

Εισαγωγή στην Γεωθερμία

Αξιοποιώντας τη θερμότητα της γης για παραγωγή βιώσιμης ενέργειας



Βασίλειος Διαμαντής, Δρ. Μηχανικός Περιβάλλοντος
Ξάνθη, 23/05/2025

Σκοπός του μαθήματος

- Κατανόηση των βασικών εννοιών και ορισμών
- Εμβάθυνση σε γεωθερμικές εφαρμογές και τεχνολογίες
- Αναγνώριση πλεονεκτημάτων / μειονεκτημάτων
- Μελέτη περιπτώσεων από τη διεθνή πρακτική

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

- Περιλαμβάνει το κόστος κατασκευής ανοιγμένο στη συνολική διάρκεια ζωής της εγκατάστασης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας.

Προέλευση	Κόστος ενέργειας (\$/MWh)
Γεωθερμία	40–100
Φυσικό αέριο	40–80
Λιθάνθρακες	60–120
Φωτοβολταϊκά	30–70
Ανεμογεννήτριες	30–60

- Το κόστος ενέργειας για τη γεωθερμία εξαρτάται από:
 - Ποιότητα γεωθερμικού πόρου
 - Κόστος και επιτυχία ανόρυξης γεωτρήσεων
 - Μέγεθος εγκατάστασης και τεχνολογία
 - Τοποθεσία και χρηματοδότηση

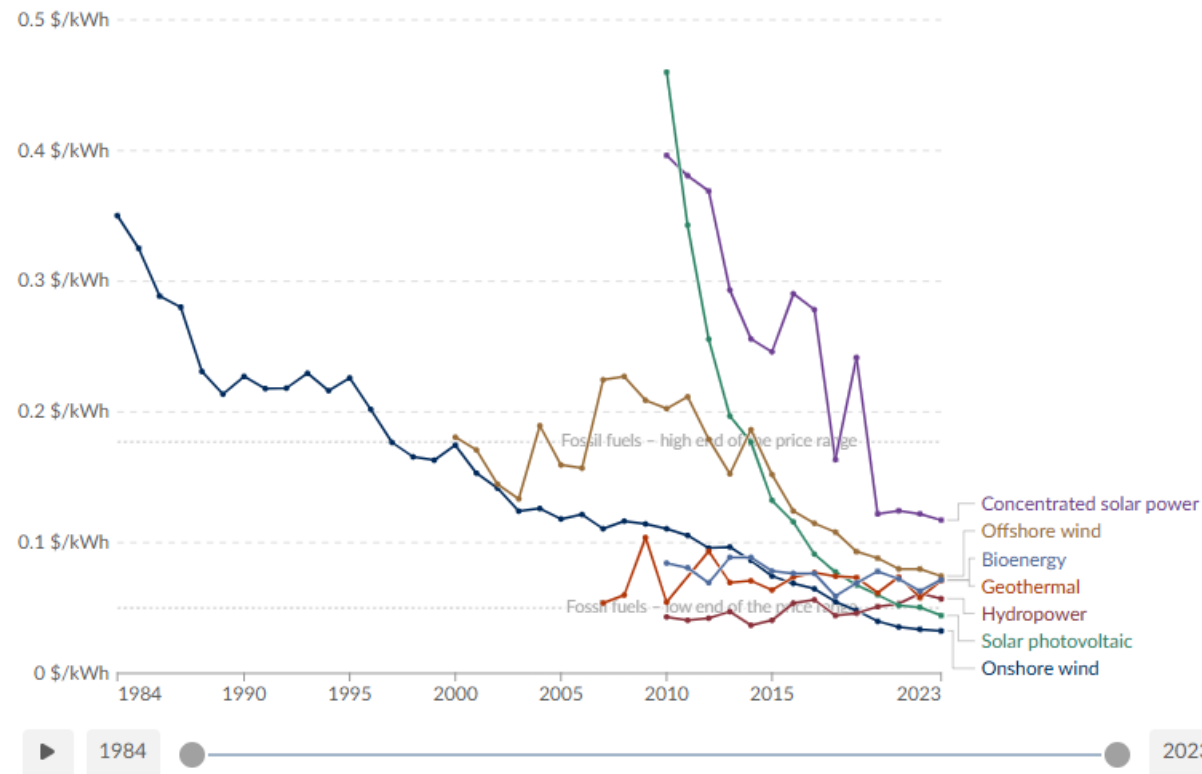
Levelized cost of energy for renewables by country, World

The average cost per unit of energy generated across the lifetime of a new power plant. This data is expressed in US dollars per kilowatt-hour. It is adjusted for inflation but does not account for differences in living costs between countries.

Our World
in Data

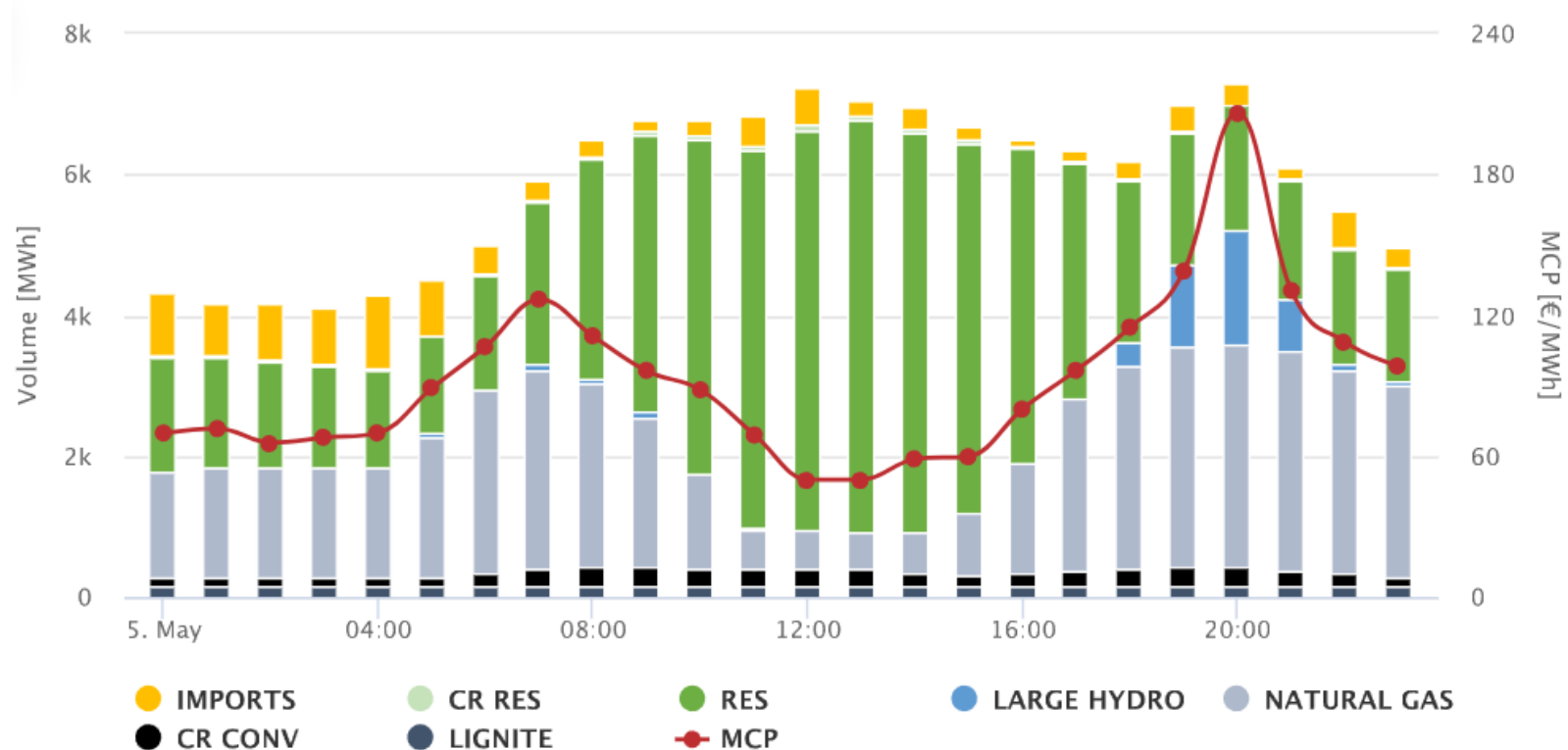
Table Chart

Settings



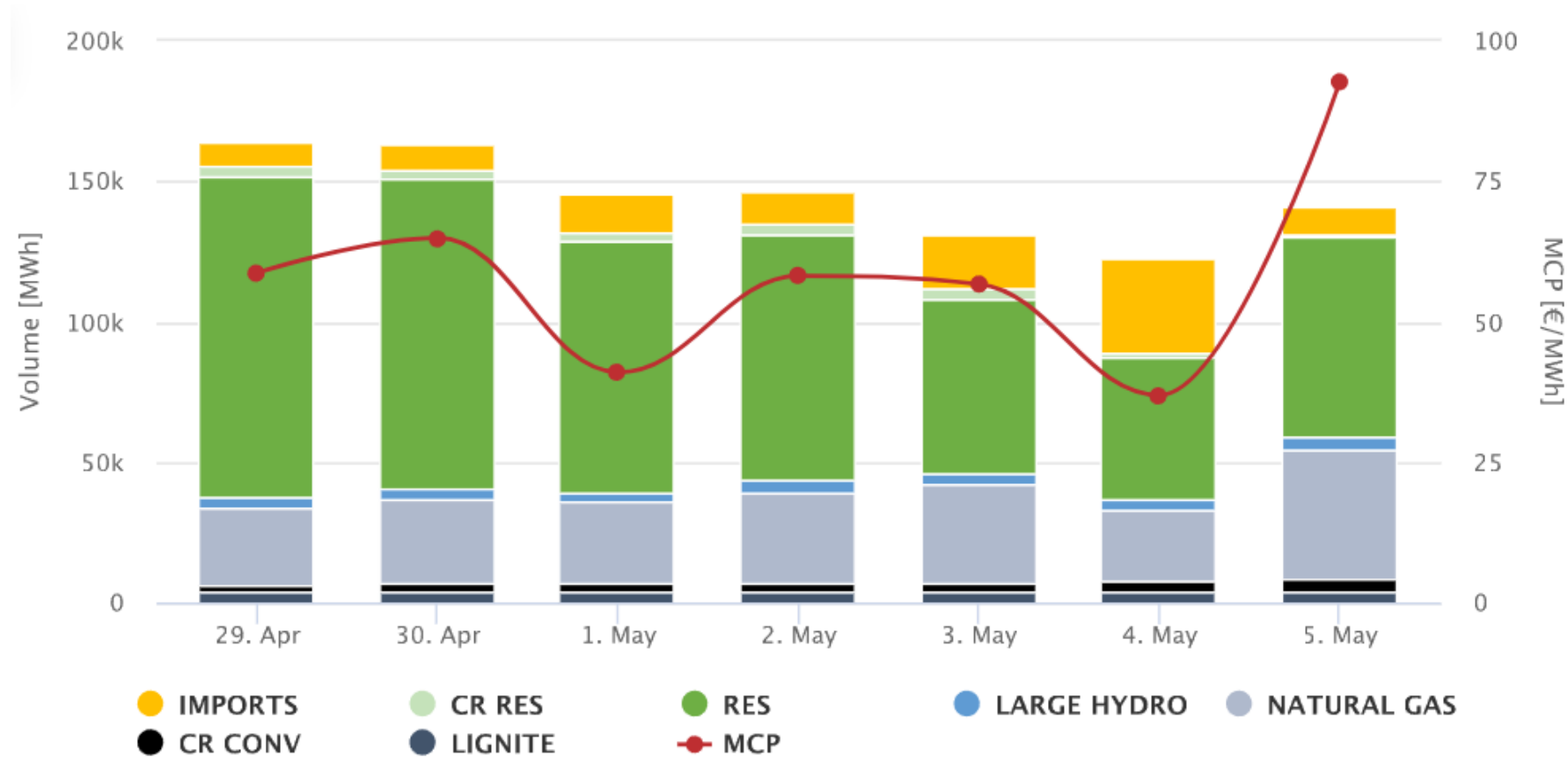
Levelized cost of energy for renewables by country, World

