

Γεωθερμική έρευνα - Ερευνητικές διαδικασίες

Τεχνικο-οικονομικοί παράγοντες για την αξιολόγηση της οικονομικότητας των γεωθερμικών χρήσεων και της «αξίας» του ενεργειακού προϊόντος

- ✓ η θερμοκρασία,
- ✓ η παροχή και
- ✓ η ποιότητα των ρευστών.
- ✓ το κόστος των γεωτρήσεων,
- ✓ Αστάθμητοι παράγοντες - κανόνες της ελεύθερης οικονομίας

Για την οικονομικότητα του γεωθερμικού κοιτάσματος απαιτούνται

- ✓ Ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες για τη δημιουργία των εκμεταλλεύσιμων γεωθερμικών πεδίων
- ✓ μικρά σχετικά βάθη και
- ✓ η γεωθερμική ενέργεια να είναι όσο γίνεται περισσότερο συγκεντρωμένη, κοντά στην επιφάνεια και κατά το δυνατόν ανανεώσιμη

□ Για την απάντηση **περί οικονομικότητας** απαιτούνται συστηματικές **Επιφανειακές γεωθερμικές έρευνες.**

➤ Οι επιφανειακές έρευνες, αν και χρονοβόρες, είναι πολλαπλάσια φθηνότερες από τις βαθιές γεωτρητικές εργασίες.

□ Η γνώση των συνθηκών του πεδίου αποτελεί απαραίτητο εργαλείο στην κατανόηση του **γεωθερμικού μοντέλου,**

το οποίο με τη σειρά του είναι απαραίτητο για το σχεδιάσμό και υλοποίηση της εκμετάλλευσης και της σωστής διαχείρισης του κάθε πεδίου.

Η γεωθερμική έρευνα διακρίνεται σε τέσσερα κύρια (ή τυπικά) στάδια:

1^ο. Γενική επισκόπηση μεγάλης κλίμακας

2^ο. Λεπτομερής και συστηματική έρευνα των πιθανότερων γεωθερμικών περιοχών

3^ο .Εντοπισμός-περιχάραξη των γεωθερμικών πεδίων, μελέτη των χαρακτηριστικών

4^ο .Ανάπτυξη και διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων.

✓ Τα στάδια αυτά ισχύουν σε όλες τις περιπτώσεις της γεωθερμικής έρευνας, αν και οι επί μέρους γεωλογικές συνθήκες είναι διαφορετικές από πεδίο σε πεδίο.

✓ Η γεωθερμική έρευνα στοχεύει στα ευνοϊκότερα αποτελέσματα με το λιγότερο δυνατό κόστος.

✓ Σε κάθε φάση απαιτείται υποχρεωτικά η συνεργασία και ο συντονισμός των διαφόρων επιστημόνων και τεχνικών που εμπλέκονται στην όλη έρευνα.

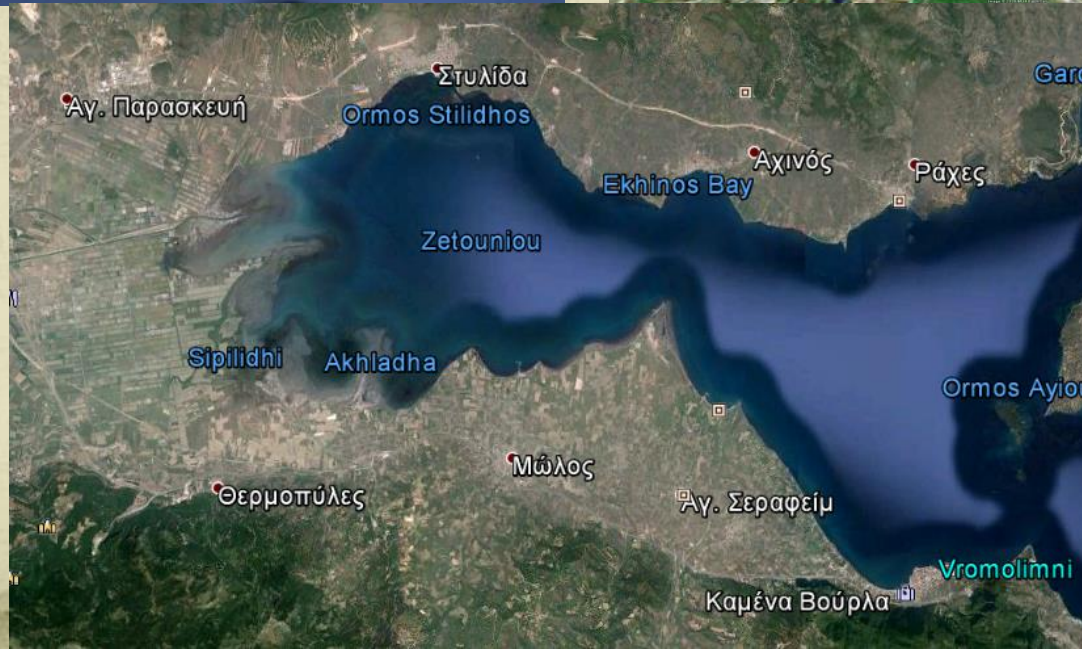
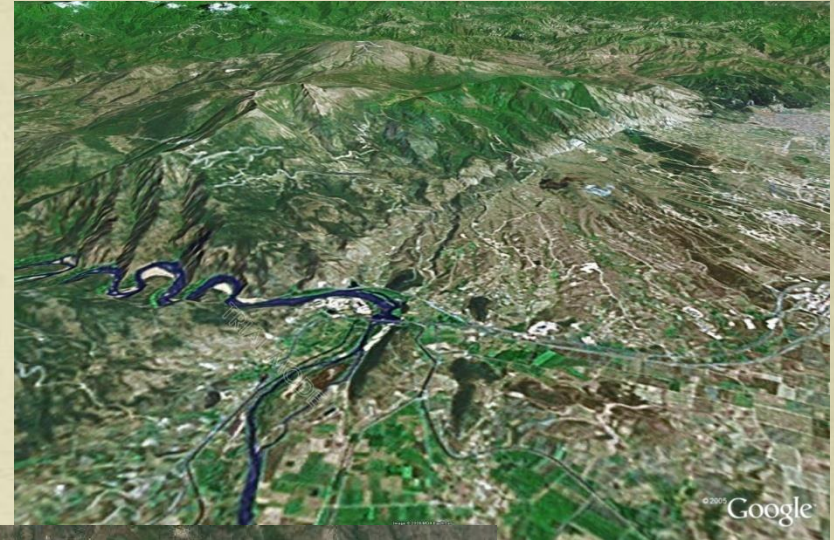
Πρώτο στάδιο: Γεωθερμική έρευνα μεγάλης κλίμακας

