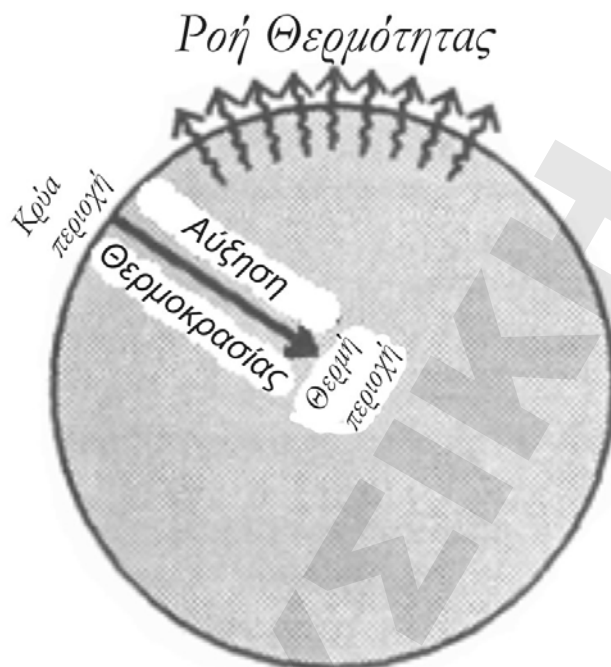


5. Η ΡΟΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Η θερμότητα ρέει προς τα έξω από το εσωτερικό της γης μέσω της επιφανείας της (εικ. 5-1). Ο ρυθμός θερμικής ροής εγκάρσια σε μια περιοχή ή εγκάρσια προς την επιφάνεια της γης, είναι μια συνάρτηση της αρχικής θερμοκρασίας της γης, της παραγωγής θερμότητας μέσα στη γη, της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ διαφορετικών περιοχών της γης και της ικανότητας των διαφορετικών γήινων υλικών να μεταδώσουν θερμότητα με επαφή (εικ. 5-2). Οι μετρήσεις του ρυθμού της θερμικής ροής σε διαφορετικά περιβάλλοντα, παρέχουν ενδείξεις της παρουσίας θερμού υλικού σε ρηγά βάθη (διεισδύσεις νέων γρανιτών; άνοδος ασθενόσφαιρας), ύπαρξη κρύου υλικού μέσα στη γη (υποβύθιση λιθόσφαιρας) και ψύξη του υλικού με το πέρασμα του χρόνου (υποβύθιση του ωκεάνιου πυθμένα μακριά από την μεσο-ωκεάνιο ράχη).



Εικόνα 5-1. Η θερμότητα ρέει προς τα έξω, μακριά από τη θερμή εσωτερική περιοχή της γης, εγκάρσια προς τη κρύα επιφάνεια της. Ο μέσος ρυθμός είναι περίπου 0.08 W/m^2 , που ισοδυναμεί με $1.9 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ HFU.

5.2 Η θερμότητα μέσα στη γη

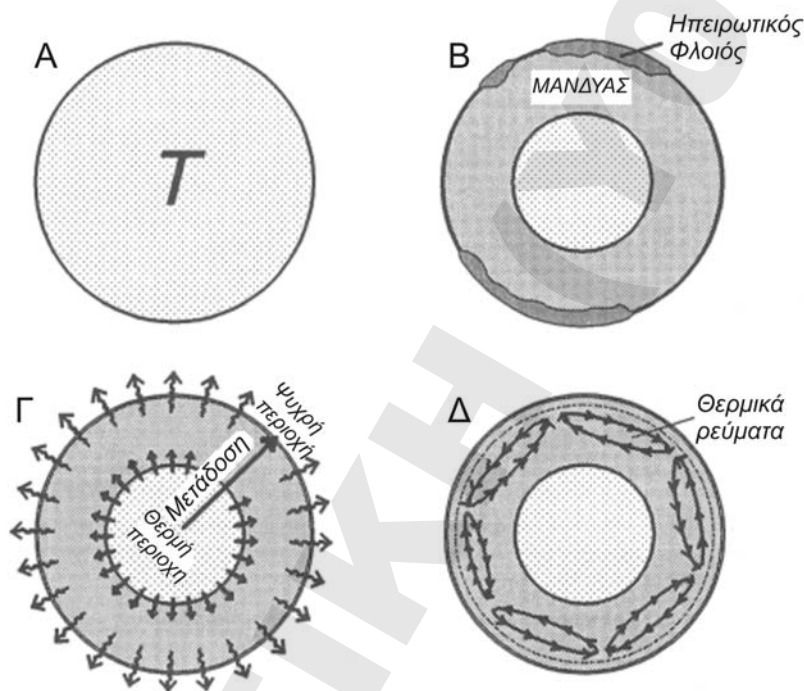
5.2.1 Πηγές θερμότητας

Η περισσότερη θερμότητα του εσωτερικού της γης οφείλεται στις συνδυασμένες επιδράσεις της αρχικής θερμοκρασίας της (θερμότητα σχηματισμού) και της θερμότητας που παράγεται με το πέρασμα του χρόνου από την ίδια τη γη (πρωταρχικά από τη μεταστοιχείωση ραδιενεργών υλικών).

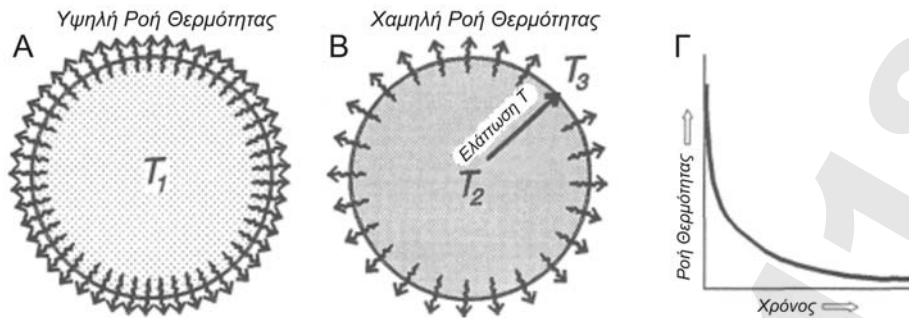
5.2.1.α Θερμότητα από τον σχηματισμό της γης. Τον 19^ο αιώνα ο William Kelvin υπολόγισε την ηλικία της γης μεταξύ 20 και 40 εκατομμύρια χρόνια, βασίζομενος σε μετρήσεις της ροής θερμότητας εγκάρσια προς την επιφάνεια της (εικ. 5-3). Οι υποθέσεις του Kelvin ήταν απόρροια της σκέψης ότι όλη η θερμότητα της γης ξεκίνησε να ρέει, όταν η γη

άρχισε να ψύχεται από τη τηκόμενη κατάσταση της και ότι η θερμότητα μεταφέρεται εκτός της γης μέσω της επαφής των υλικών αυτής. Αυτό το απλό μοντέλο μπορεί να απεικονισθεί παραστατικά με μια καυτή «πατάτα» που μόλις βγήκε από τον φούρνο και αφέθηκε στον πάγκο της κουζίνας να κρυώσει (εικ. 5-4α).

Μοντέρνες τεχνικές χρονολόγησης αποκαλύπτουν ότι η ηλικία της γης είναι περίπου 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια και όχι 20 ή 40 εκατομμύρια χρόνια. Η εκτίμηση της ηλικίας από τον Kelvin ήταν υποτιμημένη διότι και οι δύο υποθέσεις του ήταν ανακριβείς; η γη παράγει νέα θερμότητα από την εποχή του σχηματισμού της και η θερμότητα ρέει προς την επιφάνεια μέσω θερμικών ρευμάτων καθώς και με θερμική επαφή.

