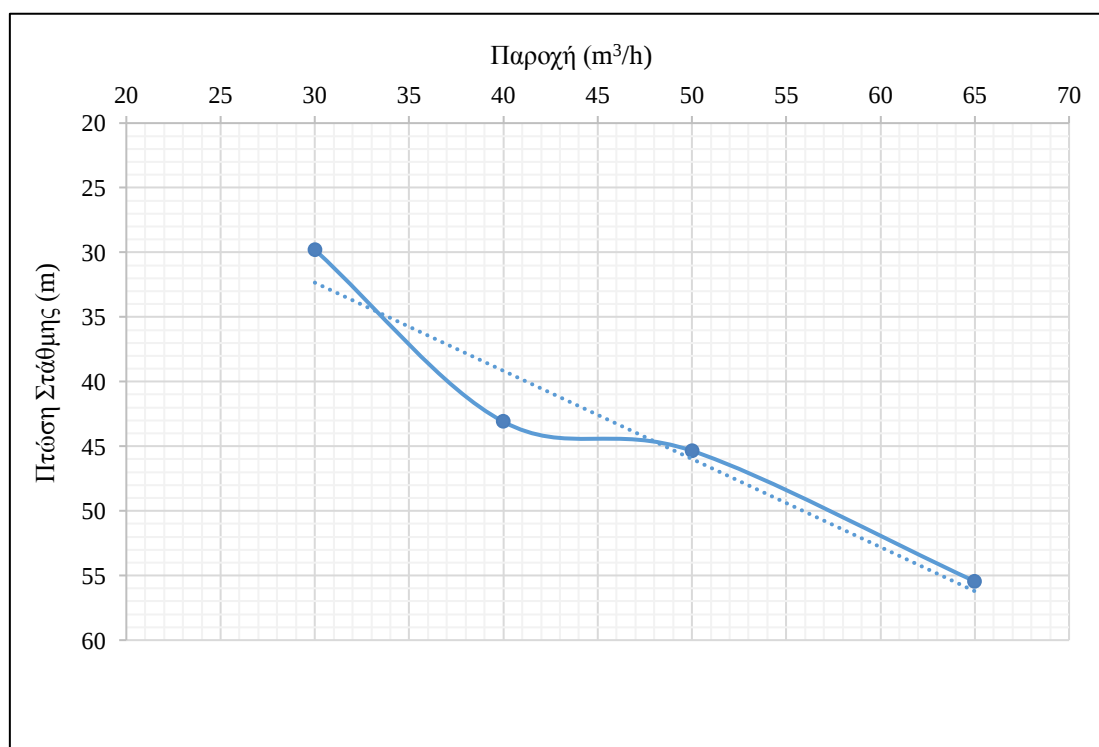
Παρατηρείται σταδιακή αύξηση της ειδικής παροχής της γεώτρησης καθώς αυξάνεται η παροχή άντλησης. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη πτώση στάθμης (4^η βαθμίδα) ή στην αναστροφή της πτώσης (3^η βαθμίδα).

Το γεγονός αυτό, μπορεί να αποδοθεί, χωρίς όμως απόλυτη βεβαιότητα, στην διαρκώς αυξανόμενη θερμοκρασία, η οποία προκαλεί μείωση της πυκνότητας του ρευστού, γεγονός που το αναγκάζει να καταλαμβάνει πρόσθετο χώρο εντός της παραγωγικής σωλήνωσης. Επιπλέον, δεν μπορεί να αποκλειστεί και η σταδιακή ενεργοποίηση νέων υδροφορέων. Η πτώση του υδραυλικού φορτίου μέσα στη γεώτρηση πιθανώς προκαλεί τροφοδοσία με μεταφορά ρευστών μέσω των ενεργών ρηγμάτων, από θερμότερα τμήματα του κύριου ταμιευτήρα, που βρίσκονται ανατολικότερα. Όπως έδειξαν προηγούμενες έρευνες, στην περιοχή ανατολικά της γεώτρησης ΑΑ-

6Ρ, εντός των ηφαιστειακών θόλων, έχει διαπιστωθεί ότι η γεωθερμική βαθμίδα λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της που ανέρχονται έως και 26.95°C/100m.

Η εκτίμηση περί πλευρικής τροφοδοσίας επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα πτώσης στάθμης-παροχής (Σχ. 33). Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει σε γενικές γραμμές εκείνη ενός υπό πίεση ταμιευτήρα με πλευρική υδραυλική επικοινωνία, ο οποίος βρίσκεται σε φάση σταδιακής ανάπτυξης με επανατροφοδοσία της γεώτρησης, έχοντας ως αποτέλεσμα τον συνεχώς μειούμενο ρυθμό πτώσης της στάθμης με την αύξηση της παροχής έως την μέγιστη αντλούμενη παροχή των 65 m³/h.

Οι τεχνικές δυσκολίες δεν επέτρεψαν την άντληση με παροχή μεγαλύτερη των 65 m³/h, οπότε δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις δυνατότητες της γεώτρησης. Για τους λόγους αυτούς, κρίνεται απαραίτητη η επανάληψη των δοκιμαστικών αντλήσεων με μεγαλύτερη παροχή και, ενδεχομένως τόσο υψηλή, ώστε ο υπό πίεση υδροφορέας να συμπεριφερθεί ως ελεύθερος και να μπορεί να γίνει εκτίμηση της κρίσιμης παροχής.



Σχήμα 33 - Γράφημα Παροχής - Πτώσης Στάθμης

5.4 Δοκιμαστική άντληση σταθερής παροχής

Περίοδος: 17/10/2016 - 21/10/2016

Βάθος τοποθέτησης της αντλίας: 90m

Διάρκεια άντλησης: 78 ώρες

Σταθερή παροχή: 45 m³/h

Με βάση τις προαντλητικές δοκιμές, τις δοκιμαστικές αντλήσεις κατά βαθμίδες και την εξασφάλιση ασφαλούς, συνεχούς και απρόσκοπτης λειτουργίας του αντλητι-

κού συγκροτήματος αποφασίστηκε η δοκιμαστική άντληση διαρκείας να γίνει με σταθερή παροχή $45 \text{ m}^3/\text{h}$.

Η στάθμη μετρήθηκε εντός του πιεζομετρικού σωλήνα της γεώτρησης. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας του ρευστού.

Η δοκιμαστική άντληση διήρκησε 78 ώρες. Μετά το τέλος της άντλησης σταθερής παροχής έγιναν μετρήσεις επαναφοράς της στάθμης (Πίνακας Π5.4.1).

Εντός 16min από την έναρξη της άντλησης, η στάθμη σταθεροποιήθηκε στα 60.2m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και παρέμεινε σταθερή έως το τέλος της άντλησης. Από το πέρας της άντλησης και εντός $\sim 7\text{min}$, η στάθμη επανήλθε στο βάθος ηρεμίας. Έπειτα, μετά το πέρας των επόμενων 10min, η στάθμη ανήλθε στα 12.9m βάθος, σχεδόν 6m πάνω από την στάθμη ηρεμίας. Μόλις ξεκίνησε η σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του ρευστού, η στάθμη άρχισε σταδιακά να υποχωρεί. Προφανώς δεν σημειώθηκε υπολειμματική στάθμη, γεγονός το οποίο, σε συνδυασμό με τη γρήγορη επαναφορά, γενικά υποδηλώνει την ύπαρξη πολύ δυναμικών υδραυλικών συστημάτων με πολύ καλά χαρακτηριστικά (T, k, S).

Η θερμοκρασία του ρευστού μετρήθηκε συστηματικά και έλαβε την μέγιστη τιμή 97.7°C μετά από 5 ώρες άντλησης.

Η αδυναμία άντλησης μεγάλης διάρκειας με κατάλληλη παροχή ($\gg 45\text{m}^3/\text{h}$), ώστε να διερευνηθούν οι πραγματικές δυνατότητες της γεώτρησης και να επιτευχθεί η απαραίτητη πτώση στάθμης, κρίνει τις μετρήσεις ως ακατάλληλες για οποιοδήποτε υπολογισμό. Αυτό κατέστησε απολύτως απαραίτητη την επανάληψη της άντλησης, η οποία ούτως ή άλλως προγραμματίζεται εντός των επόμενων μηνών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ

6.1 Γενικά

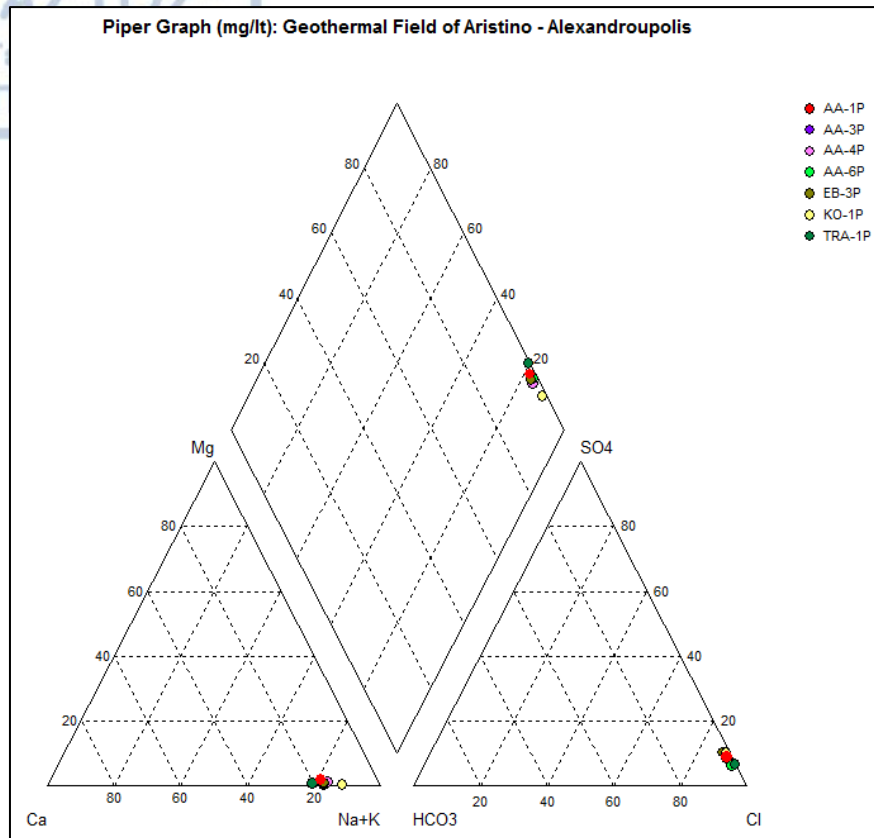
Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται το υδροχημικό καθεστώς του γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου, τόσο από βιβλιογραφικά δεδομένα (Πουτούκης και Ντότσικα 1998, Κολιός κ.ά 2001, Δαλαμπάκης κ.ά 2013) όσο και από δεδομένα που προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η κατασκευή των διαγραμμάτων και ο υπολογισμός των τελευταίων δύο στηλών του Πίνακα 2 και των τιμών των γεωθερμομέτρων του Πίνακα 3 έγιναν με την χρήση του προγράμματος Aquachem v.2014 της Schlumberger Limited.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων που ακολουθούν λήφθηκαν από διάφορες γεωθερμικές γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου και σε διαφορετικές περιόδους. Συγκεκριμένα, η δειγματοληψία από τις γεωτρήσεις TRA-1P, AA-1P, AA-3P, AA-4P, EB-3P και KO-1P έγινε στις 18/3/2013 (Δαλαμπάκης κ.ά, 2013, δειγματοληψία από Δαλαμπάκη Π., Γεωλόγο – Γεωθερμικό του Ε.Λ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ», Χημικές αναλύσεις από ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ») ενώ από την AA-6P στις 8/10/2016 (δειγματοληψία από Βουλανά Δ, μετά από 1 ώρα άντλησης, Χημικές αναλύσεις από ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ»). Οι αναλύσεις έγιναν στην υγρή φάση μετά το διαχωρισμό των φάσεων και στις δύο περιπτώσεις.

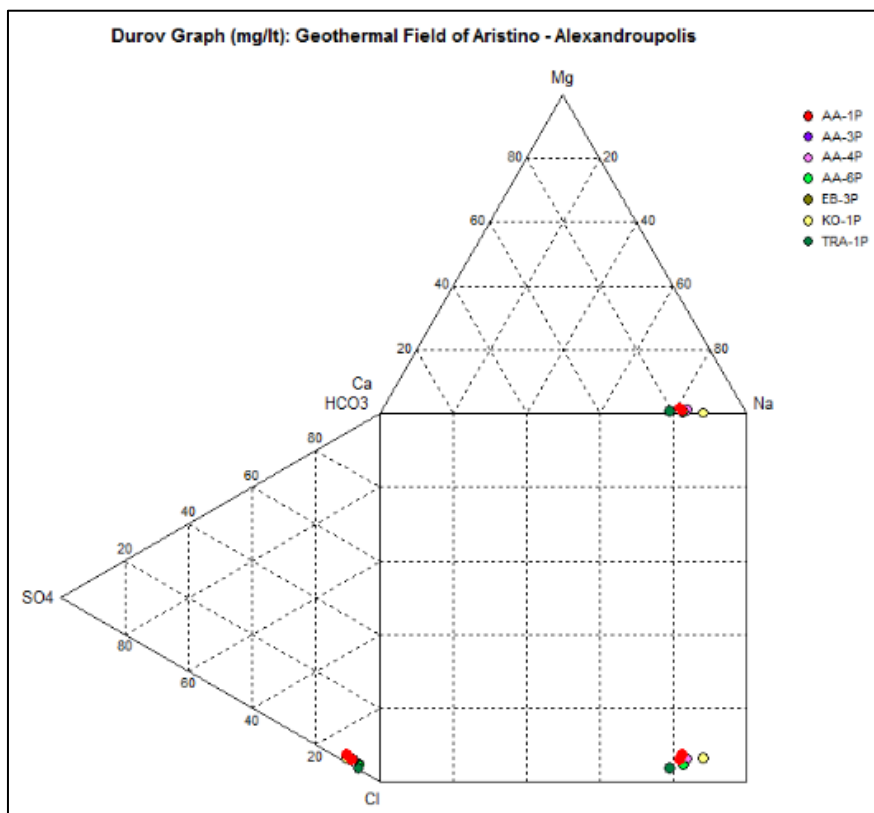
6.2 Υδροχημεία

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από Δαλαμπάκης κ.ά (2013) και από την ανάλυση του δείγματος της AA- 6P που συλλέχθηκε από τον Βουλανά Δ. στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής. Οι συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων των δειγμάτων της περιοχής του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου, καθώς και το δείγμα από τη θερμή πηγή της Τραϊανούπολης, παρουσιάζουν υψηλή αλατότητα (Δαλαμπάκης κ.ά, 2013, χημισμός δείγματος AA-6P, 2016). Στα διαγράμματα Piper (1944) και Durov (1948), όπως φαίνεται στα Σχήματα 34 και 35, διακρίνεται ένας υδροχημικός τύπος, $\text{Na}^+-(\text{Ca}^{2+})-\text{Cl}^--(\text{SO}_4^{2-})$, δηλαδή πιθανολογείται η συμμετοχή θαλασσινού νερού στη σύστασή τους. Το κατιόν Ca^{2+} και το ανιόν SO_4^{2-} συμμετέχουν στον ευρύτερο χημισμό του πεδίου, χαρακτηρίζοντας τα ρευστά ως $\text{Na}^+-(\text{Ca}^{2+})-\text{Cl}^--(\text{SO}_4^{2-})$ τύπου, όπως αναφέρεται από τους Κολιός κ.ά (2001), Πουτούκης και Ντότσικα (1998) αλλά και από τις αναλύσεις του δείγματος της γεώτρησης AA-6P.

Σύμφωνα με τους Πουτούκη και Ντότσικα (1998), κατά τις γεωτρητικές έρευνες της περιόδου 1993-1994, παρατηρήθηκε μετατόπιση του υδροχημικού τύπου από $\text{Na}-(\text{Ca})-\text{Cl}-(\text{SO}_4)$ σε $\text{Na}-\text{Cl}-(\text{SO}_4)$ στις γεωτρήσεις EB-3P και KO-1P. Κατά τη διάρκεια της άντλησης της γεώτρησης EB-3P, η μεταβολή αυτή συνοδεύτηκε από αύξηση της αλατότητας και παράλληλη άνοδο της θερμοκρασίας. Πιο αναλυτικά, η συγκέντρωση των χλωριόντων στην αρχή των δοκιμαστικών αντλήσεων της EB-3P ήταν 2252 mg/lit, μετά από άντληση 6 ωρών η συγκέντρωση σε Cl^- αυξήθηκε στα 3748 mg/lit ($T=85^\circ\text{C}$), ενώ στο τέλος 4960 mg/lit με θερμοκρασία $T=92.5^\circ\text{C}$.