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας



- Ενεργειακό μίγμα Ελλάδας
- <https://www.raaey.gr/>

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας



- Ενεργειακό μίγμα Ελλάδας
- <https://www.raaey.gr/>

Ερωτήσεις

Ποιος έχει εμπειρία από τη γεωθερμία

Greece



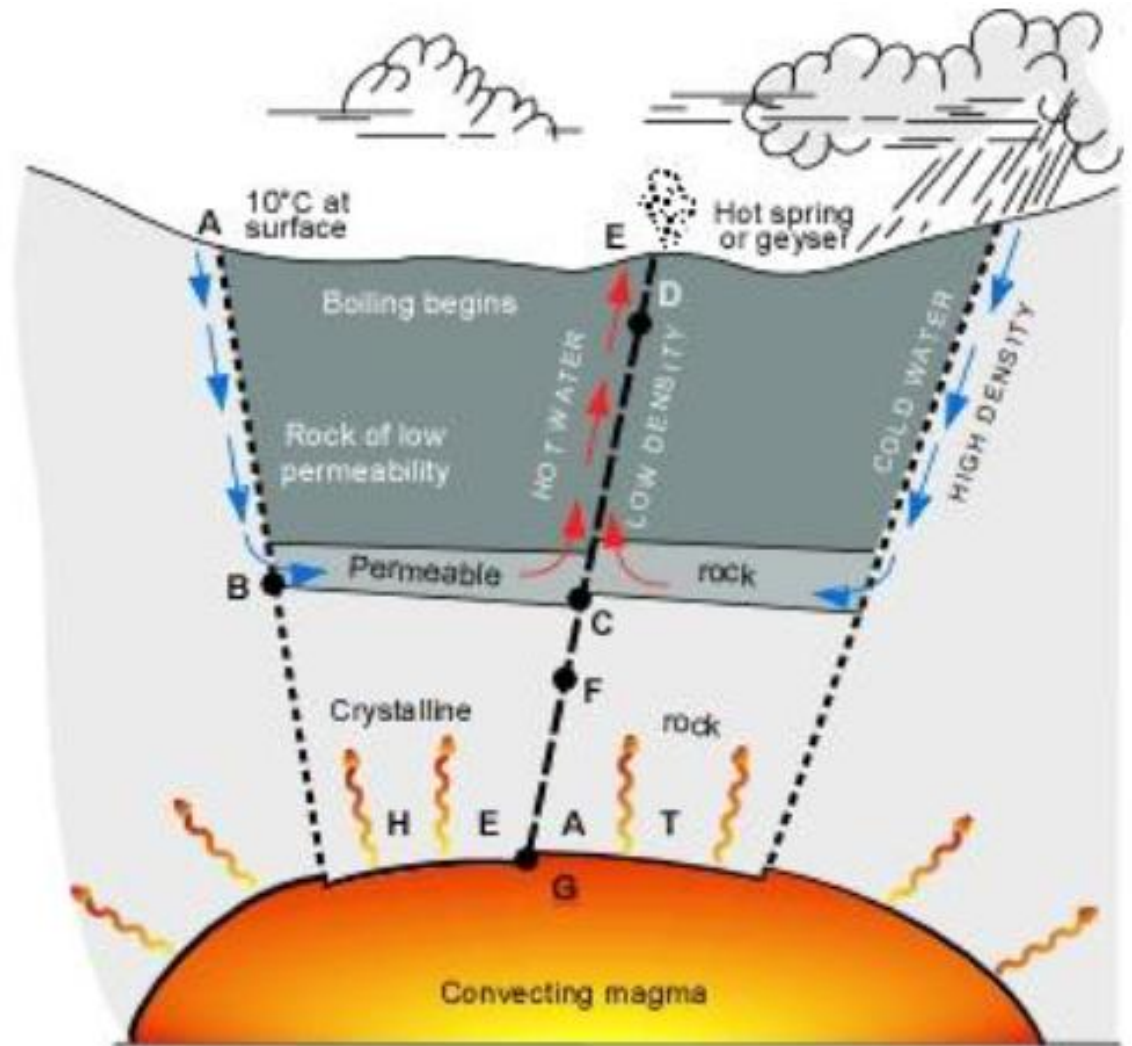
Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- Θερμοπίδακες (geyser)
- Είναι δημιουργήματα υπέρθερμων υπογείων νερών που κυκλοφορούν σε μικρό βάθος. Αυτά τα νερά κάθε τόσο αποκτούν πίεση ικανή να προκαλέσει «έκρηξη» νερού και ατμού, που εκτινάσσονται σε αρκετές δεκάδες μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.



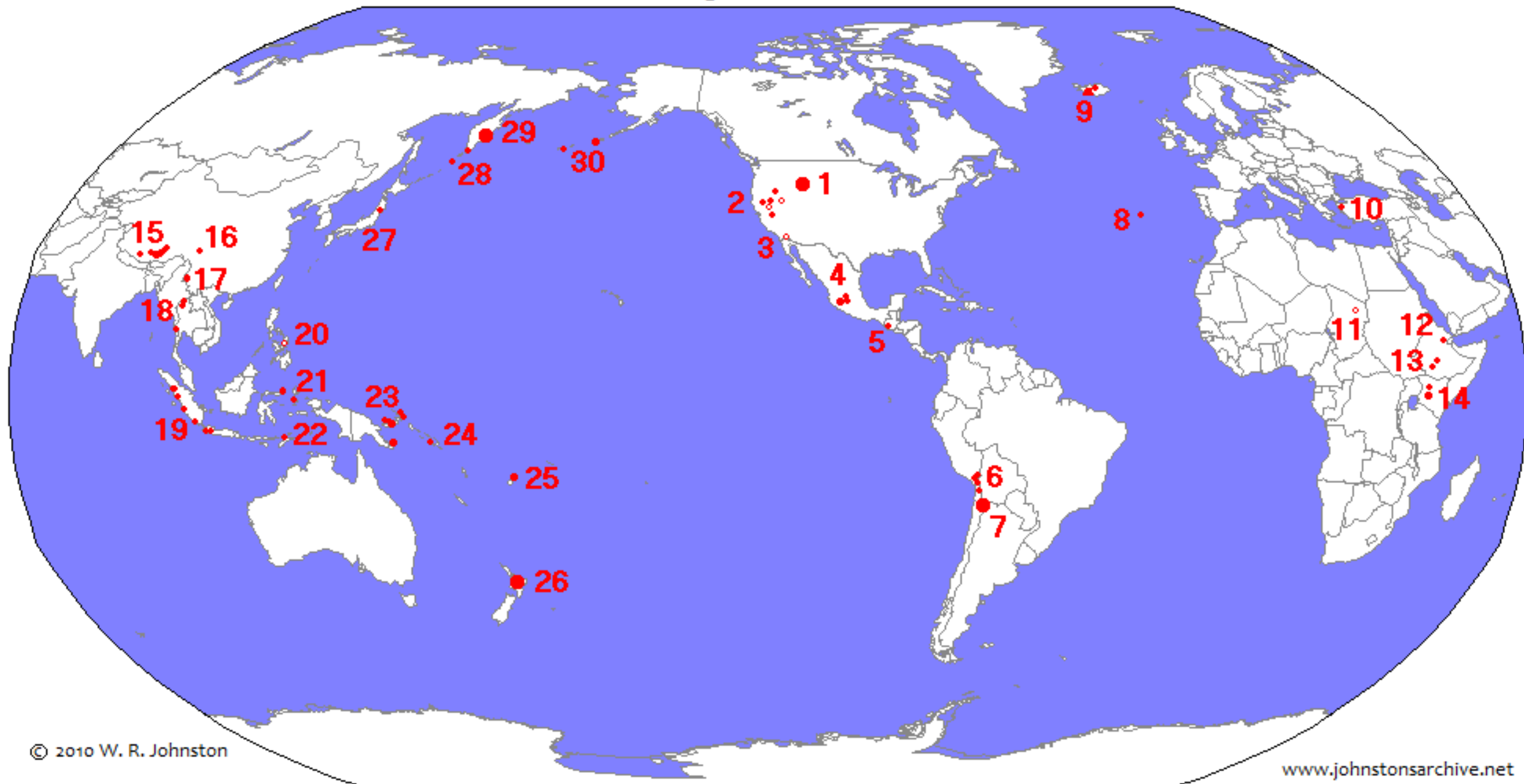
Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- Θερμοπίδακες (geyser)





World Geyser Locations



active/dormant geysers:

● 50 or more

● 10-49

● 1-9

○ extinct field

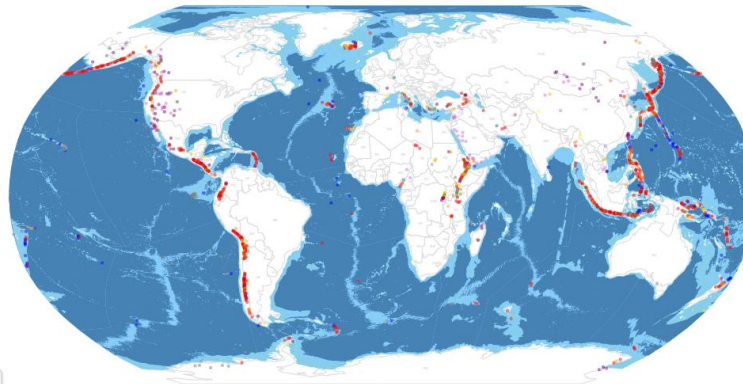
1. **Yellowstone National Park, Wyoming**
2. Mickey Hot Springs, Oregon; Lassen volcano and Long Valley Caldera, California; Beowawe, Steamboat Hot Springs, and Great Boiling Springs, N
3. Salton Sea, California
4. Araro, Comanjilla, and Ixtlan de los Hervores, Mexico
5. Zunil, Guatemala
6. Aguas Calientes, Puentebello, Putina, Sayasayani, and Sicoloque, Peru; Puchuldiza and Suriri, Chile
7. **El Tatio, Chile**; Laguna Colorada and Sol de Manana, Bolivia
8. Furnas, Azores Islands
9. **Iceland**
10. Ayvalik, Turkey
11. Yerike Volcano, Chad
12. Tendaho, Ethiopia
13. Lake Abaya and Lake Langano, Ethiopia
14. Lake Bogoria and Logkippi, Kenya
15. Bibilung, Capu, Daggyai Tso, Gulu, Naisum Chuja, Peting Chuja, Quzai, Yangbajing, and Yangyingxiang, Tibet, P.R. China
16. Chaluo, Sichuan, P.R. China
17. Balazhang and Tengchong, Yunnan, P.R. China
18. Ban Muang Chom, Pa Pai, and Pong Hom, Thailand; Dawi, Myanmar
19. Kerinci, Lampung-Semangko, Pasaman, and Tapanuli, Sumatra, Indonesia; Cisolok and Papandayan, Java, Indonesia
20. Bao-Banati, Philippines
21. Mahawu Volcano and Toraget, Celebes, Indonesia; Bacan Island, Indonesia
22. Bukapeting, Alor, Indonesia
23. Pangalu, Koimumu, Narage Island, Ambitle Island, Lihir Island, Deidie, and Iamelete, Papua-New Guinea
24. Mbiti Voghala, Solomon Islands
25. Nakama Springs, Fiji
26. **North Island, New Zealand**
27. Japan
28. Shiashkotan Island and Pauzheka, Russia
29. **Dolina Geizerov, Russia**
30. Kanaga and Umnak Islands, Alaska

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- **Ατμίδες**
- Είναι έξοδοι υπέρθερμου ατμού που βγαίνει από ρωγμές του εδάφους χωρίς πίεση, αλλά με εντυπωσιακή σταθερότητα, μαζί με ηφαιστειακά αέρια. Γύρω από τις ατμίδες αποτίθενται άλατα και ορυκτά που περιέχονται στον ατμό. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις ξεπερνούν τους 600 °C, αλλά συνήθως έχουν θερμοκρασία γύρω στους 100 °C.

World Map of Volcano Types

This interactive map shows the locations of Volcanoes worldwide, their classification, and their names. For more details, zoom in. For more data, hover over the map. For more information, scroll down.



[Map of Volcanoes Worldwide](#)

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

Ατμίδες (fumaroles)



Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- **Υδροθερμικοί ή φρεατικοί κρατήρες**
- Σχηματίζονται ύστερα από «έκρηξη» υπέρθερμων γεωθερμικών ρευστών που βρίσκονται εγκλωβισμένα σε μικρό βάθος υπό πίεση, και τα οποία ανατινάζουν τα υπερκείμενα πετρώματα.
- Φωτογραφίες φρεατικών κρατήρων στη Νίσυρο.

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- Υδροθερμικοί κρατήρες



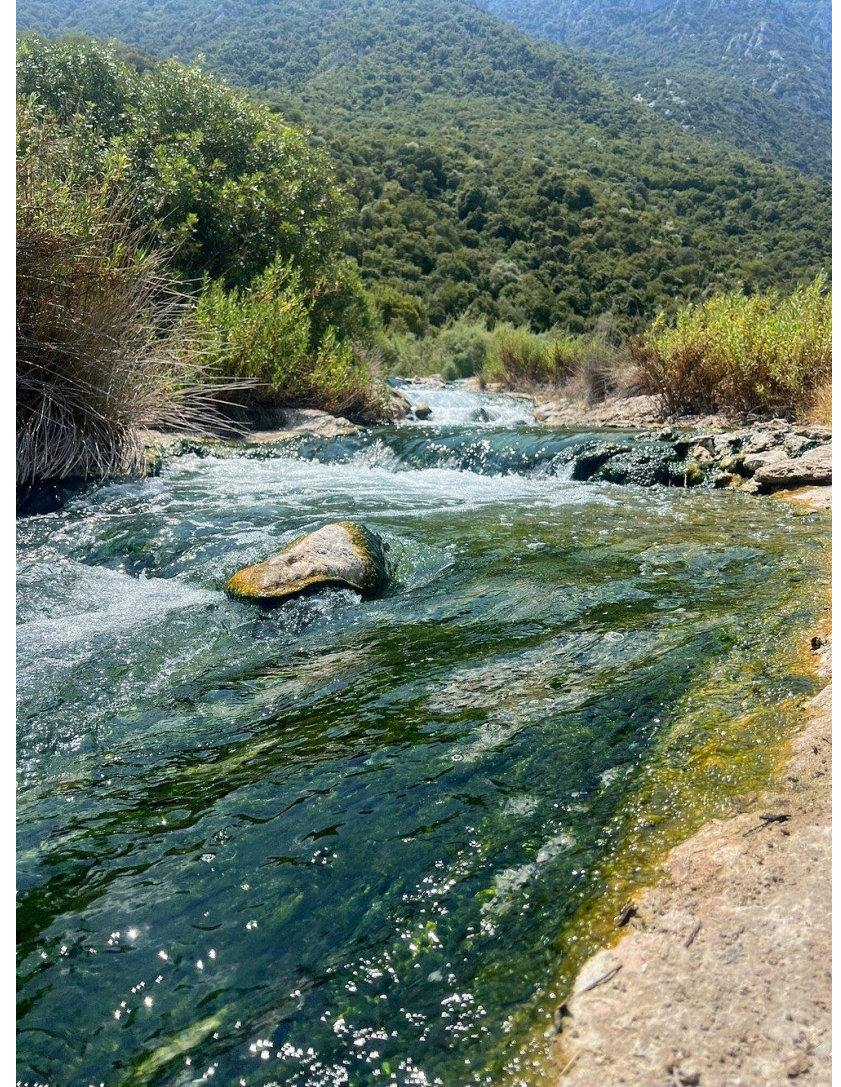


Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- **Θερμές πηγές**
- Είναι έξοδοι ζεστού νερού, κάτω από ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, με θερμοκρασία μέχρι 100 °C. Σε μερικές περιπτώσεις έχουν εντυπωσιακή παροχή. Οι πηγές των Θερμοπυλών είναι εντυπωσιακές και ενεργές από την εποχή του Λεωνίδα, συνεχίζουν να ρέουν και σήμερα με σημαντική παροχή (1.000 m³/h) και αποδεικνύουν την ανανεωσιμότητα του ενεργειακού αυτού πόρου.

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- Θερμές πηγές





Η Αιδηψός είναι ένα από τα πιο παλιά και γνωστά θέρετρα στον κόσμο όταν πρόκειται για ιαματικά λουτρά και θεραπεία. Υπάρχουν περισσότερες από ογδόντα μεμονωμένες πηγές με νερά που κυμαίνονται από 40 έως 80 βαθμούς.