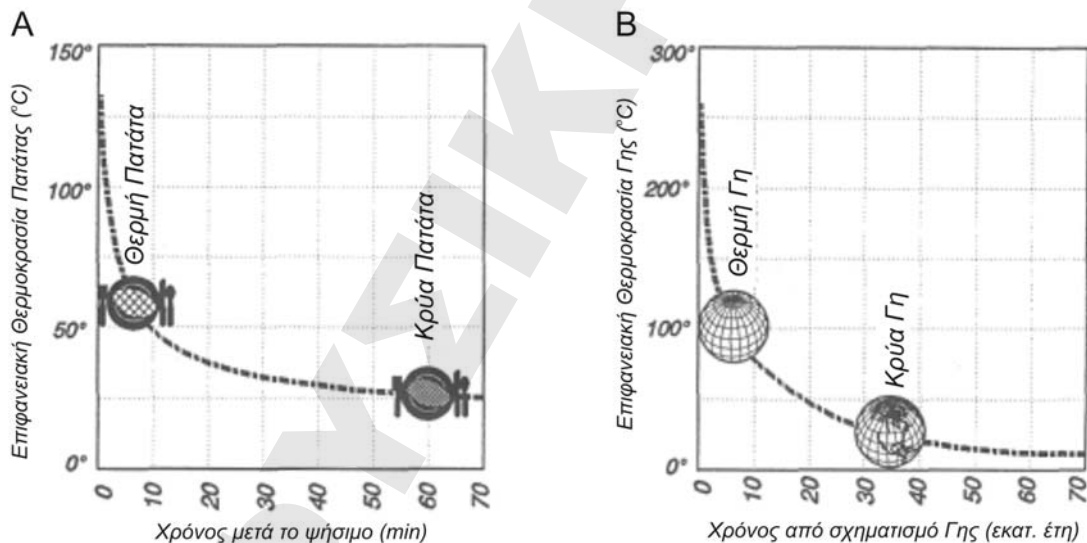


- Εικόνα 5-2.** α) **Θερμότητα σχηματισμού.** Η θερμότητα όλων των περιοχών της γης, οφείλεται μερικώς, στην αρχική κατανομή της θερμοκρασίας της (T). Η θερμοκρασία ελαττώνεται καθώς η γη ψύχεται με το χρόνο.
- β) **Παραγωγή θερμότητας.** Νέα θερμότητα παράγεται από τη διάσπαση ραδιενεργών υλικών, κυρίως μέσα στο φλοιό και το μανδύα της γης.
- γ) **Θερμική μετάδοση.** Η θερμότητα γενικά μεταδίδεται προς τα έξω, μακριά από τη θερμή εσωτερική περιοχή της γης προς τη κρύα επιφάνεια της. Τοπικά, μερικά πετρώματα μεταδίδουν τη θερμότητα ευκολότερα από άλλα.
- δ) **Μεταφορά θερμότητας.** Μεγάλα ποσά θερμότητας μπορούν να μεταφερθούν από μια περιοχή σε άλλη με θερμικά ρεύματα. Τέτοια ρεύματα εμφανίζονται στο ανώτερο τμήμα της ασθενόσφαιρας και στο κατώτερο τμήμα του μανδύα της γης.



Εικόνα 5-3. Μείωση της θερμοκρασίας με το χρόνο. α) Η αρχική θερμοκρασία της γης (T_1), σε τηκόμενη κατάσταση κατά τη στιγμή του σχηματισμού της. β) Καθώς η θερμότητα χάνεται μέσω της επιφάνειας, η θερμοκρασία ελαττώνεται παντού. Η θερμότερη περιοχή είναι κοντά στο κέντρο (T_2) και ελαττώνεται προς τα έξω (σε T_3). γ) Ο ρυθμός ροής της θερμότητας εγκάρσια προς την επιφάνεια επίσης ελαττώνεται με το χρόνο. Η μέση θερμική ροή εγκάρσια προς την επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε από τον Kelvin για να εκτιμήσει την ηλικία της γης.

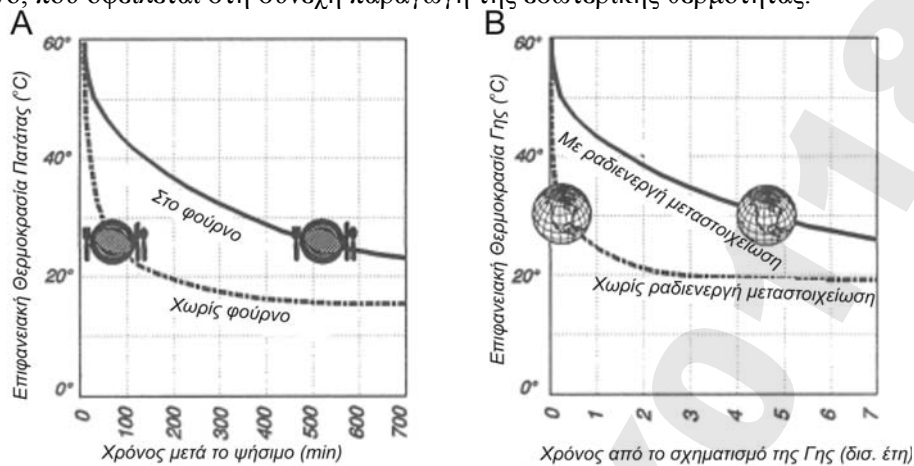
Εάν κάποιος έμπαινε στην κουζίνα και έπιανε την καυτή πατάτα θα είχε την εντύπωση ότι είχε βγει πριν από λίγα λεπτά. Εάν όμως έπιανε μια κρύα πατάτα θα σχημάτιζε την εντύπωση ότι είχε βγει από το φούρνο τουλάχιστον πριν μια ώρα. Με όμοιο τρόπο, η μέση θερμοκρασία της γης κοντά στην επιφάνεια δείχνει και την ηλικία της (εικ. 5-4β).



Εικόνα 5-4. Ελάττωση της θερμοκρασίας λόγω μετάδοσης της θερμότητας. α) Η θερμοκρασία της επιφάνειας της «πατάτας» δείχνει το χρόνο από τη στιγμή που βγήκε η «πατάτα» από το φούρνο. β) Εάν υποθεθεί ότι δεν παράγεται νέα θερμότητα ή δεν χάνεται από τα θερμικά ρεύματα μεταφοράς, τότε η θερμοκρασία μέχρι βάθους 1 km δείχνει την ηλικία της γης.

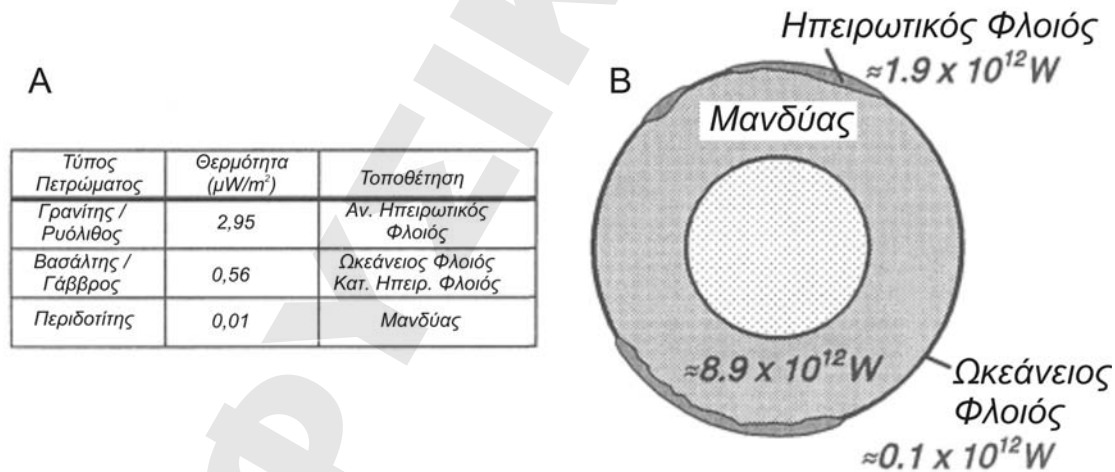
5.2.1.β Μεταστοιχείωση ραδιενεργών υλικών. Νέο ποσό θερμότητας παράγεται όταν ραδιενεργά στοιχεία μεταστοιχειώνονται από μια μορφή σε άλλη, πρωταρχικά στο μανδύα της γης. Συνεχίζοντας την παραπάνω αναφερθείσα αναλογία, θα μπορούσαμε να πάρουμε την «πατάτα» από ένα κανονικό φούρνο και να την τοποθετήσουμε σε φούρνο μικροκυμάτων; όπου τα μικροκύματα θα διεγείρουν νέα θερμότητα μέσα στην «πατάτα». Εάν θέσουμε το φούρνο σε μικρή ένταση, η «πατάτα» θα κρυώσει, αλλά όχι τόσο γρήγορα, όπως όταν είναι

έξω από το φούρνο (εικ. 5-5α). Όπως η γη (εικ. 5-5β) η «πατάτα» θα παραμείνει ζεστή για πολύ χρόνο, που οφείλεται στη συνεχή παραγωγή της εσωτερικής θερμότητας.



Εικόνα 5-5. Εσωτερική παραγωγή θερμότητας. α) Η καυτή «πατάτα» ψύχεται πολύ πιο αργά εάν τοποθετηθεί σε φούρνο μικροκυμάτων σε χαμηλή ένταση. β) Η γη έχει ψυχθεί πολύ πιο αργά από τον αναμενόμενο χρόνο, διότι νέα θερμότητα παράγεται κατά τη διάρκεια της ραδιενεργής μεταστοιχείωσης.

Η παραγωγή της θερμότητας εξαρτάται από τη διάσπαση των ραδιενεργών στοιχείων, όπως το ουράνιο, θόριο και κάλιο. Τα πετρώματα του φλοιού της γης, ιδιαίτερα του ηπειρωτικού, έχουν υψηλά ποσοστά σε τέτοια στοιχεία και έτσι παράγονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας ανά μονάδα όγκου (εικ. 5-6α). Ο μανδύας της γης είναι, εν τούτοις, πολύ περισσότερο ογκώδης από ότι ο φλοιός, έτσι ώστε η περισσότερη νέα θερμότητα να παράγεται στο μανδύα (εικ. 5-6β).



Εικόνα 5-6. Παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό της γης από ραδιενεργή μεταστοιχείωση. α) Παραγωγή θερμότητας από διαφορετικούς τύπους εκρηξιγενών πετρωμάτων (Philpotts, 1990). Ένα κυβικό μέτρο ηπειρωτικού φλοιού (γρανίτης/γάββρος) παράγει θερμότητα πολύ πιο γρήγορα από ένα κυβικό μέτρο μανδύα (περιδοτίτης). β) Ο μανδύας είναι πολύ περισσότερο ογκώδης από το φλοιό της γης, συνεισφέροντας έτσι την περισσότερη παραγωγή θερμότητας του εσωτερικού της.