❖ Η γεωθερμική έρευνα μίας ευρύτερης περιοχής (π.χ. μίας περιφέρειας ή μίας μεγάλης γεωλογικής ενότητας) πρέπει να λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους και να χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία, όπως

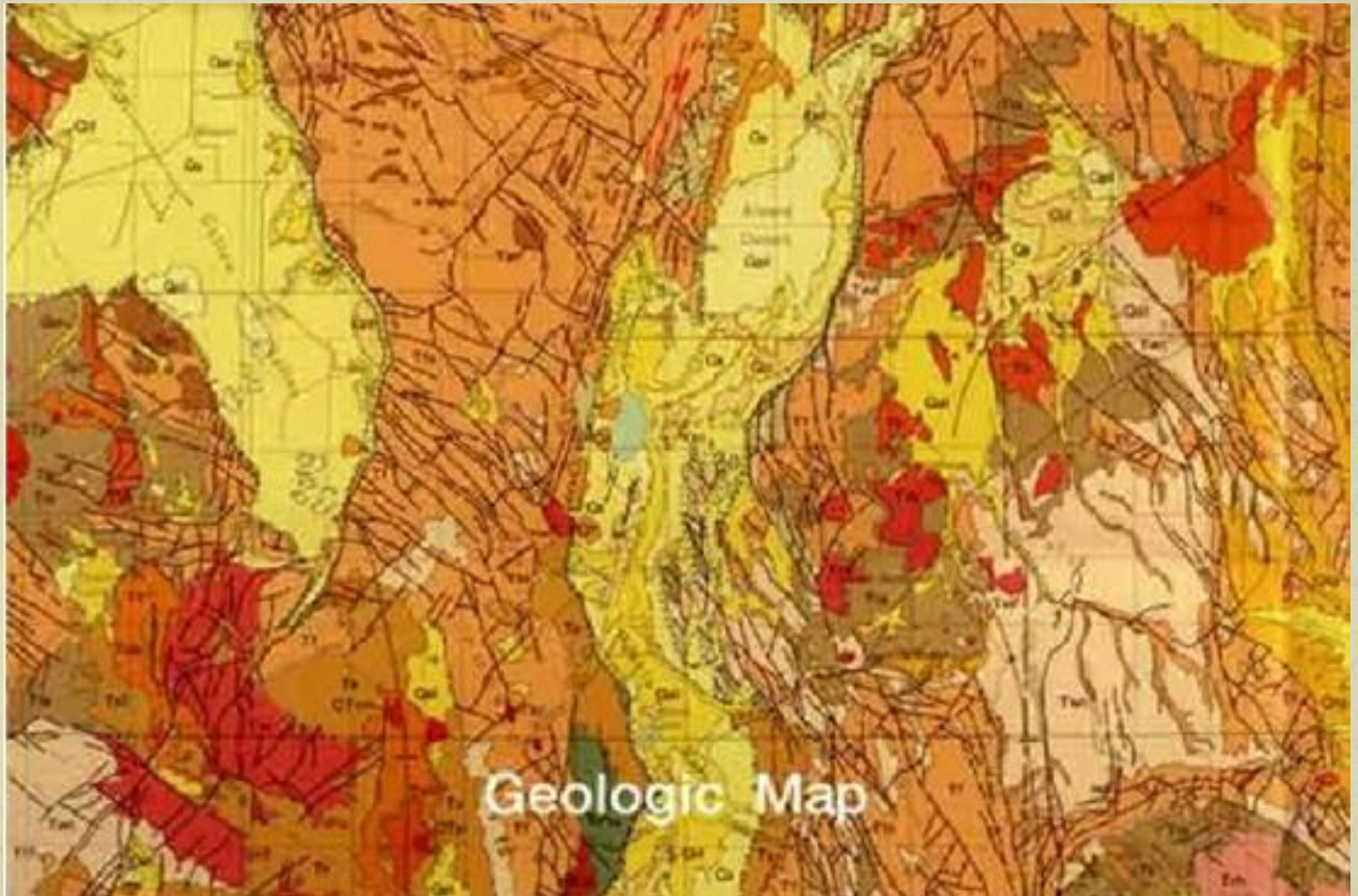
- ❑ γεωλογικοί και τεκτονικοί χάρτες,
 - ❑ αεροφωτογραφίες,
 - ❑ βιβλιογραφική ανασκόπηση,
 - ❑ αναγνωριστικές επισκέψεις,
 - ❑ θερμομετρήσεις,
 - ❑ δειγματοληψίες – αναλύσεις νερού κ.τ.λ..