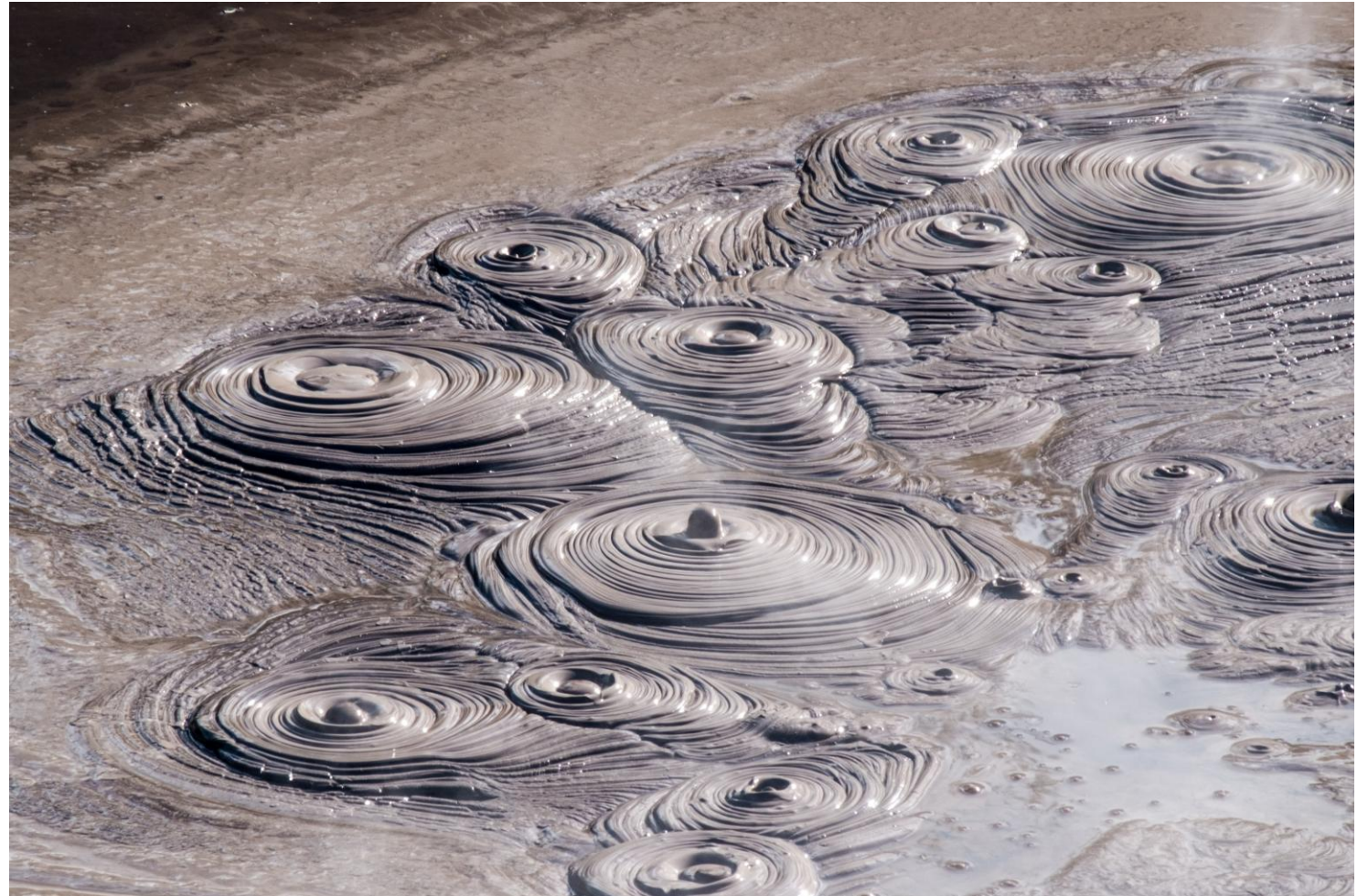
[ΛΟΥΤΡΑ ΑΙΔΗΨΟΥ – GRtraveller](#)

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

- Λεκάνες ιλύος



Bubbling Mud Pool at Lassen
Volcanic National Park



Rotorua, New Zealand



Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

Λεκάνες ιλύος

[Thermal Mud Baths Spa at Krinides, Greece](#)

Επιφανειακές εκδηλώσεις θερμότητας της γης

Θερμές πηγές

Ατμίδες

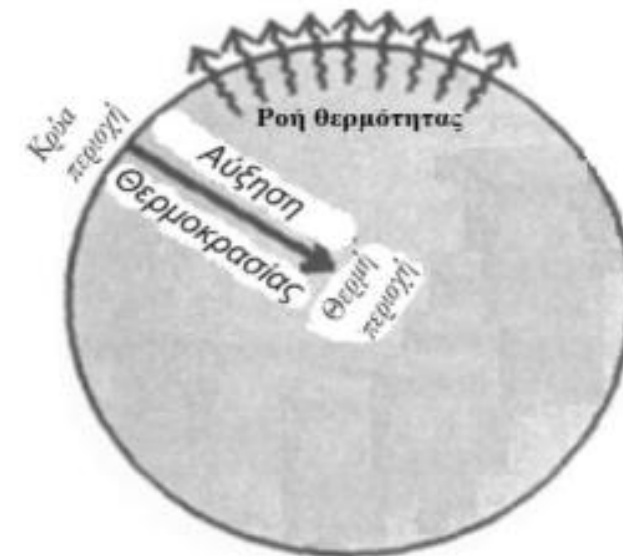
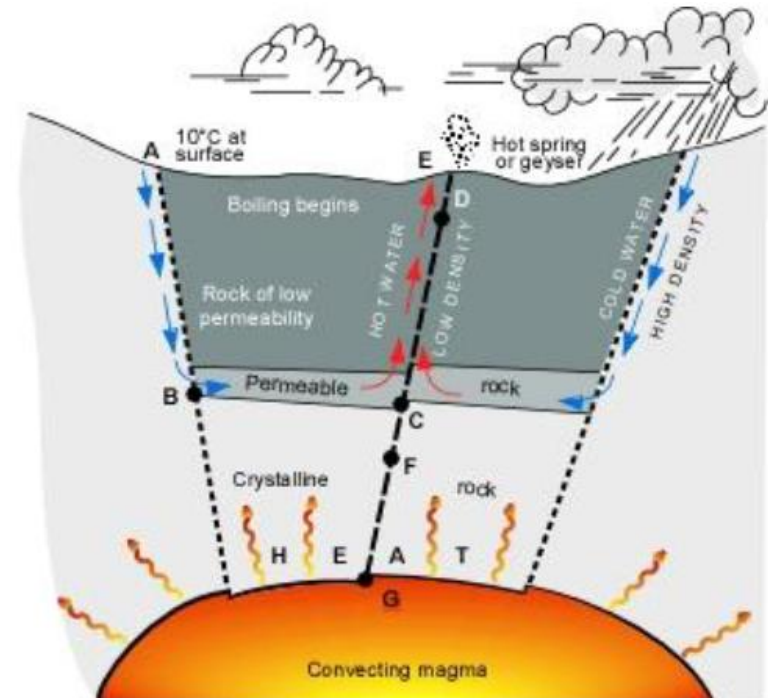
Λεκάνες ιλύος

Υδροθερμικοί κρατήρες

Θερμοπίδακες

Βασικό θεωρητικό υπόβαθρο

- Γεωθερμική ενέργεια
- Γεωθερμικό πεδίο
- Γεωθερμική βαθμίδα
- Ροή θερμότητας
- Γεωθερμικό σύστημα
- Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων



Γεωθερμική ενέργεια

- Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια, εννοούμε το τμήμα της γήινης θερμότητας που βρίσκεται αποθηκευμένο με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού ή σε μίγμα των παραπάνω, ή θερμών – ξηρών πετρωμάτων σε ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες.
- Η ενέργεια αυτή βρίσκεται συνήθως περιορισμένη σε μία γεωθερμική περιοχή ή πεδίο με συγκεκριμένα επιφανειακά όρια **«Γεωθερμικό πεδίο»**.
- Η εκμετάλλευση της ενέργειας αυτή (είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος είτε για άμεσες χρήσεις) είναι εφικτή μόνο υπό την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο, **εξασφαλίζουν ένα συγκριτικό οικονομικό αποτέλεσμα.**

Γεωθερμική ενέργεια

Ραδιενεργός διάσπαση

Διάσπαση ισοτόπων όπως το ουράνιο, το θόριο και το κάλιο στον μανδύα και τον φλοιό.

Διεισδύσεις μάγματος

Λιωμένα πετρώματα ανεβαίνουν προς τον φλοιό, θερμαίνοντας τα περιβάλλοντα πετρώματα και τα υπόγεια ύδατα.

Μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας

- **Αγωγή:** μεταφορά διαμέσου στερεών / ξηρών πετρωμάτων
- **Συναγωγή:** μέσω της κίνησης θερμού νερού

Γεωθερμική ενέργεια

- Η Γεωθερμική Ενέργεια είναι μία καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας επειδή η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης είναι ουσιαστικά απεριόριστη.
- Η πηγή της γεωθερμικής ενέργειας, η θερμότητα της Γης, είναι διαθέσιμη 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο.
- Αντιθέτως, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ημερησίων και εποχιακών διακυμάνσεων και των εναλλαγών του καιρού.
- Γι' αυτούς τους λόγους, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με την χρήση γεωθερμικής ενέργειας είναι σταθερά πιο αξιόπιστη από πολλές άλλες μορφές ηλεκτρικής ενέργειας, από τη στιγμή που αξιοποιείται ο πόρος,.
- Η θερμότητα που ρέει συνεχώς από το εσωτερικό της Γης υπολογίζεται ότι αντιστοιχεί σε **42 εκατομμύρια MW** ηλεκτρικής ενέργειας (*ένα MW μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες περίπου 1.000 σπιτιών*).

Γεωθερμικό πεδίο

- Νοείται μια γεωθερμική περιοχή, η οποία με κριτήριο την **ποσότητα**, τη **θερμοκρασία** και το **βάθος των γεωθερμικών ρευστών** χαρακτηρίζεται εκμεταλλεύσιμη (κυρίως με οικονομικά κριτήρια).
- Σύμφωνα με το Νόμο **4602/2019 (Άρθρο 2)**
 - **Γεωθερμικό πεδίο** είναι ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος, μέσα στον οποίο εντοπίζεται αυτοτελές γεωθερμικό δυναμικό.
 - **Γεωθερμικό δυναμικό** αναφέρεται το σύνολο των γηγενών φυσικών ατμών, των θερμών νερών, επιφανειακών ή υπόγειων, και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που υπερβαίνουν τους 30°C.
 - **Περιοχές Γεωθερμικού Ενδιαφέροντος (ΠΓΘΕ)** : είναι ο ευρύτερος χώρος μέσα στον οποίο υπάρχουν ενδείξεις παρουσίας γεωθερμικού δυναμικού θερμοκρασίας έως 90°C. Γενικά *χαρακτηρίζονται εκείνες όπου η αυξημένη θερμική ροή δημιουργεί θετικές γεωθερμικές ανωμαλίες.*
 - **Γεωθερμικοί πόροι:** είναι η υπεδάφια συγκέντρωση θερμών ρευστών ή θερμότητας εν γένει, για την οποία υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ως προς την δυνατότητα εκμετάλλευσής του μορφές ενέργειας

Γεωθερμική βαθμίδα

- Στην επιφάνεια της Γης, η θερμοκρασία ελέγχεται κυρίως από τον Ήλιο και την ατμόσφαιρα. Ελάχιστα μόνον μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι ημερήσιες μεταβολές της θερμοκρασίας γίνονται ελάχιστα αισθητές – από το βάθος των 15m περίπου, η θερμοκρασία είναι σχετικά σταθερή με πολύ αργές μεταβολές που εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες.
- **Η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος**, σχεδόν παντού, αν και ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται (γεωθερμική βαθμίδα) διαφοροποιείται σημαντικά, ανάλογα με το τεκτονικό καθεστώς και την γεωλογική δομή της περιοχής (θερμική αγωγιμότητα των πετρωμάτων).
- Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή περίπου μέχρι τα 10.000 m, η **μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2.5-3.0 °C/100 m**.
- Η φυσιολογική τιμή της γεωθερμικής βαθμίδας στα πρώτα χιλιόμετρα της λιθόσφαιρας κυμαίνεται από 20 έως 50 °C/km, ενώ η μέση τιμή της θεωρείται 33 °C/km.

Γεωθερμική βαθμίδα

- **Ορισμός:** Η γεωθερμική βαθμίδα ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό.

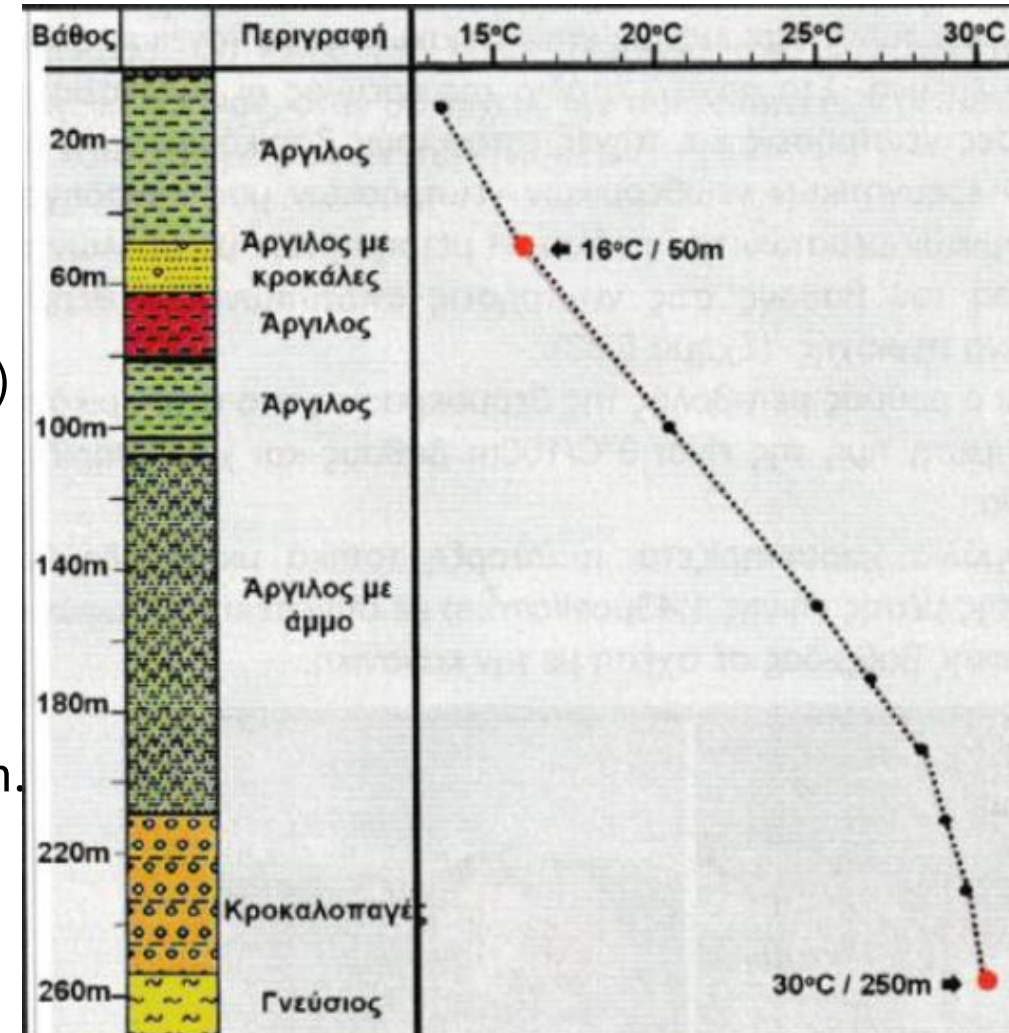
Παράδειγμα υπολογισμού θερμοβαθμίδας

$$\Delta T / \Delta h = [(T \text{ σε βάθος } n) - (T \text{ σε βάθος } i)] / (H \text{ βάθος } n - H \text{ βάθος } i)$$

$$= (30^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C}) / (250 \text{ m} - 50 \text{ m})$$

$$= 7^\circ\text{C} / 100\text{m}$$

- Η θερμοβαθμίδα στη γεώτρηση στο βάθος από τα 50 m έως τα 250 m είναι $7^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, άνω του διπλάσιου της κανονικής.
- Η κανονική γεωθερμική βαθμίδα είναι $3^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ή $30^\circ\text{C} / \text{km}$.