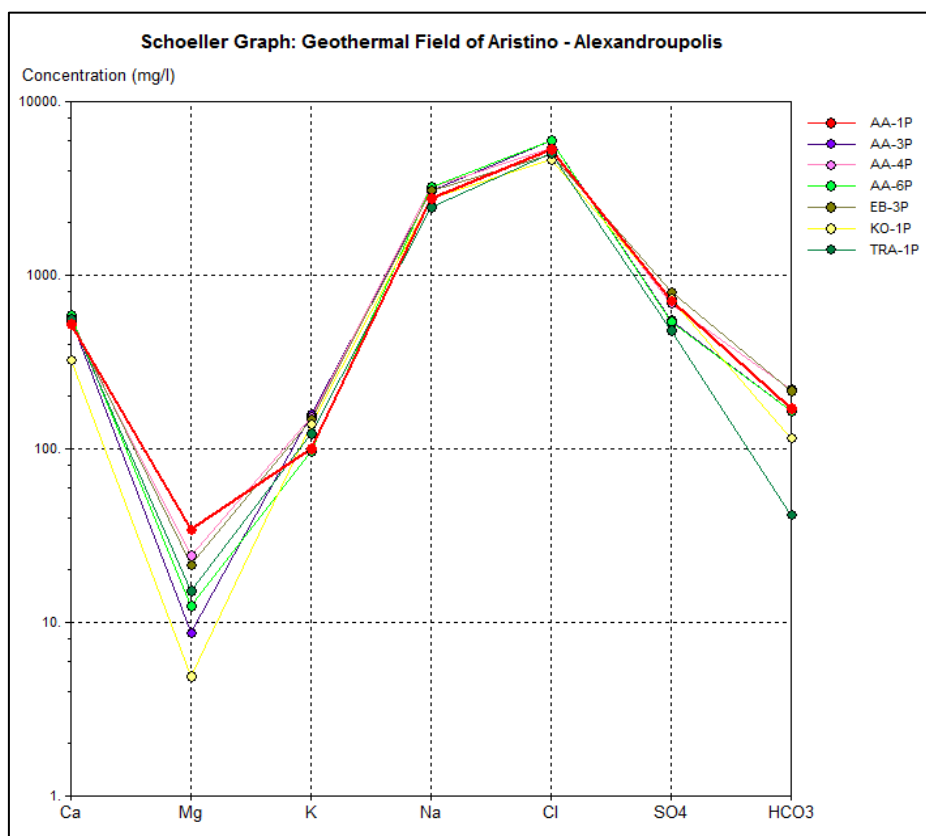
Σχήμα 34 - Διάγραμμα Piper



Σχήμα 35 - Διάγραμμα Durov

Οι ιοντικοί λόγοι Na/Cl, K/Cl (μη βέβαιοι δείκτες θαλάσσιας διείσδυσης) και Br/Cl (βέβαιοι δείκτες θαλάσσιας διείσδυσης) υποδεικνύουν τη συμμετοχή θαλασσινού νερού στο γεωθερμικό σύστημα. Με βάση τις τιμές των συγκεντρώσεων των ιόντων Br⁻ και Cl⁻ υπολογίστηκε ότι η συμμετοχή αυτή είναι περίπου 23% ± 1, θεωρώντας ότι τα χλωριόντα προέρχονται αποκλειστικά από τη θάλασσα (Πουτούκης και Ντότσικα, 1998).

Με βάση την κατανομή των αλκαλικών γαιών παρατηρείται εμπλουτισμός στα ιόντα Ca²⁺, HCO₃⁻ και Li⁺ λόγω διαδικασιών διάλυσης σε συνθήκες σχετικά υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων CO₂. Η μείωση του Mg²⁺ αποδίδεται στην παρουσία δευτερογενών υδροθερμικών ορυκτών, όπως ο χλωρίτης που βρέθηκε κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων KO-1P και EB-3P. Στις γεωτρήσεις αυτές η υδροφορία αναπτύσσεται εξολοκλήρου εντός των εξαλοιωμένων δακτυοανδευσιτικών λαβών. Τέτοια ορυκτά δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση ρευστού-πετρώματος σε μέσες θερμοκρασίες (T=80-90°C) (Πουτούκης και Ντότσικα, 1998 και Κολιός κ.ά, 2001). Ελάττωση του Mg²⁺ παρατηρείται και στα δείγματα που λήφθηκαν το 2013 από τις γεωθερμικές γεωτρήσεις TRA-1P (παρουσιάζει και μία μικρή ελάττωση στη συγκέντρωση των HCO₃⁻), AA-1P, AA-3P, AA-4P, EB-3P και KO-1P καθώς και στο δείγμα που λήφθηκε το 2016 από την γεώτρηση AA-6P (Σχ. 36).



Σχήμα 36 - Διάγραμμα Schoeller

Ο ρηχότερος ταμειντήρας χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις αλκαλίων σε σύγκριση με τις αλκαλικές γαίες. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η κυκλοφορία του ρευστού γίνεται κυρίως εντός των ηφαιστειακών σχηματισμών της περιοχής. Το τε-

λευταίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο χημισμός του ρηχότερου ταμιευτήρα οφείλεται περισσότερο στην υδρόλυση των αργίλοπυριτικών ορυκτών και λιγότερο στην ανάμειξη με τα ρευστά του βαθύτερου ταμιευτήρα (Πουτούκης και Ντότσικα, 1998). Η οξείδωση του σιδηροπυρίτη που εμφανίζεται σε μικρές ποσότητες εντός των δακτοειδών ανδεσίων μπορεί να εξηγήσει τον εμπλουτισμό των ρευστών σε SO_4^{2-} . Παράλληλα, ο μη ταυτόχρονος εμπλουτισμός σε Ca^{2+} αποδίδεται στην πιθανή καθίζηση ασβετίτη (Πουτούκη και Ντότσικα, 1998; ΕΚΕΤΑ/ΙΕΤΕΘ, 2014). Η δυνητικότητα των επικαθίσεων ασβεστίτη, όπως μελετήθηκε από το ΕΤΕΚΑ/ΙΕΤΕΘ, περιγράφεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

6.3 Έλεγχος Σχηματισμού Επικαθίσεων Ασβεστίτη

Οι επικαθίσεις ασβεστίτη (CaCO_3) είναι ένα από τα κοινότερα προβλήματα των γεωθερμικών γεωτρήσεων, σωληνώσεων, δικτύων και μονάδων. Η ύπαρξη αυτού του προβλήματος οδήγησε στην εύρεση ορισμένων δεικτών για την πρόβλεψη της τάσης δημιουργίας ανθρακικών επικαθίσεων. Μερικοί από αυτούς τους δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι: ο Δείκτης Κορεσμού Langelier (Langelier Saturation Index, LSI), ο δείκτης Ryznar (Ryznar Index, RI) και ο λόγος Υπερκορεσμού S. Οι τιμές των δεικτών για την συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Ο δείκτης Langelier χρησιμοποιείται για σχετικά αραιά διαλύματα, δηλαδή για συνολικά διαλυμένα στερεά (ΣΔΣ) μέχρι περίπου 4000 mg/l. Στη περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου η ύπαρξη περίπου ΣΔΣ 10000 mg/l κρίνει τη χρήση αυτού του δείκτη ως ακατάλληλη, υπό την έννοια ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί και να ερμηνευτεί μεμονωμένα. Πολλοί ερευνητές συσχετίζουν τη διαβρωτικότητα των νερών με αυτόν τον δείκτη, κάτι όμως που θεωρείται εσφαλμένο για τα γεωθερμικά ρευστά που περιέχουν χλωριόντα και άλλα συστατικά (ΕΚΕΤΑ/ΙΕΤΕΘ, 2014).

Ο δείκτης Ryznar είναι ένας εμπειρικός δείκτης που παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την περίπτωση ασβεστιτικών επικαθίσεων. Υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες, θετικός δείκτης Langelier δεν σημαίνει απαραίτητα ότι υπάρχει τάση για σχηματισμό επικαθίσεων και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο δείκτης Ryznar.

Η τάση για τη δημιουργία επικαθίσεων είναι δυνατό να εκτιμηθεί και από τον υπολογισμό του βαθμού υπερκορεσμού S, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \left[\frac{(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})}{K_{sp}} \right]^{1/2}$$

(οι παρενθέσεις εκφράζουν τις ενεργότητες των ιόντων και K_{sp} είναι το γινόμενο διαλυτότητας).

Τιμές του S μεγαλύτερες της μονάδας δηλώνουν ότι το νερό είναι υπέρκορο ως προς το ανθρακικό ασβέστιο και ότι υπάρχει τάση του ρευστού να αποβάλει την περίσσεια του CaCO_3 με τη μορφή επικαθίσεων (καταβύθιση CaCO_3). Αντίθετα, τιμές του S μικρότερες της μονάδας δείχνουν ότι το νερό είναι υπόκορο, με αποτέλεσμα τη διαλυτοποίηση τυχόν επικαθίσεων που έχουν ήδη σχηματιστεί.

Σημειώνεται ότι για να σχηματιστούν επικαθίσεις απαιτείται να ξεπεραστεί κάποιος κρίσιμο λόγος υπερκορεσμού. Εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι ο κρίσιμος λόγος υπερκορεσμού για τον ασβεστίτη είναι ~5 (Ανδρίτσος κ.ά, 1996). Η ε-

μπειρία από τη μελέτη γεωθερμικών μονάδων χαμηλής ενθαλπίας στην Ελλάδα έδειξε ότι η κρίσιμη τιμή αυτού του λόγου έχει τιμή 3 (ΕΚΕΤΑ/ΙΕΤΕΘ, 2014).

Πίνακας 2 - Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ρευστών από 7 γεωτρήσεις του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου αναφορικά με την τάση σχηματισμού επικαθίσεων ασβεστίτη (Τροποποιημένο από Δαλαμπάκη κ.ά, 2013- Οι δύο τελευταίες στήλες υπολογίστηκαν από τον Βουλανά Δ.)

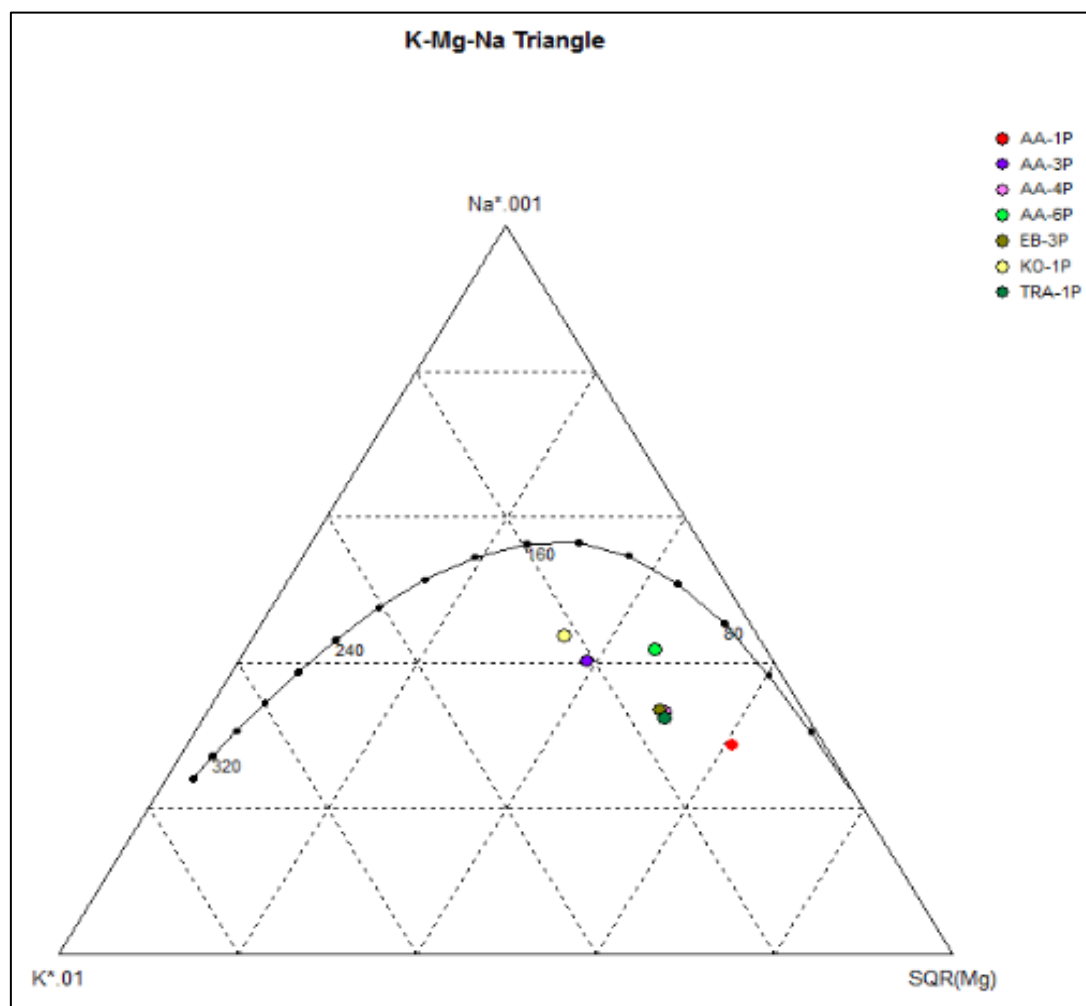
Γεώτρηση	ΑΑ-1P*	ΑΑ-4P**	ΑΑ-3P**	ΚΟ-1P**	ΕΒ-3P**	ΑΑ-6P**	ΤΡΑ-1P***
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά γεώτρησης							
Βάθος (m)	250	460	360	120	250	410	50
Θερμοκρασία (°C)	52	64	89.5	82	92	97	50
pH (στους 25°C)	7.72	8.11	7.58	6.61	7.04	6.9	7.4
Αγωγιμότητα (μS/cm) (στους 25°C)	15960	13530	15170	14800	15500	18100	14050
Ολικά διαλυμένα στερεά, TDS (g/l)	9.54	10.18	10.51	8.64	9.76	10.547	8.378
Δείκτες υπερκορεσμού							
Λόγος Υπερκορεσμού (S) - PHREEQC	3.35	6.32	2.99	0.80	2.82	-	-
Λόγος Υπερκορεσμού (S) - HYDRAQL	3.28	6.34	2.52	0.73	2.32	-	-
Δείκτης Langelier (LSI)	0.57	1.32	1.0	-0.45	0.48	-	-0.97
Δείκτης Ryznar (RI)	6.7	5.5	5.6	7.6	6.2	8.2	12

* Ανώτερος Ταμιευτήρας, ** Βαθύτερος Ταμιευτήρας, *** Υπέρκειται Γεωθερμικά Ενεργής Ρηξιγενούς Ζώνης

Σύμφωνα με την τελική έκθεση του έργου «Μελέτη χημισμού γεωθερμικών ρευστών και συμπεριφορά επιλεγμένων υλικών στην αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου - Αλεξανδρούπολης», η οποία ανατέθηκε από τον Ινστιτούτο Εργείων Βελτιώσεων του ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ» και υλοποιήθηκε το 2014 από Επιστημονική Ομάδα [ΕΚΕΤΑ/ΙΕΤΕΘ (Ινστιτούτο Έρευνας & Τεχνολογίας Θεσσαλίας – Βόλος)], συμπεραίνεται ότι θα υπάρξει έντονο πρόβλημα καθαλατώσεων με το ρευστό της γεώτρησης ΑΑ-4P, ενώ είναι αρκετά πιθανό να υπάρξει πρόβλημα και με τα ρευστά των γεωτρήσεων ΑΑ-1P, ΑΑ-3P και ΕΒ-3P, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

6.4 Γεωθερμομετρία

Σύμφωνα με το τριγωνικό διάγραμμα K-Mg-Na του Σχήματος 37 (Giggenbach, 1998), το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα και την αναγνώριση του βαθμού ισορροπίας των νερών, τα υπό μελέτη δείγματα των ρευστών χαρακτηρίζονται ως νερά σε μερική ισορροπία ή αναμεμιγμένα με ρευστά. Η ανάμειξη γίνεται μεταξύ των ρευστών που εντοπίστηκαν σε μικρότερα βάθη, με αρχική θερμοκρασία 53°C, και των βαθύτερων ρευστών με εκτιμώμενη αρχική θερμοκρασία 140°C (Κολιός κ.ά, 2001).