Στόχος των παραπάνω είναι η επιλογή και υπόδειξη των περιοχών με τις ευνοϊκότερες συνθήκες. Έτσι, αποκλείονται μερικές περιοχές και οι προσπάθειες επικεντρώνονται σε ορισμένες μόνο περιοχές, για τις οποίες γίνεται προσεκτική επεξεργασία των υπαρχόντων στοιχείων.

Το πρώτο στάδιο της έρευνας ξεκινά με δορυφορικές εικόνες (χάρτες) και αεροφωτογραφίες.



Γεωλογικοί χάρτες



Δεύτερο στάδιο: Λεπτομερής και συστηματική έρευνα των πιθανότερων γεωθερμικών περιοχών

Το στάδιο αυτό αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της γεωθερμικής έρευνας και μελέτης, αφού επιχειρείται ο καθορισμός και η έρευνα των περιοχών που έχουν τις περισσότερες πιθανότητες ύπαρξης γεωθερμικών πεδίων σε μικρό σχετικά βάθος

❖ Ερευνώνται με λεπτομέρεια εκείνοι οι παράγοντες που μπορούν να χαρακτηρίσουν μια γεωθερμική περιοχή.

(γεωλογικοί, τεκτονικοί, ηφαιστειολογικοί, λιθολογικοί, υδρογεωλογικοί, γεωχημική, γεωφυσική, θερμοδυναμικοί κ.λ.π.),

❖ Τελικός στόχος του σταδίου αυτού είναι ο προσδιορισμός
✓ του γεωθερμικού μοντέλου κάθε γεωθερμικού κοιτάσματος και
✓ η γνώση της θέσης και κατάστασης στην οποία βρίσκονται τα γεωθερμικά ρευστά ή θερμά πετρώματα.

Συγχρόνως προτείνεται

✓ η σειρά,
✓ το βάθος και
✓ τα χαρακτηριστικά των ερευνητικών – παραγωγικών γεωτρήσεων.

Το δεύτερο στάδιο ερευνών είναι χρονοβόρο και απαιτεί τη διεξαγωγή πολλών εργασιών στην ύπαιθρο, το εργαστήριο και το γραφείο

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

- Αναγνώριση γεωθερμικών φαινομένων
- Προκαταρκτική αξιολόγηση των δυνατοτήτων για αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας

Αξιολόγηση της τεχνοοικονομικής υποδομής της περιοχής

Γεωλογική, υδρογεωλογική, γεωχημική και γεωφυσική έρευνα

Αποτύπωση προσφοράς ζήτησης ενέργειας

Ανόρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων

Προμελέτη σκοπιμότητας

Συμπληρωματική έρευνα

Ανόρυξη γεωτρήσεων μελέτης πεδίου (μεγάλου βάθους)