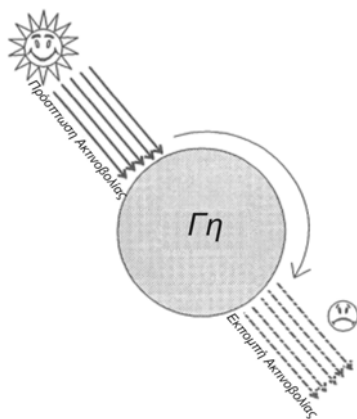
5.2.2 Μεταφορά Θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας από μια περιοχή σε άλλη μπορεί να συμπεριλάβει και ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ακτινοβολία), ατομική αλληλεπίδραση μεταξύ των υλικών

διαφορετικής θερμοκρασίας (μεταφορά θερμότητας με επαφή), ή την πραγματική μεταφορά θερμών υλικών (κατακόρυφων θερμών ρευμάτων και πλευρικών ή οριζόντιων θερμών ρευμάτων του μανδύα της γης).

5.2.2.α Ακτινοβολία

Μια συνήθης και φανερή πηγή θερμότητας στην επιφάνεια της γης είναι η ακτινοβολία από τον ήλιο (εικ. 5-7).



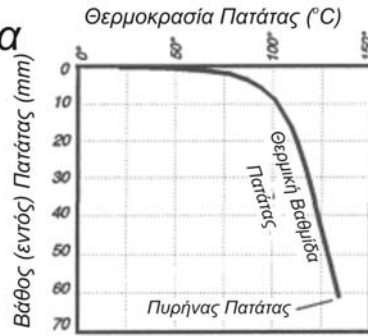
Εικόνα 5-7. Μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια της γης με ακτινοβολία. Τα μεγάλα ποσά θερμότητας που προέρχονται από τον ήλιο, απορροφώνται κατά τη διάρκεια της ημέρας και εκπέμπονται πίσω με ακτινοβολία κατά τη νύκτα.

Αυτή η ακτινοβολία είναι της τάξης των $2 \times 10^{17} \text{ W}$ ($\approx 4 \times 10^2 \text{ Wm}^{-2}$ κατά μέσο όρο στην επιφάνεια), που προσδίδει μια μέση θερμοκρασία της επιφάνειας στους περίπου 20°C (Fowler, 1990). Η ηλιακή θερμότητα προκαλεί την ατμοσφαιρική και ωκεάνιο κυκλοφορία, η οποία στη συνέχεια προκαλεί γεωλογικές διαδικασίες στην επιφάνεια (διάβρωση, αποσάθρωση, ροή ποταμών, παγετώνες). Στην πραγματικότητα όλη η θερμότητα που λαμβάνεται από τη γη ακτινοβολείται πίσω και χάνεται, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να μη μπορεί να εξηγήσει το ποσόν της θερμότητας που ρέει από το βαθύτερο εσωτερικό της γης ($\approx 8 \times 10^2 \text{ W m}^{-2}$). Άλλες πηγές θερμότητας είναι υπεύθυνες για τις εσωτερικές διαδικασίες της γης (σεισμοί, ηφαιστειότητα, κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών, κ.λ.π.).

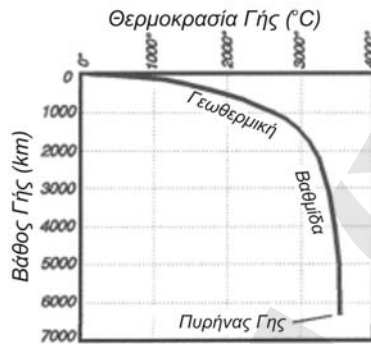
5.2.2.β Ροή θερμότητας με επαφή.

Η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με ατομικούς κραδασμούς ρέοντας από μια περιοχή υψηλότερης σε άλλη χαμηλότερης θερμοκρασίας. Τέτοια μεταφορά θερμότητας προσομοιάζεται από μια καυτή και ξηρή «πατάτα». Η θερμότητα προχωρεί από το κέντρο της καυτής «πατάτας» σε ψυχρότερες περιοχές κοντά στην επιφάνεια της, η οποία βρίσκεται σε επαφή με τον κρύο αέρα (εικ.5-8α). Μια θερμική βαθμίδα έτσι δημιουργείται στην «πατάτα», με την αύξηση της θερμοκρασίας από την επιφάνεια προς το κέντρο της. Έτσι ακριβώς συμβαίνει με τη μεταφορά θερμότητας από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια της και δημιουργείται μια γεωθερμική βαθμίδα, με την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια της και με πιο αργό ρυθμό σε μεγαλύτερα βάθη (εικ. 5-8β). Η μεταφορά θερμότητας μέσω της επαφής των υλικών είναι μια αργή διαδικασία σχετικά με τη κλίμακα του γεωλογικού χρόνου.

A) Ψητή Πατάτα



B) Γη

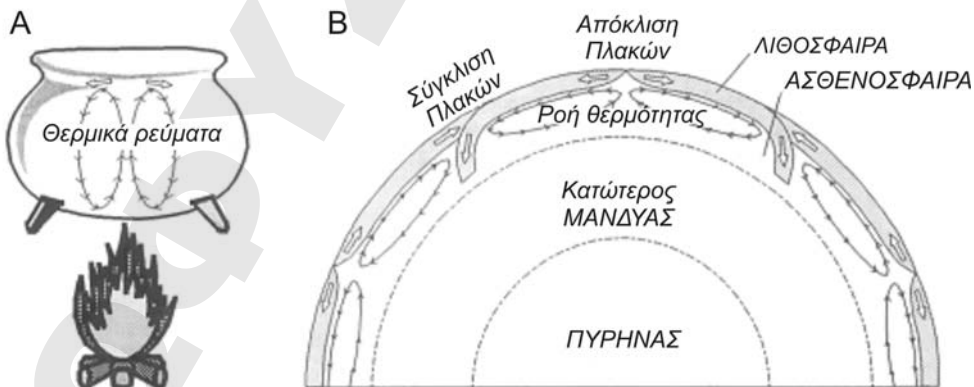


Εικόνα 5-8. Μετάδοση θερμότητας με επαφή.

- α) Καθώς η θερμότητα μεταδίδεται από τη θερμή κεντρική περιοχή της «πατάτας» προς τη κρύα επιφάνεια της, αναπτύσσεται μια θερμική βαθμίδα. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ταχεία κοντά στην επιφάνεια της και βαθμιαία προς το κέντρο της.
- β) Η γη δημιουργεί μια ανάλογη γεωθερμική βαθμίδα κατά τη μετάδοση θερμότητας από τη θερμή εσωτερική περιοχή προς τη κρύα επιφάνεια της.