Ροή θερμότητας

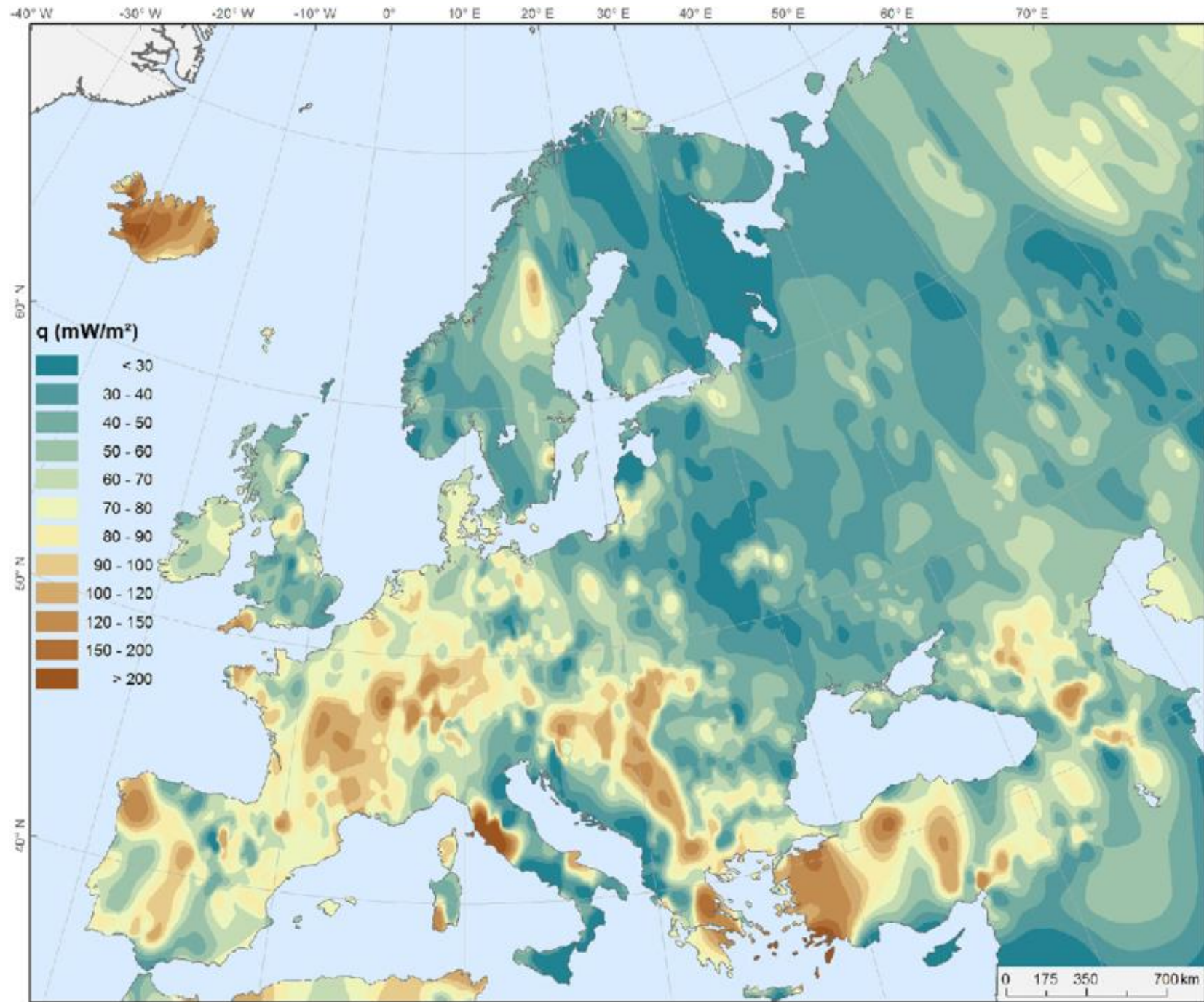
- Λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα, προκαλείται **ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες** του υπεδάφους προς τις ρηχές και ψυχρότερες.
- Ο όρος θερμική ροή σημαίνει τον ρυθμό με τον οποίο απάγεται η θερμότητα (θερμική ενέργεια) από το εσωτερικό της Γης προς την επιφάνεια, **ανά μονάδα επιφάνειας**. Η θερμοκρασιακή διαφορά των βαθύτερων στρωμάτων προκαλεί ροή θερμότητας από τις βαθύτερες και θερμότερες ζώνες προς τις επιφανειακές και ψυχρότερες.
- Η **μέση γήινη ροή θερμότητας** στις ηπείρους και τους ωκεανούς είναι **65 και 101 mW/m²** αντίστοιχα, οι οποίες υπολογίζοντας, την έκταση των περιοχών, δίνουν ένα παγκόσμιο μέσο όρο της τάξης των 87 mW/m².
- Η **θερμότητα αυτή πολλές φορές μεταφέρεται σε υδροφόρους σχηματισμούς** της περιοχής με αποτέλεσμα τα νερά να θερμαίνονται και να κυκλοφορούν μέσα στα πετρώματα φτάνοντας πολλές φορές μέχρι την επιφάνεια (θερμές πηγές).

Χάρτης ροής θερμότητας στην Ελλάδα

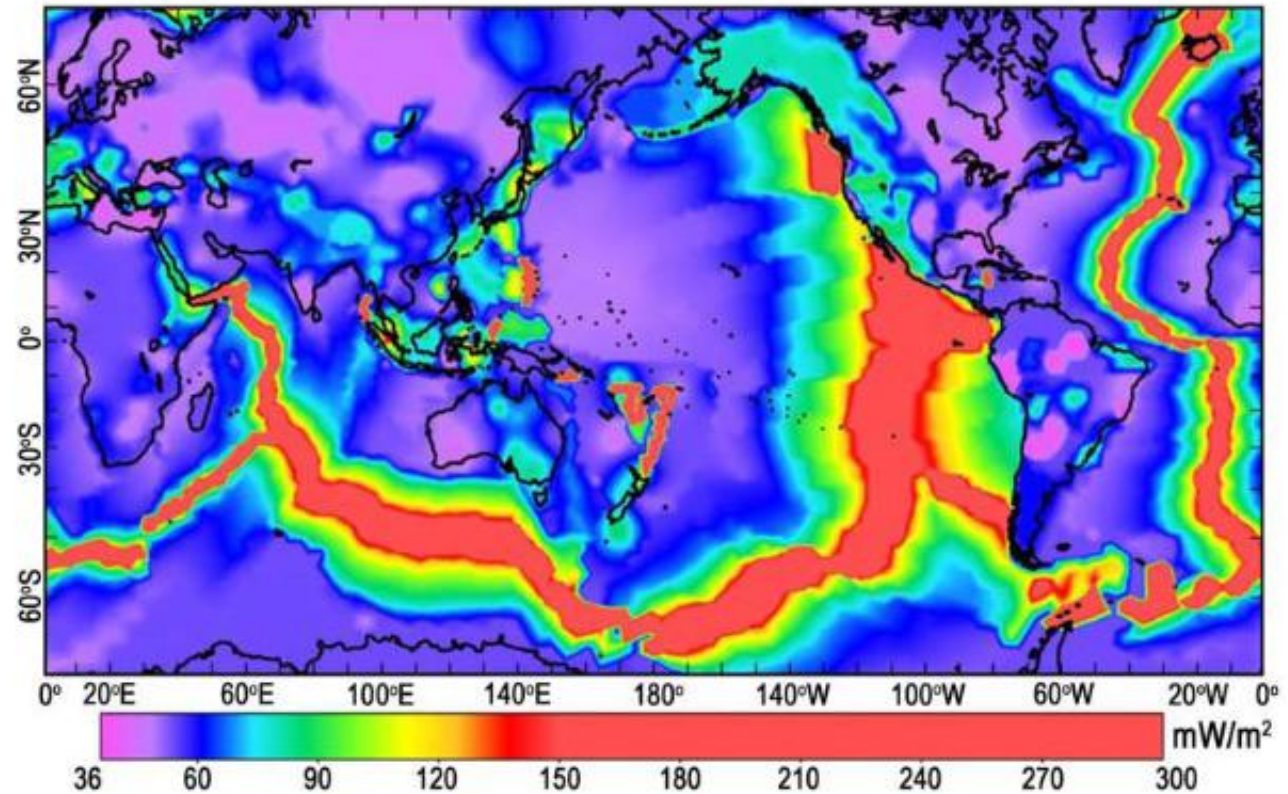
- Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες παρατηρούνται κατά μήκος νησιωτικών και ηφαιστειακών τόξων, πίσω από τις ζώνες σύγκλισης (σύγκρουσης) τεκτονικών πλακών, όπως είναι για την Ελλάδα το ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου (Νίσυρος – Σαντορίνη – Μήλος – Μέθανα – Σουσάκι Κορινθίας)