Σχήμα 37 – Τριγωνικό Διάγραμμα K-Mg-Na

Τα γεωθερμόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι: Na/K (Fournier 1973, Truesdell 1976, Fournier & Potter 1979, Fournier 1979), Na-K-Ca (Fournier 1979) και Na-K-Ca Mg corrected (Fournier & Truesdell 1979), και αναγράφονται στον Πίνακα 3.

Η γεώτρηση AA-1P υδρομαστεύει τον ρηχότερο υδροφορέα πράγμα που δικαιολογεί τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν. Οι σχετικά υψηλές υπολογιζόμενες θερμοκρασίες πιθανόν οφείλονται την ανάμειξη των ρευστών.

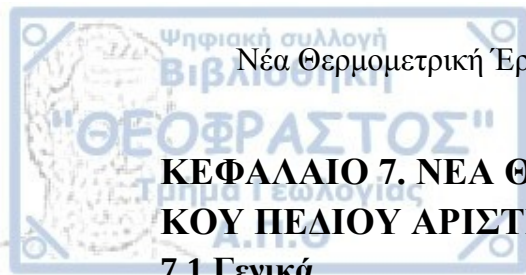
Η γεώτρηση των λουτρών Τραϊνούπολης TRA-1P, που βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από τις υπόλοιπες, υπέρκειται της γεωθερμικά ενεργής ζώνης διαρρήξεων και ρηγμάτων που θεωρείται ότι τροφοδοτεί τη γεώτρηση με ρευστά υψηλής θερμοκρασίας από μεγαλύτερα βάθη.

Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις υδρομαστεύουν τον βαθύτερο ταμιευτήρα, γεγονός που δικαιολογεί τις υψηλές θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν από τα γεωθερμόμετρα.

Πίνακας 3 - Πίνακας Γεωθερμομέτρων

Γεωθερμόμετρο	AA-1P*	AA-4P**	AA-3P**	KO-1P**	EB-3P**	AA-6P**	TRA-1P***	Αναφορά
Na/K	90	110	118	115	112	76	115	Fournier 1973
Na/K	99	119	126	123	120	86	123	Truesdell 1976
Na/K	156	175	181	178	176	143	179	Fournier & Potter 1979
Na/K	143	160	166	163	161	131	164	Fournier 1979
Na-K-Ca	149	164	167	168	164	141	162	Fournier 1979
Na-K-Ca-Mg corrected	129	149	-	-	154	-	157	Fournier & Truesdell 1979

* Ανώτερος Ταμιευτήρας, ** Βαθύτερος Ταμιευτήρας, *** Υπέρκειται Γεωθερμικά Ενεργής Ρηξιγενούς Ζώνης



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΝΕΑ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΑΡΙΣΤΗΝΟΥ-ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

7.1 Γενικά

Η αρχική θερμομετρική έρευνα στην περιοχή του Αρίστηνου εκπονήθηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε κατά την περίοδο 1998-2001. Η δεύτερη και πιο πρόσφατη έλαβε χώρα στις 18-19/10/2016, στα πλαίσια της οποίας θερμομετρήθηκαν κατά βάθος όλες οι γεωτρήσεις του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου από τους Δαλαμπάκη Π., Γεωλόγο – Γεωθερμικό; Ηλία Α., Γεωπόνο - Υδραυλικό Msc του ΕΛ.Γ.Ο «ΔΗΜΗΤΡΑ», και Βουλανά Δ., φοιτητή του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. (Σχ. Π7.2.1).

7.2 Μετρήσεις

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκε το θερμόμετρο Pt1000 της Delta Ohm, στο οποίο είχε προσαρτηθεί ακροδέκτης με μεγάλο μήκος καλωδίου της Quteco (Σχ. Π7.2.2). Το βήμα μέτρησης ήταν 10m, ξεκινώντας από το βάθος των 20m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους έως τον πυθμένα της κάθε γεώτρησης.

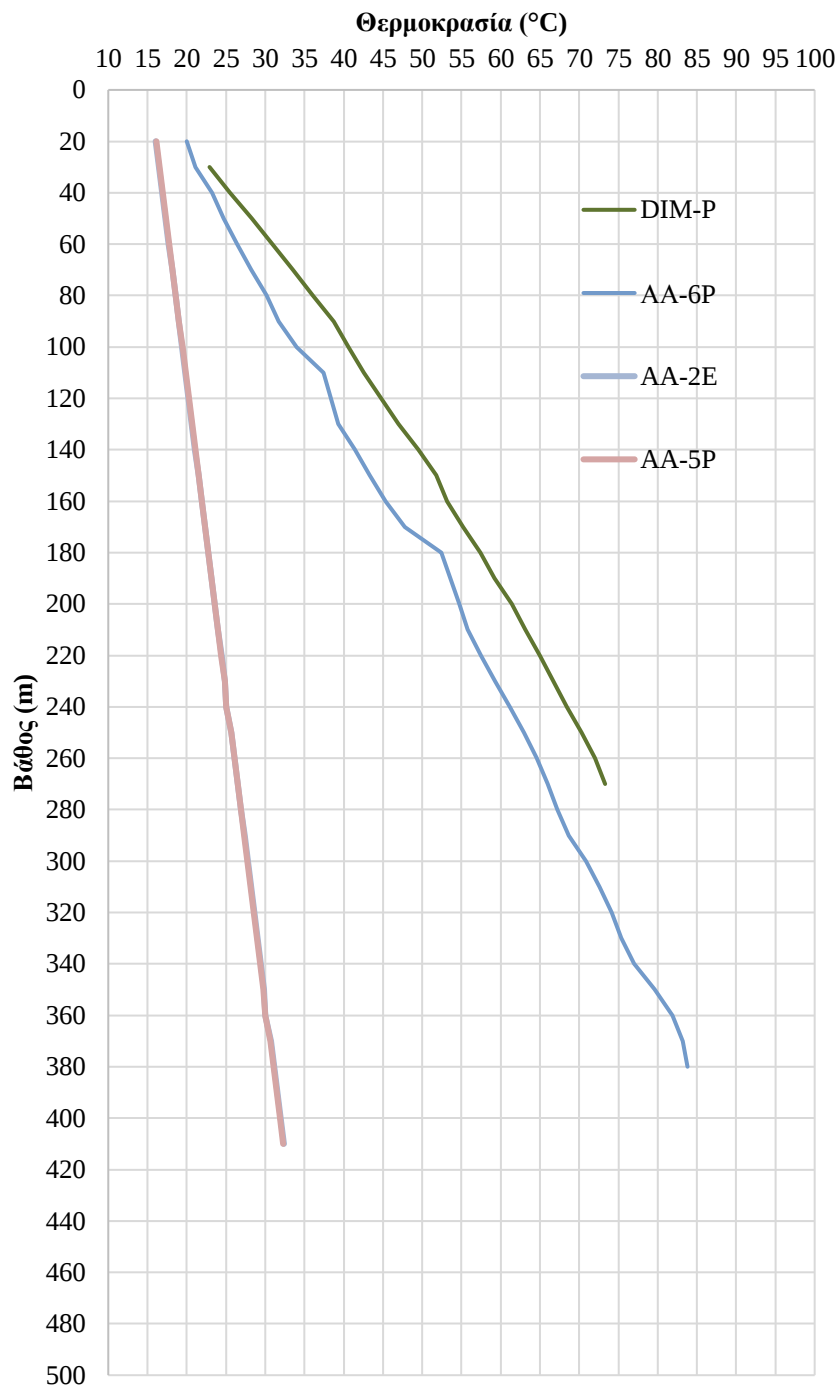
7.3 Επεξεργασία Θερμομετρικών Δεδομένων

7.3.1 Γενικά

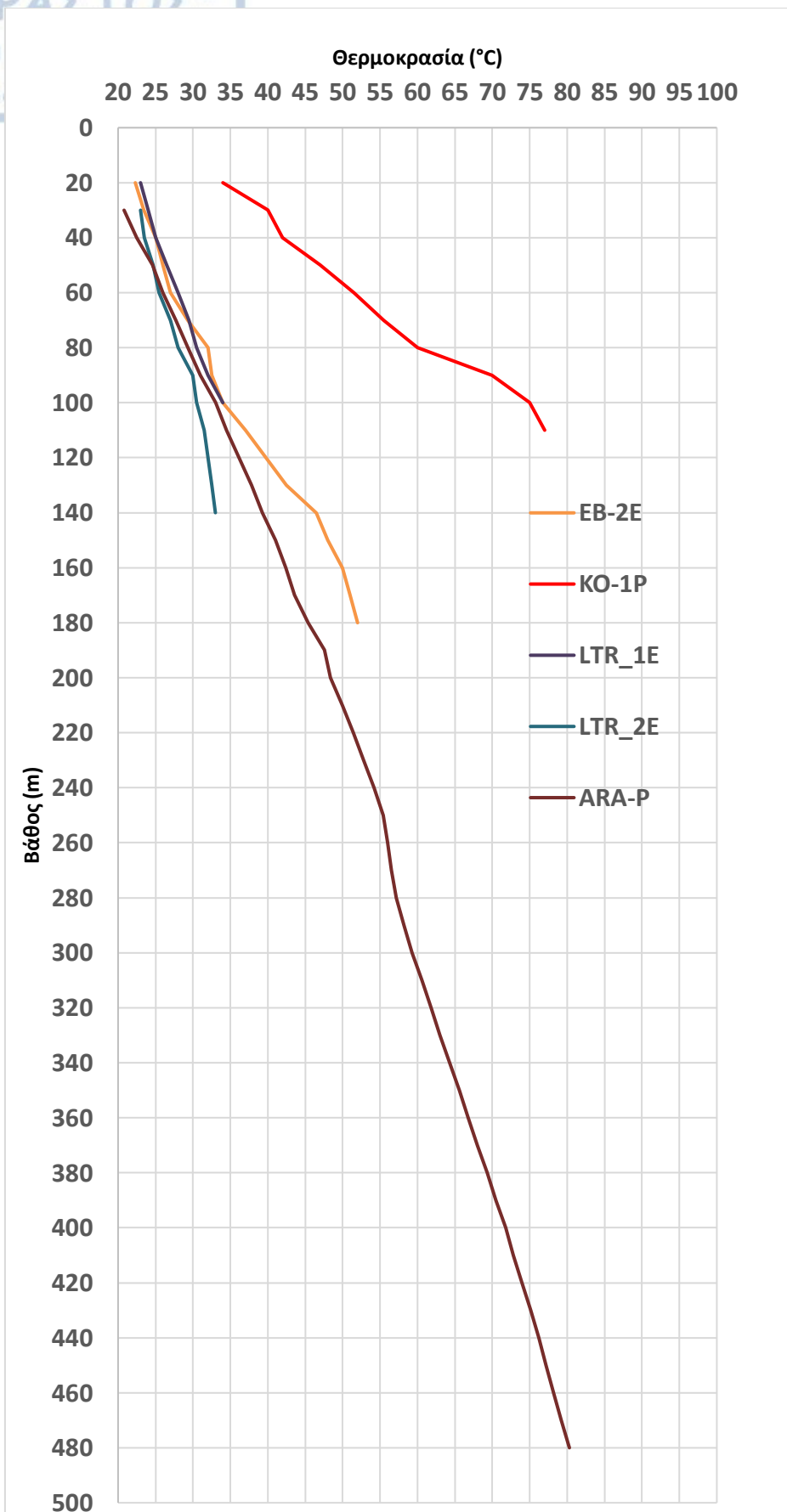
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμομετρήσεων και της γεωστατικής επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από την προαναφερθείσα έρευνα. Σκοπός αυτής της επεξεργασίας ήταν η κατασκευή του γεωθερμικού μοντέλου του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου, με βάση το σύνολο των ισοθερμοκρασιακών επιφανειών (ίδια θερμοκρασία σε συνάρτηση με το βάθος) για τις θερμοκρασίες 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C και των ισοθερμοκρασιακών καμπυλών (μεταβολή της θερμοκρασίας στο ίδιο βάθος) για τα βάθη 100m, 200m, 300m. Η επεξεργασία έγινε με την χρήση του προγράμματος Surfer v.14 της Golden Software.

7.3.2 Διαγράμματα Γεωθερμικών Βαθμίδων Γεωτρήσεων Βεβαιωμένου Γεωθερμικού Πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης

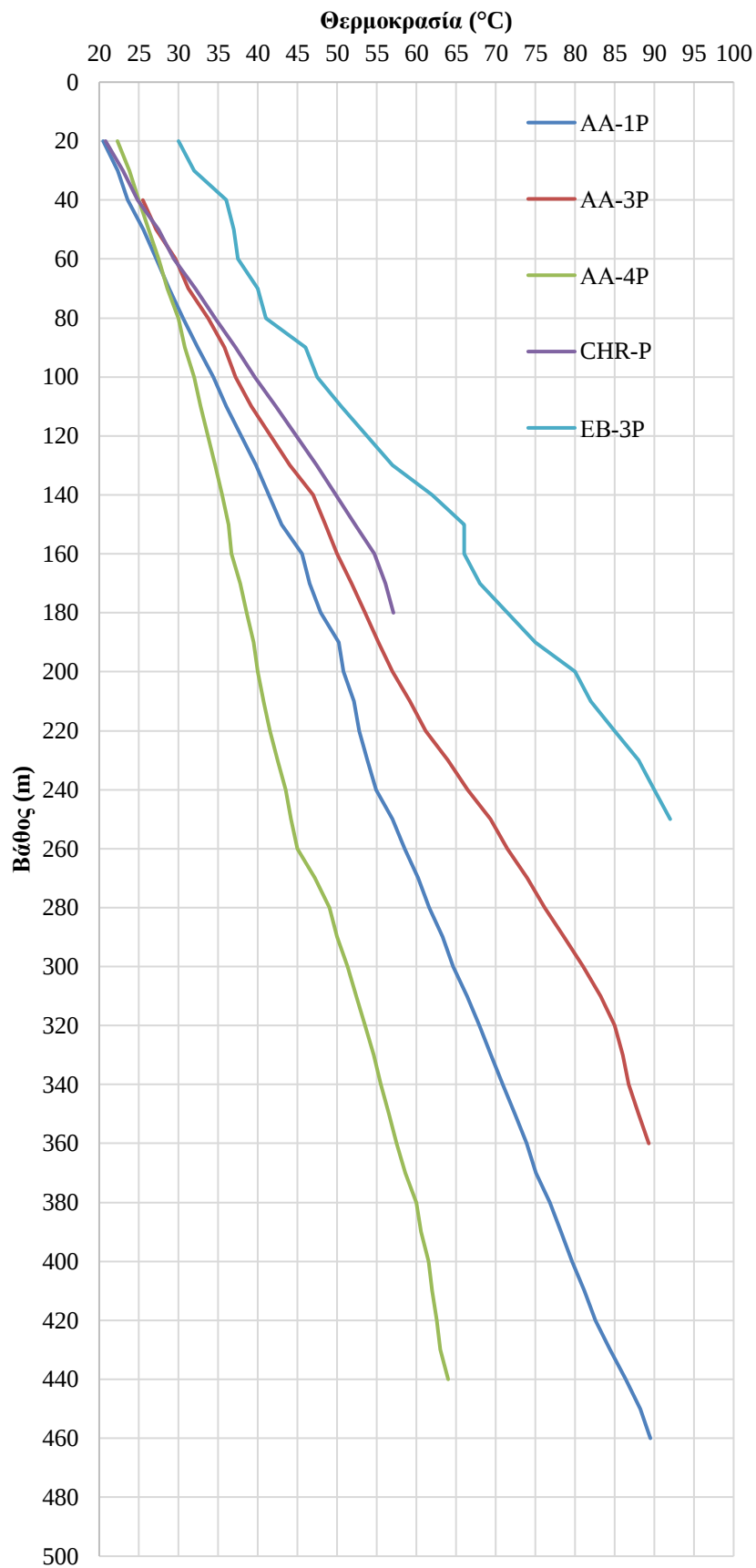
Με βάση τα ακόλουθα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας με το βάθος (Σχ. 38-40), υπολογίστηκαν οι μέσες γεωθερμικές βαθμίδες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.