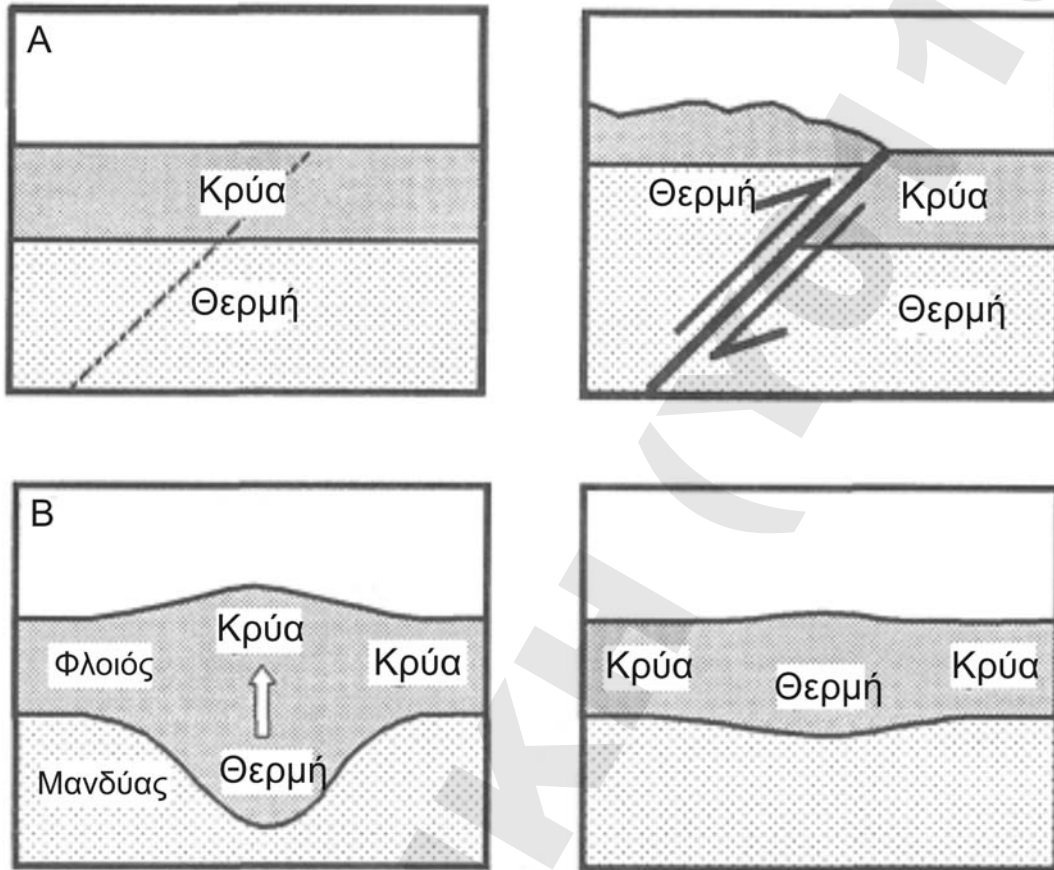
5.2.2.γ Θερμικά ρεύματα

Η μεταφορά της θερμότητας σε συνδυασμό με την κίνηση του υλικού ονομάζεται θερμικό ρεύμα. Σε ένα δοχείο με βραστό νερό τα θερμικά ρεύματα μεταφέρουν θερμότητα πολύ γρήγορα (εικ. 5-9α). Το καυτό νερό κοντά στην εστία ανέρχεται. Το κρύο, πυκνότερο νερό κοντά στην επιφάνεια κατέρχεται περιφερειακά της εστίας. Στην εικόνα 5-9β απεικονίζεται σχηματικά η σχέση του συστήματος λιθόσφαιρα/ασθενόσφαιρα. Η μεταφορά θερμότητας του υλικού πλήρωσης (ασθενόσφαιρα) παράγει ρεύματα τα οποία ανέρχονται και κατέρχονται σε περιοχές της γης παραμορφώνοντας τον φλοιό (λιθόσφαιρα).



Εικόνα 5-9. Μεταφορά θερμότητας με θερμικά ρεύματα. α) Η θερμότητα μεταφέρεται γρήγορα σε ένα δοχείο με βραστό νερό, από τον πυθμένα του, όπου είναι καυτό και αραιό, προς το στόμιο (ανερχόμενο σκέλος), και ψυχόμενο κοντά στην επιφάνεια, όπου γίνεται κρύο και πυκνό, κατέρχεται (κατερχόμενο σκέλος). β) Θερμικά ρεύματα μεταφοράς με μικρές ταχύτητες (μερικά εκατοστά/έτος) μπορούν να εμφανισθούν στην ασθενόσφαιρα της γης. Πέραν της ανακατανομής της

θερμότητας, τα θερμικά ρεύματα μεταφοράς συμβάλλουν στη μετακίνηση των λιθосφαιρικών πλακών. Όπου θερμικά ρεύματα ανέρχονται, οι πλάκες αποκλίνουν και όπου κατέρχονται, επιταχύνουν τη σύγκλιση των πλακών. Κάποια θερμικά ρεύματα πιστεύεται ότι εμφανίζονται στο κατώτερο μανδύα.



Εικόνα 5-10. Θερμική ροή σε στερεό υλικό. α) Ανάστροφο ρήγμα. β) Διάβρωση και ισοστατική ισορροπία.

5.2.2.δ Θερμική ροή σε στερεά υλικά

Η ροή αυτή είναι μια ειδική περίπτωση μεταφοράς θερμότητας, όπου η θερμότητα μεταφέρεται μέσω της κίνησης του υλικού σε στερεή κατάσταση. Η ροή της θερμότητας γενικά προχωρεί αργά, έτσι ώστε η διάδοση της θερμότητας να επαναρυθμίζει την θερμοκρασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εν τούτοις, τεκτονικές διαδικασίες μετακινούν γρήγορα τεμάχια θερμού υλικού σε μεγάλες οριζόντιες ή κατακόρυφες αποστάσεις, έτσι ώστε η μεταφορά οριζόντιου θερμικού ρεύματος να είναι σημαντική. Παραδείγματα που περιλαμβάνουν οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις είναι τα βαθιά ανάστροφα ρήγματα (εικ. 5-10α), καθώς επίσης και η άνοδος των οροσειρών που οφείλεται σε διάβρωση και σε ισοστατική ισορροπία (εικ. 5-10β).

5.2.3 Ροή θερμότητας εγκάρσια προς την επιφάνεια της γης

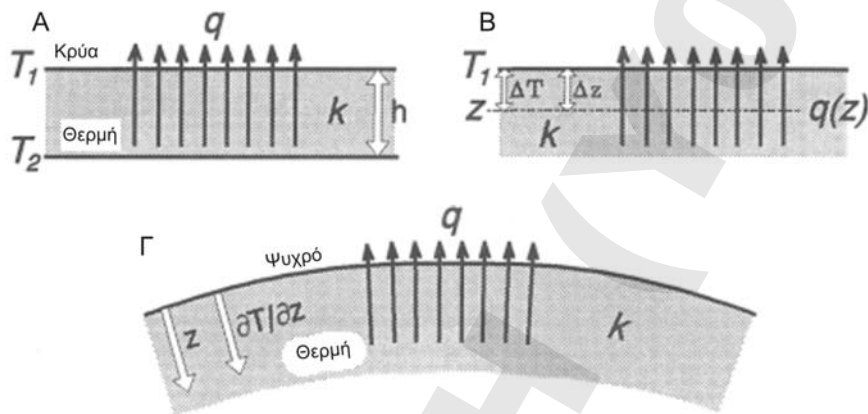
5.2.3.α Η Εξίσωση της ροής θερμότητας

Ο ρυθμός με τον οποίο ρέει η θερμότητα με θερμική επαφή από το εσωτερικό της γης προς την επιφάνεια μπορεί να προσομοιωθεί με το μοντέλο μιας απλής πλάκας (εικ. 5-11α). Η ενέργεια της θερμότητας μεταφέρεται από το επίπεδο της υψηλότερης θερμοκρασίας (T_2) προς την επιφάνεια της χαμηλότερης θερμοκρασίας (T_1), σύμφωνα με τη σχέση:

$$q = k \left(\frac{T_2 - T_1}{h} \right) \quad (1)$$

όπου:

- q = ο ρυθμός θερμικής ροής, ανά μονάδα επιφανείας, δια μέσου της οροφής της πλάκας (W m^{-2})
- k = η θερμική αγωγιμότητα της πλάκας ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- T_1 = η θερμοκρασία στην επιφάνεια της πλάκας ($^\circ\text{C}$)
- T_2 = η θερμοκρασία στη βάση της πλάκας ($^\circ\text{C}$)
- h = το πάχος της πλάκας (m)



Εικόνα 5-11. Ροή θερμότητας. α) Μεταφορά θερμότητας εγκάρσια προς μια λεπτή πλάκα θερμικής αγωγιμότητας (k). Η θερμοκρασία στον πυθμένα της πλάκας είναι (T_2) είναι υψηλότερη από εκείνη της οροφής (T_1). β) Για σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος, η ροή θερμότητας $q(z)$ μπορεί να υπολογισθεί από τις τιμές των k , T_1 και τη μεταβολή θερμοκρασίας (ΔT) για μια μικρή μεταβολή του βάθους (Δz). γ) Η θερμότητα ρέει εκτός της επιφανείας της γης με ένα ρυθμό (q) σύμφωνα με τη γεωθερμική βαθμίδα $\frac{\partial T}{\partial z}$

Εάν υπάρχει μια γραμμική αύξηση στην θερμοκρασία από την επιφάνεια προς τα κάτω (εικ. 5-11β), η ροή της θερμότητας μπορεί να εκφραστεί ως μια συνάρτηση του βάθους:

$$q(z) = k \left(\frac{[T_1 + \Delta T] - T_1}{\Delta z} \right) \quad (2)$$

όπου:

- $q(z)$ = η ροή θερμότητας σε βάθος z (θετικό προς τα κάτω)
- ΔT = η μεταβολή στην θερμοκρασία από την επιφάνεια προς βάθος z
- Δz = η απόσταση από την επιφάνεια μέχρι το βάθος z .

Λαμβάνοντας το όριο, για πολύ μικρό Δz :

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} q(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} k \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} \right) = k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Για σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας με το βάθος (εικ. 5-10), η ροή θερμότητας στην επιφάνεια της γης είναι:

$$q = k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

όπου:

q = ο ρυθμός με τον οποίο ρέει η θερμότητα προς τα έξω εγκάρσια προς την επιφάνεια της γης (ροή θερμότητας)

k = η ικανότητα των πετρωμάτων σε μια περιοχή να μεταδίδουν θερμότητα (θερμική αγωγιμότητα)

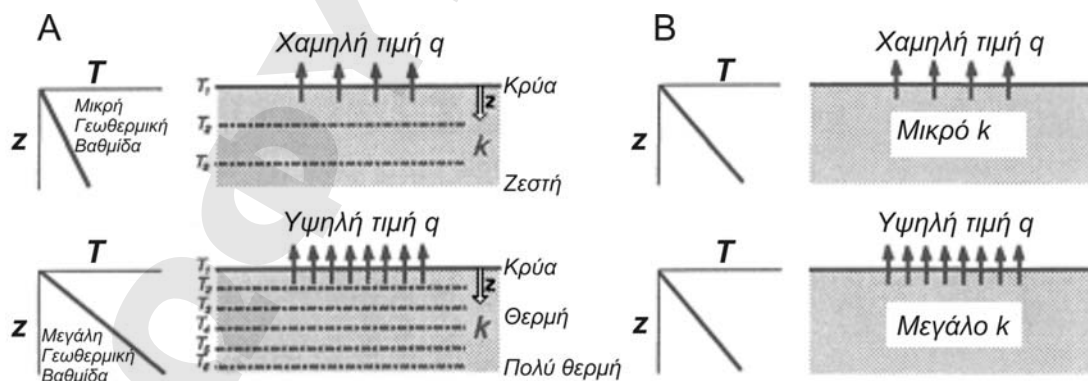
$\frac{\partial T}{\partial z}$ = ο ρυθμός με τον οποίο η θερμοκρασία αυξάνεται από την επιφάνεια προς τα κάτω (προς το κέντρο της γης) σε μια περιοχή (γεωθερμική βαθμίδα)