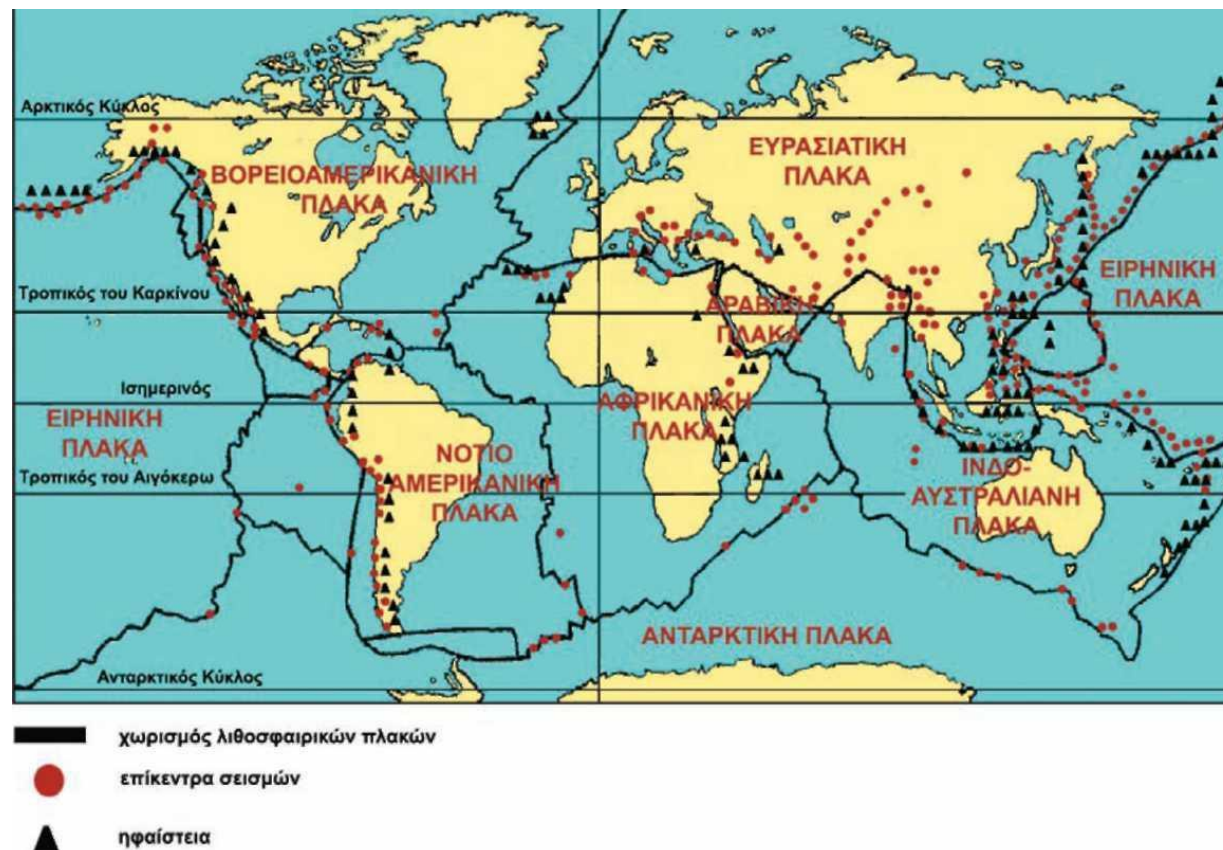
Ροή θερμότητας στην Ευρώπη



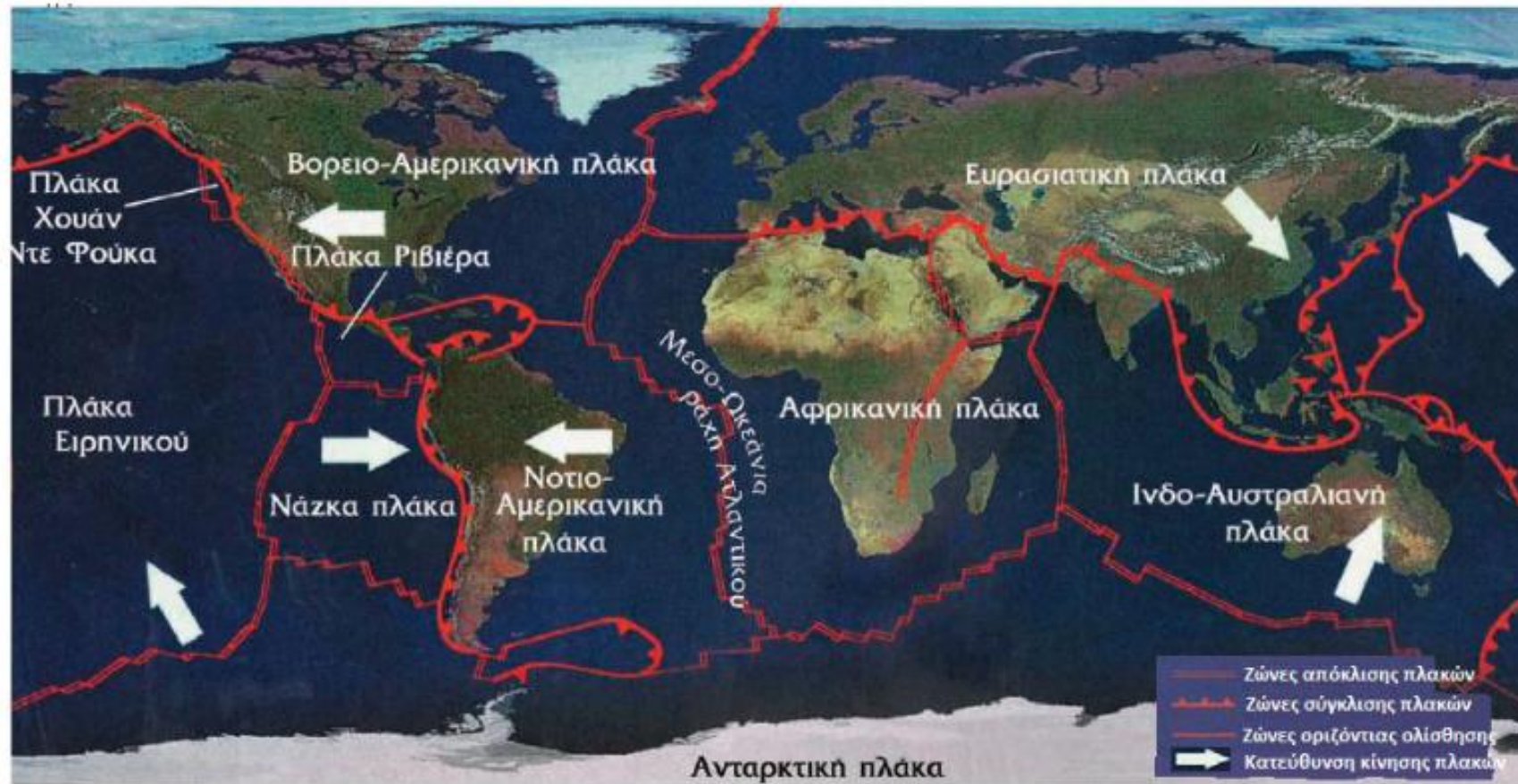
Παγκόσμια ροή θερμότητας



Λιθοσφαιρικές πλάκες



Λιθοσφαιρικές πλάκες



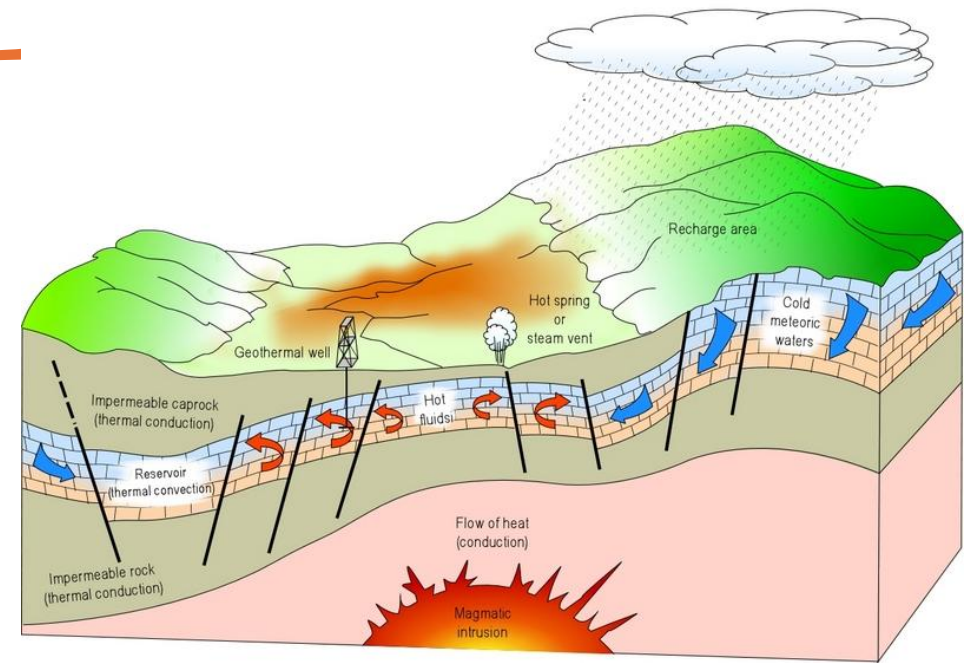
Ερωτήσεις

- Γιατί πιστεύετε ότι ορισμένες χώρες όπως η Ισλανδία έχουν μεγαλύτερο γεωθερμικό δυναμικό από άλλες;



Γεωθερμικά συστήματα

- Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία: την **εστία θερμότητας**, τον **ταμιευτήρα** και το **ρευστό**, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας.
- Από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση.



Εστία θερμότητας:

- μαγματική διείσδυση (με θερμοκρασίες 600- 1200°C), η οποία έφθασε σε σχετικά μικρά βάθη (3-10 km)
- κανονική θερμική ροή της γης, που δημιουργεί όλο και θερμότερους σχηματισμούς όσο πηγαίνουμε στο βάθος.

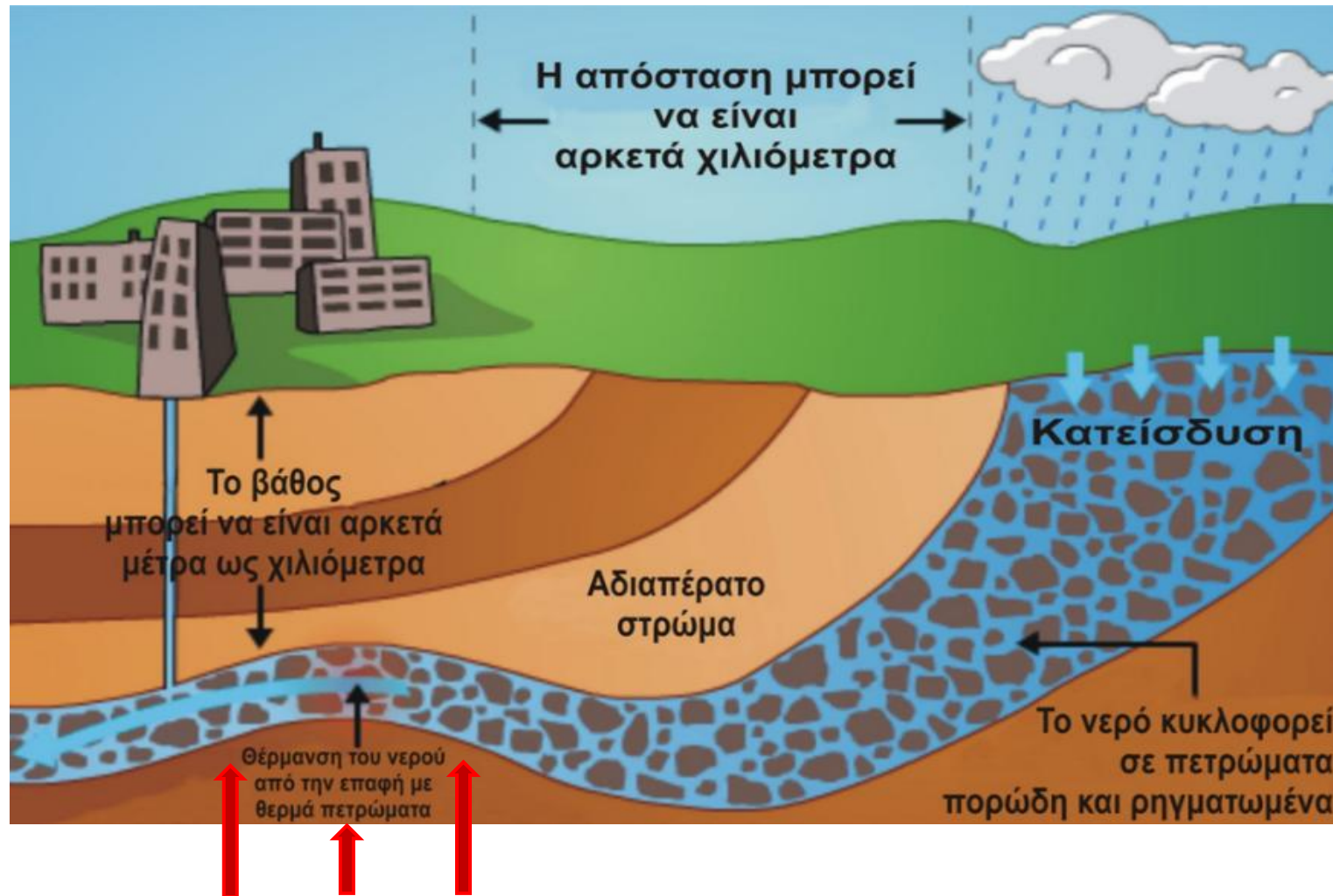
Ταμιευτήρας

Αποτελείται ουσιαστικά από ένα σύστημα θερμών διαπερατών πετρωμάτων, που επιτρέπουν την εύκολη κυκλοφορία ή τον εγκλωβισμό των κυκλοφορούντων ρευστών, τα οποία απάγουν θερμότητα.

Ρευστά (νερά)

- μετεωρικής ή επιφανειακής προέλευσης (και σπάνια μαγματικής)
- σε υγρή ή αέρια φάση, συχνά περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαλυμένων στερεών και αερίων.
- Η κατάσταση των γεωθερμικών ρευστών εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία τους.

Γεωθερμικά συστήματα



Γεωθερμικά συστήματα

- Τα γεωθερμικά συστήματα ή γεωθερμικά πεδία εντοπίζονται στις περιοχές με κανονική ή λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα, και κυρίως στις περιοχές γύρω από τα περιθώρια των τεκτονικών πλακών, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής.
- Υψηλές γεωθερμικές βαθμίδες, μέχρι $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, παρατηρούνται κατά μήκος των ωκεάνιων επεκτατικών κέντρων όπως η Μεσατλαντική Ράχη, όπου σχηματίζεται καινούριος ωκεάνιος φλοιός λόγω της απόκλισης (απομάκρυνσης) τεκτονικών πλακών και επακόλουθης εξόδου θερμού μαγματικού υλικού από τον μανδύα



Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Υδροθερμικά συστήματα

- Περαιοί σχηματισμοί με φυσική κυκλοφορία ρευστών

Αβαθής γεωθερμία

- Από 1 m βάθος έως 100 m, με ή χωρίς νερό

Θερμά ξηρά πετρώματα

- Μη περαιοί σχηματισμοί πετρωμάτων χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών. Τεχνική κυκλοφορία νερών με σύστημα δύο τουλάχιστον γεωτρήσεων (ESG)

Γεωπεπιεσμένα συστήματα

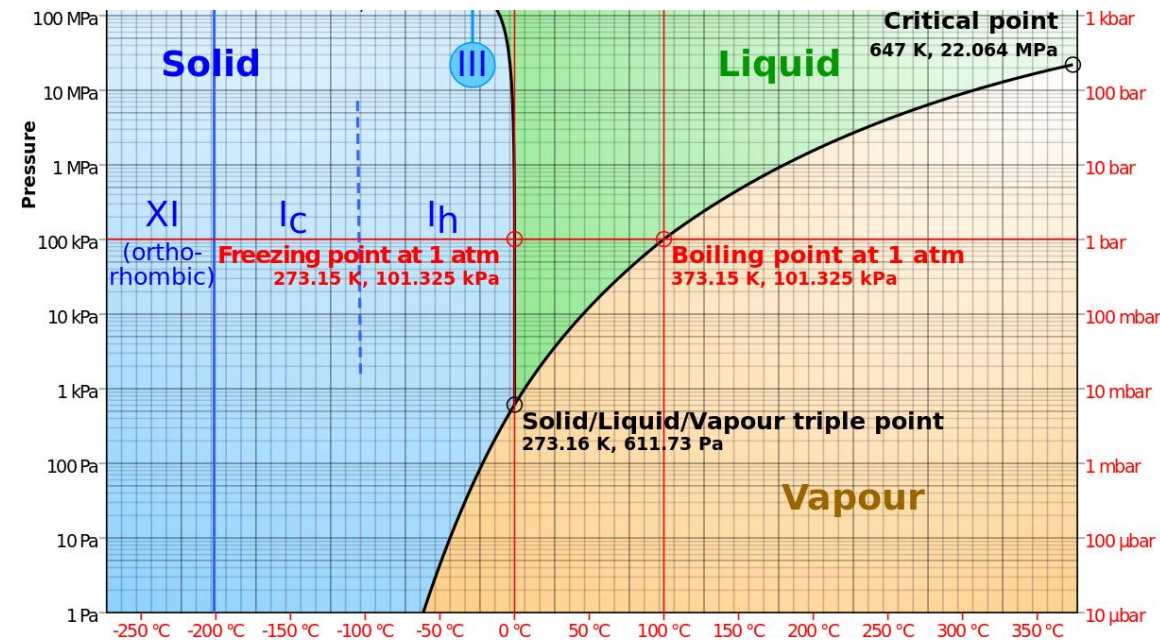
- Έγκλειστα υδροφόρα στρώματα υπό μεγάλη πίεση, παρουσία υδρογονανθράκων