Κυριότερες μέθοδοι του δευτέρου σταδίου είναι κατά σειρά,



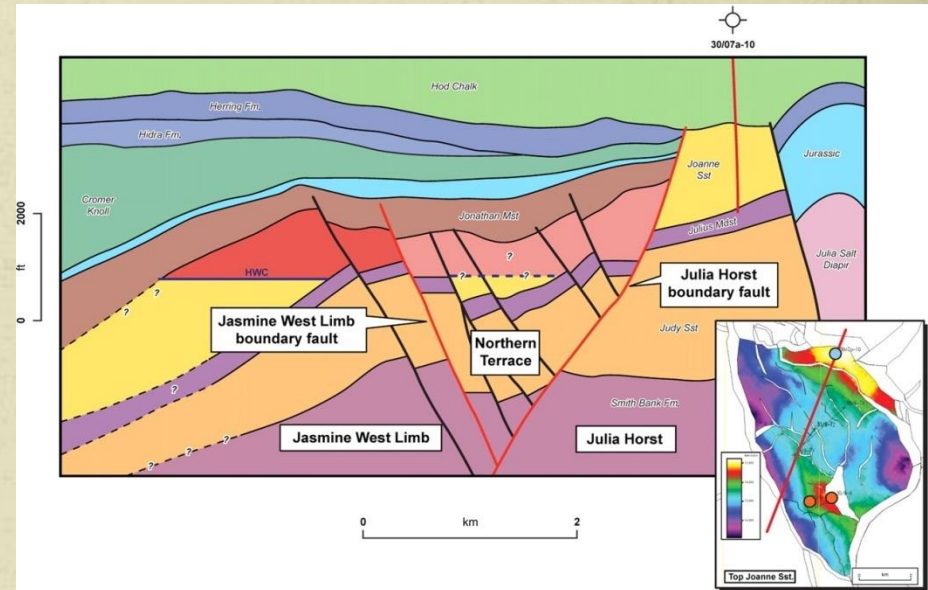
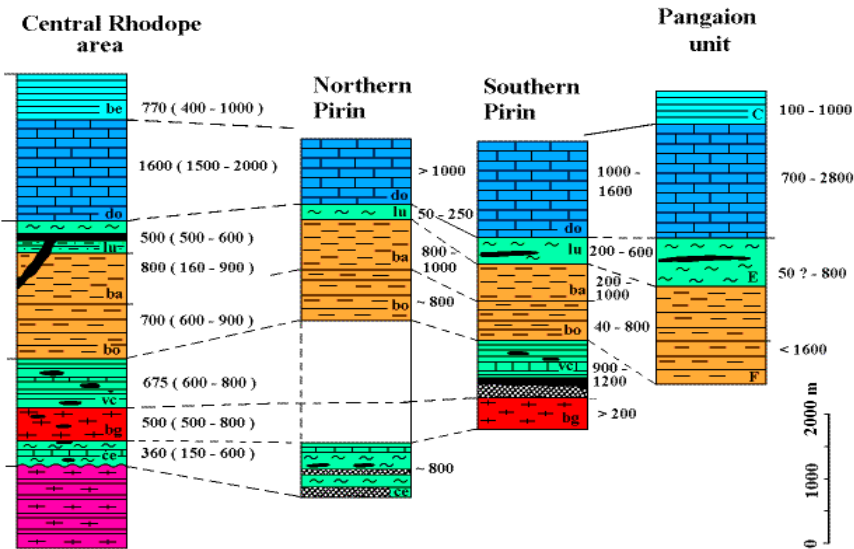
➤ **Γεωλογική μελέτη και ειδική χαρτογράφηση**

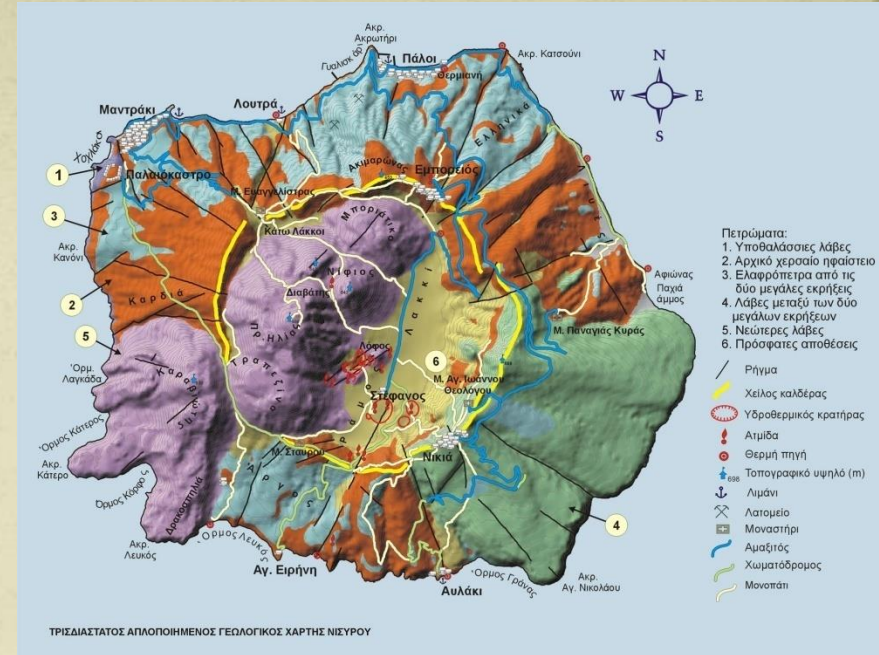
Στόχος της είναι να κατανοηθούν

- ✓ το είδος και η φύση των γεωλογικών σχηματισμών που συμμετέχουν στην κατασκευή των επιφανειακών τμημάτων της λιθόσφαιρας της περιοχής,
- ✓ τα λιθολογικά χαρακτηριστικά τους.
- ✓ η στρωματογραφία τους και το πάχος κάθε σχηματισμού
- ✓, η περατότητα ή στεγανότητα κτλ.