Ο πίνακας 5-1 δείχνει ότι οι θερμικές αγωγιμότητες για τα περισσότερα πετρώματα κυμαίνονται από 2 έως 3 $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$. Οι τιμές των πετρωμάτων πλούσια σε χαλαζία (ψαμμίτης, χαλαζίτης) μπορούν να έχουν τιμές υψηλότερες. Για μια δεδομένη θερμική αγωγιμότητα, η υψηλότερη τιμή της ροής θερμότητας προκύπτει από την υψηλότερη γεωθερμική βαθμίδα (εικ. 5-12α). Εάν η γεωθερμική βαθμίδα είναι σταθερή, περιοχές με πετρώματα υψηλότερης θερμικής αγωγιμότητας θα έχουν υψηλότερη ροή θερμότητας (εικ. 5-12β).

Πίνακας 5-1

Θερμική αγωγιμότητα επιλεγμένων πετρωμάτων (μέσες τιμές από Jessop, 1990)

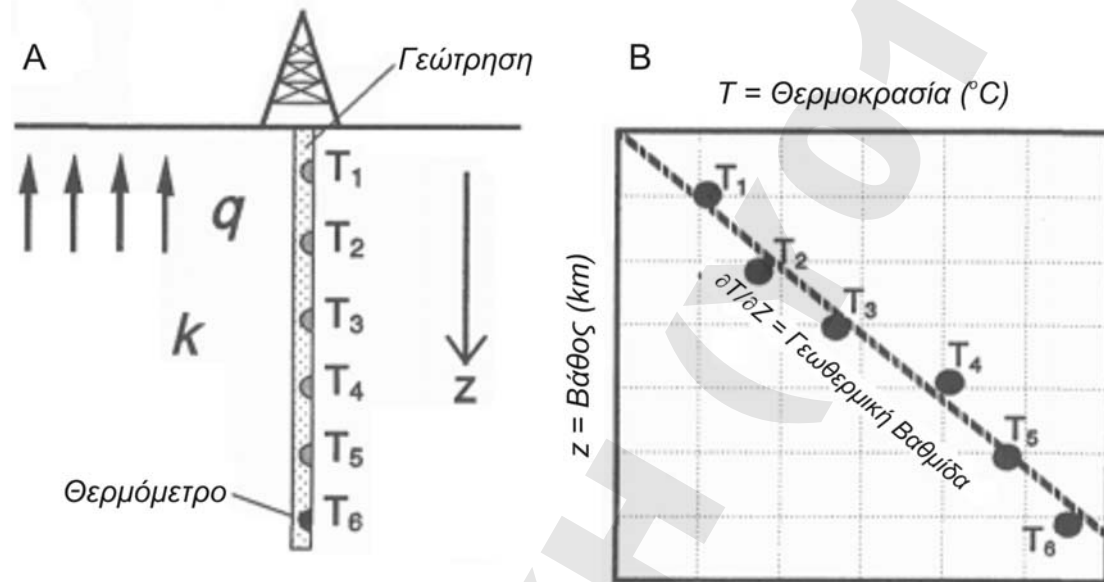
| | Πέτρωμα | Θερμική Αγωγιμότητα ($W m^{-1} ^\circ C^{-1}$) |
|---------------|--------------|---|
| Εκρηξιγενή | Ρυόλιθος | 2.6 |
| | Γρανίτης | 3.3 |
| | Ανδεσίτης | 2.3 |
| | Διορίτης | 2.8 |
| | Βασάλτης | 1.8 |
| | Γάββρος | 2.8 |
| Ιζηματογενή | Σχιστόλιθος | 2.1 |
| | Ψαμμίτης | 3.7 |
| | Ασβεστόλιθος | 3.4 |
| Μεταμορφωμένα | Αμφιβολίτης | 3.0 |
| | Σερπετινίτης | 3.5 |
| | Χαλαζίτης | 5.0 |



Εικόνα 5-12. α) Μεταβολή της ροής θερμότητας (q), ως συνάρτηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Η θερμική αγωγιμότητα (k) παραμένει σταθερή. β) Μεταβολή της ροής θερμότητας, ως συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας. Η γεωθερμική βαθμίδα παραμένει σταθερή.

5.2.3.β Μέτρηση της ροής θερμότητας

Η εικόνα 5-13 δείχνει ότι η ροή θερμότητας μετριέται με τη λήψη της θερμοκρασίας σε διαφορετικά βάθη μιας γεώτρησης, προσδιορίζοντας τη γεωθερμική βαθμίδα ($\frac{\partial T}{\partial z}$). Εάν η μέση θερμική αγωγιμότητα (k) είναι γνωστή για τα πετρώματα της περιοχής, η ροή θερμότητας (q) μπορεί να υπολογισθεί. Οι παράμετροι στην εξίσωση της ροής θερμότητας που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι σε μονάδες *SI*.



Εικόνα 5-13. Μέτρηση της ροής θερμότητας. α) Οι θερμοκρασίες (T_1, T_2, \dots, T_6) μετριοούνται για διαφορετικά βάθη (z) σε μια γεώτρηση. β) Οι θερμοκρασίες T απεικονίζονται σε συνάρτηση με το βάθος z και προκύπτει έτσι η γεωθερμική βαθμίδα ($\frac{\partial T}{\partial z}$). Σε συνδυασμό με τη μετρηθείσα θερμική αγωγιμότητα (k) της περιοχής, μπορεί να υπολογισθεί η ροή θερμότητας από $q = k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$.

Ο πίνακας 5.2 δείχνει άλλες μονάδες που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία και πως σχετίζονται με τις μονάδες *SI*. Ιδιαίτερα, οι μονάδες ροής θερμότητας (*HFU*) έχουν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερους χάρτες ($1 \text{ HFU} = 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 4.2 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$). Μερικές τυπικές τιμές που έχουν μετρηθεί στη γη είναι:

$$k \approx (2 \text{ έως } 5) \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \\ \approx (0.005 \text{ έως } 0.012) \text{ cal cm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

και:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx (0.01 \text{ έως } 0.05) \text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1} \\ \approx (10 \text{ έως } 50) \text{ }^{\circ}\text{C Km}^{-1}$$

έτσι ώστε:

$$q \approx (0.03 \text{ έως } 0.12) \text{ W m}^{-2} \\ \approx (1 \text{ έως } 3) \text{ HFU}$$

Πίνακας 5-2

Μετατροπή από το Διεθνές Σύστημα (SI) σε άλλες μονάδες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία

| | SI | Ισοδύναμες μονάδες |
|--|--------------------------|--|
| Θερμική αγωγιμότητα (k) | $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$ | $2.39 \times 10^{-3} cal cm^{-1} ^\circ C^{-1} s^{-1}$ |
| Γεωθερμική βαθμίδα $\frac{\partial T}{\partial z}$ | $^\circ C m^{-1}$ | $10^3 ^\circ C Km^{-1}$ |
| Ροή θερμότητας (q) | $W m^{-2}$ | $2.39 \times 10^{-5} cal cm^{-2} s^{-1}$ $2.39 \times 10^1 HFU$ |

5.2.4 Τεκτονική και ροή θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας από μια περιοχή της γης σε άλλη, αυξάνεται με την κίνηση κατακόρυφων και οριζόντιων θερμικών ρευμάτων μέσα στο ανώτατο τμήμα του μανδύα της. Η κίνηση αυτών των θερμικών ρευμάτων διευκολύνει την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών. Η πλευρική μεταφορά γενικά ανεβάζει τη ροή θερμότητας στις ωκεάνιες περιοχές σχετικά με τις αντίστοιχες ηπειρωτικές. Η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας καθιστά ρηχές περιοχές με υψηλή θερμοκρασία, ιδιαίτερα όπου οι πλάκες απομακρύνονται (ηπειρωτικές ρηξιγενείς ζώνες, μεσο-ωκεάνιες ράχες).

Σε περιοχές όπου οι πλάκες συγκλίνουν, η διείδυση της κρύας πλάκας προκαλεί χαμηλή ροή θερμότητας σε ζώνες υποβύθισης και σε οροσειρές.

