

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

**ΑΝΤΩΝΙΟΣ Ν. ΒΑΣΑΛΑΚΗΣ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ**

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας
Ειδίκευση " Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία "

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΗ ΝΗΣΟ ΝΑΞΟ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ Ν. ΒΑΣΑΛΑΚΗΣ

Γεωλόγος

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων: Καθηγητής Φυτίκας Μιχαήλ

Μέλος: Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος

Μέλος: Λέκτορας Κωνσταντίνος Βουδούρης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο κατά την διάρκεια της εκπόνησής της και κυρίως τους κατοίκους της Νάξου που χωρίς τη συνεργασία τους δε θα ήταν δυνατή η συλλογή των δεδομένων.

Ευχαριστώ ειλικρινά τον Καθηγητή μου κ. Μ.Φυτίκα για την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγησή του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γ. Δημόπουλο για την συμπαράστασή του καθώς επίσης και τον Λέκτορα κ. Κ. Βουδούρη για τις εύστοχες επισημάνσεις του τόσο στο αρχικό όσο και στο τελικό κείμενο της διατριβής. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Καθηγητή κ. Β. Χρηστάρα για τη συνεργασία και τη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς τους φίλους και συνάδελφους μεταπτυχιακούς φοιτητές κ. Κούσκουρα Αργύριο για την συνολική βοήθεια του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου και Μυριούνη Χρήστο, τον υποψήφιο διδάκτορα Κατριβάνο Εμμανουήλ για τη στήριξη και τις συμβουλές του και τον φίλο και υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Σωτηριάδη για την υπομονή και την βοήθειά του κατά το διάστημα των χημικών αναλύσεων.

Ευχαριστώ θερμά τον γεωλόγο, υπεύθυνο του τμήματος γεωθερμίας του Κ.Α.Π.Ε Κ.Καρύτσα για τις συμβουλές και τη γνώση που μου παρείχε.

Θα ήθελα να τονίσω την αμέριστη υποστήριξη που είχα από το Δήμο Νάξου και τον Δήμο Δρυμαλίας κατά την διάρκεια συλλογής των δεδομένων.

Θεωρώ υποχρέωση μου να αναφέρω την άμεση ανταπόκριση που είχα από την γεωλόγο Νίκη Παπαγιάννη και τον γεωλόγο Ανδρέα Καρυστινο, υπαλλήλους του Υπουργείου Γεωργίας σε κάθε μου αίτημα για βοήθεια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την απεριόριστη ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1 Εισαγωγή

1.1 Γεωθερμική και υδρογεωλογική έρευνα στη Νήσο Νάξο.

Η Νάξος βρίσκεται στις Κυκλάδες, βορειότερα του ηφαιστειακού τόξου. Τοποθετείται στην Αττικοκυκλαδική ζώνη. Αποτελείται από α) Αλπικούς σχηματισμούς περιοχικής μεταμόρφωσης που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού, β) έναν γρανοδιорίτη που διείσδυσε στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο κατά το Α.Μειόκαινο και γ) μη διαφοροποιημένα πετρώματα, κυρίως μη μεταμορφωμένα ιζήματα, πετρώματα της οφειολιθικής ακολουθίας που βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με το γρανοδιорίτη και τα μεταμορφωμένα πετρώματα.

Μέχρι σήμερα δεν είχε γίνει καμία εργασία στη Νήσο της Νάξο που να φανερώνει την ύπαρξη γεωθερμικού πεδίου. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν η γεωθερμική έρευνα του νησιού. Έτσι πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερών, μετρήσεις της θερμοκρασίας τους, θερμομετρήσεις σε γεωτρήσεις και χημική ανάλυση των δειγμάτων νερού που λήφθηκαν από γεωτρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν ότι υπάρχει μια αρκετά μεγάλη γεωθερμική ανωμαλία στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού που εμφανίζεται κυρίως βορειοανατολικά της περιοχής Αγιασμού. Η ύπαρξη του γρανοδιорίτη και τα ρήγματα παράταξης ΒΑ/ΝΔ που παρουσιάζονται στην περιοχή αποτελούν τους κύριους λόγους δημιουργίας αυτής της γεωθερμικής ανωμαλίας.

1.2 Εισαγωγή στη Γεωθερμία.

Γεωθερμική ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και εμπεριέχεται σε φυσικά επιφανειακά ή υπόγεια ρευστά με τη μορφή ατμών, θερμών νερών ή μίγματα νερών και ατμών ή και αερίων. Γεωθερμική είναι και η ενέργεια των θερμών "ξηρών" πετρωμάτων ή των λιωμένων μαγματικών υλικών.

Η γη είναι θερμή στο εσωτερικό της, όπως αποδεικνύουν οι φυσικές επιφανειακές θερμές ατμίδες, τα θερμά νερά και τα αέρια, τα geysers, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, κλπ. Από μετρήσεις προέκυψε ότι η θερμοκρασία αυξάνει σταθερά με το βάθος. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος ονομάζεται "γεωθερμική βαθμίδα" και η μέση τιμή της στα πρώτα χιλιόμετρα της γης ανέρχεται σε 30 °C/km. Με τον όρο "θερμική ροή" χαρακτηρίζεται η θερμότητα που μεταδίδεται από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της γης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Ο μέσος όρος της θερμικής ροής υπολογίζεται σε 60 mW/m².

Περιοχές με τιμές θερμικής ροής μεγάλες, που φθάνουν μέχρι και το εξαπλάσιο της μέσης, είναι (Φυτίκας, 2000) οι ακόλουθες :

- Περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης, όπου τμήματα του ωκεάνιου φλοιού απομακρύνονται μεταξύ τους (περιοχές των μεσο-ωκεάνιων ράχων). Η αυξημένη θερμική ροή είναι αποτέλεσμα της μεταφορικής κίνησης του μανδύα που προκαλεί άνοδο από τα βάθη προς την επιφάνεια των βαθύτερων και θερμών μαγματικών μαζών.
- Περιοχές βύθισης λιθοσφαιρικών πλακών. Στις περιοχές αυτές και συγκεκριμένα 150-250 km από τη τάφρο - όριο βύθισης της μιας πλάκας κάτω από την άλλη, σχηματίζονται νησιωτικά τόξα ή πτυχωσιγενείς οροσειρές στα ηπειρωτικά περιθώρια. Η αιτία που προκαλεί την ανωμαλία της θερμικής ροής στην περίπτωση αυτή είναι οι τεράστιες ποσότητες μαγμάτων που ανεβαίνουν από τον ενυδατωμένο μανδύα, ο οποίος βρίσκεται πάνω από τη ζώνη Benioff. Στην περιοχή ανάπτυξης του ηφαιστειακού τόξου η ροή θερμότητας φθάνει μέχρι και 600 mW/m² (Loddo & Mongelli, 1978). Η περιοχή πίσω από το ηφαιστειακό τόξο υπόκειται σε μία εφελκυστική τεκτονική που επιτρέπει μέχρι και τη διείσδυση μαγματικών μαζών και προκαλείται άνοδος προς την επιφάνεια των ισοθέρμων καμπυλών. Στις οπισθότοξες αυτές περιοχές η ροή θερμότητας φθάνει μέχρι 90 mW/m² (Watanabe et al., 1977). Έτσι, οι θερμικές ανωμαλίες δημιουργούνται κατά τη διάρκεια αυτής της μακρόχρονης διαδικασίας είτε σε σχέση με την ηφαιστειότητα που αναπτύσσεται, είτε σε σχέση με την άνοδο πολύ βαθιών μαγματικών μαζών (πλουτωνισμός), είτε με την άνοδο βαθιών και θερμών ρευστών λόγω της εφελκυστικής τεκτονικής.
- Ηπειρωτικές περιοχές διογκώσεων (Swellings) ή θερμών κηλίδων (Hot spots). Σε μεγάλα βάθη του μανδύα αναπτύσσονται σταθερές μεταφορικές κινήσεις που

δημιουργούν μερικά σταθερά θερμά σημεία. Όταν ένα εσωτερικό τμήμα μιας λιθοσφαιρικής πλάκας που μετατοπίζεται περνά πάνω από ένα τέτοιο θερμό σημείο, αποσπά βασαλτικό υγρό ασθενοσφαιρικής ίσως προέλευσης και δημιουργεί ένα ηφαίστειο. Η σταδιακή μετακίνηση της πλάκας προκαλεί και το συνεχή σχηματισμό νέων ηφαιστειακών κέντρων στην ίδια ευθεία. Στην περίπτωση ηπειρωτικών πλακών εμφανίζονται κάποιες ειδικές διογκώσεις του φλοιού στο εσωτερικό περιοχών, τελείως σταθερών από τεκτονική άποψη.

- Περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων. Μεγάλα τεκτονικά βυθίσματα παρουσιάζουν και αυτά ανωμαλίες θερμικής ροής, χωρίς να φθάνουν σε υψηλές τιμές. Για παράδειγμα στο κεντρικό τμήμα της Παννονικής πεδιάδος μετρήθηκαν θερμικές ροές που κυμαίνονται ανάμεσα σε 50.2 και 100.3 mW/m².

Οι παραπάνω περιοχές αυξημένης θερμικής ροής σχετίζονται με ευρείας κλίμακας γεωδυναμικά φαινόμενα. Εκτός όμως αυτών των φαινομένων, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταβολή της θερμικής ροής στις ηπειρωτικές μάζες, όπως π.χ. είναι η ηλικία των πετρωμάτων. Στατιστικές μετρήσεις στις ηπείρους δείχνουν ότι τα υπολείμματα των Προκάμβριων πετρωμάτων έχουν χαμηλή θερμική ροή (41 mW/m²), οι Ερκύνιες μάζες έχουν θερμική ροή που πλησιάζει τη μέση γήινη (62 mW/m²) ενώ τα πετρώματα του Μεσοζωικού και του Τριτογενούς χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές θερμικής ροής (μέχρι 74 mW/m²) (Champan et al., 1979).

"Γεωθερμικές περιοχές" είναι θεωρητικά εκείνες που για διαφορετικές αιτίες έχουν θερμική ροή και επομένως γεωθερμική βαθμίδα ανώτερη από τις μέσες τιμές της γήινης. Οι περισσότερες από τις περιοχές αυτές βρίσκονται κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Δεν αρκεί όμως μόνο η θερμική ανωμαλία για τη δημιουργία γεωθερμικών κοιτασμάτων ή γεωθερμικών πεδίων. Χρειάζονται και άλλες ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, όπως η ύπαρξη γεωθερμικών ρευστών σε όχι μεγάλα βάθη, με ικανοποιητική θερμοκρασία, καλά έως αποδεκτά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και σε αξιόλογη ποσότητα.

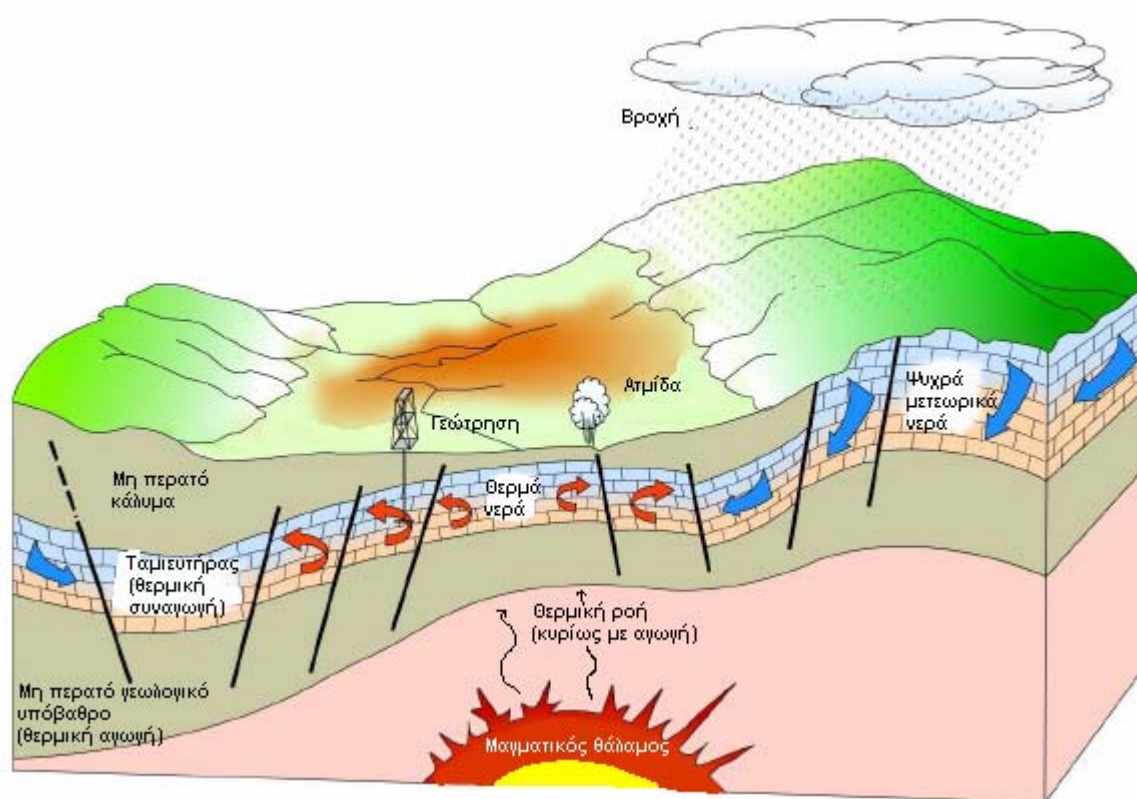
1.2.1 Γεωθερμικά πεδία.

Με τον όρο "γεωθερμικά πεδία" εννοούνται περιοχές στις οποίες η θερμική ενέργεια της Γης είναι επαρκώς συγκεντρωμένη και σε μικρά σχετικά βάθη, ώστε να δημιουργεί μία εκμεταλλεύσιμη ενεργειακή πηγή. Τα γεωθερμικά πεδία ταξινομούνται με βάση τα γεωλογικά, υδρολογικά και θερμικά χαρακτηριστικά τους.

Ένα γεωθερμικό πεδίο συγκροτείται από τρία κύρια στοιχεία (Dickson M. H. & Fanelli M., 1990) : μια θερμή πηγή, έναν ταμιευτήρα (reservoir) και τα ρευστά που είναι τα μέσα του, τα οποία περιέχουν και μεταφέρουν τη θερμότητα.

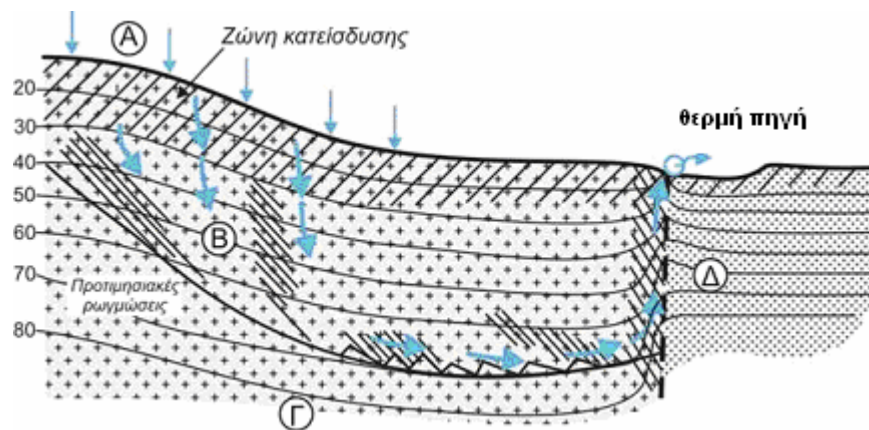
Τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητη και η παρουσία ενός καλύμματος, με πετρώματα αδιαπέρατα ή με πολύ χαμηλή διαπερατότητα, τα οποία υπέρκεινται του ταμιευτήρα και αποτρέπουν τη διαφυγή των θερμών ρευστών του ταμιευτήρα με γρήγορη μεταφορά προς την επιφάνεια. Πάντως, η απώλεια θερμότητας με αγωγή δεν αποτρέπεται από το αδιαπέρατο κάλυμμα. Εντούτοις, η ποσότητα θερμότητας που άγεται είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που θα χάνονταν μέσω διαφυγής του ρευστού (Gupta, 1980).

Ο ταμιευτήρας σχηματίζεται από θερμά και υδροπερατά πετρώματα, από τα οποία η θερμότητα μπορεί να αποσπασθεί μέσω των ρευστών που κυκλοφορούν. Σε πολλές, αλλά σε όχι όλες τις περιπτώσεις, ο ταμιευτήρας συνδέεται με κάποια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, που ανανεώνει το σύνολο ή μέρος των ρευστών.

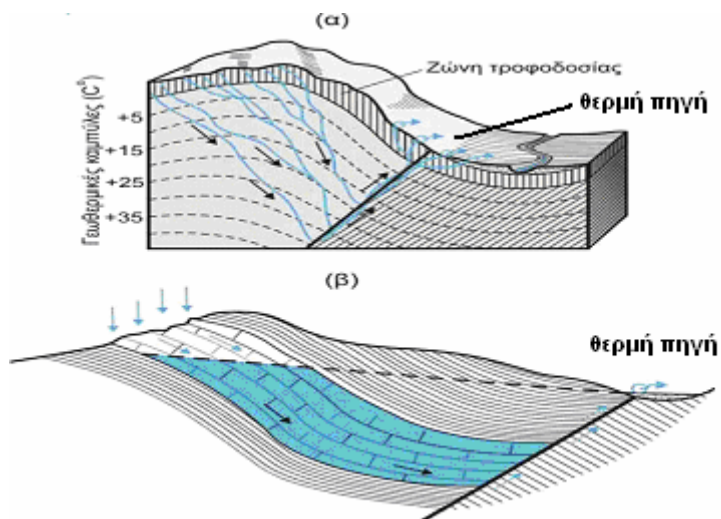


Σχήμα 1.1. Ένα γεωθερμικό πεδίο που παράγει ατμό και τα κύρια συστατικά του (από πάνω προς τα κάτω): η περιοχή επαναφόρτισης, το μη περατό κάλυμμα, ο ταμιευτήρας, το μη περατό γεωλογικό υπόβαθρο, και η πηγή ενέργειας.

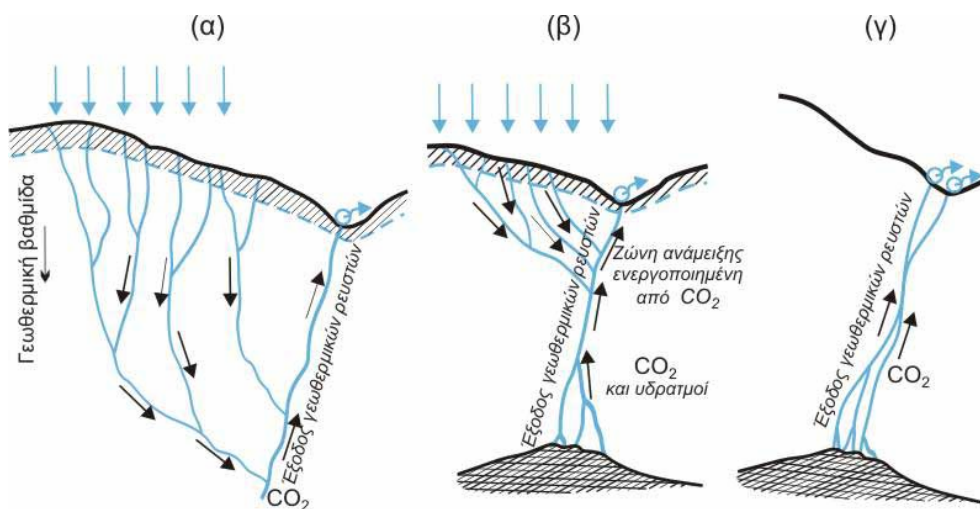
Γεωθερμικά ρευστά εμφανίζονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών (Σχήμα 1.2-1.5) ή αποσπώνται με γεωτρήσεις.



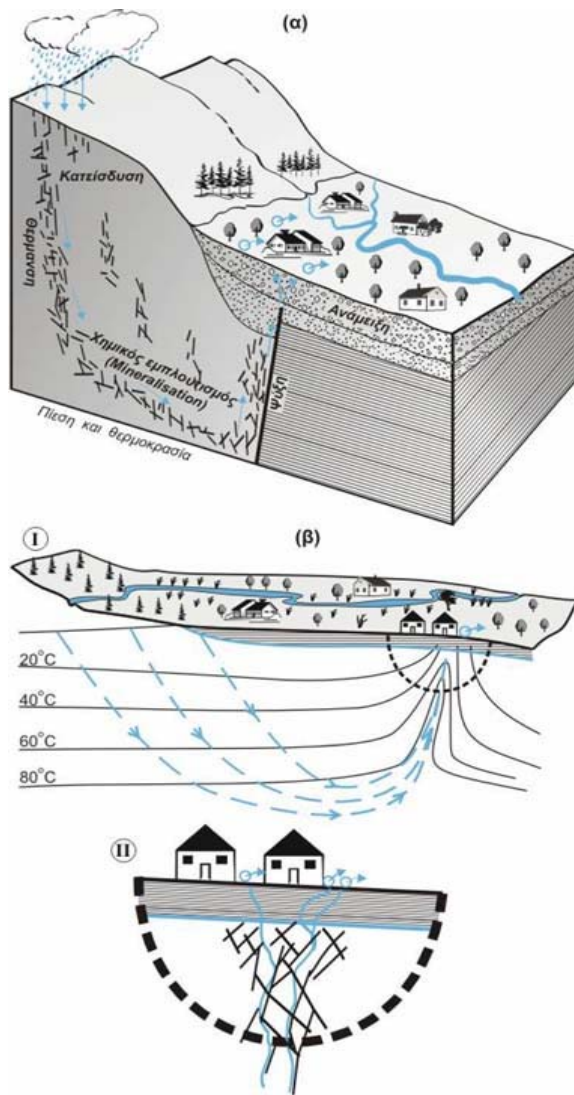
Σχήμα 1.2 Σχηματισμός μιας θερμομεταλλικής πηγής (κατά Blavoux B.-Berthier F., 1995)



Σχήμα 1.3 Περιπτώσεις δημιουργίας θερμών πηγών [(α) κατά Desio 1959 από τον Καλλέργη Γ., 2001, (β) κατά Moret L., 1946).



Σχήμα 1.4 Θερμή πηγή με μετεωρικό νερό (α), με μετεωρικό + «νεαρό» νερό (β) και με «νεαρό» νερό (γ) (κατά Castany G., 1968)



Σχήμα 1.5. Στερεοδιαγράμματα που δείχνουν τη δημιουργία δύο διαφορετικών πηγών [(α) κατά Lopoukhine M., 1995, (β) κατά Blavoux B.-Berthier F., 1985]

Τα γεωθερμικά πεδία απαντούν στη φύση σε μία ποικιλία συνδυασμών γεωλογικών, φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών, δημιουργώντας διαφόρους τύπους (Σχήμα 1.1).

1.2.1.1 Μεταφορικά και Μεταδοτικά Γεωθερμικά Συστήματα.

Τα γεωθερμικά πεδία μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες ομάδες, ανάλογα με την κυκλοφορία ή όχι γεωθερμικού ρευστού, δηλ. σε μεταφορικά (convective) και μεταδοτικά (conductive) γεωθερμικά συστήματα. Η διάκριση αυτή είναι ευρέως αποδεκτή (Bowen, 1989).

- Μεταφορικά Γεωθερμικά Συστήματα.

Αυτά χαρακτηρίζονται από τη φυσική κυκλοφορία των γεωθερμικών ρευστών, έτσι ώστε το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας να μεταφέρεται από τα κυκλοφορούντα ρευστά και ένα μικρό ποσοστό να μεταφέρεται μέσω της μάζας των πετρωμάτων (δια της αγωγής). Δηλ. στην

περίπτωση αυτή τα θερμά νερά, που έχουν επιφανειακή προέλευση, ακολουθούν τον κύκλο κάθοδος - θέρμανση - άνοδος με τη βοήθεια επαγωγικών ρευμάτων. Τα μεταφορικά συστήματα χαρακτηρίζονται και ως "κυκλικά συστήματα" (Ellis & Mahon, 1977).

Μέσα στον ταμιευτήρα τα νερά μετακινούνται κυρίως εξαιτίας της διαφορών πυκνότητας που προκαλούνται από τη θερμοκρασία, μεταφέροντας θερμότητα από τα χαμηλότερα τμήματα του ταμιευτήρα προς τα ανώτερα τμήματά του (Lippmann & Bodvarsson, 1987). Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι ότι η θερμοκρασία στα ανώτερα τμήματα του ταμιευτήρα δεν είναι υποδιαίστερη σε σχέση με τη θερμοκρασία στα χαμηλότερα τμήματα.

- **Μεταδοτικά Γεωθερμικά Συστήματα**

Αυτά χαρακτηρίζονται από θερμικό καθεστώς που οφείλεται μόνο στην αγωγή της θερμότητας μέσω των πετρωμάτων. Το γεωθερμικό ρευστό είτε είναι παρόν, όπως στην περίπτωση των βαθιών υδροφόρων οριζόντων σε ιζηματογενείς λεκάνες, είτε «παράγεται» τεχνητά όπως στα "Θερμά Ξηρά Πετρώματα". Τα μεταδοτικά συστήματα χαρακτηρίζονται και ως "αποθηκευτικά" (Κολιός, 1993), αφού το νερό τους είναι αποθηκευμένο στα πετρώματα για μεγάλο χρονικό διάστημα και εκεί θερμαίνεται, είτε σαν νερό μέσα στο σχηματισμό όπου μπορεί να συνυπάρχει με νερό των ιζημάτων (connate) και νερό μετεωρικό ενός άλλου όμορου επιφανειακού υδραυλικού συστήματος.

1.2.1.2 Ταξινόμηση των Γεωθερμικών Συστημάτων.

Το πιο συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πεδίων βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών. Με βάση την ενθαλπία, τα γεωθερμικά πεδία χαρακτηρίζονται ως χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Λαμβάνοντας υπ' όψη διάφορα όρια θερμοκρασίας υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων με βάση την ενθαλπία (Dickson & Fanelli, 1990).

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ	Πεδία Χαμηλής Ενθαλπίας	Πεδία Μέσης Ενθαλπίας	Πεδία Υψηλής Ενθαλπίας
Κατά Muffler & Cataldi, 1978	< 90 °C	90 - 150 °C	> 150 °C
Κατά Hochstein, 1990	< 125 °C	125 - 225 °C	> 225 °C
Κατά Benderitter & Corny, 1990	< 100 °C	100 - 200 °C	100 - 200 °C
Κατά Haenel, Rybach & Stegena, 1988	<150 °C	----	> 150 °C

1.2.1.3 Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας.

Στα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας απουσιάζει η εστία θερμότητας με τη μορφή λιωμένου μάγματος σε μικρό σχετικά βάθος, με αποτέλεσμα η θερμική ανωμαλία να είναι μικρότερη. Τα γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας μπορούν να υπάρχουν με όλα τα συστήματα θερμικών ανωμαλιών και βρίσκονται και σε περιοχές κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας. Εκείνο που έχει ιδιαίτερη σημασία είναι η γεωλογική και τεκτονική δομή της περιοχής.

Έτσι, σε περιοχές με εφελκυστικού τύπου τεκτονική, που δημιουργούν πρόσφατες λεκάνες, υπάρχει μικρή θερμική ανωμαλία εξ' αιτίας των μεγάλων, βαθιών και "ανοικτών" κανονικών ρηγμάτων που τέμνουν βαθείς και θερμούς υδροφόρους και επιτρέπουν τη γρήγορη άνοδο αυτών των βαθύτερης προέλευσης θερμών ρευστών (οπότε δε χάνουν τη θερμότητά τους) και επομένως τη μεταφορά σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας. Εάν η τεκτονική αλλά και η όλη γεωμετρία του ρήγματος αφήνουν ανοικτή τη δίοδο, η άνοδος των γεωθερμικών ρευστών μέχρι την επιφάνεια γίνεται γρήγορα και συνεπώς σχηματίζονται σε μερικά σημεία θερμές πηγές. Τις περισσότερες φορές όμως τα ρευστά δεν καταφέρνουν να φθάσουν μέχρι την επιφάνεια, αλλά εγκλωβίζονται κοντά σ' αυτήν και δημιουργούν γεωθερμικά πεδία στην περιοχή των ρηγμάτων ή πολύ κοντά σ' αυτά. Τα σημεία διασταύρωσης ρηγμάτων επιτρέπουν τη γρήγορη και πιο μαζική άνοδο σημαντικών ποσοτήτων θερμών ρευστών.

Η ύπαρξη λοιπόν βαθιών, "ανοικτών" ρηγμάτων, σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες (κατάλληλος ταμιευτήρας, στεγανό κάλυμμα κλπ.) ευνοούν το σχηματισμό γεωθερμικών πεδίων χαμηλής και μερικές φορές μέσης ενθαλπίας.

Οι Sorey et al. (1983) διακρίνουν δύο ειδών γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας : (α) τα πεδία με υδροθερμικά μεταφορικά συστήματα και (β) εκείνα με συστήματα όπου η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή (μεταδοτικά συστήματα).

1.3 Γεωθερμική Έρευνα.

1.3.1 Αντικείμενα Έρευνας

Τα αντικείμενα μιας γεωθερμικής έρευνας είναι (Lumb, 1981):

1. Ο προσδιορισμός των γεωθερμικών φαινομένων
2. Η επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός εκμεταλλεύσιμου παραγωγικού γεωθερμικού πεδίου
3. Η εκτίμηση του μεγέθους του ενεργειακού πόρου
4. Ο καθορισμός του τύπου του γεωθερμικού πεδίου
5. Ο εντοπισμός των παραγωγικών ζωνών

6. Ο καθορισμός του θερμικού περιεχομένου των γεωθερμικών ρευστών που θα παραχθούν από το γεωθερμικό πεδίο μέσω των παραγωγικών γεωτρήσεων
7. Η συλλογή των βασικών δεδομένων, πάνω στα οποία θα βασιστούν τα αποτελέσματα της μελλοντικής παρακολούθησης του πεδίου
8. Ο καθορισμός της τιμής των ευαίσθητων περιβαλλοντικών παραμέτρων πριν από την εκμετάλλευση
9. Η συλλογή πάσης φύσεως πληροφορίας και γνώσης για κάθε χαρακτηριστικό στοιχείο που θα μπορούσε να προκαλέσει προβλήματα κατά την ανάπτυξη του πεδίου.

Η σχετική σπουδαιότητα καθενός από τα παραπάνω εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι περισσότεροι από τους οποίους συνδέονται με αυτό καθαυτό τον ενεργειακό πόρο, και περιλαμβάνουν το είδος της αναμενόμενης εκμετάλλευσης, τη διαθέσιμη τεχνολογία, τα οικονομικά μεγέθη, ως επίσης την κατάσταση, τη γεωγραφική θέση και τη χρονική περίοδο. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν άμεσα τον προγραμματισμό και την έκβαση μιας γεωθερμικής έρευνας. Για παράδειγμα, οι προκαταρκτικές αναγνωριστικές έρευνες των γεωθερμικών εκδηλώσεων επιφανείας αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και χρησιμότητα όταν αφορούν μια απομακρυσμένη και μη μελετημένη περιοχή, σε σχέση με μια γνωστή και εκτενώς μελετημένη. Εξάλλου, η εκτίμηση του ακριβούς μεγέθους του γεωθερμικού πόρου αποκτά ίσως μικρότερη σημασία εφόσον πρόκειται για μια μικρής κλίμακας εφαρμογή, αφού η τελευταία προφανώς απαιτεί πολύ λιγότερη θερμική ενέργεια απ' ό,τι ήδη παράγεται με φυσικό τρόπο. Επίσης, εάν η γεωθερμική ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση μιας περιοχής ή σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλού βαθμού θερμότητα, τότε η εύρεση ρευστών υψηλής θερμοκρασίας δεν αποτελεί απαραίτητα τον αντικειμενικό σκοπό της γεωθερμικής έρευνας (Lumb, 1981).

Για την πραγματοποίηση των στόχων μιας γεωθερμικής έρευνας υπάρχουν και εφαρμόζονται πολλές μέθοδοι και τεχνικές. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και σε άλλους τομείς έρευνας. Όμως, παρόλο που μπορεί να έχουν εξαιρετική συμβολή και η εφαρμογή τους να είναι πετυχημένη στην έρευνα π.χ. ορυκτών, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, δεν αποτελούν αναγκαστικά την πλέον ενδεδειγμένη λύση στη γεωθερμική έρευνα. Αντίθετα, τεχνικές περιορισμένης χρήσης στην έρευνα πετρελαίου μπορεί να αποδειχθούν ιδανικά εργαλεία στον τομέα της αναζήτησης φυσικής γήινης θερμότητας (Combs & Muffler, 1973).

1.3.2 Μέθοδοι έρευνας

Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες αποτελούν την αφετηρία κάθε γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος. Η βασική τους συνεισφορά αφορά στον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης των περιοχών που θα πρέπει να ερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, καθώς και στην υπόδειξη των καταλληλότερων μεθόδων έρευνας για τις συγκεκριμένες περιοχές. Οι γεωλογικές-υδρογεωλογικές μελέτες παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις επόμενες φάσεις της γεωθερμικής έρευνας, ακόμη και στον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών και παραγωγικών γεωτρήσεων. Επίσης, παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που συγκεντρώνονται από τις άλλες μεθόδους, την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πόρου και, τελικά, την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) του γεωθερμικού συστήματος. Τα στοιχεία των μελετών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη φάση παραγωγής, αναφορικά με την ορθολογική διαχείριση του γεωθερμικού ταμιευτήρα και γενικότερα του πεδίου. Φαίνεται λοιπόν ότι η διάρκεια και το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής έρευνας μπορεί να μειωθούν σημαντικά αν ο προγραμματισμός της γίνει με σωστό σχεδιασμό και αποδοτικό συντονισμό.

Οι γεωχημικές έρευνες (συμπεριλαμβανομένης της γεωχημείας ισοτόπων), αποτελούν αξιόλογα εργαλεία για τον καθορισμό της φύσης του γεωθερμικού συστήματος (υγρό ή ατμός), την εκτίμηση της ελάχιστης αναμενόμενης θερμοκρασίας στο βάθος και της ομοιογένειας στην παροχή των ρευστών, την έμμεση εκτίμηση των χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών που βρίσκονται στο βάθος καθώς και για τον προσδιορισμό της πηγής τροφοδοσίας του ταμιευτήρα. Επιπλέον, μπορούν να παράσχουν πολύτιμες πληροφορίες για το είδος των προβλημάτων που ενδέχεται να προκύψουν κατά την επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα και κατά την παραγωγική διαδικασία (π.χ. αλλαγές στη σύσταση των ρευστών, διάβρωση ή επικαθήσεις στις σωληνώσεις και τις εγκαταστάσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισης ή αποφυγής τους. Η γεωχημική έρευνα συνίσταται σε δειγματοληψίες, χημικές και/ή ισοτοπικές αναλύσεις του νερού και των αερίων των γεωθερμικών επιφανειακών εκδηλώσεων (θερμές πηγές, ατμίδες, κλπ.) ή των γεωτρήσεων στην υπό μελέτη περιοχή. Επειδή η γεωχημική έρευνα αφενός παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία για τον περαιτέρω σχεδιασμό του γεωθερμικού προγράμματος, αφετέρου το κόστος της είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με πιο εξεζητημένες μεθόδους, όπως είναι για παράδειγμα οι γεωφυσικές ή γεωτρητικές, θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο τον δυνατόν περισσότερο πριν την εφαρμογή άλλων περισσότερο δαπανηρών μεθοδολογιών.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις σκοπεύουν στην έμμεση απόκτηση γνώσης, από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Θερμοκρασία (θερμομετρική έρευνα)
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος)
- Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος)
- Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος)
- Μαγνητική επιδεκτικότητα (μαγνητική μέθοδος)

Μερικές από τις παραπάνω μεθόδους, όπως η σεισμική, η βαρυτομετρική και η μαγνητική, οι οποίες κατά παράδοση εφαρμόζονται στην έρευνα πετρελαίου, έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, το βάθος και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά βαθιών γεωλογικών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελούν ένα γεωθερμικό ταμειυτήρα. Όμως, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν λίγα έως καθόλου στοιχεία για την ύπαρξη ή όχι ρευστών, κάτι που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της γεωθερμικής έρευνας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται σκοπιμότερη η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων για την αποσαφήνιση λεπτομερειών κατά τα τελευταία στάδια του γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, πριν ακριβώς τον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων. Πληροφορίες για την παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις βαθιές γεωλογικές δομές μπορούν να αποκτηθούν με τη βοήθεια των γεωηλεκτρικών και των ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες από τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην ύπαρξη τέτοιων ρευστών καθώς και στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πράγματι, οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ευρεία εφαρμογή στη γεωθερμική έρευνα και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μαγνητοτελλουρική μέθοδος (MT), η οποία αξιοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από τις ηλιακές καταιγίδες, έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας πλέον δυνατότητες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρά το γεγονός ότι προϋποθέτει πολύ εξεζητημένο τεχνολογικό εξοπλισμό και είναι ευαίσθητη στους βασικούς θορύβους των αστικών ή βιομηχανικών περιοχών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μαγνητοτελλουρικής μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό βαθύτερων, σε σχέση με αυτές που προσδιορίζονται από την ηλεκτρομαγνητική ή τη γεωηλεκτρική μέθοδο, δομών. Η «ηχομαγνητοτελλουρική μέθοδος ελεγχόμενης πηγής» (Controlled Source Audiomagnetotelluric Method-CSAMT) που αναπτύχθηκε πρόσφατα, χρησιμοποιεί τεχνητά επαγόμενα κύματα αντί των φυσικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το βάθος διείσδυσης με αυτήν την τεχνική είναι μικρότερο, αλλά τα αποτελέσματα είναι πιο γρήγορα, το κόστος μικρότερο και οι λεπτομέρειες που

τελικά προκύπτουν είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με την κλασσική μαγνητοτελλουρική μέθοδο.

Οι θερμομετρικές τεχνικές (μετρήσεις θερμοκρασίας, προσδιορισμός της γεωθερμικής βαθμίδας και της γήινης θερμικής ροής) συχνά παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού, με καλή προσέγγιση, της θερμοκρασίας στην οροφή του ταμιευτήρα).

Όλες γενικά οι μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων έχουν μεγάλο κόστος, κάποιες μάλιστα ιδιαίτερα υψηλό. Για το λόγο αυτό, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αδιακρίτως και υπό οποιεσδήποτε καταστάσεις και συνθήκες, διότι μια μέθοδος που πιθανώς παρέχει θαυμάσια αποτελέσματα σε ένα συγκεκριμένο γεωλογικό περιβάλλον μπορεί να μην έχει καθόλου ικανοποιητική απόδοση σε κάποιο άλλο. Άρα, η εκ των προτέρων προσεκτική επιλογή της(ων) γεωφυσικής(ών) μεθόδου(ων) είναι πολύ σημαντική όσον αφορά τον περιστολή του κόστους, και θα πρέπει να γίνεται από κατάλληλους και ειδικούς γεωφυσικούς επιστήμονες, που με τη σειρά τους θα βρίσκονται σε συνεχή και στενή συνεργασία με τους γεωλόγους (Meidav, 1998).

Η διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων σηματοδοτεί το τελικό στάδιο ενός ερευνητικού γεωθερμικού προγράμματος και αποτελεί το μόνο μέσο για τον προσδιορισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και την εκτίμηση του δυναμικού του (Combs & Muffler, 1973). Τα στοιχεία που προκύπτουν από τις ερευνητικές γεωτρήσεις θα πρέπει λογικά να είναι τέτοια, ώστε να επαληθεύουν όλες τις αρχικές υποθέσεις και τα μοντέλα που είχαν αναπτυχθεί κατά τα προηγούμενα στάδια της έρευνας, καθώς και να επιβεβαιώσουν ότι ο ταμιευτήρας είναι πράγματι παραγωγικός και περιέχει αρκετή ποσότητα ρευστών, με χαρακτηριστικά κατάλληλα για τη χρήση που προορίζονται. Καθίσταται λοιπόν φανερό πως η επιλογή της σωστής θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι ένα κρίσιμο και δύσκολο εγχείρημα, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη εμπειρία, γνώσεις και λεπτούς χειρισμούς.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής ειδίκευσης πραγματοποιήθηκε έρευνα στη νήσο Νάξο, με σκοπό την εύρεση πιθανής γεωθερμικής ανωμαλίας. Οι μέθοδοι που συμπεριέλαβε η έρευνα ήταν: αναζήτηση όλων των επιφανειακών σημείων νερού αλλά και των υπαρχουσών υδρογεωτρήσεων, δειγματοληψία νερού από επιλεγμένα σημεία, μετρήσεις της θερμοκρασίας νερού στην κεφαλή των υδρογεωτρήσεων και χημική ανάλυση επιλεγμένων δειγμάτων νερού που λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις, ενημέρωση για τη γεωλογία και την τεκτονική του νησιού μέσα από την βιβλιογραφία και καθορισμός του υδρογεωλογικού ισοζυγίου. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για μια προκαταρτική έρευνα, με περιορισμένα οικονομικά μέσα, η οποία όμως μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια αναλυτικότερη και σε βάθος γεωθερμική μελέτη της Νάξου με περισσότερα τεχνικά μέσα στο μέλλον.

1.4 Χρήσεις των Γεωθερμικών Πόρων

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πιο σημαντική μορφή αξιοποίησης των γεωθερμικών πόρων υψηλής θερμοκρασίας ($>150^{\circ}\text{C}$). Οι μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας πόροι ($<150^{\circ}\text{C}$) είναι κατάλληλοι για πολλούς και διαφορετικούς τύπους εφαρμογών. Το κλασσικό διάγραμμα του Lindal, 1973 (Σχήμα 1.6), το οποίο δείχνει τις πιθανές χρήσεις των γεωθερμικών ρευστών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους, ισχύει ακόμη μέχρι σήμερα. Στο διάγραμμα όμως αυτό θα πρέπει να προστεθεί η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου (binary cycle) από ρευστά που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από 85°C . Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι το κατώτατο όριο των 20°C μπορεί να ξεπεραστεί, αλλά μόνο υπό ορισμένες συνθήκες και κυρίως με τη χρήση των αντλιών θερμότητας.

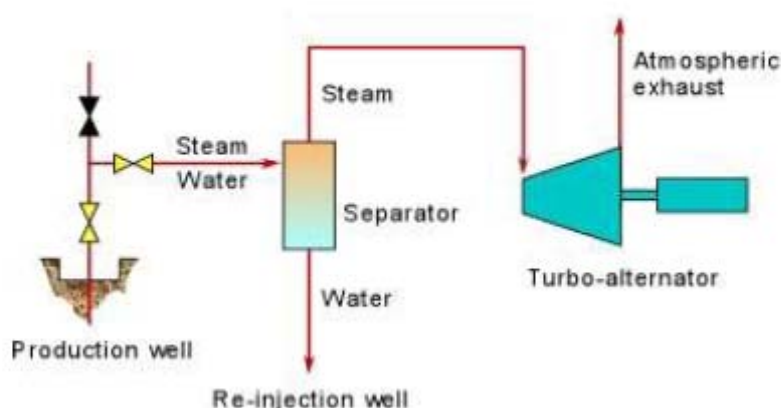
Το διάγραμμα του Lindal δίνει έμφαση σε δύο σημαντικές παραμέτρους που αφορούν στην αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων (Gudmundsson, 1988): (α) με διαδοχικές και συνδυασμένες εφαρμογές μπορούν να αυξηθούν οι πιθανότητες επιτυχούς έκβασης και η αποτελεσματικότητα των γεωθερμικών προγραμμάτων και (β) η θερμοκρασία των ρευστών μπορεί να περιορίσει τις πιθανές χρήσεις. Παρόλα αυτά, το πεδίο εφαρμογών μπορεί να διευρυνθεί εάν ο σχεδιασμός ενός προγράμματος είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.



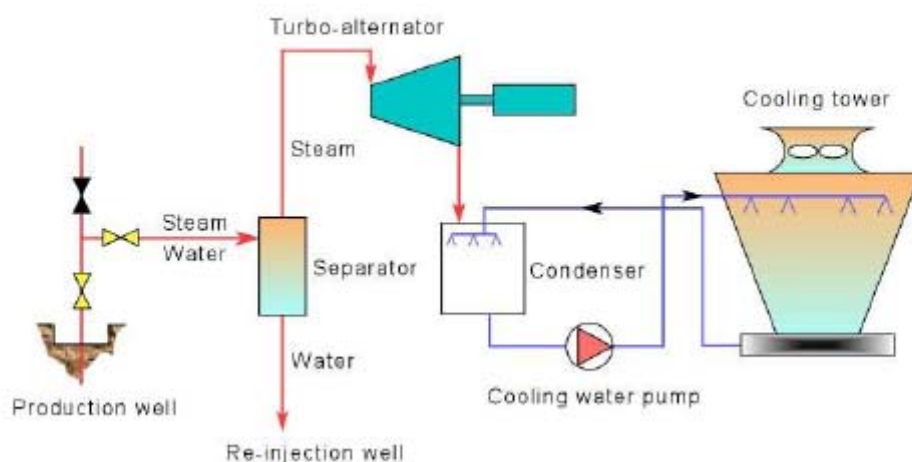
Σχήμα 1.6. Το διάγραμμα του Lindal (Lindal, 1973)

1.4.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά λαμβάνει χώρα σε μονάδες που λειτουργούν είτε με συμβατικούς ατμοστρόβιλους ή με δυαδικό κύκλο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πόρου. Οι συμβατικοί ατμοστρόβιλοι απαιτούν ρευστά που έχουν θερμοκρασίες τουλάχιστον 150°C. Η μονάδα μπορεί να λειτουργεί με συμπυκνωτές, όπου η πίεση διατηρείται συνεχώς σε χαμηλά επίπεδα (condensing type) ή χωρίς (back pressure type), οπότε γίνεται διάθεση του ατμού στην ατμόσφαιρα.



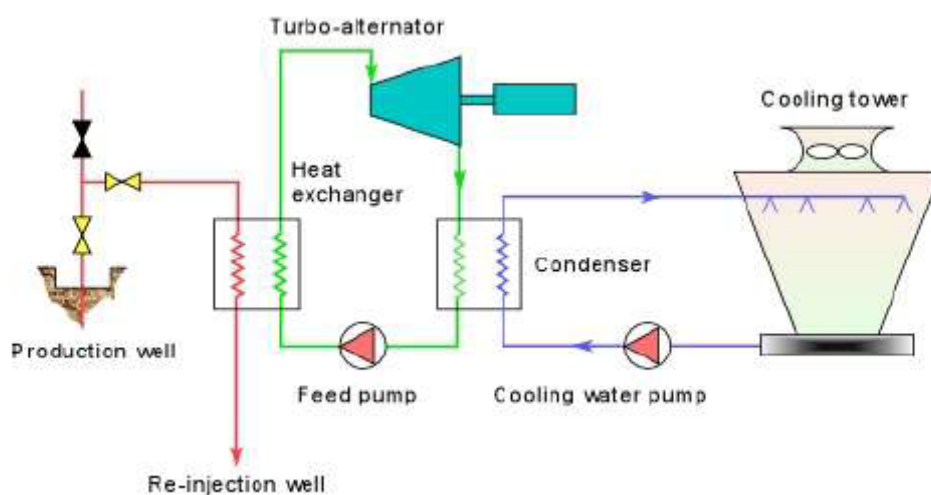
Σχήμα 1.7. Σκαρίφημα γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με διάθεση του ατμού απευθείας στην ατμόσφαιρα. Η ροή του γεωθερμικού ρευστού σημειώνεται με κόκκινο χρώμα.



Σχήμα 1.8. Σκαρίφημα μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας με συμπυκνωτές. Η ροή των ρευστών υψηλής θερμοκρασίας σημειώνεται με κόκκινο χρώμα, ενώ του νερού ψύξης με μπλε.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ρευστά χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας και από το υψηλής θερμοκρασίας νερό που εξέρχεται από τους διαχωριστές στα γεωθερμικά

πεδία υγρής φάσης, σημειώνει αξιόλογη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως εξαιτίας της προόδου που επιτεύχθηκε στην τεχνολογία των δυαδικών ρευστών. Σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ένα δευτερεύον –συνήθως οργανικό-ρευστό (ισο-πεντάνιο), το οποίο έχει χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, αν συγκριθεί με τον υδατίνο ατμό. Το δευτερεύον ρευστό χρησιμοποιείται μέσα σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR) ως εξής: το γεωθερμικό ρευστό προσφέρει θερμότητα στο δευτερεύον υγρό μέσω εναλλακτών θερμότητας, οπότε το τελευταίο εξατμίζεται. Ο ατμός που παράγεται κινεί έναν κανονικό στρόβιλο αξονικής ροής, στη συνέχεια ψύχεται και συμπυκνώνεται, οπότε ο κύκλος αρχίζει ξανά (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9. Σκαρίφημα μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικό κύκλο. Το γεωθερμικό ρευστό σημειώνεται με το κόκκινο χρώμα, το δευτερεύον ρευστό με πράσινο και το νερό ψύξης με μπλε.

Εάν γίνει σωστή επιλογή του δευτερεύοντος ρευστού, τα δυαδικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιούν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 85-170°C.

Εκτός από τις περιπτώσεις χαμηλής-μέσης ενθαλπίας, τα δυαδικά συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εκεί όπου η εφαρμογή του κύκλου εκτόνωσης των ρευστών (flashing) θα πρέπει να αποφεύγεται (π.χ. για την αποφυγή απόφραξης των γεωτρήσεων). Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποβρύχιες αντλίες, ώστε να ρευστά να παραμένουν υπό σταθερή πίεση και σε υγρή φάση, ενώ η ενέργεια μπορεί να λαμβάνεται από το ρευστό κυκλοφορίας με τη βοήθεια του δυαδικού συστήματος.

Τα δυαδικά συστήματα κατασκευάζονται συνήθως σε μικρές αρθρωτές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η ισχύς ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες KWe έως λίγα MWe. Τέτοια συστήματα εντούτοις έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζονται

σε συστοιχία ώστε τελικά να δημιουργούνται μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνολικής ισχύος κάποιων δεκάδων MWe.

Μικρές «κινητές», συμβατικές ή όχι, μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσαν όχι μόνο να συμβάλλουν στη μείωση του κινδύνου μερικής αποτυχίας των νέων γεωτρήσεων, αλλά κυρίως να βοηθήσουν στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απομονωμένων περιοχών. Το βιοτικό επίπεδο απομονωμένων κοινοτήτων θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά εάν υπήρχε η δυνατότητα να βασιστούν σε τοπικούς ενεργειακούς πόρους. Η ηλεκτρική ενέργεια θα διευκόλυνε πολλές, φαινομενικά απλοϊκές, αλλά, εξαιρετικά σημαντικές εργασίες, όπως η άντληση νερού για άρδευση και η ψύξη φρούτων και λαχανικών για συντήρηση σε μεγάλο χρονικό διάστημα. Η διευκόλυνση που παρέχουν οι «κινητές» μονάδες γίνεται περισσότερο εμφανής στις περιοχές που δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε συμβατικά καύσιμα, και στις κοινότητες για τις οποίες το κόστος σύνδεσής τους με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο είναι εξαιρετικά υψηλό.

1.4.2 Αφαλάτωση

Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με γεωθερμικά ρευστά σαν θερμαντικό μέσο δύνανται να επιτευχθεί με τη μέθοδο της πολυσταδιακής εξάτμισης εν κενώ (MED). Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αφαλάτωση πρέπει η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών να είναι τουλάχιστον 60 °C. Η θερμοκρασία απόρριψης σχεδιάζεται να είναι 40-50 °C.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της νήσου Μήλου όπου έγιναν εκτεταμένες έρευνες για την εγκατάσταση μιας μονάδας αφαλάτωσης και παράλληλης ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας (<90°C). Οι ανάγκες της νήσου Μήλου για νερό υπολογίστηκε ότι καλύπτονται από 75m³/h αφαλατωμένου θαλασσινού νερού. Η μέθοδος MED (multi effects distillation) απόσταξης πολλαπλών αποτελεσμάτων προτάθηκε για την πραγματοποίηση της αφαλάτωσης λόγω του ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας. Εκτός από τη γεωθερμική ενέργεια το εγχείρημα αυτό προϋποθέτει και τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία των αντλιών νερού, για τις αντλίες αφαλάτωσης, για τους μηχανισμούς μέτρησης και αυτοματισμού, για το φωτισμό κτλ. Η συνολική ανάγκη σε ηλεκτρικό ρεύμα υπολογίστηκε σε 470kW_e τα οποία μπορούν να παραχθούν από ένα γεωθερμικό ORC (γεννήτρια ρεύματος). Η οικονομική ανάλυση κόστους-ωφέλειας που πραγματοποιήθηκε για το μηχανισμό MED έδειξε ότι η πλέον συμφέρουσα θερμοκρασία επανεισαγωγής υπολογίζεται στους 55°C.

Δυστυχώς λόγω διαφόρων συγκυριών, δεν έχει ολοκληρωθεί το έργο αυτό μέχρι σήμερα.

1.4.3 Άμεσες Χρήσεις της Γεωθερμίας

Οι άμεσες χρήσεις της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση είναι οι παλαιότερες, οι πιο πολύπλευρες και οι πλέον συνηθισμένες μορφές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Η λουτροθεραπεία, η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση, οι αγροτικές εφαρμογές, οι υδατοκαλλιέργειες και κάποιες βιομηχανικές χρήσεις είναι οι πιο γνωστές κλασικές μορφές χρήσεις. Όμως οι αντλίες θερμότητας αποτελούν σήμερα μια πολύ διαδεδομένη μορφή αξιοποίησης (12,5 % της συνολικής χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας κατά το έτος 2000) των ρευστών ή πετρωμάτων πολύ χαμηλής θερμοκρασίας. Υπάρχουν φυσικά και κάποιοι άλλοι μικρότερης κλίμακας τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμίας, οι οποίοι όμως δεν είναι τόσο συνηθισμένοι.

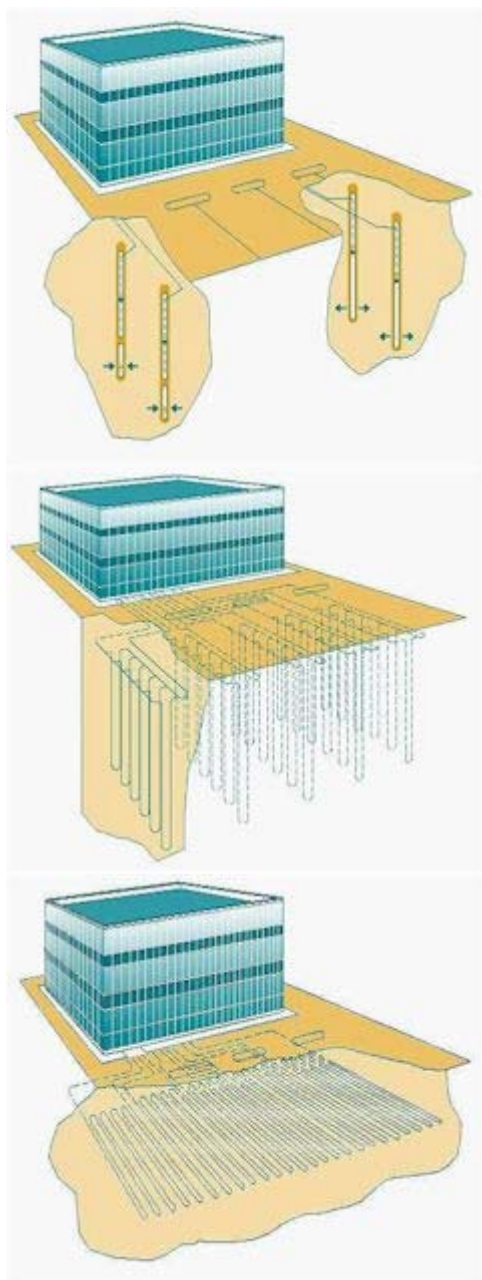
Η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση (space and district heating) παρουσίασαν μεγάλη ανάπτυξη στην Ισλανδία, όπου η συνολική ισχύς του γεωθερμικού συστήματος τηλεθέρμανσης ανέρχονταν στα τέλη του 1999 σε περίπου 1200 MWt. Αποτελούν επίσης ιδιαίτερα διαδεδομένες εφαρμογές και στις χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, καθώς και τις Η.Π.Α., Κίνα, Ιαπωνία, Γαλλία, κλπ.

Τα γεωθερμικά συστήματα τηλεθέρμανσης είναι έντασης κεφαλαίου, δηλαδή απαιτούν μεγάλα αρχικά κεφάλαια. Το κύριο κόστος αφορά την αρχική επένδυση για την κατασκευή των γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής, την αγορά των συστημάτων άντλησης και μεταφοράς των ρευστών, την κατασκευή των δικτύων και των σωληνώσεων, την προμήθεια του εξοπλισμού ελέγχου και παρακολούθησης των εγκαταστάσεων, την κατασκευή των σταθμών διανομής και των δεξαμενών αποθήκευσης. Παρόλα αυτά, τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία αφορούν στην ενέργεια που καταναλώνεται για την άντληση των ρευστών, τη συντήρηση του συστήματος και τη διαχείριση της εγκατάστασης, είναι σημαντικά μικρότερα σε σύγκριση με αυτά μιας συμβατικής μονάδας. Ένας κρίσιμος παράγοντας για τον υπολογισμό του αρχικού κόστους του συστήματος είναι η πυκνότητα του θερμικού φορτίου ή, αλλιώς, οι απαιτήσεις σε θέρμανση δια την επιφάνεια που καλύπτει η περιοχή που πρόκειται να θερμανθεί. Η υψηλή θερμική πυκνότητα καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα- σκοπιμότητα του έργου τηλεθέρμανσης, αφού το δίκτυο διανομής απορροφά μεγάλα κεφάλαια.

Κάποια οικονομικά οφέλη θα μπορούσαν να προκύψουν από το συνδυασμό θέρμανσης και ψύξης σε περιοχές όπου οι κλιματικές συνθήκες επιτρέπουν τέτοιες εφαρμογές. Ο συντελεστής φορτίου σε ένα τέτοιο σύστημα ψύξης-θέρμανσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που αντιστοιχεί μόνο στη θέρμανση, και η τιμή της ενεργειακής μονάδας πρέπει να είναι κατά συνέπεια χαμηλότερη (Gudmundsson, 1988).

Η ψύξη χώρων αποτελεί μια αρκετά εφικτή και βιώσιμη επιλογή, στην περίπτωση όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανές απορρόφησης, οι οποίες βρίσκονται εύκολα στο

εμπόριο και η τεχνολογία τους είναι ευρέως γνωστή. Ο κύκλος της απορρόφησης είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας τη θερμότητα έναντι του ηλεκτρισμού. Τα γεωθερμικά ρευστά παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση αυτών των μηχανών, όμως η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες των 105°C.



Σχήμα 1.9. Εγκατάσταση με γεωτρήσεις άντλησης και επαναφοράς υπογείων υδάτων. Το νερό αντλείται από τον υδροφόρο ορίζοντα διέρχεται από την αντλία θερμότητας όπου απορροφά ή αποδίδει θερμότητα και κατόπιν επανεισάγεται στη γη (www.spitia.gr)

Σχήμα 1.10. Εγκατάσταση κλειστού βρόχου (ανακυκλοφορία του ψυκτικού) με κατακόρυφες σπείρες σωληνώσεων. Γίνονται γεωτρήσεις σε μικρά σχετικά βάθη και εισάγονται σωλήνες που αποτελούν το γεωθερμικό εναλλάκτη. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεγάλης εγκατάστασης όπου απαιτείται πολύ μεγάλο μήκος σωληνώσεων και η επιφάνεια του οικοπέδου είναι μικρή (www.spitia.gr)

Σχήμα 1.11. Εγκατάσταση κλειστού βρόχου (ανακυκλοφορία του ψυκτικού) με οριζόντιες σπείρες σωληνώσεων. Ανοίγονται ορύγματα βάθους περίπου 2m ή γίνεται εξολοκλήρου εκσκαφή του χώρου και τοποθετείται ο γεωθερμικός εναλλάκτης (www.spitia.gr)

Ο γεωθερμικός κλιματισμός (θέρμανση και ψύξη) χώρων άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά από τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας (heat pumps). Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την απόληψη και χρήση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου των σωμάτων χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι, τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού (ponds), κλπ. (Σχήμα 1.9-10-11).

Συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας κλειστού κυκλώματος που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος (ground-coupled) και αντλιών επιφανειακού ή επεδάφιου νερού (ground-water) βρίσκονται σήμερα εγκατεστημένα σε 27 χώρες, με συνολική θερμική ισχύ που ανήλθε σε 6.875 MWt κατά το έτος 2000. Η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων βρίσκεται στις ΗΠΑ (4.800 MWt), την Ελβετία (500 MWt), τη Σουηδία (377 MWt), τον Καναδά (360 MWt), τη Γερμανία (344 MWt) και την Αυστρία (228 MWt) (Lund, 2001). Για τη λειτουργία των συστημάτων αυτών χρησιμοποιούνται ρηχοί υδροφόροι ορίζοντες ή εδάφη και υπόγεια πετρώματα, με θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 5-30°C.

Οι αγροτικές εφαρμογές της γεωθερμίας συνίστανται κυρίως στις ανοικτές καλλιέργειες και τη θέρμανση θερμοκηπίων. Το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ανοικτές καλλιέργειες για την άρδυσή τους και/ή τη θέρμανση του εδάφους.

Η πιο συνηθισμένη γεωθερμική εφαρμογή στον αγροτικό τομέα είναι η θέρμανση θερμοκηπίων, η οποία αναπτύχθηκε ιδιαίτερα σε πολλές χώρες. Η εκτός εποχής καλλιέργεια κηπουρικών, οπωρικών και ανθοκομικών προϊόντων ή η ανάπτυξή τους σε περιοχές με μη ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί σήμερα να βασιστεί σε μια ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία. Υπάρχουν ποικίλες λύσεις για την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης των φυτών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση της καλύτερης θερμοκρασίας για το κάθε είδος, στη σωστή ένταση του φωτός, στην ιδανική συγκέντρωση CO₂ μέσα στο θερμοκήπιο, στην κατάλληλη υγρασία του εδάφους και του αέρα και στην κίνηση του αέρα μέσα στα θερμοκήπια.

Η χρήση των γεωθερμικών ρευστών για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά του έξοδα, τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις φτάνουν το 35% του κόστους παραγωγής (οπωρικά, άνθη, διακοσμητικά φυτά και δενδρύλλια).

Η εκτροφή κτηνοτροφικών ειδών και υδρόβιων οργανισμών, όπως ακριβώς και τα φυτά, επωφελούνται σημαντικά από τις άριστες συνθήκες της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, τόσο ως προς την ποιότητα όσο και ως προς την ποσότητα παραγωγής τους. Σε πολλές περιπτώσεις τα γεωθερμικά νερά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ακόμη επικερδέστερα, μέσα από τη συνδυασμένη χρήση τους σε κτηνοτροφικές μονάδες και γεωθερμικά θερμοκήπια. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη θέρμανση μιας μονάδας εκτροφής ζώων είναι περίπου το 50% αυτής που απαιτείται για ένα θερμοκήπιο ίδιας επιφάνειας, οπότε

η κλιμακωτή χρήση των γεωθερμικών ρευστών θεωρείται ενδεδειγμένη. Η εκτροφή ζώων σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας συνεισφέρει στη βελτίωση της υγείας τους, ενώ η χρήση των θερμών ρευστών θα μπορούσε να επεκταθεί στον καθαρισμό και την εξυγίανση των χώρων τους, αλλά και στην ξήρανση των αποβλήτων τους (Barbier and Fanelli, 1977).

Οι υδατοκαλλιέργειες, οι οποίες στην ουσία αποτελούν την ελεγχόμενη εκτροφή υδρόβιων οργανισμών, αποκτούν σήμερα ολοένα και μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της αυξημένης ζήτησής τους στην αγορά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκτροφής των ειδών αυτών είναι πολύ πιο σημαντικός σε σχέση με τα είδη που αναπτύσσονται στην ξηρά (θηλαστικά και πτηνά). Διατηρώντας με τεχνητά μέσα τη θερμοκρασία σε βέλτιστα επίπεδα, καθίσταται δυνατή και η εκτροφή εξωτικών ειδών, η βελτίωση της παραγωγής ή ακόμη και ο διπλασιασμός του αναπαραγωγικού κύκλου σε μερικά είδη (Barbier and Fanelli, 1977).

Τα είδη που κατά παράδοση εκτρέφονται σε τέτοιες μονάδες είναι: κυπρίνος, γατόψαρο, λαβράκια, κέφαλοι, χέλια, σολωμοί, μουρούνες, γαρίδες, αστακοί, καραβίδες, κάβουρες, στρείδια, μύδια, χτένια κλπ. Οι υδατοκαλλιέργειες περιλαμβάνουν επίσης την εκτροφή κροκοδείλων και αλιγατόρων, που αξιοποιούνται συνήθως ως τουριστικό αξιοθέατο αλλά και για την εκμετάλλευση του δέρματός τους, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια πολύ επικερδή δραστηριότητα. Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τα υδρόβια είδη κυμαίνονται κατά βάση μεταξύ 20 και 30°C. Το μέγεθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία των ρευστών, τη θερμοκρασία που απαιτείται στις δεξαμενές εκτροφής και από τις θερμικές απώλειες των τελευταίων.

Η καλλιέργεια της σπιρουλίνας (*Spirulina*) θεωρείται επίσης μια μορφή υδατοκαλλιέργειας. Λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας, αυτό το μονοκυτταρικό, σπειροειδές και γαλάζιο-πράσινο φύκος, συχνά αποκαλείται «υπερτροφή». Επίσης, έχει προταθεί ως λύση στο πρόβλημα της ασιτίας στις φτωχότερες περιοχές του πλανήτη, όμως για την ώρα χαρακτηρίζεται στο εμπόριο απλά ως «συμπλήρωμα διατροφής». Η σπιρουλίνα καλλιεργείται σήμερα σε αρκετές τροπικές και υπο-τροπικές χώρες, σε λίμνες ή τεχνητές δεξαμενές, όπου επικρατούν ιδανικές συνθήκες για τη γρήγορη ανάπτυξή της (μέσα σε ένα ζεστό, αλκαλικό περιβάλλον, πλούσιο σε CO₂). Παρόλα αυτά, σε αρκετές χώρες των εύκρατων ζωνών η γεωθερμική ενέργεια έχει ήδη αξιοποιηθεί επιτυχώς σε τέτοιες υδατοκαλλιέργειες, για την ανάπτυξη της *spirulina* σε ετήσια βάση, παρέχοντας την απαραίτητη θερμότητα αλλά και το CO₂. Ένα τέτοιο πετυχημένο παράδειγμα έχουμε στη Νιγηρία Σερρών.

Τα γεωθερμικά ρευστά, σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό τους εύρος, είτε πρόκειται για ατμό είτε για νερό, μπορούν να αξιοποιηθούν και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως άλλωστε φαίνεται από το διάγραμμα του Lindal (Σχήμα 1.5.). Οι διάφορες δυνατές μορφές αξιοποίησης περιλαμβάνουν θέρμανση κατά τη διεργασία, εξάτμιση, ξήρανση, απόσταξη,

αποστείρωση, πλύσιμο, λιώσιμο πάγων και ανάκτηση αλάτων. Η χρήση της γεωθερμικής θερμότητας κατά τη βιομηχανική επεξεργασία διάφορων προϊόντων εφαρμόζεται σε 19 χώρες (Lund and Freeston, 2001), όπου οι εγκαταστάσεις είναι γενικά πολύ μεγάλες και η κατανάλωση ενέργειας υψηλή. Άλλα συγκεκριμένα παραδείγματα βιομηχανικών εφαρμογών είναι η εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, η παραγωγή χαρτιού, τμημάτων αυτοκινήτων, η ανάκτηση λαδιού, η παστερίωση γάλακτος, η χρήση στη βυρσοδεψία, η χημική ανάκτηση προϊόντων, η παραγωγή με διαχωρισμό του CO₂, η χρήση σε πλυντήρια, η ξήρανση γης διατόμων, η επεξεργασία πολτού και χαρτιού και η παραγωγή βορικών αλάτων και βορικού οξέος. Υπάρχουν επίσης εφαρμογές για χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας για λιώσιμο πάγου και αντιπαγετική προστασία πεζοδρομίων, δρόμων και πλατειών, ως και σχέδια για τη διάλυση της ομίχλης σε κάποια αεροδρόμια. Στην Ιαπωνία λειτουργεί μια μικρή βιομηχανία που χρησιμοποιεί τις λευκαντικές ιδιότητες του υδρόθειου (H₂S) των γεωθερμικών νερών για την παραγωγή πρωτοποριακών και εξαιρετικής ποιότητας υφασμάτων για γυναικεία ρούχα. Στην ίδια χώρα, εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο μια τεχνική για τη βιοτεχνική-βιομηχανική παρασκευή ενός ελαφρού «γεωθερμικού ξύλου», το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για ειδικές κατασκευές.

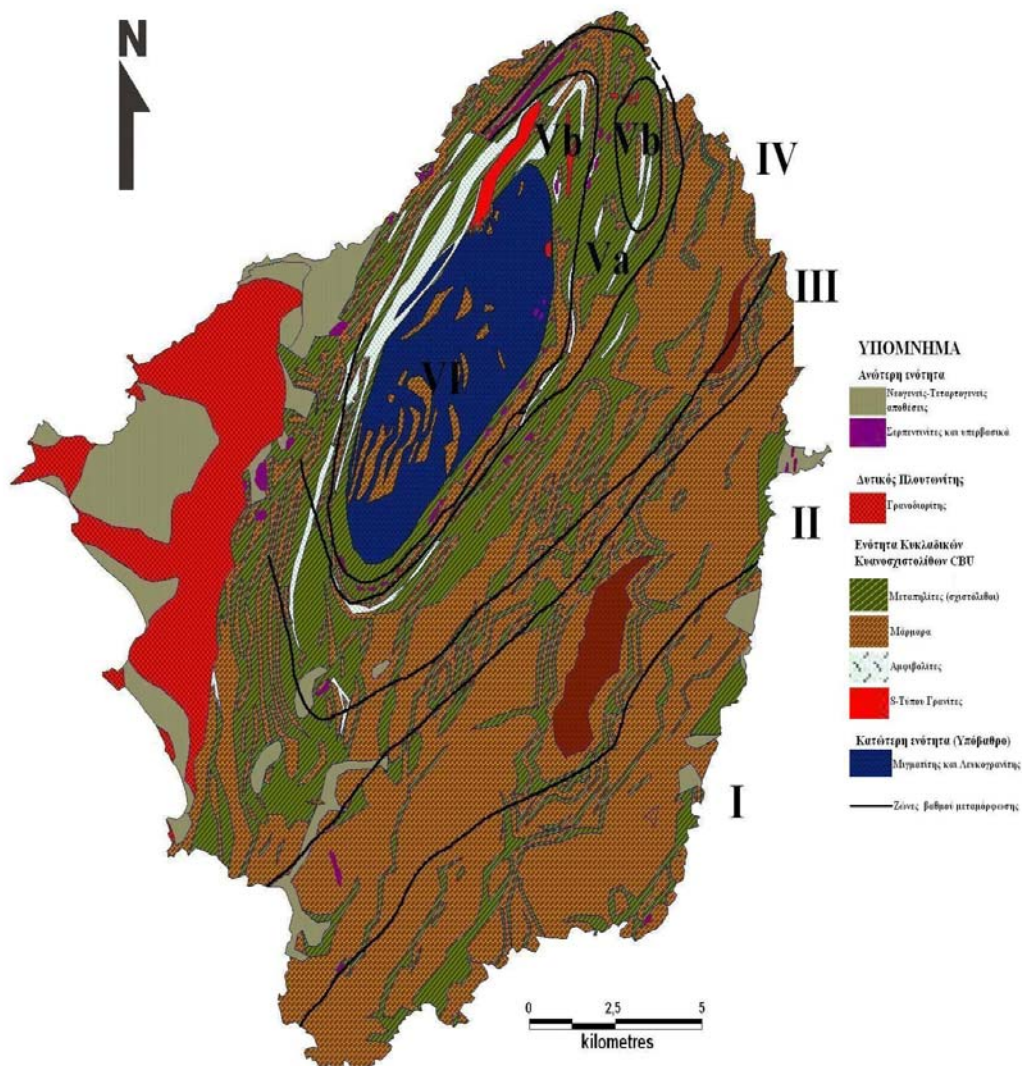
2. Γεωλογία της νήσου Νάξου

2.1 Γεωλογικά Στοιχεία.

Η νήσος Νάξος βρίσκεται περίπου στο μέσο της Αττικοκυκλαδικής μάζας, η οποία ανήκει στο ενδιάμεσο μεταμορφικό πεδίο των Ελληνίδων, και συνίσταται κυρίως από σειρά παραμορφωμένων και μεταμορφωμένων μεσοζωικών ιζημάτων πλατφόρμας, τα οποία περιβάλλουν ένα τεκτονικό, θόλο γνευσιακού υποβάθρου ερκύνιας ηλικίας (Durr, S., Altherr, R., Keller, J., Okrusch, M., & Seidel, E., 1978, Παπανικολάου, Δ. 1988). Έχει ελλειπτικό σχήμα και από γεωμορφολογικής άποψης, η Νάξος χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, κυρίως στο ανατολικό και βόρειο τμήμα της, στο οποίο σημειώνονται βαθιές κοιλάδες που έχουν τεκτονικές καταβολές.

Στη δομή της συμμετέχουν, επίσης, μαγματικά πετρώματα διαφορετικής ηλικίας και παραμορφώσεως, μειοκαινικά μολασσικά ιζήματα και πυριγενή πετρώματα, καθώς και νεότερα, κυρίως χερσαία, πλειοκαινικά και πλειστοκαινικά ιζήματα, το υλικό των οποίων προέρχεται κυρίως από τη διάβρωση του τεκτονικού θόλου που καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της Νάξου (Jansen, J., 1977) (Σχήμα 2.1.). Δεν λείπουν φυσικά και οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις.

Τα γεωλογικά στοιχεία που παρατίθενται προέρχονται από την υπάρχουσα πλούσια βιβλιογραφία και αναφέρονται γιατί μας βοήθησαν στην κατανόηση της γεωθερμικής κατάστασης του νησιού.



Σχήμα 2.1. Γεωλογικός Χάρτης της Νάξου (Jansen et al. 1977, Feenstra 1985). Οι ζώνες βαθμού μεταμόρφωσης είναι οι εξής: I. Ζώνη Διασπόρου-Κορουνδίου, II+III. Ζώνη Κορουνδίου-Χλωριτοειδούς IV. Ζώνη Κορουνδίου-Σταυρόλιθου, V_a+V_b . Ζώνη Κορουνδίου -Πράσινου Σπινελίου.

Αναλυτικότερα η Νάξος μπορεί να χωριστεί σε τρεις γεωλογικές ενότητες :

- α) ένα Σύμπλεγμα Μεταμορφωμένου Πυρήνα (Metamorphic Core Complex MCC)
- β) ένα γρανοδιορίτη ο οποίος διεισδύει στο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα κατά το Α.Μειόκαινο («δυτικός πλουτωνίτης» της Νάξου)
- γ) μια μικρότερη εμφάνιση μη διαφοροποιημένων πετρωμάτων, κυρίως μη μεταμορφωμένα ιζήματα και πετρώματα της οφειολιθικής ακολουθίας σε επαφή με το γρανοδιορίτη και το μεταμορφωμένο υπόβαθρο (ή **Ενότητα μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων**).

2.2 Εξέλιξη της Μεταμόρφωσης.

Σύμφωνα με τον Jansen et al. (1977) τουλάχιστον 4 διαδοχικά αλπικά γεγονότα μεταμόρφωσης έχουν επηρεάσει τη Νάξο. Τα δυο πρώτα (**M₁** και **M₂**) είναι πιο εκτεταμένα γενικότερα στις Κυκλάδες (Van der Maar and Jansen, 1983). Τα άλλα δυο, (**M₃** και **M₄**), γεγονότα μεταμόρφωσης παρουσιάζουν τοπική σημασία.

Η επίδραση του **M₁** γεγονότος μεταμόρφωσης (45 ± 5 Ma) (Μέσο Ηώκαινο) (Andriessen et al. (1979) and Wijbrans & McDougall (1988)) που χαρακτηρίζεται από υψηλές πιέσεις 7-9 Kbar και χαμηλές θερμοκρασίες 400-480°C (μεταμόρφωση γλαυκοφανιτικής φάσης) έχει διατηρηθεί πολύ καλά στην ορυκτολογία των πετρωμάτων που βρίσκονται στο ΝΑ τμήμα του νησιού. Στην περιοχή αυτή στις ζώνες I-II (Σχήμα 2.1) οι συγκεντρώσεις ορυκτών που φέρουν γλαυκοφανή είναι συχνές στα πηλικά και μεταφαιστειακά πετρώματα. Η **M₁** φάση παρουσιάζει περιοχικό χαρακτήρα στο Κυκλαδικό σύμπλεγμα (Van der Maar and Jansen, 1983) και επηρέασε τη Νάξο στο σύνολό της.

Το κύριο γεγονός μεταμόρφωσης που επηρέασε τη Νάξο, **M₂**, σχημάτισε πετρώματα της φάσης Barrow και πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Τα περισσότερα δεδομένα χρονολογούν τη φάση χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (**M_{2a}**) στα 25 ± 5 εκ χρόνια (ζώνες II και III), ενώ τη φάση υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης (**M_{2b}**) στα 15 ± 5 εκ χρόνια πριν (ζώνες IV μέχρι VI) (Altherr et al., 1982; Andriessen et al., 1979; Wijbrans & McDougall, 1988; Andriessen, 1991; Keay et al., 2001). Σε αντίθεση με τα περισσότερα νησιά των Κυκλάδων, η **M₂** Μειοκαινική μεταμόρφωση στη Νάξο άγγιξε συνθήκες ανάτηξης ($670 \pm 50^\circ\text{C}$ και 5-7 Kbar) (Jansen and Schuiling, 1976; Buick and Holland, 1989) και δημιούργησε ένα μιγματικό θόλο δομής κρεμμυδιού στο κεντρικό τμήμα του νησιού. Από αυτόν τον πυρήνα υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης προς τα έξω, οι συνθήκες μεταμόρφωσης υποβαθμίζονται σταδιακά από την αμφιβολιτική φάση στη σχιστολιθική. Συνεπώς η μεταμόρφωση χαρακτηρίζεται από ομόκεντρες ζώνες μειούμενου βαθμού μεταμόρφωσης γύρω από τον μιγματικό πυρήνα. Οι Jansen και Schuiling (1976) διέκριναν 7 πρόδρομες μεταμορφικές ζώνες κυρίως αναφερόμενες στις συναθροίσεις ορυκτών στα πηλικά πετρώματα. Οι ζώνες πήραν το όνομά τους από τα χαρακτηριστικά ορυκτά ή από τις συναθροίσεις ορυκτών. Οι ζώνες φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

Κατά τα πρώτα στάδια της μιγματιποίησης ένας αριθμός γρανιτών **S** τύπου (συντεκτονικοί) διείσδυσε στο βόρειο τμήμα του νησιού 11-15 εκ χρόνια πριν (Keay et al., 2001). Η μεταμόρφωση υψηλής θερμοκρασίας και η διείσδυση των γρανιτών **S** τύπου ήταν σύγχρονες με την πλαστική εφελκυστική μεταμόρφωση, πάχους $>1\text{km}$ που προκλήθηκε στην ρηγματογενή ζώνη μικρής κλίσης της Μουτσούνας (Lister and Forster, 1996)(Σχήμα 2.5).

Κατά την περίοδο 14-12 Ma (Μειόκαινο) (Wijbrans & McDougall, 1988; Keay et al., 2001), ένα τεράστιο γρανοδιοριτικό σώμα διείσδυσε στο δυτικό τμήμα του νησιού (Andriessen et al., 1979). Αποτελεί τμήμα του μαγματικού τόξου της Ελληνική ζώνη υποβύθισης (Άνω Μειόκαινο), η οποία οπισθοχωρεί προς τα νότια, και διείσδυσε συγκινηματικά μέσα στο υποκείμενο τμήμα του συστήματος εφελκυστικής ρηξιγενούς παραμόρφωσης της Μουτσούνας (Buick, 1991). Αυτός ο γρανοδιορίτης προκάλεσε μεταμόρφωση επαφής (M_3) στο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα (CBU) σε μια ζώνη πάχους 1km μέσα από την επαφή. Η μεταμόρφωση επαφής ανήκει στην φάση ανδαλουσίτη-σιλλιμανίτη ($p \sim 2\text{kb}$).

Το M_4 γεγονός μεταμόρφωσης ($\sim 10\text{Ma}$ (Feenstra, A., 1985)) χαρακτηρίστηκε από οπισθοδρομούσα μεταμόρφωση ($p \sim 1\text{kb}$, $T = 250\text{-}350^\circ\text{C}$) και παρουσίασε έντονη εμφάνιση στο ΒΑ τμήμα του νησιού.

Ο Lister et al. (1984) θεώρησε ότι η Νάξος είναι ένα **σύμπλεγμα μεταμορφωμένου πυρήνα** (metamorphic core complex MCC) τύπου Κορδιλιέρας, λέγοντας ότι τα μη διαφοροποιημένα πετρώματα αποτελούν τμήματα μιας διαταραγμένης μη μεταμορφωμένης ανώτερης πλάκας από την οποία το MCC βγήκε προς τα πάνω μέσω μιας Α. Αλπικής εφελκυστικής τεκτονικής.

Και οι δύο προαναφερόμενες τεκτονικές διαδικασίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν οπισθοδρομούσα μεταμόρφωση κυρίως στα ανώτερα τμήματα της ζώνης επώθησης.

2.3 Λιθοστρωματογραφία.

2.3.1 α) Σύμπλεγμα Μεταμορφωμένου Πυρήνα (Metamorphic Core Complex MCC).

Το Σύμπλεγμα Μεταμορφωμένου Πυρήνα (Metamorphic Core Complex MCC) της Νάξου είναι ένα μεταμορφικό σύμπλεγμα το οποίο περιέχει πολλές χημικά διαφορετικές λιθολογίες (Jansen & Schuiling, 1976) και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού. Μπορεί να χωριστεί σε δυο επιμέρους ενότητες:

- i. μια **Μεταϊζηματογενή Ακολουθία (Ενότητα Κυκλαδικών Κυανοσχιστόλιθων CBU)** που αποτελεί ένα Αλπικό Σύμπλεγμα Περιοχικής Μεταμόρφωσης και
- ii. ένα **Μιγματιτικό - Γνευσιακό πυρήνα** ερκύνιας ηλικίας.

i. Μεταϊζηματογενής Ακολουθία.

Το μεγαλύτερο τμήμα της Νάξου, και κυρίως το ανατολικό και νότιο, καταλαμβάνεται από σειρά μεταμορφωμένων μεσοζωικών ιζημάτων πλατφόρμας, τα οποία συμμετείχαν στην αλπική ορογένεση σε περιοχή σύγκλισης λιθοσφαιρικών πλακών. Η μεταϊζηματογενής αυτή ακολουθία αποτελείται κυρίως από ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα και μεταπηλίτες (σχιστόλιθοι) με εμφανίσεις αμφιβολιτών και υπερβασικών (υπερμαφικών) πετρωμάτων.

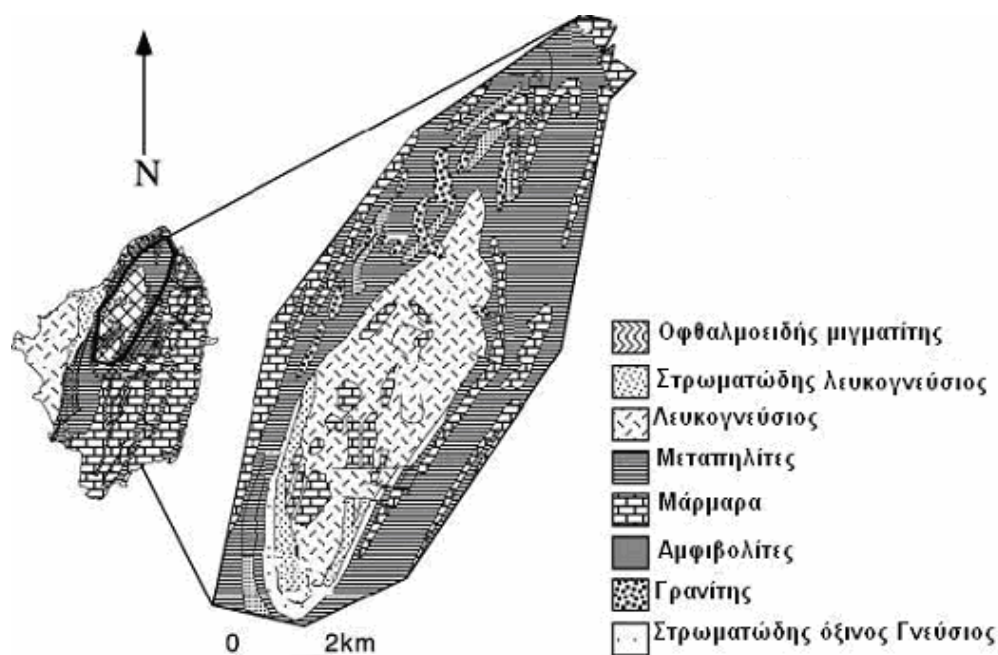
Μάρμαρα : Στα στρωματογραφικώς κατώτερα μέρη της μεταμορφωμένης σειράς, τα περισσότερα μάρμαρα είναι αδροκρυσταλλικά και λευκά. Τα δολομιτικά μάρμαρα σπανίζουν στους υψηλότερους βαθμούς μεταμόρφωσης. Οι δολομίτες είναι συνήθως συμπαγείς, χωρίς σαφείς ενστρώσεις και είναι κιτρινόλευκοι. Τα μάρμαρα περιέχουν ένστρώσεις ασβεστιτικών σχιστόλιθων, χλωριτοσερικιτικών σχιστόλιθων, ακτινο-χλωρο-επιδοτιτικών και γλαυκοφανιτικών σχιστόλιθων παρουσιάζοντας έντονη καρτικοποίηση η οποία γίνεται εντονότερη κοντά στις παράκτιες περιοχές. Οι ενότητες των μαρμάρων που τοποθετούνται μέσα στη μεταϊζηματογενή ακολουθία εμπεριέχουν και φακούς μεταμορφωμένου βωξίτη (σμύριδας).

Μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι (μεταπηλίτες): οι περισσότεροι μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι και γνεύσιοι φαίνεται να έχουν πηλτική σύσταση και απαντώνται σχιστόλιθοι με ανθρακικά υλικά, χαλαζίτες και σχιστόλιθοι με αμφιβόλους. Κοντά στο μιγματιτικό θόλο απαντώνται άφθονες, απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες είναι συχνές καθώς επίσης και διασταυρούμενες υδροθερμικές φλέβες γαλακτόχρωου χαλάζια.

Αμφιβολίτες: ζωνώδεις αμφιβολίτες εμφανίζονται ως παρεμβολές στην σειρά των σχιστόλιθων-μαρμάρων σε όλη την κεντρική Νάξο. Συνήθως φαίνεται ότι συνδέονται με στρώματα μαρμάρου.

ii. Ο Μιγματιτικός - Γνευσιακός Πυρήνας

Το κεντρικό τμήμα της Νάξου καταλαμβάνει ένας επιμήκης, λίαν διαβρωμένος τεκτονικός θόλος, διεύθυνσης περίπου B15A, τον πυρήνα του οποίου (μιγματιτικός Jansen and Schuiling, 1976; Buick, 1991a ή γνευσιακός πυρήνας G. Pe-Piper, C. N. Kotopoulis, D. J. W. Piper, 1997) αποτελούν ορθογνεύσιοι, μιγματίτες και νησίδες αδροκρυσταλλικών μαρμάρων μεταπηλιτών και αμφιβολιτών (Sue Keay, Gordon Lister, Ian Buick, 2001) (Σχήμα 2.2). Τα μάρμαρα που εγκλείονται στο μιγματίτη δεν θεωρούνται τμήμα του υποβάθρου αλλά ότι τοποθετήθηκαν στο μιγματιτικό πυρήνα κατά τη M_2 μεταμόρφωση.



Σχήμα 2.2. Γεωλογία του γνευσιακού-μιγματιτικού πυρήνα του συστήματος μεταμορφωμένου πυρήνα μιγματιτικού-γνευσιακού πυρήνα (metamorphic core complex) της Νάξου (Buick, 1988).

Η ζώνη του πυρήνα (του λευκογρανιτικού πυρήνα κατά Buick, 1988) χωρίζεται από τα πετρώματα χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης (μεταϊζηματογενή ακολουθία) μέσω μιας μεγάλης ζώνης πλαστικής διάτμησης η οποία δημιουργεί ένα χελώνιο (carapace) το οποίο περιβάλλει τον τεκτονικό θόλο της Νάξου. Πάνω από αυτή τη διαχωριστική ζώνη πλαστικής διάτμησης τοποθετείται η ακολουθία Μεσοζωικών μαρμάρων (τα οποία φέρουν κατά τόπους μεταβωξίτες), σχιστόλιθων (κυρίως μεταπηλίτες) υπερβασικών και μεταηφαιστειακών πετρωμάτων της μεταϊζηματογενούς ακολουθίας (Durr et al., 1978).

S-Τύπου Γρανίτες (Βόρειος Γρανίτης και Φλεβικά).

Στο βορειότερο τμήμα του νησιού, μέσα στο γνευσιακό – μιγματιτικό πυρήνα, ο γνεύσιος έχει υποστεί διείσδυση από νεώτερα γρανιτικά σώματα με ξενολίθους ψαμμίτη και πηλίτη. Πηγματίτες και απλίτες συναντώνται τόσο στον πυρήνα όσο και στα γύρω μεταϊζηματογενή πετρώματα και κάποιοι από αυτούς παρουσιάζουν μεγάλη συνάφεια με τα μεγαλύτερα λευκογρανιτικά σώματα. που είναι συνκινηματικά (συντεκτονικά) (Jansen and Schuiling, 1976; Jansen, 1977).

2.3.2 Ο Γρανοδιוריτης (Δυτικός Πλουτωνίτης) της Νάξου.

Στο δυτικό τμήμα της νήσου Νάξου κάνουν την εμφάνισή τους I-τύπου κεροσιλβικά-βιοτιτικά πετρώματα που σύμφωνα με την ονοματολογία κατά Streckeisen & LeMaitre (1979) προσδιορίζονται γεωχημικά ως τοναλίτες, γρανοδιוריτές και γρανοδιוריτικοί γρανίτες στους οποίους παρεμβάλλονται νεώτεροι λευκογρανίτες (Pe-Piper, 2000) του Μέσου Μειοκαίνου (Henjes-Kunst et al. 1988). Αυτή η μάζα ονομάστηκε από τους Pe-Piper, Kotopoulou & Piper (1997) ως «δυτικός πλουτωνίτης» για να διαφοροποιείται από τον Ερκύνιας ηλικίας πλουτωνίτη ο οποίος βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του νησιού.

Ο Μειοκαινικός δυτικός πλουτωνίτης διεισδύει σε μεταμορφωμένα πετρώματα πρασινοσχιστολιθικής έως αμφιβολιτικής φάσης (στη Μεταϊζηματογενή Ακολουθία) και βρίσκεται σε επαφή με μη μεταμορφωμένους οφειολίθους, Ηωκαινικούς ασβεστόλιθους και ιζήματα θαλάσσιας απόθεσης μικρού βάθους ηλικίας Κάτω Μειόκαινου- Άνω Πλειοκαίνου (Jansen, 1973; Roesler, 1978). Η ηλικία διείσδυσης του δυτικού πλουτωνίτη θεωρείται μεγαλύτερη των 12.3 ± 0.4 Ma, (Pe-Piper, Kotopoulou & Piper, 1997) και μικρότερη των 13.6 ± 0.2 (Wijbrans & McDougall, 1988).

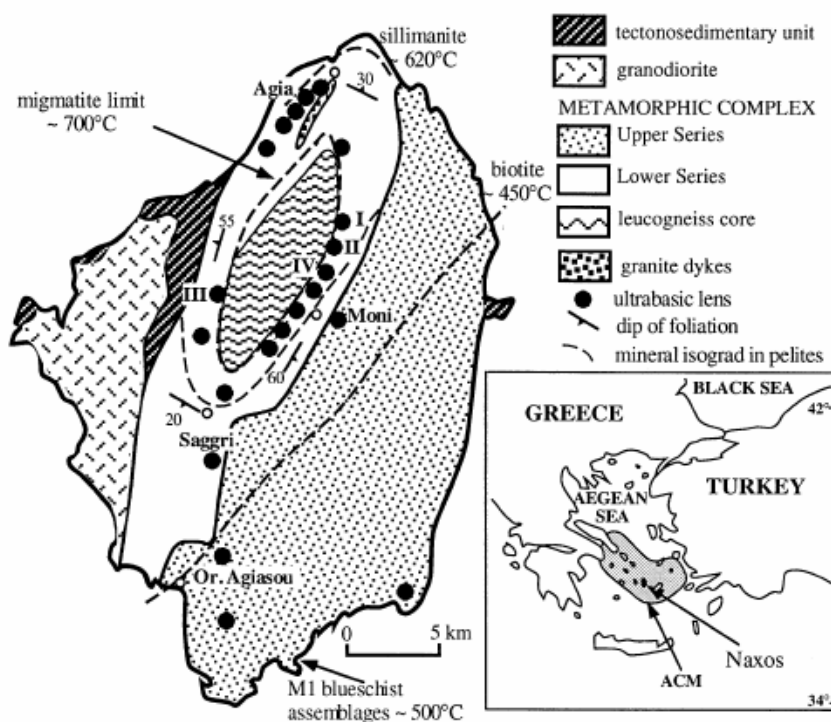
2.3.3 Ενότητα μη Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων.

Η Ενότητα μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων συνίσταται από αποθέσεις και ιζηματογενή πετρώματα όπως κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, μάργες και από υπερβασικά πετρώματα όπως σερπεντινίτες, διάβασες και γάββρους (Jansen, J. 1977).

α. Υπερβασικά πετρώματα.

Τα υπερβασικά αυτά πετρώματα μπορούν να χωριστούν σε 2 κύριες ομάδες: τα πετρώματα των 2 ανώτερων υπερβασικών οριζόντων (Αγιασός, Σαγκρί, Μονή) υπέστησαν σερπεντινίωση σε χαμηλές θερμοκρασίες πριν από την έναρξη της M_2 μεταμόρφωσης, ενώ οι περιδοτίτες οι οποίοι σχετίζονται με τον μιγματιτικό πυρήνα διατηρούν ενδείξεις ενός γεγονότος ισορροπίας που έλαβε χώρα στο μανδύα. Αυτή η ανομοιότητα φανερώνει μια

διαφορά προέλευσης και τρόπου τοποθέτησης των δυο αυτών ομάδων υπερβασικών πετρωμάτων.



Σχήμα 2.3. Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Νάξου και θέσεις των υπερβασικών πετρωμάτων (μαύρες κουκκίδες) (Katzir et al. 1999).

Η παρουσία νεώτερης σερπεντινικής υφής στα υπερβασικά πετρώματα των δυο ανώτερων οριζόντων, η οποία υπερκαλύφθηκε από την ορυκτολογία και τις δομές που δημιούργησε η M_2 , φανερώνει ότι αρχικά αποσθρώθηκαν και ενυδατώθηκαν σε θαλάσσιο περιβάλλον πιθανότατα κατά τη διάρκεια της επώθησης, πριν από την Αλπική μεταμόρφωση.

Το οφειολιθικό, μαζί με το ιζηματογενές κάλυμμά του, υπέρκειται τεκτονικά ενός απότομου, σχεδόν κάθετου ρήγματος στην επαφή του μεταμορφωμένου συμπλέγματος και του Άνω – Μέσο Μειοκαινικού γρανοδιορίτη στην δυτική πλευρά της Νάξου. (Σχήμα 2.4.).

β. Νεογενείς αποθέσεις.

Η ενότητα των αλλόχθονων πετρωμάτων ή Ανώτερη Ενότητα αποτελείται από ένα μείγμα (mélange) διαταραγμένων ιζημάτων ρηχής θάλασσας του Μειοκαίνου – Πλειοκαίνου (Jansen, 1973; Angelier et al., 1982) τα οποία πιθανώς αποτέθηκαν ως συνεφελκυστικά ιζήματα (Urai et al., 1990; Gautier et al., 1993). Τα κροκαλοπαγή του Ανώτερου Πλειόκαινου (Roesler, 1978) περιέχουν χάλικες οι οποίες προέρχονται από υλικό των κατώτερων στρωμάτων. Τα κροκαλοπαγή αυτά αποτέθηκαν στις πλευρές του θόλου κατά τη διάρκεια της

αποκάλυψης του λόγω εφελκυσμού (Lister et al., 1984; Buick, 1991b; Gautier et al., 1993; Keay and Lister, 1996a,b).

Ειδικότερα, η πετρολογική ανάλυση των προαναφερθέντων χαλίκων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι ενότητες από τις οποίες προήλθαν, αποτελούσαν τμήμα μιας ακολουθίας πετρωμάτων παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου (εξωτερική Πελαγονική ζώνη) και τμήμα μιας ακολουθίας οφειολιθικών πετρωμάτων αποτελούμενη από κερατολίθους και ασβεστόλιθους βαθιάς θάλασσας οι οποίοι αποτέθηκαν πάνω σε στρώμα βασάλτη (ζώνη Πίνδου). Σε μικρότερη ποσότητα εμφανίζονται πετρώματα του Παλαιογενούς, τα οποία συμπεριλαμβάνουν ανθρακικά ρηχής θάλασσας σε ανάμειξη με ασβεστοψαμμιτικά, πυριτιοκλαστικά συστατικά και συστατικά ηφαιστειακού τόξου, έχοντας δομή που ομοιάζει με φλύσχη.

Τα μειοκαινικά ιζήματα δεν περιέχουν στοιχεία του μεταμορφωμένου συμπλέγματος της Νάξου, σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα ιζήματα του Πλειοκαίνου. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι τα μειοκαινικά ιζήματα αποτέθηκαν όσο το μεταμορφικό σύμπλεγμα ήταν ακόμη κάτω από την επιφάνεια.

Η ακολουθία ιζημάτων του Μειοκαίνου έχει αποτεθεί πάνω σε ένα οφειολιθικό κάλυμμα. Το κάλυμμα αυτό τοποθετήθηκε κοντά στα όρια του συμπλέγματος μεταμορφωμένου πυρήνα ως εφελκυστικό αλλόχθονο (extensional allochthon) κατά τον εφελκυσμό μεγάλης κλίμακας του ευρύτερου Αιγιακού χώρου.

Οι νεότερες τεταρτογενείς αποθέσεις, εμφανίζονται στα παράλια του νησιού και κατά κύριο λόγο στο δυτικό του μέρος, αποτελούνται από αλλούβια ιζήματα (παράκτιες πεδιάδες με άμμο, ιλύς και ενίοτε χάλικες), λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις (συνήθως αμμώδεις, ενίοτε με στρώματα πλούσια σε κίσσηρη), θίνες και συγκολλημένα αλλουβιακά ριπίδια (αδιαβάθμητες κυρίως συγκεντρώσεις τεμαχών μαρμάρων, σχιστόλιθων, γνευσίων, μιγματίτη και αμφιβολίτη με αμμώδη συνδετική ύλη).

Κεντρικότερα στο νησί εμφανίζονται συγκολλημένα κορήματα κοιλάδων και κλιτύων (τεμάχη, κυρίως μαρμάρου, σχιστόλιθου και σμύριδας, με ερυθροφαιό ανθρακικό συνδετικό υλικό) και κροκαλοπαγή (πολύ αδρομερή, με στρώσεις χονδρόκοκκων ψαμμιτών) πλειστοκαινικής ηλικίας.

2.4 Τεκτονική της Νήσου Νάξου

Η γενικότερη εξέταση της σύνθετης τεκτονικής της νήσου Νάξου που βασίζεται στην πλούσια σχετική βιβλιογραφία έχει ενδιαφέρον επίσης για την κατανόηση της γεωθερμικής κατάστασης και γι' αυτό αναφέρεται με συντομία.

2.4.1 Το Σύμπλεγμα Μεταμορφωμένου Πυρήνα της Νήσου Νάξου.

Το κύριο τεκτονικό χαρακτηριστικό της Νάξου είναι ένα Σύμπλεγμα Μεταμορφωμένου πυρήνα (Metamorphic Core Complex MCC), στο οποίο το ηπειρωτικό υπόβαθρο, πιθανώς Βαρισκίου ηλικίας (Altherr et al., 1982; Strumpf, 1997; Reischmann, 1998) καλύπτεται από ένα μέσου-υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης κάλυμμα, το οποίο όπως έχει προαναφερθεί αποτελείται από ανθρακικά, μικροκρυσταλλικά πυριτικά και τοφικά πετρώματα (Jacobshagen, 1986). Μετά από την Ηωκαινική συμπίεση το σύμπλεγμα υπέστη μεταμόρφωση τύπου Barrow η οποία κλιμακώθηκε πριν 16 Ma (John and Howard, 1995).

Ο πυρήνας του MCC της Νάξου (Jansen, 1973; Buick 1988) είναι μια από τις ελάχιστες περιοχές οι οποίες υπέστησαν μεταμόρφωση υψηλής θερμοκρασίας πριν αλλά και κατά τη διάρκεια της Ολιγοκαινικής-Μειοκαινικής εφελκυστικής τεκτονικής την οποία ακολούθησε έξοδος στην επιφάνεια του συμπλέγματος πυρήνα (Lister et al., 1984; Buick, 1991a; Urai et al., 1990; Gautier et al., 1993).

Οι Lister et al. (1984), Wijbrans and McDougall (1988) and Andriessen (1991) είχαν προτείνει ότι ο θόλος της Νάξου δεν προέκυψε από την τοπική ανοδική κίνηση ενός μιγματιτικού θόλου (Jansen and Schuiling, 1976) αλλά σχηματίστηκε πάνω από ένα διεισδύον θερμό μαγματικό σώμα που προκάλεσε ένα θερμικό γεγονός μικρής διάρκειας (0.1–3 Ma) με ταυτόχρονη μεταφορά της θερμότητας μέσω υγρών (Wijbrans and McDougall, 1988) γεγονός το οποίο θα καθιστούσε δυνατή την ερμηνεία ενός τόσο έντονου θερμικού αποτελέσματος.

Τα θερμικά γεγονότα τα οποία ήταν υπεύθυνα για την τήξη και την μεταμόρφωση πετρωμάτων στη Νάξο είναι δυνατόν να προεκκλήθησαν από την κίνηση του συστήματος του Ελληνικού τόξου προς τα Νότια με την βοήθεια ενός μηχανισμού κάμψης του υποβυθισμένου τμήματος της Αφρικανικής πλάκας προς τα πίσω (slab roll-back mechanism) (Altherr et al., 1988; Meulenkamp et al., 1988; Wijbrans and McDougall, 1988).

Η δεύτερη περίοδος μαγματισμού μπορεί να συμπεριέλαβε διείσδυση μαφικών τηγμάτων μέσα στον κατώτερο φλοιό και μερική τήξη. Παρόλα αυτά η συσσώρευση μεγάλων όγκων μάγματος προκάλεσε σε πρώτο στάδιο την διείσδυση γρανιτοειδών μέσα στον πυρήνα και σε δεύτερη φάση την διείσδυση του Δυτικού πλουτωνίτη σε μικρό βάθος (~3 kbar). Μέχρι αυτό το χρονικό σημείο η έξοδος του μιγματιτικού πυρήνα είχε σχεδόν ολοκληρωθεί. Η τελική έξοδος του MCC ολοκληρώθηκε με το σχηματισμό ρηγμάτων αποκόλλησης τα οποία άρχισαν να ενεργούν στα ~10 Ma, και οδήγησαν στην αποκάλυψη του θόλου στα 8 Ma.

2.4.2 Τεκτονική

Τόσο ο Hecht (1979) όσο και οι Bonneau et al. (1978) κατέληξαν ότι η πρωτοαλπική τεκτονική περίοδος στη Νάξο χαρακτηρίστηκε από έντονη πτύχωση οριζόντιων πτυχών και επώθηση (D1 φάση). Οι δομές αυτές του κύριου τεκτονικού γεγονότος, έχουν μέγεθος μερικών χιλιομέτρων και οι άξονες των πτυχών έχουν διεύθυνση B-BBA. Έκτός από την D1 ο Bonneau et al. (1978) διέκρινε και κάποια άλλες μικρότερης έντασης τεκτονικές φάσεις. Μια φάση εξ αυτών D2 δημιούργησε πιο ανοιχτές πτυχές. Οι D2 δομές φαίνονται καθαρά στο γεωλογικό χάρτη του Jansen (1973). Η πτύχωση στη Νάξο προηγήθηκε του M₂ θερμικού γεγονότος.

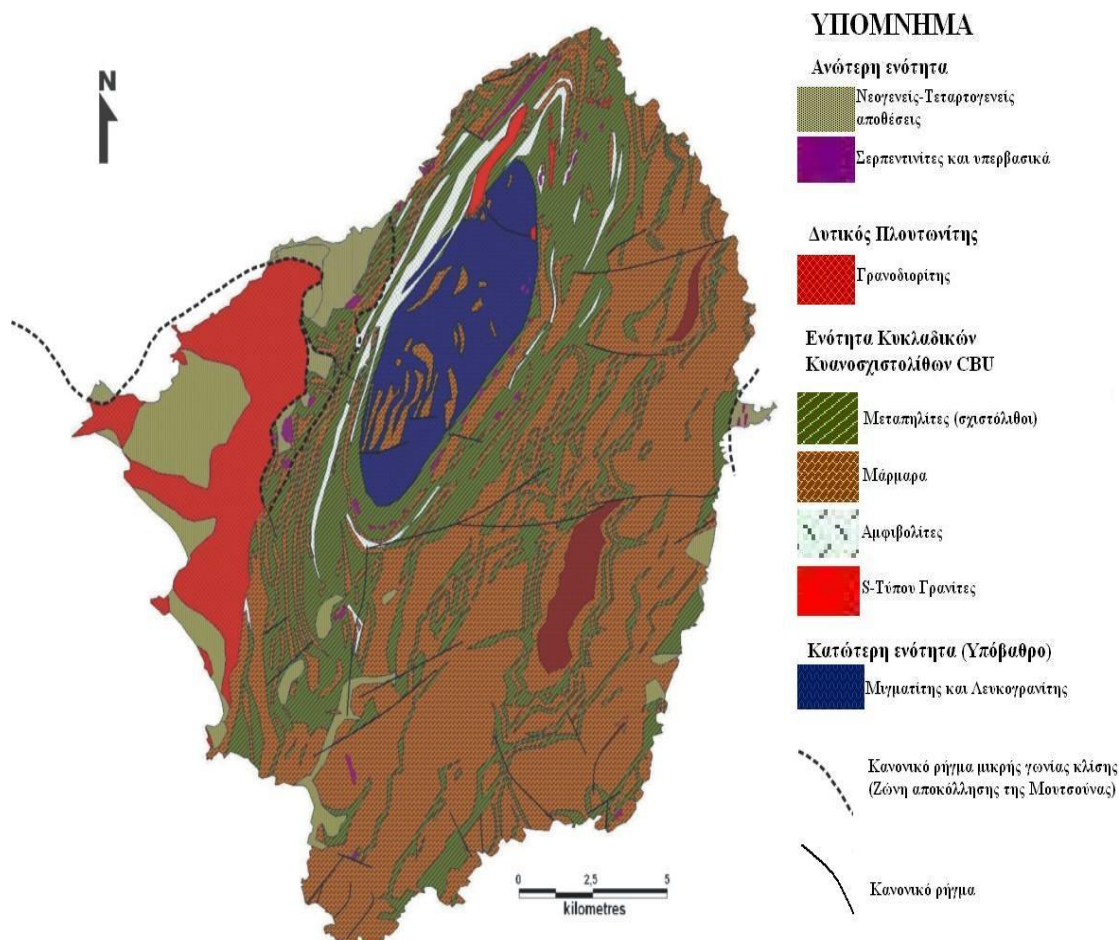
Η γεωδυναμική εξέλιξη του Α.Μειοκαίνου στη Νάξο πραγματοποιήθηκε με γρήγορη ανύψωση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Andriessen et al., 1979; Altherr et al., 1982). Οι Lister et al. (1984) υπέθεσαν ότι αυτή η κίνηση προκλήθηκε από εφελκυσμό του φλοιού και θεώρησαν ότι η B-BBA γράμμωση στο νησί έχει τέτοια εξάπλωση λόγω του υποπαράλληλου σε αυτή εφελκυσμού, ο οποίος προκάλεσε και την κύρια ζώνη διάτμησης μικρής κλίσης κατά μήκος της οποίας το σύμπλεγμα κινήθηκε άνωθεν.

Παρακάτω γίνεται αναλυτικότερη αναφορά στη θραυστιγενή και πλαστική παραμόρφωση της Νάξου.

2.4.2.1 Θραυστιγενής Παραμόρφωση

Στη Νάξο παρατηρούνται διάφορες γενεές ρηγμάτων, η δημιουργία των οποίων οφείλεται στις μεταορογενετικές κινήσεις σε εφελκυστικά πεδία. Τα ρήγματα αυτά ταξινομούνται ως:

- Κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας, τα οποία είναι υπεύθυνα για την τοποθέτηση των λειψάνων της τεκτονοϊζηματογενούς σειράς (αλλόχθονης σειράς) πάνω στον γρανοδιορίτη και στο μεταμορφωμένο σύμπλεγμα.
- Κανονικά ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ με οριζόντια συνιστώσα, τα οποία ενδεχομένως έχουν σχέση με το τελευταίο στάδιο της ανύψωσης του μιγματιτικού θόλου (Μειόκαινο).
- Κανονικά ρήγματα του Πλειόκαινου και του Τεταρτογενούς, διαφόρων διευθύνσεων (Buick, I., 1988, Jansen, J., 1977) (Σχήμα 2.4.).



Σχήμα 2.4. Γεωλογικός-τεκτονικός Χάρτης της Νήσου Νάξου (Jansen et al. 1977, Brichau, 2004)

Στην διατριβή (τελευταία σελίδα) επισυνάπτεται σε μεγαλύτερες διαστάσεις ο γεωλογικός-τεκτονικός χάρτης της νήσου Νάξου και έχουν χαραχθεί 3 γεωλογικές τομές, με σκοπό την πληρέστερη κατανόηση της δομής του νησιού.

2.4.2.2 Πλαστική Παραμόρφωση

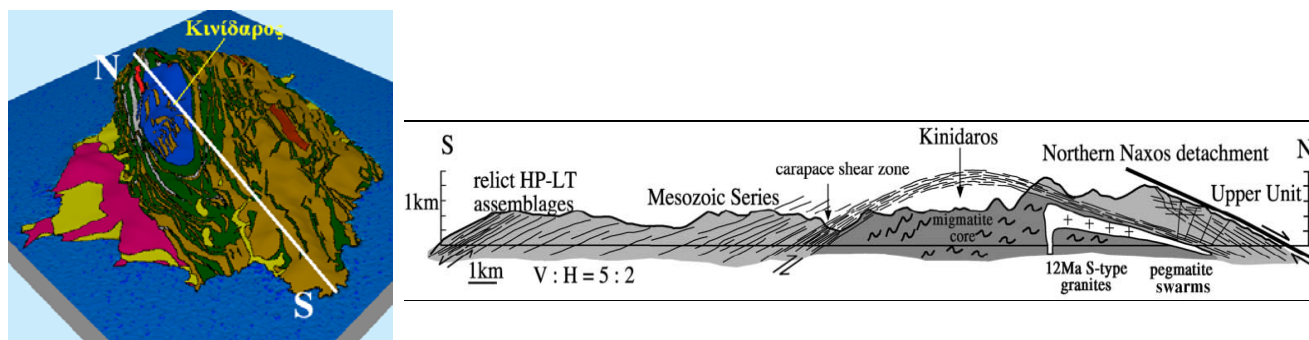
Πτυχές

Από το Ηώκαινο έως σήμερα, έχουν παρατηρηθεί στη Νάξο τουλάχιστον 3 γενεές πτυχών (F_1 ; F_2 , F_3). Η πρώτη γενεά (F_1) αφορά σε ισοκλινείς πτυχές, οι οποίες σχηματίστηκαν πριν από την κορύφωση της M_2 μεταμόρφωσης. Η δεύτερη γενεά (F_2) αφορά επίσης σε ισοκλινείς πτυχές και θεωρείται σύγχρονη με την κορύφωση της M_2 μεταμόρφωσης. Η τρίτη γενεά (F_3) αφορά σε όρθιες πτυχές μεγάλης κλίμακας, οι οποίες σχηματίστηκαν μετά τη M_2 μεταμόρφωση και των οποίων η δημιουργία έχει αποδοθεί σε πεδίο συμπίεσης διεύθυνσης Α-Δ (Buick, I., 1991. Buick, I., 1988. Hecht, J., 1979. Jansen, J., 1977. Lister, G., Foster, G., 1996.).

Ζώνες Διατμητικής Ολίσθησης

Έχουν αναγνωριστεί 2 μεγάλες ζώνες διατμητικής ολίσθησης (εύρους μεγαλύτερου από 1 Km).

Η πρώτη θεωρείται εφελκυστικού χαρακτήρα μικρής γωνίας, με διεύθυνση BBA, η οποία περιβάλλει ως κέλυφος (carapace) τον μιγματιτικό πυρήνα (Σχήμα 2.5.). Διήρκεσε και πέραν των υψηλών συνθηκών μεταμόρφωσης, έχει δε πτυχωθεί λόγω δράσης του πεδίου συμπίεσης διεύθυνσης A-Δ (πτυχές F_3) (Buick, I., 1991. Buick, I., 1991 Lister, G., Foster, G., 1996).



Σχήμα 2.5. Σχηματική τομή N-B της Νάξου με έμφαση στις πιο σημαντικές τεκτονικές δομές. Οι μιγματίτες εμφανίζονται στον πυρήνα του τεκτονικού θόλου έχοντας υποστεί τη M_2 Ολιγοκαινική-Μειοκαινική υψηλού βαθμού μεταμόρφωση. Η μεγάλη ζώνη διατμητικής ολίσθησης που καλύπτει ως κέλυφος τον μιγματίτη (carapace shear zone) πτυχώθηκε κατά το τελευταίο στάδιο A-Δ συμπίεστικής τεκτονικής. (S. Keay et al.2001)

Η δεύτερη ζώνη διατμητικής ολίσθησης έχει αναγνωριστεί στο ανατολικό όριο του γρανοδιορίτη, στην επαφή του με το μεταμορφωμένο σύμπλεγμα και θεωρείται ότι οφείλεται σε πεδίο "διαγωνίου πίεσεως" (transpression) (Bickle, M.J., Baker, S., 1990).

Μετά το ξεκίνημα της εφελκυστικής διάτμησης, μικροί γρανίτες S τύπου διείσδυσαν στο υποκείμενο τμήμα αυτού του συστήματος εφελκυστικών ρηγμάτων μεταξύ ~15-14 Ma και επακολούθησε η διείσδυση του δυτικού πλουτωνίτη μεταξύ ~14-12 Ma στην Νάξο.

Η εμφάνιση του συστήματος εφελκυστικών ρηγμάτων στη Νάξο με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν αυτά στο νησί (συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, έναρξη της διάτμησης μετά τη διείσδυση του γρανοδιορίτη) οδήγησαν σε ταχύτητες ολίσθησης σχετικά μεγαλύτερες, πράγμα το οποίο σχετίζεται με την εφελκυστική διάτμηση πλαστικής παραμόρφωσης (Brichau, 2004).

Το σύστημα εφελκυστικών ρηγμάτων της Νάξου είναι μοναδικό στον Αιγαίο χώρο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα εξής:

- υψηλός ρυθμός ολίσθησης της ζώνης αποκοπής ~9-8 km/Ma πράγμα το οποίο σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά σχηματισμού του συστήματος εφελκυστικών ρηγμάτων της Νάξου.
- αύξηση του ρυθμού ολίσθησης κατά μήκος της ζώνης μετάβασης από πλαστική σε θραυσηγενή παραμόρφωση από ~6 km/Ma σε ~9-8 km/Ma το οποίο μάλλον οφείλεται στη

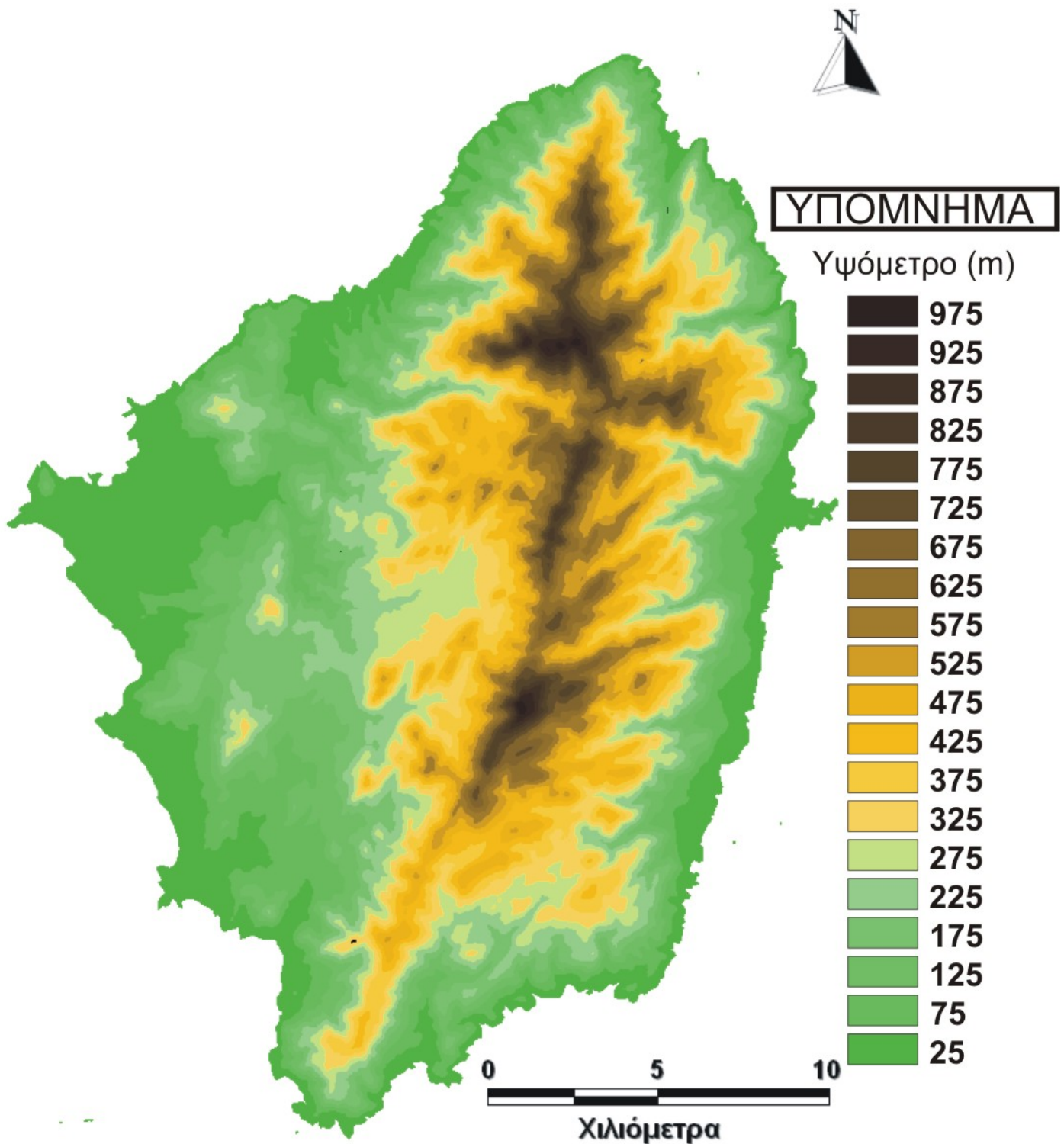
διείσδυση της τεράστιας μάζας του γρανοδιορίτη κατά την έναρξη λειτουργίας της ζώνης αποκόλλησης

-οι ζώνες εφελκυστικής διάτμησης οι οποίες έχουν τις ρίζες στον κατώτερο φλοιό

-το μεγάλης κλίμακας σύστημα εφελκυστικών ρηγμάτων Νάξου / Πάρου δείχνει μεγαλύτερο ρυθμό ολίσθησης πράγμα που πιθανώς οφείλεται στη διείσδυση ενός τεράστιου γρανοδιοριτικού όγκου.

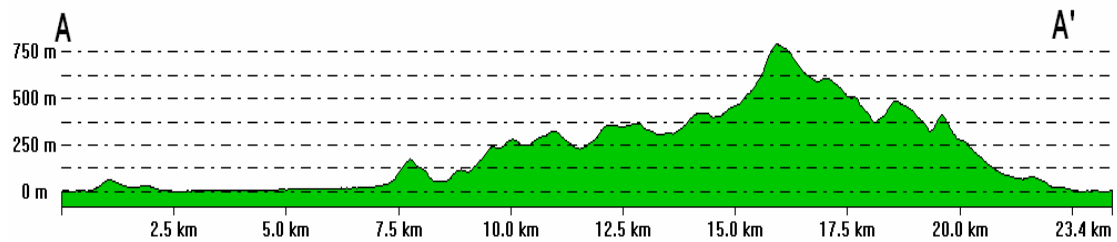
3. Γεωμορφολογικά Στοιχεία

Για την ποσοτική ανάλυση της ψηφιοποιήσαμε τις ισοϋψείς των 50 m του χάρτη της νήσου Νάξου και στη συνέχεια κατασκευάσαμε τον ψηφιοποιημένο χάρτη της περιοχής.

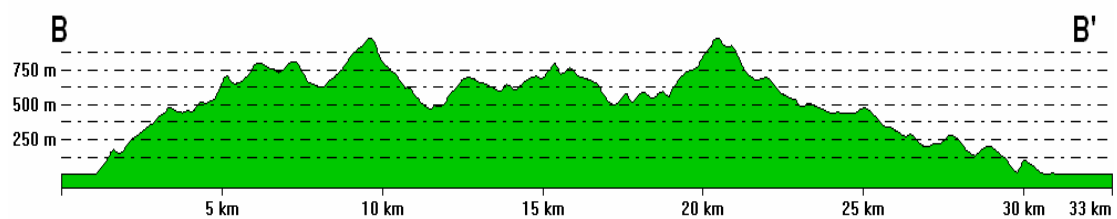


Σχήμα3.1. Ψηφιοποιημένος γεωμορφολογικός χάρτης της νήσου Νάξου.

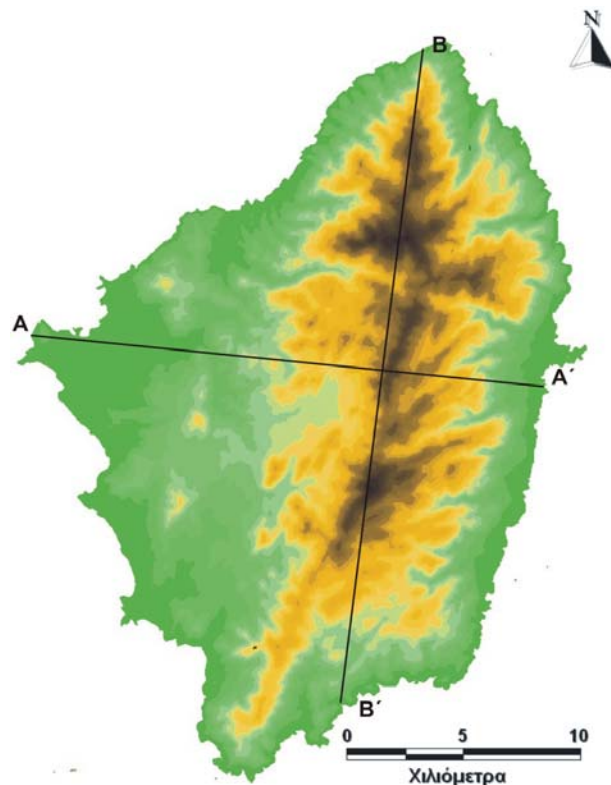
Παρακάτω παρουσιάζονται γεωμορφολογικές τομές σε διευθύνσεις ΔΒΔ – ΑΝΑ (Α-Α') και ΒΒΑ – ΝΝΔ (Β-Β') (Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3), ενώ η θέση τους παρουσιάζεται στο χάρτη του Σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.2. Γεωμορφολογική τομή Α – Α' με διεύθυνση ΔΒΔ - ΑΝΑ



Σχήμα 3.3. Γεωμορφολογική τομή Β – Β' με διεύθυνση ΒΒΑ - ΝΝΔ



Σχήμα 3.4 Ψηφιοποιημένος γεωμορφολογικός χάρτης της νήσου Νάξου με τις θέσεις των τομών.

Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν το εμβαδόν, η περίμετρος, το μέσο υψόμετρο, καθώς επίσης και η μέση κλίση και η υψογραφική του καμπύλη. Οι δύο τελευταίες παράμετροι εκφράζουν ποσοτικά το ανάγλυφο μιας περιοχής.

Το μέσο υψόμετρο μιας περιοχής ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των γινομένων του μέσου υψομέτρου (h') δύο διαδοχικών ισοϋψών επί την αντίστοιχη επιφάνειά τους (ε), δια του συνολικού εμβαδού (E) και δίνεται από τη σχέση:

$$H_M = \frac{\sum \varepsilon \cdot h'}{E} \quad (3.1)$$

Η μέση κλίση (P) του εδάφους μιας περιοχής υπολογίζεται με τη μέθοδο Horton R.E., (1945). Κατά τη μέθοδο αυτή η μέση κλίση δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{d \cdot L}{E} \quad (3.2)$$

όπου: P = η ζητούμενη μέση κλίση (%)

d = η ισοδιάσταση (m)

E = η συνολική επιφάνεια της λεκάνης (m^2)

$L = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$ το συνολικό μήκος των ισοϋψών (m)

Η υψογραφική καμπύλη είναι μια έκφραση του σταδίου απογυμνώσεως μιας περιοχής. Η υψογραφική καμπύλη δείχνει με απλό τρόπο την κατανομή της μάζας του αναγλύφου σε σχέση με το υψόμετρο. Στον άξονα των X παρουσιάζεται το σχετικό εμβαδόν (εμβαδόν περιοχής που βρίσκεται πάνω από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο / συνολικό εμβαδόν της περιοχής) και στον άξονα των Y το σχετικό υψόμετρο (υψόμετρο σε μια συγκεκριμένη θέση / μέγιστο υψόμετρο), (Κουτσογιάννης, 1999).

Από την ψηφιοποίηση που πραγματοποιήθηκε (Πίνακας 3.1) προκύπτει πως η νήσος Νάξος καταλαμβάνει έκταση 431.55 km^2 , με περίμετρο 125,6 km.

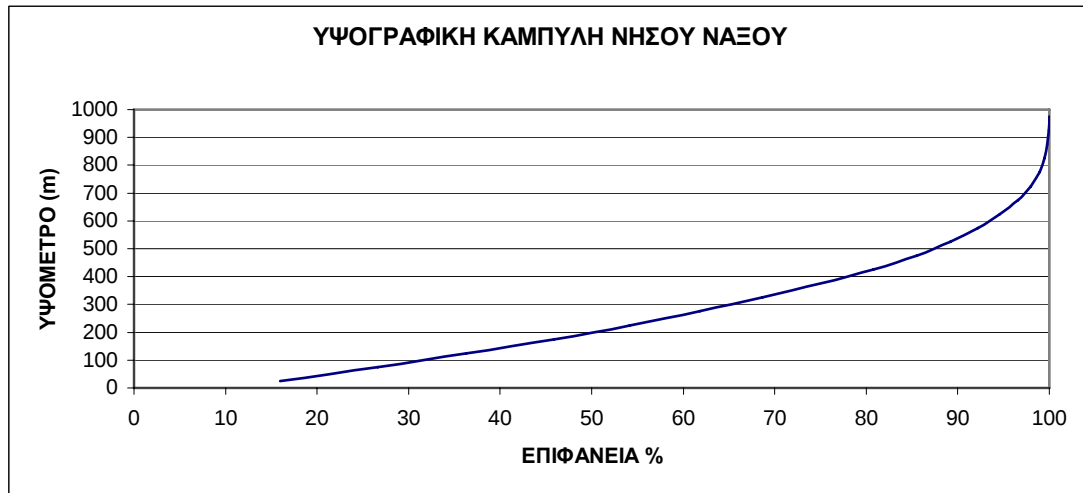
Πίνακας 3.1 Ποσοτικά χαρακτηριστικά της Νάξου.

a/a	Ισοϋψείς (m)	Μήκος ισοϋψών (km)	Ισοϋψείς (α) – (β)	Μέσο υψόμετρο h' (m)	Επιφάνεια ε μεταξύ των (α) και (β) σε km²	E₁%	Επιφάνεια E₂% περικλειόμενη από την (β)
1	0	125,6	0-50	25	68,81	15,9	15,9
2	50	155,6	50-100	75	46,04	10,7	26,6
3	100	180,44	100-150	125	41,82	9,7	36,3
4	150	188,71	150-200	175	41,19	9,5	45,8
5	200	187,86	200-250	225	35,81	8,3	54,1
6	250	177,6	250-300	275	33,14	7,7	61,8
7	300	177,64	300-350	325	29,47	6,8	68,7
8	350	165,26	350-400	375	27,28	6,3	75,0
9	400	163,07	400-450	425	24,9	5,8	80,7
10	450	145,26	450-500	475	20,49	4,7	85,5
11	500	117,75	500-550	525	15,77	3,7	89,1
12	550	98,24	550-600	575	13,01	3,0	92,2
13	600	81,04	600-650	625	10,32	2,4	94,6
14	650	67,84	650-700	675	8,58	2,0	96,5
15	700	54,3	700-750	725	6,21	1,4	98,0
16	750	39,91	750-800	775	4,17	1,0	98,9
17	800	23,48	800-850	825	2,16	0,5	99,4
18	850	11,06	850-900	875	1,29	0,3	99,7
19	900	8,12	900-950	925	0,91	0,2	100,0
20	950	3,27	950-1000	975	0,18	0,0	100,0
Σύνολο		2172,05			431.55	100	

Από την σχέση 3.1 προκύπτει ότι το μέσο υψόμετρο της νήσου ανέρχεται σε 265.476 m. Επίσης από την σχέση 3.2 προκύπτει ότι η μέση κλίση της νήσου είναι ίση με $P = 0.25$ ή $P = 25\%$, η οποία και αντιστοιχεί σε γωνία $\varphi = 14.14^\circ$. Με δεδομένο ότι η κλίση καθορίζει την ταχύτητα των επιφανειακών ρεόντων υδάτων και μέσω αυτής και των φαινομένων της διάβρωσης και της κατείσδυσης (Σούλιος 1975), είναι πιθανότερο να περιμένουμε, ανεξάρτητα με τη λιθολογική σύσταση του όγκου, σχετικά μεγάλο συντελεστή επιφανειακής απορροής.

1	Εμβαδόν περιοχής	E	431.55 km ²
2	Περίμετρος	P _A	125.6 km
3	Μέγιστο υψόμετρο	Z _{max}	265.476 m
4	Ελάχιστο υψόμετρο	Z _{min}	0 m
5	Μέσο υψόμετρο	H _M	1005.4 m
6	Μέση κλίση (P)	P	25 %
7	Αντίστοιχη γωνία	φ	14.14 %

Στη συνέχεια κατασκευάσαμε την υψογραφικής καμπύλη (Σχήμα 3.5). Από την υψογραφική καμπύλη διαπιστώνεται, πως σχεδόν το 90% της επιφάνειας της περιοχής βρίσκονται κάτω από την ισοϋψή των 500 m.

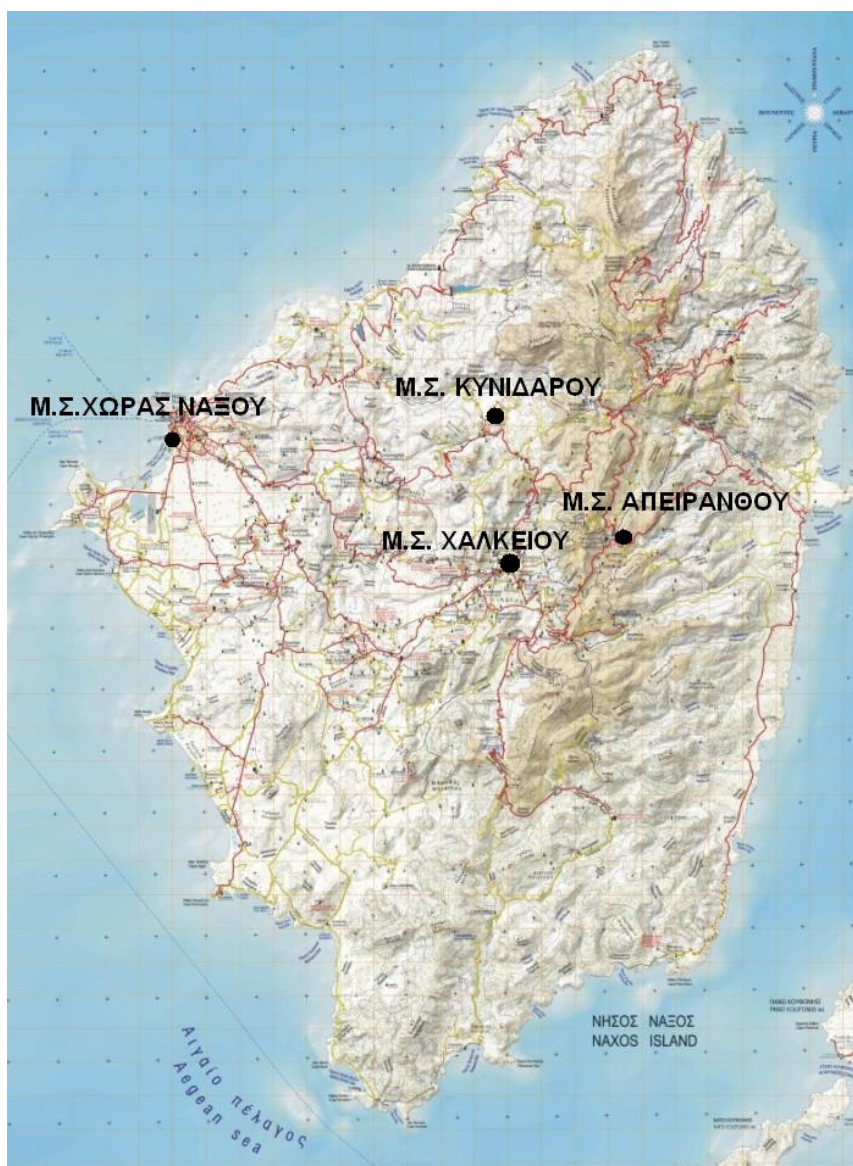


Σχήμα 3.5. Η υψογραφική καμπύλη της νήσου Νάξου

4. Υδρολογικά στοιχεία

4.1 Βροχομετρικοί και Μετεωρολογικοί Σταθμοί

Η Νάξος αν εξαιρέσουμε το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην πρωτεύουσα του νησιού και τον σταθμό μέτρησης μετεωρολογικών δεδομένων δεν έχει αρκετά καλή κάλυψη από βροχομετρικούς σταθμούς. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των μοναδικών βροχομετρικών σταθμών στη Χώρα Νάξου, στο Χαλκείο, στον Κυνίδαρο και στην Απείρανθο. Στο παράρτημα αναφέρονται αναλυτικά τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή αυτών σε σχέση με την περιοχή μελέτης, ενώ στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 4.1 Μετεωρολογικοί και βροχομετρικοί σταθμοί της Νάξου.

Πίνακας 4.1 Βροχομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

α/α	Βροχομετρικοί σταθμοί	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο (m)	Περίοδος λειτουργίας	Φορέας
1	Χώρα Νάξου	25,3722	37,1002	5	1956-	Ε.Μ.Υ
2	Χαλκείο	25,4869	37,0665	283	1987-	Δήμος Δρυμαλίας
3	Κυνίδαρος	25,4787	37,1024	427	1987-	Δήμος Δρυμαλίας
4	Απείρανθος	25,5214	37,0725	607	1987-	Δήμος Δρυμαλίας

4.2 Βροχοπτώσεις

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων των βροχομετρικών σταθμών για χρονικό διάστημα 16 υδρολογικών ετών (1987 -2003). Η περίοδος αυτή θεωρείται ικανοποιητική και κατά τη διάρκειά της λειτούργησαν όλοι οι σταθμοί.

4.2.1 Σχέση Ύψους Βροχόπτωσης - Υψομέτρου

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης των σταθμών για την περίοδο 1987 – 2003.

Πίνακας 4.2 Ετήσια ύψη βροχόπτωσης (mm) για την περίοδο 1987 – 2003

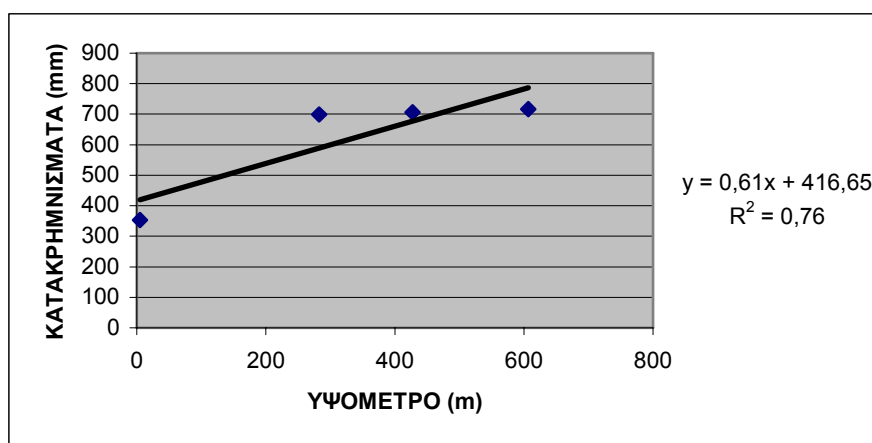
α/α	Υδρολογικό έτος	ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ (mm)			
		ΝΑΞΟΥ	ΧΑΛΚΕΙΟ	ΚΥΝΙΔΑΡΟΣ	ΑΠΕΙΡΑΝΘΟΣ
		Υψόμετρο (m)			
		5m	283m	427m	607m
1	1987-88	341,3	654,1	657,1	742,5
2	88-89	317,2	543,96	533,72	553,7
3	89-90	140	243,5	315,2	335,6
4	90-91	351,3	793,1	786,2	913
5	91-92	280,9	547,4	560,2	498,8
6	92-93	311,4	626,9	602,5	634,1
7	93-94	383,1	619,6	547,7	576,6
8	94-95	403,3	902,4	952,2	879
9	95-96	381,1	854,6	795,5	1054,8
10	96-97	399,8	583,6	838,4	616,7
11	97-98	360,6	659,5	683,2	546,3
12	98-99	485,1	784,5	900,3	591,2
13	99-00	169,2	349,4	347,8	355,7
14	00-01	233,9	465,5	432,8	491,2
15	01-02	427,1	1009,6	1002,5	1159
16	02-03	651,9	1534,2	1354,03	1512,8
Μ.Ο.		352,3	698,2	706,8	716,3

Η ετήσια κατανομή των βροχοπτώσεων (P) επηρεάζεται άμεσα από το υψόμετρο (H) της περιοχής. Για τον προσδιορισμό της βροχοβαθμίδας εφαρμόστηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται η γραμμική μαθηματική έκφραση:

$$y = a \cdot x + \beta \quad (4.1)$$

με ανεξάρτητη μεταβλητή το υψόμετρο των σταθμών (H) και εξαρτημένη το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (P). Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.2 προκύπτει η σχέση $P=0.61 \cdot H + 416.65$ ($R^2 = 0,76$). Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης (standard error of the estimate) είναι μικρό και αυτό υποδηλώνει ότι η προσαρμογή των δεδομένων στην ευθεία (Σχήμα 4.2) είναι καλή και για το δοσμένο υψόμετρο μπορούμε να προβλέψουμε το ύψος βροχόπτωσης, χωρίς μεγάλο σφάλμα.

Η κλίση της ευθείας αυτής (βροχοβαθμίδα) είναι σχετικά μεγάλη (υπάρχει μια αύξηση της τάξης των 61 χιλιοστών ανά 100 μέτρα) και μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός, ότι πέραν του υψομέτρου επεμβαίνει και ο παράγοντας ηπειρωτικότητα, ο οποίος επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη βροχοβαθμίδα (Καλλέργης κ.α., 2002).

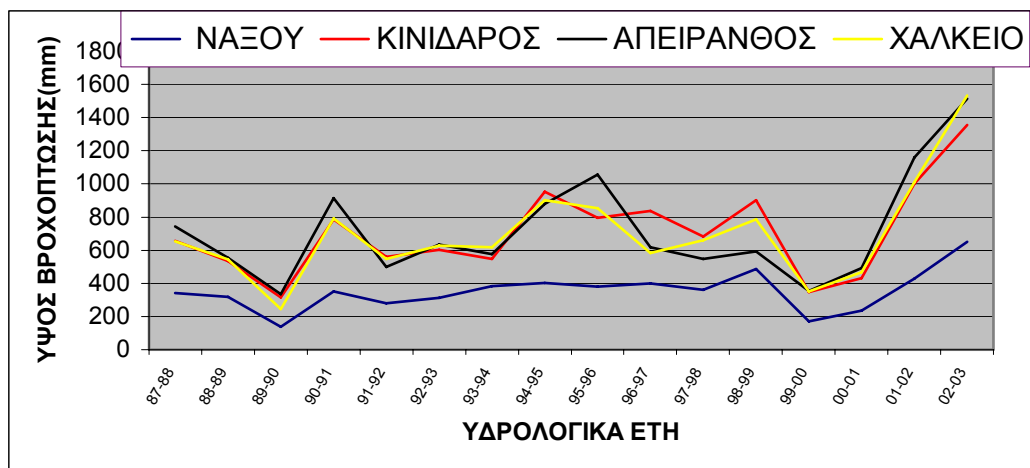


Σχήμα 4.2 Γραφική απεικόνιση της σχέσης ύψους βροχής – υψομέτρου στην Νάξο.

Με βάση τη σχέση 3.1, καθώς και την κατανομή της επιφάνειας στα διάφορα υψόμετρα (βλέπε κεφ. 3) προκύπτει ότι το μέσο υψόμετρο του νησιού είναι ίσο με $H_M = 245,7 \text{ m}$. Έτσι από τη σχέση 4.1 προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης που δέχεται το σύνολο της Νάξου για την περίοδο 1987 - 2003 είναι ίσο 567 mm.

4.2.2 Κατανομή των βροχοπτώσεων

Τα ετήσια ύψη βροχόπτωσης των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής έρευνας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 και στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η γραφική τους παράσταση.



Σχήμα 4.3 Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στους σταθμούς της περιοχής για την περίοδο 1987 – 2003

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ευρεία διακύμανση των ετήσιων τιμών της βροχόπτωσης. Υψηλότερες βροχοπτώσεις εμφανίζει ο σταθμός της Απειράνθου, ακολουθούν οι σταθμοί του Κυνιδάρου και του Χαλκείου με μικρή διαφορά ενώ αισθητά χαμηλότερες βροχοπτώσεις παρουσιάζονται στο σταθμό της Νάξου γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην υψομετρική διαφορά που έχουν οι σταθμοί. Τα έτη με τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις είναι το 2002 – 2003 και ακολουθεί το έτος 2001 – 2002 . Επίσης οι χαμηλότερες βροχοπτώσεις αντιστοιχούν στα υδρολογικά έτη 1989-1990 και 1999-2000

5 Θερμομετρική Έρευνα.

5.1 Εισαγωγή

Η μέτρηση των θερμοκρασιών των νερών των γεωτρήσεων της περιοχής τόσο στην κεφαλή τους κατά την άντληση όσο και στο εσωτερικό τους και ο υπολογισμός της γεωθερμικής βαθμίδας αποτελούν μία σημαντική μέθοδο έρευνας, ιδιαίτερα σε περιοχές με μικρές θερμικές ανωμαλίες και χωρίς επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας (π.χ. θερμές πηγές). Οι έστω και μικρές θερμικές ανωμαλίες μιας περιοχής αποτελούν ένα πολύ ενθαρρυντικό στοιχείο για την ύπαρξη ενός γεωθερμικού συστήματος σε μεγαλύτερο βάθος και το οποίο δεν είναι εμφανές με άλλα στοιχεία στην επιφάνεια.

Η θερμομετρική έρευνα δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τη θερμική κατάσταση σε κάθε σημείο μέτρησης και προσδιορίζει τις σχετικές διαφορές από ένα σημείο σε άλλο, διακρίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις πιο ευνοϊκές από τις λιγότερο ευνοϊκές περιοχές και οριοθετώντας την έκταση της γεωθερμικής ανωμαλίας. Η καλή γεωγραφική κατανομή στο χώρο και η μεγάλη πυκνότητα των σημείων μέτρησης αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την καλύτερη αξιοποίηση των θερμομετρήσεων.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας πραγματοποιήθηκε θερμομέτρηση του νερού όλων των διαθέσιμων γεωτρήσεων στη Νάξο κατά την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2004. Θερμομετρήθηκαν 73 γεωτρήσεις στην κεφαλή τους κατά την άντληση, ενώ δεν στάθηκε, δυστυχώς, δυνατή η μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορα βάθη διότι πρόκειται για κοινές υδρογεωτρήσεις, ιδιωτικές και κοινοτικές – δημοτικές μέσα στις οποίες ήταν τοποθετημένο το αντλητικό συγκρότημα και δεν ήταν δυνατή η κάθοδος του αισθητήρα του θερμομέτρου. Ακόμη δεν εντοπίστηκαν γεωτρήσεις στις οποίες να πραγματοποιούνταν, κατά την περίοδο των μετρήσεων, εργασίες συντήρησης ώστε να έχει εξαχθεί το αντλητικό συγκρότημα. Οι εργασίες αυτές προφανώς πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενώ κατά την περίοδο που πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις, περίοδος έντονων αρδεύσεων, το σύνολο των γεωτρήσεων βρισκόταν σε λειτουργία. Το βάθος των γεωτρήσεων ποικίλει από 30 μέχρι 550 m.

Η μεθοδολογία έρευνας, που ακολουθήθηκε, είναι η διεθνώς καθιερωμένη. Κατά την υπαίθρια εργασία, χρησιμοποιήθηκε φορητό ηλεκτρικό θερμόμετρο με αντίσταση πλατίνης τύπου DIGITRON Pt100 για μετρήσεις στην κεφαλή των γεωτρήσεων. Το θερμόμετρο είναι αρκετά μεγάλης ακρίβειας και επιτρέπει ανάγνωση της τάξης του 0.1°C και χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ώστε να μην υπάρχουν σχετικές διαφορές στις μετρήσεις.

5.2 Θερμομέτρηση στην Κεφαλή των Γεωτρήσεων κατά την Άντληση

Οι θερμομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη θερινή περίοδο αφού η συντριπτική πλειοψηφία των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται για αρδευτικούς σκοπούς, και κατά συνέπεια την περίοδο αυτή βρίσκονται σε λειτουργία. Παράλληλα, με τη μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε και μέτρηση τόσο της αγωγιμότητας όσο και του pH του αντλούμενου νερού. Και αυτό προκειμένου από το σύνολο των γεωτρήσεων να επιλεγούν οι περισσότερες αντιπροσωπευτικές για την πραγματοποίηση δειγματοληψιών και χημικών αναλύσεων αλλά και για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην προέλευση των νερών. Τα γεωθερμικά νερά είναι γνωστό ότι έχουν γενικά μεγαλύτερη αλατότητα από τα επιφανειακά και διαφορετικό pH και ο χημισμός τους μας δίνει πολύτιμα συμπεράσματα.

Τα αποτελέσματα των θερμομετρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν από εμάς αλλά και σε προηγούμενα έτη από το Υπουργείο Γεωργίας, στην κεφαλή των γεωτρήσεων κατά την άντληση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 με τη σημείωση της αντίστοιχης περιόδου θερμομέτρησης. Στον πίνακα αυτόν αναγράφονται (α) ο κωδικός της γεώτρησης, (β) το βάθος της γεώτρησης και (γ) οι τιμές της μετρημένης θερμοκρασίας αντίστοιχα για τις περιόδους Αυγούστου-Οκτωβρίου 2000, Ιουνίου-Ιουλίου 2001, Ιουλίου-Σεπτεμβρίου 2001 (Υπ. Γεωργίας) και Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2004 (δική μας).

Πίνακας 5.1. Θερμομέτρηση στην κεφαλή γεωτρήσεων στη νήσο Νάξο για τις περιόδους Αυγούστου-Οκτωβρίου 2000, Ιουνίου-Ιουλίου 2001, Ιουλίου-Σεπτεμβρίου 2001 (Υπ. Γεωργίας) και Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2004 (δική μας)

a/a	ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ (ΕΓΣΑ 1987)			ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)	ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ (°C)			
						Υπουργείου Γεωργίας			Δική μας
		X	Y	Z		8-10/2000	6,7/2001	7-9/2001	8,9/2004
1	4	625,350	4101,047	182,0	550			27,6	25,7
2	7	625,354	4100,810	170,0	450		24,5	23,4	23,6
3	8	625,243	4100,747	172,0	400		26,9	27,1	24,1
4	11	625,746	4100,216	153,0	420	25	26,1	27,3	22,3
5	13	625,542	4100,368	160,0	450	24	24,3	23,4	22,1
6	14	625,111	4100,013	170,0	460	27	27,1		27,1
7	15	625,070	4099,938	172,0	480		25,4	24,6	27
8	23	628,326	4108,293	84,0	90	20			18,8
9	28	625,478	4108,757	76,0	90	20			23
10	29	625,776	4095,584	46,0	140	20	20	20	20,3
11	30	628,676	4099,638	198,0	200	24	25		22,3
12	32	627,499	4097,954	118,0	150	24	26,3	26,2	21
13	33	627,608	4098,108	123,7	100	24	24		20,4
14	34	628,240	4098,940	161,0	90	21	21		19,7

15	35	628,190	4098,930	158,0	150	23	23	21,2	20,2
16	36	628,477	4099,074	174,0	152	22	22,7		20
17	38	626,800	4101,349	180,0	60		23,5		18,2
18	42	627,050	4097,320	99,0	250	23	23,7	21,5	22,4
19	43	625,638	4096,004	68,0	100	22,8	23,5	20,8	21,6
20	45	626,468	4096,620	72,0	100	23			21
21	47	626,148	4094,628	42,0	120		23,5	21	20,4
22	50	627,326	4093,928	54,0	62	19	21,7		20,3
23	54	627,741	4090,300	68,0	80	23	25		32,3
24	56	628,166	4090,146	110,0	180		27,5		28,6
25	57	628,880	4090,540	200,0	160		27,8		32,6
26	58	627,671	4090,411	57,0	42	31	26,8		27,6
27	61	626,927	4092,012	10,0	40		22		21,6
28	63	628,967	4094,298	150,0	165		26,2		21,7
29	70	625,460	4094,714	28,5	42	22	22,6	20,6	18,6
30	72	625,530	4094,452	29,0	45	23,5	23,5		20
31	75	626,965	4096,566	83,0	140		20,8	21,6	18,6
32	79	626,455	4097,247	90,0	150		23,9	22,4	19,7
33	80	627,129	4097,917	108,0	170		27	25,4	18,6
34	84	628,250	4098,510	144,0	180		23		19,8
35	85	627,513	4098,162	122,0	175				20,6
36	87	627,726	4098,408	132,0	200		26,1	23,5	22,2
37	89	628,570	4098,460	159,0	180		22	21,7	20,8
38	92	628,190	4099,180	167,0	185		22,4		20,3
39	100	626,600	4100,410	170,0	300	29		25,9	24,8
40	103	626,310	4100,460	164,0	300	26	25,5		25
41	104	626,080	4100,280	158,0	130	26	24,9		24
42	111	639,995	4104,997	66,0	74	19	21	19,6	18,5
43	112	640,684	4104,339	21,0	50	21	21,5		20,6
44	116	640,735	4104,402	17,0	42		24,2		20,6
45	117	639,250	4097,280	8,0	11	23	22,9		20,6
46	120	638,466	4095,042	40,0	85	22	22,9		20,5
47	123	638,695	4094,794	36,0	38	25	24,3		22,6
48	127	639,550	4099,600	37,0	70	21	24,5		20,4
49	129	640,515	4102,268	10,0	56	22	25,2		20,4
50	139	640,907	4106,574	38,0	42	21			19,6
51	140	631,350	4101,720	282,0	135	23	24	23,4	20,1
52	141	631,900	4103,161	281,0	38	21	27		17,8
53	142	628,830	4103,409	182,0	45	21	25,7		19,6
54	149	625,759	4102,923	180,0	300		24,2		26,4
55	151	631,376	4106,681	384,0	98	17,2		20,8	16,6
56	153	632,079	4106,312	438,0	138	20		18,8	19,6
57	154	636,497	4109,924	556,0	133				14,6
58	156	624,450	4097,260	96,0	150	16	24,6		23,1

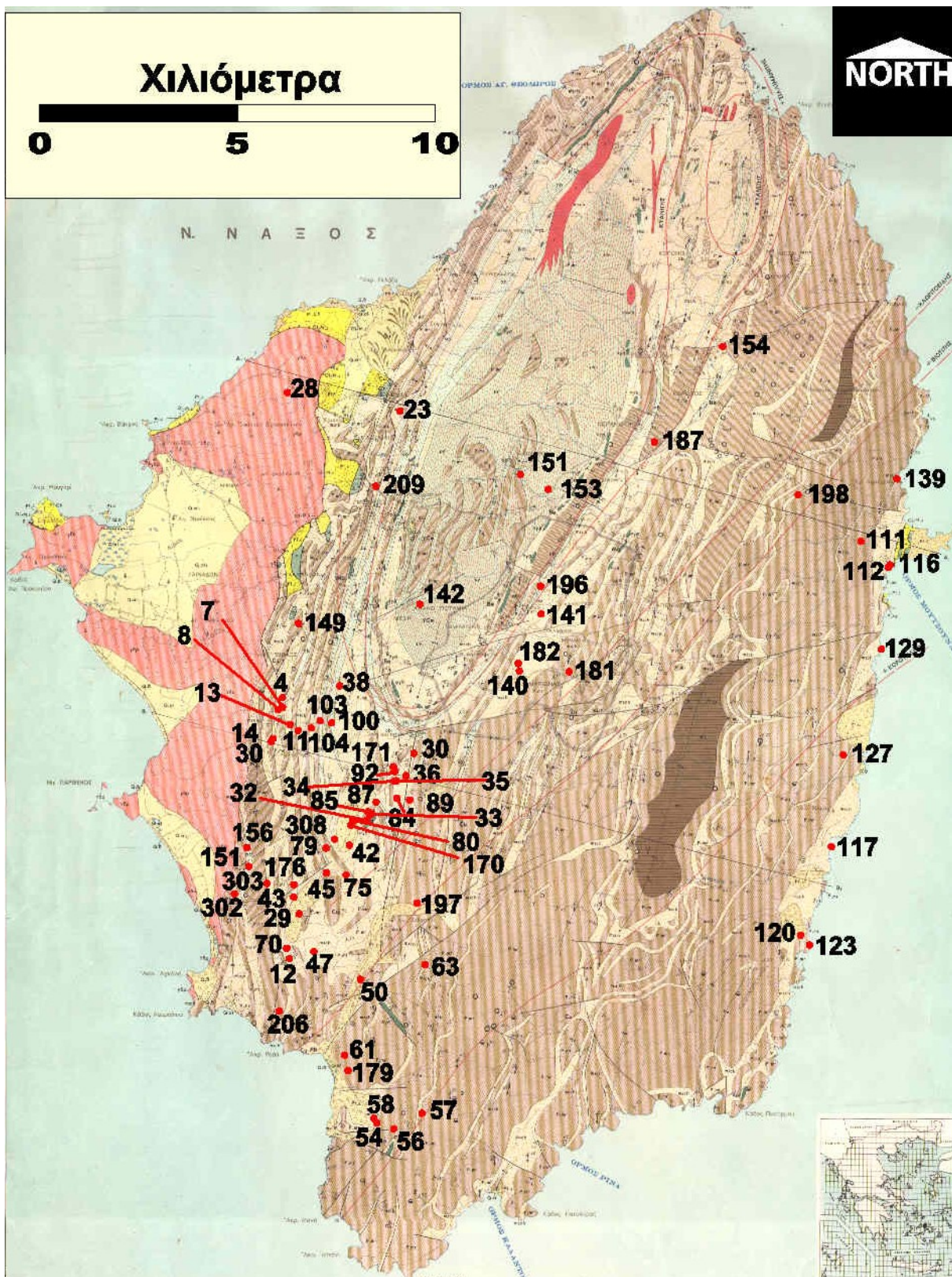
59	157	624,500	4096,780	108,0	165	17	26,1		24,3
60	170	627,080	4097,824	104,5	100				20,6
61	171	628,160	4099,300	161,0	160		23,1	20,8	19,5
62	176	625,640	4096,319	80,0			26,7	25,3	21,2
63	179	627,015	4091,616	5,0	20		27,7		23,6
64	181	632,610	4101,700	320,0	310		25,1		18
65	182	631,320	4101,910	272,0					18
66	187	634,767	4107,512	508,0					14,6
67	196	631,886	4103,868	314,0					17,6
68	197	628,760	4095,850	164,0	180				20,3
69	198	638,406	4106,169	235,0	290				18,4
70	206	625,270	4093,120	41,0	60				20,6
71	209	627,712	4106,393	92,0			22,6		22,6
72	302	624,137	4096,086	28,0	34		25,6		20,4
73	303	624,962	4096,348	96,0	120		22,9		21,4
74	308	626,673	4097,469	84,5	180		23,8		18,5

Στο χάρτη του Σχ. 5.1 απεικονίζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων που θερμομετρήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής..

Σε κάθε άντληση όπου λαμβάνεται η τιμή της θερμοκρασίας στη κεφαλή της γεώτρησης, το αισθητήριο παραμένει ακίνητο για τον απαραίτητο χρόνο, έτσι ώστε να επέλθει θερμική ισορροπία του θερμομέτρου με το νερό. Τότε η θερμοκρασία, που αναγράφεται στο όργανο ανάγνωσης της επιφάνειας, σταθεροποιείται σε μία ορισμένη τιμή, η οποία και καταγράφεται.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γινόταν αφού είχε παρέλθει ικανός χρόνος από την έναρξη της άντλησης (~20min) ώστε είχε απομακρυνθεί το νερό που είχε παραμείνει στις σωληνώσεις. Έτσι η θερμοκρασία του νερού αντιστοιχούσε, με μικρή απόκλιση, στο βάθος που είχε τοποθετηθεί η αντλία χωρίς να επηρεάζεται αισθητά από τη θερμοκρασία του σωλήνα της αντλίας.

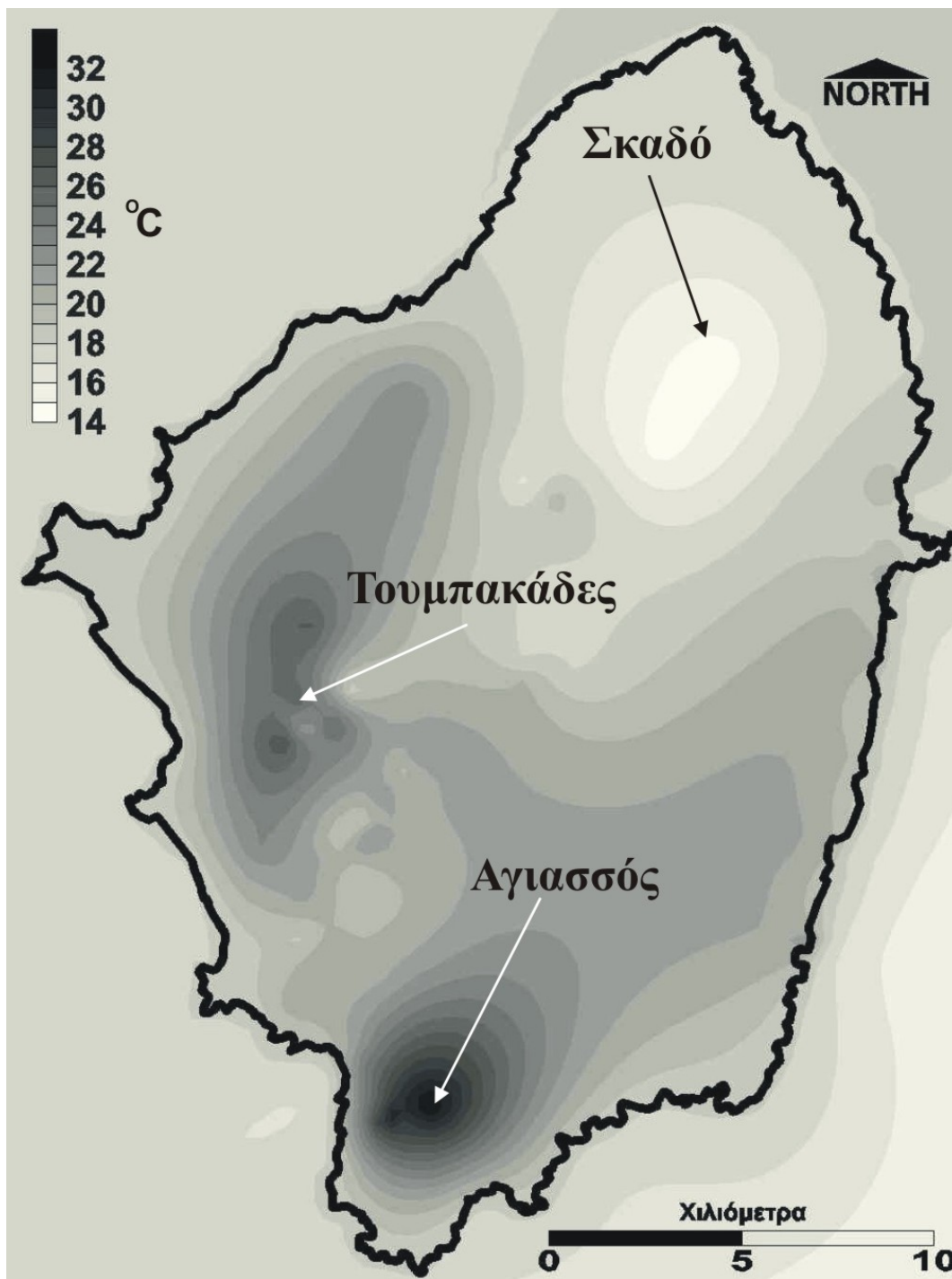
Σ' αυτόν τον τρόπο μέτρησης πολύ συχνά το νερό που αντλείται αποτελεί προϊόν ανάμιξης βαθύτερων και θερμότερων νερών με ψυχρότερα πιο επιφανειακά νερά, γεγονός που αλλοιώνει την πραγματική θερμική κατάσταση της περιοχής. Όμως, η θερμοκρασία του νερού που καταγράφεται με τη θερμομέτρηση μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα, αν αυτή είναι αυξημένη, έστω και πολύ λίγο.



Σχήμα 5.1. Θέσεις και κωδικός αριθμός των γεωτρήσεων που θερμομετρήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

5.3 Χάρτες ισόθερμων καμπυλών για τη νήσο Νάξο.

Με βάση τα αποτελέσματα των θερμομετρήσεων που πραγματοποιήσαμε στην κεφαλή των γεωτρήσεων κατά την άντληση κατασκευάστηκε ένας χάρτης ισόθερμων καμπυλών (Σχήμα 5.2.)



Σχήμα 5.2. Χάρτης ισόθερμων καμπυλών από μετρήσεις θερμοκρασίας νερού στην κεφαλή των γεωτρήσεων κατά την άντληση.

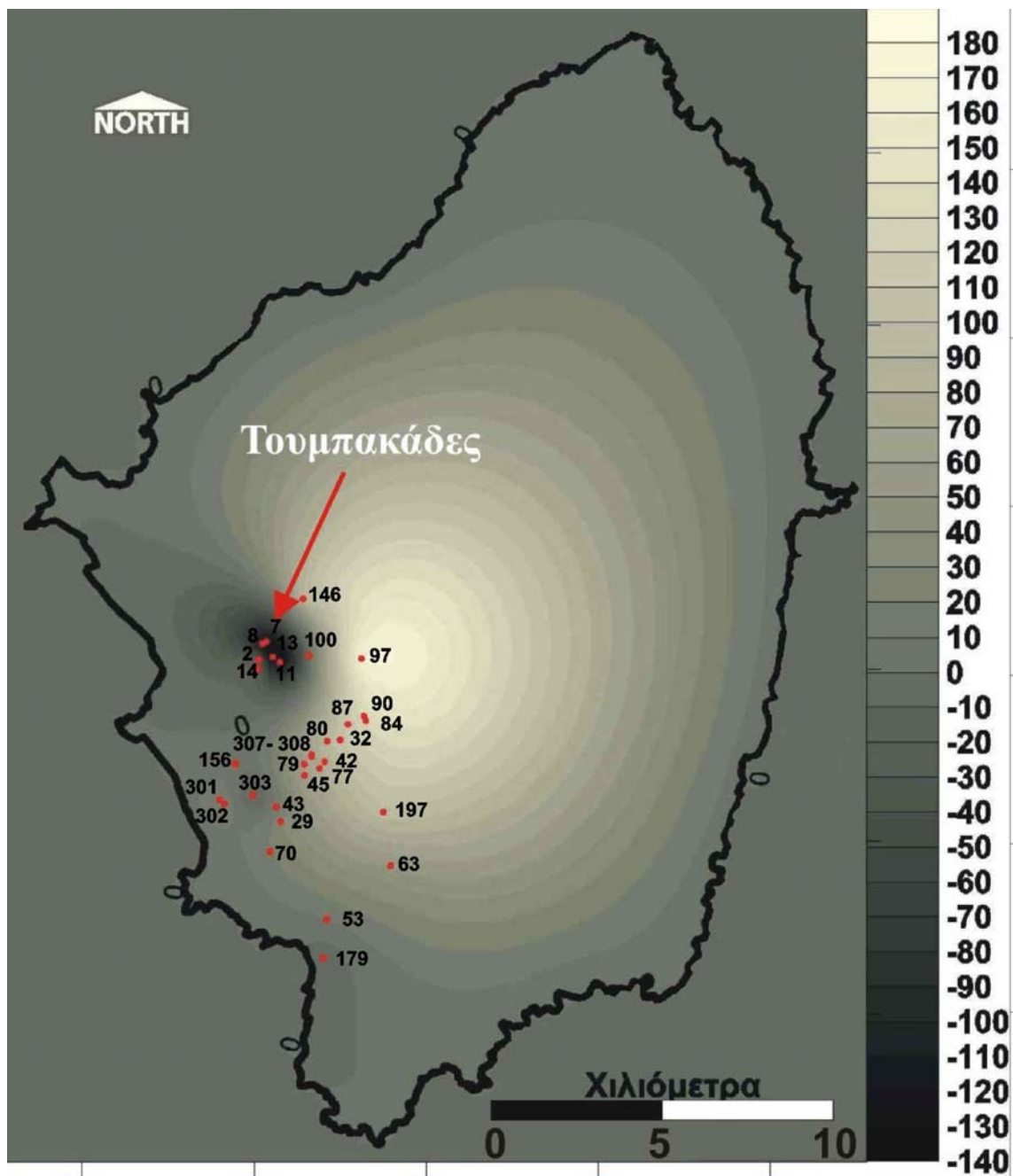
Από τις μετρήσεις θερμοκρασίας στην κεφαλή των γεωτρήσεων κατά την άντληση προκύπτουν τα εξής:

1. Στην περιοχή Αγιασός (Σχ.5.2) τα υπόγεια νερά έχουν υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες στη γεώτρηση 57, βάθους 160m φτάνουν τους 32.6°C και στις κοντινές σε αυτή γεωτρήσεις 54, 56 και 58 βάθους 80m, 180m και 42m έχουν θερμοκρασίες 32.3°C, 28.6°C και 27.6°C αντίστοιχα. Και οι τέσσερις αυτές γεωτρήσεις βρίσκονται μέσα ή πλησίον μίας τεκτονικής λεκάνης η οποία δημιουργείται από δυο υποπαράλληλα ρήγματα παράταξης Α-Δ. Ειδικότερα η γεώτρηση 54 βρίσκεται σχεδόν πάνω στη ζώνη διάρρηξης του νοτιότερου εκ των δύο ρηγμάτων πράγμα το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γεώτρηση αυτή τροφοδοτείται μέσω του ρήγματος, με νερά που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος και παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασίες. Λίγο βορειότερα των τεσσάρων αυτών γεωτρήσεων βρίσκεται η 179, βάθους 20m αλλά με θερμοκρασία αντλούμενου νερού 23.6°C. Είναι μια γεώτρηση πολύ κοντά στην ακτή, με νερό πολύ μεγάλης αλατότητας (14100 μS/cm) η οποία αυξάνει κατά την άντληση. Είναι προφανές ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση αντλεί και θαλασσινό νερό η θερμοκρασία του οποίου κατά τη περίοδο των μετρήσεων ήταν 18°C. Συνεπώς το νερό της συγκεκριμένης γεώτρησης επηρεάζεται και από νερά βαθύτερου και θερμότερου υδροφόρου. Τα προαναφερόμενα δεδομένα συνιστούν μια πολύ αξιόλογη ένδειξη ύπαρξης γεωθερμικής ανωμαλίας.
2. Στην περιοχή Τουμπακάδες (κεντρικο-δυτική Νάξος) (Σχ.5.2) τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν σχετικά υψηλές θερμοκρασίες που σε κάποιες γεωτρήσεις (14, 15) φτάνουν τους 27°C. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περιοχή αυτή υπάρχουν πολλές γεωτρήσεις μεγάλου βάθους (μέχρι και 550m) και γίνεται έντονη άρδευση για γεωργοκτηνοτροφικούς σκοπούς. Ακόμη όπως φαίνεται και στο Σχ.5.3 η περίοδος κατά την οποία πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις στάθμης συνέπεσε με την περίοδο έντονων αρδεύσεων (καλοκαιρινή περίοδος) με αποτέλεσμα σε πολλές γεωτρήσεις της περιοχής (Πίνακας 5.2) η στάθμη να βρίσκεται κάτω από τα 300m. Συνεπώς οι γεωτρήσεις αυτές αντλούσαν νερό από αρκετά μεγάλα βάθη και κάποιες από βάθη μεγαλύτερα των 300m. Άρα η θερμοκρασία 27°C μπορεί να θεωρηθεί ίσως κανονική με βάση τη μέση γήινη θερμοβαθμίδα (30°C/km) χωρίς αυτό όμως να αποκλείει την πιθανότητα ύπαρξης θερμού υδροφόρου. Λύση θα ήταν η πραγματοποίηση θερμομετρήσεων βάθους η οποία θα μας

δείξει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος. Θα πρέπει να τονιστεί ότι μετρήσεις στάθμης έγιναν σε γεωτρήσεις που βρίσκονται στο νότιο, κεντρικό και δυτικό τμήμα του νησιού (όπου συμπεριλαμβάνεται και η περιοχή Τουμπακάδες) γιατί μόνο σε αυτές κατέστη δυνατό. Συνεπώς η κατανομή της στάθμης, όπως αυτή φαίνεται στο χάρτη του Σχήματος 5.3, είναι ακριβής μόνο για την ευρύτερη περιοχή όπου έχουν πραγματοποιηθεί επί τόπου μετρήσεις.

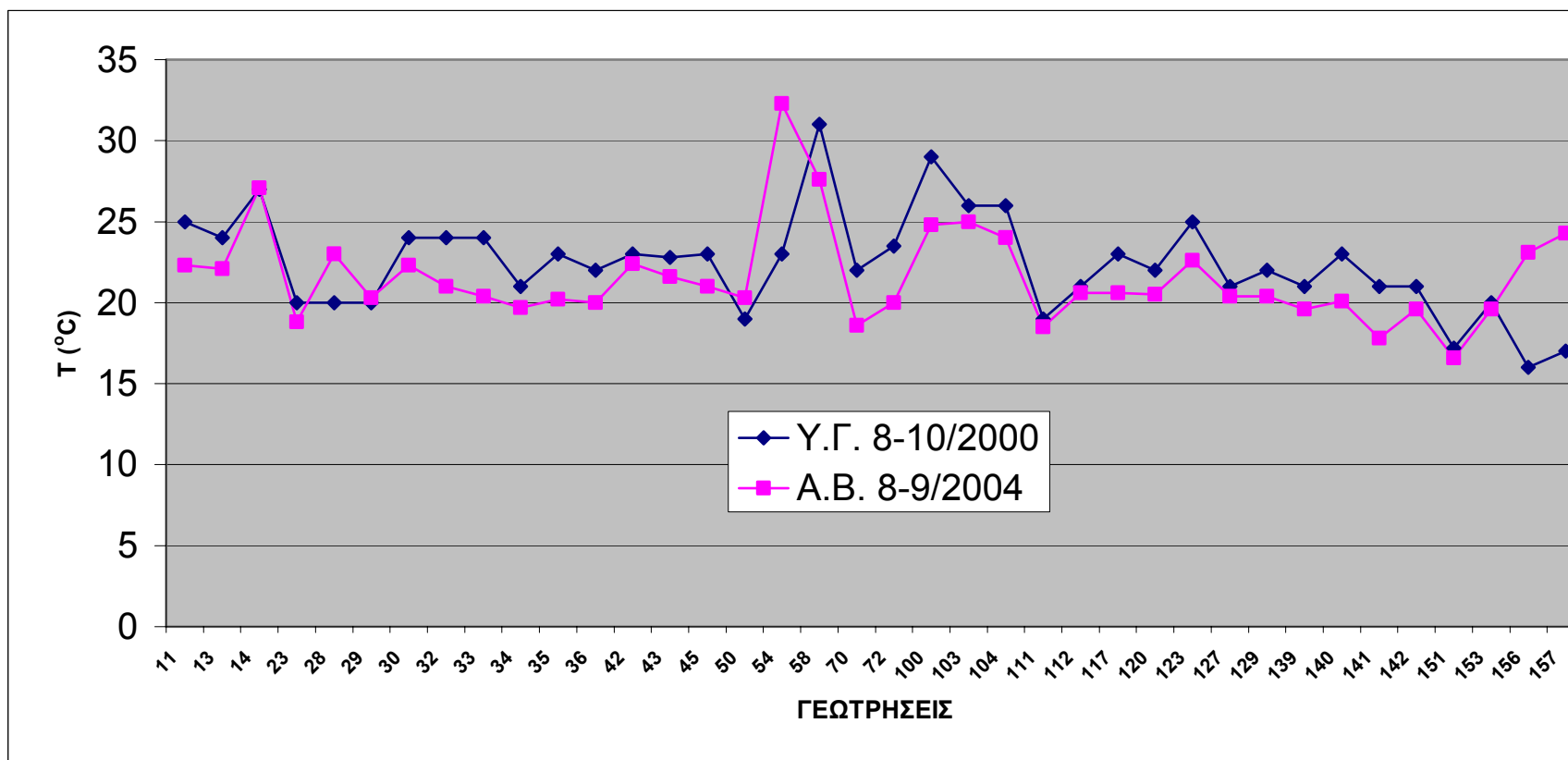
Πίνακας 5.2. Πίνακας πιεζομετρικής στάθμης και στάθμης που έχει αναχθεί στο επίπεδο της θάλασσας, στη Νάξο.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ			ΣΤΑΘΜΗ (m)	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΣΤΑΘΜΗ (m)
	X	Y	Z		
2	625,138	4100,282	152	177	-25
7	625,354	4100,81	170	300	-130
8	625,243	4100,747	172	300	-128
11	625,746	4100,216	153	300	-147
13	625,542	4100,368	160	300	-140
14	625,111	4100,013	170	189	-19
29	625,776	4095,584	46	16	30
32	627,499	4097,954	118	11	107
42	627,05	4097,32	99	19	80
43	625,638	4096,004	68	58	10
45	626,468	4096,92	72	8	64
53	627,107	4092,737	20	10	10
63	628,967	4094,298	150	100	50
70	625,46	4094,714	28	9	19
77	626,904	4097,126	86	8	78
79	626,455	4097,247	90	24	66
80	627,129	4097,917	108	12	96
84	628,25	4098,51	144	14	130
87	627,726	4098,408	132	20	112
90	628,19	4098,64	147	12	135
97	628,116	4100,321	209	37	172
100	626,6	4100,41	170	170	0
146	626,427	4102,036	212	118	94
156	624,45	4097,26	96	93	3
179	627,015	4091,616	5	12	-7
197	628,76	4095,85	164	67	97
301	623,998	4096,218	30	6	24
302	624,137	4096,086	28	7	21
303	624,962	4096,348	96	112	-16
307	626,668	4097,523	86	17	69
308	626,673	4097,469	84	19	65

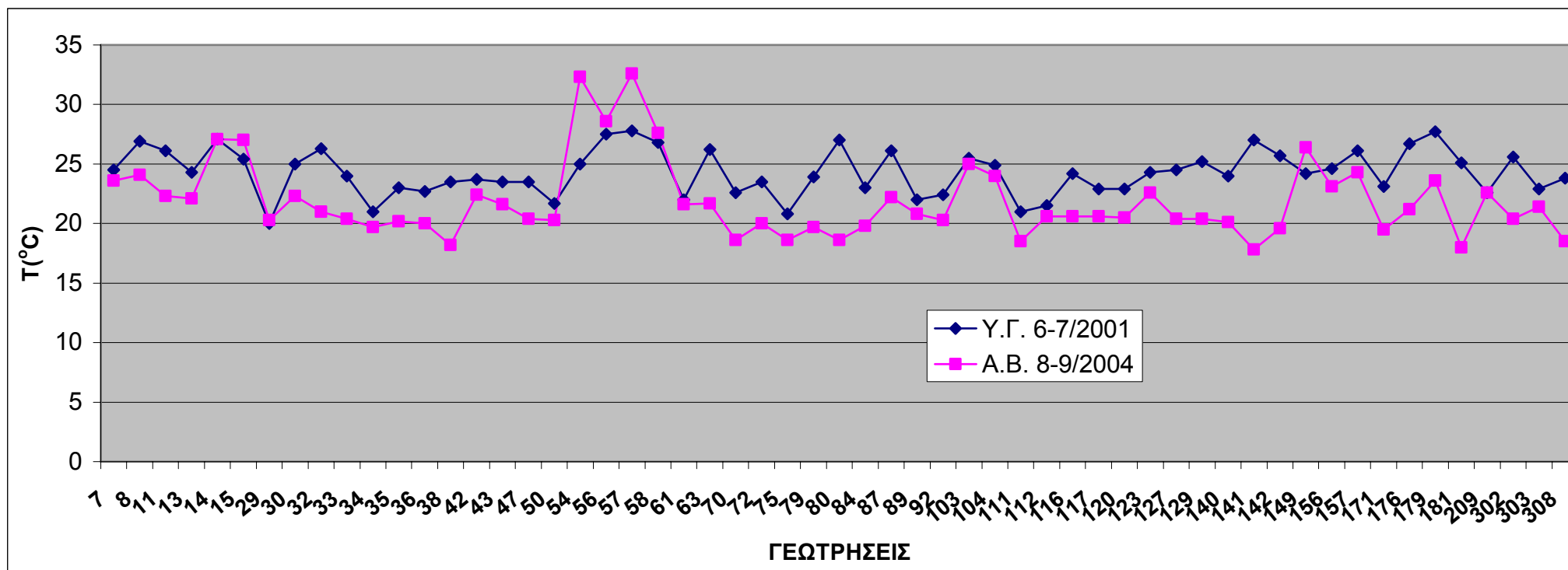


Σχήμα 5.3. Χάρτης πιεζομετρίας της Νάξου. Παρουσιάζεται η ανηγμένη στάθμη του υδροφόρου στο επίπεδο της θάλασσας (ισόβαθμη 0). Οι τιμές είναι σε μέτρα (m). Εμφανής η έντονη ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου στο δυτικό τμήμα του νησιού (μέχρι και 140m κάτω από τη θαλάσσια στάθμη). Με κόκκινες κουκίδες συμβολίζονται οι θέσεις (γεωτρήσεις) όπου μετρήθηκε η στάθμη. Τα δεδομένα των μετρήσεων παραθέτονται στον πίνακα 3 του παραρτήματος Ι. Η κατανομή της στάθμης είναι ακριβής μόνο για την περιοχή όπου υπάρχουν μετρήσεις.

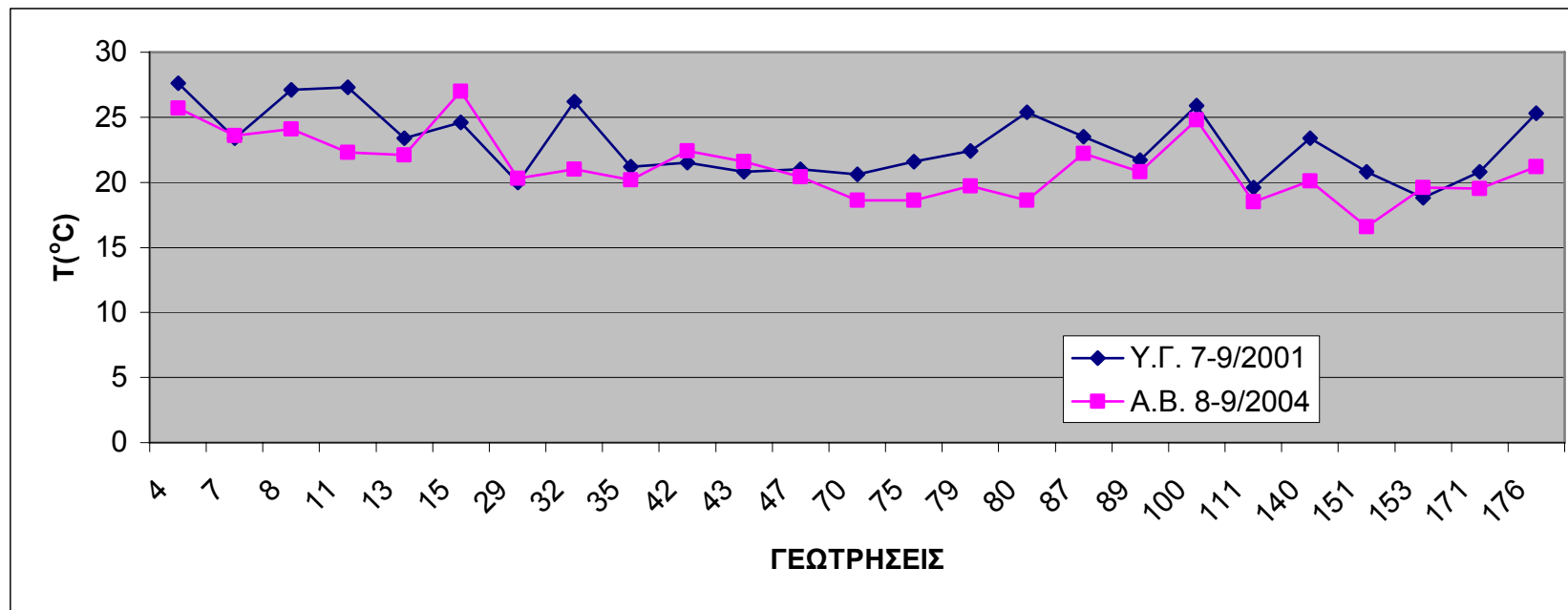
3. Στο βόρειο τμήμα του νησιού κοντά στο χωριό Σκαδό καθώς και στην γύρο περιοχή μετρήθηκαν χαμηλές θερμοκρασίες νερού (γεώτρηση 154 -13.6°C, 187 -14.6°C και 151 16.6 °C). Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία ρηχών υδροφόρων που τροφοδοτούν τις γεωτρήσεις με ψυχρά επιφανειακά νερά. Όπως φαίνεται και από τις χημικές αναλύσεις (βλέπε κεφ. 7.) παρουσιάζουν πολύ χαμηλές περιεκτικότητες σε άλατα, τις χαμηλότερες στο νησί.
4. Στο ανατολικό τμήμα του νησιού η θερμοκρασία των υπόγειων νερών των γεωτρήσεων (από βορειότερα προς νοτιότερα 139, 198, 111, 112, 116, 129, 117, 120, και 123) κυμαίνεται από τους 18.4 °C (γεώτρηση 198) έως τους 22.6 °C (γεώτρηση 123) αυξανόμενη προς τα νότια, όμως οι περισσότερες των γεωτρήσεων έχουν θερμοκρασία νερού ~20 °C και έχουν πραγματοποιηθεί μέσα σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς.
5. Στα διαγράμματα Σχ.5.4, Σχ.5.4 και Σχ.5.6 που ακολουθούν πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν από το Υπουργείο Γεωργίας σε τρεις χρονικές περιόδους και τις δικές μας μετρήσεις για τις αντίστοιχες γεωτρήσεις (Πίνακας 5.1). Και στα τρία γραφήματα φαίνεται ότι οι τιμές των θερμοκρασιών στην κεφαλή των γεωτρήσεων που κατεγράψαν κατά την άντληση υπογείων νερών το 2000-2001 από το Υπουργείο Γεωργίας είναι για όλες σχεδόν τις γεωτρήσεις υψηλότερες από τις δικές μας μετρήσεις στις αντίστοιχες γεωτρήσεις. Είναι πολύ πιθανό η διαφορά αυτή να οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά θερμόμετρα ή ακόμα και σε διαφορετικό τρόπο πραγματοποίησης των μετρήσεων. Παρόλα αυτά οι μετρήσεις του Υπουργείου Γεωργίας έγιναν σε μια περίοδο έντονης ξηρασίας για το νησί (βλέπε κεφ 4.4). Αντιθέτως οι δικές μας μετρήσεις ακολούθησαν μια περίοδο εντονότατων βροχοπτώσεων. Έτσι λόγω της περιόδου έντονων βροχοπτώσεων που προηγήθηκε των δικών μας μετρήσεων, κατείδυσαν στους υδροφόρους μεγάλες ποσότητες μετεωρικού νερού το οποίο ανέβασε τη στάθμη των υπόγειων υδάτων και ταυτόχρονα, λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του, μείωσε την θερμοκρασία των υπόγειων νερών ενώ κατά τις ξηρές περιόδους οι γεωτρήσεις αντλούν νερά που βρίσκονται βαθύτερα και είναι συνήθως θερμότερα.



Σχήμα 5.4 Παράθεση σε γράφημα της θερμοκρασίας του νερού στην κεφαλή των αντίστοιχων γεωτρήσεων που μετρήθηκε από υπαλλήλους του Υπουργείου Γεωργίας κατά την περίοδο Αυγούστου – Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου του 2000 (μπλε γραμμή Υ.Γ. 8-10/2000) και από εμάς την περίοδο Αυγούστου – Σεπτεμβρίου του 2004 (ροζ γραμμή Α.Β. 8-9/2004).

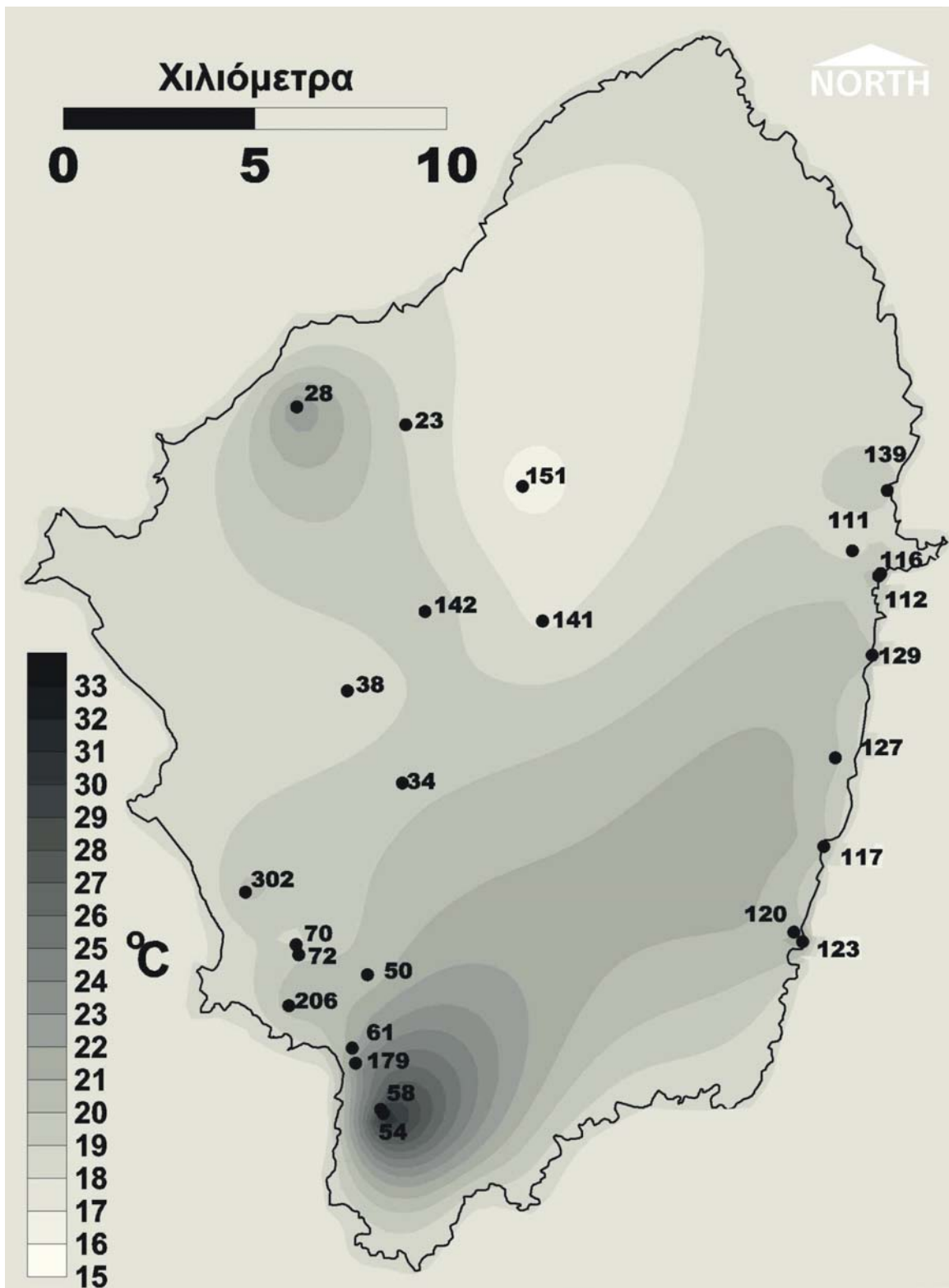


Σχήμα 5.5 Παράθεση σε γράφημα της θερμοκρασίας του νερού στην κεφαλή των αντίστοιχων γεωτρήσεων που μετρήθηκε από υπαλλήλους του Υπουργείου Γεωργίας κατά την περίοδο Ιουνίου - Ιουλίου του 2001 (μπλε γραμμή Υ.Γ. 6-7/2001) και από εμάς την περίοδο Αυγούστου – Σεπτεμβρίου του 2004 (ροζ γραμμή Α.Β. 8-9/2004).

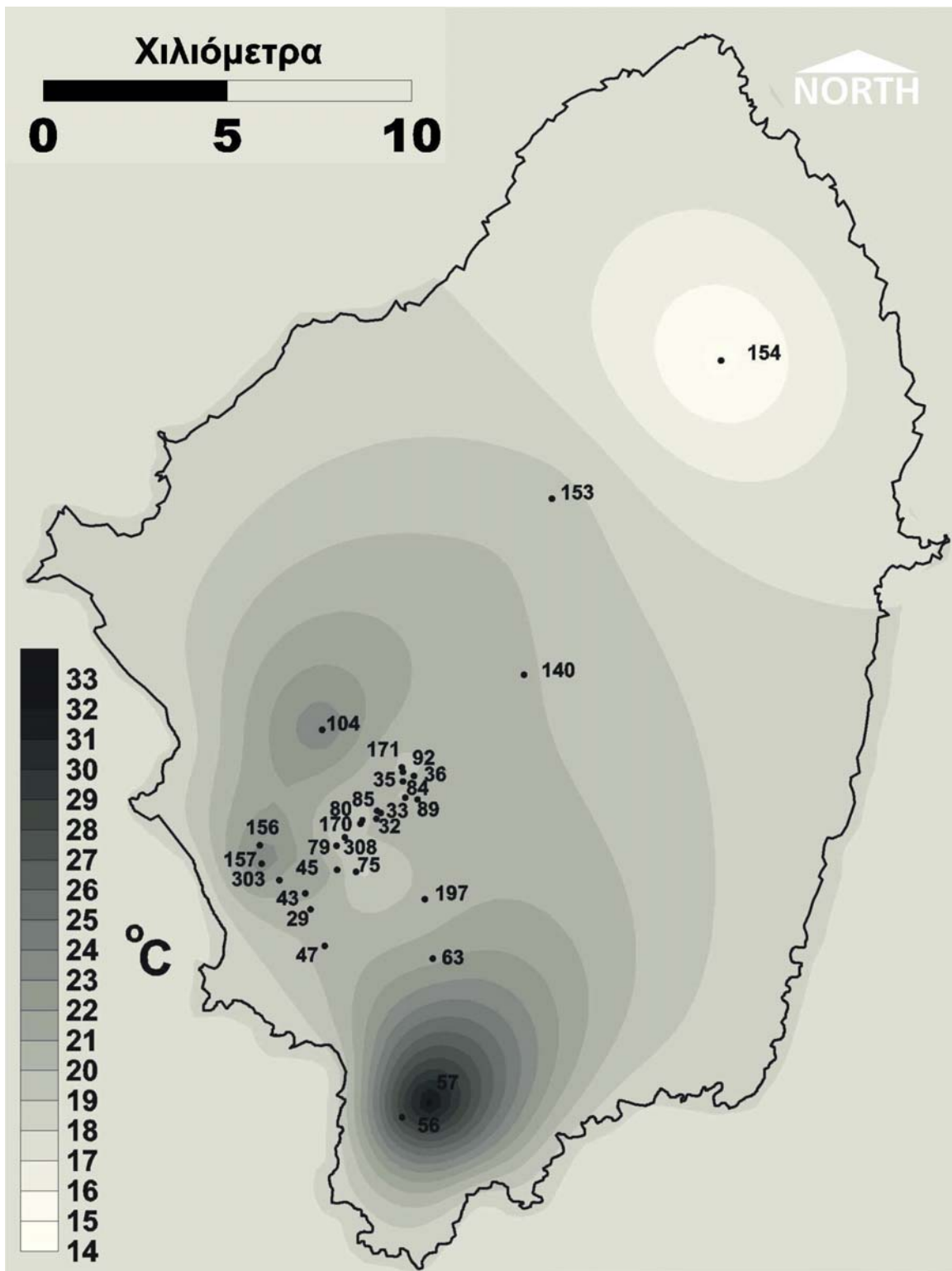


Σχήμα 5.6 Παράθεση σε γράφημα της θερμοκρασίας του νερού στην κεφαλή των αντίστοιχων γεωτρήσεων που μετρήθηκε από υπαλλήλους του Υπουργείου Γεωργίας κατά την περίοδο Ιουλίου – Αυγούστου - Σεπτεμβρίου του 2001 (μπλε γραμμή Υ.Γ. 7-9/2001) και από εμάς την περίοδο Αυγούστου – Σεπτεμβρίου του 2004 (ροζ γραμμή Α.Β. 8-9/2004).

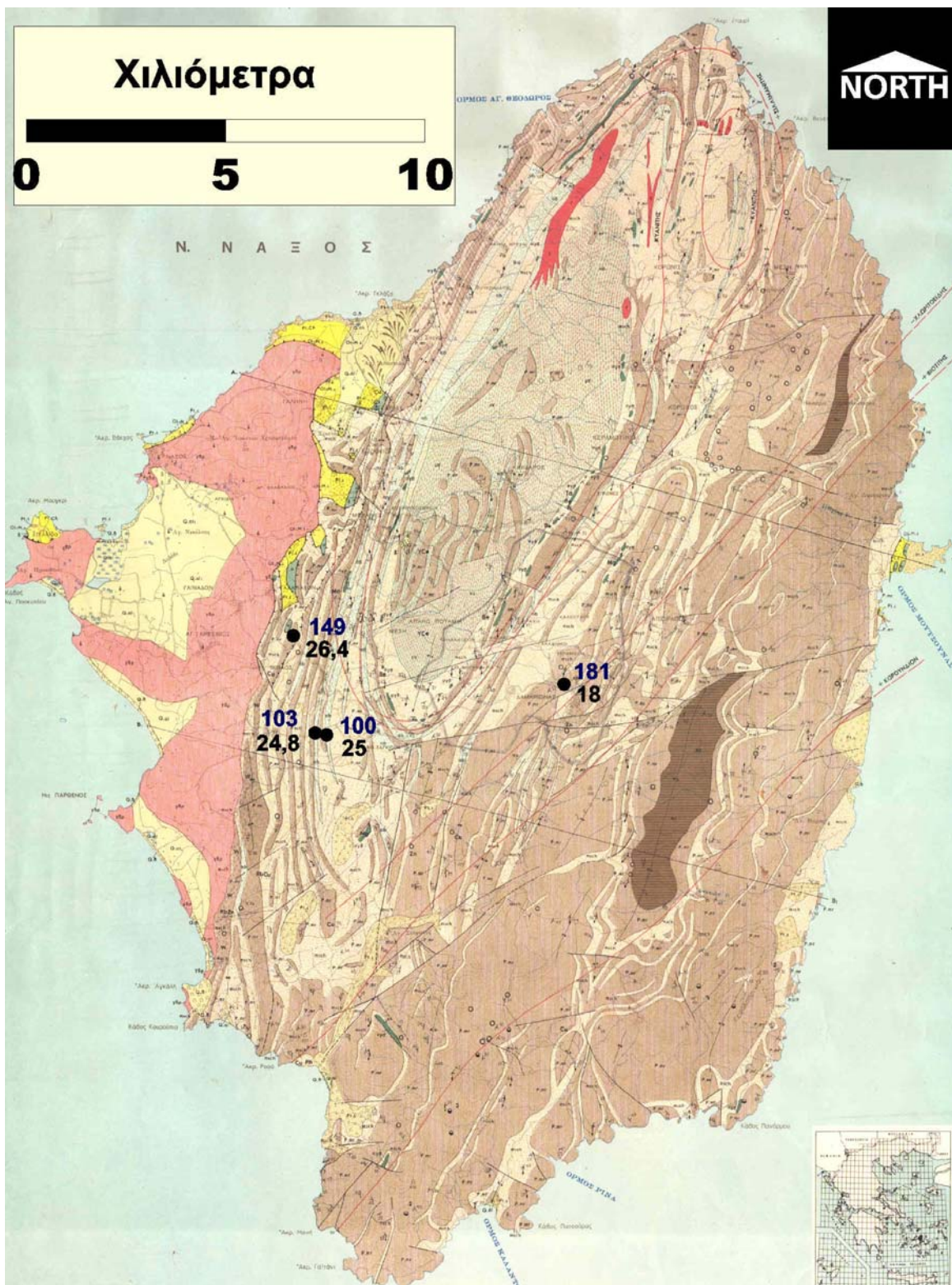
6. Πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των γεωτρήσεων ανάλογα με το βάθος τους. Έτσι χωρίστηκαν οι γεωτρήσεις σε 5 ομάδες ως ακολούθως: 0-100m, 100-200m, 200-300m, 300-400m και 400-550m και κάθε ομάδα γεωτρήσεων τοποθετήθηκε σε ξεχωριστό χάρτη παραθέτοντας παράλληλα και την τιμή της θερμοκρασίας νερού που μετρήθηκε στην κεφαλή κάθε μίας από αυτές κατά την άντληση (Σχ.5.7 έως Σχ. 5.11). Σε όλους τους χάρτες είναι εμφανές ότι υπάρχει μια τάση αύξησης της θερμοκρασίας όσο κινούμαστε προς νότο. Δευτερευόντως οι γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στην επαφή του γρανοδιορίτη με τα μεταμορφωμένα πετρώματα, τείνουν να έχουν μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας νερού από αυτές που βρίσκονται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του νησιού. Συγκεκριμένα τα υπόγεια νερά των γεωτρήσεων 156,157 και 303 που βρίσκονται κοντά στο όριο μεταξύ του γρανοδιορίτη και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων έχουν θερμοκρασία 3-4°C υψηλότερη από αυτά γεωτρήσεων παρόμοιου βάθους που βρίσκονται δυτικότερα. Η θερμοκρασία νερού που μετρήθηκε στη γεώτρηση 28, η οποία βρίσκεται στο βόρειο άκρο του γρανοδιορίτη, ήταν 23 °C, τιμή 4-5 °C μεγαλύτερη από αυτές των γεωτρήσεων που βρίσκονται δυτικότερά της. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η επαφή του γρανοδιορίτη με τα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι τεκτονική, κανονικό ρήγμα μικρής γωνίας κλίσης. Ακόμη και από τη γεωμορφολογία αλλά και από την τεκτονική φαίνεται ότι δυτικά της επαφής και παράλληλα σε αυτή, εκτείνεται ένα αντίκλινο. Τρία υποπαράλληλα ρήγματα βρίσκονται κοντά στο νότιο τμήμα της επαφής και στην περιοχή όπου έχουν πραγματοποιηθεί οι γεωτρήσεις 156, 157 και 303. Η αντικλινική αυτή δομή σε συνδυασμό με τη συνδρομή των ρηγμάτων και την κλίση των στρωμάτων προς την επαφή, είναι πιθανό να τροφοδοτούν υδροφόρους, που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος (400-500m) με μετεωρικό νερό, το οποίο να θερμαίνεται και εν συνεχεία να ανέρχεται προς την επιφάνεια. Η γεώτρηση 104 βάθους 130m έχει θερμοκρασία νερού κατά την άντληση 24 °C. Η συγκεκριμένη γεώτρηση βρίσκεται στην περιοχή Τουμπακάδες στην οποία, όπως έχει προαναφερθεί, κυριαρχούν γεωτρήσεις μεγάλου βάθους, κατά την άντληση των οποίων ανέρχονται προς την επιφάνεια νερά βαθύτερων υδροφόρων, υψηλότερης θερμοκρασίας και συνεπώς είναι πολύ πιθανό να επηρεάζεται με αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων της περιοχής και του νερού που αντλείται από την 104.



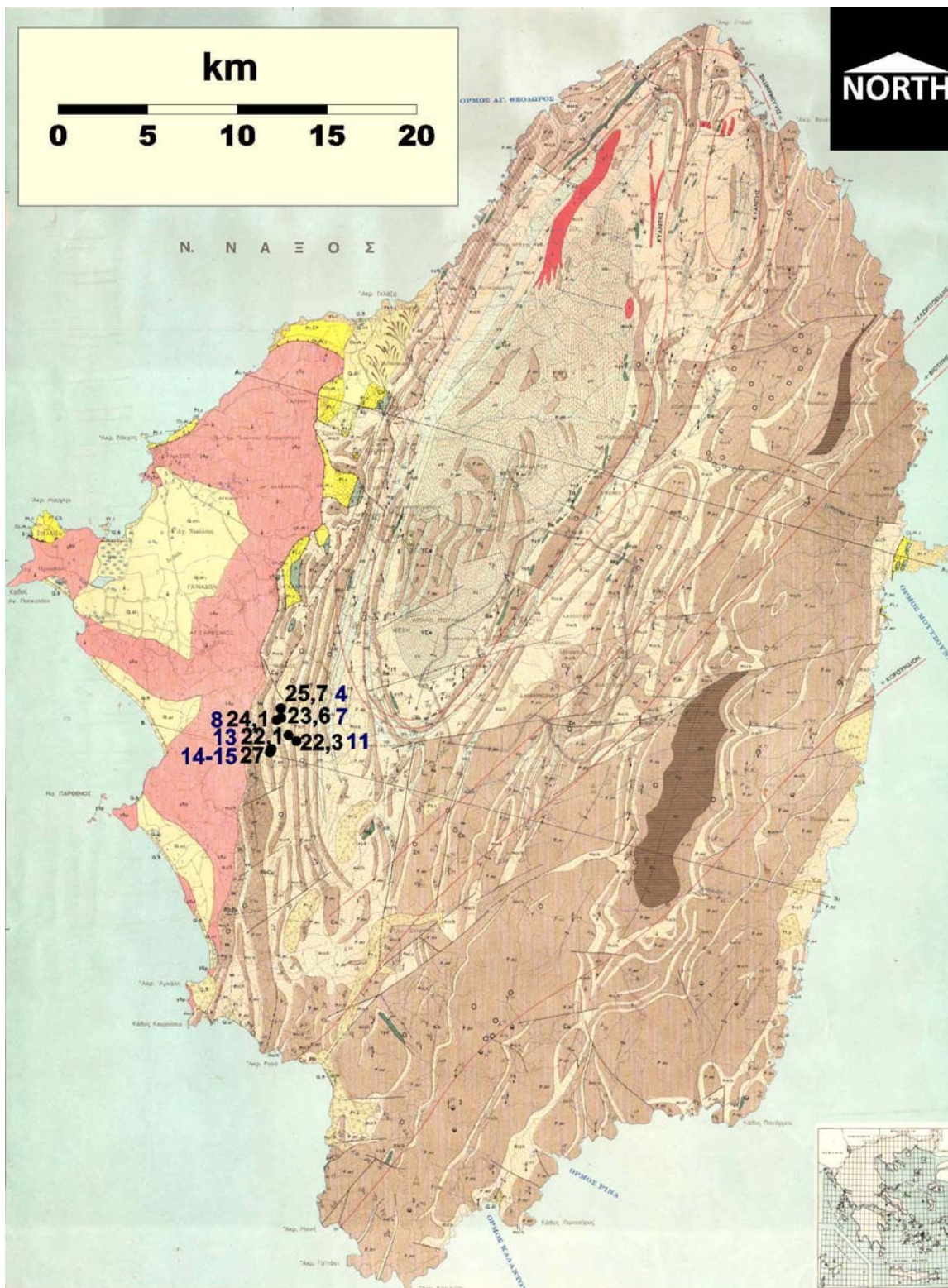
Σχήμα 5.7. Κατανομή των θερμοκρασιών νερών που μετρήθηκαν στην κεφαλή γεωτρήσεων βάθους από 0 – 100 m κατά την άντληση.



Σχήμα 5.8 Κατανομή θερμοκρασιών νερού που μετρήθηκαν στην κεφαλή γεωτρήσεων βάθους από 100 - 200 m κατά την άντληση.

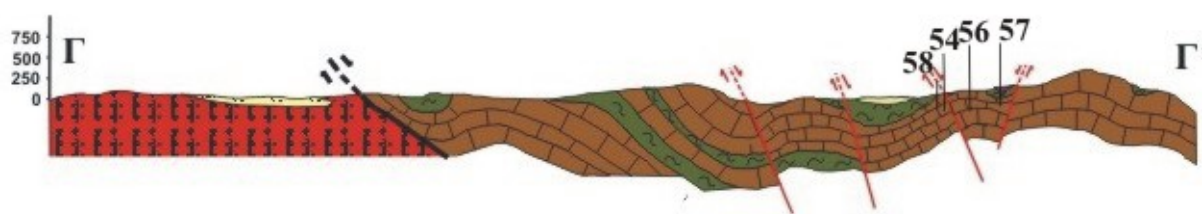


Σχήμα 5.10 Θερμοκρασίες νερού που μετρήθηκαν στην κεφαλή γεωτρήσεων βάθους από 300 - 400 m κατά την άντληση. Με τα μπλε γράμματα παρουσιάζεται ο κωδικός της γεώτρησης ενώ με τα μαύρα η θερμοκρασία νερού που μετρήθηκε.



Σχήμα 5.11 Θερμοκρασίες νερού που μετρήθηκαν στην κεφαλή γεωτρήσεων βάθους από 400 - 550 m κατά την άντληση. Με τα μπλε γράμματα παρουσιάζεται ο κωδικός της γεώτρησης ενώ με τα μαύρα η θερμοκρασία νερού που μετρήθηκε.

7. Στο γεωλογικό χάρτη της Νάξου χαράχθηκαν τρεις 3 γεωλογικές τομές με σκοπό την πληρέστερη κατανόηση της δομής του νησιού για να φανεί αν η τεκτονική και η γεωλογία του νησιού συνδράμουν στην ανάπτυξη μιας γεωθερμικής ανωμαλίας. Η τομή Γ Γ' αφορά την περιοχή όπου εμφανίζεται η εν λόγω γεωθερμική ανωμαλία η οποία είναι (περιοχή Αγιασσός όπως αναφέρθηκε ανωτέρω). Όπως φαίνεται και στον γεωλογικό χάρτη της Νάξου οι γεωτρήσεις 58, 57, 56 και 54 βρίσκονται μέσα σε μία τεκτονική λεκάνη ΝΔ της οποίας δημιουργείται ένα αντίκλινο. Στην ευρύτερη περιοχή τα μάρμαρα και κατά θέσεις οι υποκείμενοι των μαρμάρων σχιστόλιθοι τέμνονται από 3 υποπαράλληλα ρήγματα (Σχ. 5.12).



Σχήμα 5.12 Γεωλογική τομή του ΓΓ' (ΒΔ-ΝΑ) , όπως αυτή έχει χαραχθεί στο χάρτη του παραρτήματος, στην οποία εμφανίζονται οι γεωτρήσεις στην περιοχή Αγιασσός όπου μετρήθηκαν υψηλές θερμοκρασίες υπόγειων υδάτων.

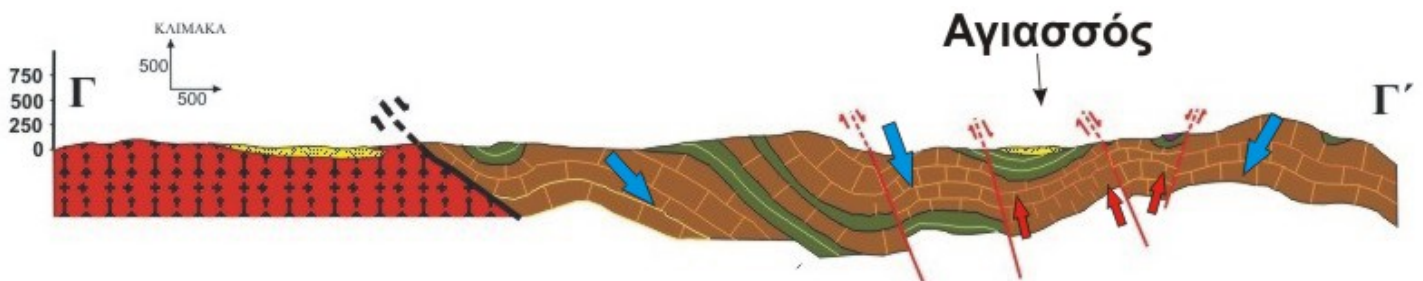
Η περιοχή όπου έχουν πραγματοποιηθεί αυτές οι 4 γεωτρήσεις παρουσιάζει έντονο τεκτονισμό. Αποτελεί τη μεγαλύτερη τεκτονική λεκάνη του νησιού. Οι κλίσεις των ρηγμάτων και των στρωμάτων εκατέρωθεν της λεκάνης καθώς και το γεγονός ότι ΝΑ και ΒΔ της παρουσιάζονται δυο αντικλινικές δομές δημιουργεί ευνοϊκούς όρους για συγκέντρωση και ακόλουθη κατείσδυση όμβριων υδάτων σε ικανό βάθος ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία τους και την εν συνεχεία άνοδό τους στην επιφάνεια μέσω των ρηγμάτων. Στην συγκεκριμένη περιοχή εντοπίστηκαν οι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας υπόγειων υδάτων στο νησί.

Αν θεωρήσουμε ότι η κλίση της επαφής του γρανοδιορίτη με τα παρακείμενα πετρώματα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχ.5.12, είναι πολύ πιθανό να συναντάται κάτω από την περιοχή όπου έχουν πραγματοποιηθεί οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις, σε βάθος το οποίο θα ξεπερνά το 3 km. Φαίνεται λοιπόν ότι το συγκεκριμένο σώμα, για το οποίο η διαδικασία ψύξης έχει ολοκληρωθεί προ πολλού, δεν είναι ο κύριος λόγος πρόκλησης αυτής της γεωθερμικής ανωμαλίας. Ίσως αυξάνει τη θερμοκρασία των προσκείμενων σε αυτόν σχηματισμών μέσω της διάσπασης ραδιενεργών στοιχείων τα οποία περιέχονται μέσα σε αυτόν.

Ένα πιθανό γεωθερμικό μοντέλο για την περιοχή είναι το εξής (Σχ.5.13):

Το νερό της βροχόπτωσης αρχικά κατείσδυει, μέσω των ρηγμάτων, των διακλάσεων και των ρωγμών στα καρστικοποιημένα μάρμαρα, σε ικανό βάθος. Τα νερά αυτά θερμαίνονται στο βάθος αφού έλθουν σε επαφή με θερμότερα πετρώματα και αναμειγνύονται μερικά με κάποια ποσότητα θαλασσινού νερού (βλέπε κεφ 7.). Στη συνέχεια ανέρχονται εύκολα και γρήγορα προς την επιφάνεια με την βοήθεια των εφελκυστικών ρηγμάτων που προαναφέρθηκαν.

Συνεπώς για την εύρεση θερμότερων γεωθερμικών ρευστών θα πρέπει να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις μέσα στη λεκάνη και κοντά στα στις ζώνες ρηγματώσης των τριών νοτιότερων ρηγμάτων.



Σχήμα 5.13 Υποθετικό μοντέλο για την περιοχή της Αγιασσού όπου και παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες υπόγειων νερών. Με τα μπλε βέλη παριστάνεται η κατείσδυση των μετεωρικών υδάτων ενώ με τα κόκκινα η άνοδος των θερμών υδάτων με τη βοήθεια των ρηγμάτων.

6. Χημική Γεωθερμομετρία.

Οι θερμοκρασίες των βαθύτερων γεωθερμικών ρευστών μπορούν να εκτιμηθούν από τη χημική σύσταση των θερμών νερών που βρίσκονται στην επιφάνεια ή κοντά σ' αυτήν. Τα γεωθερμόμετρα, χημικά και ισοτοπικά, είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην έρευνα των ρευστών των γεωθερμικών πεδίων, για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας που αναμένεται να έχουν στους βαθείς ταμιευτήρες και συνεπώς αποτελούν πολύτιμα εργαλεία στην εκτίμηση υπόγειων γεωθερμικών πεδίων και στην παρακολούθηση της υδρολογίας των συστημάτων κατά την παραγωγή (Barbier, 1998).

Η πρόβλεψη βασίζεται στην εφαρμογή εμπειρικών μαθηματικών σχέσεων μεταξύ διαφόρων χημικών στοιχείων και θερμοκρασίας, αφού οι συγκεντρώσεις κάποιων συστατικών και ο λόγος ορισμένων στοιχείων μπορούν να συσχετισθούν με την υπόγεια θερμοκρασία, κάνοντας μερικές διευθετήσεις για το βαθμό ανάμιξης του νερού του γεωθερμικού ταμιευτήρα με ψυχρότερα υπόγεια νερά (Gupta, 1980, Barbier, 1998). Οι σχέσεις αυτές διατυπώνονται κατόπιν μελέτης των χημικών αναλύσεων του νερού, του χημισμού των πετρωμάτων, των εργαστηριακών πειραμάτων και τη γνώση της μέγιστης θερμοκρασίας που έγινε γνωστή σε πλήρως μελετημένα γεωθερμικά πεδία και αναφέρονται στην κατάσταση ισορροπίας των γεωθερμικών ρευστών.

Για την καλή εφαρμογή των γεωθερμομέτρων θα πρέπει να θεωρηθεί ότι οι συνέπειες της αραίωσης είναι ασήμαντες και ότι έχει επιτευχθεί θερμοδυναμική ισορροπία. Γενικά, τα γεωθερμόμετρα που βασίζονται σε λόγους στοιχείων είναι πιο ανθεκτικά σε επιδράσεις αραίωσης σε σχέση με αυτά που βασίζονται σε απόλυτες συγκεντρώσεις (Barbier, 1998). Η ανάμιξη των θερμών νερών του ταμιευτήρα με κανονικά ψυχρά υπόγεια νερά μπορεί να μεταβάλλει τις συγκεντρώσεις των κρίσιμων στοιχείων σε ένα γεωθερμόμετρο και να έχει συνέπειες στην υπολογιζόμενη θερμοκρασία ώστε αυτή να είναι είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη της πραγματικής (Wright, 1991).

Συνηθισμένα χημικά γεωθερμόμετρα είναι αυτά του SiO_2 , του Na/K , του Na-K-Ca , του Na-Li , του K-Mg , του Li-Mg , κ.ά. Διαφορετικά γεωθερμόμετρα συχνά παρέχουν διαφορετικά αποτελέσματα, για το ίδιο θερμό νερό μιας περιοχής. Η χρήση των άλλων γεωχημικών και γεωλογικών δεδομένων μπορούν να βοηθήσουν στην εξαγωγή του σωστού συμπεράσματος, ρίχνοντας φως στην σχετική αξιοπιστία των διαφόρων γεωθερμομέτρων και σε συγκεκριμένες γεωλογικές καταστάσεις (Wright, 1991). Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην ερμηνεία των δεδομένων των χημικών γεωθερμομέτρων, αφού οποιοσδήποτε μπορεί να εφαρμόσει τις εξισώσεις των γεωθερμομέτρων, αλλά η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι εξαιρετικά λεπτή και περίπλοκη.

6.1 Γεωθερμόμετρο του SiO₂.

Το SiO₂ εμφανίζεται με διαφορετικές μορφές : χαλαζία, χαλκηδόνιου, χριστοβαλίτη, άμορφου πυριτίου. Ο χαλαζίας είναι η πιο βασική μορφή του SiO₂ και έχει τη χαμηλότερη διαλυτότητα (Ellis & Mahon, 1977). Η διαλυτότητα του χαλαζία επηρεάζεται από την παρουσία διαλυμένων αλάτων, εκτός κι αν αυτά υπάρχουν σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο νερό (Ellis & Mahon, 1977). Η διαλυτότητα του SiO₂ αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ οι μεταβολές στην πίεση έχουν ελάχιστη επίδραση σ' αυτό (Ellis & Mahon, 1977).

Οι θερμοκρασίες που υπολογίζονται με το πυριτικό γεωθερμόμετρο (SiO₂) συνήθως θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν τις χαμηλότερες πιθανές τιμές, αν και πιστεύεται ότι το γεωθερμόμετρο αυτό λειτουργεί ικανοποιητικά για θερμοκρασίες πάνω από 150 °C (Bowen, 1989). Κι αυτό γιατί πιθανόν να μην εκπληρώνονται οι εξής προϋποθέσεις (Καλλέργης, 1986), που θα πρέπει να ισχύουν για την εφαρμογή του γεωθερμομέτρου του SiO₂ :

- (i) Η διάλυση του χαλαζία και των άλλων μορφών SiO₂ να έχει γίνει μόνο στο βαθύ ταμιευτήρα,
- (ii) να μην υπάρχουν απώλειες σε χαμηλότερες θερμοκρασίες,
- (iii) να μη λαμβάνει χώρα ανάμιξη θερμού νερού με άλλα υπόγεια νερά, που ενδεχομένως να οδηγήσει σε μεταβολή της συγκέντρωσης του SiO₂.

Ακόμη και αν το νερό κινείται γρήγορα κατά την άνοδό του μπορεί να διατηρήσει αμετάβλητη την αρχική του συγκέντρωση. Επομένως το SiO₂ μεταφέρει την πληροφορία της θερμοκρασίας του βαθύτερου ταμιευτήρα, με την προϋπόθεση να παραμένει και να διατηρείται στο θερμό διάλυμα η αρχική συγκέντρωσή του. Είναι δυνατόν, κατά τη διαδρομή των γεωθερμικών ρευστών προς την επιφάνεια, να υπάρχει αλλοίωση της αρχικής συγκέντρωσης του SiO₂ λόγω καθίζησης από διάφορες αιτίες (απότομη πτώση θερμοκρασίας, μείωση του pH, μεγάλη διαδρομή της αβαθούς κυκλοφορίας, βραδύτητα κυκλοφορίας του νερού, απότομη πτώση πίεσης). Επίσης, μπορεί να μην υπάρχει καθίζηση, αλλά να λαμβάνει χώρα ανάμιξη με κρύα επιφανειακά νερά. Ακόμη, είναι δυνατόν να έχουμε διαλυτοποίηση SiO₂ από πυριτικά πετρώματα εκ μέρους των γεωθερμικών ρευστών, με αποτέλεσμα τον ελαφρύ εμπλουτισμό αυτών σε SiO₂ και συνεπώς, πάλι, μεταβολή της αρχικής του συγκέντρωσης που είχε στον ταμιευτήρα. Όλες αυτές οι περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη κάθε φορά και ανάλογα με τις γεωλογικές και άλλες συνθήκες της κάθε περιοχής.

Έχουν προταθεί διάφοροι τύποι γεωθερμομέτρων του SiO₂. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{(5.19 - \log \text{SiO}_2)} - 273.15$$

που αφορά το γεωθερμόμετρο του χαλαζία χωρίς απώλεια ατμού για θερμοκρασίες 0-250 °C (Fournier, 1981) και στην οποία η συγκέντρωση του SiO₂ εκφράζεται σε ppm (mg/l) ενώ έχουν υπολογιστεί και οι τιμές που δίνουν και τα υπόλοιπα γεωθερμόμετρα SiO₂.

6.2 Γεωθερμόμετρα Na/K και Na-K-Ca.

Ο λόγος Na/K στα νερά χρησιμοποιήθηκε σαν γεωθερμόμετρο από τους ερευνητές κυρίως στα πετρώματα που περιέχουν αστρίους, όπου φαίνεται ότι μεταβάλλεται αντίστροφα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, δηλ. χαμηλή τιμή του λόγου Na/K αντιστοιχεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο λόγος αυτός σχετίζεται με την αντίδραση ανταλλαγής ιόντων Na⁺ και K⁺ (Ellis & Mahon, 1977) : K⁺ + Na-άστριος = K-άστριος + Na⁺.

Γενικά, πάντως, το γεωθερμόμετρο Na/K λειτουργεί καλύτερα σε υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία γιαυτό και δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο στην περίπτωση της Νάξου. Δεδομένα υπαίθρου δείχνουν ότι ο ατομικός αριθμός Na/K, για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 180 °C περίπου, είναι ένα χρήσιμο γεωθερμόμετρο (D' Amore & Panichi, 1987). Λόγω του ότι στην περιοχή μας δεν περιμένουμε τόσο μεγάλες θερμοκρασίες τα συγκεκριμένα γεωθερμόμετρα κρίθηκαν μη ακριβή.

Το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca χρησιμοποιείται με σκοπό να διορθωθεί η θερμοκρασία που δίνει το γεωθερμόμετρο του Na-K. Για το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση :

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log(\text{Na} / \text{K}) + \beta [\log(\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2.06] + 2.47} - 273$$

για θερμοκρασίες 4-340°C (Fournier & Truesdell, 1973),

όπου $\beta=4/3$ για $\text{Ca}^{1/2}/\text{Na} > 1$ και $t < 100$ °C

$\beta=1/3$ για $\text{Ca}^{1/2}/\text{Na} < 1$ ή αν $t_{4/3} > 100$ °C

και όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na, K και Ca είναι εκφρασμένες σε ppm.

Χρησιμοποιώντας συγκεντρώσεις σε ppm κατά (Mahon & Ellis 1977 σε mol) υπολογίζεται το $\text{Ca}^{1/2}/\text{Na}$. Αν είναι μικρότερο από 1 υπολογίζεται η θερμοκρασία και το β παίρνει την τιμή 1/3. Αν το $\text{Ca}^{1/2}/\text{Na}$ είναι μεγαλύτερο του 1, το $\beta=4/3$. Αν για την προηγούμενη υπόθεση η θερμοκρασία υπολογίζεται μεγαλύτερη από 100 °C, επαναφέρεται η τιμή 1/3 για το β και χρησιμοποιείται η υπολογισμένη θερμοκρασία. Σε άλλη περίπτωση η θερμοκρασία για $\beta=4/3$ θεωρείται σωστή. Για νερά υψηλής θερμοκρασίας με υψηλή συγκέντρωση σε CO₂, όπου η

συγκέντρωση σε Ca είναι πολύ χαμηλή (λίγα ppm) ο όρος $\beta \log(\text{Ca}^{1/2}/\text{Na})$ μπορεί να γίνει ισχυρά αρνητικός και ασταθής. Σε αυτή την περίπτωση ο απλός λόγος Na/K είναι πιο χρήσιμος. Το ορυκτολογικό υπόβαθρο των γεωθερμομέτρων θα πρέπει να παίρνεται υπ' όψη. Δεν είναι σωστό να εφαρμόζουμε το γεωθερμόμετρο του Na/K ή το Na-K-Ca σε όξινα νερά τα οποία δεν θα είναι σε ισορροπία με τους αστρίους ούτε εφαρμόζονται σε συστήματα νερού, σε πετρώματα με ασυνήθιστες υψηλές ή χαμηλές συγκεντρώσεις ενός συγκεκριμένου αλκαλίου εκτός και αν είναι διαθέσιμες άμεσες συσχετίσεις με μετρημένες θερμοκρασίες.

Το γεωθερμόμετρο Na-K-Ca μπορεί να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα αν η περιεκτικότητα σε CO_2 ή Mg^{2+} είναι πολύ υψηλή (Wright, 1991).

Τα γεωθερμόμετρα Na/K και Na-K-Ca επηρεάζονται λιγότερο από συνθήκες νέας ισορροπίας και αραίωσης κοντά στην επιφάνεια από ότι το γεωθερμόμετρο του SiO_2 (Truesdell, 1975). Τα γεωθερμόμετρα αυτά, αν και εμπειρικά, εξαρτώνται από την ισορροπία μεταξύ των θερμών νερών και των πρωταρχικών αργιλοπυριτικών ορυκτών στο περιβάλλον πέτρωμα ή που παράγονται από εξαλλοίωση. Αν δεν επιτευχθεί ισορροπία ή αν η ορυκτολογική ακολουθία είναι ασυνήθης, τότε είναι δυνατόν να υποδειχθούν παραπλανητικές πληροφορίες.

6.3 Γεωθερμόμετρο Na-Li.

Από πολλούς ερευνητές αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα η μελέτη της σχέσης Na-Li ως προς τη θερμοκρασία. Από μετρήσεις σε διάφορα γεωθερμικά πεδία φαίνεται ότι η σχέση Na/Li και θερμοκρασίας μπορεί να εφαρμοσθεί για πολλά και διαφορετικής πετρολογικής σύστασης πεδία και για ποικίλου χημισμού νερά. Η σχέση Na/Li με τη θερμοκρασία φαίνεται ότι ελάχιστα επηρεάζεται από την ανάμιξη ενώ φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται από τις νέες χημικές ισορροπίες που λαμβάνουν χώρα κατά την άνοδο του νερού. Η μόνη διαφοροποίηση της σχέσης Na/Li και θερμοκρασίας περιορίζεται στα πολύ αλατούχα νερά με $\text{CI} > 0.3$ moles.

Το εμπειρικό γεωθερμόμετρο Na-Li δίνεται από τη σχέση Fouillac & Michard (1981) :

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1000}{(0.14 + \log \frac{\text{Na}}{\text{Li}})} - 273.15$$

για θερμοκρασίες 20-340 °C και για νερά με $\text{CI} < 0.2$ mol (7000 ppm) και όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na^+ και Li^+ είναι εκφρασμένες σε mol.

6.4 Γεωθερμόμετρο K-Mg.

Για το γεωθερμόμετρο K-Mg χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση :

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{4410}{(14 + \log \frac{K^2}{Mg})} - 273.15 \quad (\text{Giggenbach et. al., 1983})$$

όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων K^+ και Mg^{2+} είναι εκφρασμένες σε ppm (mg/l).

Το γεωθερμόμετρο αυτό μπορεί να εφαρμοσθεί όταν με βάση το τριγωνικό διάγραμμα του Giggenbach (1988) κατατάσσονται σε εκείνη την κατηγορία των νερών για τα οποία δεν έχει επέλθει χημική ισορροπία νερού - πετρώματος. Για νερά αυτού του τύπου ο Giggenbach δεν θεωρεί ευνοϊκή τη χρήση του γεωθερμομέτρου Na-K, ενώ αντίθετα θεωρεί ευνοϊκή τη χρήση του γεωθερμομέτρου K-Mg.

Όταν τα δείγματα νερού προβάλλονται στην περιοχή όπου επικρατεί μερική χημική ισορροπία νερού - πετρώματος, τότε η προτεινόμενη θερμοκρασία προκύπτει από τη θέση των δειγμάτων αυτών πάνω στο τριγωνικό διάγραμμα.

6.5 Γεωθερμόμετρο Li-Mg.

Το εμπειρικό γεωθερμόμετρο Li-Mg δίνεται από τη σχέση (Kharaka 1989) :

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1900}{(4.67 + \log \frac{\sqrt{Mg}}{Li})} - 273.15$$

όπου οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε mg/l.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των γεωθερμομέτρων που προαναφέρθηκαν, παραθέτονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Γεωθερμόμετρα SiO₂ σε °C.

Κ Ω Δ Ι Κ Ο Σ	SiO ₂ (mg/l)	Γεωθερμόμετρο SiO ₂ χωρίς απώλειες ατμού (Fournier. 1981)	Γεωθερμόμετρο SiO ₂ μέγιστες απώλειες ατμού 100°C (Fournier. 1977)	Γεωθερμόμετρο Χαλκιδόνιου (Fournier. 1977)	Γεωθερμόμετρο α- Χριστοβαλίτη (Fournier. 1977)	Γεωθερμόμετρο β- Χριστοβαλίτη (Fournier. 1977)	Γεωθερμόμετρο Άμορφου SiO ₂ (Fournier. 1977)
4	13,3	48.78	55.85	16.24	0.36	-42.50	-57.91
7	21	65.29	70.59	33.28	16.05	-28.15	-44.55
8	13,7	49.80	56.77	17.29	1.33	-41.62	-57.09
11	26,1	73.76	78.08	42.12	24.17	-20.67	-37.60
13	20,5	64.37	69.78	32.33	15.18	-28.95	-45.30
23	22,4	67.76	72.78	35.85	18.42	-25.98	-42.53
30	22,6	68.10	73.08	36.21	18.74	-25.68	-42.25
42	18,8	61.13	66.90	28.97	12.09	-31.79	-47.94
45	24	70.44	75.15	38.65	20.99	-23.61	-40.33
47	27,4	75.71	79.80	44.17	26.05	-18.94	-35.99
54	23,9	70.28	75.01	38.48	20.83	-23.76	-40.47
56	26,5	74.36	78.61	42.76	24.76	-20.13	-37.10
57	36,8	88.04	90.60	57.18	37.97	-7.88	-25.70
58	21	65.29	70.59	33.28	16.05	-28.15	-44.55
61	10,1	39.58	47.56	6.85	-8.30	-50.37	-65.22
84	21,2	65.65	70.91	33.66	16.40	-27.84	-44.26
100	29,6	78.85	82.56	47.48	29.08	-16.13	-33.38
103	22,1	67.24	72.32	35.31	17.92	-26.44	-42.96
104	30,9	80.63	84.12	49.35	30.80	-14.54	-31.90
111	8,3	33.34	41.90	0.52	-14.14	-55.66	-70.15
117	12,1	45.56	52.95	12.94	-2.68	-45.27	-60.48
120	11,2	42.97	50.63	10.31	-5.11	-47.48	-62.53
127	13,9	50.30	57.22	17.80	1.80	-41.19	-56.68
129	22,7	68.27	73.23	36.39	18.91	-25.53	-42.11
140	20,9	65.11	70.43	33.09	15.88	-28.31	-44.70
141	25,2	72.36	76.85	40.66	22.83	-21.91	-38.75
142	23,3	69.28	74.13	37.45	19.88	-24.63	-41.28
149	26,1	73.76	78.08	42.12	24.17	-20.67	-37.60
153	46,3	98.26	99.49	68.07	47.94	1.42	-17.06
154	3,2	6.26	17.04	-26.55	-39.22	-78.14	-91.08
156	18,9	61.33	67.07	29.18	12.28	-31.62	-47.78
157	18,5	60.54	66.37	28.36	11.52	-32.31	-48.42
176	18,8	61.13	66.90	28.97	12.09	-31.79	-47.94
179	10,5	40.85	48.71	8.14	-7.11	-49.29	-64.22
181	17,4	58.29	64.36	26.03	9.38	-34.27	-50.25
182	22,5	67.93	72.93	36.03	18.58	-25.83	-42.39
187	19,7	62.88	68.45	30.78	13.75	-30.27	-46.52
198	9,1	36.24	44.53	3.45	-11.44	-53.21	-67.87
206	19,3	62.11	67.77	29.98	13.02	-30.94	-47.15
209	21,2	65.65	70.91	33.66	16.40	-27.84	-44.26
307	14,7	52.25	58.97	19.81	3.65	-39.51	-55.12

Πίνακας 2. Γεωθερμόμετρα Αλκαλίων σε °C.

BH	Γεωθερμόμετρο K/Mg (Giggenbach et. al., 1983)	Γεωθερμόμετρο Mg/Li (Kharaka 1989)	Γεωθερμόμετρο Na/Li (Fouillac & Michard 1981)	Γεωθερμόμετρο Na/K (Fournier, 1979)	Γεωθερμόμετρο Na/K (Arnorsson, 1983)	Γεωθερμόμετρο Na- K-Ca (Fournier & Truesdell, 1973)
4	51.29	40.91	195.99	158.60	161.48	116.59
7	50.62	56.56	278.48	165.72	168.13	122.23
8	46.70	49.42	231.54	172.51	174.46	127.38
11	48.77	66.22	301.47	157.58	160.53	126.68
13	49.56	65.20	301.84	157.75	160.69	118.08
23	57.79	55.27	303.67	158.60	161.48	121.97
30	29.56	53.02	306.49	293.11	284.52	189.47
42	16.26	34.63	185.15	359.69	343.47	222.19
45	28.75	47.50	189.67	220.63	218.90	167.82
47	50.92	117.31	642.50	138.63	142.75	106.88
54	44.90	49.81	188.35	148.83	152.33	120.33
56	43.26	39.28	145.81	150.90	154.27	119.56
57	40.40	43.06	167.76	167.75	170.02	136.11
58	47.45	54.88	201.60	136.66	140.89	109.44
61	19.20	66.74	143.89	161.69	164.37	141.26
84	56.88	41.25	275.15	189.10	189.86	130.04
100	33.51	49.18	141.43	152.31	155.60	134.92
103	31.44	46.22	160.61	186.06	187.04	153.43
104	37.82	52.95	191.71	166.62	168.97	137.09
111	46.66	35.52	126.31	134.36	138.72	115.05
117	66.67	40.57	247.49	145.21	148.93	102.71
120	26.59	62.31	165.70	162.78	165.39	137.27
127	25.82	63.04	149.17	150.27	153.68	126.24
129	48.29	56.46	176.94	115.57	120.96	95.55
140	29.04	53.28	287.37	279.98	272.75	181.37
141	48.07	35.41	205.43	194.81	195.14	136.53
142	55.69	43.20	212.52	149.28	152.75	114.96
149	51.73	37.65	164.98	144.30	148.08	114.04
153	42.44	44.35	172.69	160.68	163.43	126.27
154	18.66	61.95	210.68	239.52	236.14	159.76
156	35.40	59.36	176.94	147.27	150.87	114.20
157	26.59	84.42	207.14	140.04	144.07	114.45
176	36.31	71.19	270.39	172.64	174.58	128.68
179	-4.54	93.16	75.48	131.72	136.24	149.33
181	38.40	49.23	241.81	212.84	211.74	140.38
182	37.11	58.19	259.06	200.20	200.11	145.78
187	31.84	82.43	383.54	216.98	215.55	138.53
198	66.28	34.60	267.35	175.36	177.11	124.43
206	21.64	83.81	156.99	125.15	130.03	121.30
209	53.90	58.80	261.93	141.31	145.27	111.46
307	23.70	49.23	179.18	229.23	226.76	171.76

6.6 Αποτελέσματα Χημικής Γεωθερμομετρίας στη Νάξο.

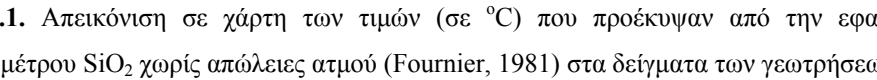
Από την εφαρμογή των γεωθερμομέτρων (Πίνακας 6.1) δε μπορούν να εξαχθούν καθαρά συμπεράσματα αναφορικά με την υποτιθέμενη θερμοκρασία των αρχικών ταμιευτήρων. Μόνο τα γεωθερμόμετρα SiO_2 χωρίς απώλειες ατμού (Fournier, 1981) και SiO_2 μέγιστες απώλειες ατμού 100°C (Fournier, 1977) μπορεί να θεωρηθούν ότι δίνουν λογικότερες τιμές τονίζοντας και τη γεωθερμική ανωμαλία που έχει εντοπισθεί μέσω των θερμομετρήσεων.

Αναλυτικότερα το γεωθερμόμετρο SiO_2 (Σχήμα 6.1) χωρίς απώλειες ατμού (Fournier, 1981) για τα νερά των γεωτρήσεων 54, 57, 57 και 58 που βρίσκονται στην περιοχή της Αγιασσού δίνει θερμοκρασίες αντίστοιχα από 70.28, 74.36, 88.4 και 65.29°C . Για τα υπόλοιπα νερά της περιοχής έρευνας οι εκτιμώμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 39 και 80°C με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται σε γεωτρήσεις που βρίσκονται ανατολικά, κοντά στο γρανοδιοριτικό σώμα και η χαμηλότερη τιμή στη γεώτρηση 154 η οποία βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νησιού. Όπως είναι εμφανές υπάρχει αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων αυτού του γεωθερμομέτρου με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις θερμομετρήσεις (βλέπε κεφ.5). Προβληματισμό δημιουργεί η πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε ιόντα SiO_2 που εμφανίζει το νερό της γεώτρησης 153 (κεντρικό τμήμα του νησιού) και παράλληλα η υψηλή τιμή που δίνουν τα γεωθερμόμετρα πυριτίου για την περιοχή αυτή, τιμή η οποία είναι και η υψηλότερη στο νησί (Σχήμα 6.1). Πιθανότατα το SiO_2 , που είναι διαλυμένο, δεν είναι γεωθερμικής προέλευσης αλλά μάλλον προέρχεται από διαλυτοποίηση πυριτικών ορυκτών σε αβαθείς υδροφόρους πράγμα πολύ πιθανό λόγω του ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση βρίσκεται στο μιγματιτικό πυρήνα, σε αντίθεση με τις θερμές γεωτρήσεις της περιοχής Αγιασσού που έχουν γίνει σε μάρμαρα.

Τα γεωθερμόμετρα Na/Li (Fouillac & Michard 1981), Na/K (Fournier. 1979) και Na-K-Ca Γεωθερμόμετρο Na-K-Ca (Fournier & Truesdell. 1973) δίνουν υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες για όλα τα υπόγεια νερά οι οποίες είναι αντίστοιχα 75.4 - 642.5°C (μόνο μια τιμή είναι μικρότερη των 140°C), 115 - 360°C και 96 - 222°C .

Οι θερμοκρασίες που λαμβάνονται με τη χρήση του εμπειρικού γεωθερμομέτρου Li-Mg (Kharaka & Mariner, 1989) θεωρούνται γενικά ελαφρώς υποβαθμισμένες, τόσο των γεωθερμικών όσο και των λοιπών υπόθεμων νερών. Έτσι, για τα νερά των γεωτρήσεων 54, 56, 57, 58 λαμβάνονται θερμοκρασίες 49.8 , 39.3 , 43.1 και 54.9°C αντίστοιχα. Για τα υπόλοιπα νερά οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 34.6 και 117.3°C .

Με τη χρήση του γεωθερμομέτρου K/Mg (Giggenbach et. al.. 1983) για τα νερά των γεωτρήσεων 54, 56, 57, 58 λαμβάνονται θερμοκρασίες 44.9 , 43.3 , 40.4 και 47.4°C αντίστοιχα. Για τα υπόλοιπα νερά οι υπολογιζόμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ -4.54 και 66.67°C .



7. Υδροχημική Έρευνα Νερών

Η γνώση του χημισμού των γεωθερμικών ρευστών συμβάλει στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την προέλευση αυτών, για την προέλευση των διαλυμένων μέσα σε αυτά στοιχείων και αερίων, για τις συνθήκες του ταμιευτήρα, για τις χημικές διεργασίες που έλαβαν χώρα μέσα σ' αυτόν, για την εκτίμηση της θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα, για τις διόδους κυκλοφορίας των γεωθερμικών ρευστών, για την πιθανή ανάμιξη των γεωθερμικών ρευστών με επιφανειακότερα, μη γεωθερμικά, νερά και για τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στο χημισμό των γεωθερμικών ρευστών στον ταμιευτήρα και στο χημισμό των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια.

Στα πλαίσια της γεωθερμικής έρευνας στη Νήσο Νάξο πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία νερών από 41 γεωτρήσεις κατά την ίδια περίοδο των θερμομετρήσεων (Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2004).

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας των νερών πραγματοποιήθηκαν επί τόπου και πάλι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας τους στην κεφαλή των γεωτρήσεων. Για τις θερμομετρήσεις χρησιμοποιήθηκε φορητό ψηφιακό θερμόμετρο. Η αγωγιμότητα μετρήθηκε με τα αγωγιμόμετρα JENWAY 4071, ενώ για τις μετρήσεις του pH χρησιμοποιήθηκε η φορητή συσκευή HI 9024C της HANNA.. Τα δείγματα από κάθε σημείο συλλέχθηκαν σε δύο φιάλες πολυαιθυλενίου του 1lt, στη μία εκ των οποίων οξινίσθηκαν με τη χρήση διαλύματος HCl έως ότου το pH γίνει ίσο ή περίπου ίσο με 2. Αυτό αποσκοπούσε στην καλύτερη διατήρηση των κατιόντων και στην αποτροπή οποιασδήποτε αλλοίωσής τους (πιθανής καθίζησης) μέχρι τη στιγμή της πραγματοποίησης των χημικών αναλύσεων στο εργαστήριο στη Θεσσαλονίκη. Πριν την οξίνιση έγινε σχολαστική διήθηση για την κατακράτηση των αιωρούμενων λεπτόκοκκων σωματιδίων και υλικών. Σε δεύτερη φιάλη το δείγμα ήταν φυσικό και αναλλοίωτο, προκειμένου να μετρηθούν και εργαστηριακά οι τιμές της αγωγιμότητας και του pH αλλά και να προσδιορισθούν τα στοιχεία που δεν αλλοιώνονται με την πάροδο του χρονικού διαστήματος μεταξύ δειγματοληψίας και χημικής ανάλυσης.

7.1. Μεθοδολογία χημικών αναλύσεων

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από εμάς στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. μετά από σχετικό σύντομο χρονικό διάστημα από την ημερομηνία δειγματοληψίας. Προσδιορίστηκαν τα ιόντα Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Li^+ , B, HCO_3^- , και το SiO_2 . Η επεξεργασία, ο έλεγχος και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων με τα διαγράμματα Piper και Durov έγιναν με το λογισμικό Aquachem.

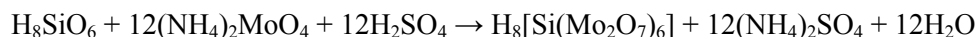
Τα στοιχεία SiO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- και B προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του Φασματοφωτόμετρου HACH 2000. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης άνω των 100 διαφορετικών αναλύσεων, δίνοντας στη συσκευή έναν κωδικό προγράμματος και επιλέγοντας το κατάλληλο για την ανάλυση μήκος κύματος. Το οπτικό του σύστημα χρησιμοποιεί πρίσμα υψηλού διαχωρισμού και πετυχαίνει ακρίβεια στην περιοχή μήκους κύματος από 400 nm μέχρι 900 nm (HACH 1990c). Για τον προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες αναλυτικές μέθοδοι : Για τον προσδιορισμό του SiO_2 εφαρμόστηκε η μέθοδος Silicomolybdate (SILICA, HR), η Μέθοδος Αναγωγής του Καδμίου για τα NO_3^- , η θολερομετρία για τα SO_4^{2-} και η Καρμινική Μέθοδος για το B.

Για τον προσδιορισμό του SiO_2 εφαρμόστηκε η μέθοδος Silicomolybdate (SILICA, HR). Η μέθοδος αυτή εμπεριέχει την αντίδραση του ιόντος Mo με το SiO_2 και τα PO_4^{3-} κάτω από όξινες συνθήκες για το σχηματισμό κιτρινόχρωμου διαλύματος. Για σημαντικές ποσότητες SiO_2 το κίτρινο χρώμα που παραμένει μετά την προσθήκη του κιτρικού οξέος είναι αρκετά έντονο για να αναγνωσθεί άμεσα. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σ' αυτή την αναλυτική διαδικασία είναι οι εξής (HACH 1990b) :

(α) Το πυριτικό οξύ αντιδρά με νερό και ενυδατώνεται κατά την αντίδραση



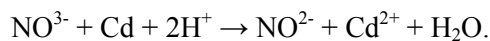
(β) Αυτό το ενυδατωμένο πυριτικό οξύ αντιδρά με ενώσεις μολυβδαινίου με την παρουσία οξέων και σχηματίζεται πυριτικομολυβδικό οξύ :



Το διάστημα των τιμών συγκέντρωσης που μπορεί να μετρήσει το χρωματόμετρο όσον αφορά το SiO_2^{2+} είναι μεταξύ 0.0 και 40.0 mg/l.

Για τον προσδιορισμό του NO_3^- χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος Αναγωγής του Καδμίου. Εφαρμόστηκε τόσο η υψηλής κλίμακας όσο και η χαμηλής κλίμακας μέθοδος.

Στην υψηλή κλίμακας αναλυτική τεχνική το μέταλλο κάδμιο (Cd) χρησιμοποιείται για την αναγωγή των νιτρικών ιόντων (NO_3^-) σε νιτρώδη (NO_2^-) σύμφωνα με την αντίδραση:



Στη συνέχεια τα νιτρώδη ιόντα (NO_2^-) αντιδρούν σε ένα όξινο μέσο με σουλφανικό οξύ και σχηματίζεται ένα διαζώνιο άλας, το οποίο όταν ενωθεί με γεντισικό οξύ σχηματίζει ένα κεχριμπαρόχρωμο διάλυμα. Η ένταση του χρώματος αυτού του τελευταίου διαλύματος είναι απευθείας ανάλογη με τη συγκέντρωση των νιτρικών στο δείγμα του νερού (HACH 1990b). Το εύρος των τιμών συγκέντρωσης είναι μεταξύ 0 και 30 mg/l NO_3^- -N και πολλαπλασιάζοντας στη συνέχεια με τον συντελεστή 4.4 μετατρέπονται σε mg/l NO_3^- (HACH 1990d)

Στη χαμηλής κλίμακας αναλυτική τεχνική, το Cd χρησιμοποιείται για την αναγωγή των NO_3^- σε NO_2^- (όπως προηγουμένως). Τα NO_2^- αντιδρούν με σουλφανικό οξύ και σχηματίζεται ένα διαζώνιο άλας, το οποίο όταν ενωθεί με χρωμοτροπικό οξύ σχηματίζει

πορτοκαλόχρωμο σύμπλεγμα, του οποίου η ένταση του χρώματος είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των NO_3^- (HACH 1990b). Το εύρος των τιμών συγκέντρωσης είναι μεταξύ 0 και 4.5 mg/l NO_3^- -N και πολλαπλασιάζοντας στη συνέχεια με τον συντελεστή 4.4 μετατρέπονται σε mg/l NO_3^- (HACH 1990d).

Για τον προσδιορισμό των SO_4^{2-} χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SulfaVer4, που περιγράφεται στο εγχειρίδιο χημικών αναλύσεων της εταιρείας HACH και λαμβάνει το όνομά της από το ομώνυμο χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιείται. Το αντιδραστήριο αυτό περιέχει βάριο (Ba) το οποίο, αντιδρώντας με τα υπάρχοντα SO_4^{2-} , σχηματίζει αδιάλυτο θειικό βάριο (BaSO_4) που προκαλεί θολότητα του διαλύματος (HACH 1990b). Το μέγεθος της θολότητας είναι ανάλογο της συγκέντρωσης των SO_4^{2-} και γι' αυτό η αναλυτική αυτή μέθοδος βασίζεται στη θολομετρία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ένα εύρος τιμών από 0 έως 65 mg/l SO_4^{2-} (HACH 1990d). Αν το δείγμα νερού περιέχει SO_4^{2-} των οποίων η συγκέντρωση υπερβαίνει το παραπάνω ανώτατο όριο, τότε γίνεται η σχετική αραίωσή του με απιονισμένο νερό.

Το βόριο (B) προσδιορίστηκε από την αντίδρασή του με καρμινικό οξύ, με την παρουσία θειικού οξέος (H_2SO_4), που οδηγεί στο σχηματισμό ενός ερυθρωπού έως υποκύανου χρώματος διαλύματος. Η ένταση του χρώματος είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του βορίου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ένα εύρος τιμών από 0 έως 14 mg/l B (HACH 1990d).

Τα αλκάλια K^+ , Na^+ και Li^+ προσδιορίστηκαν με τη χρησιμοποίηση του Φλογοφωτόμετρου PFP 7 της εταιρείας JENWAY και τη χρήση καταλλήλων πρότυπων διαλυμάτων που περιείχαν γνωστές περιεκτικότητες των στοιχείων που επρόκειτο να προσδιορισθούν. Η αρχή λειτουργίας του φλογοφωτόμετρου στηρίζεται στο γεγονός ότι η ένταση της φλόγας του οργάνου είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του ιόντος που αναρροφάται. Η επιλογή του ιόντος, που κάθε φορά προσδιορίζεται, ρυθμίζεται με την χρήση του κατάλληλου φίλτρου. Με τη βοήθεια των πρότυπων διαλυμάτων κατασκευάζεται το διάγραμμα συσχέτισης των συγκεντρώσεων (σε ppm) και της ένδειξης της συσκευής, που χαρακτηρίζεται ως καμπύλη βαθμονόμησης. Μετά την κατασκευή της καμπύλης αυτής τοποθετούνται τα δείγματα του νερού και προσδιορίζονται οι πραγματικές περιεκτικότητες τους από την ένδειξη του οργάνου. Αν οι περιεκτικότητες κάποιων δειγμάτων υπερβαίνουν τα όρια της καμπύλης αυτής τότε συνήθως πραγματοποιείται αραίωση των δειγμάτων, έτσι ώστε αυτά να τοποθετούνται μέσα στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε ιόν έχει τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη και συνεπώς πρέπει να κατασκευάζονται ξεχωριστές καμπύλες για το καθένα.

Τα ιόντα Ca^{2+} και Mg^{2+} προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. με τη διαδικασία προσδιορισμού της σκληρότητας με τη μέθοδο

της ογκομέτρησης και τιτλοδότησης με EDTA με τη μέθοδο HACH και χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό τιτλοδότη τύπου 16900-01 (*HACH 1988e*).

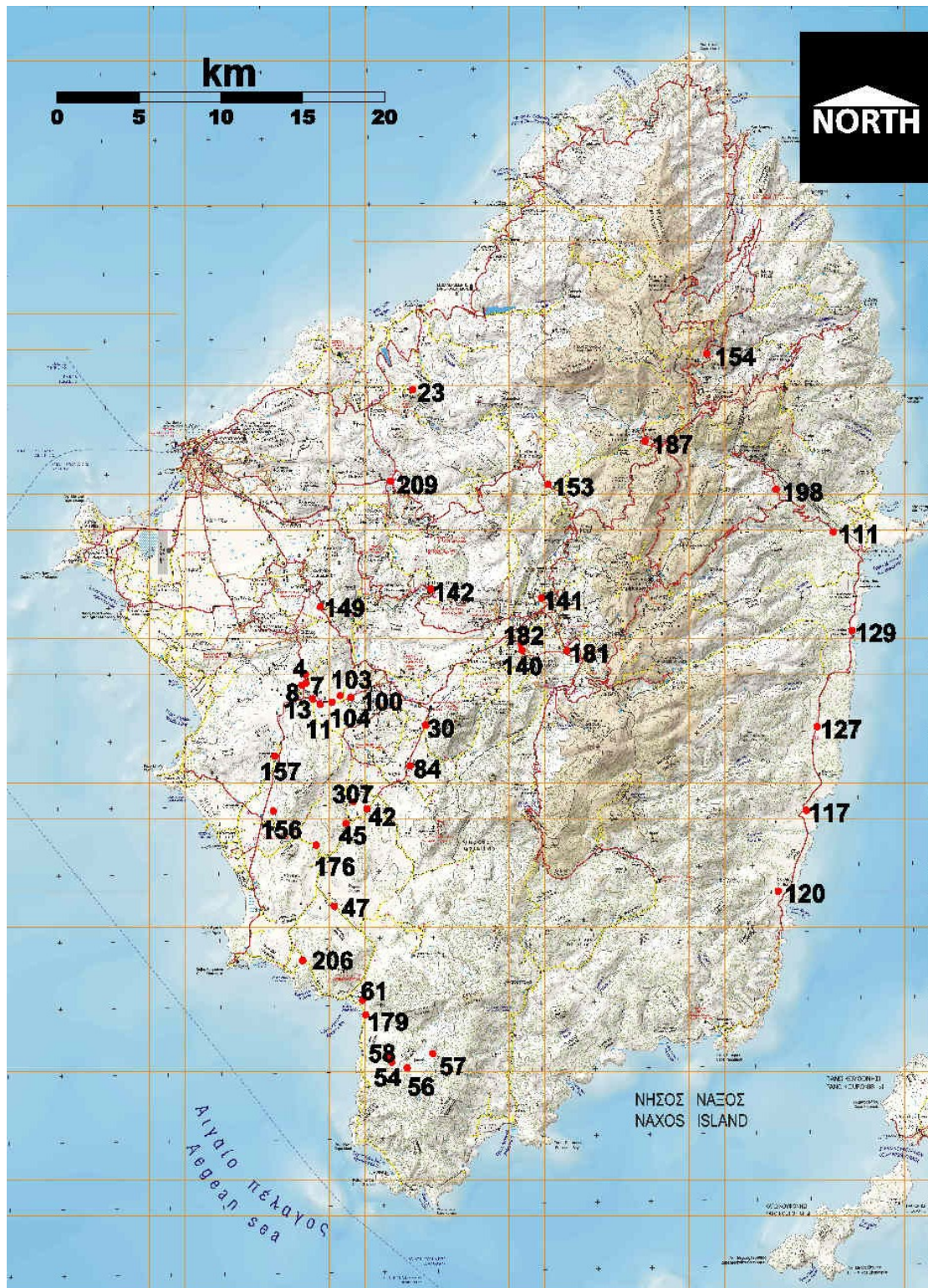
Τέλος τα ιόντα Cl^- προσδιορίστηκαν με άμεση τιτλοδότηση του δείγματος νερού. Η αλλαγή του χρώματος του υδάτινου διαλύματος προσδιορίζει τη συγκέντρωση των ιόντων Cl^- .

7.2. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων

Για την αξιολόγηση του υδροχημικού χαρακτήρα των νερών της εξεταζόμενης περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων από 41 δείγματα. Οι περιεκτικότητες εκφράζονται σε mg/l. Εκτός από τις χημικές παραμέτρους παρατίθενται και οι σημαντικότερες φυσικοχημικές παράμετροι κάθε δείγματος, όπως αγωγιμότητα, pH, θερμοκρασία και Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (TDS).

Το Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (TDS) είναι η συνολική συγκέντρωση διαλυμένων στο νερό αλάτων (*Καλλέργης 1986*) και υπολογίζεται από την άθροιση των συγκεντρώσεων των μεμονωμένων ιόντων, συμπεριλαμβανομένου και του διαλυμένου SiO_2 (*Fetter, 1994*).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των αναλύσεων προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθότητα της αναλυτικής διαδικασίας και να διαπιστωθεί τυχόν σφάλμα αυτής (*Λαμπράκης 1991*). Το σφάλμα από το ισοζύγιο των θετικών και των αρνητικών φορτίων εκφράζεται από τη διαφορά τους σαν ποσοστό επί τοις % του αθροίσματος και δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5-7%, προκειμένου το αποτέλεσμα της χημικής ανάλυσης να θεωρηθεί αξιόπιστο. Σε κάποια δείγματα το σφάλμα υπερβαίνει το προαναφερόμενο ποσοστό. Το σφάλμα ισοζυγίου (ή αναλυτικό σφάλμα) αναγράφεται στην τελευταία σειρά του Πίνακα 7.1. Στο τοπογραφικό διάγραμμα του Σχ.7.1. απεικονίζονται οι θέσεις δειγματοληψίας.



Σχήμα 7.1. Τοπογραφικός χάρτης της Νήσου Νάξου με απεικονισμένες τις θέσεις δειγματοληψίας.

Πίνακας 7.1. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπογείων νερών της περιοχής (από υπάρχουσες γεωτρήσεις)

							Περιεκτικότητες ιόντων και ενώσεων εκφρασμένες σε (mg/l)											Σ φ ά λ μ α (%)
a/a	Δείγμα	pH	Ολική σκληρότητα	T °C	EC μS/cm	TDS	SO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Cl	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺²	SiO ₂	B ⁻	K ⁻	Na ⁻	Mg ⁺²	Li ⁺²	
1	4	7,41	428	25,7	950	659	78	42	81	247	106,3	13,3	0,2	3	65	23	0,2	7,3
2	7	7,19	470	23,6	1260	939,24	190	97,24	156	229	125,2	21	0	4	78	38,3	0,5	3
3	8	7,54	336	24,1	950	566,3	27	56,8	24	263	83,8	13,7	0	3,9	69	24,8	0,3	18,1
4	11	7,56	574	22,3	1260	1067,3	194	25,6	161	358	91,6	26,1	0	6	132	72	1	4,9
5	13	7,44	456	22,1	1020	735,2	38	24	158	267	116,5	20,5	0	3,6	79	28	0,6	7,5
6	23	7,32	294	18,8	730	568	43	6,6	110	227	48	22,4	0	3	65	42,5	0,5	5,8
7	30	7,34	322	22,3	770	587,1	74	4,4	86	236	69	22,6	0	11	51	32,7	0,4	4,4
8	42	7,22	542	22,4	1100	754	184	7	141	138	124,8	18,8	0,1	26,5	73	40,6	0,2	13,2
9	45	7,43	416	21,0	1250	916,6	138	8,4	201	266	73,4	24	0	14,5	139	51,9	0,4	4,8
10	47	7,27	455	20,4	1310	889,6	10	33	200	354	143,2	27,4	0,1	3,1	92	23,7	3,1	3,9
11	54	7,21	472	32,3	1520	972,64	62	77,44	287	216	116,6	23,9	0	5,6	141	42,7	0,4	4,8
12	56	7,28	382	28,6	1260	866,7	63	15,4	187	317	109,2	26,5	0	4,8	117	26,6	0,2	3,3
13	57	7,41	601	32,6	1720	1187,8	46	5,7	418	307	110,4	36,8	0	9,4	178	76,1	0,4	5
14	58	7,32	280	27,6	920	630,22	37	34,32	129	219	78,8	21	0	3	92	15,8	0,3	4,2
15	61	7,44	302	21,6	2160	1283,74	40	26,84	515	267	92,4	10,1	0,1	14,5	300	17,3	0,5	1,8
16	84	7,27	503	19,8	955	700,3	149	123,2	94	103	108	21,2	0	3,4	48	50,2	0,3	18,2
17	100	7,77	409	24,8	1400	1098,9	225	15,3	248	214	63,2	29,6	0	10,4	248	45	0,4	7,4
18	103	7,73	394	25,0	1490	1033,8	260	4,4	238	181	62,8	22,1	0	13,2	194	57,9	0,4	4,7
19	104	7,28	742	24,0	1600	1303,82	254	3,52	303	308	115,2	30,9	0	10,6	204	74	0,6	5,4
20	111	7,51	336	18,5	1220	915,84	70	11,44	313	244	73,2	8,3	0,5	4,8	153	37,4	0,2	3,4
21	117	7,29	347	20,6	760	600,58	28	14,08	71	310	100	12,1	0	1,5	40	23,7	0,2	5
22	120	7,38	370	20,5	1550	1066,9	50,2	28,2	342	271	100,3	11,2	0	11,2	228	24,3	0,5	4,9
23	127	7,21	418	20,4	1630	1142,78	50	29,48	347	311	143,2	13,9	0	9,1	224	14,7	0,4	5,6
24	129	7,24	397	20,4	1240	920,14	94	4,84	155	370	136	22,7	0,7	2,7	120	13,9	0,3	2,9
25	140	7,67	697	20,1	1160	1003,9	164,2	24,3	176	313	168	20,9	0	14	73	50	0,5	17,8
26	141	7,37	415	17,8	950	732,62	80	7,92	104	310	104	25,2	0	4,5	59	37,8	0,2	5,6
27	142	7,34	180	19,6	700	482,18	10	7,48	101	223	41,2	23,3	0	2,2	55	18,8	0,2	6,1
28	149	7,75	332	26,4	1080	767,7	170	8,8	157	197	82,4	26,1	0	3,4	92	30,8	0,2	2,7
29	153	7,21	218	19,6	720	532,02	36	3,52	128	161	52	46,3	0	4	84	17	0,2	4,7
30	154	7,48	83	13,6	270	183,2	28	5	38	48,4	27,3	3,2	0,6	3,6	28	1	0,1	4,3
31	156	7,36	222	23,1	880	623,18	10	71,28	152	202	80,8	18,9	0	3,1	80	4,9	0,2	5,7
32	157	7,42	234	24,3	820	640,8	48	30,6	134	205	81,2	18,5	0	4	116	3,1	0,4	4,6
33	176	7,3	329	21,2	1070	594,4	44	36	147	146	102	18,8	0	4,7	83	12,4	0,5	10,1
34	179	7,05	996	18,5	14100	11756,68	840	11,88	5460	1050	312,8	10,5	0	117	3900	52,3	2,2	1
35	181	7,31	357	18,0	860	568,2	56	33,2	91	194	119,2	17,4	0	4	42	11,2	0,2	8,3
36	182	7,36	624	18,0	1350	1075	196	4,8	194	334	156,8	22,5	0	8,9	109	48,4	0,6	5,3
37	187	7,63	175	14,6	420	230,56	22	8,36	42	43	66,8	19,7	0	2,4	24	2	0,3	30,5
38	198	7,68	285	20,6	530	441,6	27	9,2	78	202	39,4	9,1	0	2	34	40,7	0,2	4,8
39	206	7,27	762	20,6	4600	3031,58	270	5,28	1440	286	240	19,3	1	19	710	39,6	1,4	4,5
40	209	7,46	952	22,6	1760	1467,3	313	141	338	205,6	218	21,2	0,7	5	142	82	0,8	5,5
41	307	7,19	1003	18,5	2590	1951,52	380	36,52	514	408	236	14,7	0	26,9	234	100,8	0,6	2,1
	M.o	7,40	442		1534,0	1158,3	124,4	27,9	347,8	262,2	110,2	20,4	0,1	10,0	219,4	35,4	0,5	6,7

Γενικά χαρακτηριστικά

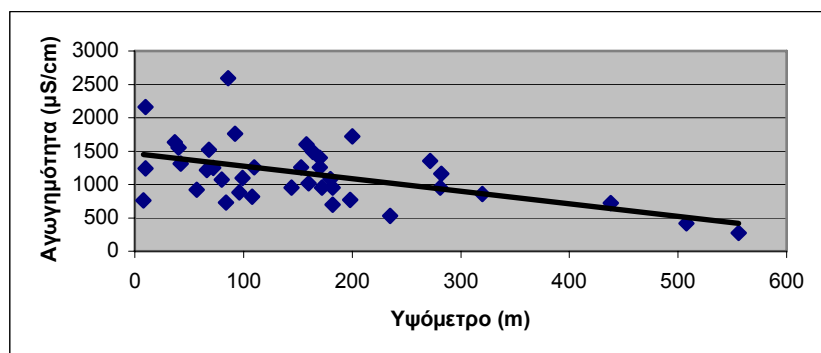
Από τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, προέκυψε ο Πίνακας 7.2, ο οποίος παρουσιάζει τη μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή των παραμέτρων που μετρήθηκαν καθώς και την τυπική τους απόκλιση:

Πίνακας 7.2. Διακύμανση φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των υπογείων νερών της περιοχής

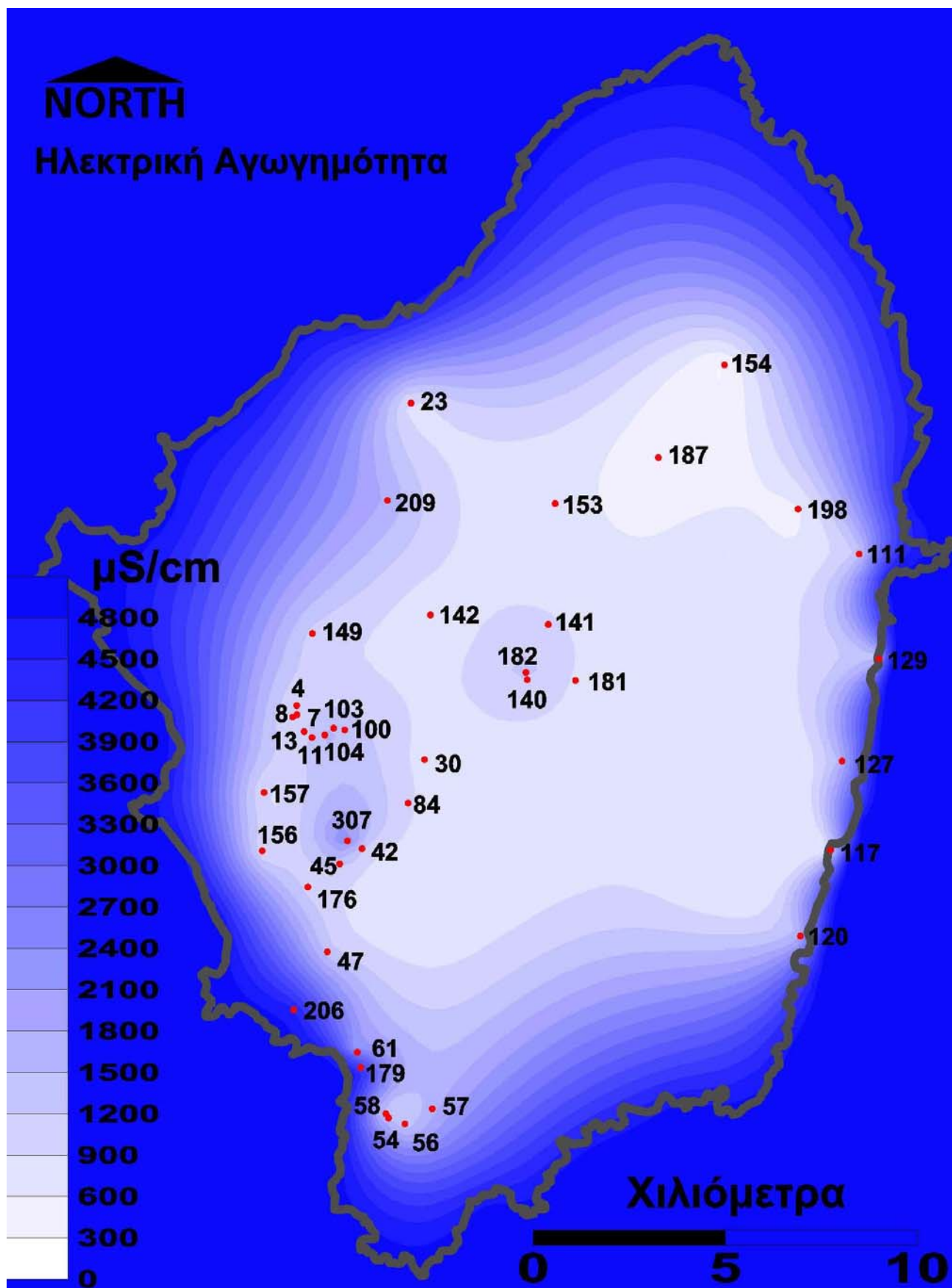
Παράμετροι	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
pH	7.05	7.77	7.40	0.17
E.C. ($\mu\text{S cm}^{-1}$ at 25 °C)	210	14100	1534	982
T.H. (mg L^{-1} CaCO_3)	83	1003	440	208
T.D.S.	178.5	11,280	1273	785
T (°C)	13.6	36.6	25.7	2.3
Ca^{2+} (mg L^{-1})	27.3	312.8	110.2	57.9
Mg^{2+} (mg L^{-1})	1.0	100.8	35.4	23.1
Na^+ (mg L^{-1})	24	3900	219.4	600.3
K^+ (mg L^{-1})	1.5	117.0	9.9	18.1
HCO_3^- (mg L^{-1})	43.0	1050	262.2	149.4
Cl^- (mg L^{-1})	24.0	5460	347.3	849.7
SO_4^{2-} (mg L^{-1})	10.0	840	124.3	148.2
NO_3^- (mg L^{-1})	3.52	141.0	27.9	32.2
SiO_2 (mg L^{-1})	3.2	46.3	20.5	7.7
Na^+/Cl^-	0.42	2.87	0.66	0.38
$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	0.03	1.33	0.36	0.25

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.1, οι τιμές του pH παρουσιάζουν πολύ μικρή διακύμανση (7.05-7.77) με μέση τιμή το 7.40 υποδηλώνοντας ότι τα νερά της Νάξου είναι ουδέτερα έως πολύ ελαφρά αλκαλικά.

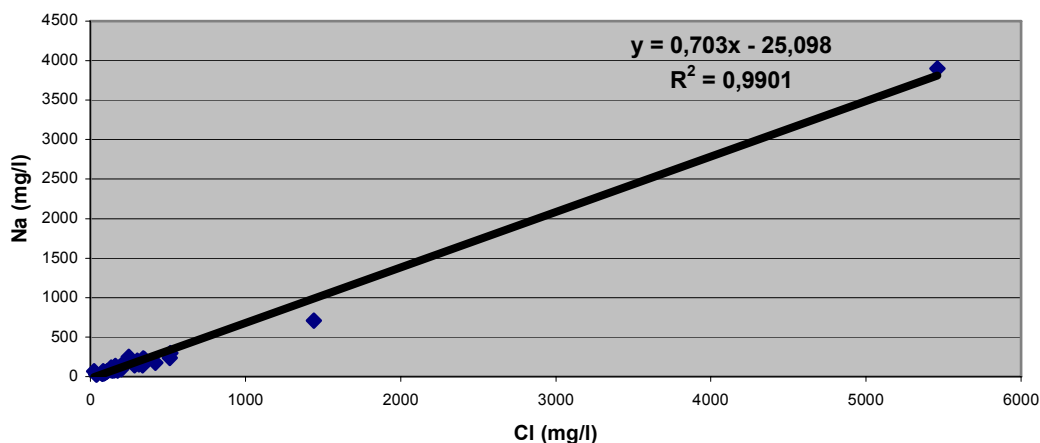
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, έχοντας ελάχιστη τιμή 210 $\mu\text{S/cm}$ και μέγιστη 14100 $\mu\text{S/cm}$. Όπως φαίνεται από το γράφημα που ακολουθεί, οι τιμές παρουσιάζουν μείωση με το υψόμετρο της γεώτρησης από την οποία πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία του εκάστοτε νερού, πράγμα που χωρίς άλλο υποδεικνύει την επίδραση της θάλασσας (Σχήμα 7.2.).



Σχήμα 7.2. Γράφημα συσχέτισης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του υψόμετρου των γεωτρήσεων δειγματοληψίας.



Σχήμα 7.3 Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\mu\text{S/cm}$) των υπόγειων νερών



Σχήμα 7.4 Διάγραμμα μεταβολής Na – Cl

Η συσχέτιση μεταξύ των ιόντων Na^+ και Cl^- είναι πάρα πολύ καλή ($R^2=0.9901$), γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι έχουν κοινή προέλευση. Στην περίπτωση των υπόγειων νερών της Νάξου, τα προαναφερόμενα ιόντα προέρχονται προφανώς από το θαλάσσιο νερό. Σημαντικός είναι ο ρόλος των αερομεταφερόμενων υδροσταγονιδίων από τη θάλασσα στην υφαλμύρωση αβαθών υδροφόρων στρωμάτων (Dazy J., Drogue C., Charmanidis Ph., Darlet Ch. (1997)).

Γενικότερα η κατανομή περιεκτικότητας των ιόντων Na^+ , K^+ , Cl^- και Mg^{2+} στο νησί παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με αυτή της αγωγιμότητας, παρουσιάζοντας μικρότερες τιμές στο ανατολικό τμήμα του νησιού απ' ότι στο δυτικό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της γεωργοκτηνοτροφικής δραστηριότητας καθώς και το μεγαλύτερο μέρος της άντλησης υδάτων γίνεται στο δυτικό τμήμα του νησιού (το οποίο έχει και χαμηλότερο ανάγλυφο), με αποτέλεσμα οι γεωτρήσεις να αντλούν νερό παλαιότερο, βαθύτερων υδροφόρων με κάποιο επηρεασμό από το θαλάσσιο νερό και συνεπώς επιφορτισμένο με περισσότερα άλατα (δες κεφ. 7.3). Επίσης, η περιεκτικότητα των ιόντων NO_3^- και SO_4^{2-} , τα οποία προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη χρήση φυτοφαρμάκων και από αστικά-κτηνοτροφικά απόβλητα, παρουσιάζεται αυξημένη στα υπόγεια νερά του δυτικού τμήματος του νησιού σε σχέση με το ανατολικό.

Στο Παράρτημα του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται οι υδροχημικοί χάρτες των ιόντων NO_3^- , SO_4^{2-} και Ca^{2+} .

7.3 Προέλευση των υπόγειων υδάτων - Ιοντικοί λόγοι

Οι λόγοι των συγκεντρώσεων (εκφρασμένων σε meq/l) διαφόρων ιόντων μέσα στο νερό είναι ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο για τον καθορισμό της προέλευσης του νερού (Λαμπράκης, 1991). Η διερεύνηση αυτή έγινε με βάση τους ιοντικούς λόγους Na^+ / K^+ , Mg^{+2} / Ca^{+2} , Cl^- / SO_4^{2-} , $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / (K^+ + Na)$, οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4. Τιμές των ιοντικών λόγων των νερών της νήσου Νάξου.

Δείγμα	Ιοντικοί δείκτες (meq/l)			
	Na^+ / K^+	Mg^{2+} / Ca^{2+}	Cl / SO_4^{2-}	$(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / (K^+ + Na^+)$
4	36,74	0,36	1,41	2,48
7	33,07	0,50	1,11	2,69
8	30,00	0,49	1,20	2,01
11	37,30	1,29	1,12	1,78
13	37,21	0,40	5,63	2,30
23	36,74	1,46	3,47	2,03
30	7,86	0,78	1,57	2,46
42	4,67	0,54	1,04	2,49
45	16,25	1,16	1,97	1,24
47	50,32	0,27	27,10	2,23
54	42,69	0,60	6,27	1,49
56	41,33	0,40	4,02	1,47
57	32,11	1,13	12,31	1,48
58	52,00	0,33	4,72	1,29
61	35,08	0,31	17,44	0,45
84	23,94	0,77	0,85	4,38
100	40,43	1,17	1,49	0,62
103	24,92	1,52	1,24	0,90
104	32,63	1,06	1,62	1,30
111	54,05	0,84	6,06	0,99
117	45,22	0,39	3,44	3,91
120	34,52	0,40	9,23	0,69
127	41,74	0,17	9,40	0,84
129	75,36	0,17	2,23	1,50
140	8,84	0,49	1,45	3,54
141	22,23	0,60	1,76	3,10
142	42,39	0,75	13,68	1,47
149	45,88	0,62	1,25	1,63
153	35,61	0,54	4,82	1,07
154	13,19	0,06	1,84	1,11
156	43,76	0,10	20,59	1,25
157	49,17	0,06	3,78	0,84
176	29,94	0,20	4,53	1,64
179	56,52	0,28	8,81	0,12
181	17,80	0,15	2,20	3,57
182	20,77	0,51	1,34	2,38
187	16,96	0,05	2,59	3,17
198	28,83	1,70	3,91	3,48
206	63,36	0,27	7,23	0,49
209	48,16	0,62	1,46	2,80
307	14,75	0,70	1,83	1,85

- Λόγος $r(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / r(K^{+} + Na)$

Είναι γνωστό ότι ο λόγος $r(Ca^{+2} + Mg^{+2}) / r(K^{+} + Na)$ παρουσιάζει τιμές υψηλότερες της μονάδας στις περιοχές εμπλουτισμού των υδροφόρων, ενώ στις περιοχές μειωμένου εμπλουτισμού η σχέση αυτή λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας. Όπως προκύπτει από τα δεδομένα, τα νερά στις περισσότερες περιοχές του νησιού και κυρίως στο κεντρικό και πλέον ορεινό του τμήμα παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες της μονάδας συνεπώς οι περιοχές αυτές αποτελούν περιοχές εμπλουτισμού των υδροφόρων μέσω της κατείσδυσης των ομβρίων υδάτων όπως είναι λογικό και αναμενόμενο. Τα νερά μερικών γεωτρήσεων (111, 103, 127, 157, 120, 100, 206, 61 και 179), οι οποίες βρίσκονται κοντά στις ακτές του νησιού παρουσιάζουν τιμές <1, υποδηλώνοντας θέσεις εκφόρτισης των υδροφόρων.

- Λόγος rMg^{+2} / rCa^{+2}

Ο λόγος rMg^{+2} / rCa^{+2} δίνει πληροφορίες για την προέλευση του νερού (0.5 - 0.7 ασβεστολιθικοί υδροφόροι, 0.7 - 0.9 δολομιτικοί υδροφόροι, > 0.9 υδροφόροι πυριτικών πετρωμάτων, > 1 υδροφόροι σε μαγματικά ή μεταμορφωμένα πετρώματα). Από τα δεδομένα προκύπτει ότι σε μερικές μόνο γεωτρήσεις (198, 103, 23, 11, 100, 45, 57, 104) τα νερά που αντλούνται προέρχονται από υδροφόρους που αποτελούνται από ορυκτά με υψηλή συγκέντρωση SiO_2 και όπως φαίνεται και στο χάρτη του Σχ.7.1 σε συνδυασμό με το γεωλογικό χάρτη οι προαναφερόμενες γεωτρήσεις βρίσκονται κυρίως σε σχιστολιθικούς σχηματισμούς. Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις, που καταλαμβάνουν και το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού, αντλούν από υδροφόρους ασβεστιτικής και δολομιτικής σύστασης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η γεώτρηση 57, ενώ βρίσκεται σε μία περιοχή που κυριαρχούν τα μάρμαρα, φαίνεται να τροφοδοτείται από υδροφόρο που αποτελείται από ορυκτά με υψηλή συγκέντρωση SiO_2 . Σημειωτέον ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση παρουσίασε την υψηλότερη τιμή θερμοκρασίας κατά τη θερμομέτρηση αντλούμενου νερού στην κεφαλή των γεωτρήσεων.

- Λόγος rNa^{+} / rK^{+}

Ο λόγος rNa^{+} / rK^{+} παρέχει κάποιες ενδείξεις κατά πόσο ένα υδροφόρο στρώμα έχει συνεχή τροφοδοσία (τιμή του λόγου 15-25), ή αποτελείται από παλαιότερο νερό (τιμή του λόγου 50 - 70). Όταν ο λόγος παίρνει τιμές μικρότερες του 10, τότε πρόκειται για νερό μετεωρικής προέλευσης, ενώ όταν παίρνει τιμές περίπου ίσες με 47 υποδηλώνει πως το νερό είναι θαλάσσιας προέλευσης (Λαμπράκης 1991, Καλλέργης 1986). Αναφορικά με τη Νάξο, τα νερά των γεωτρήσεων 103, 84, 141, 182, 181, 187, 45, 307, 154, 140, 30, 42, οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος της οροσειράς που διασχίζει το νησί και κοντά στην

κορυφογραμμή της, παρουσιάζουν τιμές <25, φανερώνοντας ότι τροφοδοτούνται από υδροφόρα στρώματα στα οποία το νερό συνεχώς ανακυκλώνεται από την έλευση οβριών υδάτων. Για τις υπόλοιπες γεωτρήσεις μπορεί να ειπωθεί ότι αντλούν νερά τα οποία προέρχονται από ανάμειξη όμβριων, παλαιών υδάτων καθώς και θαλασσινού νερού.

- Λόγος rCl^- / rSO_4^{-2}

Όταν ο λόγος rCl^- / rSO_4^{-2} είναι μεγαλύτερος του 10, το νερό πιθανόν να είναι θαλάσσιας προέλευσης, όταν παίρνει τιμές μεταξύ 5 και 10 το νερό χαρακτηρίζεται χλωριούχο, ενώ τιμές του λόγου που κυμαίνονται από 5 μέχρι και μικρότερες από 0.2 δείχνουν ότι το νερό βαθμιαία μεταπίπτει από χλωριούχο σε θειικό (Λαμπράκης 1994, Καλλέργης 1986). Όσον αφορά τη νήσο Νάξο τα νερά των γεωτρήσεων 47, 156, 61, 142, 57 έχουν τιμές <10, των γεωτρήσεων 127, 120, 179, 206, 54, 111, 13 τιμές από 5 έως 10 και των υπολοίπων (που αποτελούν και την πλειοψηφία) τιμές από 5 έως 1 με εξαίρεση την 84 της οποίας το νερό έχει τιμή για $rCl^- / rSO_4^{-2} < 1$. Οι περισσότερες εκ των γεωτρήσεων έχουν γίνει για αρδευτικούς σκοπούς σε περιοχές με μέση έως έντονη γεωργοκτηνοτροφική δραστηριότητα και συνεπή χρήση λιπασμάτων. Αυτός είναι πιθανώς ο λόγος για τον οποίο το κλάσμα rCl^- / rSO_4^{-2} δίνει τιμές για την πλειοψηφία των υπόγειων υδάτων του νησιού μικρότερες του 5.

7.4 Ταξινόμηση των υπόγειων νερών

Για τη συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις χημικές αναλύσεις και για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο από τα υδροχημικά διαγράμματα που έχουν επικρατήσει.

Αυτά προσφέρουν μια εποπτική εικόνα της θέσης και του είδους του νερού καθώς και συγκρίσεις και συσχετισμούς που επιδέχονται ερμηνεία. Υπάρχουν πολλών ειδών διαγράμματα που χρησιμοποιούνται και διαφόρων ειδών ταξινομήσεις του νερού που χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια η κάθε μία.

Έτσι υπάρχουν διαγράμματα ανυσματικά, ραβδοδιαγράμματα, κυκλικά και ακτινωτά, πολυγωνικά, ημιλογαριθμικά και τριγωνικά κ.τ.λ. και πάνω σ' αυτά τα διαγράμματα έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές κατατάξεις της ποιότητας του νερού (π.χ. Piper, Piper-De Wiest, Durov, Schoeller).

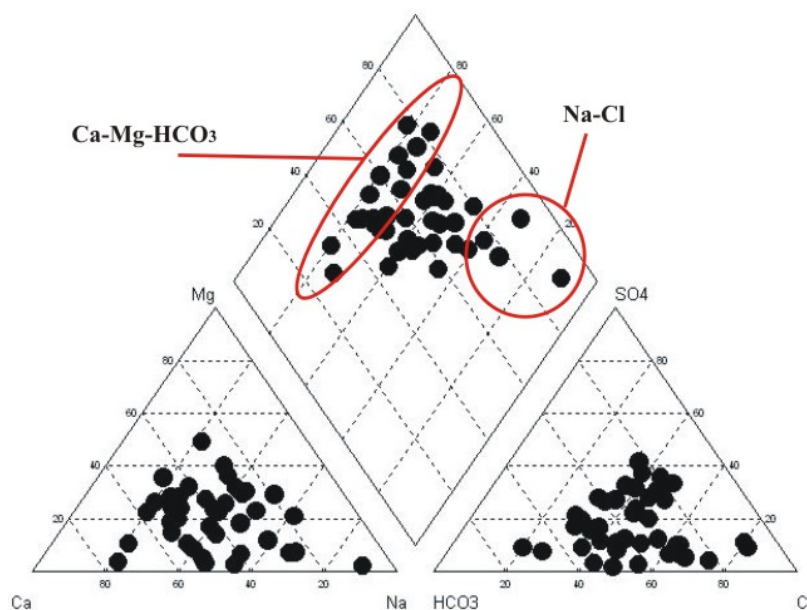
Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται τα τριγωνικά διαγράμματα και η ταξινόμηση κατά Piper - De Wiest, το διάγραμμα S.A.R, το διάγραμμα Durov, η ταξινόμηση κατά Schoeller και η ταξινόμηση κατά Wilcox.

7.4.1 Διάγραμμα Piper – De Wiest

Το τριγραμμικό διάγραμμα Piper (1944) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και ίσως το πιο εύχρηστο, διότι η αναγνώριση των ομοιοτήτων και των διαφορών που παρουσιάζουν διάφορα δείγματα νερού καθώς και της ανάμειξης δύο διαφορετικών νερών, είναι άμεση (Δημόπουλος, 1983 – Καλλέργης, 1986).

Στα τριγραμμικά διαγράμματα, τα κατιόντα, εκφρασμένα επί τοις εκατό του συνόλου των κατιόντων σε meq/lit, προβάλλονται σαν ένα σημείο στο αριστερό τρίγωνο και αντίστοιχα τα ανιόντα προβάλλονται στο δεξιό τρίγωνο κατά τον ίδιο τρόπο. Τα δύο αυτά σημεία προβάλλονται στον κεντρικό ρόμβο. Το σημείο που προκύπτει αντιστοιχεί σε έναν τύπο νερού (Πατρικάκη, 2002).

Με τη βοήθεια του προγράμματος Aquachem κατασκευάστηκε το διάγραμμα PIPER του Σχήματος 7.5.



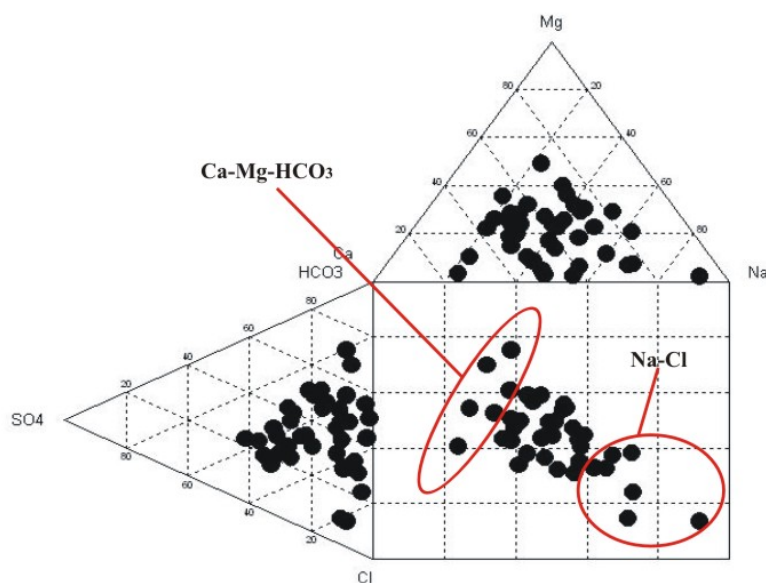
Σχήμα 7.5 Νερά της Νάξου στο τριγραμμικό διάγραμμα των κυριότερων ιόντων κατά (Α. Piper, 1944)

Από την ταξινόμηση κατά Piper – De Wiest προκύπτει ότι τα υπόγεια ύδατα της νήσου Νάξου μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικούς τύπους: αυτά που προέρχονται από ασβεστόλιθους – δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεγαλύτερων υψόμετρων και είναι του τύπου $\text{Ca}(\text{Mg})\text{-HCO}_3$ και παρόμοιας σύστασης νερά τα οποία όμως έχουν υποστεί την επίδραση του θαλασσινού νερού Na-Cl . Ο πρώτος τύπος νερών εμφανίζεται στο κεντρικό μέρος του νησιού (γεωτρήσεις 8, 117, 198, 181, 140, 187, 84, 30, 182, 7, 42) ενώ ο δεύτερος στις γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στις ακτές (γεωτρήσεις 179, 206, 120, 61)

7.4.2 Διάγραμμα Durov

Το διάγραμμα Durov, αποτελεί τροποποίηση των τριγωνικών διαγραμμάτων του Durov το 1950. Στα διαγράμματα αυτά γίνονται προβολές του 50 % της ολικής συγκέντρωσης των κατιόντων και αντίστοιχα των ανιόντων.

Σ' αυτά τα διαγράμματα τα ιόντα τοποθετούνται σε ρόμβους και σε τρίγωνα και στη συνέχεια γίνεται η προβολή των ιόντων αυτών μέσα σε τετράγωνα δίνοντας έτσι τον τύπο του νερού ανάλογα με το τετράγωνο που προβάλλονται. Στο Σχήμα 7.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα Durov για τα υπόγεια νερά της νήσου Νάξου. Από το σχήμα 7.6 προκύπτει πως τα νερά της Νάξου μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικούς τύπους: αυτά που προέρχονται από ασβεστόλιθους – δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεγαλύτερων υψόμετρων και είναι του τύπου $\text{Ca}(\text{Mg})\text{-HCO}_3$ και παρόμοιας σύστασης νερά τα οποία όμως έχουν υποστεί την επίδραση του θαλασσινού νερού Na-Cl και τα ενδιάμεσα των δυο τύπων που είναι τα περισσότερα. Ο πρώτος τύπος νερών εμφανίζεται στο κεντρικό μέρος του νησιού (γεωτρήσεις 8, 117, 181, 187, 140, 141, 120, 103, 111) ενώ ο δεύτερος στις γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στις ακτές (γεωτρήσεις 179, 206, 120, 61) όπως φάνηκε και από το διάγραμμα Piper.



Σχήμα 7.6 Νερά της Νάξου στο διάγραμμα Durov (Lloyd, J. W., Heathcote, J.A., 1985)

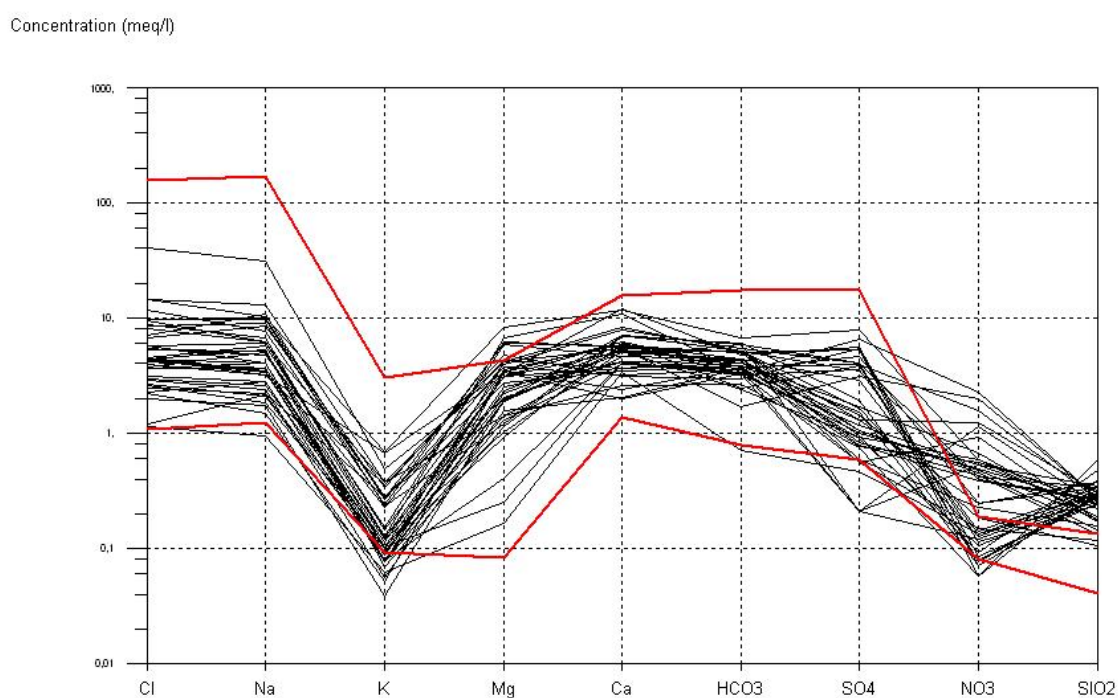
7.4.3 Διάγραμμα Schoeller

Το διάγραμμα αυτό προτάθηκε από τον H. Schoeller (1948, 1962, 1967) και έχει ευρεία χρήση γιατί επιτυγχάνει να απεικονίσει με σαφή τρόπο τους διάφορους τύπους του υπόγειου νερού. Επίσης με αυτό το διάγραμμα είναι εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων. Τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα Schoeller χρησιμοποιούνται και για τον προσδιορισμό της ποσιμότητας του νερού.

Στον άξονα των τετμημένων τοποθετούνται σε κανονικά διαστήματα από τα αριστερά προς τα δεξιά το δέκατο της συγκέντρωσης των ιόντων εκφρασμένες σε meq/lit και επί των αξόνων των τεταγμένων, που είναι βαθμολογημένες σε μια λογαριθμική κλίμακα, τοποθετούνται ο αριθμός των meq/lit των παραπάνω ιόντων (Λαμπράκης, 1991).

Τα σημεία τομής που προκύπτουν ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Το πλεονέκτημα σ' αυτό τον τρόπο απεικόνισης, είναι ότι εκτός της άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων είναι δυνατή η σύγκριση και των κυριότερων ιοντικών λόγων, οι οποίοι και ορίζονται από τις κλίσεις των ευθυγράμμων τμημάτων.

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 7.5 κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα Schoeller για τα υπόγεια νερά της περιοχής (Σχήμα 7.7).



Σχήμα 7.7 Ημιλογαριθμικό διάγραμμα Schoeller για τα δείγματα της Νάξου.

7.4.4 Διάγραμμα S.A.R

Το διάγραμμα S.A.R. χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Η καταλληλότητα του νερού για άρδευση εξετάζεται σε σχέση με δύο παράγοντες.

α) Τον κίνδυνο αλκαλίωσης

Η αύξηση της σχετικής περιεκτικότητας σε Na^+ του εδάφους έχει ως συνέπεια τη μείωση της περατότητας και την αύξηση της σκληρότητάς του, γιατί συμπιέζεται πιο εύκολα. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αντικατάστασης των ιόντων Ca^{2+} , Mg^{2+} από Na^+ στο πλέγμα των

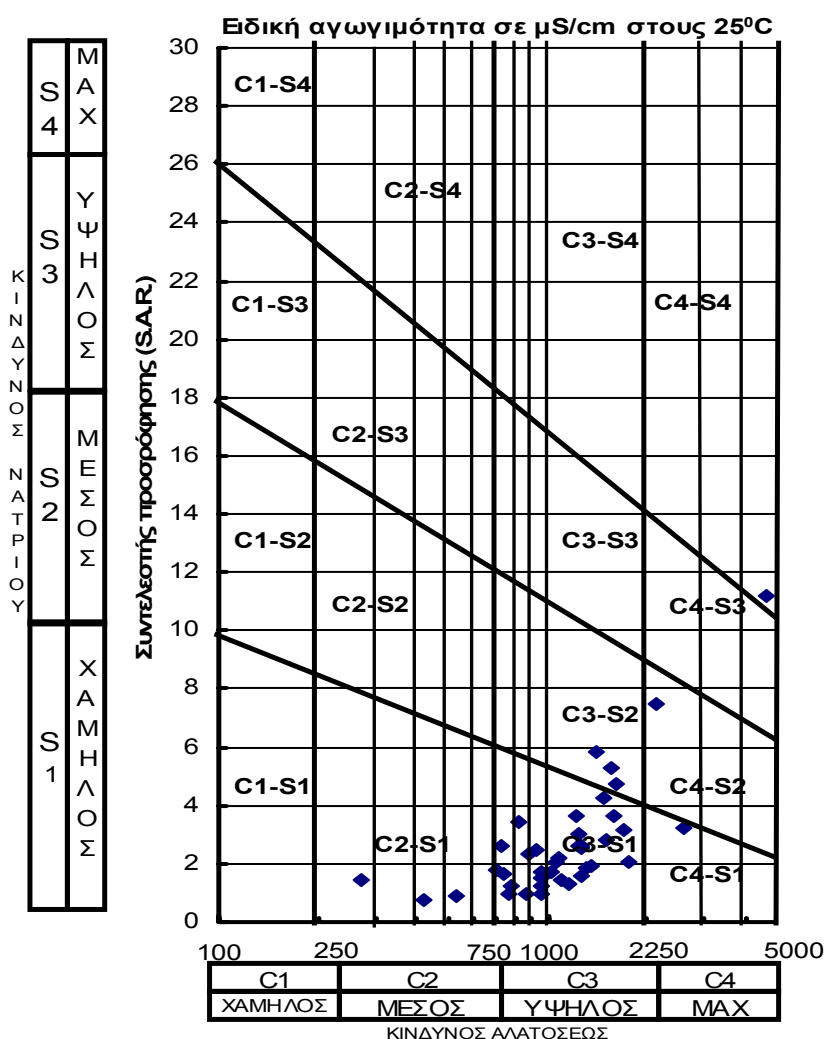
αργίλων. Η έκταση της αντικατάστασης αυτής μπορεί να προσδιοριστεί από το δείκτη προσρόφησης Νατρίου (S.A.R.).

$$S.A.R. = rNa / \sqrt{\frac{r(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}} \quad (7.1)$$

β) Τον κίνδυνο αλατότητας

Σε εδάφη που κυριαρχούν τα αργιλικά υλικά η δυνατότητα απόπλυσης των αλάτων που υπάρχουν σε περίσσεια είναι μειωμένη λόγω της μικρής περατότητας και της χαμηλής δυνατότητας αποστράγγισης. Ο κίνδυνος αλατότητας μπορεί να εκτιμηθεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε ο δείκτης S.A.R. για όλα τα δείγματα (Πίνακας 2 Παράρτημα) και οι τιμές αυτές τοποθετήθηκαν στο διάγραμμα κατάταξης αρδευτικού νερού κατά USDA (Richards, 1954 – Wilcox, 1955), όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.8.



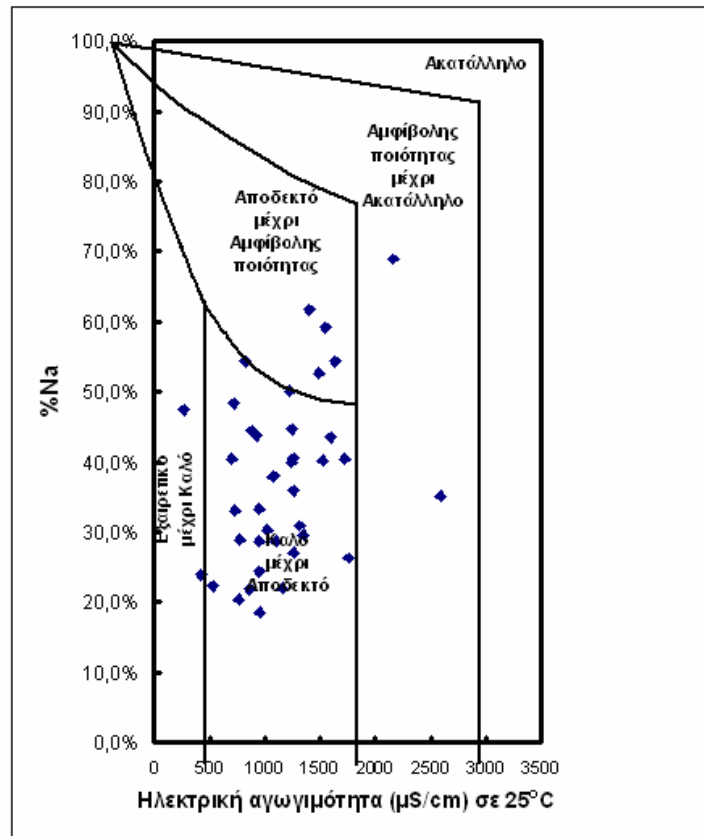
Σχήμα 7.8 Κατάταξη των νερών άρδευσης συναρτήσει της ειδικής αγωγιμότητας και της σχέσης S.A.R για τα δείγματα τις Νάξου.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων υπόγειων νερών της νήσου Νάξου που αναλύθηκαν ανήκει στην κατηγορία C3-S1, δηλαδή η ποιότητα του νερού θεωρείται μέτρια έως κακή, όπου το νερό κατά την άρδευση μπορεί να δημιουργήσει έντονα φαινόμενα αλάτωσης στα εδάφη. Τρία εκ των δειγμάτων τοποθετούνται στην κατηγορία C2-S1 (μέτρια ποιότητα νερού, θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προφύλαξη στα βαριά εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και για ευαίσθητα φυτά), ενώ τα υπόλοιπα πέντε δείγματα κρίνονται από ελαφρώς έως πλήρως ακατάλληλα για άρδευση και προφανώς για πόση.

7.4.5 Διάγραμμα Wilcox

Το διάγραμμα Wilcox (1955) χρησιμοποιείται και αυτό για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού. Αυτό λαμβάνει υπόψη την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού και την επί % περιεκτικότητά του σε Na σε σχέση με το σύνολο των αλκαλίων. Στο Σχήμα 7.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εφαρμογή του διαγράμματος Wilcox για τα υπόγεια νερά της νήσου Νάξου.

Από το διάγραμμα διαπιστώνεται, ότι η πλειοψηφία των υπόγεια νερά της Νάξου χαρακτηρίζονται ως νερά μέσης- μεγάλης περιεκτικότητας σε άλατα. Πρόκειται δηλαδή για νερά κακής ποιότητας που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άρδευση εδαφών με ευπαθείς καλλιέργειες και κάποια από αυτά είναι εντελώς ακατάλληλα για οποιαδήποτε αρδευτική δραστηριότητα. Παρόλα αυτά κάποια δείγματα νερού είναι εξαιρετικής ποιότητας, με μικρή συγκέντρωση σε άλατα. Προέρχονται κυρίως από υδροφόρους που βρίσκονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα και όπου δεν πραγματοποιείται έντονη άντληση. Οι εν λόγω υδροφόροι αποτελούνται κυρίως από μάρμαρα που παρουσιάζουν ενστρώσεις σχιστολίθων.



Σχήμα 7.9 Διάγραμμα κατάταξης αρδευτικών νερών κατά Wilcox για τα δείγματα της Νάξου

7.5 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (P.C.A.)

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών χρησιμοποιήθηκε για να συνοψίσει τα υδροχημικά δεδομένα, που προήλθαν από την ανάλυση 41 δειγμάτων από το νερό της Νάξου. Πρόκειται για μια τεχνική που μειώνει τις διαστάσεις, δηλ. τον αριθμό των μεταβλητών, σε μικρότερο αριθμό κυρίων συνιστωσών. Έτσι μέσω των κύριων συνιστωσών κάθε μία από τις n αρχικές μεταβλητές (Z) εκφράζεται γραμμικά με K ($K = j, j < n$) ασυσχέτιστες κύριες συνιστώσες, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Z_i = a_{i1}K_1 + a_{i2}K_2 + \dots + a_{in}K_j, (i = 1, 2, 3 \dots j) \quad (7.2)$$

όπου a_{ij} είναι η τιμή του φορτίου της μεταβλητής i στην συνιστώσα j .

Η θέση κάθε δείγματος στον χώρο των κύριων συνιστωσών μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας την κάτωθι εξίσωση:

$$\text{Score}_i = \beta_1 \text{Ca} + \beta_2 \text{Mg} + \beta_3 \text{Na} + \beta_4 \text{K} + \beta_5 \text{HCO}_3 + \beta_6 \text{Cl} + \beta_7 \text{SO}_4 + \beta_8 \text{NO}_3 \quad (7.3)$$

όπου $\beta_1, \dots, \beta_{12}$ είναι τα φορτία κάθε μεταβλητής στην i -οστή συνιστώσα.

Προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου είναι (Βουδούρης, 1995):

1. Οι αρχικές μεταβλητές να έχουν μεγάλο συντελεστή συσχέτισης, γι' αυτό πριν την εφαρμογή της μεθόδου ελέγχεται ο πίνακας συντελεστών συσχέτισης.
2. Ο αριθμός των μεταβλητών να είναι σχετικά μεγάλος. Αν ο αριθμός είναι μικρός (< 4) δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της μεθόδου.

Η μέθοδος σε υδροχημικά δεδομένα εφαρμόζεται ακολουθώντας τα κάτωθι βήματα (Davis, 1987 - Βουδούρης, 1995):

- α) Διευθέτηση των αρχικών μεταβλητών - υδροχημικών παραμέτρων υπό μορφή πίνακα.
- β) Υπολογισμός του πίνακα διακυμάνσεων - συνδιακυμάνσεων (variance - covariance matrix) των δεδομένων ή του πίνακα των συντελεστών συσχέτισης (correlation coefficient matrix) των αρχικών μεταβλητών.

Ο συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\left\{ \left[\sum_i (x_i - x_m)^2 \right] \left[\sum_i (y_i - y_m)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (7.4)$$

όπου: x και y είναι η i - οστή τιμή των μεταβλητών x και y

x_m, y_m είναι οι μέσες τιμές τους

Οι συντελεστές συσχέτισης (r) διευθετούνται υπό μορφή πίνακα. Ο πίνακας συσχέτισης δίνει την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών (Πίνακας 7.5).

Πίνακας 7.5 Πίνακας συντελεστών συσχέτισης για τα δείγματα της Νάξου

	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH	Li	K	NO ₃	SiO ₂	Cond
Na	1	0,631	0,164	0,995	0,814	-2,20·10 ⁻²	0,53	0,959	-0,1	-0,195	0,987
Ca		1	0,443	0,676	0,753	-0,102	0,575	0,662	0,225	-0,112	0,727
Mg			1	0,191	0,574	0,115	0,2	0,277	0,152	0,237	0,254
Cl				1	0,82	-2,80·10 ⁻²	0,551	0,955	-9,10·10 ⁻²	-0,195	0,995
SO ₄					1	1,40·10 ⁻²	0,452	0,86	5,20·10 ⁻²	-6,80·10 ⁻²	0,854
pH						1	-3,30·10 ⁻²	3,90·10 ⁻²	-9,70·10 ⁻²	7,30·10 ⁻²	-2,30·10 ⁻²
Li							1	0,485	3,00·10 ⁻²	5,00E-02	0,573
K								1	-0,14	-0,2	0,957
NO ₃									1	-8,90·10 ⁻²	-6,20·10 ⁻²
SiO ₂										1	-0,196
Cond											1

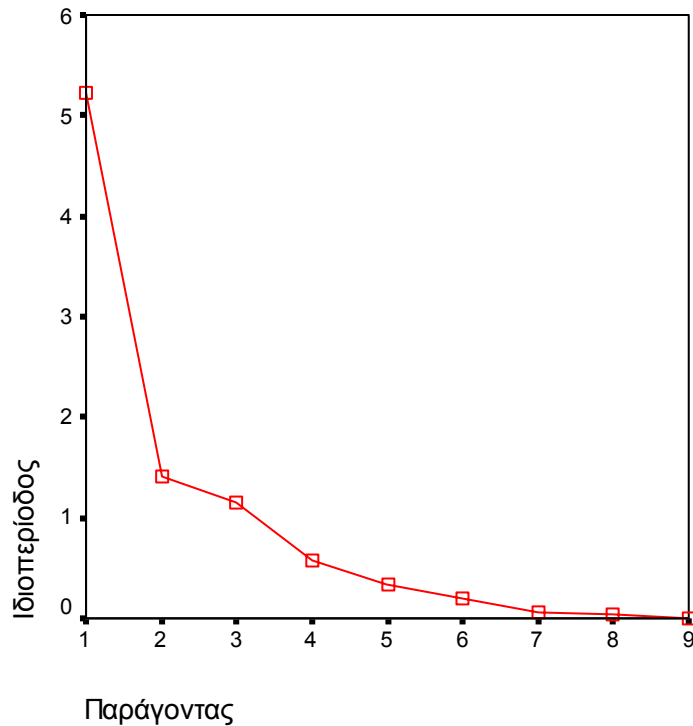
γ) Επίλυση του πίνακα συσχέτισης και υπολογισμός των ιδιοτιμών (eigenvalues), των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors), των κυρίων συνιστωσών (principal components) και των αντίστοιχων φορτίων (Πίνακας 7.6).

Πίνακας 7.6 Ιδιοτιμές και ολικές διακυμάνσεις

Παράγοντες		Αρχικές ιδιοτιμές			Τετραγωνικά φορτία		
a/a	Συστατικό	Ιδιοτιμές	Διακύμανση %	Αθροιστική %	Ιδιοτιμές	Διακύμανση %	Αθροιστική %
1	SO ₄	5,229	58,099	58,099	5,229	58,099	58,099
2	NO ₃	1,412	15,686	73,785	1,412	15,686	73,785
3	Cl	1,148	12,754	86,539	1,148	12,754	86,539
4	HCO ₃	0,575	6,390	92,929			
5	Ca	0,328	3,643	96,571			
6	SiO ₂	0,204	2,263	98,834			
7	K	0,06445	0,716	99,550			
8	Na	0,03953	0,439	99,990			
9	Mg	9,389·10 ⁻⁴	1,043·10 ⁻²	100,000			

Οι τιμές των ιδιοτιμών εμφανίζονται κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους, βοηθώντας την επιλογή των κύριων συνιστωσών. Τα κριτήρια για την επιλογή των κύριων συνιστωσών είναι (Βουδούρης, 2004):

- 1) Το ποσοστό της ολικής διακύμανσης. Αν κάποιες κύριες συνιστώσες εξηγούν υψηλό ποσοστό της ολικής διακύμανσης επιλέγονται οι συνιστώσες αυτές.
- 2) Η επιλογή των κυρίων συνιστωσών που σχετίζονται με ιδιοτιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Αν μια κύρια συνιστώσα αντιστοιχεί σε μικρή τιμή ιδιοτιμής τότε μπορεί να παραληφθεί.
- 3) Το κριτήριο "Cattell's Scree - test". Αν παραστήσουμε τον αριθμό των κύριων συνιστωσών στον άξονα X και των αντίστοιχων ιδιοτιμών στον άξονα Ψ, εμφανίζεται ένα «σπάσιμο» της ευθείας. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό επιλέγονται οι συνιστώσες που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές και βρίσκονται πριν το σπάσιμο (Σχήμα 7.9).



Σχήμα 7.10 Εφαρμογή του κριτηρίου "Cattell's Scree - test" για τα δείγματα της Νάξου.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας συντελεστών συσχέτισης (Πίνακας 7.5). Από τον Πίνακα 7.6 φαίνονται αρχικά οι ισάριθμες με τις μεταβλητές κύριες συνιστώσες (9). Όπως προκύπτει και από το διάγραμμα Scree - plot μόνο τρεις (3) κύριες συνιστώσες έχουν ιδιοτιμή μεγαλύτερη από τη μονάδα και αντιπροσωπεύουν συνολικά το 86,5 % της ολικής διακύμανσης. Η πρώτη συνιστώσα εκφράζει το 58,1 %, η δεύτερη το 15,7 %, και η τρίτη το 12,8 %. Έτσι επιλέγονται οι τρεις αυτές κύριες συνιστώσες (K_1 , K_2 , K_3).

Στον Πίνακα 7.7 με τη διατήρηση των 3 κυρίων συνιστωσών φαίνονται τα φορτία που προκύπτουν για καθεμιά μεταβλητή. Το άθροισμα των ιδιοτιμών ισούται με τον αριθμό των μεταβλητών (9).

Πίνακας 7.7 Φορτία των κυρίων συνιστωσών

ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ		
	K ₁	K ₂	K ₃
SO ₄ ⁻²	0,920	0,225	0,014
NO ₃ ⁻	-0,035	0,550	-0,747
Cl ⁻	0,956	-0,202	0,003
HCO ₃ ⁻	0,903	-0,086	0,126
Ca ⁺²	0,802	0,294	-0,209
SiO ₂ ⁻	-0,167	0,511	0,705
K ⁺	0,958	-0,166	0,047
Na ⁺	0,947	-0,232	0,013
Mg ⁺²	0,409	0,763	0,172

Αυτό που διαπιστώνεται από τον πρώτο παράγοντα ο οποίος και εκφράζει το 58,1% της ολικής διακύμανσης των ιόντων είναι ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των ιόντων Na, K, Ca, HCO₃, Cl και SO₄. Ο παράγοντας αυτός συνδέθηκε με την αλατότητα των νερών της νήσου, λόγω του ότι τα ιόντα που συσχετίζονται βάσει αυτού είναι κατά κύριο λόγο τα ιόντα που προκαλούν αυξημένη αλατότητα στα υπόγεια νερά.

Επίσης από τον δεύτερο παράγοντα, ο οποίος και εκφράζει το 15,7 % της ολικής διακύμανσης των ιόντων διαπιστώνεται πως τα ιόντα Mg δεν συσχετίζονται και δεν επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό με κανένα από τα υπόλοιπα ιόντα.

Τέλος από τον τρίτο παράγοντα που εκφράζει το 12,8 % της διακύμανσης των ιόντων προκύπτει ότι πως τα ιόντα NO₃ και SiO₂ παρουσιάζουν αντίστροφη συσχέτιση, δηλαδή όσο αυξάνεται το ένα τόσο ελαττώνεται το άλλο. Ο παράγοντας αυτός λόγω των ιόντων SiO₂ συνδέθηκε με την πιθανότητα ύπαρξης γεωθερμικής ανωμαλίας.

Οι χάρτες κατανομής τις τιμές των παραγοντικών τιμών (factor scores) στα νερά των γεωτρήσεων όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία παρατίθενται στο Παράρτημα.

7.6 Συμπεράσματα Χημικών Αναλύσεων.

Από τις χημικές αναλύσεις που έγιναν σε δείγματα νερού γεωτρήσεων της νήσου Νάξου προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (E.C.) παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση. Οι τιμές παρουσιάζουν μείωση με το υψόμετρο της γεώτρησης από την οποία πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία του εκάστοτε νερού, πράγμα που χωρίς άλλο υποδεικνύει την επίδραση της θάλασσας. Ακόμη η συσχέτιση μεταξύ των ιόντων Na^+ και Cl^- είναι πάρα πολύ καλή ($R^2=0.9901$), γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι έχουν κοινή προέλευση. Στην περίπτωση των υπόγειων νερών της Νάξου, τα προαναφερόμενα ιόντα προέρχονται προφανώς από το θαλάσσιο νερό.
- Η κατανομή περιεκτικότητας των ιόντων Na^+ , K^+ , Cl^- και Mg^{2+} στο νησί παρουσιάζει μικρότερες τιμές στο ανατολικό τμήμα απ' ότι στο δυτικό. Η περιεκτικότητα των ιόντων NO_3^- και SO_4^{2-} , τα οποία προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη χρήση φυτοφαρμάκων και από αστικά-κτηνοτροφικά απόβλητα, παρουσιάζεται αυξημένη επίσης στα υπόγεια νερά του δυτικού τμήματος του νησιού σε σχέση με το ανατολικό.
- Από την ανάλυση των ιοντικών λόγων προέκυψε ότι στο κεντρικό και πλέον ορεινό τμήμα του νησιού γίνεται ο εμπλουτισμός των υδροφόρων μέσω της κατείσδυσης των ομβρίων υδάτων όπως είναι λογικό και αναμενόμενο ενώ κοντά στις ακτές του νησιού γίνεται η εκφόρτιση των υδροφόρων. Λίγες μόνο γεωτρήσεις αντλούν από υδροφόρους που αποτελούνται πυριτικά πετρώματα. Οι περισσότερες γεωτρήσεις, οι οποίες καταλαμβάνουν και το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού, αντλούν από υδροφόρους ασβεστιτικής και δολομιτικής σύστασης. Τα νερά των γεωτρήσεων που βρίσκονται κατά μήκος της οροσειράς η οποία διασχίζει το νησί και κοντά στην κορυφογραμμή της, τροφοδοτούνται από υδροφόρα στρώματα στα οποία το νερό συνεχώς ανακυκλώνεται από την έλευση οβρίων υδάτων. Για τις υπόλοιπες γεωτρήσεις μπορεί να ειπωθεί ότι αντλούν νερά τα οποία προέρχονται από ανάμειξη όμβριων, παλαιών υδάτων καθώς και θαλασσινού νερού.
- Τα υπόγεια ύδατα της νήσου Νάξου μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικούς τύπους: αυτά που προέρχονται από ασβεστόλιθους – δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεγαλύτερων υψόμετρων και είναι του τύπου Ca(Mg)-HCO_3 και παρόμοιας σύστασης νερά τα οποία όμως έχουν υποστεί την επίδραση του θαλασσινού νερού Na-Cl . Ο πρώτος τύπος νερών εμφανίζεται στο κεντρικό μέρος του νησιού ενώ ο δεύτερος στις γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στις ακτές.

8. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την γεωθερμική έρευνα στη Νάξο μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

1) Γεωλογικά η νήσος Νάξος αποτελείται από α) αλπικούς σχηματισμούς περιοχικής μεταμόρφωσης που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού και συνίστανται κυρίως από μάρμαρα και σχιστολίθους, β) ένα γρανοδιορίτη που διείσδυσε στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο και γ) μη μεταμορφωμένα ιζήματα όπως κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, μάργες και υπερβασικά πετρώματα όπως σερπεντινίτες, διάβασες και γάββρους,

2) Αναφορικά με την τεκτονική, παρατηρούνται κανονικά ρήγματα μικρής γωνίας, κανονικά ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ με οριζόντια συνιστώσα του Μειοκαίνου και κανονικά ρήγματα του Πλειόκαινου και του Τεταρτογενούς, διαφόρων διευθύνσεων.

3) Οι κύριοι υδροφόροι αναπτύσσονται στα μάρμαρα, ενώ μικρότερου βάθους και δυναμικότητας υδροφόροι αναπτύσσονται στις αδρομερείς φάσεις των Νεογενών και τεταρτογενών αποθέσεων.

4) Η περιεκτικότητα των υπόγειων νερών σε ιόντα και σε διαλυμένα άλατα είναι μικρότερη στο ανατολικό τμήμα του νησιού απ' ότι στο δυτικό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της οικονομικής δραστηριότητας (οικιστικής και αγροτικής) απαντάται στο δυτικό τμήμα του νησιού με αποτέλεσμα την εντατική εκμετάλλευση των υδροφόρων συστημάτων και την ποιοτική υποβάθμιση, λόγω διείσδυσης της θάλασσας και της νιτρορύπανσης.

5) Οι κύριοι υδροχημικοί τύποι των υπόγειων νερών της Νάξου είναι: α) Ca (Mg)-HCO₃ που αντιπροσωπεύει μετεωρικά νερά των ζωνών εμπλουτισμού του κεντρικού και βόρειου τμήματος του νησιού και β) Na-Cl που αντιπροσωπεύει νερά επηρεασμένα από θαλάσσια διείσδυση στο νοτιοδυτικό και σε κάποιες περιοχές του ανατολικού τμήματος του νησιού.

6) Από τη χωρική διακύμανση της θερμοκρασίας, με βάση τις θερμομετρήσεις νερού στην κεφαλή 73 γεωτρήσεων προκύπτει μια γενική τάση αύξησης της θερμοκρασίας κατά τη μετακίνηση από Βορρά προς Νότο λόγω της τεκτονικής δομής. Έτσι στην περιοχή Αγιασός, η οποία βρίσκεται στο Νότιο-Νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν ανώμαλα υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 30 °C σε γεωτρήσεις βάθους <180m. Προφανώς στην προαναφερόμενη περιοχή του νησιού υπάρχει μια γεωθερμική ανωμαλία. Δευτερευόντως οι γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στην επαφή του γρανοδιορίτη με τα μεταμορφωμένα πετρώματα, τείνουν να έχουν μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας νερού από αυτές που βρίσκονται στο κεντρικό και βόρειο τμήμα του νησιού. Από τη γεωμορφολογία αλλά και από την τεκτονική φαίνεται ότι δυτικά της επαφής και παράλληλα σε αυτή, εκτείνεται ένα αντίκλινο. Τρία υποπαράλληλα ρήγματα βρίσκονται κοντά στο νότιο τμήμα

της επαφής Η αντικλινική αυτή δομή σε συνδυασμό με τη συνδρομή των ρηγμάτων και την κλίση των στρωμάτων προς την επαφή, είναι πιθανό να τροφοδοτούν υδροφόρους, που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος (400-500m) με μετεωρικό νερό, το οποίο να θερμαίνεται και εν συνεχεία να ανέρχεται προς την επιφάνεια.

7) Το γεωθερμόμετρο SiO_2 χωρίς απώλειες ατμού (Fournier, 1981) κρίθηκε ως το πλέον αξιόπιστο και επιβεβαιώνει τις ανωτέρω διαπιστώσεις με κάποιες αποκλίσεις. Για τα νερά των γεωτρήσεων 54, 57, 57 και 58 που βρίσκονται στην περιοχή της Αγιασσού δίνει θερμοκρασίες αντίστοιχα από 70.28, 74.36, 88.4 και 65.29 °C. Για τα υπόλοιπα νερά της περιοχής έρευνας οι εκτιμώμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 39 και 80 °C με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται σε γεωτρήσεις που βρίσκονται ανατολικά, κοντά στο γρανοδιοριτικό σώμα και η χαμηλότερη τιμή στη γεώτρηση 154 η οποία βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νησιού.

8) Όπως είναι εμφανές υπάρχει αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων αυτού του γεωθερμομέτρου με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις θερμομετρήσεις. Προβληματισμό δημιουργεί η πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε ιόντα SiO_2 που εμφανίζει το νερό της γεώτρησης 153 (κεντρικό τμήμα του νησιού) και παράλληλα η υψηλή τιμή που δίνουν τα γεωθερμόμετρα πυριτίου για την περιοχή αυτή, τιμή η οποία είναι και η υψηλότερη στο νησί (Σχήμα 6.1). Πιθανότατα το SiO_2 , που είναι διαλυμένο, δεν είναι γεωθερμικής προέλευσης αλλά μάλλον προέρχεται από διαλυτοποίηση πυριτικών ορυκτών σε αβαθείς υδροφόρους πράγμα πολύ πιθανό λόγω του ότι η συγκεκριμένη γεώτρηση βρίσκεται στο μιγματιτικό πυρήνα, σε αντίθεση με τις θερμές γεωτρήσεις της περιοχής Αγιασσού που έχουν γίνει σε μάρμαρα.

9) Με βάση τα γεωλογικά, υδροχημικά και τεκτονικά δεδομένα συντάχθηκε το γεωθερμικό μοντέλο της περιοχής όπου εμφανίζεται η γεωθερμική ανωμαλία:

Το νερό της βροχόπτωσης αρχικά κατεισδύει, μέσω των ρηγμάτων, των διακλάσεων και των ρωγμών στα καρστικοποιημένα μάρμαρα, σε ικανό βάθος. Τα νερά αυτά θερμαίνονται στο βάθος αφού έλθουν σε επαφή με θερμότερα πετρώματα και αναμειγνύονται με κάποια ποσότητα θαλασσινού νερού (βλέπε κεφ 7.). Στη συνέχεια ανέρχονται εύκολα και γρήγορα προς την επιφάνεια με την βοήθεια των εφελκυστικών ρηγμάτων που προαναφέρθηκαν.

9. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

α. Το βασικότερο βήμα το οποίο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί στην περαιτέρω διερεύνηση της γεωθερμικής κατάστασης στο νησί είναι η πραγματοποίηση θερμομετρήσεων βάθους σε γεωτρήσεις σε όλο το νησί με σκοπό τη σύνταξη χαρτών γεωθερμικής βαθμίδας καθώς και διαφόρων χαρτών ισόθερμων καμπυλών βάθους. Με αυτόν τον τρόπο θα διαπιστωθεί η έκταση της γεωθερμικής ανωμαλίας και θα προσδιοριστούν τα ποιοτικά της χαρακτηριστικά. Η πρόσβαση στις γεωτρήσεις θα δώσει τη δυνατότητα και ειδικής δειγματοληψίας από διάφορα βάθη, ώστε να ερευνηθούν γεωχημικά οι θερμοί υδροφόροι.

β. Θα πρέπει να δοθεί έμφαση στις τεκτονικές δομές του νησιού, να πραγματοποιηθεί αναλυτικότερη χαρτογράφηση των ρηγμάτων, συστημάτων ρωγμών και διακλάσεων. Σε συνάρτηση με τα δεδομένα που θα προκύψουν από τις θερμομετρήσεις βάθους και με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα, ως και με τη γεωλογία να προσδιορισθεί με μεγαλύτερη προσέγγιση γεωθερμικό μοντέλο.

γ. Πληροφορίες για την παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις βαθιές γεωλογικές δομές μπορούν να αποκτηθούν με τη βοήθεια των γεωηλεκτρικών και των ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες από τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην ύπαρξη τέτοιων ρευστών καθώς και στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πράγματι, οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ευρεία εφαρμογή στη γεωθερμική έρευνα και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

δ. Σε περίπτωση θετικών αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνει η επαλήθευση των υποθέσεων με ερευνητικές γεωτρήσεις οι οποίες και θα οδηγήσουν στον προσδιορισμό των πραγματικών χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και την εκτίμηση του δυναμικού του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δικής μας έρευνας στη Νάξο, η περιοχή που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η Αγιασός. Αναμένεται σε βάθος μεγαλύτερο των 300m να υπάρχει γεωθερμικός ταμιευτήρας με θερμοκρασία νερού 75-85°C, όπως προέκυψε από τα γεωθερμόμετρα SiO₂.

Πιθανές χρήσεις

Θα πρέπει να τονισθεί ότι η θερμοκρασία των ρευστών είναι αυτή η οποία θα καθορίσει τη χρήση τους. Παρόλα αυτά, το πεδίο εφαρμογών μπορεί να διευρυνθεί εάν ο σχεδιασμός του προγράμματος είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.

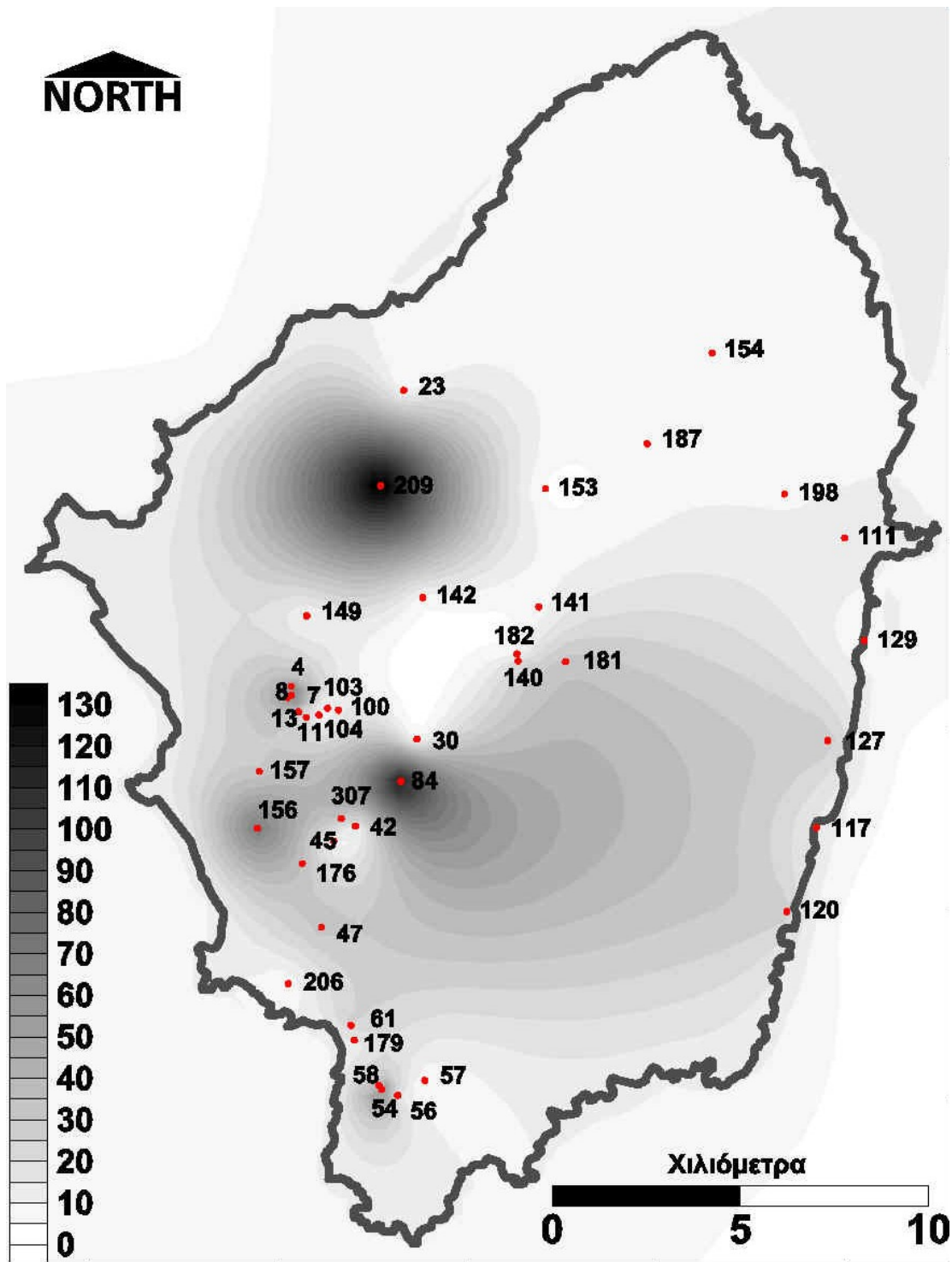
Στην περίπτωση εύρεσης γεωθερμικού ταμιευτήρα, στην Αγιασσό, με θερμοκρασία ρευστών $>60^{\circ}\text{C}$ είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί αφαλάτωση θαλασσινού νερού, με γεωθερμικά ρευστά σαν θερμαντικό μέσο, με τη μέθοδο της πολυσταδιακής εξάτμισης εν κενώ (MED). Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αφαλάτωση πρέπει η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών να είναι τουλάχιστον 60°C . Η θερμοκρασία απόρριψης σχεδιάζεται να είναι $40-50^{\circ}\text{C}$. Η ύπαρξη πόσιμου νερού είναι ζωτικής σημασίας για τη Νάξο και ιδιαίτερα για τα μικρότερα νησιά των Κυκλάδων, τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά στη Νάξο, όπως Κουφονήσια, Κέρος, Δονούσα και Σχοινούσα που η τροφοδοσία τους με πόσιμο νερό γίνεται μέσω πλοιαρίων από τη Ραφήνα. Η δημιουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης στη Νάξο θα περιορίσει σημαντικά το πρόβλημα της λειψυδρίας των γύρω νησιών.

Η Αγιασσός είναι μια περιοχή η οποία τα επόμενα χρόνια είναι σχεδόν βέβαιοι ότι θα αξιοποιηθεί τουριστικά, λόγω της θέσης της (παραθαλάσσια με μεγάλης έκτασης αμμώδη ακτή) και του φυσικού κάλους το οποίο παρουσιάζει. Συνεπώς η επέκταση του ήδη υπάρχοντος οικισμού και η δημιουργία ξενοδοχειακών μονάδων θα δώσουν την ευκαιρία εφαρμογής της θέρμανσης χώρων και τηλεθέρμανσης και ψύξης με γεωθερμικά ρευστά στα νέα αυτά οικοδομήματα. Σημαντικά οικονομικά οφέλη θα μπορούσαν να προκύψουν από το συνδυασμό θέρμανσης και ψύξης και για τους επιχειρηματίες αλλά και γενικότερά για τους κάτοικους έχοντας κατά νου τις συνεχείς αυξήσεις στην τιμή του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αλλά και τις αυξήσεις που πρόκειται να γίνουν στα τιμολόγια της Δ.Ε.Η.

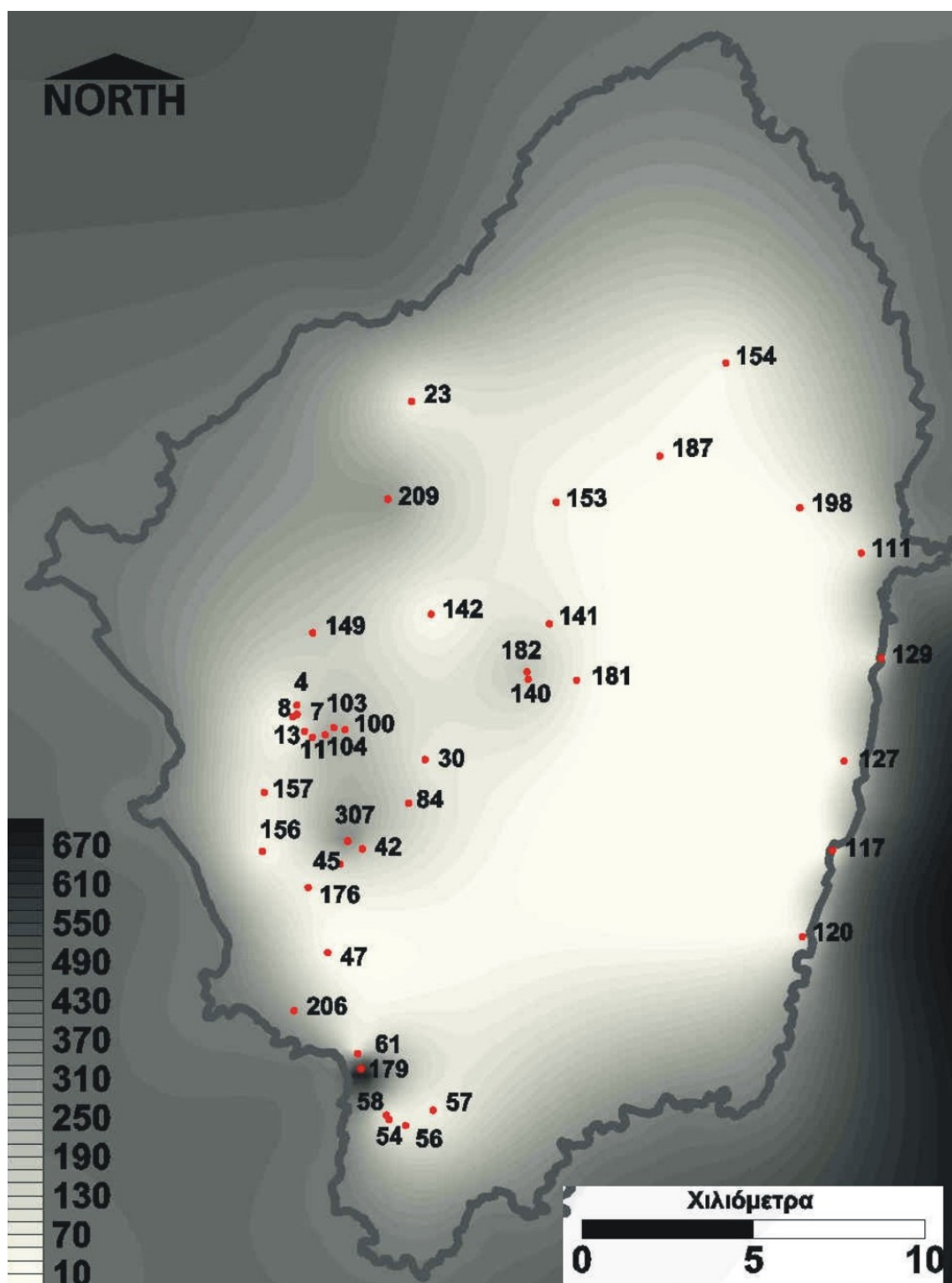
Ακόμη με τη χρήση των γεωθερμικών ρευστών θα μπορεί οικονομικά να γίνεται θέρμανση θερμοκηπίων και εκτροφή υδρόβιων οργανισμών.

Τέλος στο νησί υπάρχει έντονη κτηνοτροφική δραστηριότητα η οποία συμπεριλαμβάνει και την παραγωγή αγελαδινού και αιγο – πρόβειου γάλακτος. Με τη χρήση της γεωθερμίας θα είναι δυνατή η δημιουργία μιας μονάδας παστερίωσης του γάλατος αυτού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



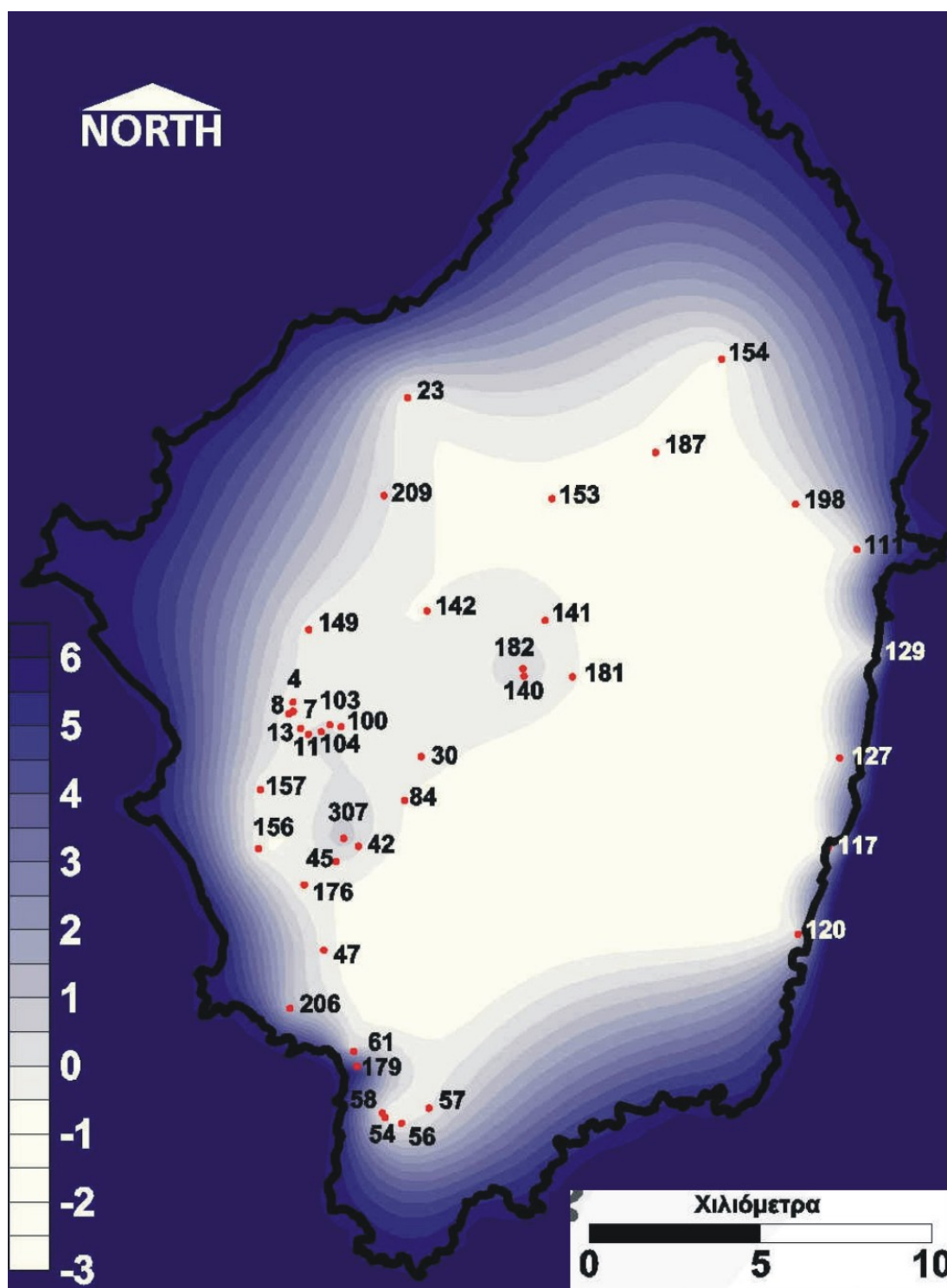
Σχήμα 1. Χάρτης κατανομής της σύστασης των υπόγειων νερών σε ιόντα NO_3^- (mg/l).



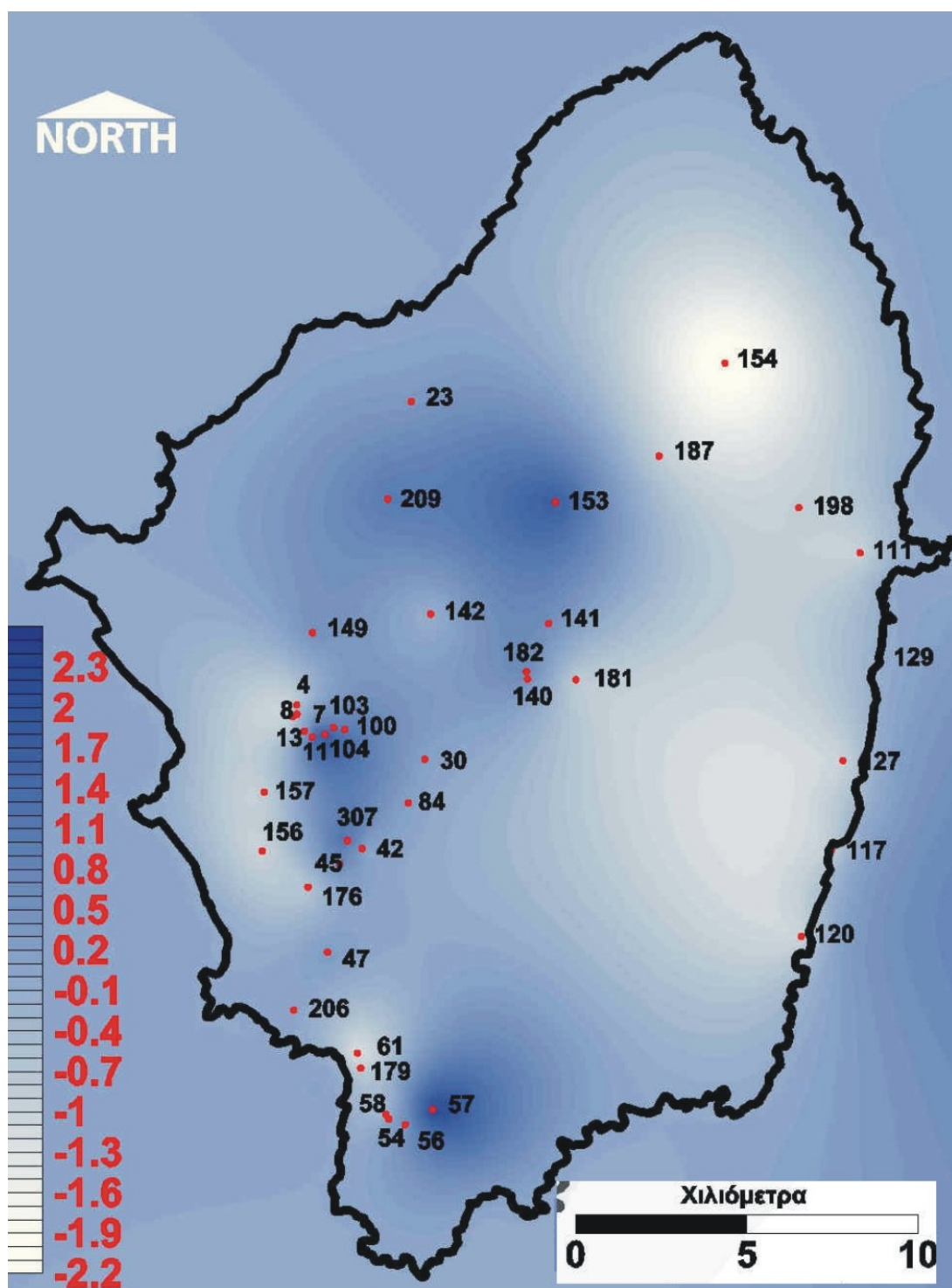
Σχήμα 2. Χάρτη κατανομής της σύστασης των υπόγειων νερών σε ιόντα SO_4^{2-} (mg/l).

Πίνακας 1. Κατανομή τιμής παραγόντων K1, K2, K3, στα ύδατα των γεωτρήσεων της νήσου Νάξου.

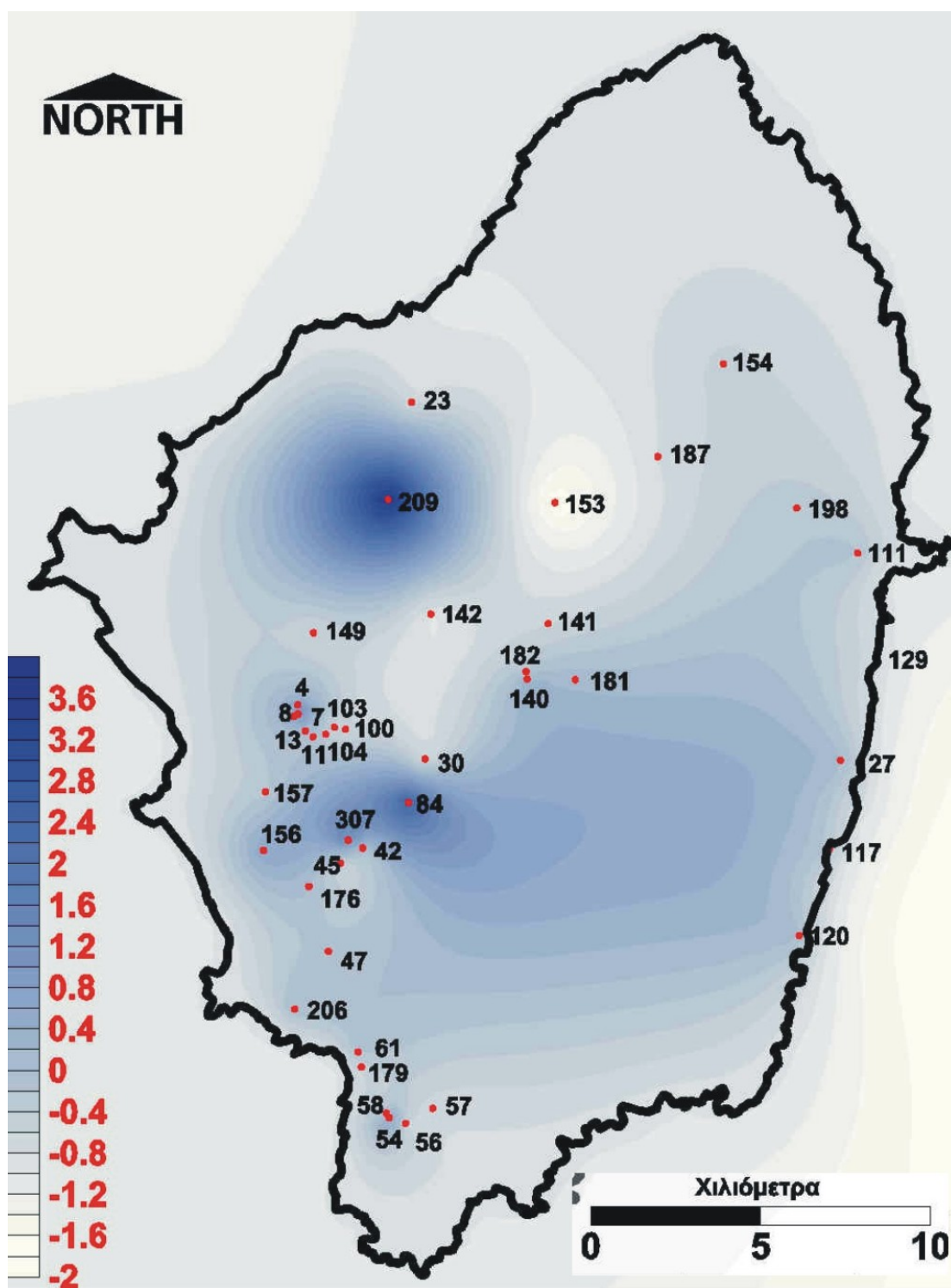
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ		
	K1	K2	K3
4	-0,256	-0,894	0,480
7	-0,218	0,022	1,836
8	-0,371	-0,934	0,671
11	0,043	1,431	0,060
13	-0,234	-0,152	-0,128
23	-0,416	0,330	-0,744
30	-0,258	0,169	-0,816
42	0,082	0,100	-0,219
45	-0,045	0,737	-0,578
47	-0,161	0,316	-0,140
54	-0,301	0,266	1,173
56	-0,159	0,365	-0,606
57	-0,059	2,308	-0,731
58	-0,423	-0,464	-0,170
61	0,040	-1,413	-0,070
84	-0,517	0,149	2,544
100	-0,093	1,081	-0,618
103	0,001	0,803	-0,460
104	0,214	1,981	-0,443
111	-0,132	-0,979	-0,138
117	-0,214	-0,917	-0,224
120	-0,027	-1,107	0,082
127	0,061	-1,042	0,121
129	-0,001	-0,127	-0,727
140	0,208	0,525	0,336
141	-0,166	0,563	-0,617
142	-0,521	-0,163	-1,032
149	-0,258	0,510	-0,659
153	-0,664	1,757	-1,785
154	-0,629	-2,276	-0,538
156	-0,531	-1,038	0,654
157	-0,394	-0,945	-0,280
176	-0,424	-0,724	0,071
179	5,818	-0,906	-0,579
181	-0,336	-0,804	0,111
182	0,226	0,720	-0,216
187	-0,687	-0,838	-0,784
198	-0,425	-0,857	-0,293
206	1,036	0,112	0,044
209	0,137	1,043	3,801
307	1,056	1,292	1,610



Σχήμα 4. Χάρτης κατανομής τιμής του παράγοντα K1 στα ύδατα των γεωτρήσεων της νήσου Νάξου.

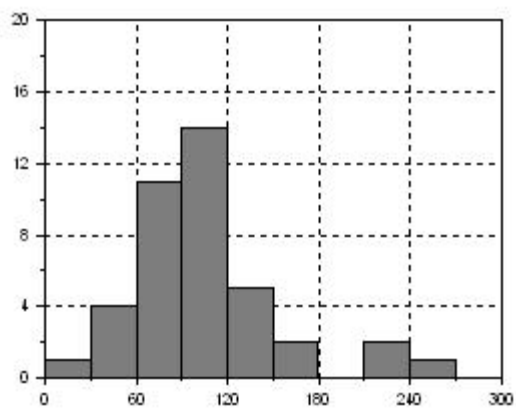


Σχήμα 5. Χάρτης κατανομής τιμής του παράγοντα K2 στα ύδατα των γεωτρήσεων της νήσου Νάξου.



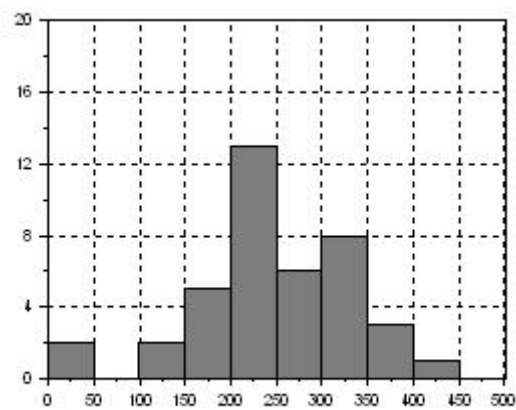
Σχήμα 6. Χάρτης κατανομής τιμής του παράγοντα K3 στα ύδατα των γεωτρήσεων της νήσου Νάξου.

Frequency (counts)



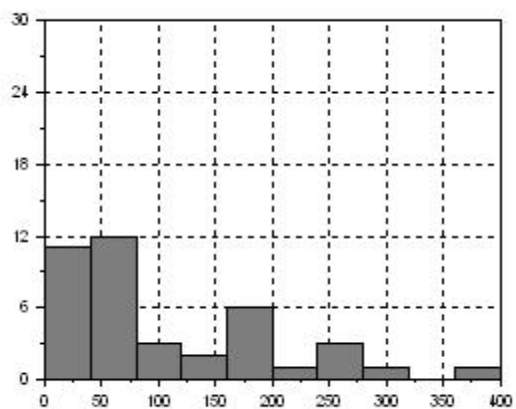
Ca (mg/l)

Frequency (counts)



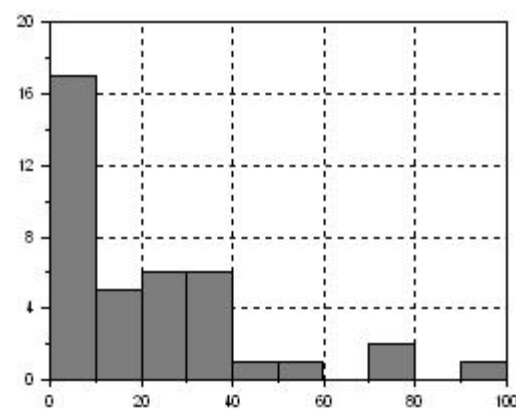
HCO3 (mg/l)

Frequency (counts)



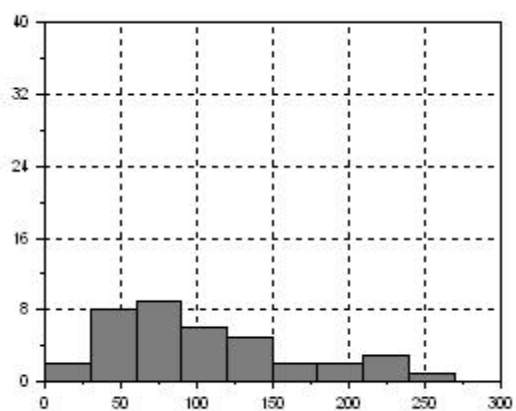
SO4 (mg/l)

Frequency (counts)



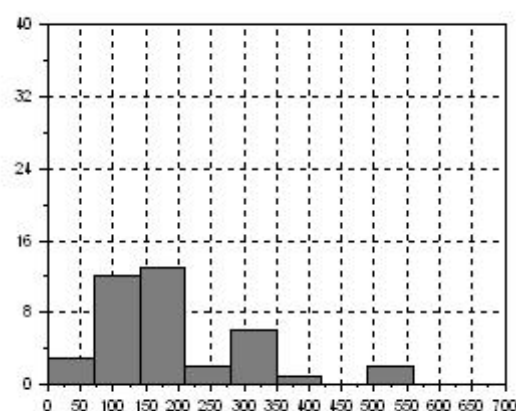
NO3 (mg/l)

Frequency (counts)



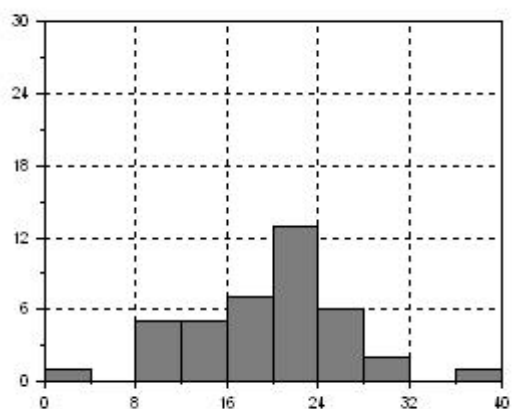
Na (mg/l)

Frequency (counts)



Cl (mg/l)

Frequency (counts)



SiO2 (mg/l)

Σχήμα 7. Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης συγκέντρωσης των ιόντων Ca, HCO₃, SO₄, NO₃, Na, Cl και SiO₂ στα υπόγεια νερά της νήσου Νάξου.

Πίνακας 2. Τιμές δείκτη SAR και αγωγιμότητας

Γεώτρηση	C(μS/cm)	S.A.R.
4	950	1,490
7	1260	1,565
8	950	1,702
11	1260	2,507
13	1020	1,706
23	730	1,647
30	770	1,267
42	1100	1,452
45	1250	3,036
47	1310	1,877
54	1520	2,839
56	1260	2,604
57	1720	3,192
58	920	2,474
61	2160	7,513
84	955	0,957
100	1400	5,827
103	1490	4,247
104	1600	3,648
111	1220	3,628
117	760	0,934
120	1550	5,300
127	1630	4,767
129	1240	2,621
140	1160	1,270
141	950	1,260
142	700	1,783
149	1080	2,195
153	720	2,586
154	270	1,433
156	880	2,337
157	820	3,438
176	1070	2,066
179	14100	53,764
181	860	0,986
182	1350	1,951
187	420	0,789
198	530	0,907
206	4600	11,190
209	1760	2,081
307	2590	3,213

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή.

1. BARBIER, E. and FANELLI, M., 1977. Non-electrical uses of geothermal energy. Prog. Energy Combustion Sci., 3, 73-103.
2. CASTANY, G., 1963: «Traite pratique des eaux souterrains», Dunod, Paris, pp. 657.
3. CHAPMAN D.S., POLLACK H.N. & CERMAK V. 1979, "Global heat flow with special reference to the region of Europe", in V. Cermak and L. Rybach, "Terrestrial heat flow in Europe", pp. 41-48, Springer, Berlin-Heidelberg, New York.
4. COMBS, J. and MUFFLER, L.P.J., 1973. Exploration for geothermal resources. In : Kruger, P. and Otte, C., eds., Geothermal Energy, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
5. DICKSON M. H. & FANELLI M. 1990, "Geothermal Energy and its Utilization", in "Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization", UNITAR/ UNDP Center On Small Energy Resources, Rome, Italy, pp. 1-29.
6. ELLIS A.J. & MAHON W.A.J. 1977, "Chemistry and Geothermal Systems", Academic Press Inc., USA, 392 pp.
7. ENTINGH, D. J., EASWARAN, E. and McLARTY, L., 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C., 12 pp.
8. GUDMUNDSSON, J.S., 1988. The elements of direct uses. Geothermics, 17,119-136.
9. GUPTA K. H. 1980, "Geothermal resources: an energy alternative" Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 227 pp.
10. LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris, pp.135—148.
11. LIPPMANN M.J. & BODVARSSON G.S. 1987, "Convective heat transport in geothermal systems", Revista Brasileira de Geofisica, Vol. 5, p. 301-310.
12. LODDO M. & MONGELLI 1978, "Heat flow in Italy", Pure and Applied Geophysics, Vol. 117 1/2, p. 135-149.
13. LUMB, J. T., 1981. Prospecting for geothermal resources. In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., eds., Geothermal Systems, Principles and Case Histories, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77—108.
15. LUND, J. W., and FREESTON, D., 2001. World-wide direct uses of geothermal energy 2000. Geothermics 30, 29- 68.
16. MEIDAV T. 1980, "Direct Current Resistivity Methods in Geothermal Exploration", in Technical Training Course No.2 "Geophysical Exploration Methods for Geothermal Resources", San Diego, California, USA, 28pp.
17. MORET, L. (1946): «Les sources Thermominerales».- Masson et cie editeurs, 146 p., Paris
18. RAFFERTY, K., 1997. An information survival kit for the prospective residential geothermal heat pump owner. Bull. Geo-Heat Center , 18, 2, 1—11.
19. SOREY M.L., REED M.J., FOLEY D. & RENNER J. L. 1983, "Methods for assessing low-temperatures geothermal resources", In "AsseGeothermal Energy". Stanford University Press, Stanford, California, USA, pp. 69-94.

20. WATANADE T., LONGSETH M.G. & ANDERSON R.N. 1977, "Heat flow in back arc basins of the western pacific", in Talwani M. & Pitman W.C. III eds, "Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins", Maurice Ewing Series I, American Geophysical Union, Washington D. C., p. 137-162.
21. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., 2001: «Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία», 2nd edition, Α, Β, Γ τόμοι, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
22. ΚΟΛΙΟΣ Ν. 1993, "Γεωθερμική έρευνα χαμηλής ενθαλπίας - Μελέτη του γεωθερμικού πεδίου Ν. Κεσσάνης", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Αθηνών, Αθήνα.
23. ΦΥΤΙΚΑΣ Μ. (1977), "Γεωλογική και Γεωθερμική Μελέτη της Νήσου Μήλου", Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.
24. ΦΥΤΙΚΑΣ Μ. (1998), "Τεχνική γεωτρήσεων", Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Κεφάλαιο 2: Γεωλογία.

25. ALTHERR, R.H., KREUZER, J., WENDT, I., LENZ, H., WAGNER, G.A., KELLER, J., HARRE, W., AND HANDORF, A., 1982, A late Oligocene/early Miocene high temperature belt in the Attic-Cycladic-Crystalline Complex SE Pelagonia, Greece: Hannover, Geologisches Jahrbuch, v. 23, p. 97–164.
26. ALTHERR, R., HENJES-KUNST, F., MATTHEWS, A., FRIEDRICHSEN, H., HANSEN, B.T., 1988. O–Sr isotopic variations in Miocene granitoids from the Aegean: evidence for an origin by combined assimilation and fractional crystallization. Contrib. Mineral. Petrol. 100, 528– 541.
27. ANDRIESEN, P.A.M., BOELRIJK, N.A.I.M., HEBEDA, E.H., PRIEM, H.N.A., VERDURMEN, E.A.T., AND VERSCHURE, R.H., 1979, Dating the events of metamorphism and granitic magmatism in the Alpine Orogen of Naxos Cyclades Greece: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 69, p. 215–225.
28. ANDRIESEN, P.A.M, BANGA, G., AND HEBEDA, E.H., 1987, Isotopic age study of pre-Alpine rocks in the basal units on Naxos, Sikinos and Ios, Greek Cyclades: Amsterdam, Geologie en Mijnbouw, v. 66, no. 1, p. 3–14.
29. ANDRIESEN, P.A.M., 1991. K–Ar and Rb–Sr age determinations on micas of impure marbles of Naxos, Greece: the influence of metamorphic fluids and lithology on the blocking temperature. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 71, 89–99.
30. BICKLE, M.J., BAKER, S., "Advective-diffusive transport of isotopic fronts: an example from Naxos, Greece", Earth and Planetary Sci. Lett 97, pp. 78-93, 1990.
31. BONNEAU, M., GEYSSANT, J. AND LEPVRIER, C. 1978 Tectonique alpine dans le massif d'Attique-Cyclade Grèce: Plis couchés kilometriqués dans l'île de Naxos, Conséquences. Rev.Géogr.Phys.Géol.dyn. 20, 109-122.
32. BRICHAU, S. 2004 Constraining the tectonic evolution of extensional fault systems in the Cyclades Greece using low-temperature thermochronology. Phd thesis
33. BUICK, I.S., 1991a. Mylonite fabric development on Naxos, Greece. Journal of Structural Geology 13, 643-655.
34. BUICK, I.S., 1991b. The late Alpine evolution of an extensional shear zone, Naxos, Greece. Journal of the Geological Society of London 148, 93-103.

35. BUICK, I.S. & HOLLAND, T.J.B, 1991. The nature and distribution of fluids during amphibolite facies metamorphism, Naxos Greece. *Journal of metamorphic Geology* 9, 301-314.
36. BUICK, I.S., 1988. The metamorphism and structural evolution of the Barrovian overprint, Naxos, Cyclades, Greece. PhD thesis, University of Cambridge.
37. FORSTER M. A., LISTER G. S., 2005. Several distinct tectono-metamorphic slices in the Cycladic eclogite-blueschist belt, Greece *Contrib Mineral Petrol.* original paper.
38. GAUTIER, P. & BRUN, J.P., 1994. Crustal-scale geometry and kinematics of late-orogenic extension in the central Aegean Cyclades and Evvia. *Tectonophysics* 238, 399-424.
39. GAUTIER, P., BALLEVRE, M., BRUN, J-P. & JOLIVET, L., 1990. Extension ductile et basins sédimentaires mio-pliocènes dans les Cyclades îles de Naxos et Paros. *Compte rendu Académie des Sciences* 310, 147-153.
40. GAUTIER, P., BRUN, J-P. & JOLIVET, L., 1993. Structure and Kinematics of upper Cenozoic extensional detachment on Naxos and Paros Cyclades Islands, Greece. *Tectonics* 12, 1180-1194.
41. HECHT, J., "Αποτελέσματα γεωλογικής έρεύνης της σμύριδας στη Νάξο", Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε., 24 σελ., 1979.
42. HECHT, J., BAKONΔΙΟΣ, Γ, "Αποτελέσματα πάνω στην ερευνητική δραστηριότητα για τη σμύριδα στη νήσο Νάξο", Έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε., 1979.
43. HIBSCH, C., BARRIER, P., JANIN, M.C., MALARTRE, F., VANDERHAEGHE, O. & PHOTIADES, A. 2004. Sedimentological, geomorphic and seismotectonic record of Metamorphic Core Complex MCC exhumation and brittle deformation stages in Naxos-Paros islands Cyclades, Greece. Réunion des Sciences de la Terre Joint Earth Sciences Meeting, Strasbourg, France, 20-25 septembre 2004.
44. JACOBESHAGEN, V., 1986. *Geologie von Griechenland*. Borntraeger, Stuttgart, 350 pp.
45. JANSEN, J., 1977. "The Geology of Naxos", Αθήνα, Ι.Γ.Μ.Ε., σελ. 100,
46. JANSEN, J., 1973. "Γεωλογικός χάρτης Νάξου, κλίμακας 1:50000" Αθήνα, Ι.Γ.Μ.Ε.,
47. JOHN, B.E. & HOWARD, K.A. 1995. Rapid extension recorded by cooling-age patterns and brittle deformation, Naxos, Greece. *Journal of Geophysical Research* 100, no. B7, 9969-9979.
48. KATZIR, Y., AVIGAD, D., MATTHEWS, A., GARFUNKEL, Z. & EVANS, B.W., 1999. Origin and metamorphism of ultrabasic rocks associated with a subducted continental margin, Naxos Cyclades, Greece. *Journal of Metamorphic Geology* 17, 301-318.
49. KEAY, S., LISTER, G.S., 1996a. Inside the dome of the Naxos core complex. In: Lister, G.S., Forster, M.A. Eds., *Inside the Aegean Metamorphic Core Complexes*. Australian Crustal Research Centre, Technical Publication, Melbourne, pp. 75–88.
50. KEAY, S., LISTER, G.S., 1996b. Evolution of the Naxos core complex. In: Lister, G.S., Forster, M.A. Eds., *Inside the Aegean Metamorphic Core Complexes*. Australian Crustal Research Centre, Technical Publication, Melbourne, pp. 61– 74.
51. KEAY, S., LISTER, G., BUICK, I. 2001. The timing of partial melting, Barrovian metamorphism and granite intrusion in the Naxos metamorphic core complex, Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Tectonophysics* 342, 275-312.
52. KOUKOUVELAS, I.K. & KOKKALAS, S., 2003. Emplacement of the Miocene west Naxos pluton Aegean Sea, Greece: a structural study. *Geology Magazine* 140, 45-61.

53. KUHLEMANN, J., FRISCH, W., DUNKL, I., 2004. Miocene siliciclastic deposits of Naxos Island: Geodynamic and environmental implications for the evolution of the southern Aegean Sea Greece Geological Society of America Special Paper 378.
54. LISTER, G.S., BANGA, G. & FEENSTRA, A. 1984. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Geology* 12, 21-25.
55. LISTER, G.S., BALDWIN, S.L., 1993. Plutonism and the origin of metamorphic core complexes. *Geology* 21, 607– 610.
56. LISTER, G.S. & FORSTER, M. 1996. Inside the Aegean metamorphic core complexes. Technical Publications of the Australian Crustal Research Centre 45, 110p.
57. MOYNTPAKHΣ, Δ., 1985: «Γεωλογία Ελλάδος», University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 207.
58. MOYNTPAKHΣ, Δ., 1988: «Συνοπτική Γεωτεκτονική εξέλιξη του ευρύτερου Ελληνικού χώρου», Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 116.
59. MEULENKAMP, J.E., WORTEL, M.J.R., VAN WAMEL, W.A., SPAKMAN, W., HOOGERDUYNSTRATING, E., 1988. On the Hellenic subduction zone and the geodynamic evolution of Crete since the late Middle Miocene. *Tectonophysics* 146, 203–215.
60. PE-PIPER, G., KOTOPOULI, C. N. & PIPER, D. J. W. 1997. Granitoid rocks of Naxos, Greece: regional geology and petrology. *Geological Journal* 32, 153–71.
61. REISCHMANN T 1998 Pre-Alpine origin of tectonic units from the metamorphic complex of Naxos, Greece, identified by single zircon Pb/Pb dating. *Bull Geol Soc Greece* 32:101–111
62. ROESLER, G., 1978. Relics of non-metamorphic sediments on Central Aegean Islands. In: Closs, H., Roeder, D., Schmidt, K. Eds., *Alps, Apennines, Hellenides: Interunion Commission on Geodynamics Scientific Report 38*. Elsevier, Amsterdam, pp. 480–481.
63. STRUMPF, N., 1997, *Das Kernkristallin von Naxos Kykladen, Griechenland*: Berlin, Schriftenreihe für Geowiss., v. 5, 140 p.
64. SMITH, A. G., 1993. Tectonic significance of the Hellenic–Dinaric ophiolites. In: Prichard, H. M., Alabaster, T., Harris, N. B. W. & Neary, C. R. (eds) *Magmatic Processes and Plate Tectonics. Geological Society, London, Special Publications* 76, 213–243.
65. URAI, J.L., SCHUILING, R.D. & JANSEN, J.B.H., 1990. Alpine deformation on Naxos Greece. *Geological Society Special Publication* 54, 509-522.
66. WALCOTT, C.R., 1998. The Alpine evolution of Thessaly NW Greece and late Tertiary Aegean kinematics. PhD thesis, Utrecht University; *Geologica Ultraiectiona* 162, 176p.
67. WIJBRANS, J.R. & MCDUGALL, I. 1988. Metamorphic evolution of the Attic Cycladic metamorphic belt on Naxos Cyclades, Greece utilizing $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectrum measurements. *Journal of Metamorphic Geology* 6, 571-594.

Κεφάλαιο 3 : Γεωμορφολογία.

68. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, Δ., 1999: «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3^η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
69. ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ., 1975. Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Ξυνιάδος Φθιώτιδα, Διατριβή, Θεσ/νική, σελ. 99.

Κεφάλαιο 4 : Υδρογεωλογία

71. ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ, Π., 1983: «Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Καστοριάς», Διδ. Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, σελ. 130.
72. ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., 2004: «Στατιστική ανάλυση υδρογεωλογικών δεδομένων», Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., σελ. 102.
73. ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., 1995: «Υδρογεωλογικές συνθήκες του ΒΔ/κού τμήματος του Ν. Αχαΐας», Διδ. διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
74. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν., ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΥ Π., 2002: «Υδρολογικό ισοζύγιο και διαχείριση του καρστικού συστήματος Γιούχτα», Ερευνητικό πρόγραμμα Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.
75. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., 2001: «Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία», 2nd edition, Α, Β, Γ τόμοι, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
76. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., 1986: «Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία», Τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
77. KOPPEN, W., GEIGER, R., 1936: «Handbuch der Klimatologie», Berlin.
78. ΜΙΜΙΚΟΥ, Μ., 1994: «Τεχνολογία υδατικών πόρων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2nd edition, Αθήνα.
79. ΞΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ, Θ., 1972: «Μαθήματα Στατιστικής Υδρολογίας», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
80. ΡΑΠΤΗ, Δ., 1995: «Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής Σκύδρας – Επισκοπής Μακεδονία. Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των υδροφόρων στρωμάτων», Διδ. Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
81. ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ., 1985: «Συμβολή στη μελέτη των καρστικών υδροφόρων συστημάτων του ελληνικού χώρου», παρ. αρ. του 23^{ου} τόμου της επετ. Της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ., Θεσ/νίκη, σελ. 292.
82. ΣΟΥΛΙΟΣ, Γ., 1986: «Γενική Υδρογεωλογία», Πρώτος Τόμος, University Studio Press.
83. THORNTHWAITE, C., 1944: «Report of the committee on transpiration and evaporation», Am. Geoph. Union, vol. 25.
84. THORNTHWAITE, C., 1951: «An approach toward a rational classification of climate», Geogr. Rev., Vol. 38, pp. 55 – 94.
85. THORNTHWAITE, C. MATHER, J., 1955: «The water Balance», Climatology, vol. VIII, No 1, New Jersey, pp. 1 -37.
86. ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Γ., 1995: «Υδατικοί πόροι: Τεχνική Υδρολογία», Εκδ. Συμμετρία, Αθήνα, σελ. 675.
87. ΦΛΟΚΑΣ, Α., 1990: «Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας», Εκδόσεις Ζήτη, Α.Π.Θ., σελ.465.

Κεφάλαιο 6 : Γεωθερμομετρία.

88. ARNÓRSSON, S., GUNNLAUGSSON, E., 1983: Gas chemistry in geothermal systems. Proceedings of the 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, Ca., 231-237.

89. BARBIER E. 1998, "Geothermal Energy: A general overview", In: International Workshop on Heating Greenhouses with Geothermal Energy" Guideline & Proceedings, Institute for Innovative Technologies of Azores INOVA, Ponta Delgrada Azores, Portugal, pp. 31-109.
90. BOWEN R. 1989, "Geothermal Resources", 2nd Edition, Elsevier Applied Science, New York, USA, 485 pp.
91. D' AMORE F. & PANICHI C. 1987, "Geochemistry in Geothermal Exploration", Chapter 5, Applied Geothermics eds M. Economides & P. Ungemach, pp. 68-89.
92. ELLIS A.J. & MAHON W.A.J. 1977, "Chemistry and Geothermal Systems", Academic Press Inc., USA, 392 pp.
93. FOUILLAC C. & MICHARD G. 1981, "Sodium lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs", Geothermics, Vol. 10, pp. 55-70.
94. FOURNIER R.O. 1981, "Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering", In: Geothermal Systems: Principles and Case Histories, Ryback L. and Muffler L.J.P. Eds, Wiley, New York, pp. 109-143.
95. FOURNIER R.O & TRUESDELL A.H. 1973, "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 37, pp. 1255-1275.
96. FOURNIER, R.O., 1977: Chemical geothermometers and mixing model for geothermal systems. Geothermics, 5, 41-50.
97. FOURNIER, R.O., AND TRUESDELL, A.H., 1973: An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 1255-1275.
98. GIGGENBACH, W.F., 1980: Geothermal gas equilibria. Geochim. Cosmochim. Acta, 44, 2021-2032.
99. GIGGENBACH W.F., GONFIANTINI R., JANGI B.L. & TRUESDELL A.H. 1983, "Isotopic and chemical composition of Parbati Valley geothermal recharges, NW Himalaya, India", Geothermics, Vol. 12, pp. 199-222.
100. GIGGENBACH W. F. 1988, "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers", Geochim. Cosmochimica Acta, Vol. 52, pp. 2749-2765.
101. GUPTA K. H. 1980, "Geothermal resources: an energy alternative" Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 227 pp.
102. ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ Γ. 1986, "Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία", Τόμοι Α' και Β', Έκδοση Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
103. KHARAKA Y.K. & MARINER R.H. 1989, "Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins", In: Naeser, N.D. and Mc Collon, T.H. eds "Thermal History of Sedimentary Basins", Springer-Verlag, N. York, pp. 99-117.
104. TRUESDELL A.H. 1975, "Geochemical Techniques in Exploration", Proc. 2nd UN Symp. on the Development and Use of Geothermal Resources, Vol. 1, pp. 53-86.
105. WRIGHT P. M. 1991, "Exploration for Direct Heat Resources", in "Geothermal Direct Use Engineering and Design Guidebook", 2nd edition, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, Oregon, USA, pp. 55-98.

Κεφάλαιο 7 : Υδροχημεία

- 106.ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., 2004: «Στατιστική ανάλυση υδρογεωλογικών δεδομένων», Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., σελ. 102.
- 107.ΒΟΥΔΟΥΡΗΣ, Κ., 1995: «Υδρογεωλογικές συνθήκες του ΒΔ/κού τμήματος του Ν. Αχαΐας», Διδ. διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- 108.DAVIS, J.C., 1987: «Statistics and data analysis in geology», 2nd edition, John Wiley and Sons, N.Y., pp. 656.
- 109.DAVIS, S.N. AND R.J.M. DE WIEST 1966. Hydrogeology, New York: John Wiley and Sons.
- 110.DAZY J., DROGUE C., CHARMANIDIS PH., DARLET CH. 1997. 'The influence of marine inflows on the chemical composition of groundwater in small islands: the example of the Kyclades Greece'. Environmental Geology 31 3/4 June 1997, 133-141.
- 111.ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ, Γ., 1983: «Εφαρμοσμένη Γεωλογία», Τόμος 1^{ος}, Υδρογεωλογία, Θεσσαλονίκη, σελ 428.
- 112.ΚΑΛΛΕΡΓΗΣ, Γ., 1986: «Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία», Τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- 113.ΛΑΜΠΡΑΚΗΣ, Ν., 1994: «Εισαγωγή στην υδροχημεία», Πανεπιστήμιο Πατρών, σελ. 158.
- 114.LLOYD, J.W., HEATHCOTE, J.A., 1985: «Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction», Oxford.
- 115.ΠΑΤΡΙΚΑΚΗ, Ο., 2002: «Μελέτη των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής του νότιου πεδίου Πτολεμαΐδας», Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.
- 116.PIPER, A., 1944: «A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis», Trausam, Geophysical Union, 25/914-928, New York.
- 117.SCHOLLER, H., 1948: «Le régime hydrologique des calcaires éocènes du synclinal du Dyr El Kef Tunisie», Bull. Sco. Geol. Gr., ser. 5, Vol. 28, Paris, pp. 167 – 180.
- 118.SCHOLLER, H., 1962: «Les eaux souterraines», Ed. Masson, Paris, pp. 642.
- 119.SCHOLLER, H., 1967: «Hydrodynamique dans le karst écoulement et emmagasinement», Cornique d' Hydrogéologie, no 10, éditions B.R.G.B. Orléans France, pp. 7 – 21.
- 120.WILCOX, L.V., 1955: «Classification and use of irrigation waters», U. S. Depart. Agric. Circ. 969, Washington, pp. 19.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.	4
1.1 Γεωθερμική έρευνα στη Νήσο Νάξου.	4
1.2 Εισαγωγή στη γεωθερμία.	5
1.2.1 Γεωθερμικά πεδία.	6
1.2.1.1 Μεταφορικά και Μεταδοτικά γεωθερμικά συστήματα.	9
1.2.1.2 Ταξινόμηση των γεωθερμικών συστημάτων με βάση την ενθαλπία τους.	10
1.2.1.3 Γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας.	11
1.3 Γεωθερμική έρευνα.	11
1.3.1 Αντικείμενα έρευνας	12
1.3.2 Μέθοδοι έρευνας.	13
1.4 Χρήσεις των γεωθερμικών πόρων.	16
1.4.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.	17
1.4.2 Αφαλάτωση.	19
1.4.3 Άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας.	20
2. Γεωλογία της νήσου Νάξου.	25
2.1 Γεωλογικά στοιχεία της Νήσου Νάξου.	25
2.2 Εξέλιξη της μεταμόρφωσης.	27
2.3 Λιθοστρωματογραφία.	29
2.3.1 Αλπικό σύμπλεγμα περιοχικής μεταμόρφωσης	29
2.3.2 Ο γρανοδιορίτης (Δυτικός Πλουτωνίτης) της Νάξου.	31

2.3.3	Ενότητα μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων.	31
2.4	Τεκτονική της Νήσου Νάξου.	33
2.4.1	Το Σύμπλεγμα Μεταμορφικού Πυρήνα της νήσου Νάξου.	34
2.4.2	Τεκτονική.	35
2.4.2.1	Θραυστιγενής παραμόρφωση.	35
2.4.2.2	Πλαστική παραμόρφωση.	36
3.	Γεωμορφολογικά στοιχεία της νήσου Νάξου.	39
4.	Υδρολογικά στοιχεία.	44
4.1	Βροχομετρικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί.	44
4.2	Βροχοπτώσεις	45
4.2.1	Σχέση ύψους βροχόπτωσης – υψομέτρου.	45
4.2.2	Κατανομή των βροχοπτώσεων.	47
5.	Γεωθερμική και θερμομετρική έρευνα στη νήσο Νάξο.	48
5.1	Εισαγωγή.	48
5.2	Θερμομέτρηση στην κεφαλή των γεωτρήσεων κατά την άντληση.	49
5.3	Χάρτες ισόθερμων καμπυλών.	53
6.	Χημική γεωθερμομετρία	69
6.1	Γεωθερμόμετρο του SiO_2 .	70
6.2	Γεωθερμόμετρα Na/K και Na-K-Ca.	71
6.3	Γεωθερμόμετρο Na-Li.	72
6.4	Γεωθερμόμετρο K-Mg.	73
6.5	Γεωθερμόμετρο Li-Mg.	73
6.6	Αποτελέσματα χημικής γεωθερμομετρίας στη Νάξο .	76

7. Υδροχημική έρευνα νερών.	78
7.1. Μεθοδολογία πραγματοποίησης χημικών αναλύσεων δειγμάτων.	78
7.2. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων.	81
7.3 Προέλευση των υπόγειων υδάτων - Ιοντικοί λόγοι.	87
7.4 Ταξινόμηση των υπόγειων νερών.	89
7.4.1 Διάγραμμα Piper – De Wiest.	90
7.4.2 Διάγραμμα Durov.	91
7.4.3 Διάγραμμα Schoeller.	91
7.4.4 Διάγραμμα S.A.R.	92
7.4.5 Διάγραμμα Wilcox.	94
7.5 Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (P.C.A.).	95
7.6 Συμπεράσματα χημικών αναλύσεων	99
8. Συμπεράσματα	101
9. Προτάσεις	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	121
Χάρτης νήσου Νάξου και τομές επί αυτού	123

ΥΠΟΜΝΗΜΑ
Ανώτερη Ενότητα μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων

Τεταρτογενές

Αλλούβια ιζήματα, λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, θίνες και συγκολλημένα αλλουβιακά ριπίδια.

Τριτογενές (Ολιγόκαινο-Μειόκαινο)

Μη μεταμορφωμένα ιζήματα
κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, μάργες

Εκρηξηγενή

Μειόκαινο

Ο γρανοδιορίτης (Δυτικός Πλουτωνίτης) της Νάξου

Συντεκτονικοί γρανίτες (S-τύπου)

Κάτω Ηώκαινο

Πετρώματα της οφειολιθικής ακολουθίας
σερπεντινίτες, διαβάσεις, γαββροειδή πετρώματα

**Αλπικό σύμπλεγμα περιοχικής μεταμόρφωσης
(Ενότητα Κυκλαδικών Κυανοσχιστολίθων CBU).**

Μεταϊζηματογενής Ακολουθία

Μεσοζωικό

Μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι (μεταπηλίτες)

Αμφιβολίτες

Μετακροκαλοπαγές εκ μαρμάρων

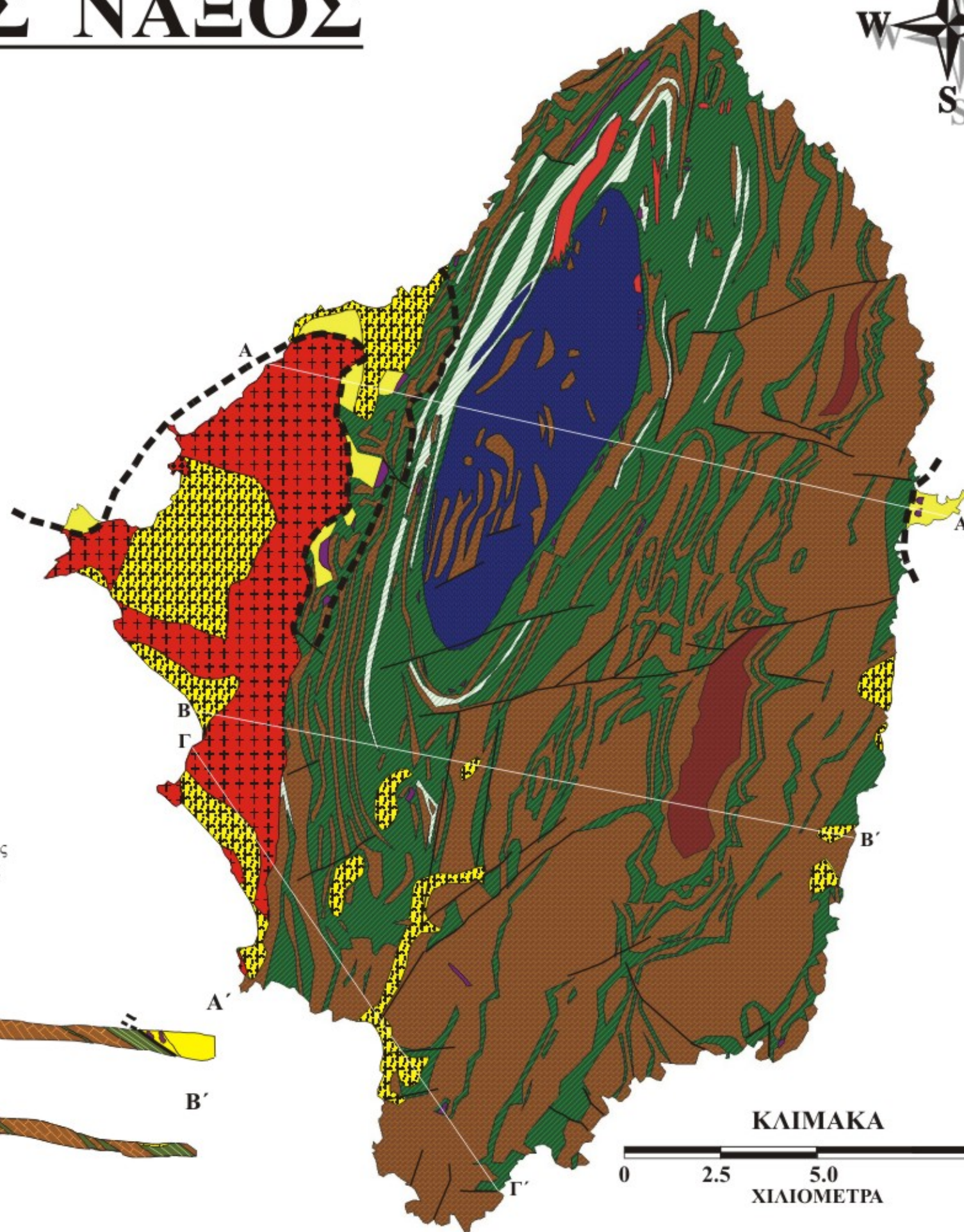
Μάρμαρα

Λιθανθρακοφόρο (Ερκύνιο)

Μιγματιτικός - Γνευσιακός πυρήνας

Ορθογενέσιοι, παραγενέσιοι, μιγματίτες

ΝΗΣΟΣ ΝΑΞΟΣ



Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.