Γεωλογική μελέτη και ειδική χαρτογράφηση

Η μελέτη αυτή προϋποθέτει τη γεωλογική χαρτογράφηση την κατασκευή μερικών χαρακτηριστικών στρωματογραφικών στηλών και ορισμένων γεωλογικών τομών της περιοχής, οι οποίες θα πρέπει να διέρχονται από τα κεντρικότερα σημεία του πεδίου





➤ Ηφαιστειολογική μελέτη εφαρμοζόμενη στη Γεωθερμία

Όταν η υπό έρευνα περιοχή βρίσκεται σε χώρο με ηφαιστειακούς σχηματισμούς και, κυρίως, όταν έχει ηφαιστειακά κέντρα που παρουσιάζουν πρόσφατη ή ενεργό δραστηριότητα, είναι προφανές ότι χρειάζεται ειδική ηφαιστειολογική αντιμετώπιση.

Η μελέτη των διεργασιών υδροθερμικής εξαλλοίωσης των πετρωμάτων και απόθεσης νέων υδροθερμικών ορυκτών δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την ύπαρξη και το χαρακτήρα του στεγανού καλύμματος του ταμιευτήρα.



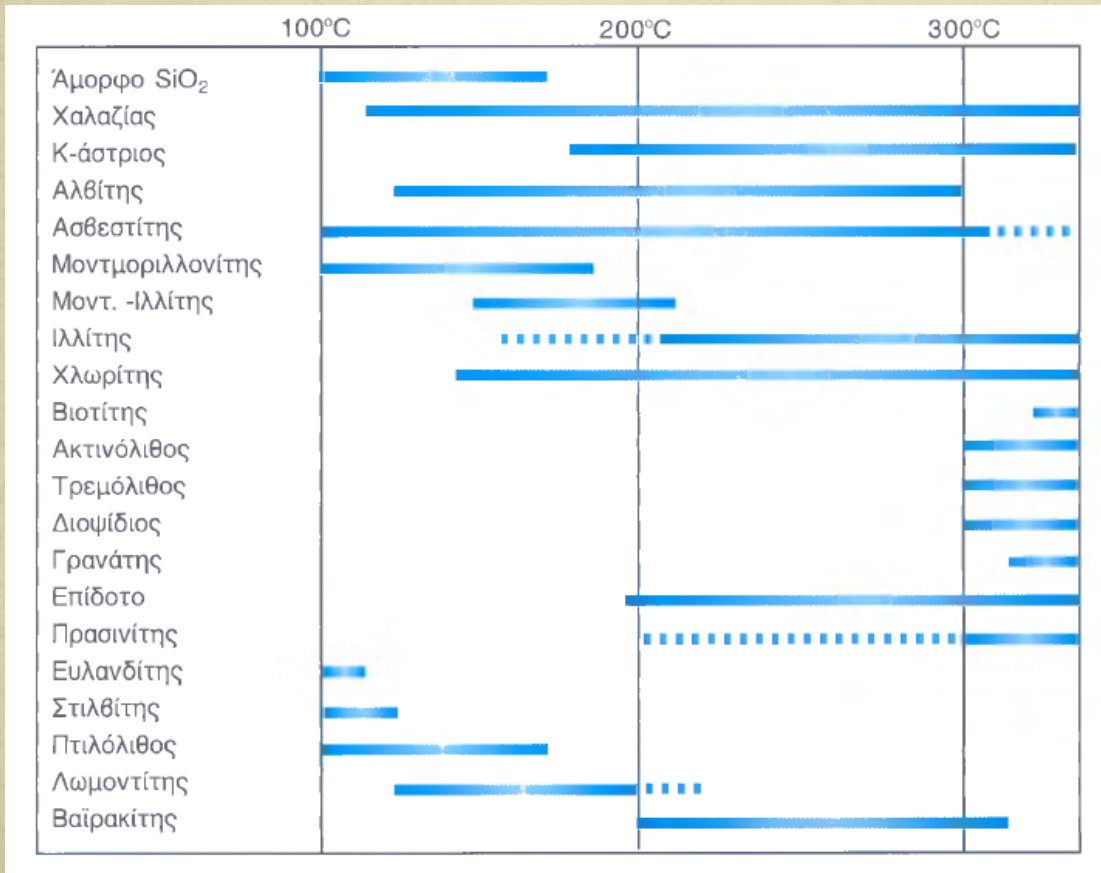
Υδροθερμική εξαλλοίωση- Υδροθερμική απόθεση

✓ Τα πετρώματα μέσα στα οποία κυκλοφορούν τα γεωθερμικά ρευστά στο υπέδαφος επηρεάζουν όπως είναι φυσικό τη σύστασή τους, δηλαδή ορισμένα χημικά στοιχεία από τα ρευστά μπορεί να αντικαταστήσουν κάποια άλλα στοιχεία.

✓ Συμβαίνει όμως και το αντίθετο, δηλ. τα ρευστά, αντιδρώντας με τα πετρώματα, αλλοιώνουν πολλά συστατικά τους (ορυκτά), μερικές φορές τα διαλύουν εντελώς. δηλαδή ορισμένα ορυκτά των πετρωμάτων που αποτελούν τον ταμιευτήρα μπορεί να διαλύονται επιλεκτικά από τα ρευστά

✓ Τα συστατικά που προσλαμβάνονται από τα νερά είτε διατηρούνται στο διάλυμα είτε αποτίθενται σε άλλο σημείο, όταν αλλάξουν οι γεωχημικές και γεωθερμικές συνθήκες.