5.2.4.α Ηπειρωτικές περιοχές

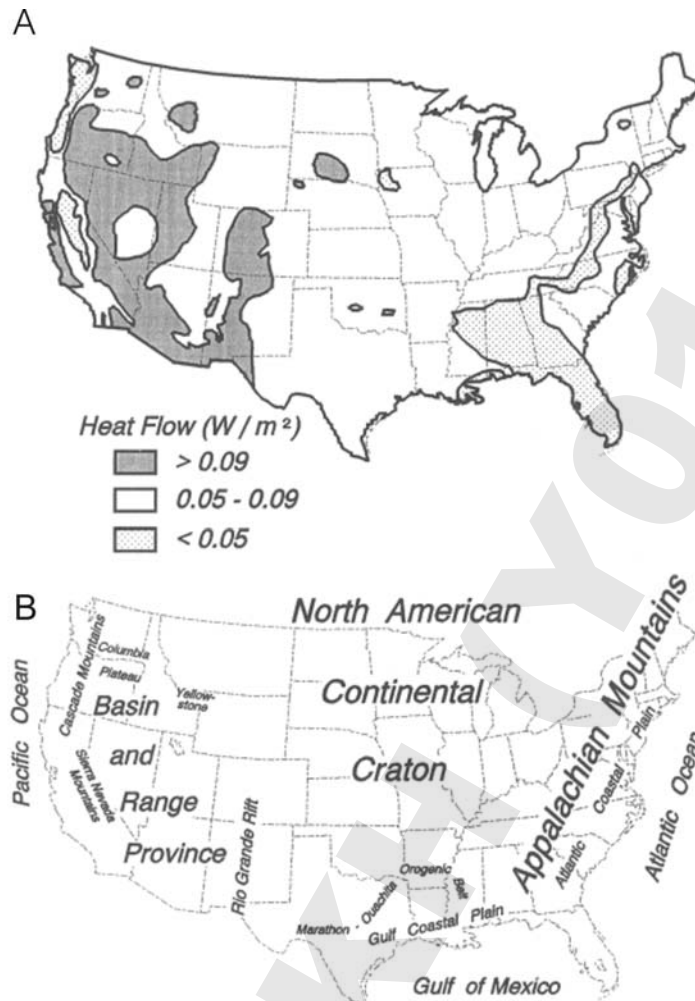
Στην εικόνα 5-14 είναι ένας χάρτης ροής θερμότητας που έχει υπολογισθεί για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Ο πίνακας 5-3 δείχνει κατά προσέγγιση τις γεωθερμικές βαθμίδες και τις τιμές ροής θερμότητας για τρεις περιοχές, μιας κρύας, μιας κανονικής και μιας θερμής. Οι γεωθερμικές βαθμίδες για τις τρεις περιοχές έχουν απεικονισθεί πάνω σε διαγράμματα φάσεων για πετρώματα του ανώτερου ηπειρωτικού φλοιού (γρανίτης) και του μανδύα της γης (περιδοτίτης) στην εικόνα 5-14. Τα διαγράμματα δείχνουν τις επιπτώσεις στα πετρώματα, για διαφορετικά γεωλογικά περιβάλλοντα, ως αποτέλεσμα των διαφορετικών γεωθερμικών βαθμίδων.

Ηπειρωτικό σταθερό τέμαχος. Στο σταθερό τμήμα μιας ηπείρου, υπάρχει κανονική αύξηση της θερμοκρασίας μετά του βάθους. Τα γρανιτικά πετρώματα του ανώτερου έως μέσου φλοιού είναι πολύ ψυχρά για να παρουσιάσουν μερική τήξη (εικ. 5-15α).

Πίνακας 5-3

Κατά προσέγγιση γεωθερμικές βαθμίδες και τιμές ροής θερμότητας για τρεις περιοχές της Βορείου Αμερικής ($1 HFU = 4.2 \times 10^{-2} W / m^2$)

| Γεωθερμική | Βαθμίδα | Ροή Θερμότητας | |
|---|------------------|----------------|----------|
| Οροσειρά Σιέρρας Νεβάδας | $10 ^\circ C/km$ | $0.03 W / m^2$ | 0.75 HFU |
| Ηπειρωτική σταθερή περιοχή | $20 ^\circ C/km$ | $0.06 W / m^2$ | 1.5 HFU |
| Επιμήκεις οροσειρές εναλλασσόμενες με λεκάνες | $30 ^\circ C/km$ | $0.1 W / m^2$ | 2.5 HFU |

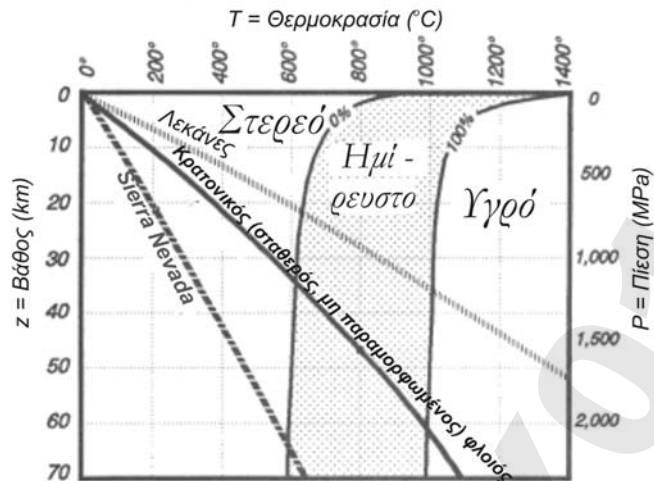


Εικόνα 5-14. Χάρτης ροής θερμότητας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (από U.S. Department of Energy Heat Flow Map, 1996).

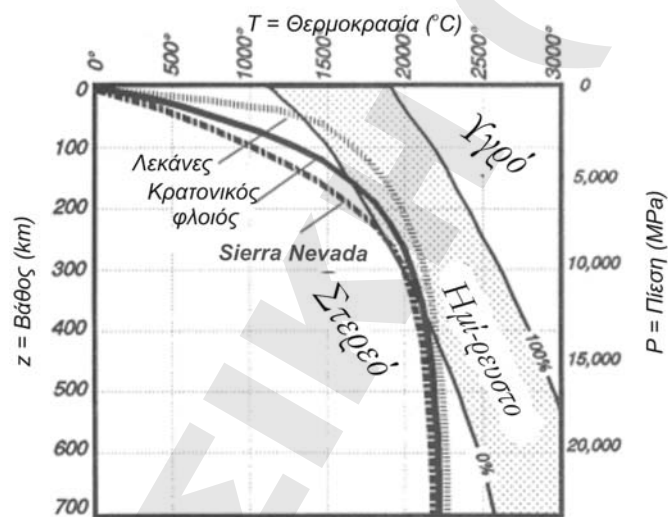
Ο ανώτερος μανδύας έχει κανονική θερμοκρασία, όπως προκύπτει από τις τυπικές σεισμικές ταχύτητες που είναι περίπου 8.1 έως 8.2 km/s. Επειδή η περιοχή αυτή δεν είναι τεκτονικά ενεργή, είχε χρόνο να εξισορροπηθεί θερμικά. Έτσι μια σχετικά επίπεδη επιφάνεια μεταξύ της λιθόσφαιρας και ασθενόσφαιρας έχει δημιουργηθεί σε βάθος 150 km (εικ. 5-16α).

Ηπειρωτική ρηξιγενής ζώνη. Η πολύ θερμή ασθενόσφαιρα βρίσκεται σε ρηχή περιοχή κάτω από μια ηπειρωτική ρηξιγενή ζώνη, θερμαίνοντας υπερκείμενα πετρώματα του φλοιού. Σε ένα βάθος περίπου 20 km κάτω από την περιοχή με «εναλλασσόμενες οροσειρές και λεκάνες», τα γρανιτικά πετρώματα είναι αρκετά θερμά ώστε να ξεκινά μερική τήξη (εικ. 5-15α). Οι σεισμικές εστίες έτσι περιορίζονται στα ανώτερα 15 km ή τόσο περίπου, διότι η υψηλή γεωθερμική βαθμίδα προκύπτει σε ρηχή εύθραυστη έως ελατή μεταβατική ζώνη.

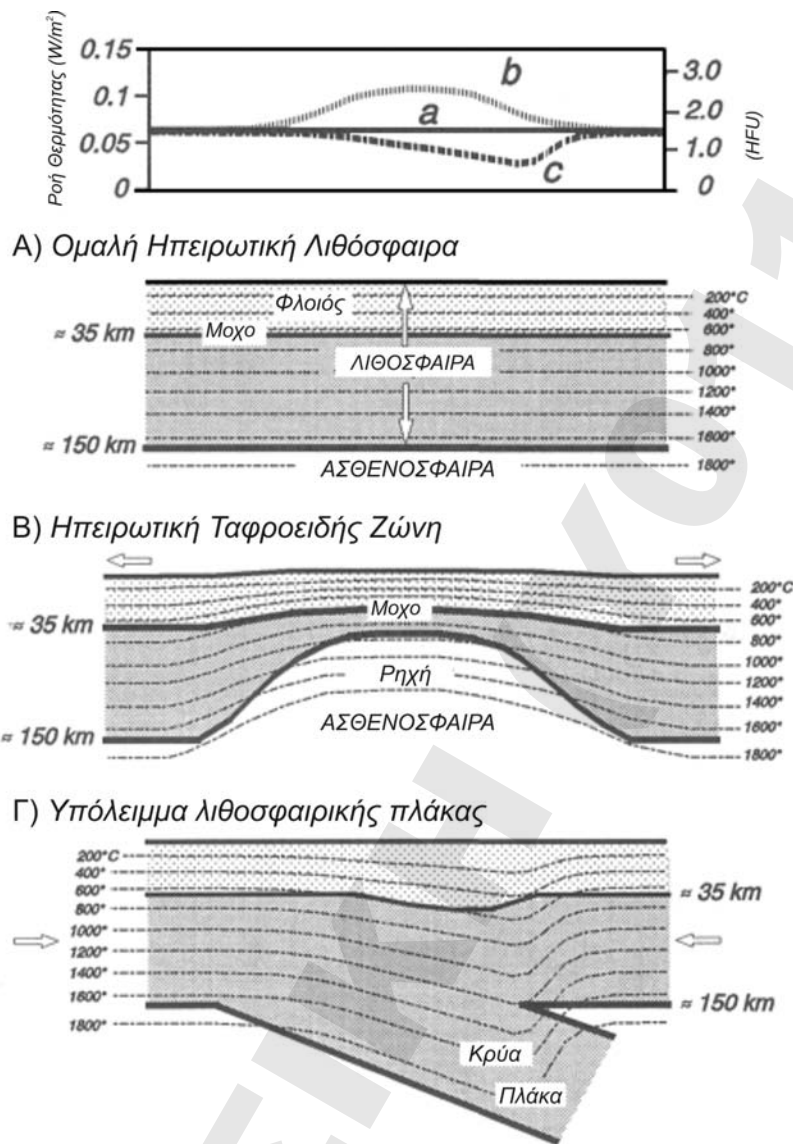
Α) Διάγραμμα P/T στερεού Γρανίτη



Β) Διάγραμμα P/T υγρού Περιδοτίτη



Εικόνα 5-15. α) Γεωθερμικές βαθμίδες του πίνακα 5-3 που έχουν απεικονισθεί σε διάγραμμα φάσης ξηρού γρανίτη και β) γεωθερμικές βαθμίδες που έχουν απεικονισθεί σε διάγραμμα φάσης περιδοτίτη.



Εικόνα 5-16. Μοντέλα που εξηγούν την παρατηρηθείσα ροή θερμότητας σε τρεις περιοχές της Βορείου Αμερικής.

Χαμηλές σεισμικές ταχύτητες παρατηρούνται για τον ανώτερο μανδύα κάτω από την περιοχή με «εναλλασσόμενες οροσειρές και λεκάνες», σύμφωνα με τη πολύ ρηχή θέση της ασθενόσφαιρας. Η υψηλή γεωθερμική βαθμίδα δείχνει ότι, στα 45 km βάθος, η θερμοκρασία είναι γύρω στους 1300 °C. Η πίεση στην πολύ θερμή ασθενόσφαιρα είναι τόσο χαμηλή σ' αυτό το βάθος, ώστε να παρατηρείται μερική τήξη (εικ. 5-15β). Ο κατώτερος φλοιός μπορεί να έρχεται σε επαφή με νέο γαββροϊκό υλικό, όπως δείχνεται από τις ημι-οριζόντιες ασυνέχειες σε σεισμικά προφίλ ανάκλασης. Η μεταβατική ζώνη φλοιού/μανδύα είναι νέα και επίπεδη (εικ. 5-16β), που προκύπτει από τη μαγματική διαφοροποίηση του γάββρου που υπέρκειται του περιδοτίτη. Αυτή η νέα ασυνέχεια Moho αποκαλύπτεται από τις ισχυρές ανακλάσεις, που προέρχονται από το βάθος των περίπου 30 έως 32 km, καθ' όλη την έκταση της περιοχής με «εναλλασσόμενες οροσειρές και λεκάνες».

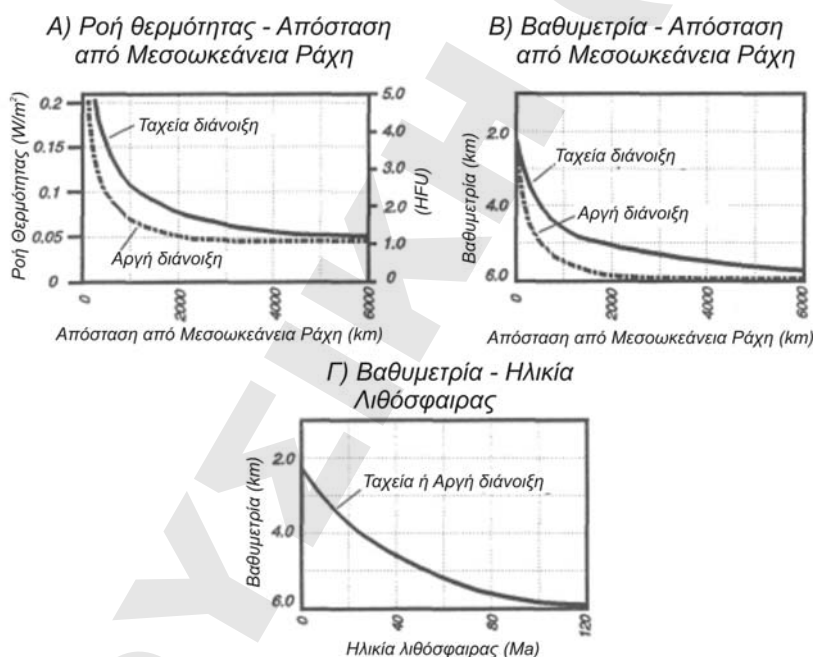
"Υπόλειμμα" ζώνης υποβύθισης. Οι οροσειρές της Σιέρρας Νεβάδας στην Καλιφόρνια και στη Νεβάδα αποτελούν τις αποσαθρωμένες ρίζες ενός ηφαιστειακού τόξου που προϋπήρχε της δημιουργίας του ρήγματος μετασχηματισμού του Αγίου Ανδρέα. Η χαμηλή ροή θερμότητας (εικ. 5-14) προτείνει την παρουσία μιας παχιάς, κρύας λιθόσφαιρας, ένα υπόλειμμα της προηγούμενης ζώνης υποβύθισης (εικ. 5-15β, 5-16γ). Όμοιες λιθοσφαιρικές πλάκες έχουν αναγνωρισθεί, μέσω σεισμικών μελετών χρονικών υπολοίπων,

στις ανατολικές Άλπεις και τα νότια Καρπάθια στην Ευρώπη. Με το χρόνο, αυτές οι κρύες πλάκες θα αναθερμανθούν και θα φθάσουν στις κανονικές θερμοκρασίες του ανώτερου μανδύα και η ασυνέχεια λιθόσφαιρα/ασθενόσφαιρα θα επιστρέψει σε ρηχότερο επίπεδο.

5.2.4.β Ωκεάνιες Περιοχές

Οι ωκεάνιες περιοχές είναι γενικά πιο θερμές από τις ηπειρωτικές, διότι η λιθόσφαιρα τους είναι νεώτερη. Με το χρόνο, ο ανώτερος μανδύας ψύχεται, κατεβάζοντας βαθύτερα την ασυνέχεια λιθόσφαιρα/ασθενόσφαιρα. Διατομές εγκάρσια προς τις μέσο-ωκεάνιες ράχες δείχνουν συσχετίσεις της ηλικίας του φλοιού, της βαθυμετρίας και της ροής θερμότητας σύμφωνα με την δημιουργία νέας λιθόσφαιρας. Στις ζώνες υποβύθισης, τα προφίλ ροής θερμότητας σκιαγραφούν περιοχές της κατερχόμενης λιθόσφαιρας και της διεύθυνσης του μάγματος.

Μεσο-ωκεάνιος ράχη. Στις μέσο-ωκεάνιες ράχες, οι τιμές ροής θερμότητας και η τοπογραφία ελαττώνονται εκθετικά με την απόσταση από τους άξονες των ράχων (εικ. 5-17α,β). Για μια δεδομένη ταχύτητα απομάκρυνσης των πλακών, όσο μακρύτερα βρίσκονται από τη ράχη, τόσο πιο ψυχρές είναι. Έτσι, η μείωση των τιμών ροής θερμότητας δείχνει την ελάττωση της θερμοκρασίας με την ηλικία (εικ. 5-17γ).