Μάγμα

- Θερμοκρασία $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε μερικά χιλιόμετρα βάθος λόγω μαγματικών διεισδύσεων

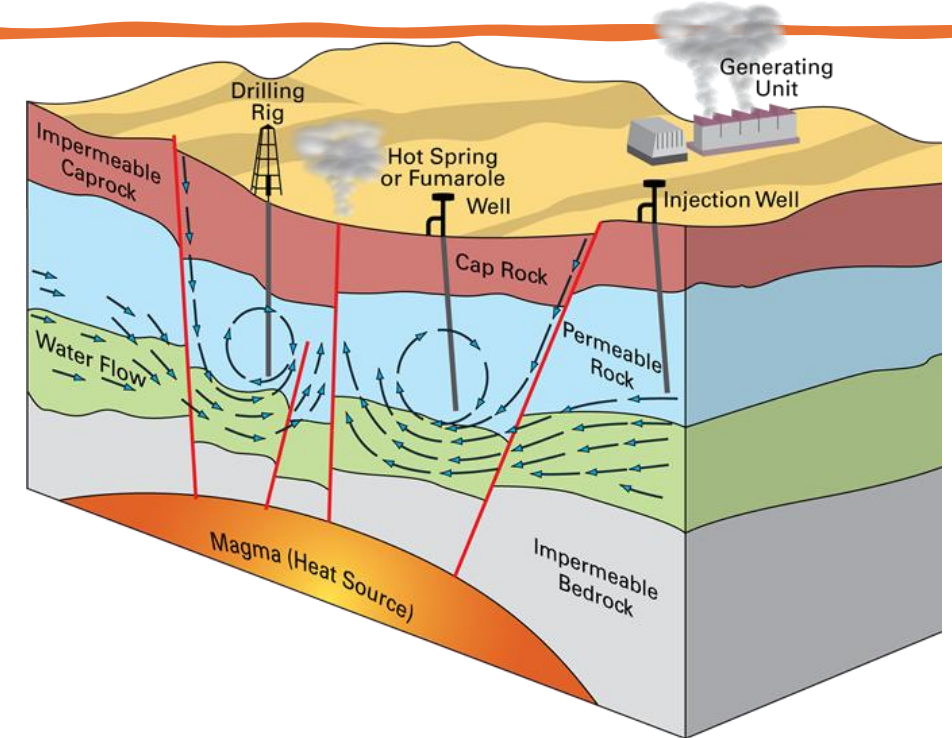
Υδροθερμικά συστήματα

- Τα **συστήματα νερού** είναι τα συνηθέστερα και, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν, μπορούν να παραγάγουν θερμό νερό (σε θερμοκρασίες $<100^{\circ}\text{C}$) ή μίγμα νερού-ατμού (διφασικά συστήματα) σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
- Η θερμική εστία των συστημάτων αυτών είναι συνήθως λιωμένο ή πρόσφατα στερεοποιημένο πέτρωμα που βρίσκεται σε βάθος από 3 μέχρι 10 km.
- Η μεταφορά της θερμότητας επιτελείται με **συναγωγή υπόγειων νερών**. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού και του ατμού που παράγονται είναι μετεωρικής ή επιφανειακής προέλευσης.



Υδροθερμικά συστήματα

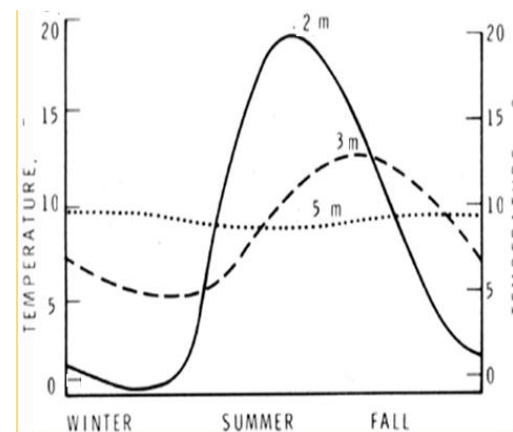
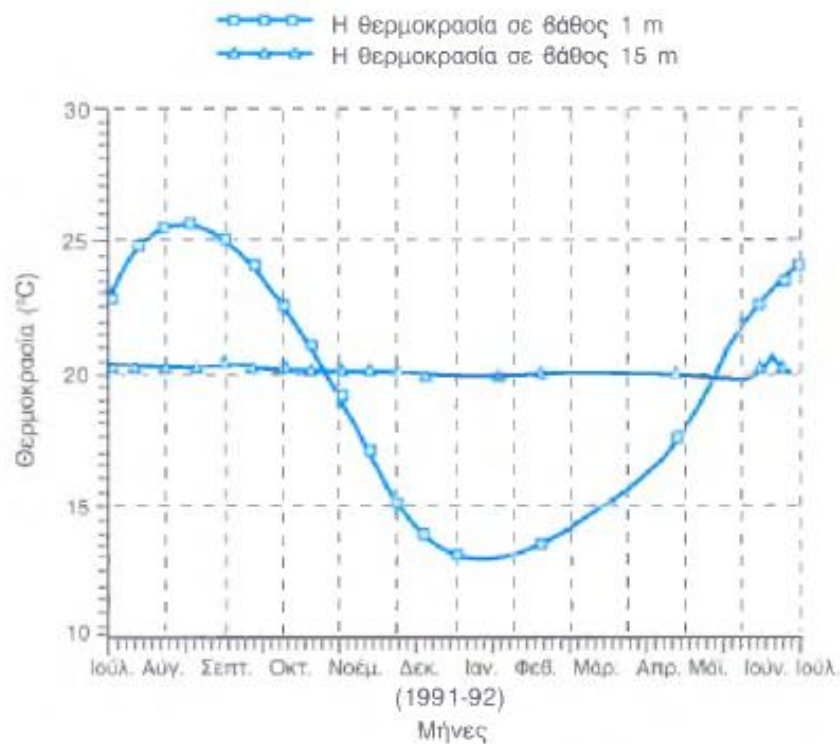
- Συστήματα που περιέχουν ατμό (~240 °C)
- Συστήματα που περιέχουν θερμό νερό
 - Υψηλής θερμοκρασίας (> 150 °C)
 - Μέσης θερμοκρασίας (90-150 °C)
 - Χαμηλής θερμοκρασίας (< 90 °C)



✓ Περίπου το 90% των υδροθερμικών συστημάτων που αξιοποιούνται είναι συστήματα μίγματος νερού-ατμού. Τα νερά αυτά περιέχουν μεγάλες ποσότητες διαλυμένων αλάτων (από 1 μέχρι και 350 g/L), τα οποία προκαλούν προβλήματα επικαθήσεων και διαβρώσεων στις εγκαταστάσεις και κάνουν **απαραίτητη την επανεισαγωγή** των νερών στον ταμειευτήρα.

Αβαθής γεωθερμία

- Με βάση πολυάριθμες μετρήσεις που έχουν γίνει στο υπέδαφος διαφόρων σημείων του κόσμου, έχει διαπιστωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, συνήθως μέχρι τα 15 m.

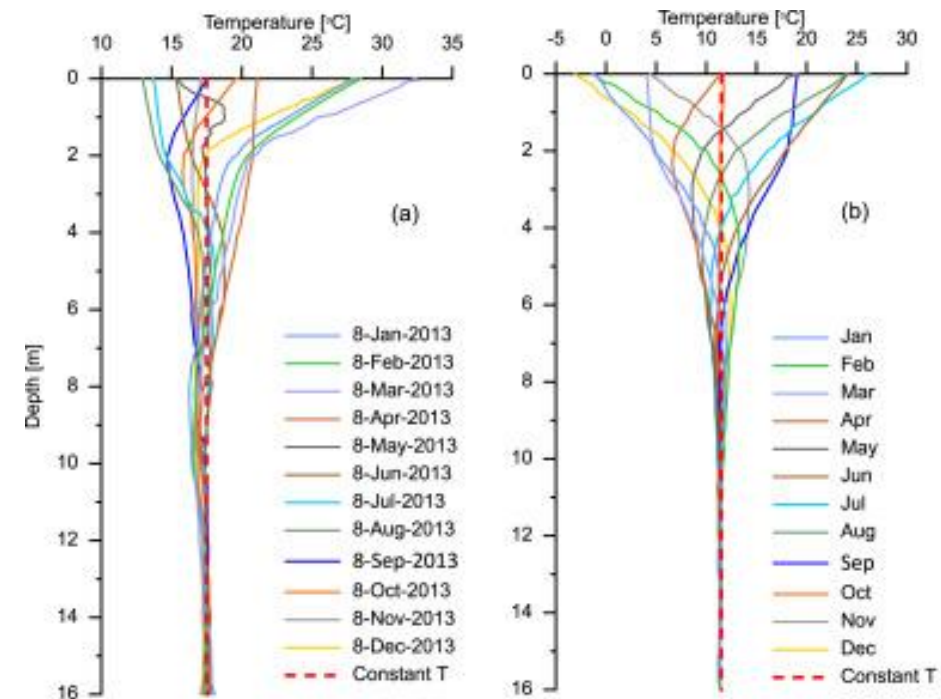


Αβαθής γεωθερμία

- Αβαθής ή Κανονική Γεωθερμία (Γεωθερμική Ενέργεια), ορίζεται ως η θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό, ή διαφορετικά «τα ρηχά γεωθερμικά ρευστά ή η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων που βρίσκονται σε πολύ μικρά βάθη.
- Στο άρθρο 2 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/28/EK η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται κανονικά σε ένα βάθος μέχρι 400 m (και στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις σε βάθη που δεν ξεπερνούν τα 100 m).
- Εναλλακτικά όπως στη χώρα μας, χαρακτηρίζεται ως η θερμότητα που παρουσιάζεται κάτω από κάθε υπέδαφος, η θερμότητα των λιμνών, ποταμών και θαλασσών, το ύψος της θερμοκρασίας των οποίων είναι μικρότερο από τους 30°C.

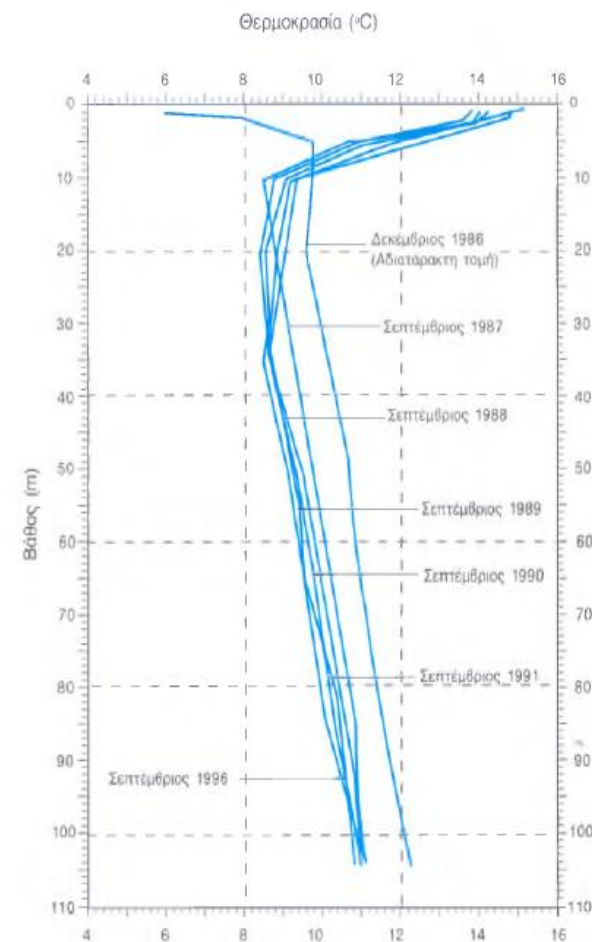
Αβαθής γεωθερμία

- Το προφίλ θερμοκρασίας εδάφους στη
(α) Μελβούρνη, β) Λονδίνο



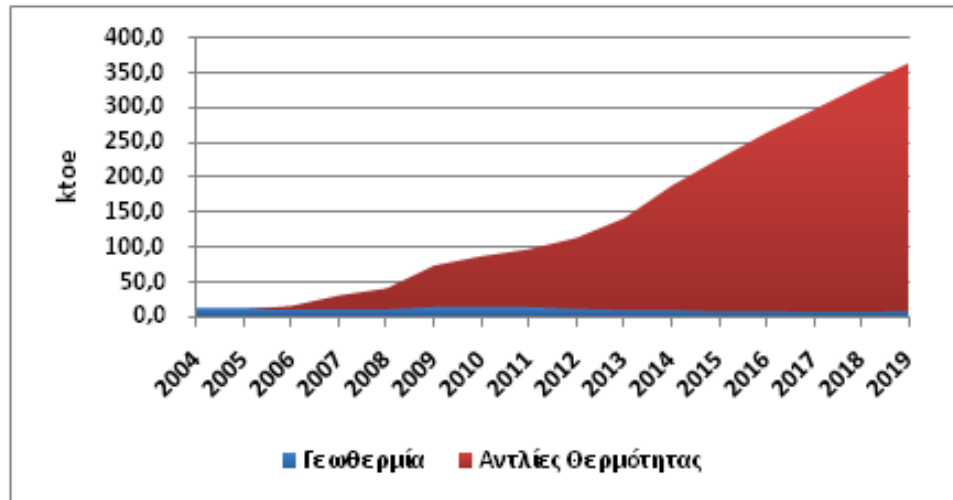
Αβαθής γεωθερμία

- Από εκεί και κάτω, η μεταβολή της θερμοκρασίας υπακούει μόνο στους κανόνες της γεωθερμικής βαθμίδας, δηλαδή αυξάνεται σταθερά με το βάθος και με μέσο ρυθμό της τάξης του $1^{\circ}\text{C}/30\text{ m}$, που είναι η μέση ή ομαλή γεωθερμική βαθμίδα.
- Στην Ελλάδα θεωρείται η θερμοκρασία $<30^{\circ}\text{C}$ ανεξάρτητα του βάθους.
- Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας αναπτύσσεται ραγδαία σε ορισμένες ανεπτυγμένες χώρες, με τη χρήση των αντλιών θερμότητας.