✓ Έτσι, έχουμε δύο κύρια φαινόμενα (με άλλα ενδιάμεσα) την
✓ Υδροθερμική εξαλλοίωση και την Υδροθερμική απόθεση



Περιοχές θερμοκρασιών για
τυπικά υδροθερμικά ορυκτά
(Henley & Ellis, 1983).

Υδροθερμική εξαλλοίωση- Υδροθερμική απόθεση

➤ α) υδροθερμική εξαλλοίωση, πρόκειται για το φαινόμενο εξαλλοίωσης των πετρωμάτων στα οποία κυκλοφορούν τα γεωθερμικά ρευστά (δηλαδή αναφέρεται στις ορυκτολογικές μεταβολές που προκαλούνται στα πετρώματα από την αλληλεπίδραση με τα γεωθερμικά ρευστά)

➤ β) υδροθερμικές αποθέσεις, απόθεση νέων ορυκτών ή ενώσεων από τα υδροθερμικά ρευστά, τα οποία καλούνται και υδροθερμικά προϊόντα.

❖ Αυτές οι ορυκτολογικές- χημικές αλλαγές στα πετρώματα του ταμιευτήρα μπορούν να επηρεάσουν και να τροποποιήσουν

❖ την υδροπερατότητα και το πορώδες των πετρωμάτων.

❖ Η μετατροπή ορισμένων ορυκτών λόγω του pH και της θερμοκρασίας σε άλλα του αργίλου, δημιουργούν επίσης στεγανοποίηση του αρχικού πετρώματος, γεγονός που επιδρά σημαντικά στα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού πεδίου.

Υδροθερμική εξαλλοίωση του γρανίτη



Οι όξινες-θειούχες πηγές αποθέτουν κοντά στην επιφάνεια διάφορα ορυκτολογικά κατάλοιπα, που περιέχουν αυτόχθον θείο, κιννάβαρι, θειικά ορυκτά, οξείδια του σιδήρου και αργιλικά ορυκτά. Τέτοιες εξαλλοιωμένες περιοχές μπορούν να αναγνωριστούν



□ Μια χαρακτηριστική υδροθερμική εξαλλοίωση ενδιάμεσης θερμοκρασίας δημιουργεί την αργιλοποίηση (καολινιτίωση ή μπεντονιτίωση) των ηφαιστιτών, μετατρέποντάς τους από περατούς σε εντελώς στεγανούς σχηματισμούς.



□ Επιτυγχάνεται δηλαδή αυτοστεγανοποίηση, καθιστώντας έτσι τους πρώην ηφαιστίτες σε ιδανικούς σχηματισμούς για το ρόλο του καλύμματος.

✓ Η μπεντονιτίωση χρειάζεται ρευστά $150-180^{\circ}\text{C}$ και pH μάλλον αλκαλικό.

✓ Η καολινιτίωση ρευστά $120-150^{\circ}\text{C}$ και pH όξινο, με τη συμμετοχή των πιο επιφανειακών ρευστών.

✓ Τέλος, η πυριτίωση απαιτεί ρευστά ακόμη μικρότερης θερμοκρασίας.

□ Η παραπάνω στρωματοποίηση και ζώνωση των υδροθερμικών ορυκτών είναι πολύ χαρακτηριστική και αποτελεί μία πολύ καλή εφαρμογή των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στη γεωθερμομετρία.

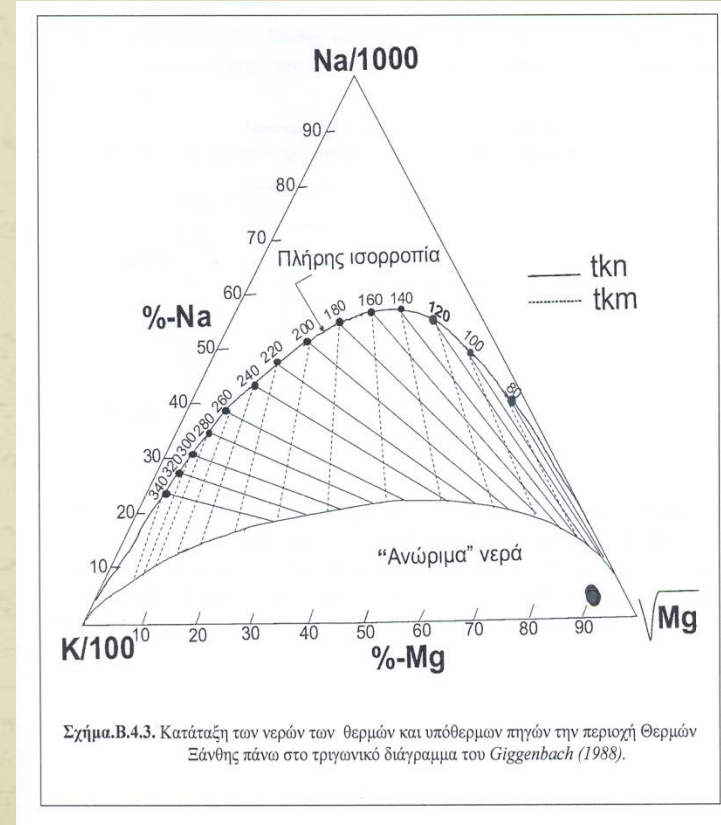
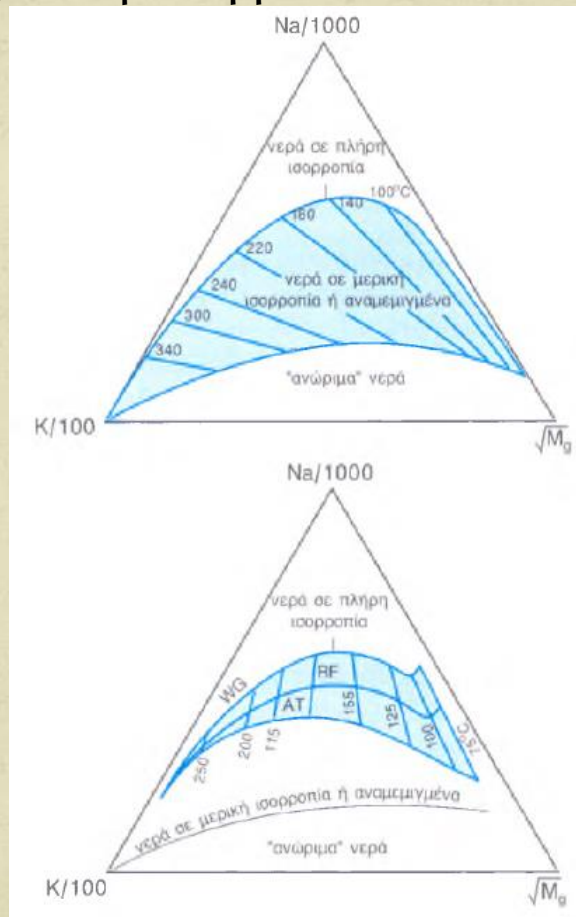
□ Κλασικό παράδειγμα στρωματοποίησης υδροθερμικών ορυκτών βρίσκουμε στη Μήλο.



Ισορροπία χημικών στοιχείων στο νερό

Η μη ισορροπία ορισμένων στοιχείων στο νερό και στα περιβάλλοντα πετρώματα παίζει ένα ουσιαστικό ρόλο για την περαιτέρω επιβάρυνση των γεωθερμικών νερών, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερο οι δυο συστάσεις (νερού και πετρώματος) προσεγγίζουν την ισορροπία

Τριγωνική Γεωθερμική μέθοδος



Σχήμα.Β.4.3. Κατάταξη των νερών των θερμών και υπόθερμων πηγών την περιοχή Θερμών Ξάνθης πάνω στο τριγωνικό διάγραμμα του Giggenbach (1988).

Τριγωνικά διαγράμματα, για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του ταμειυτήρα και για την αναγνώριση του βαθμού ισορροπίας των νερών.

- Γεωλογική μελέτη και ειδική χαρτογράφηση
- Ηφαιστειολογική μελέτη

➤ Γεωχημεία εξειδικευμένη στη γεωθερμική έρευνα

✓ Η μελέτη της γεωχημείας των γεωθερμικών ρευστών (καθώς και των στερεών πετρωμάτων) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και αρκετά αξιόπιστη μέθοδο για την αναζήτηση και τη μελέτη των γεωθερμικών πεδίων και αποτελεί αξιόλογο εργαλείο για την κατανόηση της σημερινής ή της πρόσφατης γεωθερμικής κατάστασης στην ερευνούμενη περιοχή.

Εκτίμηση των θερμοκρασιών του γεωθερμικού "ταμιευτήρα"

➤ Από τις αποθέσεις

➤ Από τη χημική σύσταση των θερμών νερών ή πηγών

❖ Οι χημικές αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μερικές φορές για να εκτιμηθεί η θερμοκρασία του υπόγειου ταμιευτήρα. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική και κατά τη διάρκεια της ανόρυξης των γεωτρήσεων για τους παρακάτω λόγους.

✓ ακριβείς μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν μπορούν να γίνουν σε μια γεώτρηση,

✓ η χημική γεωθερμομετρία μπορεί να υποδείξει ότι θερμοκρασίες υψηλότερες από εκείνες που βρέθηκαν μέσα σε μία γεώτρηση μπορούν να βρεθούν κάπου αλλού στην ευρύτερη περιοχή.

➤ Ιχνοστοιχείων που απαντούν σε ορισμένα ορυκτά

➤ Ο βαθμός ενανθράκωσης οργανικών ενώσεων

➤ Γεωφυσικές μέθοδοι (μετρήσεις της θερμοκρασίας μέσα σε γεωτρήσεις, έμμεσοι μέθοδοι όπως η βαρυτομετρική, γεωηλεκτρική, μαγνητοτελλουρική, σεισμική, η μέθοδος των θερμοκρασιών)

➤ Από διάφορα γεωθερμόμετρα, όπως γεωθερμόμετρα Na/K και K/Ar, κ.λ.π.

