



# Γεωθερμία

## Ενότητα 1: Βασικές Έννοιες

Καθηγητής Κωνσταντίνος Λ. Κατσιφαράκης  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Βασικές Έννοιες



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Βασικές Έννοιες: Γεωθερμία (1/2)

- *Γεωθερμία* (Γη + θερμός) είναι ο κλάδος της Γεωφυσικής που ερευνά τα θερμικά φαινόμενα, τα οποία συμβαίνουν στο εσωτερικό της Γης. Κάθε γεωφυσικό φαινόμενο συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με την γεωθερμία, αφού είτε συνοδεύεται από μετακίνηση ποσοτήτων θερμότητας, είτε επηρεάζεται από την θερμοκρασία.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμοσμένη έρευνα στον τομέα της Γεωθερμίας, που αποσκοπεί στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.



# Βασικές Έννοιες: Γεωθερμία (2/2)



Εικόνα 1: Sokkur Geysir, Ισλανδία Πηγή: προσωπικό αρχείο Β. Ιωσηφίδη, 2007.



# Βασικές Έννοιες: Θερμότητα

Η *θερμότητα* είναι η συνολική (μακροσκοπική) έκφραση της ενέργειας των ατόμων ή μορίων ενός σώματος, είναι δηλαδή μια μορφή ενέργειας.

Αποτελεί την φυσική κατάληξη κάθε διαδικασίας ενεργειακών μετατροπών. Με άλλα λόγια όλες οι μορφές ενέργειας μπορούν να μετατραπούν εξ ολοκλήρου σε θερμότητα, ενώ το αντίστροφο δεν ισχύει. Με την έννοια αυτή η θερμική ενέργεια είναι η πιο υποβαθμισμένη.



# Βασικές Έννοιες: Θερμοκρασία (1/2)

Η *θερμοκρασία* είναι μέτρο της μέσης στάθμης της ενέργειας των μικροσκοπικών κινήσεων των ατόμων και μορίων ενός σώματος. Οι συνηθέστερες μονάδες μέτρησης της θερμοκρασίας είναι ο βαθμός Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ) και το Kelvin (K). Είναι:

$$\theta_K = 273.15 + \theta_C$$

Σε ορισμένες χώρες χρησιμοποιείται και η κλίμακα Fahrenheit. Είναι:

$$\theta_F = \frac{9}{5} \theta_C + 32$$

Η θερμοκρασία είναι από τις σπουδαιότερες φυσικές ιδιότητες της Γης. Είναι βαθμωτό μέγεθος και μεταβάλλεται τόσο χωρικά (από θέση σε θέση) όσο και χρονικά.





# Βασικές Έννοιες: Θερμοκρασία (2/2)

- Υπάρχουν χωρικές διαφορές μικρής κλίμακας, όπως η διαφορά θερμοκρασίας του νερού γειτονικών πηγών και διαφορές στην κλίμακα του πλανήτη, όπως η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πυρήνα και μανδύα. Ανάλογα έχουμε χρονικές μεταβολές μικρής κλίμακας, όπως η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους και άλλες που έχουν σχέση με τη θερμική εξέλιξη του πλανήτη, που διαρκεί δισεκατομμύρια χρόνια.
- Η προσθήκη θερμότητας σε ένα σώμα δεν οδηγεί πάντα σε αύξηση της θερμοκρασίας του. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του βρασμού ενός υγρού (αλλαγή φάσης) η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.



# Βασικές Έννοιες: Θερμοβαθμίδα

Η μεταβολή της θερμοκρασίας στη «γειτονιά» κάποιου σημείου ονομάζεται *θερμοβαθμίδα*.

Η θερμοβαθμίδα ( $\text{grad } T$ ) είναι διανυσματικό μέγεθος.

Σε κάθε σημείο  $A$  έχει διεύθυνση κάθετη στην ισόθερμη επιφάνεια που διέρχεται από το  $A$  και φορά από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη θερμοκρασία.



# Βασικές Έννοιες:

## 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα

- Είναι η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Μια γενική διατύπωσή του είναι η ακόλουθη: Αν και η ενέργεια έχει πολλές μορφές, η ολική ποσότητά της είναι σταθερή και όταν χάνεται ενέργεια με μια μορφή εμφανίζεται ταυτόχρονα με άλλες μορφές.
- Σε μόνιμες ροές το *1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα* μπορεί να διατυπωθεί με τον ακόλουθο τρόπο: Το άθροισμα της θερμότητας και του έργου που προσδίδονται σε ένα ρευστό, το οποίο ρέει μέσα από ένα χώρο ελέγχου σε συνθήκες μόνιμης ροής, ισούται με το άθροισμα των μεταβολών της ενθαλπίας, της κινητικής ενέργειας και της δυναμικής ενέργειας του ρευστού.