Σχήμα 38 - Διάγραμμα Γεωθερμικών Βαθμίδων DIM-P, AA-6P, AA-2E, AA-5P



Σχήμα 39 - Διάγραμμα Γεωθερμικών Βαθμίδων EB-2E, KO-1P, LTR_1E, LTR_2E, ARA-P



Σχήμα 40 - Διάγραμμα Γεωθερμικών Βαθμίδων AA-1E, AA-3P, AA-4P, CHR-P, EB-3P

Πίνακας 4 - Συγκεντρωτικός Πίνακας Μέσων Γεωθερμικών Βαθμίδων Γεωτρήσεων Βεβαιωμένου Γεωθερμικού Πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης

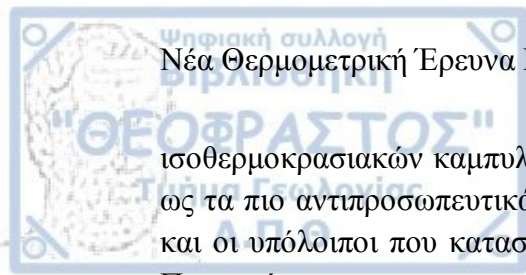
Ονομασία Γεώτρησης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμοκρασία (°C)
AA-5P	4.15	460	32.27
AA-2E	4.20	460	32.38
LTR_2E	9.09	140	33.00
AA-4P	10.00	440	64.00
ARA-P	13.28	480	80.30
LTR_1E	13.75	100	34.00
AA-1E	15.92	470	92.62
AA-6P	17.72	408	83.20
EB-2E	18.75	180	52.00
AA-3P	19.78	360	89.30
DIM-P	21.16	270	73.30
CHR-P	22.50	180	57.00
EB-3P	26.95	250	92.00
KO-1P	49.17	140	93.00

Οι γεωθερμικές βαθμίδες που υπολογίστηκαν για τις γεωτρήσεις LTR_1E, LTR_2E, EB-2E, CHR-P και KO-1P δεν θεωρούνται απολύτως αξιόπιστες, αλλά κυρίως ενδεικτικές, λόγω του μικρού βάθους ανόρυξης (<180m).

7.3.3 Επιλογή Μεθόδου Γεωστατιστικής Επεξεργασίας

Η επιλογή της κατάλληλης γεωστατικής μεθόδου έγινε μετά την εφαρμογή των μεθόδων Inverse Distance to a Power, Data metrics, Minimum Curvature, Modified Shepard's Method, Polynomial Regression, Moving Average, Kriging, Local Polynomial, Nearest Neighbor, Radial Basis Function (Multiquadric), Natural Neighbor, Triangulation with Linear Interpolation.

Από τις 12 παραπάνω μεθόδους επιλέχτηκε η Radial Basis Function (Multiquadric) εξαιτίας της δυνατότητας απεικόνισης με πιο σαφή τρόπο των χωρικών μεταβολών της θερμοκρασίας και την εξαγωγή συμπερασμάτων για το θερμοκρασιακό καθεστώς στην περιοχή, σε συνδυασμό με τις γεωλογικές παρατηρήσεις και τα γεωθερμικά δεδομένα. Η μορφή και η διάταξη των καμπυλών, κυρίως στις περιοχές των αναθολώσεων αλλά και μεταξύ αυτών, ενδεχομένως αποτελούν ένδειξη για την ύπαρξη ζωνών τροφοδοσίας/ρηγμάτων. Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι ισοθερμοκρασιακές επιφάνειες των 30°C (Σχ. 41), 50°C (Σχ. 42) και ο χάρτης των

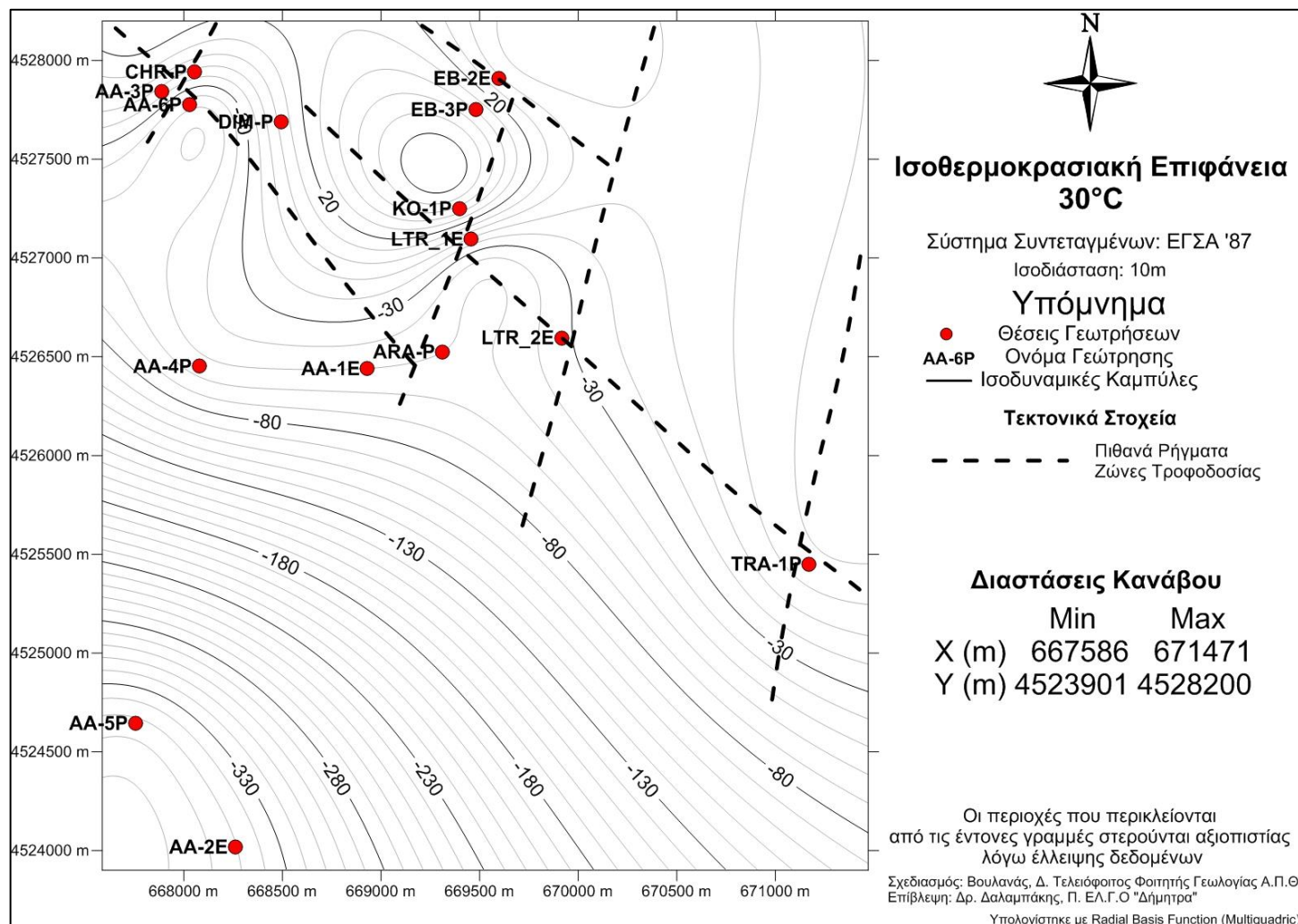


ισοθερμοκρασιακών καμπυλών για το βάθος των 100m (Σχ. 43), τα οποία κρίνονται ως τα πιο αντιπροσωπευτικά για την περιοχή ενδιαφέροντος. Οι τελευταίοι 3 χάρτες και οι υπόλοιποι που κατασκευάστηκαν παρατίθενται στα Σχήματα Π7.3.3.1-10 του Παραρτήματος.

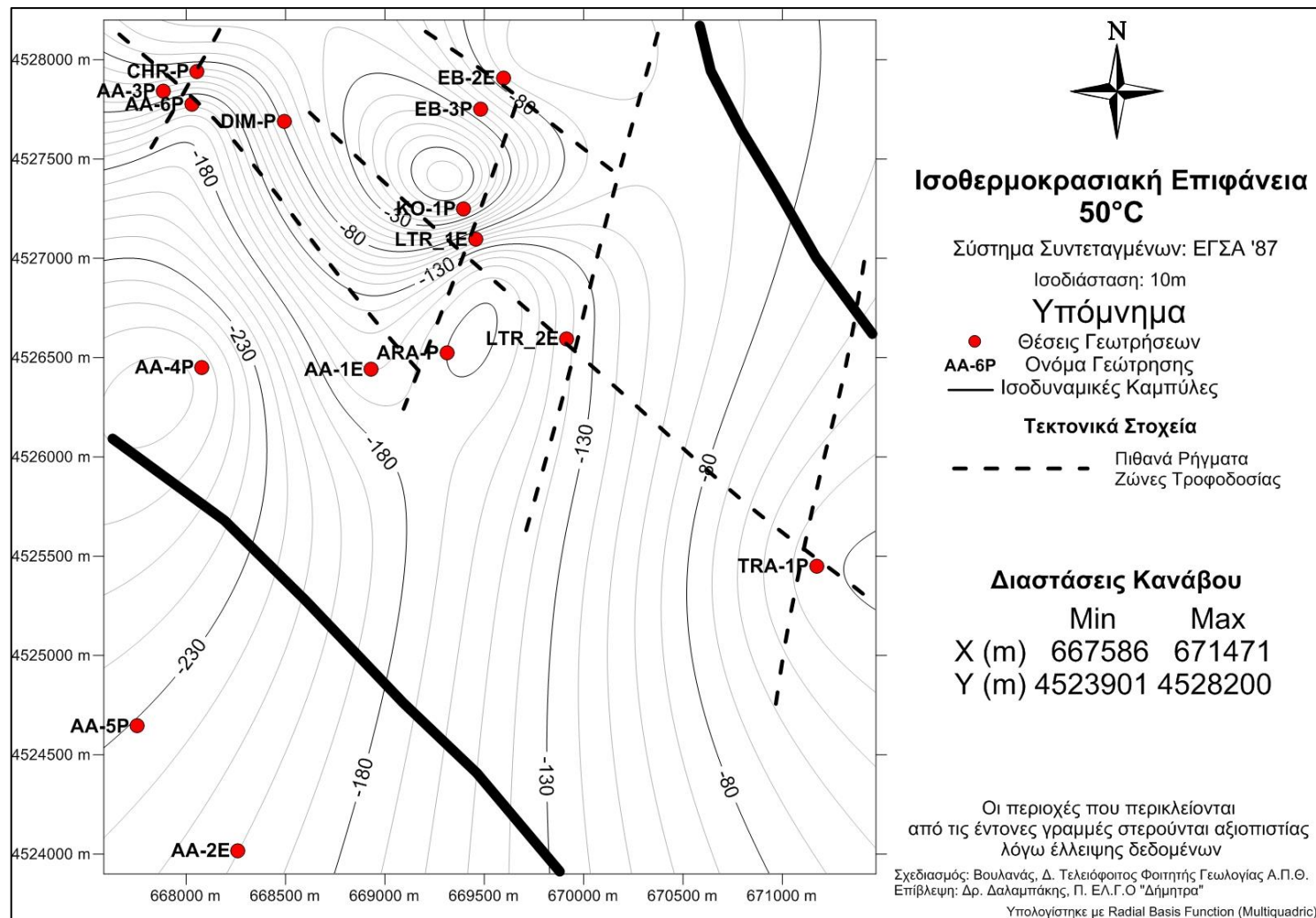
7.3.4 Αποτελέσματα-Συζήτηση

Με βάση τους χάρτες των Σχημάτων 41, 42 και 43 εμφανίζονται αναβολώσεις των ισόθερμων καμπυλών σε δύο θέσεις: μεταξύ των γεωτρήσεων DIM-P, KO-1P, EB-3P και των ARA-P, LTR_1E, LTR_2E. Αυτό πιθανώς δείχνει α) την ύπαρξη ανοικτών ρηγμάτων που δρουν ως δίοδοι τροφοδοσίας των γεωθερμικών ταμιευτήρων ή/και β) τις θέσεις ηφαιστειακών διεισδύσεων.

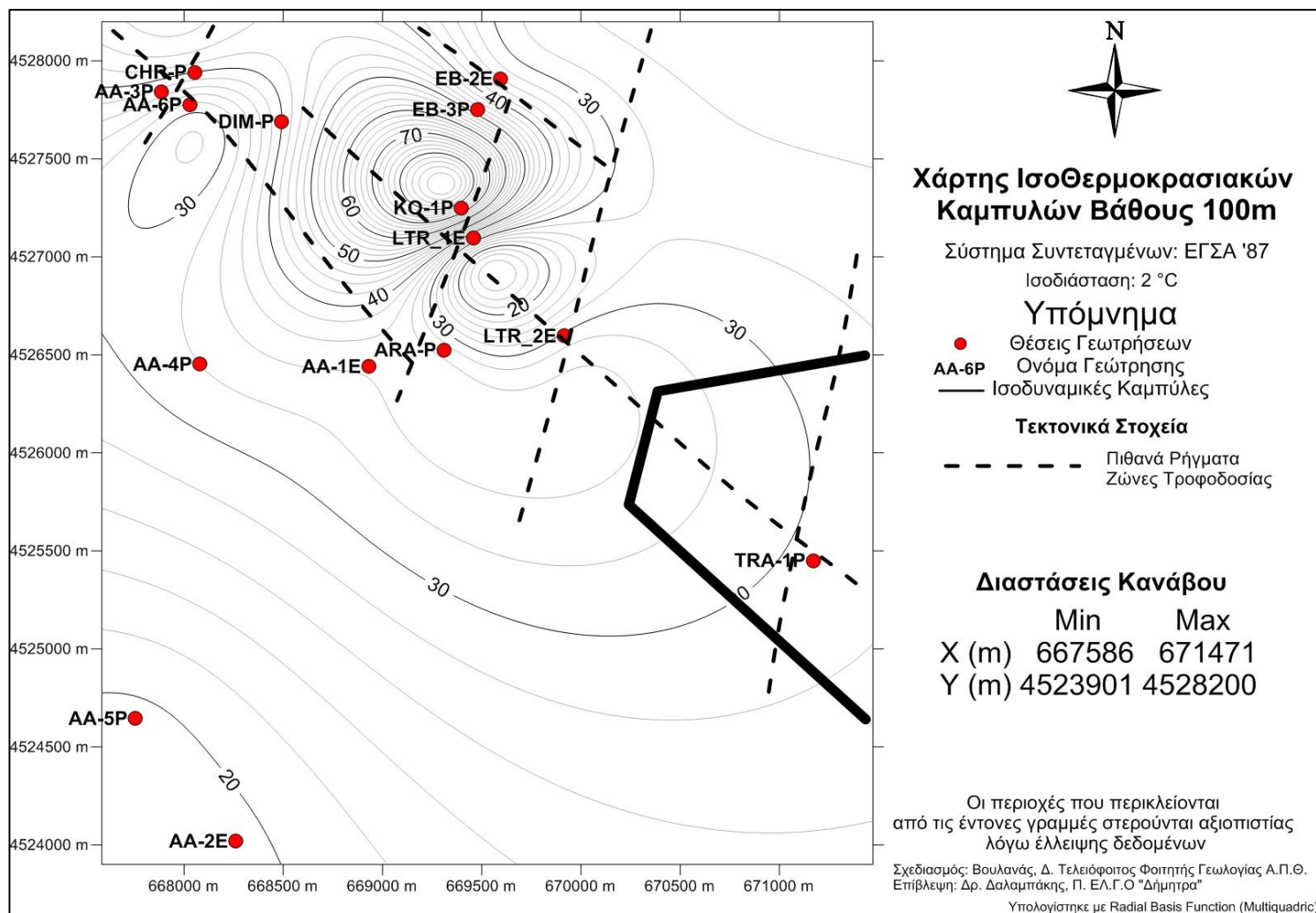
Μία επιπλέον παρατήρηση που μπορεί να γίνει από τους χάρτες είναι ότι όσο κανείς απομακρύνεται από τον ηφαιστειακό δόμο τόσο ελαττώνονται οι θερμοκρασίες. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μέσες γεωθερμικές βαθμίδες που υπολογίστηκαν για την περιοχή. Για παράδειγμα, η γεωθερμική βαθμίδα στη γεώτρηση AA-5P, η οποία υδρομαστεύει τις Τριτογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις καθώς και τα ανώτατα τμήματα των υποκείμενων ηφαιστιτών που εκτείνονται από την παραθαλάσσια περιοχή μέχρι τον ηφαιστειακό δόμο, είναι $4.15^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Αντίθετα, η EB-3P που βρίσκεται βορειότερα και υδρομαστεύει τα πυροκλαστικά και ηφαιστειοκλαστικά προϊόντα ΒΔ του λόφου «Πασά», εμφανίζει βαθμίδα ίση με $26.95^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.