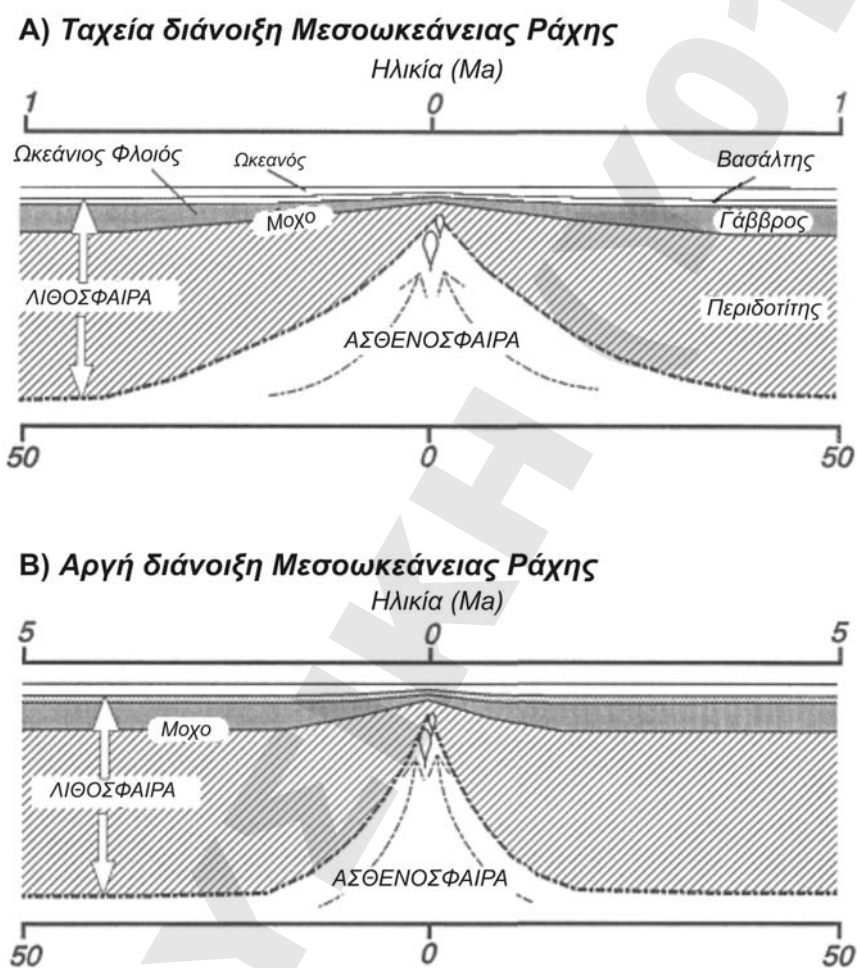


Εικόνα 5-17. Συγκρίσεις μεταξύ ροής θερμότητας, βάθους στήλης νερού και απόστασης από την μεσο-ωκεάνιο ράχη. α) Όσο γρηγορότερος είναι ο ρυθμός απομάκρυνσης των πλακών, τόσο ευρύτερη γίνεται η περιοχή υψηλής ροής θερμότητας, β) Ράχες με γρήγορη απομάκρυνση δείχνουν μια ευρύτερη περιοχή με μεγάλα υψόμετρα από τις ράχες μικρής ταχύτητας απομάκρυνσης, γ) Ο ωκεάνιος πυθμένας βυθίζεται καθώς η μεσο-ωκεάνιος ράχη ψύχεται με το χρόνο.

Σε ίδια απόσταση από τους άξονες των ράχων, οι γρήγορα κινούμενες ράχες είναι περισσότερο υπερυψωμένες από τις κινούμενες ράχες με μικρότερη ταχύτητα (εικ. 5-17β). Το υψόμετρο είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Θερμότερες περιοχές έχουν θερμικά διαστειλί τον μανδύα και κατ' επέκταση έχουν ανυψωθεί. Η εικόνα 5-17γ δείχνει ότι για αργές και γρήγορες μετακινήσεις των ράχων, το βάθος του νερού αυξάνεται εκθετικά σχετικά με την ηλικία της λιθόσφαιρας.

Γενικά, οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την εικόνα 5-17 προτείνουν ότι, καθώς τα υλικά κινούνται μακριά από τον άξονα της ράχης, ψύχονται και συστέλλονται, προκαλώντας την πτώση της οροφής του φλοιού σε βαθύτερα επίπεδα, κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ελάττωση της θερμοκρασίας ακολουθεί μια εκθετική μείωση με το χρόνο, έτσι ώστε η οροφή της λιθόσφαιρας ορισμένης ηλικίας να δίδει ένα προβλεπόμενο βάθος νερού.

Γρήγορα κινούμενες ράχες παραμένουν θερμές και υπερυψωμένες σε κάποια απόσταση από τον άξονα της ράχης, δημιουργώντας ένα πολύ ευρύ (ομαλό) προφίλ (εικ. 5-18α). Αργά κινούμενες ράχες είναι αρχαιότερες και πιο κρύες σε αντίστοιχες αποστάσεις από την ράχη, παράγοντας απότομα προφίλ (εικ. 5-18β).



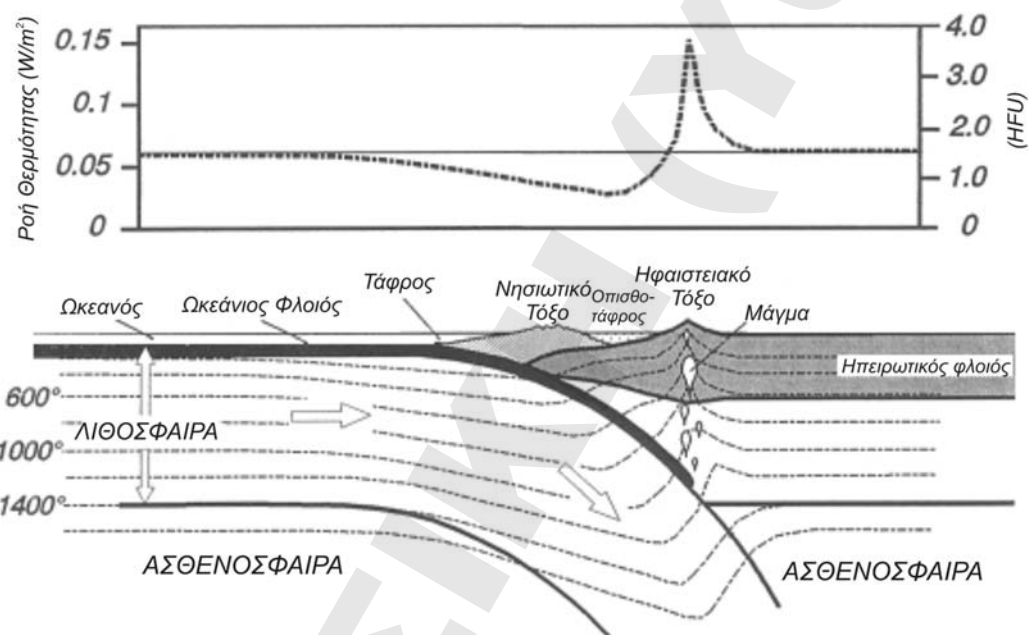
Εικόνα 5-18. Ταχεία απομάκρυνση πλακών οδηγεί σε μια ευρύτερη μεσο-ωκεάνιο ράχη (α), με περισσότερο ομαλές κλίσεις του πυθμένα του νερού, της Moho και της ασυνέχειας λιθόσφαιρα/ασθενόσφαιρα, σε σχέση με τον αργό ρυθμό απομάκρυνσης (β).

Ζώνη υποβύθισης. Σε μια ζώνη υποβύθισης, η θερμική επίδραση είναι πολύ όμοια με την τοποθέτηση ενός κύβου πάγου σε ένα φλιτζάνι καυτού αφειγήματος καφέ. Παίρνει κάποιο χρόνο προτού αρκετή θερμότητα μεταφερθεί από τον καφέ στον πάγο, προκαλώντας τη τήξη του. Εν τω μεταξύ, η θερμοκρασία του πάγου είναι μικρότερη από εκείνη του περιβάλλοντος του καφέ.

Όταν η λιθosphαιρική πλάκα βυθίζεται, διαταράσσει τις ισότιμες καμπύλες θερμοκρασίας (ισόθερμες καμπύλες), ελαττώνοντας τη γεωθερμική βαθμίδα στην περιοχή της ζώνης υποβύθισης (εικ. 5-19). Οι μετρήσεις ροής θερμότητας συχνά δείχνουν μια ευρεία χαμηλή

ζώνη στην περιοχή μεταξύ της βυθιζόμενης πλάκας και του ηφαιστειακού τόξου και μια υψηλή ζώνη στο ηφαιστειακό τόξο. Οι χαμηλές τιμές προέρχονται από την επίδραση της κρύας πλάκας, ενώ οι υψηλές αντανακλούν την μεταφορά θερμότητας μέσα στο ανερχόμενο μάγμα. Ο χάρτης της εικόνας 5-14α δείχνει αυτή τη διάταξη της χαμηλής/υψηλής ροής θερμότητας, στη ζώνη υποβύθισης της Κασκαδίας στο βορειοδυτικό τμήμα της Αμερικής.

Μια συνέπεια της γρήγορης υποβύθισης της πλάκας είναι ότι ψυχρό υλικό μπορεί να κατέλθει σε μεγάλα βάθη, παραμένοντας αρκετά στερεό για να σπάσει με σεισμούς. Με το χρόνο η πλάκα θερμαίνεται, αλλά η ψυχρότητα μπορεί να παραταθεί για δεκάδες εκατομμύρια χρόνια. Λιθοσφαιρικές ρίζες έχουν έτσι αναγνωρισθεί κάτω από περιοχές αρκετά πρόσφατης σύγκλισης πλακών, όπως στις Άλπεις και στις οροσειρές της Σιέρρας Νεβάδας (εικ. 5-14, 5-15β, 5-16γ).



Εικόνα 5-19. Ισόθερμες καμπύλες και προφίλ ροής θερμότητας στη ζώνη υποβύθισης μιας λιθοσφαιρικής πλάκας. Οι ισότιμες καμπύλες κατέρχονται καθώς η κρύα πλάκα καταβυθίζεται στην περιοχή της τάφρου, προκαλώντας χαμηλή ροή θερμότητας. Θερμά ρευστά που μεταναστεύουν προς την επιφάνεια, από την οροφή της πλάκας υποβύθισης, παράγουν μάγμα και υψηλή ροή θερμότητας στο ηφαιστειακό τόξο.