# Βασικές Έννοιες:

## 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα

Απλοϊκά λέει ότι η αξιοποιήσιμη ενέργεια δεν διατηρείται. Μπορεί να διατυπωθεί με διάφορους τρόπους, όπως:

- Η εντροπία ενός αδιαβατικού συστήματος δεν μπορεί να ελαττωθεί. Σε όλες τις μη αντιστρεπτές διεργασίες η εντροπία του αυξάνεται, ενώ στις αντιστρεπτές παραμένει σταθερή.
- Όλες οι φυσικές διεργασίες είναι μη αντιστρεπτές. Οι αντιστρεπτές διεργασίες δεν είναι παρά εξιδανικευμένες περιπτώσεις μη αντιστρεπτών διεργασιών.
- Είναι αδύνατο, με τη βοήθεια μίας άψυχης υλικής διάταξης να προκληθεί μηχανικό αποτέλεσμα από οποιοδήποτε τμήμα ύλης με ψύξη της κάτω από τη θερμοκρασία του ψυχρότερου από τα αντικείμενα του περιβάλλοντος.
- Η ενέργεια του κόσμου είναι σταθερή. Η εντροπία του κόσμου τείνει σε ένα μέγιστο (διατύπωση του Clausius για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα).



# Βασικές Έννοιες: Ενθαλπία

Εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που εμπεριέχεται σε ένα σύστημα.

Δίνεται από τη σχέση:

$$H = U + pV$$

όπου  $U$  η εσωτερική ενέργεια του ρευστού,  $p$  η πίεση και  $V$  ο όγκος.

Όπως φαίνεται από τη σχέση αυτή, η ενθαλπία, που μετρείται με μονάδες ενέργειας, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχει διαστάσεις ενέργειας.



# Βασικές Έννοιες:

## Ειδική Θερμοχωρητικότητα

*Ειδική θερμοχωρητικότητα* (specific heat) ενός υλικού είναι το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του υλικού κατά  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η ειδική θερμοχωρητικότητα  $c$  μετρείται σε  $\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , σε  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  ή σε  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  και χαρακτηρίζει την ικανότητα του υλικού για αποθήκευση θερμότητας. Για τον λόγο αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας.

Η ειδική θερμοχωρητικότητα των μη πορωδών πετρωμάτων κυμαίνεται γύρω στα  $0,8\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$  (σε θερμοκρασία  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Σε κεκορεσμένα πορώδη πετρώματα η  $C$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές, εξαιτίας της μεγάλης ειδικής θερμοχωρητικότητας του νερού που είναι ίση με  $4,2\text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$  στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



# Βασικές Έννοιες:

## Τρόποι Μεταφοράς της Θερμότητας

Στο εσωτερικό της Γης μεταφέρονται συνεχώς ποσά θερμότητας.

Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας, που έχουν σημασία για φαινόμενα μεγάλης κλίμακας, είναι:

- η *θερμική αγωγή* (heat conduction),
- η *ακτινοβολία* (radiation) και
- η *συναγωγή* (convection).



# Θερμική αγωγή (1/4)

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, η ύπαρξη διαφορετικών θερμοκρασιών έχει ως επακόλουθο την ροή θερμότητας από τις θερμότερες προς τις ψυχρότερες περιοχές, δηλαδή κατά την διεύθυνση της θερμοβαθμίδας. Σε στερεά σώματα η μεταφορά θερμότητας γίνεται κυρίως με θερμική αγωγή, δηλαδή με μεταφορά της αυξημένης κινητικής ενέργειας των μορίων της θερμότερης περιοχής στα γειτονικά τους μόρια της ψυχρότερης περιοχής, χωρίς μεταφορά ύλης.

Η θερμική ροή  $Q$  (ανά μονάδα επιφάνειας) δίνεται από τη σχέση:

$$Q = - K_C \cdot \text{grad } T$$





# Θερμική αγωγή (2/4)

$$Q = - K_c \cdot \text{grad } T$$

Είναι δηλαδή ανάλογη προς τη θερμοβαθμίδα. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η φορά της είναι από τις μεγαλύτερες προς τις μικρότερες θερμοκρασίες (ενώ της θερμοβαθμίδας είναι από τις μικρότερες προς τις μεγαλύτερες). Ο συντελεστής αναλογίας  $K_c$  ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (ή απλώς θερμική αγωγιμότητα) και είναι ιδιότητα του υλικού, μέσα στο οποίο γίνεται η θερμική ροή. Γενικά η θερμική αγωγιμότητα είναι τανυστής, όμως σε ισότροπα σώματα εκφράζεται με έναν μόνο αριθμό.

Τέτοια ισότροπα σώματα είναι οι κρύσταλλοι του κυβικού συστήματος. Αν και τα περισσότερα ορυκτά συστατικά των πετρωμάτων είναι ανισότροπα, τα πετρώματα συνολικά συμπεριφέρονται σαν ισότροπα, λόγω της τυχαίας διάταξης των κρυστάλλων των συστατικών τους. Αυτό δεν ισχύει για στρωματοποιημένα υλικά, όπως τα ιζηματογενή πετρώματα.



# Θερμική αγωγή (3/4)

- Η θερμική αγωγιμότητα μετρείται σε

$$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

και είναι τανυστής

- Η θερμική ροή (σε προβλήματα γεωθερμίας) μετρείται σε

HFU (Heat Flow Units)

$$\mu\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$\text{Είναί: } 1 \text{ HFU} = 1 \mu\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 40 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}.$$



# Θερμική αγωγή (4/4)

Σε ισότροπα υλικά η θερμική ροή έχει την ίδια διεύθυνση με την θερμοβαθμίδα, είναι δηλαδή κάθετη στις ισόθερμες επιφάνειες. Εξετάζοντας τα θερμικά φαινόμενα στο σύνολο της Γης μπορούμε να παραβλέψουμε τις τοπικές ανωμαλίες και να δεχθούμε ότι οι ισόθερμες επιφάνειες είναι σφαιρικές και ότι η θερμοκρασία αυξάνει συνολικά από την επιφάνεια προς το κέντρο του πλανήτη. Επομένως υπάρχει μια συνεχής θερμική ροή από το κέντρο προς την επιφάνεια της Γης.

Η ίδια σχέση χρησιμοποιείται και στον υπολογισμό των θερμικών απωλειών ενός κτιρίου. Τα θερμομονωτικά υλικά έχουν πολύ μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, περιορίζουν επομένως τη θερμική ροή, η οποία οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό του κτιρίου και στον περιβάλλοντα χώρο.



# Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης στην θερμική αγωγιμότητα (1/2)

- Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας επηρεάζει σημαντικά την μεταφορά θερμότητας. Για σταθερή θερμική ροή καθορίζει την θερμοβαθμίδα.

Όσο μικρότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα, τόσο ταχύτερη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος, άρα τόσο ευνοϊκότερες είναι οι συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Σε μη μόνιμα φαινόμενα, όπως η ψύξη μαγματικών διεισδύσεων, η θερμική αγωγιμότητα καθορίζει τη χρονική διάρκεια του φαινομένου.

- Για τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στην επιφάνεια της Γης, η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των πετρωμάτων κυμαίνεται από 1 ως 6 W/(mK).

Για παράδειγμα το ορυκτό άλας έχει  $K = 5,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ενώ ο γρανίτης έχει  $K = 2,5-4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , ανάλογα με την περιεκτικότητα σε χαλαζία και πλαγιόκλαστο (ανορθίτη).



# Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης στην θερμική αγωγιμότητα (2/2)

- Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας στο εσωτερικό της Γης μεταβάλλεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Πειραματικά αποδείχθηκε ότι για  $T$  μέχρι  $700^{\circ}\text{C}$  ισχύει μια σχέση της μορφής:

$$1/K_C = \alpha + \beta T$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι σταθερές.

- Αντίθετα, η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την πίεση.

Για πιέσεις μέχρι  $100 \text{ MPa}$  η αύξηση της  $K_C$  οφείλεται στο κλείσιμο των πόρων και των μικρορωγμών, που υπάρχουν σε όλα τα πετρώματα.

Για μεγαλύτερες πιέσεις η αύξηση της  $K_C$  οφείλεται σε παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος των ορυκτών.



# Μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς Θερμότητας με αγωγή (1/3)

- Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή σε κάποιο πεδίο εκφράζεται μαθηματικά με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_c \nabla T) + A$$

- όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα και  $t$  ο χρόνος. Το αριστερό μέλος της εξίσωσης δίνει την χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας στην εξεταζόμενη θέση.

Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους, που περιλαμβάνει χωρικές παραγώγους, δίνει την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, ενώ ο δεύτερος την συνεισφορά της θερμικής πηγής, που βρίσκεται στο εξεταζόμενο σημείο. Επομένως το  $A$  εκφράζει την παραγόμενη ισχύ ανά μονάδα όγκου και μετρείται σε  $W/m^3$ . Αν δεν υπάρχουν θερμικές πηγές, τότε  $A = 0$ .



# Μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς Θερμότητας με αγωγή (2/3)

- Η εξίσωση ισχύει σε όλα τα εσωτερικά σημεία του εξεταζόμενου πεδίου. Για να είναι όμως δυνατή η επίλυση κάποιου συγκεκριμένου προβλήματος πρέπει να είναι γνωστές οι αρχικές και οριακές συνθήκες.

Η αρχική συνθήκη καθορίζει την κατανομή της θερμοκρασίας για  $t = 0$ , δηλαδή στην αρχή των μαθηματικών υπολογισμών. Οι οριακές συνθήκες ισχύουν στα όρια του πεδίου υπολογισμών και πρέπει να είναι γνωστές σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου.

- Αναλυτική επίλυση είναι δυνατή σε πολύ απλές περιπτώσεις.

Τα συνθετότερα προβλήματα επιλύονται αριθμητικά, κυρίως με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων.



# Μαθηματική περιγραφή της μεταφοράς Θερμότητας με αγωγή (3/3)

Σε σφαιρικές συντεταγμένες και για περιπτώσεις σφαιρικής συμμετρίας, η εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( K_c r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + A$$

όπου  $r$  η απόσταση από το κέντρο συμμετρίας.

Η μορφή αυτή βοηθά στην επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων.





# Θερμική ακτινοβολία (1/6)

Πρόκειται για μηχανισμό κυματικής φύσεως. Κατά την εκπομπή ακτινοβολίας μέρος της εσωτερικής ενέργειας του σώματος μετατρέπεται σε ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας είναι από  $0,5 \cdot 10^{-4}$  cm ως 0,08 cm, ανήκει δηλαδή σχεδόν εξ ολοκλήρου στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος (το μήκος κύματος της ορατής ακτινοβολίας φθάνει μέχρι τα  $0,8 \cdot 10^{-4}$  cm).

Η ακτινοβολία είναι ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στο κενό. Με τον τρόπο αυτό φθάνει ενέργεια από τον ήλιο στην επιφάνεια της Γης και διατηρεί την μέση θερμοκρασία της στους  $14^{\circ}\text{C}$ . Η ακτινοβολία παίζει ακόμη σημαντικό ρόλο στην μεταφορά θερμότητας σε αέριες μάζες καθώς και σε ψηλές θερμοκρασίες (μεγαλύτερες από  $250^{\circ}\text{C}$ ). Τέτοιες θερμοκρασίες συναντώνται ήδη από το ανώτατο τμήμα του μανδύα της Γης.



# Θερμική ακτινοβολία (2/6)

Η σχέση που συνδέει την θερμική ροή που ακτινοβολεί ένα σώμα με την απόλυτη θερμοκρασία του είναι η ακόλουθη:

$$Q = \epsilon \sigma T^4$$

όπου  $\epsilon$  είναι η ικανότητα εκπομπής (emissivity) του σώματος και  $\sigma$  είναι η σταθερά των Stefan - Boltzman, η οποία έχει θεωρητική τιμή  $5,68 \cdot 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

Για πραγματικά σώματα ισχύει ότι  $\epsilon < 1$ .

Το ιδεατό σώμα για το οποίο  $\epsilon = 1$  λέγεται μέλαν σώμα.



# Θερμική ακτινοβολία (3/6)

Η θερμική ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σώμα ανακλάται, απορροφάται ή διαδίδεται μέσα στο σώμα. Η θερμική ροή  $Q$  που οφείλεται στη διάδοση της ακτινοβολίας, μπορεί να εκφρασθεί μαθηματικά όπως και η ροή λόγω αγωγής. Είναι δηλαδή:

$$Q = -K_r \text{ grad } T$$

όπου  $K_r$  η αγωγιμότητα λόγω ακτινοβολίας. Είναι:

$$K_r = \frac{16 n^2 \sigma T^3}{3 \varepsilon_1}$$

όπου  $n$  είναι ο συντελεστής διαθλάσεως του μέσου και  $\varepsilon_1$  η αδιαφάνεια (opacity) που μετρείται σε  $\text{cm}^{-1}$  και εξαρτάται από την πίεση, την θερμοκρασία και το μήκος κύματος.



# Θερμική ακτινοβολία (4/6)

Από την σχέση φαίνεται ότι ο συντελεστής  $K_r$  είναι ανάλογος με την τρίτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας. Πειράματα όμως έδειξαν ότι στο εσωτερικό της Γης ο  $K_r$  αυξάνει γραμμικά με την  $T$ . Η απόκλιση οφείλεται στη διασπορά της ακτινοβολίας στα όρια των κόκκων και σε απορρόφηση από άτομα μετάλλων.



# Θερμική ακτινοβολία (5/6)

Η συνολική θερμική ροή λόγω αγωγής και ακτινοβολίας μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

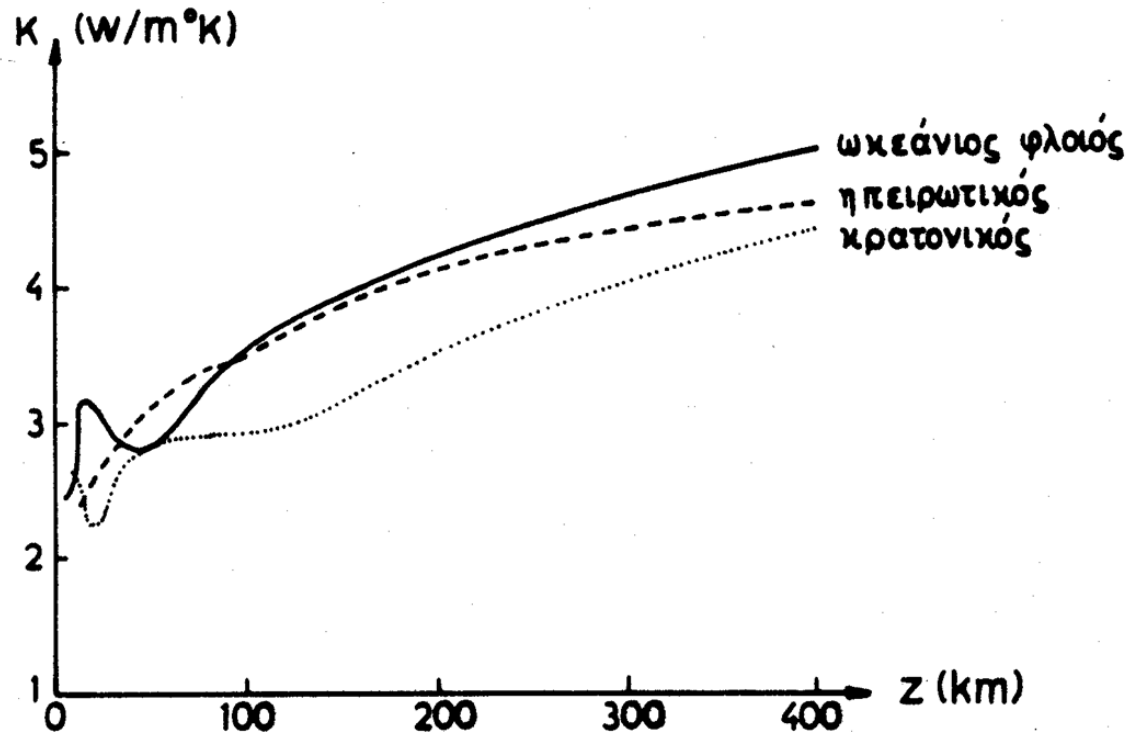
$$Q = -K_T \text{ grad } T$$

όπου  $K_T = K + K_r$ .

Η μεταβολή του  $K_T$  με το βάθος δίνεται στο διάγραμμα του σχήματος της επόμενης διαφάνειας, που έγινε με βάση πειραματικά δεδομένα.



# Θερμική ακτινοβολία (6/6)



Σχήμα 1: Μεταβολή του  $\kappa_T$  με το βάθος

ΠΗΓΗ: G. Buntebarth, *Geothermics : an introduction* Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1984.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι τιμές του  $\kappa_T$  είναι μικρότερες στον κρατονικό φλοιό, δηλαδή στο μεγάλης ηλικίας σταθερό τμήμα του ηπειρωτικού φλοιού.



# Συναγωγή (1/6)

Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται σε μετακίνηση μάζας.

Το κινούμενο ρευστό συνάγει (δηλαδή μεταφέρει μαζί) ποσά θερμότητας.

Η συναγωγή διακρίνεται, ανάλογα με το αίτιο που την προκαλεί, σε φυσική (*natural*) και εξαναγκασμένη (*forced*).



# Συναγωγή (2/6)

Η φυσική συναγωγή έχει ως κινητήρια δύναμη την βαρύτητα (άνωση) και οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας θερμού και ψυχρού ρευστού.

Για παράδειγμα, στα γεωθερμικά πεδία, τα κατώτερα στρώματα του νερού θερμαίνονται περισσότερο και γίνονται ελαφρότερα από τα ανώτερα.

Για να αποκατασταθεί η ισορροπία πρέπει τα βαρύτερα στρώματα να έρθουν στην χαμηλότερη θέση. Η κίνηση, που έχει κυκλοειδή μορφή, αρχίζει όταν η κινητήρια δύναμη μπορεί να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής (ιξώδους).





# Συναγωγή (3/6)

Αριθμητικό κριτήριο για την έναρξη και τη μορφή κίνησης, αποτελεί ο αριθμός του Rayleigh. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες σχέσεις για τον υπολογισμό του, που εξαρτώνται από το εξεταζόμενο πρόβλημα, όπως:

$$Ra = \frac{\alpha \rho_f g c_f L^3 \Delta T}{K_v \nu}$$

όπου  $\alpha$  ο συντελεστής θερμικής διαστολής,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho_f$ ,  $c_f$  και  $\nu$  η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και το κινηματικό ιξώδες του ρευστού αντιστοίχως,  $K_v$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση,  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας και  $L$  χαρακτηριστικό μήκος.



# Συναγωγή (4/6)

Σε προβλήματα φυσικής συναγωγής σε κοκκώδεις υδροφορείς η σχέση αυτή παίρνει τη μορφή:

$$Ra = \frac{\alpha \rho_f g c_f \kappa L \Delta T}{K_v \nu}$$

όπου  $\kappa$  είναι ο συντελεστής γεωμετρικής διαπερατότητας του υδροφορέα. Ακόμη ως χαρακτηριστικό μήκος μπορεί να θεωρηθεί το πάχος του υδροφορέα. Στον αριθμητή είναι οι παράγοντες που ευνοούν την κίνηση, ενώ στον παρονομαστή αυτοί που την εμποδίζουν. Στους τελευταίους συγκαταλέγονται το ιξώδες, αλλά και ο συντελεστής θερμικής αγωγής, διότι η μεταφορά θερμότητας με αγωγή περιορίζει τις διαφορές θερμοκρασίας.



# Συναγωγή (5/6)

Υπάρχουν ενδείξεις ότι συναγωγικές κυκλοειδείς κινήσεις (σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα) συμβαίνουν στον πάνω μανδύα, όπου το ιξώδες φαίνεται ότι έχει σχετικά χαμηλή τιμή, επομένως οι δυνάμεις που εμποδίζουν την κίνηση είναι μικρές.

Με την υπόθεση αυτή εξηγείται η σοβαρή ελάττωση της θερμοβαθμίδας σε βάθος 50-100 km, γιατί η μεταφορά θερμότητας με τα συναγωγικά ρεύματα μειώνει τις θερμοκρασιακές διαφορές. Σε αυτά τα ρεύματα της ασθενόσφαιρας αποδίδεται και η κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών, δηλαδή των μεγάλων τεμαχίων στα οποία χωρίζεται ο φλοιός της Γης .



# Συναγωγή (6/6)

Εξαναγκασμένη συναγωγή συμβαίνει όταν η κίνηση του ρευστού που μεταφέρει την θερμότητα δεν οφείλεται σε δυνάμεις άνωσης.

Για παράδειγμα, κατά την εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων η κίνηση προκαλείται από την διαφορά υδραυλικού φορτίου ανάμεσα στα πηγάδια άντλησης και φόρτισης, δηλαδή από την λειτουργία του συστήματος εκμετάλλευσης.

Άλλο παράδειγμα είναι η μεταφορά θερμότητας κατά την κίνηση διάπυρου μάγματος.





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Ιωάννης Αυγολούπης  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό Εξάμηνο 2012-2013



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