ΓΕΩΘΕΡΜΟΜΕΤΡΑ

Ταξινομούνται σε τρεις ομάδες

1. Γεωθερμόμετρα νερού
2. Γεωθερμόμετρα αερίων
3. Γεωθερμόμετρα ισοτόπων

Τα γεωθερμόμετρα νερού και αερίων αναφέρονται γενικά ως
ΧΗΜΙΚΑ ΓΕΩΘΕΡΜΟΜΕΤΡΑ

Γεωθερμόμετρα νερών

Πολυάριθμα εμπειρικά χημικά γεωθερμόμετρα, βασισμένα σε συγκεκριμένα συστατικά των νερών, έχουν χρησιμοποιηθεί με μικρότερη ή μεγαλύτερη επιτυχία για την εκτίμηση της θερμοκρασίας στους γεωθερμικούς ταμιευτήρες.

➤ Τα σπουδαιότερα από αυτά είναι

❖ Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) είναι ένα ενδιαφέρον συστατικό των φυσικών νερών, του οποίου η διαλυτότητα μεταβάλλεται σε σχέση με τη θερμοκρασία και με γνωστό τρόπο.

❖ Τα **Na/K** Εφαρμόζεται στα πετρώματα που περιέχουν Αστρίους, σε πεδία υψηλής ενθαλπίας. Ο λόγος της συγκέντρωσης μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της θερμοκρασίας.

❖ Των διαφόρων αλκαλίων (**Na-K-Ca**,). Χρησιμοποιείται συνήθως συμπληρωματικά για να διορθώσει τη θερμοκρασία του προηγούμενου θερμόμετρου. Προσοχή απαιτείται στη συγκέντρωση CO_2 ή Mg

➤ Λιγότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα γεωθερμόμετρα

➤ Na/Li, Li/Mg και Na-K-Mg

Γεωθερμόμετρα νερών

- ❖ Είναι μία πολύ καλή γεωθερμομετρική μέθοδος, η οποία επιτρέπει και την αναγνώριση νερών που έχουν επιτύχει ισορροπία με τα φιλοξενούντα πετρώματα.
- ❖ Διαφορετικά γεωθερμόμετρα δίνουν συχνά διαφορετικά αποτελέσματα όταν εφαρμοσθούν στα ίδια θερμά νερά.
- ❖ Ιδιαίτερη προσοχή, όπως είναι φανερό, πρέπει να δίνεται στην ερμηνεία των δεδομένων των χημικών γεωθερμομέτρων και την επιλογή του καλύτερου για κάθε περίπτωση χωριστά.
- ❖ Σε αυτό το θέμα η εμπειρία παίζει σημαντικό ρόλο. Οποιοσδήποτε μπορεί να εφαρμόσει τις γεωθερμομετρικές εξισώσεις στις χημικές αναλύσεις, αλλά η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι πάρα πολύ λεπτή και ιδιαίτερα περίπλοκη.

Πίνακας 4.6. Εξισώσεις επιλεγμένων γεωθερμομέτρων
(όλες οι συγκεντρώσεις είναι σε mg/kg).

Γεωθερμόμετρο	Εξίσωση	Περιορισμοί
<i>Διοξείδιο του πυριτίου SiO₂</i>		
1. Χαλαζίας – χωρίς απώλεια ατμού	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{5,19 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
2. Χαλαζίας – Μέγιστη απώλεια ατμού στους 100°C	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1522}{5,75 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
3. Χαλκηδόνιος	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1032}{4,69 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
4. α-Χριστοβαλίτης	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1000}{4,78 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
5. β-Χριστοβαλίτης	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{781}{4,51 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
6. Άμορφο SiO ₂	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{731}{4,52 - \log \text{SiO}_2} - 273,15$	t < 250°C
<i>Αλκάλια</i>		
7. Na/K (Fournier, 1979)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1217}{\log(\text{Na} / \text{K}) + 1,483} - 273,15$	t > 120°C
8. Na-K-Ca (Fournier & Truesdell, 1979)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1647}{\log(\text{Na} / \text{K}) + \beta[\log(\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na}) + 2,06] + 2,47} - 273,15$ β=4/3 για $\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na} > 1$ και T < 100°C β=1/3 για $\sqrt{\text{Ca}} / \text{Na} < 1$ και T > 100°C	
9. Na/K (Arnorsson, 1983)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1319}{\log(\text{Na} / \text{K}) + 1,699} - 273,15$	t = 250-350°C
10. Li/Mg (Kharaka & Mariner, 1979)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{2200}{\log(\text{Li} / \sqrt{\text{Mg}}) + 5,47} - 273,15$	t > 120°C
<i>Ισότοπα</i>		
11. ¹⁸ O (Mizutani & Rafter, 1969)	$\alpha = \frac{1000 + \delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4)}{1000 + \delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})}$ $1000 \ln \alpha = 2,88(10^6 / T(\text{K})^2) - 4,1$	