Εξέλιξη της γεωθερμίας στην Ελλάδα για τη περίοδο 2004-2019

- Εξέλιξη της εκμετάλλευσης της αβαθούς γεωθερμίας με τις αντλίες θερμότητας στην προσφερόμενη θερμική ενέργεια για διάφορες εφαρμογές με βάση τις GWh από 2006 μέχρι και 2019



Αβαθής γεωθερμία

- Τελευταία, έχει διαδοθεί σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες η τεχνική της εκμετάλλευσης της θερμότητας των πετρωμάτων σε πολύ μικρά βάθη (1-100 m), με τη βοήθεια είτε αβαθών γεωτρήσεων ή μικρών εκσκαφών στην «αυλή» του καταναλωτή και τη χρήση Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ).
- Η μέθοδος αυτή της αξιοποίησης της **αβαθούς γεωθερμίας** μπορεί να εφαρμοστεί οπουδήποτε υπάρχει ανάγκη τόσο για θέρμανση το χειμώνα, όσο και κλιματισμό το καλοκαίρι, επειδή πρακτικά ακόμα σε πολύ μικρό βάθος, η θερμοκρασία του εδάφους είναι σταθερή σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του έτους.
- Με την αβαθή γεωθερμία λαμβάνονται ή απορρίπτονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού στα πρώτα 100m από την επιφάνεια της γης.
- Αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή της γεωθερμικής ενέργειας

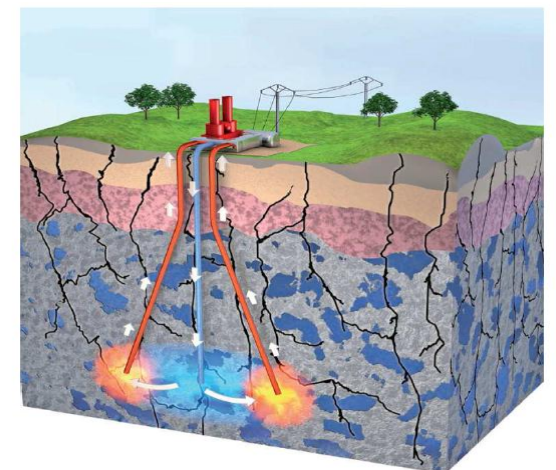
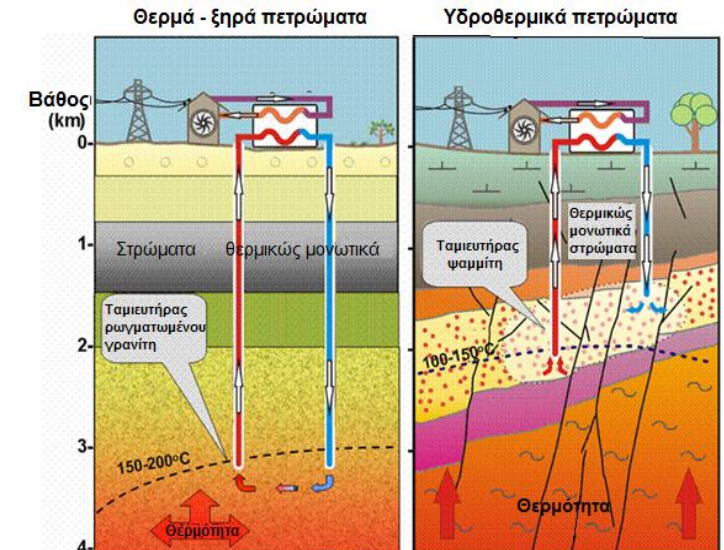
Θερμά ξηρά πετρώματα

- Σε πολλές περιοχές της γης δεν υπάρχει ικανοποιητική υδροπερατότητα των διαφόρων πετρωμάτων, αν και πολλές φορές εξασφαλίζεται μια σημαντική θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, λόγω αυξημένης θερμικής ροής.
- Τα πετρώματα αυτά είναι λοιπόν ξηρά και συγχρόνως θερμά.
- Πρόκειται για μια κατηγορία γεωθερμικής ενέργειας, που βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, είναι η **ενέργεια των θερμών ξηρών πετρωμάτων**.
- Το νερό εδώ οδηγείται τεχνητά από την επιφάνεια της γης μέσω γεώτρησης(ων) εισαγωγής μέχρι τα θερμά, ξηρά και χωρίς νερά πετρώματα, σε βάθος που μπορεί να υπερβαίνει τα 5000 m.
- Μετά τη θέρμανσή του εκεί, το νερό επιστρέφει στην επιφάνεια μέσω άλλης ή άλλων παραγωγικών γεωτρήσεων.
- Πολλές φορές δημιουργείται τεχνικά και ταμιευτήρας (με υδραυλική θραύση)

Θερμά ξηρά πετρώματα

Υψηλής θερμοκρασίας (> 250 °C έως 3 km)

Μέσης/ χαμηλής θερμοκρασίας (<150 °C έως 3 km)



Γεωπεπιεσμένα συστήματα

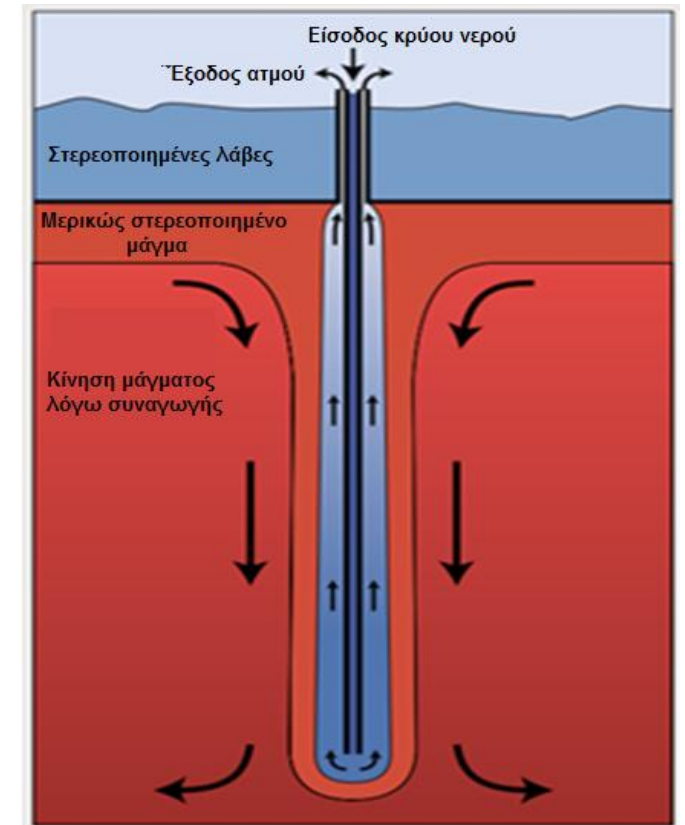
- Με τον όρο *γεωπεπιεσμένα ρευστά* εννοούνται τα γεωθερμικά ρευστά του υπεδάφους που βρίσκονται εγκλωβισμένα υπό μεγάλη πίεση (550-1350 bar) μέσα σε παλαιότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, πάντα μαζί με μεθάνιο.
- Τα ρευστά αυτά έχουν υψηλή αλατότητα και θερμοκρασίες στην περιοχή των 50-250°C.
- Οι περατοί σχηματισμοί με τέτοια ρευστά είναι συνήθως ιζηματογενείς και πτυχωμένοι, με τα ρευστά να καταλαμβάνουν τους πόρους των πετρωμάτων. Τα ρευστά εκεί βρίσκονται υπό πίεση που υπερβαίνει την υδροστατική.
- Τέτοιοι ταμιευτήρες απομονώνονται στο βάθος από υπερκείμενους μη περατούς σχηματισμούς, που είναι συνήθως αργιλικά ιζήματα.
- Τα περισσότερα δεδομένα για τα γεωπεπιεσμένα συστήματα έχουν προέλθει από γεωτρήσεις πετρελαίου.
- Γεωπεπιεσμένα πεδία υπάρχουν σε διάφορες περιοχές του κόσμου.
- Οι γεωθερμικού ενδιαφέροντος ταμιευτήρες αυτού του τύπου βρίσκονται συνήθως σε μεγάλα βάθη (3-7 km).
- Μία μεγάλη περιοχή με γεωπεπιεσμένα ρευστά βρίσκεται στον Κόλπο του Μεξικού, όπου η αποθηκευμένη ενέργεια εκτιμάται σε $1,7 \times 10^{23}$ J.

Συστήματα μάγματος

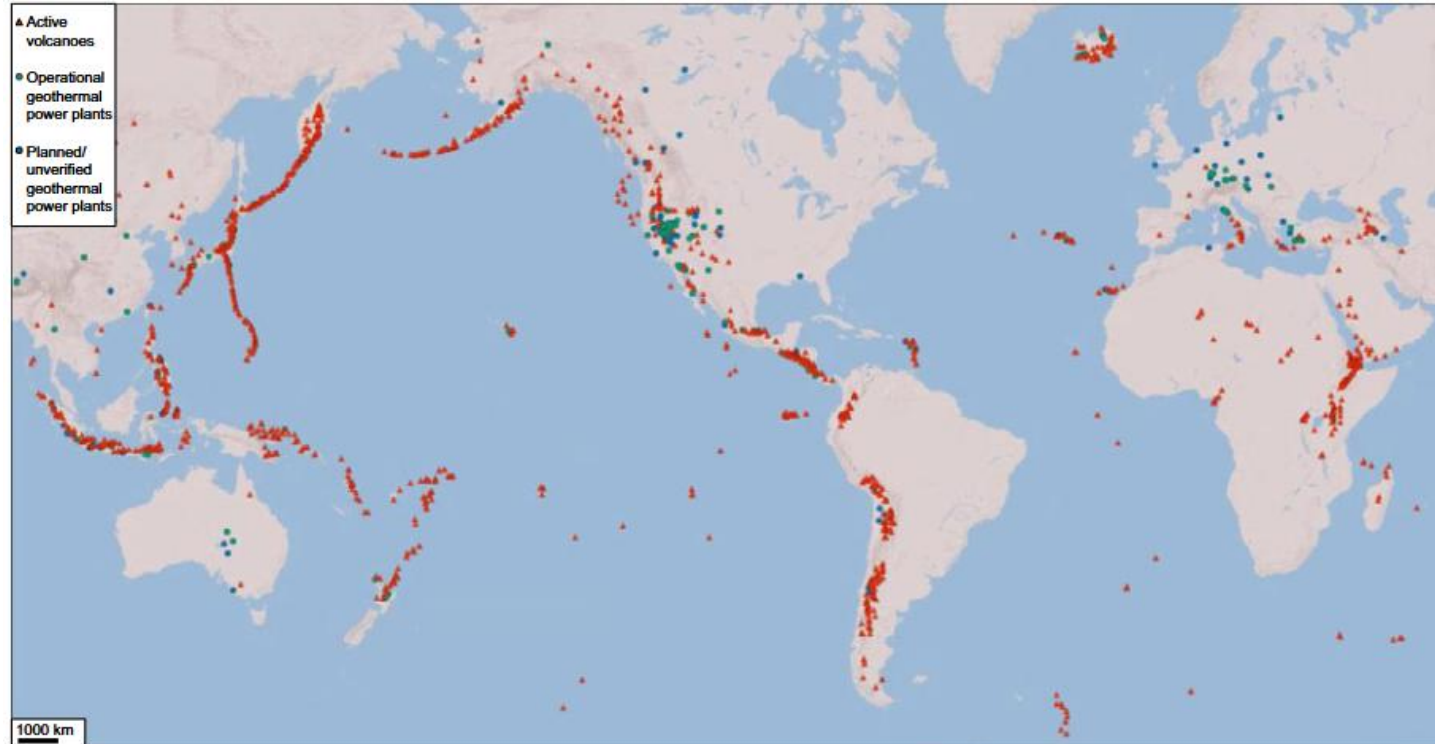
- Σε ηφαιστειακές περιοχές όπου διεισδύει μάγμα μέσα στον φλοιό σε θερμοκρασίες έως $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ η ροή θερμότητας μπορεί να ξεπερνά τα $30\,000\text{ mW/m}^2$ (1000 φορές υψηλότερη από την μέση θερμική ροή)
- Λαμβάνοντας υπόψη την θερμοχωρητικότητα του μάγματος μπορούμε να υπολογίσουμε ότι από 1 km^3 μάγματος θα μπορούσε να λειτουργεί μία εγκατάσταση δυναμικότητας 1 GW για 30 χρόνια.
- Οι εμφανίσεις μάγματος στο φλοιό της γης μπορεί να έχουν όγκο εκατοντάδων ή χιλιάδων κυβικών χιλιομέτρων.

Συστήματα μάγματος

- Οι διεισδύσεις μάγματος αντιπροσωπεύουν τοπικές περιοχές με τεράστια συγκεντρωμένη θερμική ενέργεια με τη μορφή λιωμένου ή σχεδόν λιωμένου μάγματος, σε θερμοκρασίες στην περιοχή των 650-1200°C.
- Το μάγμα είναι βασικά η πρωταρχική πηγή θερμότητας όλων των υδροθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας.
- Για να ταξινομηθεί μια περιοχή μάγματος ως γεωθερμικός πόρος, θα πρέπει να βρίσκεται σε προσβάσιμα βάθη, δηλαδή σε βάθη μικρότερα από 10 km.
- Συνήθως το μάγμα βρίσκεται σε βάθη της τάξης των 5 km. Σε σπάνιες περιπτώσεις, διεισδύσεις μάγματος βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια, κάτω ή γύρω από ενεργά ηφαίστεια.
- Θεωρητικά, η αξιοποίηση της ενέργειας από μάγματα φαίνεται απλή. Κατασκευάζεται μια ειδική γεώτρηση μέχρι τη διείσδυση του μάγματος, μέσα στην οποία κυκλοφορεί ένα θερμαντικό μέσο (πιθανόν νερό). Το μέσο αυτό θερμαίνεται στον πυθμένα της γεώτρησης και ανέρχεται λόγω συναγωγής στην επιφάνεια



Συστήματα μάγματος



Ερωτήσεις

- Ποιος από αυτούς τους τύπους θα μπορούσε να επιτρέψει τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας οπουδήποτε στον κόσμο;