Σχήμα 41 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 30°C



Σχήμα 42 – Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνεια 50°C



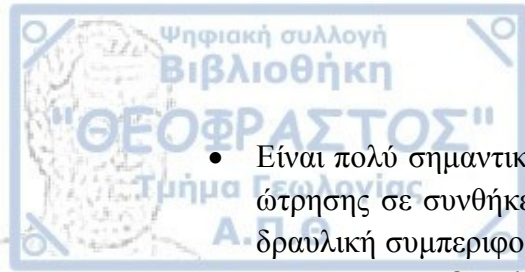
Σχήμα 43 – Χάρτης ΙσοΘερμοκρασιακών Καμπυλών Βάθους 100m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα από προγενέστερες μελέτες και έρευνες στην περιοχή του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου – Αλεξανδρούπολης και κυρίως όσα νέα στοιχεία προέκυψαν από την γεωτρητική και θερμομετρική έρευνα που διεξήχθη πρόσφατα και περιγράφεται στην παρούσα εργασία, μπορούν εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η περιοχή έρευνας ανήκει στην ιζηματογενή λεκάνη του Έβρου. Η εφελκυστική τεκτονική και η πρόσφατη ασβεσταλκαλική ηφαιστειότητα αποτελούν αιτίες δημιουργίας της θετικής ανωμαλίας του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου.
- Η νέα γεωθερμική παραγωγική γεώτρηση ΑΑ-6Ρ έφτασε σε τελικό βάθος 408m και συνάντησε δύο κύριους θερμούς υδροφορείς. Ο ρηχότερος αναπτύσσεται σε βάθος 186-192m και ο βαθύτερος στα 342-402m.
- Σύμφωνα με τις διαγραφίες ενδεχομένως υπάρχει μικρή υδροφορία και στα διαστήματα 252-276 και 300-330m.
- Ο βαθύτερος ταμιευτήρας είναι μεγάλης δυναμικότητας και θεωρείται ότι αυτός τροφοδοτεί κατά κύριο λόγο τη γεώτρηση, ενώ ο ρηχός (186-192) παρουσιάζει μικρή υδροφορία και εξαντλείται πολύ γρήγορα κατά την άντληση.
- Η προαντλητική διαδικασία και η άντληση κατά βαθμίδες χαρακτηρίστηκαν από μεγάλες τεχνικές δυσκολίες και αστοχίες που οδήγησαν στην αναγκαστική επιλογή πολύ μικρών παροχών που δεν θεωρούνται ενδεικτικές της δυναμικής της γεώτρησης.
- Η μέγιστη παροχή που επιτεύχθηκε με την αντλία που χρησιμοποιήθηκε ήταν στιγμιαία τα 70 m³/h. Η αντλία μπόρεσε να λειτουργήσει για ικανοποιητικό διάστημα με παροχή ~ 65 m³/h, χωρίς όμως η παροχή αυτή να είναι ασφαλής για τη διενέργεια μακράς διάρκειας άντλησης.
- Η σταδιακή αύξηση της παροχής από 30 m³/h έως 65 m³/h κατά την κλιμακωτή άντληση συνοδεύτηκε από αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού και μείωση του ρυθμού πτώσης της στάθμης ή και αναστροφή του.
- Η μείωση του ρυθμού πτώσης της στάθμης μπορεί να αποδοθεί στην σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας, την επακόλουθη προοδευτική μείωση της πυκνότητας και την αύξηση του όγκου του ρευστού, το οποίο τείνει να καταλάβει μεγαλύτερο όγκο και άρα μεγαλύτερο χώρο εντός της παραγωγικής σωλήνωσης της γεώτρησης.
- Η ειδική παροχή της γεώτρησης παρουσίασε σταδιακή αύξηση με την αύξηση της παροχής, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην σταδιακή ενεργοποίηση νέων τμημάτων του θερμού υδροφόρου συστήματος.

- Η άντληση μεγάλης διάρκειας (78 ωρών) έγινε με σταθερή παροχή $45 \text{ m}^3/\text{h}$, ώστε να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία της αντλίας.
- Μετά από 16 λεπτά άντλησης η στάθμη σταθεροποιήθηκε και δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω πτώση της.
- Λόγω των παραπάνω, δεν κατέστη δυνατός ο υπολογισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα.
- Η μέγιστη παροχή των $65 \text{ m}^3/\text{h}$ που επετεύχθη στην 4^η βαθμίδα δοκιμαστικών αντλήσεων, μπορεί να θεωρηθεί ως ασφαλής παροχή εκμετάλλευσης, αλλά σε καμία περίπτωση ενδεικτική του μέγιστου δυναμικού της γεώτρησης
- Η θερμοκρασία του ρευστού κατά την άντληση μετρήθηκε στους 97.7°C .
- Η θερμοκρασία στον πυθμένα της γεώτρησης μετρήθηκε περίπου 6 μήνες αργότερα, σε κατάσταση ηρεμίας, στους 83.2°C .
- Η γεωθερμική βαθμίδα που υπολογίστηκε στη γεώτρηση AA-6P είναι πολύ υψηλότερη της μέσης γήινης και η μέγιστη τιμή της υπερβαίνει τους $17.72^\circ\text{C}/100\text{m}$. Θεωρώντας ότι η τάση αύξησης της θερμοκρασίας είναι γραμμική με την αύξηση του βάθους, αναμένονται σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες
- Η ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά στη θερμοκρασία του νερού υπό άντληση και σε ηρεμία δεν μπορεί να ερμηνευτεί με τα έως σήμερα διαθέσιμα ερευνητικά δεδομένα και απαιτεί μελλοντική διερεύνηση.
- Τα ρευστά του πεδίου διαχωρίζονται σε δύο τύπους: έναν $\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}$ που αντιστοιχεί στον ρηχότερο υδροφορέα και σε έναν $\text{Na}^+-(\text{Ca}^{2+})-\text{Cl}^--(\text{SO}_4^{2-})$ που αντιστοιχεί στον βαθύτερο υδροφορέα. Τα δύο αυτά διακριτά ρευστά αναμειγνύονται κατά θέσεις μέσα στο πεδίο.
- Το pH των ρευστών της γεώτρησης AA-6P μετρήθηκε 6.9 και το σύνολο των διαλυμένων αλάτων ($\Sigma\Delta\Sigma$) 10547 mg/l
- Ο υδροχημικός τύπος των ρευστών της γεώτρησης AA-6P είναι $\text{Na}^+-(\text{Ca}^{2+})-\text{Cl}^--(\text{SO}_4^{2-})$ τύπου
- Ο σχηματισμός επικαθίσεων είναι πολύ πιθανός με το ρευστό της γεώτρησης AA-4P, ενώ είναι αρκετά πιθανό να υπάρξει πρόβλημα και με τα ρευστά των γεωτρήσεων AA-1P, AA-3P και EB-3P. Γεγονότα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό οποιασδήποτε εφαρμογής
- Με τα υπάρχοντα, ελλιπή, δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων προκύπτει ασφαλής άντληση της γεώτρησης AA-6P με την παροχή των $50 \text{ m}^3/\text{h}$ και βάθος τοποθέτησης αντλίας τα 80m



- Είναι πολύ σημαντικό να συλλεχθούν δεδομένα για την συμπεριφορά της γεώτρησης σε συνθήκες άντλησης με μεγαλύτερη παροχή. Αυτό αφορά την υδραυλική συμπεριφορά του ταμιευτήρα, την τελική θερμοκρασία του ρευστού καθώς και τα υδραυλικά όρια του συστήματος τροφοδοσίας
- Η γεώτρηση θα πρέπει σαφώς να αντληθεί εκ νέου, με τοποθέτηση του αντλητικού συγκροτήματος σε βάθος τουλάχιστον 100m και άντληση με παροχή $>80 \text{ m}^3/\text{h}$, ώστε να δοθεί δυνατότητα εξαγωγής αξιόπιστων αποτελεσμάτων διότι η συγκεκριμένη γεώτρηση προορίζεται να υποστηρίξει ενεργειακά σημαντικές επενδυτικές δράσεις στο άμεσο μέλλον
- Για την καλύτερη γνώση της γεωθερμικής βαθμίδας και της υδραυλικής κατάστασης της περιοχής απαιτείται συστηματική τεκτονική και γεωφυσική έρευνα για τη διάγνωση των πραγματικών συνθηκών στο βάθος, ώστε να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το γεωθερμικό μοντέλο του πεδίου

Η Ελλάδα, λόγω της γεωγραφικής της θέσης, διαθέτει αξιόλογο γεωθερμικό δυναμικό σε όλη σχεδόν την έκτασή της. Ένα μεγάλο μέρος αυτού συγκεντρώνεται στη Βόρεια Ελλάδα, όπου υπάρχουν πολλά και σημαντικά γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας. Το ενδιαφέρον της διπλωματικής επικεντρώνεται στο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας του Αρίστηνου -Αλεξανδρούπολης. Στο πεδίο αυτό έχουν εκπονηθεί στο παρελθόν γεωλογικές-γεωθερμικές έρευνες, οι οποίες εντόπισαν τα γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας που αναπτύσσονται στην περιοχή. Η θετική γεωθερμική ανωμαλία οφείλεται κυρίως στις πρόσφατες (Ηωκαινικές-Ολιγοκαινικές) σχετικά ρηχές ηφαιστειακές διεισδύσεις και στην ύπαρξη ευνοϊκής τεκτονικής. Η παρουσία υδροπερατών σχηματισμών ικανών να φιλοξενήσουν το θερμό ρευστό καθώς και το σημαντικό θερμικό τους φορτίο, καθιστούν τη γεωθερμία σημαντική για την τοπική οικονομία. Ο Δήμος Αλεξανδρούπολης, στα πλαίσια της προσπάθειάς του για εκμετάλλευση του πεδίου αλλά και για τη προσέλκυση επενδυτικού ενδιαφέροντος, μέσω του "Έργου Αξιοποίησης του Γεωθερμικού Πεδίου Αρίστηνου-Αλεξανδρούπολης 2016" προχώρησε στην κατασκευή νέας παραγωγικής γεωθερμικής γεώτρησης (ΑΑ-6Ρ), ενώ σχεδιάζει και τη δημιουργία δικτύου τηλεθέρμανσης για αστική και αγροτική χρήση. Η παρούσα διπλωματική αφορά στην παρακολούθηση της κατασκευής και τη μελέτη της προαναφερθείσας γεώτρησης και περιλαμβάνει τη λεπτομερή περιγραφή των εργασιών ανόρυξης, τη διενέργεια διαγραφιών και τις δοκιμαστικές αντλήσεις. Επίσης μελετήθηκε ο χημισμός των ρευστών της γεώτρησης σε συνδυασμό με παλαιότερα υδροχημικά δεδομένα. Τέλος, για την καλύτερη γνώση του γεωθερμικού μοντέλου της περιοχής έγινε θερμομέτρηση όλων των υπαρχουσών γεωτρήσεων του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου του Αρίστηνου. Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν, κατασκευάστηκαν χάρτες ισόθερων καμπυλών για συγκεκριμένα βάθη καθώς και χάρτες χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας κατ' αντιστοιχία με την τοπογραφία του υποβάθρου.

Αγγλική Περίληψη (Abstract)

Greece has a remarkable geothermal potential, due to its geotectonic regime. Northern Greece is particularly favored, with several important low enthalpy geothermal fields identified and confirmed. This thesis focuses on the low enthalpy field of Aristino – Alexandroupolis (Thrace, NE Greece). The geothermal interest of this area was revealed during the previous decades, after extended geothermal investigation, which included the construction of several exploration and/or productive geothermal wells. The geothermal anomaly is mainly attributed to the recent (Eocene-Oligocene) volcanic intrusions, in combination to the favorable tectonics. The existence of important geothermal reservoirs in relatively shallow depths and their significant potential are of great importance for the local economy. The Municipality of Alexandroupolis aims to exploit the geothermal field for public benefits but also targets to attract private investments. In the frame of the project “Development of the Geothermal Field of Aristino - Alexandroupolis 2016” a new geothermal production well (AA-6P) was drilled, which will be followed by the construction of a district heating network, for urban and agricultural uses. The present thesis regards the construction and study of the AA-6P well and includes the detailed description of the drilling and completion works, the conduction of loggings, the well pumping tests, as well as the hydro-chemical study of the fluids from this particular well in correlation to previously collected hydro-chemical data from the same field. For the better understanding of the thermal regime in this area, a thermometric survey took place within the boundaries of the confirmed field. Based on the thermometric results, maps of temperature contours for various depths were produced, as well as maps illustrating the spatial distribution of temperature according to the basement topography.



Αγγελίδης Ζ. (1989): Υδρογεωλογικά στοιχεία της θερμομεταλλικής πηγής Τραϊνούπολης νομού Έβρου, Σύνδεσμος Δήμων και Κοινοτήτων Ιαματικών Πηγών Ελλάδας, Τομέας Υδρογεωλογίας

Ανδρίτσος, Ν., Καράμπελας, Α.Ι. (1996): Σχηματισμός Επικαθίσεων και Διάβρωση σε Γεωθερμικές Εγκαταστάσεις Χαμηλής Ενθαλπίας, 5ο Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πρακτικά Τόμος Β, σελ. 141-148, Αθήνα.

Βουδούρης Σ. Κ., (2017): Εκμετάλλευση και διαχείριση Υπόγειου Νερού, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

Δαλαμπάκης, Π., Ηλίας, Α., Ανδρίτσος, Ν., Ξανθόπουλος Σ., Χριστοφορίδης Α. (2014): Γεωθερμικό Πεδίο Αρίστηνου- Αλεξανδρούπολης - Έρευνα Και Εκμετάλλευση, 10ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πρακτικά Τόμος Β, σελ. 419-428, 26-28 Νοεμβρίου 2014, Θεσσαλονίκη

ΕΚΕΤΑ/ΙΕΤΕΘ, Χαϊδεμενόπουλος, Γ.Ν., Σαράφογλου Π.Ι., Ανδρίτσος Ν. (2014): Μελέτη χημισμού γεωθερμικών ρευστών και συμπεριφορά επιλεγμένων υλικών

Κολιός Ν., Καρυδάκης Γ., Κουτσίνος Σ., Ζηκόπουλος Κ. (2001): Έρευνα και ανάπτυξη Γεωθερμικής ενέργειας στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη. Έργο 9531519 ΠΕΠ – Β΄ ΚΠΣ, Τεχνική έκθεση ΙΓΜΕ

Κυριακίδης Ελ., Τσόκας Γρ. (1990): Γεωηλεκτρική Μελέτη Περιοχής Λουτρών Αλεξανδρούπολης, Σύνδεσμος Δήμων και Κοινοτήτων Ιαματικών Πηγών Ελλάδας, Τομέας Εφαρμοσμένης Υδρογεωλογίας

Μουντράκης, Δ. (2010): Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη

Φ.Ε.Κ. 1012: Αποφάσεις Υπ' Αριθμόν:. Δ9Β/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193. Χαρακτηρισμός και υπαγωγή σε κατηγορίες των Γεωθερμικών Πεδίων της Χώρας

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

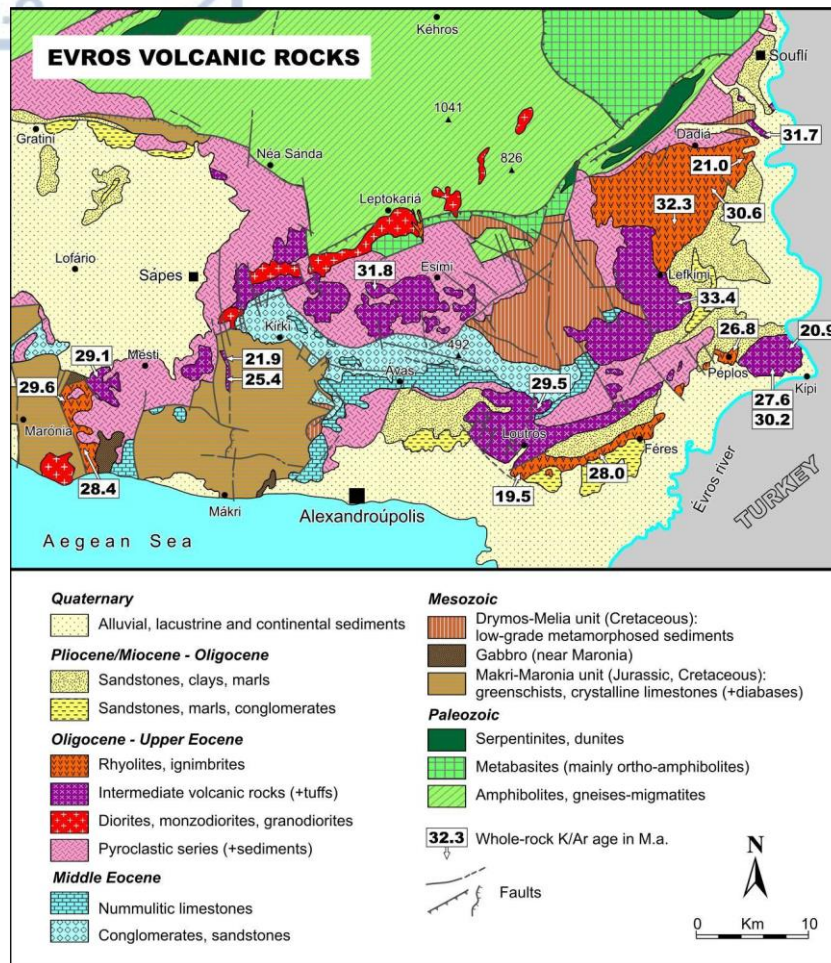
Πουτούκης, Δ και Ντότσικα, Ε. (1998): Συμβολή της ισοτοπικής υδρολογίας και της υδρογεωλογίας στη μελέτη του γεωθερμικού πεδίου Αρίστηνου Ν. Έβρου. Δελτίο της Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXII/4, σελ. 69-79

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Christofides, G., Pecskey Z., Eleftheriadis G., Soldatos T. and Koroneos A., (2004): Tertiary Evros Volcanic Rocks (Thrace, Northeastern Greece): Petrology and K/Ar Geochronology. Geologica Carpathica, 55, 5 pp. 397-409, Bratislava

- Durov, S. A. (1948): Classification of natural waters and graphical representation of their composition. Dokl. Akad. Nauk. USSR. 59(1), pp. 87-90
- Fournier, R.O. (1981): Applications of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: Rybach, Muffler (Eds.), Geothermal Systems: Principles and Case Histories. John Wiley and Sons, pp. 109–143, New York
- Fournier, R.O. and Truesdell, A.H. (1973): An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters, Geochim. Acta, 37, pp. 515-525
- Fournier, R.O., Potter, R.W. (1979): Magnesium Correction to the Na-K-Ca Chemical Geothermometer, Geochimica et Cosmochimica Acta, 43, pp. 1543–1550
- Fournier, R.O. (1979): A revised equation for the Na/K geothermometer: Geothermal Resources Council, Transactions, 3, pp. 221-224.
- Giggenbach, W.F., Gonfiantini, R., Jangi, B. and Truesdell, A.H. (1983): Isotopic and chemical composition of Parbatii valley geothermal discharges, North-West Himalaya, India Geothermics, 12, 2/3, pp. 122-190
- Giggenbach, W.F. (1988): Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers. Geochim. Cosmochim. Acta 52, pp. 2749–2765
- Kolios, N., Fytikas, M., Arvanitis, A., Andritsos, N. and Koutsisnos, S. (2007): Prospective Medium Enthalpy Geothermal Resources in Sedimentary Basins of Northern Greece, Proceeding European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany
- Truesdell, A.H., (1976): Geochemical techniques in exploration, Proceedings of the 2nd United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources: San Francisco, CA, USA, 1, pp. 53-79
- Piper, A. M. (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. American Geophysical Union Transactions, 25, pp. 914–928
- Schoeller, H. (1977): Geochemistry of groundwater. In Groundwater studies - An international guide for research and practice (Ch. 15, pp. 1–18). Paris: UNESCO
- Vryzas, Z., Wubulikasimu, Y., Gerogiorgis, D., Kelessidis, V.C., (2016): Understanding the Temperature Effect on the Rheology of Water-Bentonite Suspensions, Nordic Polymer Days and Nordic Rheological Conference, Helsinki





Σχήμα Π2.1.1 - Γεωλογικός Χάρτης Θράκης (Christofides et al, 2004)

Πίνακας Π2.5.1 - Συντεταγμένες Πιθανού και Βεβαιωμένου Γεωθερμικού Πεδίου Αρίστηνον - Αλεξανδρούπολης (ΕΓΣΑ 87)

Πιθανό Γεωθερ- μικό Πε- δίο	X (m)	Y (m)	Βεβαιωμένο Γεωθερμικό Πεδίο	X (m)	Y (m)
A	664749.11	4524286.94	E	666426.36	4526481.99
B	666298.94	4530277.10	Z	666217.52	4524356.01
Γ	677196.29	4529337.62	H	670223.39	4524242.10
Δ	677547.81	4523658.70	Θ	670147.45	4529425.04



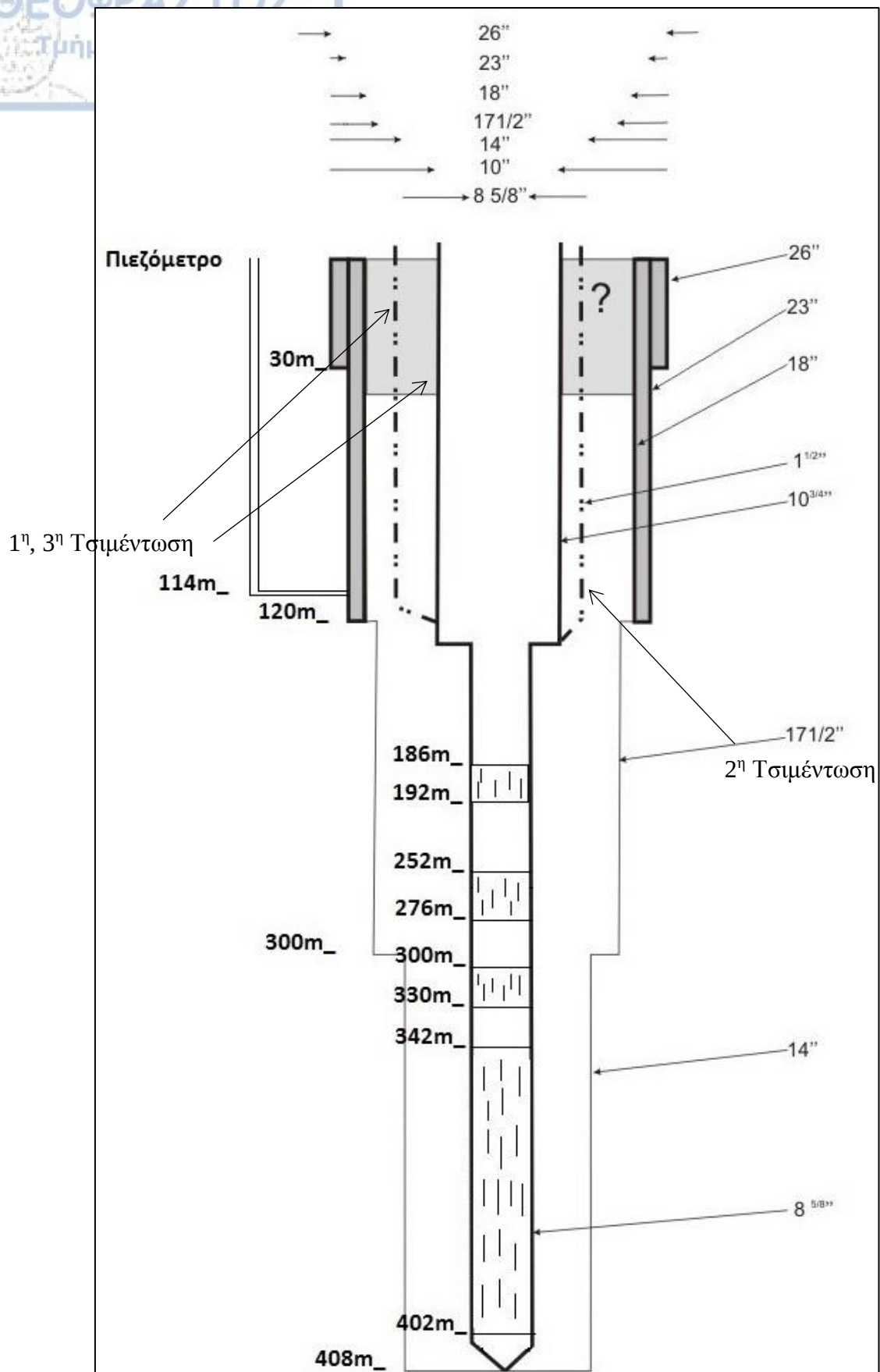
Σχήμα Π4.3.1 - Λούπα X140

Πίνακας Π4.5.1 - Λειτουργικές Προδιαγραφές Ευαίσθητης Κεφαλής ELOG της Robertson Geologging (<http://www.geologging.com/slimhole-logging/electric-log/>)

Θερμοκρασία:	0 - 70°C (μεγαλύτερα εύρη διαθέσιμα)
Μέγιστη Πίεση:	20MPa
Εύρος Αντίστασης:	1 – 2000 ohm-m

Πίνακας Π4.5.2 - Λειτουργικές Προδιαγραφές Ευαίσθητης Κεφαλής Temperature Conductivity της Robertson Geologging (<http://www.geologging.com/slimhole-logging/temperature-conductivity/>)

Θερμοκρασία:	0-70°C (μεγαλύτερα εύρη διαθέσιμα)
Μέγιστη Πίεση:	20MPa
Εύρος Θερμοκρασίας:	0-70°C (μεγαλύτερα εύρη διαθέσιμα)
Εύρος Αγωγιμότητας:	50 - 50000 $\mu\text{S/cm}$



Σχήμα Π4.5.1 - Σκαρίφημα Γεώτρησης AA-6P



Σχήμα Π5.1.1 - Μέτρηση Στάθμης Ηρεμίας στην γεώτρηση ΑΑ-3Ρ



Σχήμα Π5.1.2 – Φλαντζωτό Υδρόμετρο 100mm Madalene για υψηλές θερμοκρασίες



Σχήμα Π5.1.3 - Θερμόμετρο Pt100 της HANNA Instruments (<http://hannainst.com/hi955501-4-wire-pt100-thermometer.html>)

Πίνακας Π5.1.1 - Λειτουργικές Προδιαγραφές Θερμομέτρου Pt100 της HANNA Instruments (<http://hannainst.com/hi955501-4-wire-pt100-thermometer.html>)

Εύρος Θερμοκρασίας	-199.9 - 199.9°C; -200 - 850°C
Ανάλυση Θερμοκρασίας	0.1°C (-199.9 - 199.9°C), 1°C (-200 - 850°C)
Ακρίβεια Θερμοκρασίας	±0.2°C και ±1 ψηφίο (-120.0 - 199.9°C), ±1°C και ±1 ψηφίο (-170 to 450°C); ±1%
Περιβάλλον	0 - 50°C



Σχήμα Π5.2.1 - Κώνος Καθίζησης Imhoff της United States Plastic Corp

Πίνακας Π5.3.1 - Μετρήσεις αντλήσεων κατά βαθμίδες

ΧΡΟΝΟΣ (min)	1 ^η ΒΑΘΜΙΔΑ 30 m ³ /h	2 ^η ΒΑΘΜΙΔΑ 40 m ³ /h	3 ^η ΒΑΘΜΙΔΑ 50 m ³ /h	4 ^η ΒΑΘΜΙΔΑ 63-65 m ³ /h
0	18.80	49.15	62.57	69.46
1	31.67	54.13	64.84	70.10
2	39.10	56.58	66.70	70.90 (95.4°C)
3	42.85	57.98	67.77	71.15
4	44.85	59.08	68.55	72.05
5	46.25	59.70	69.02	72.35
6	47.08	60.12	69.31	72.50
7	47.78	60.20	69.52	72.94
8	48.08	60.23	69.62	73.02
9	48.41	61.70	69.74	73.07 (95.6°C)
10	48.60	61.42	69.81	73.16
12	48.92	61.72	69.50 (92.3°C)	73.30
14	49.20	61.90 (88.3°C)	70.36	73.35 (96.2°C)
16	49.39	61.97	71.30	73.55
18	49.53	62.07 (89.6°C)	72.35	73.80
25	49.57 (73°C)	63.11	72.35 (93.7°C)	73.95 (96.5°C)
30	49.57	62,16 (90.5°C)	71.20	74.05

35	49.47 (78°C)	62.20	71.20	74.20
40	49.23	62.23 (91.2°C)	71.2 (94.6°C)	74.20
45	49.10	62.22	70.95	74.20
50	48.85 (82.8°C)	62.22 (91.7°C)	70.53 (95.4°C)	74.20
55	48.68	62.17	70.45	74.20
60	48.60	62.10	70.35	74.55
75	48.60	62.05	70.12	74.55
90	48.61	62.23	70.06	74.55
105	48.60	62.44	69.75	74.55
120	49.15 (85°C)	62.57 (92.0°C)	69.81 (95.4°C)	74.55 (97.7°C)

Πίνακας Π5.4.1 – Μετρήσεις Αντλησης Σταθερής Παροχής (με έντονα γράμματα παρουσιάζεται η επα-
ναφορά στάθμης)

ΧΡΟΝΟΣ (min)	ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	ΣΤΑΘΜΗ (m)
0	13.04	110	60.23	2880	60.2
1	32	120	60.24	3240	60.2
2	35.55	150	60.23	3600	60.2
3	35.87	180	60.2	3960	60.2
4	37	210	60.25	4320	60.2
5	38.72	240	60.23	4680	60.2
6	39.71	270	60.23	4681	47.9
7	44.3	300	60.24	4682	39.5
8	47.9	360	60.3	4683	35.3
9	48.52	420	60.3	4684	31.7
10	49.61	480	60.3	4685	26.5
12	50.75	540	60.3	4686	22.1
14	54.78	600	60.2	4687	18,2
16	60.2	660	60.2	4688	13.92
18	60.25	720	60.2	4689	13.1
20	60.22	840	60.2	4690	12.75
25	60.23	960	60.2	4692	12.66
30	60.22	1080	60.2	4694	12.5
35	60.28	1200	60.2	4696	12.55
40	60.31	1320	60.2	4698	12.58
45	60.22	1440	60.21	4700	12.55
50	60.27	1560	60.23	4705	12.65
55	60.3	1680	60.2	4710	12.68
60	60.23	1800	60.2	4715	12.75
70	60.23	1920	60.2	4720	12.81

Παράρτημα

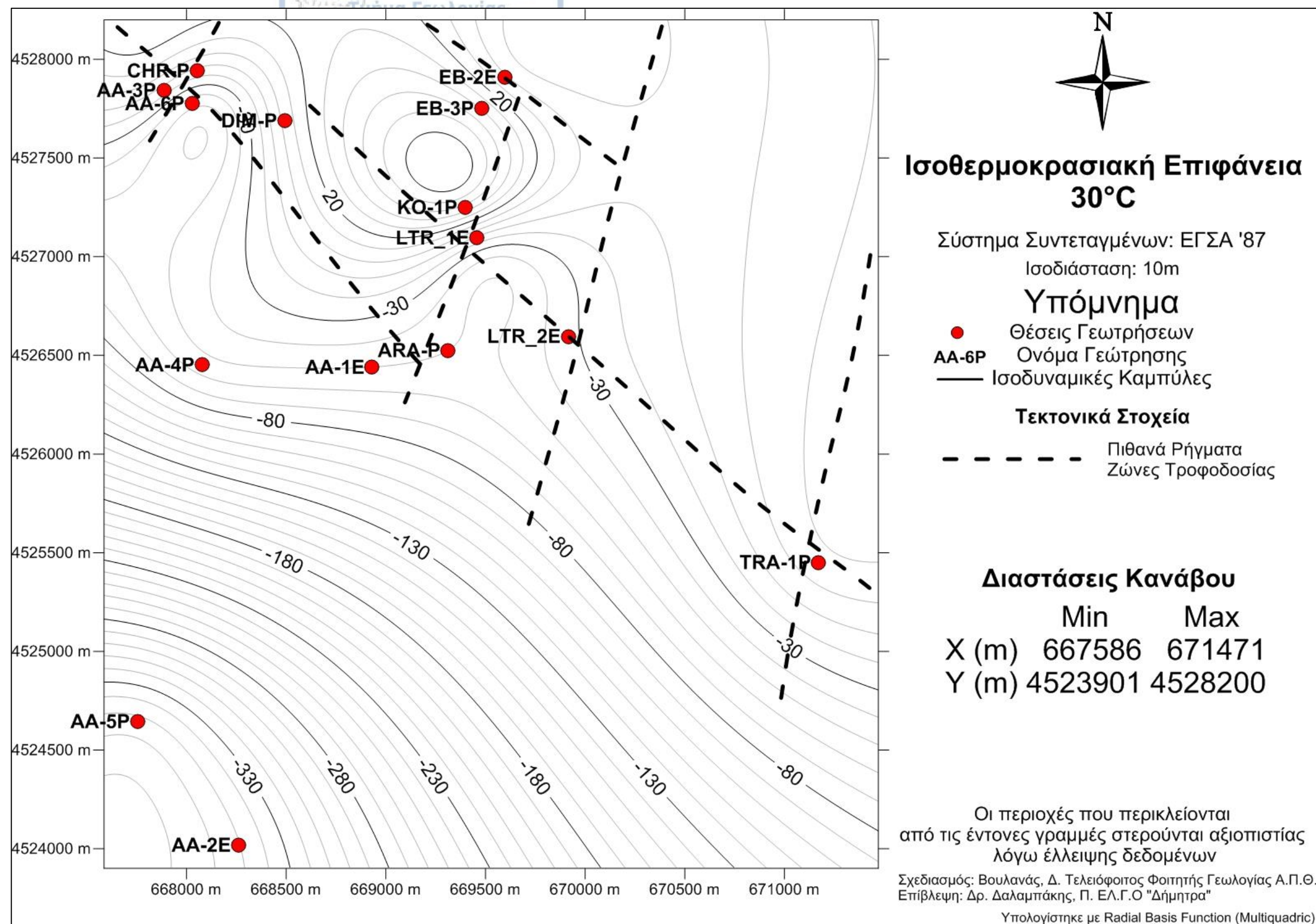
80	60.23	2040	60.2	4725	12.86
90	60.23	2160	60.2	4730	12.9
100	60.23	2520	60.2		



Σχήμα Π7.2.1 – Διαδικασία Θερμομέτρησης

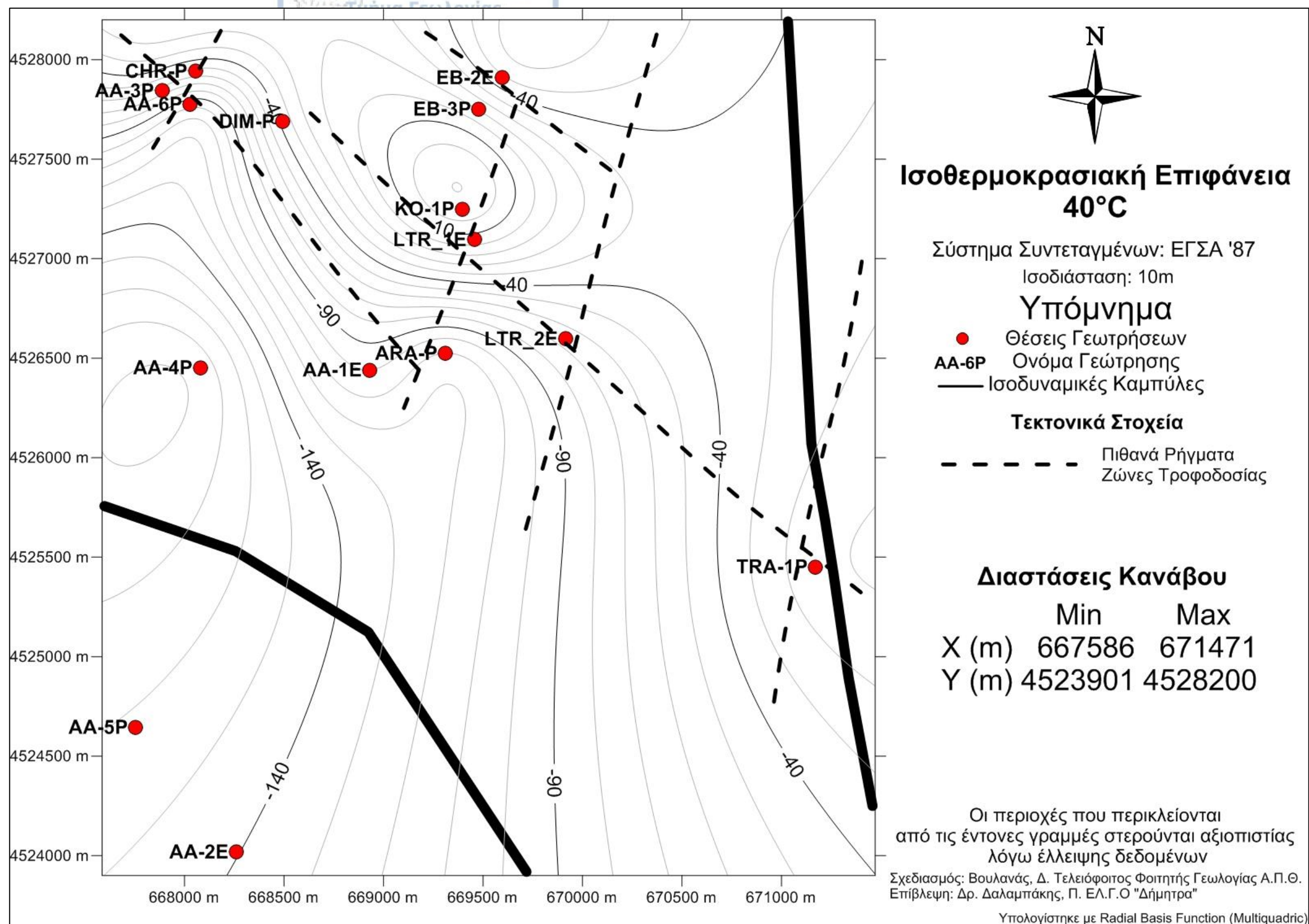


Σχήμα Π7.2.2 - Ο αναφερόμενος ακροδέκτης της QUTECO



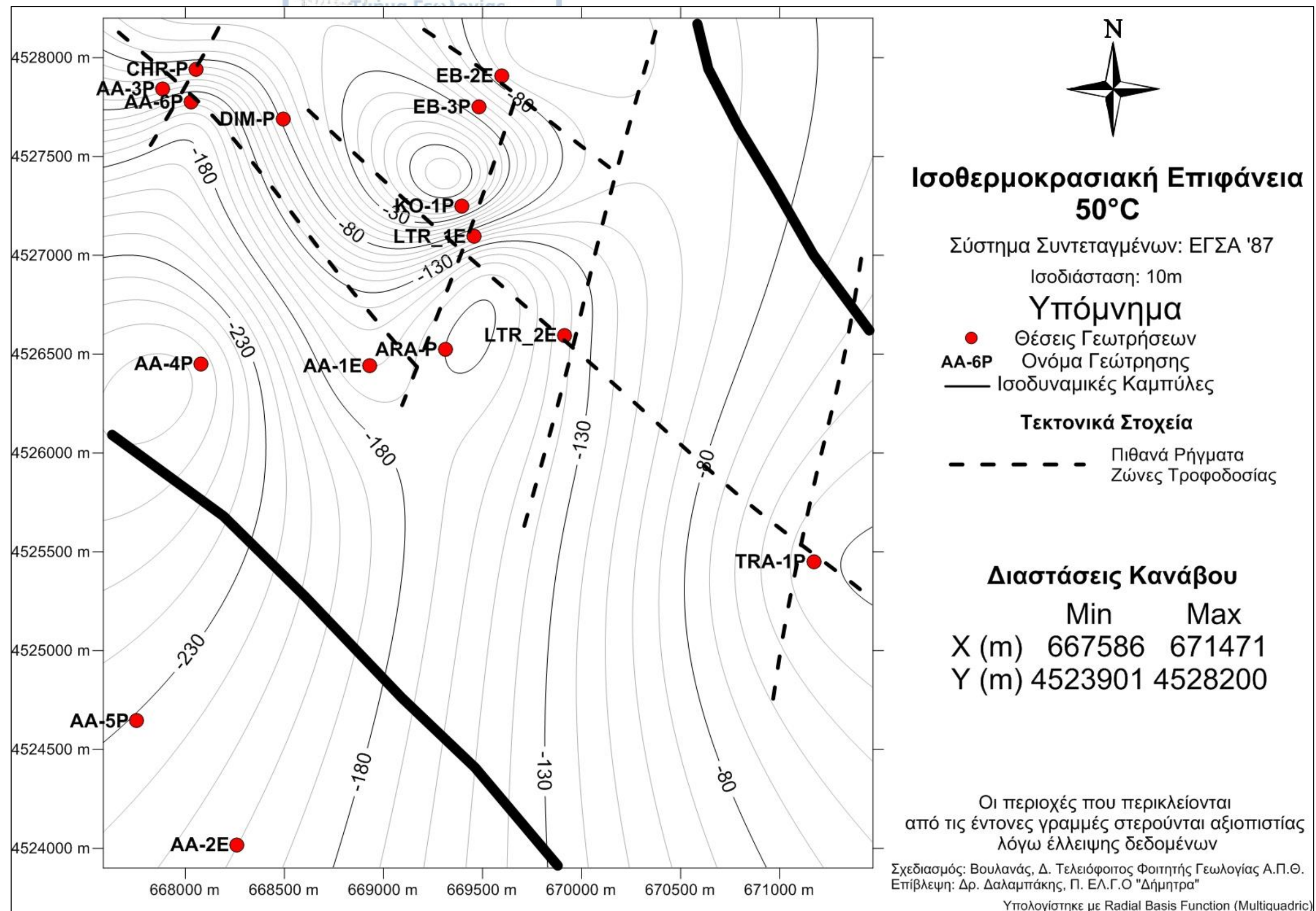
Σχήμα Π7.3.3.1 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 30°C

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



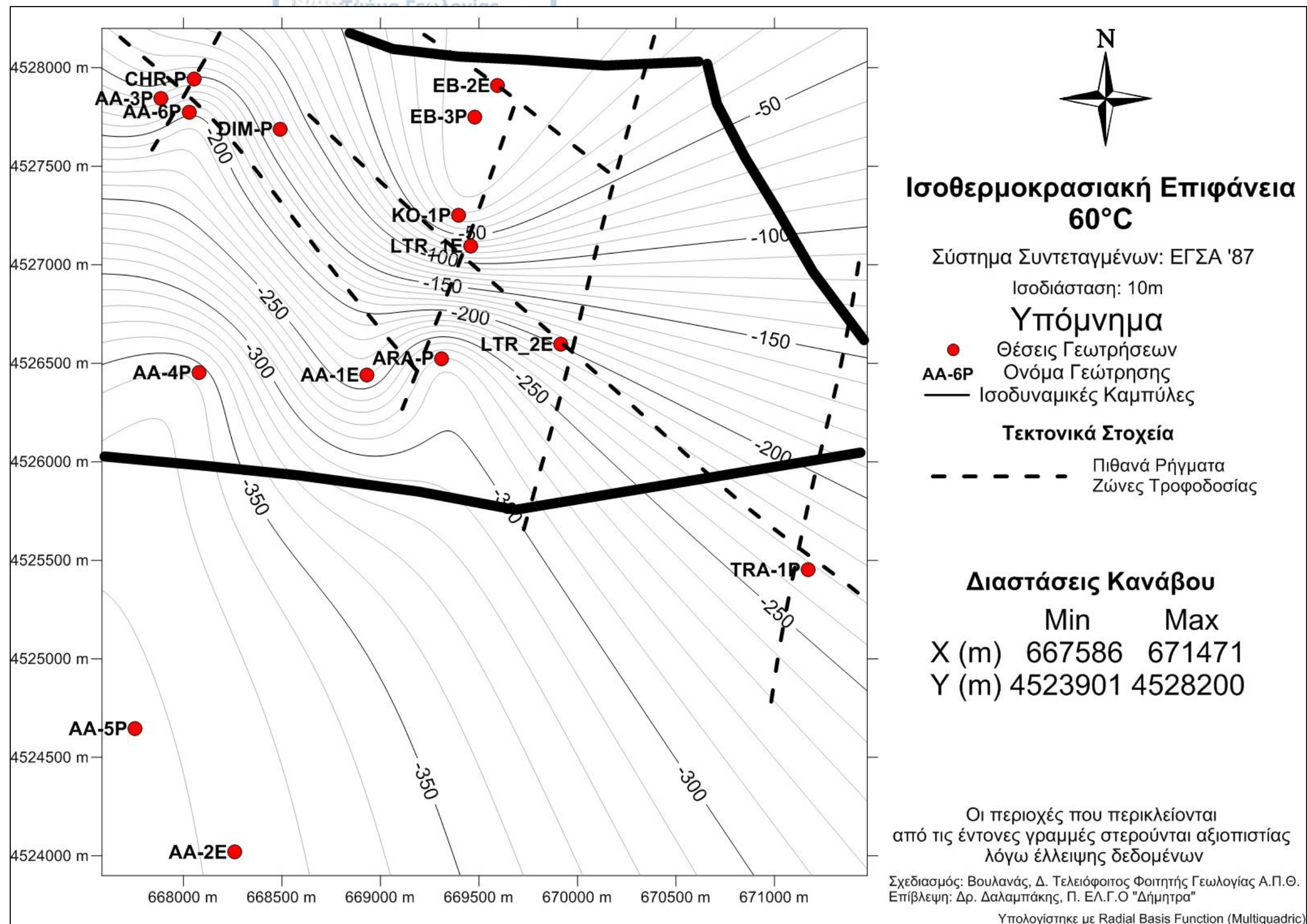
Σχήμα Π7.3.3.2- Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 40°C

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



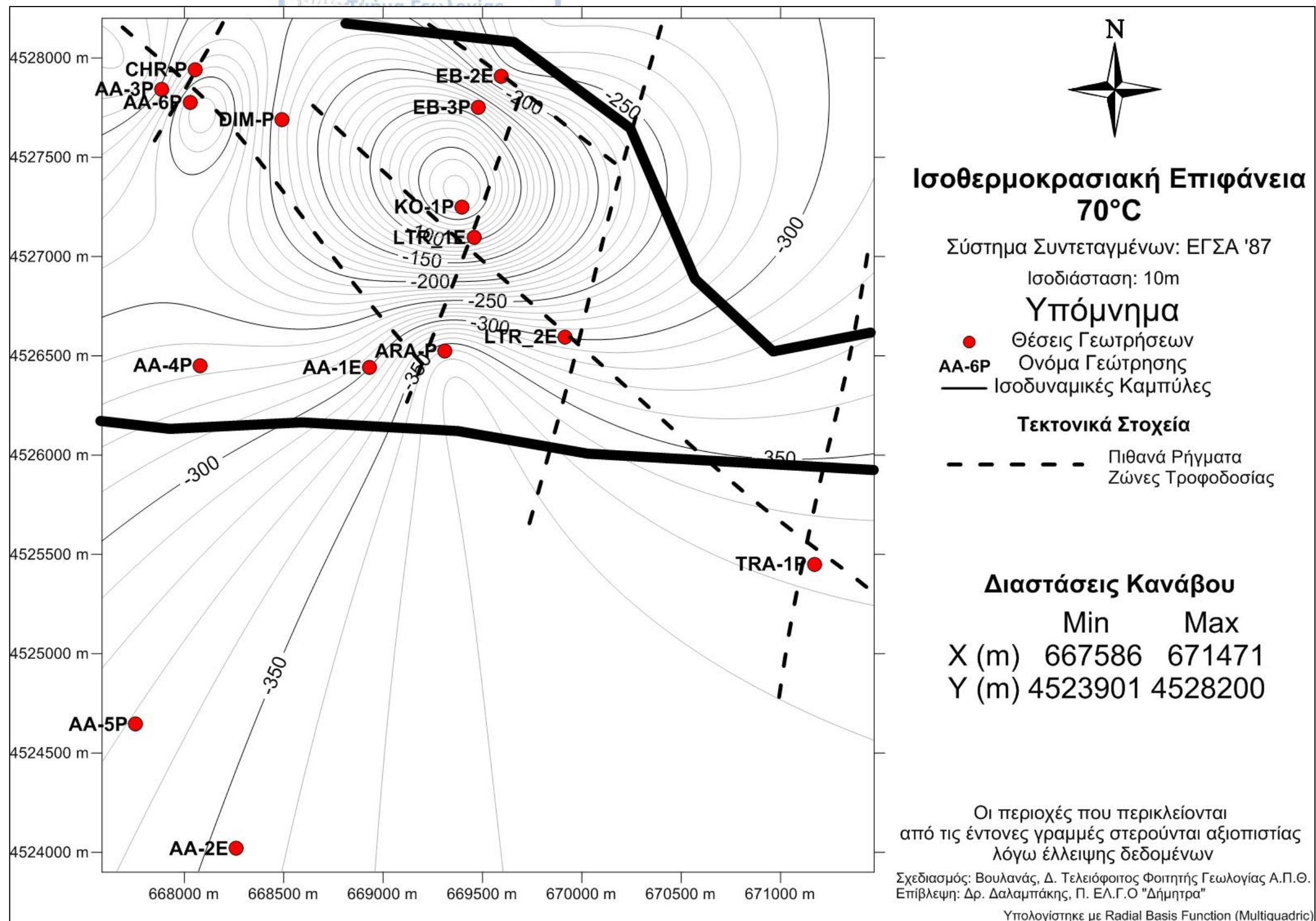
Σχήμα Π7.3.3.3 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 50°C

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



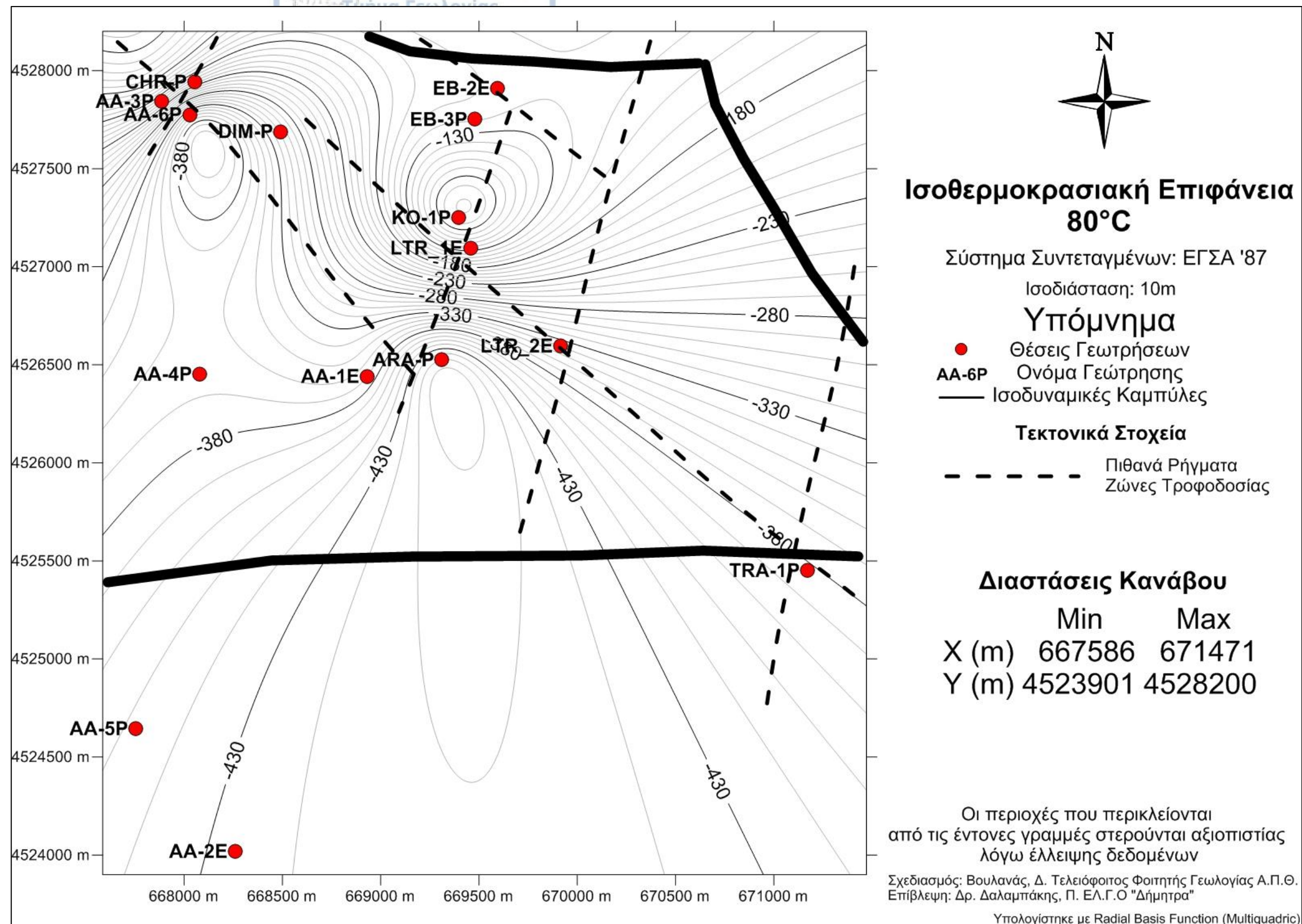
Σχήμα Π7.3.3.4 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 60°C

Ονομασία Γεώτρησης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμοκρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



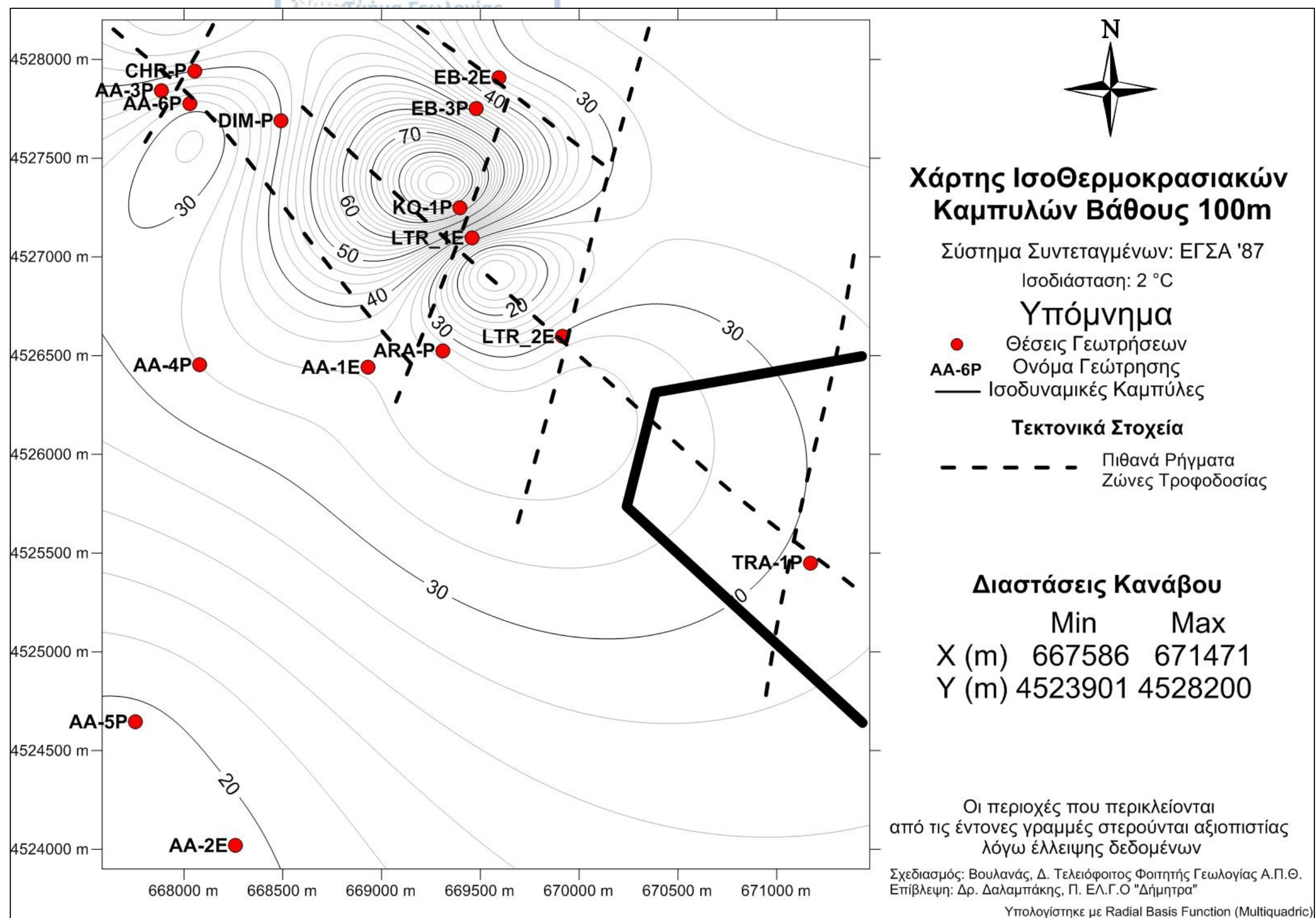
Σχήμα Π7.3.3.5 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 70°C

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



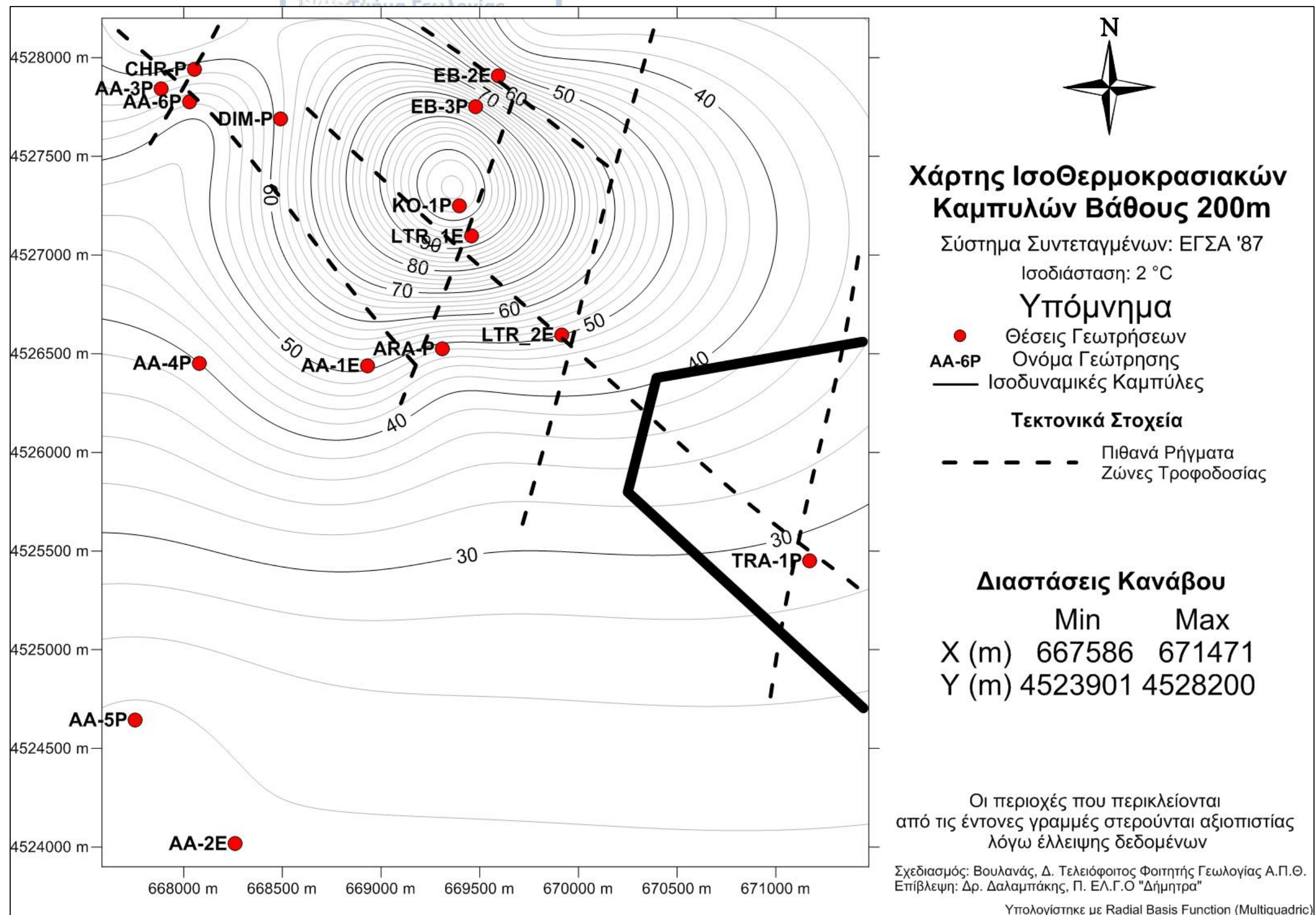
Σχήμα Π7.3.3.6 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακής Επιφάνειας 80°C

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



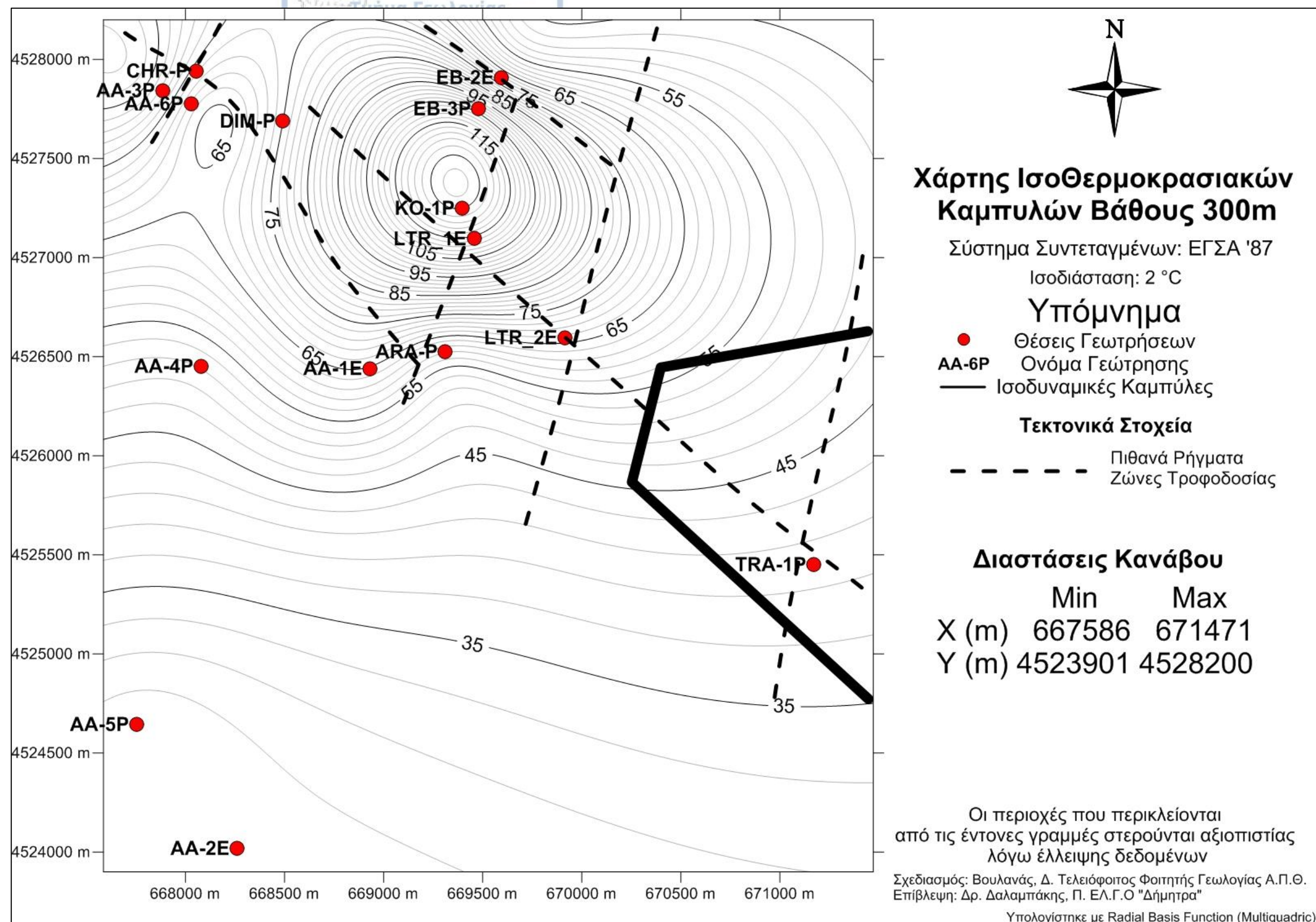
Σχήμα Π7.3.3.7 - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακών Καμπυλών 100m

Ονομασία Γεώτρησης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμοκρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



Σχήμα Π7.3.3.8 - - Χάρτης Ισοθερμοκρασιακών Καμπυλών 200m

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56



Σχήμα Π7.3.3.9- Χάρτης Ισοθερμοκρασιακών Καμπυλών 300m

Ονομασία Γεώτρη- σης	Μέση Γεωθερμική Βαθμίδα (°C/100m)	Τελικό Βάθος (m)	Τελική Θερμο- κρασία (°C)	X (m)	Y (m)	Υψόμετρο (m)
AA-2E	4.2	460	32.38	668260.8173	4524018.61	5
AA-5P	4.15	460	32.27	667754.194	4524644.637	8
ARA-P	13.28	480	80.3	669311.3215	4526524.652	30
CHR-P	22.5	180	57	668054.0933	4527941.964	47
DIM-P	21.16	270	73.3	668492.3171	4527689.059	63
LTR_1E	13.75	100	34	669457.0403	4527095.381	58
LTR_2E	9.09	140	33	669915.7972	4526596.327	57
AA-1E	15.92	470	92.62	668931.1446	4526440.506	30
AA-3P	19.78	360	89.3	667886.1523	4527843.164	45
AA-4P	10	440	64	668079.0647	4526452.01	25
AA-6P	17.72	408	83.2	668028.2946	4527775.872	44
EB-2E	18.75	180	52	669595.6184	4527909.209	72
EB-3P	26.95	250	92	669480.051	4527751.486	59
KO-1P	49.17	140	93	669397.0031	4527249.841	56