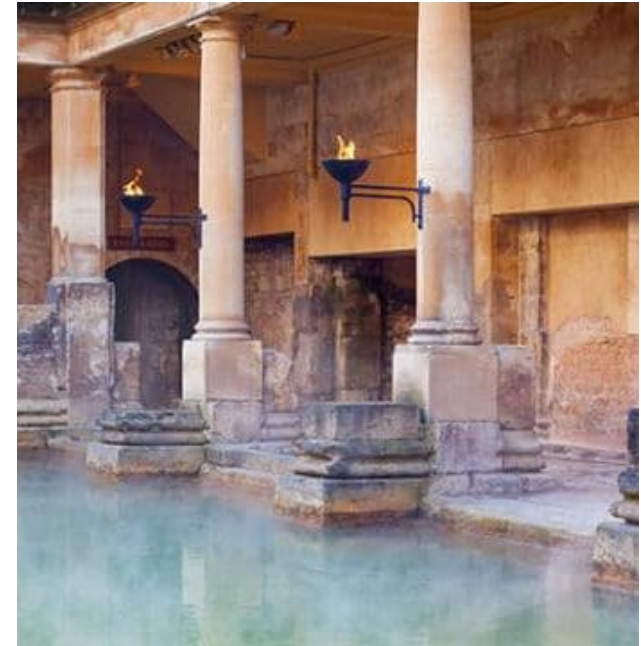


Ιστορία και χρήση της γεωθερμικής ενέργειας

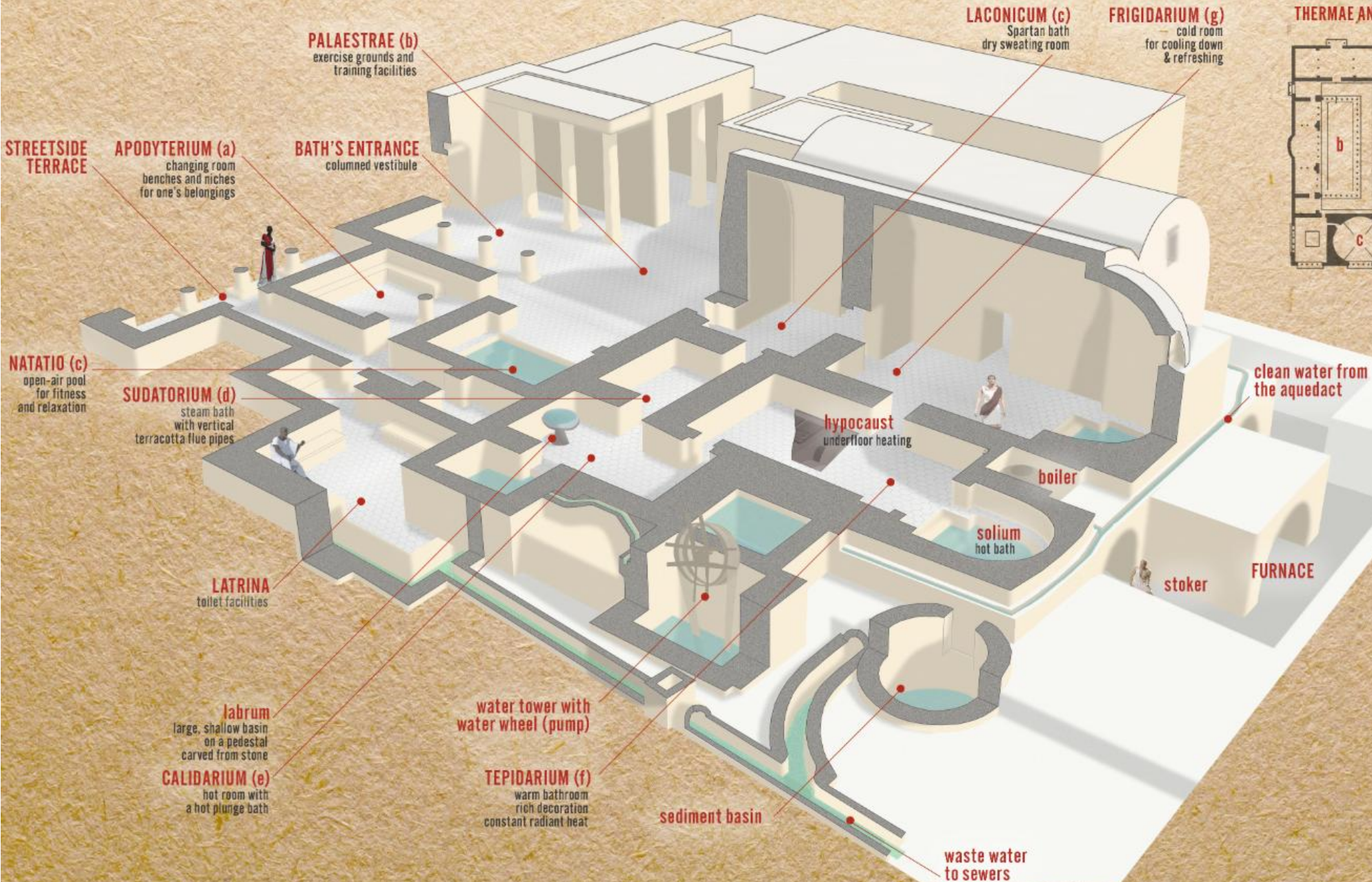
Πρώιμες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

Ρωμαϊκά λουτρά και αρχαίοι πολιτισμοί

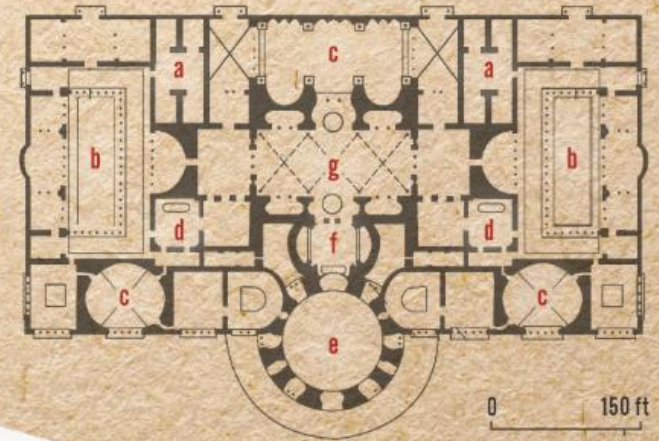
- Οι αρχαίοι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν γεωθερμικές θερμές πηγές για δημόσια λουτρά και θέρμανση.
- Στην Κίνα, στην Ιαπωνία και φυλές των ιθαγενών Αμερικανών χρησιμοποιούσαν επίσης θερμές πηγές για μπάνιο, μαγείρεμα και θεραπευτικές τελετουργίες.



THE BATHS OF THE ROMAN EMPIRE



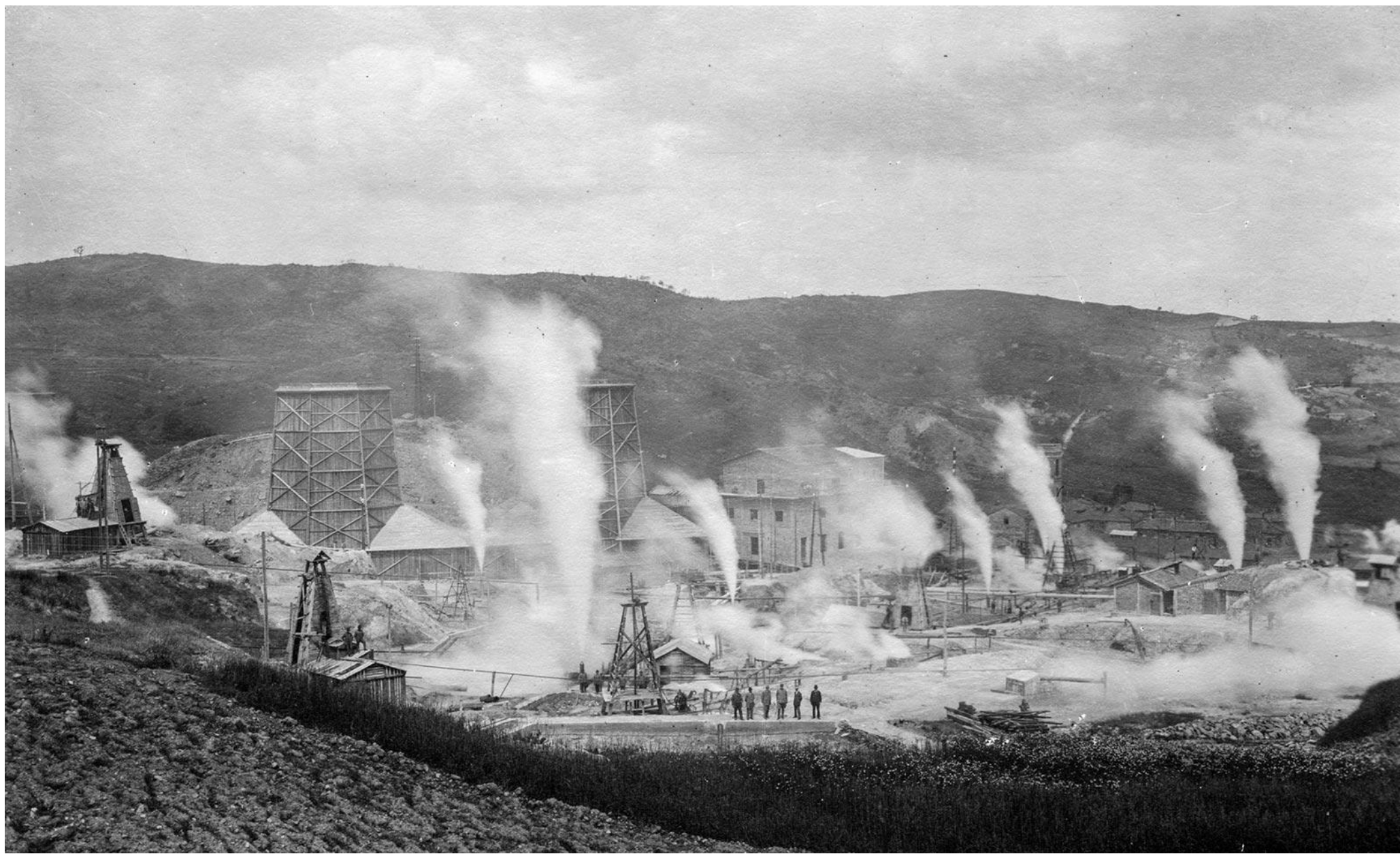
THERMAE ANTONINIANAE (Baths of Caracalla), Rome, 216 - 537 CE



Ορόσημα στην ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας









Ερωτήσεις

- Ποια χώρα πιστεύετε ότι είναι η κορυφαία παγκοσμίως στην παραγωγή γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας;



Μελέτη περίπτωσης - Ισλανδία

Μελέτη περίπτωσης - Ισλανδία

- Φωτογραφία του *Reykjavik* το 1932, όταν οι κατοικίες θερμαίνονταν με συμβατικά καύσιμα.
- Σήμερα, το *Reykjavik* είναι από η πιο καθαρή πόλη στον κόσμο, αφού το σύνολο των κτιρίων θερμαίνεται από τα γεωθερμικά νερά.



Ισλανδία (Iceland)

Iceland and geothermal energy

- Geothermal power facilities currently generate 25% of the country's total electricity production. 799 Mwe



District Heating System

- **Snow melting in sidewalks**



Iceland's Renewable Energy Mix

- Iceland is unique for achieving nearly **100% renewable energy** for electricity and heating.
- About **25% of electricity** comes from geothermal power plants.
- The rest is mostly from hydropower.
- For heating, **over 90% of homes** use geothermal energy via district heating systems

Geothermal Electricity Generation

- **Multiple geothermal power plants:** Hellisheiði, Nesjavellir, Krafla, etc.
- Plants use a mix of **flash steam and binary cycle technologies** to harness high and moderate-temperature resources.
- Total installed geothermal electricity capacity exceeds **700 MW**.
- Geothermal provides **baseload power**—stable, reliable, and independent of weather.

District Heating System

- Geothermal hot water (~80–100°C) is piped from production wells to urban centers.
- Provides **space heating, hot water, and snow melting** in sidewalks.
- Highly efficient and affordable: District heating costs a fraction of conventional heating.
- Publicly and privately managed utilities maintain extensive pipeline networks serving Reykjavík and other cities.

Environmental and Economic Benefits

- Dramatic reduction in fossil fuel use — virtually no coal, oil, or gas burned for heating or power.
- Lower carbon footprint per capita than most developed nations.
- Geothermal industry supports local economy and export of expertise.
- Innovation hub for geothermal technologies and sustainable energy policy.

Μελέτη περίπτωσης – Κένυα

- Olkaria Geothermal Plant



Geothermal Kenya

- Installed capacity over 700 MW
- Supplies about 50% of Kenya's electricity.

Olkaria Geothermal Power Plant Overview

- Located in the **East African Rift Valley**, a prime geothermal hotspot.
- One of the largest geothermal complexes in Africa.
- Installed capacity: Over **700 MW** (multiple phases: Olkaria I, II, III, IV, and V).
- Uses **flash steam technology** to harness high-temperature steam.
- Supplies about **50% of Kenya's electricity**.
- Operated mainly by **Kenya Electricity Generating Company (KenGen)**.

Geothermal Development in Kenya

- Geothermal is critical for Kenya's energy diversification.
- Reduces dependence on hydropower and expensive diesel generators.
- Kenya aims to expand geothermal capacity to over **1,600 MW** by 2030.
- Strong government support, donor funding, and international partnerships.

Socio-Economic Benefits

- **Reliable and affordable electricity** improves quality of life and supports industrial growth.
- Job creation during construction and operation phases (thousands of jobs).
- Encourages rural electrification and urban expansion.
- **Local community development programs** funded by revenues:
 - Education and health initiatives
 - Infrastructure improvements (roads, schools, clinics)
- Positive impact on **energy security** and **economic growth** in East Africa.

Environmental and Social Considerations

- Careful management to mitigate impacts on local wildlife and natural hot springs.
- Efforts to involve local communities in decision-making.
- Re-injection of geothermal fluids reduces environmental footprint.

Ερωτήσεις

Πώς διαφέρει η ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας στην Κένυα από την Ισλανδία;»

Οι θερμότερες, λιγότερο ανεπτυγμένες υποδομές της Κένυας, η μεγαλύτερη εξάρτηση από τη γεωθερμική ενέργεια για πρόσβαση στον ηλεκτρισμό, οι διαφορετικές κοινωνικές προκλήσεις.

Ποιοι παράγοντες έχουν επιτρέψει στην Ισλανδία να επιτύχει στην αξιοποίηση της γεωθερμίας που μπορεί να είναι δύσκολο σε άλλες χώρες;

Άφθονη ηφαιστειακή δραστηριότητα, μικρός πληθυσμός, κρατική υποστήριξη, αποδοχή από το κοινό

Τεχνολογίες και συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Γεωθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

- Flash Steam
- Dry Steam
- Binary Cycle

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας