



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

# Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

## Ενότητα 4: Γεωθερμική Ενέργεια

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

# Εισαγωγή στη Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης.  
Πηγάζει από:

- ▶ Την πρωτογενή θερμότητα (διαδικασία σχηματισμού του πλανήτη).
- ▶ Την ραδιενεργό διάσπαση ισοτόπων όπως  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ .

Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται προς την επιφάνεια μέσω αγωγής και συναγωγής και μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού ή άμεση θερμική χρήση.

Η γεωθερμία είναι σταθερή, ανανεώσιμη πηγή βάσης (baseload RES), σε αντίθεση με τον στοχαστικό χαρακτήρα των Φ/Β και αιολικών.



# Θερμική Δομή της Γης

- ▶ Θερμοκρασία πυρήνα:  $\sim 5\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- ▶ Θερμοβαθμίδα (Geothermal gradient): μέση τιμή  $\approx 25\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ .
- ▶ Σε ηφαιστειακές ζώνες φτάνει  $>100\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ .

Η θερμότητα διαρρέει την επιφάνεια με ροή θερμότητας  $q = -k \frac{dT}{dz}$ , όπου

$k$ = θερμική αγωγιμότητα ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ),

$\frac{dT}{dz}$  =θερμοκρασιακή κλίση.

Η μέση ροή θερμότητας της Γης είναι  $\sim 0.063\text{ W/m}^2$ , δηλ. συνολικά  $>42\text{ TW}$  παγκοσμίως.

# Τύποι Γεωθερμικών Πηγών

- ▶ Υψηλής ενθαλπίας ( $>150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): ηλεκτροπαραγωγή, π.χ. Ισλανδία, Μήλος.
- ▶ Μέσης ενθαλπίας ( $90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): τηλεθέρμανση, βιομηχανικές χρήσεις.
- ▶ Χαμηλής ενθαλπίας ( $25\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): θέρμανση/ψύξη κτιρίων, θερμοκήπια, ιαματικά λουτρά.
- ▶ Πολύ χαμηλής ενθαλπίας ( $<25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): εκμεταλλεύσιμη με αντλίες θερμότητας εδάφους (GSHP).

# Μορφές Γεωθερμικών Συστημάτων

- ▶ **Υδροθερμικά:** ρευστά νερού/ατμού σε πορώδη πετρώματα (reservoirs).
- ▶ **Γεωπιεζοθερμικά (geopressured):** θερμά ρευστά με υψηλή πίεση και μεθάνιο.
- ▶ **Ξηρά θερμά πετρώματα (Hot Dry Rock):** απαιτούν τεχνητή κυκλοφορία ρευστού.
- ▶ **Enhanced Geothermal Systems (EGS):** τεχνητή ρωγμάτωση πετρωμάτων σε βάθη 3-6 km με έγχυση νερού.

# Ισοζύγιο Ενέργειας Γεωθερμικού Πεδίου

Η διαθέσιμη ισχύς εξαρτάται από:

$$Q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out})$$

όπου

$\dot{m}$  :παροχή ρευστού (kg/s),

$c_p$  :θερμοχωρητικότητα (kJ/kg·K),

$T_{in} - T_{out}$  :διαφορά θερμοκρασίας.

Η σταθερότητα της θερμικής παραγωγής προϋποθέτει σωστό **energy balance** μεταξύ άντλησης και φυσικής αναπλήρωσης.

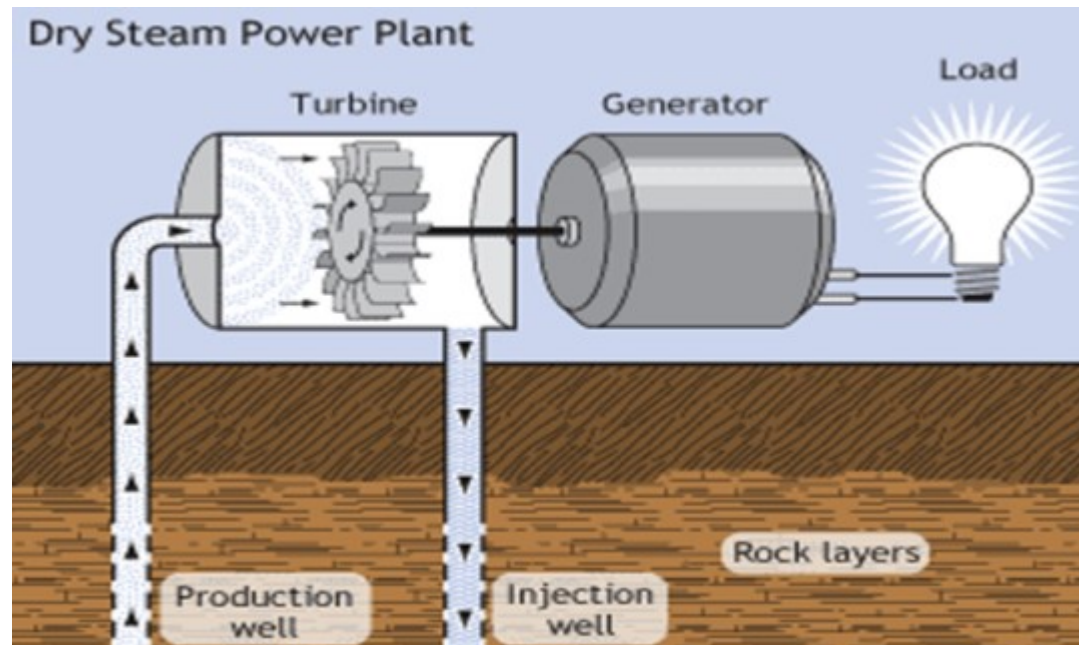
# Τεχνολογίες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

- ▶ **Dry Steam Plants:** αξιοποιούν ξηρό ατμό απευθείας (Larderello - Ιταλία).
- ▶ **Flash Steam Plants:** εκτόνωση υψηλής πίεσης ρευστού για παραγωγή ατμού.
- ▶ **Binary Cycle (ORC):** χρήση οργανικού μέσου (ισοπεντάνιο, R245fa) με χαμηλό σημείο βρασμού.

Απόδοση ηλεκτρικής μετατροπής ~10-17 %.

# Dry Steam Plants

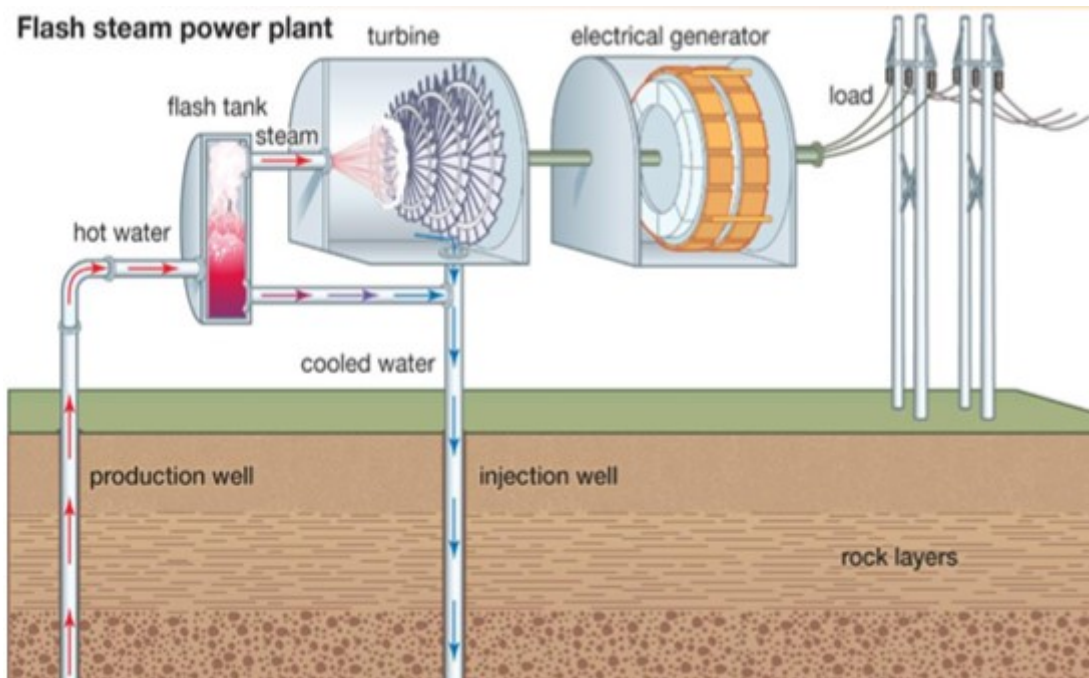
Ο υπέρθερμος ατμός οδηγείται απευθείας στο στρόβιλο, ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια.





# Flash Steam Plants

Το γεωθερμικό ρευστό είτε έρχεται ως διφασική ροή από τη γεώτρηση, είτε εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη από την πίεση που επικρατεί στην κεφαλή της γεώτρησης και μετατρέπεται σε διφασικό μείγμα. Το μείγμα αυτό διαχωρίζεται σε κατακόρυφο διαχωριστή και ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.



# Διάγραμμα Ενέργειας Κύκλου ORC



- ▶ Το ρευστό εξατμίζεται από τη γεωθερμική θερμότητα, κινεί τουρμπίνα και επανυγροποιείται. Εξίσωση καθαρής απόδοσης:

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

- ▶ Γεωθερμικό Ρευστό =) μετρίως θερμό νερό (<175 °C)
- ▶ Δευτερεύον ρευστό: 1. Νερό&Αμμωνία, 2. Ισοβουτάνιο 3. Ισοπεντάνιο κτλ

# Binary Cycle (ORC)

- ▶ Το νερό βαθιά στα έγκατα της γης θερμαίνεται από τη φυσική θερμότητα της γης. Το θερμό νερό ανεβαίνει στην επιφάνεια και μεταφέρεται στα εργοστάσια μέσω σωληνώσεων.
- ▶ Στο δυαδικό σύστημα το θερμό νερό δεν έρχεται σε επαφή με την τουρμπίνα, αλλά η θερμότητά του μεταφέρεται σε ένα δευτερεύον υγρό μέσω ενός εναλλάκτη.
- ▶ Επειδή το δευτερεύον υγρό έχει σημείο βρασμού πολύ χαμηλότερο από το θερμό νερό, το υγρό μετατρέπεται σε ατμό γρήγορα και κινείται προς τα πάνω περνώντας στην τουρμπίνα την οποία περιστρέφει με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- ▶ Μετά από αυτή τη διαδικασία το γεωθερμικό νερό έχει θερμοκρασία περίπου 21 οC χαμηλότερη, περνάει στο πηγάδι έγχυσης και στέλνεται-αντλείται πίσω στον υδροφόρο ορίζοντα. Εκεί ζεσταίνεται ξανά από τα πετρώματα του υπεδάφους ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

# Binary Cycle (ORC)

- ▶ Όταν ο ατμός αφήσει την τουρμπίνα μετακινείται στο συμπυκνωτή.
- ▶ Παράλληλα εισάγεται στο συμπυκνωτή κρύο νερό από τους πύργους ψύξης, το οποίο ψυχραίνει τον ατμό επιτρέποντάς του να συμπυκνωθεί ξανά σε υγρό που θα συλλεχθεί στη βάση της δεξαμενής του συμπυκνωτή.
- ▶ Το κρύο νερό, από τους πύργους ψύξης, εισάγεται στο συμπυκνωτή με περίπου 19 °C, αλλά αφού ψύξει το δευτερεύον υγρό, αφήνει το συμπυκνωτή με θερμοκρασία περίπου 30 °C.
- ▶ Το δευτερεύον υγρό τώρα ρέει κάτω από το συμπυκνωτή στην αντλία όπου επανα-πιέζεται και εισάγεται πίσω στον εναλλάκτη για να επαναληφθεί η διαδικασία.
- ▶ Προκειμένου να ξαναχρησιμοποιηθεί ξανά το νερό, επιστρέφει στον πύργο ψύξης όπου ψύχεται πάλι στους 19 °C.

# Γεωθερμίας Χαμηλής Ενθαλπίας (άμεση)

- ▶ Θέρμανση χώρων / τηλεθέρμανση.
- ▶ Θερμοκήπια (π.χ. Ν. Έβρος, Τύρναβος).
- ▶ Ιαματικά λουτρά / spa.
- ▶ Αφαλάτωση / ξήρανση τροφίμων.
- ▶ Βιομηχανικές διεργασίες (υφάσματα, ξύλο).
- ▶ Ιχθυοκαλλιέργειες.
- ▶ Θερμαινόμενες πισίνες
- ▶ Ιατρικές εφαρμογές

Συμβάλλει στην αγροτουριστική και οικοτουριστική ανάπτυξη και προσφέρει το μέσον για εναλλακτικές & σύγχρονες μορφές τουρισμού (κολυμβητήρια, ιαματικός τουρισμός, spa, κλπ)

Εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη το 2005 13.629 MWth και στην Ελλάδα 74,8 MWth.

Παγκοσμίως: >110 GWth εγκατεστημένη θερμική ισχύς (Lund et al., 2023).

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας / Άμεση Θέρμανση Χώρων

- ▶ Αποτελεί την παλιότερη εφαρμογή της γεωθερμίας και την περισσότερο διαδεδομένη στην Ευρώπη. Περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακές χρήσεις.
- ▶ Το γεωθερμικό ρευστό από μια ή δύο γεωτρήσεις αποδίδει θερμότητα στο σύστημα θέρμανσης του ενεργειακού χρήστη, είτε άμεσα, είτε μέσω εναλλάκτη θερμότητας.
- ▶ Χρήση γεωθερμικών ρευστών με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 45 οC.
- ▶ Κόστος Κεφαλαίου 200-1400 ευρώ ανά εγκατεστημένο kWth.
- ▶ Ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας 2-3% του κόστους κεφαλαίου
- ▶ Κόστος παραγόμενης ενέργειας 0,005-0,035 ευρώ/kWhth συμπεριλαμβανομένου των αποσβέσεων των κεφαλαίων και του κόστους χρήματος.

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας / Άμεση Θέρμανση Χώρων

- ▶ Σύμφωνα με τα στοιχεία του 2010, το μερίδιο της θέρμανσης χώρων στη συνολική χρήση άμεσης γεωθερμικής ενέργειας ανερχόταν στο 14,4% (από το οποίο το 85% αφορούσε τηλεθέρμανση).
- ▶ Οι κυριότερες χώρες που χρησιμοποιούν τη γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας για άμεση θέρμανση χώρων είναι οι: Ισλανδία, Κίνα, Τουρκία, Γαλλία.
- ▶ Η πρώτη τεκμηριωμένη χρήση για θέρμανση χώρων αναφέρεται το 14ο αιώνα, όπου κατασκευάστηκε ένα μικρό σύστημα τηλεθέρμανσης στο Chaudes-Aigues Cantal στη Γαλλία.
- ▶ Γενικά, απαιτούνται θερμοκρασίες νερού μεγαλύτερες από 40° C, ενώ με τη χρήση ΓΑΘ μπορούν να αξιοποιηθούν νερά (ή το έδαφος) με θερμοκρασία μικρότερη από 10° C.

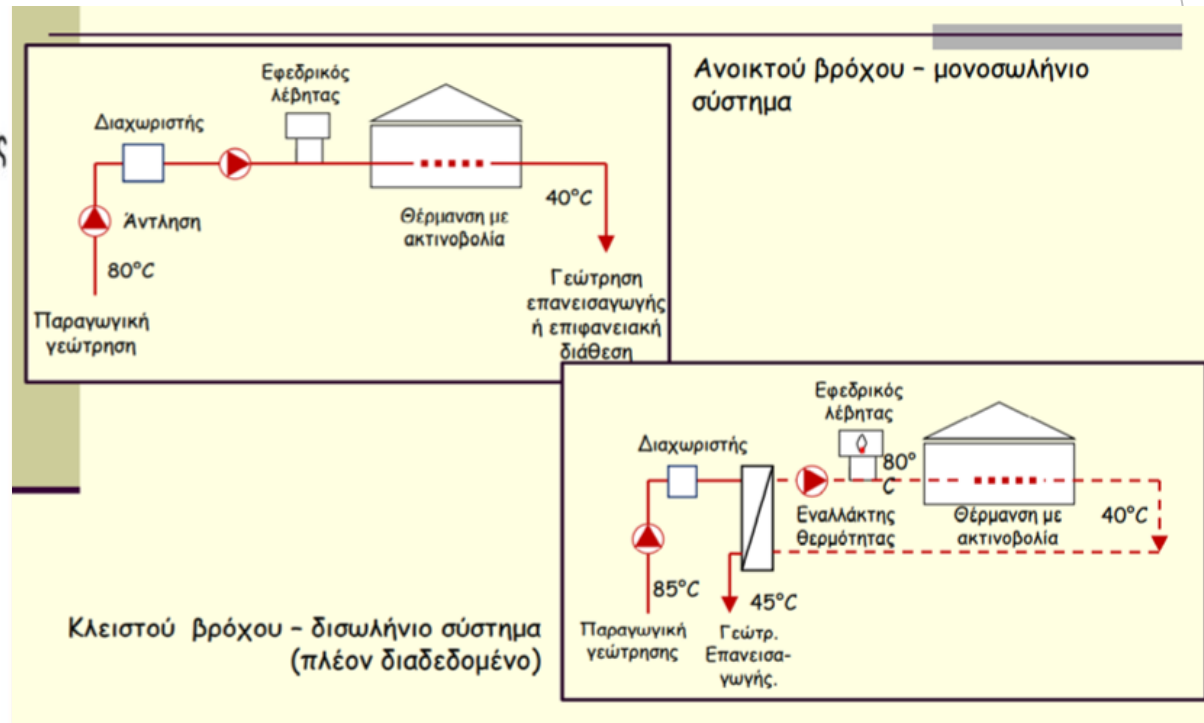
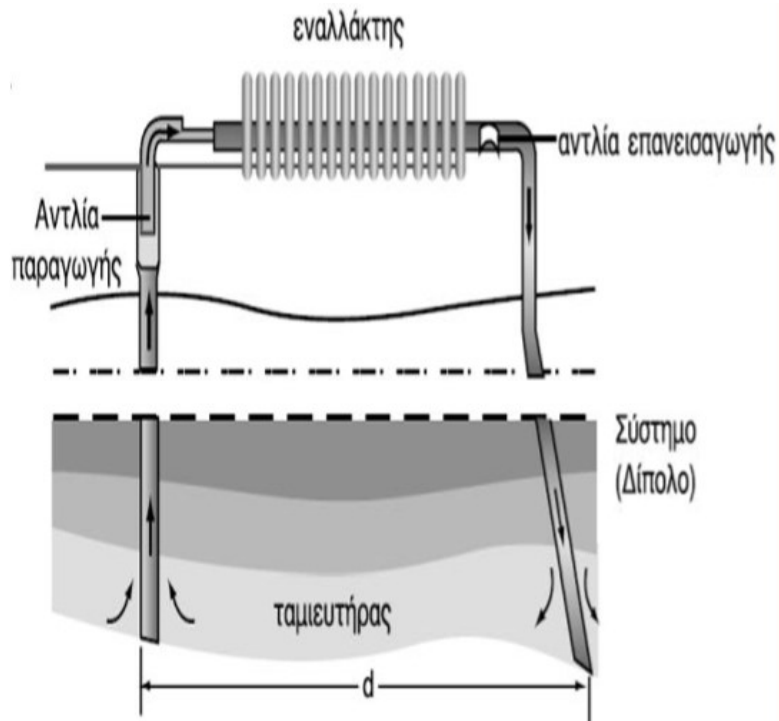
# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας / Άμεση Θέρμανση Χώρων

Θέρμανση χώρων(και ζεστό νερό) μπορεί να επιτευχθεί με:

- ▶ Ροή γεωθερμικού νερού απευθείας ή με τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας
- ▶ Χρήση υπόγειων εναλλακτών θερμότητας
- ▶ Χρήση συστημάτων Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού)



# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας / Άμεση Θέρμανση Χώρων



Σχήματα ανάκτησης της θερμότητας από ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα: (α) Σύστημα μονής γεώτρησης και διάθεση υγρού (ανοικτού βρόχου) (β) Σύστημα «δίπολο» (κλειστού βρόχου)

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας / Άμεση Ψύξη Χώρων

Ψύξη χώρων μπορεί να επιτευχθεί με:

- ▶ Με τη μέθοδο της απορρόφησης. Απαιτούνται θερμοκρασίες ρευστών > 100-110° C (Ελάχιστες εφαρμογές μέχρι τώρα)
- ▶ Χρήση συστημάτων Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (Η αντλία θα λειτουργήσει αντίστροφα αυτή τη φορά)

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας/ Θέρμανση Θερμοκηπίων

## Τρόποι Θέρμανσης

- ▶ Με εναέριους, επιδαπέδιους ή σωλήνες τοποθετημένους μέσα στο χώμα (σε βάθος 5-20 cm)
- ▶ Με εναλλάκτη αέρα-γεωθερμικού νερού (αερόθερμο)
- ▶ Με τοποθέτηση θερμαντικών σωμάτων στα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου
- ▶ Με ψεκασμό της οροφής του θερμοκηπίου με γεωθερμικό υγρό ή διέλευση υγρού στα διπλά τοιχώματα της οροφής (κυρίως για προστασία από τους πάγους)
- ▶ Με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας/ Θέρμανση Θερμοκηπίων



Άμεση θέρμανση  
με σωλήνες PP  
Λέσβος



Άμεση θέρμανση  
με σακούλες PE  
Μήλος

## Οφέλη

- ▶ Μείωση κόστους παραγωγής
- ▶ Μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα
- ▶ Μείωση της αρνητικής επίδρασης της καλλιέργειας στις κλιματικές αλλαγές
- ▶ Παροχή επίσης καλής ποιότητας νερού για άρδευση του θερμοκηπίου και όχι εξάρτηση από εξωτερική πηγή

# Γεωθερμία Χαμηλής Ενθαλπίας/ Ιχθυοκαλλιέργειες

## Τρόποι Θέρμανσης

- ▶ Άμεσα με την απευθείας εισαγωγή του γεωθερμικού νερού στις δεξαμενές ή λιμνούλες ανάπτυξης
  - ▶ Έμμεσα ύστερα από τη θέρμανση του γλυκού ή του θαλασσινού νερο
- Προκειμένου επιτευχθεί άμεση θέρμανση δεν πρέπει να υπάρχουν τοξικές ουσίες στο νερό όπως υδρόθειο, βαρέα μέταλλα, αρσενικό κ.ο.κ.
  - Χρήση γεωθερμικών ρευστών με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20 οC.
  - Εγκατεστημένη ισχύς για υδατοκαλλιέργειες στην Ευρώπη το 2005 230 MWth.

# Τηλεθέρμανση με Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική τηλεθέρμανση χρησιμοποιεί ρευστά 60-120 °C για παροχή θερμότητας σε δίκτυα θέρμανσης πόλεων.

Τυπικό διάγραμμα ροής:

Παραγωγική γεώτρηση → Εναλλάκτης → Δίκτυο προσαγωγής/επιστροφής → Επανεισαγωγική γεώτρηση.

Παραδείγματα στην Ελλάδα:

- ▶ Αρίστηνο Έβρου: δίκτυο θερμοκηπίων.
- ▶ Ν. Κεσσάνη Ροδόπης: πιλοτική τηλεθέρμανση κατοικιών.
- ▶ Δήμος Δυτικής Λέσβου: υπό ανάπτυξη γεωθερμική τηλεθέρμανση.

# Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (Ground Source Heat Pumps - GSHP)

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία χαμηλής ενθαλπίας.

Αξιοποιεί τη σχεδόν σταθερή θερμοκρασία εδάφους ( $\approx 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  στην Ελλάδα) ως θερμική πηγή/αποθήκη.

Κύριες διατάξεις:

- ▶ **Κλειστό κύκλωμα οριζόντιο:** σωλήνες σε βάθος 1-2 m.
- ▶ **Κλειστό κύκλωμα κατακόρυφο:** γεωτρήσεις 50-150 m.
- ▶ **Ανοικτό κύκλωμα:** άντληση-επανεισαγωγή υπόγειου νερού.

# Θερμοδυναμικός Κύκλος Αντλίας Θερμότητας

Βασίζεται στον **αντίστροφο κύκλο Rankine**.

Στο καθεστώς θέρμανσης:

$$COP_{heating} = \frac{Q_H}{W_{comp}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

όπου

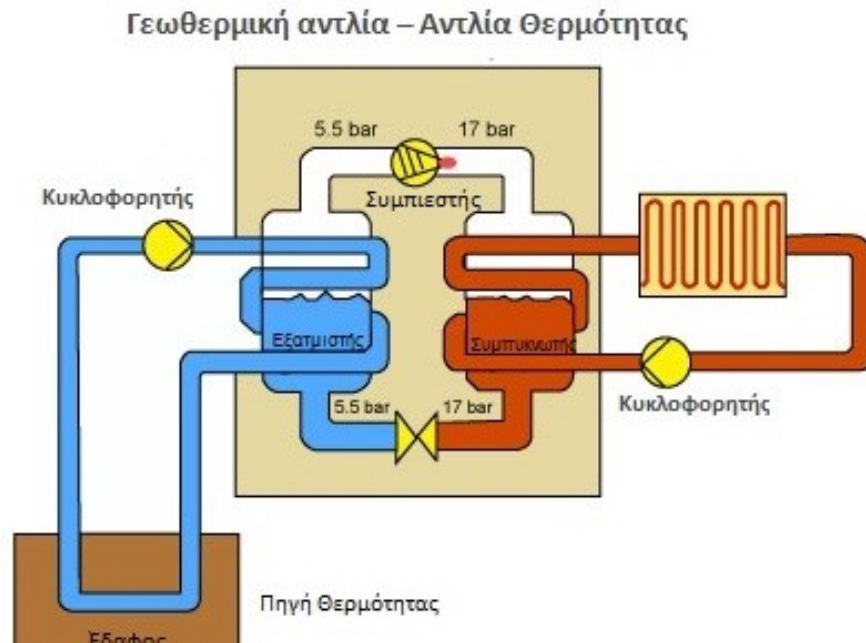
$T_H$  :θερμοκρασία συμπυκνωτή,  $T_L$  :θερμοκρασία εξατμιστή.

Όσο μικρότερη η θερμοκρασιακή διαφορά, τόσο υψηλότερος ο COP.

Στην ψύξη:  $COP_{cooling} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$ .



# Γεωθερμικός Εναλλάκτης: Ισοζύγιο Ενέργειας



Ο γεωθερμικός εναλλάκτης (γεωεναλλάκτης) είναι το **κύκλωμα σωληνώσεων** μέσα στο έδαφος, όπου κυκλοφορεί ρευστό (άλμη / νερό-γλυκόζη) και “ανταλλάσσει” θερμότητα με το έδαφος.

► Σε λειτουργία θέρμανσης κτιρίου:

Το ρευστό **βγαίνει** από τον **εξατμιστή** της Α/Θ **ψυχρό** (χαμηλή  $T$ )

Πηγαίνει στον γεωεναλλάκτη και **απορροφά θερμότητα** από το **έδαφος**

Επιστρέφει στην αντλία θερμότητας **θερμότερο**.

► Ισοζύγιο ενέργειας στο γεωεναλλάκτη:

$$Q_g = \dot{m}_b c_{p,b} (T_{out,b} - T_{in,b})$$

όπου:

►  $Q_g$ : θερμική ισχύς που απορροφάται από το έδαφος [W]

►  $\dot{m}_b$ : μαζική παροχή ρευστού (brine) [kg/s] (νερό με γλυκόζη)

►  $c_{p,b}$ : ειδική θερμοχωρητικότητα ρευστού [kJ/kg·K]

►  $T_{in,b}$ : θερμοκρασία εισόδου ρευστού στον γεωεναλλάκτη [°C]

►  $T_{out,b}$ : θερμοκρασία εξόδου (επιστροφής στην Α/Θ) [°C].

# Αύξηση Θερμοκρασίας στο Γεωεναλλάκτη

Από την εξίσωση  $Q_g = \dot{m}_b c_{p,b} (T_{out,b} - T_{in,b})$ :

$$T_{out,b} = T_{in,b} + \frac{Q_g}{\dot{m}_b c_{p,b}}$$

Φυσική ερμηνεία:

- ▶ Όσο μεγαλύτερη ισχύς  $Q_g$  αντλούμε από το έδαφος → τόσο πιο πολύ θερμαίνεται το ρευστό.
- ▶ Όσο μεγαλύτερη παροχή  $\dot{m}_b$  → το ρευστό “προλαβαίνει” να ζεσταθεί λιγότερο (μικρότερο  $\Delta T$ ) → πιο “σταθερή” λειτουργία.
- ▶ Η σταθερότερη θερμοκρασία εδάφους (π.χ. 15 °C) σημαίνει ότι το ρευστό μπορεί να επαναθερμαίνεται με μικρό θερμοκρασιακό βήμα, άρα υψηλός COP.

# Σύνδεση Γεωεναλλάκτη με Ψυκτικό Κύκλο Α/Θ

Ο γεωεναλλάκτης “τροφοδοτεί” τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας:

- ▶ Η άλμη (brine) μπαίνει στον εξωτερικό εναλλάκτη (εξατμιστή) σε θερμοκρασία  $T_{out,b}$ .
- ▶ Εκεί παραδίδει θερμότητα στο ψυκτικό μέσο, το οποίο εξατμίζεται σε θερμοκρασία  $T_{evap}$ .

Συνηθώς:

$$T_{evap} \approx T_{brine,mean} - \Delta T_{approach}$$

όπου:

- ▶  $T_{brine,mean} = \frac{T_{in,evap} + T_{out,evap}}{2}$  μέση θερμοκρασία άλμης στον εξατμιστή
- ▶  $\Delta T_{approach}$  “προσέγγιση” θερμοκρασιών (τυπική 3-5 K).
- ▶ Στον συμπυκνωτή:
- ▶ Το ψυκτικό αποδίδει θερμότητα στο κύκλωμα νερού-θέρμανσης (π.χ. ενδοδαπέδια).
- ▶ Θερμοκρασίες νερού:  $T_{ret}$  (επιστροφή)  $\rightarrow$   $T_{sup}$  (προσαγωγή).

# Σχέσεις Ισχύος και COP Αντλίας Θερμότητας

Στον σταθεροποιημένο κύκλο:

- ▶  $Q_{evap} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4)$
- ▶  $Q_{cond} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_3)$
- ▶  $W_{comp} = Q_{cond} - Q_{evap}$

οπότε:

- ▶ **COP θέρμανσης (heating mode):**

$$COP_H = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}}$$

- ▶ **COP ψύξης (cooling mode):**

$$COP_C = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}}$$

και ισχύει:

$$COP_H = COP_C + 1$$

Στο κύκλωμα νερού θέρμανσης:

$$Q_{cond} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{out,w} - T_{in,w})$$

όπου:

$\dot{m}_w$  :μαζική παροχή νερού [kg/s]

$c_{p,w}$  :ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (~4.18 kJ/kg·K)

$T_{in,w}$  :θερμοκρασία επιστροφής (από το κτίριο)

$T_{out,w}$  :θερμοκρασία προσαγωγής (προς το κτίριο, αυτό που θέλουμε να βρούμε).

# Συστήματα Αντλιών Θερμότητας Εδάφους

- ▶ **Οριζόντια γεωεναλλάκτες:** οικονομικοί, απαιτούν μεγάλη επιφάνεια (~2-3 × θερμαινόμενη επιφάνεια).
- ▶ **Κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες:** υψηλότερο κόστος διάτρησης, αλλά σταθερή απόδοση όλο το έτος.
- ▶ **Υδρογεωτρήσεις (ανοικτό σύστημα):** απαιτούν κατάλληλη υδροφορία και ποιοτικό έλεγχο νερού.

Εικόνα: σχηματικό διάγραμμα τριών τύπων GHP (κλειστό οριζ., κλειστό κατακ., ανοικτό).

# Απόδοση Συστήματος GHP

Η συνολική απόδοση (Seasonal Performance Factor - SPF) ορίζεται ως:

$$SPF = \frac{\sum Q_{heat}}{\sum W_{el}}$$

Τυπικές τιμές στην Ελλάδα: 3.5 - 5.0.

Όσο σταθερότερη η θερμοκρασία εδάφους, τόσο μεγαλύτερη η απόδοση.

Για ψύξη, το COP είναι συνήθως 6-7 λόγω ευνοϊκών θερμοκρασιών εδάφους (~18 °C).

# Εφαρμογές Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας

- ▶ Κτίρια γραφείων & πανεπιστημίων (ΕΜΠ Ζωγράφου - πιλοτικό έργο GHP 2024).
- ▶ Νοσοκομεία & ξενοδοχεία (π.χ. GHP Μαραθώνα 300 kW).
- ▶ Κατοικίες με ενδοδαπέδια θέρμανση και fan coils.
- ▶ Εμπορικά κέντρα με υβριδικό σύστημα GHP + Α/Θ αέρα.

# Υβριδικά Συστήματα Ηλιακής Υποβοήθησης

- ▶ Συνδυασμός γεωθερμικής αντλίας με ηλιακά θερμικά συλλέκτες (“Solar-assisted GHP”).
- ▶ Το ηλιακό κύκλωμα προθερμαίνει τον γεωεναλλάκτη και βελτιώνει τον COP κατά 15-20 %.
- ▶ Πλεονεκτήματα: αύξηση απόδοσης και παράταση ζωής συστήματος.



# Ενεργειακή Εξίσωση Υπολογισμού Απόδοσης

Η ισχύς θέρμανσης:

$$Q_H = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})$$

Η ηλεκτρική ισχύς συμπιεστή:  $W_{comp}$ .

Ο βαθμός απόδοσης (COP):  $COP = \frac{Q_H}{W_{comp}}$ .

Επομένως, η εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με αντιστάσεις είναι:

$$\eta_{saving} = 1 - \frac{1}{COP}$$

# Παράδειγμα Υπολογισμού COP

Δεδομένα:  $T_H = 40^\circ\text{C}$ ,  $T_L = 15^\circ\text{C}$ .

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{313}{313 - 288} = 12.5$$

Σε πραγματικές συνθήκες (λόγω απωλειών):  $COP \approx 5$ .

Δείχνει την ανώτερη θερμοδυναμική απόδοση των γεωθερμικών αντλιών.

# Παραδείγματα στην Ελλάδα

- ▶ **Μήλος:** υψηλής ενθαλπίας  $>250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , πιλοτικός σταθμός ΔΕΗ (1980s).
- ▶ **Νίσυρος:** γεωτρήσεις  $150\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- ▶ **Λέσβος:** πεδίο Πολιχνίτου ( $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - αναπτυσσόμενο δίκτυο τηλεθέρμανσης.
- ▶ **Σαμοθράκη & Αλεξανδρούπολη:** γεωτρήσεις  $40\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C}$  για θερμοκήπια και λουτρά.

Συνολική εκτιμώμενη θερμική ισχύς στη χώρα:  $>250\text{ MWth}$ .

# Χάρτης Γεωθερμικού Δυναμικού Ελλάδας



# Περιβαλλοντικά Οφέλη

- ▶ Μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> στις αντλίες θερμότητας.
- ▶ Μικρό αποτύπωμα γης σε σύγκριση με αιολικά / Φ/Β.
- ▶ Υπολείμματα γεωθερμικών ρευστών μπορούν να επαναδιοχετευθούν (“re injection”).
- ▶ Δυνατότητα συνδυασμού με αποθήκευση ενέργειας (geothermal storage).

# Κόστος και Οικονομικότητα

- ▶ Κόστος γεώτρησης: 500-1000 €/m (ανάλογα βάθος και πετρώματα).
- ▶ Επένδυση GHP: ~1 200-1 500 €/kW.
- ▶ Συντήρηση χαμηλή (<1 % ετησίως).
- ▶ LCOE τηλεθέρμανσης  $\approx$  30-40 €/MWh.

# Σύγκριση με Άλλες ΑΠΕ

| Πηγή       | Συντελεστής Φορτίου (CF) | Απόδοση                                   | Ιδιαιτερότητα     |
|------------|--------------------------|-------------------------------------------|-------------------|
| Αιολική    | 0.30-0.40                | ~45 %                                     | Μεταβλητή         |
| Φ/Β        | 0.15-0.20                | ~20 %                                     | Ημερήσια παραγωγή |
| Γεωθερμική | 0.85-0.95                | ~10-17 %<br>ηλεκτρική / >300 %<br>θερμική | Σταθερή Βάση      |

# Ανάλυση Κύκλου Ζωής (CO<sub>2</sub> eq)

Εκπομπές άνθρακα (σε gCO<sub>2</sub>/kWh):

- ▶ Γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας < 50 g.
- ▶ Φ/Β ~ 70 g.
- ▶ Φυσικό αέριο ~ 450 g.

→ Η γεωθερμία είναι η πράσινη πηγή βάσης με το μικρότερο αποτύπωμα.



# Ερευνητικές Κατευθύνσεις

- ▶ Υβριδικά συστήματα GHP + θερμική αποθήκευση (BTES).
- ▶ Ενεργειακή προσομοίωση (DesignBuilder, TRNSYS).
- ▶ Έξυπνη ρύθμιση φορτίου με AI / MPC αλγορίθμους.
- ▶ Εκμετάλλευση μεταλλευτικών υπολειμμάτων ως γεωθερμικά ρευστά.

# Παράδειγμα Εφαρμογής (Δυτική Λέσβος)

Προτεινόμενο έργο γεωθερμικής τηλεθέρμανσης (2025):

- ▶ Θερμική ισχύς ~ 3 MWth.
- ▶ Θερμοκρασία πηγής = 90 °C.
- ▶ Παροχή = 35 kg/s.
- ▶ Εκτιμώμενη κάλυψη ~ 700 νοικοκυριών.  
Εξοικονόμηση CO<sub>2</sub>: > 4 500 t ετησίως.

# Άσκηση 1

**Ζητείται:** Υπολογισμός της παραγόμενης θερμικής ισχύος ενός γεωθερμικού πηγαδιού.

**Δεδομένα:**  $\dot{m} = 12\text{kg/s}$ ,  $c_p = 4.18\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ ,  $T_{in} = 90^\circ\text{C}$ ,  $T_{out} = 60^\circ\text{C}$ .

**Βήμα 1:**  $\Delta T = T_{in} - T_{out} = 30^\circ\text{C}$

**Βήμα 2:**  $Q = \dot{m}c_p\Delta T = 12 \times 4.18 \times 30 = 1505\text{kJ/s} = 1.5\text{MW}$ .

# Άσκηση 2

Δεδομένα γεωεναλλάκτη (brine loop):

- ▶ Υπόγειο έδαφος σχεδόν σταθερό:  $T_{ground} \approx 15^{\circ}C$
- ▶ Η άλμη επιστρέφει από τον εξατμιστή προς το έδαφος στους  $T_{in,b} = 5^{\circ}C$
- ▶ Μαζική παροχή άλμης:  $\dot{m}_b = 1.2 \text{ kg/s}$
- ▶  $c_{p,b} = 3.9 \text{ kJ/kg} \cdot K$  (νερό-γλυκόλη)
- ▶ Θερμική ισχύς που απορροφάται από το έδαφος:  $Q_g = 20 \text{ kW}$
- ▶ Ο συμπιεστής καταναλώνει  $W_{comp} = 4.5 \text{ kW}$ .
- ▶ Κύκλωμα νερού θέρμανσης:
- ▶  $\dot{m}_w = 0.53 \text{ kg/s}$
- ▶  $c_{p,w} = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot K$
- ▶ Θερμοκρασία επιστροφής από το κτίριο:  $T_{in,w} = 35^{\circ}C$

## Άσκηση 2

Ζητούνται:

α) Η θερμοκρασία εξόδου άλμης από τον γεωεναλλάκτη  $T_{out,b}$

β)  $Q_{evaporator}$ ,  $T_{evaporator}$  .

γ) Η θερμοκρασία προσαγωγής νερού  $T_{out,w}$  .

δ) Ο COP θέρμανσης της Α/Θ.

## Λύση Άσκηση 2

A)  $Q_g = \dot{m}_b c_{p,b} (T_{out,b} - T_{in,b})$ :

$$T_{out,b} = T_{in,b} + \frac{Q_g}{\dot{m}_b c_{p,b}} = 9,3$$

B) Θεωρούμε ότι στον εξατμιστή απορροφώνται  $Q_{evap} = 18 \text{ kW}$  από την άλμη (υπάρχουν  $\sim 2 \text{ kW}$  απωλειών στο borefield).

Το μέσο επίπεδο άλμης στον εξατμιστή είναι:

- ▶  $T_{brine,mean} \approx \frac{T_{in,evap} + T_{out,evap}}{2} \approx 7^\circ\text{C}$
- ▶ Θεωρούμε  $\Delta T_{approach} = 5\text{K}$ :
- ▶  $T_{evap} \approx T_{brine,mean} - \Delta T_{approach} = 7 - 5 = 2^\circ\text{C}$

## Λύση Άσκηση 2

Γ)  $Q_{\text{evap}}=18\text{kW}$ ,  $W_{\text{comp}} = 4.5 \text{ kW}$ .

- ▶  $Q_{\text{cond}} = Q_{\text{evap}} + W_{\text{comp}} = 18 + 4.5 = 22.5 \text{ kW}$
- ▶  $COP_H = \frac{Q_{\text{cond}}}{W_{\text{comp}}} = \frac{22.5}{4.5} = 5.0$
- ▶ Ο COP θέρμανσης της αντλίας θερμότητας είναι **5.0**.

Δ)  $Q_{\text{cond}} = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{\text{out},w} - T_{\text{in},w})$ :

- ▶  $Q_{\text{cond}} = 22.5 \text{ kW} = 22.5 \text{ kJ/s}$
- ▶  $\dot{m}_w c_{p,w} = 0.53 \times 4.18 = 2.2154 \text{ kJ/s} \cdot K$
- ▶  $\Delta T_w = \frac{22.5}{2.2154} \approx 10.16 K$
- ▶  $T_{\text{out},w} = 35 + 10.16 \approx 45.2^\circ C$

Το νερό προσαγωγής προς το σύστημα θέρμανσης βγαίνει περίπου στους **45 °C**.

# Κύρια Συμπεράσματα

- ▶ Η γεωθερμία είναι ανανεώσιμη, σταθερή και ανεξάρτητη από καιρό.
- ▶ Κατάλληλη για θερμικές εφαρμογές και αντλίες θερμότητας.
- ▶ Υψηλή ενεργειακή απόδοση και μικρό LCOE.
- ▶ Η Ελλάδα διαθέτει σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό και ανθρώπινο δυναμικό.



# Βιβλιογραφία

- ▶ Bertani R. (2023). Geothermal Power Generation in the World. EGEC Report.
- ▶ Lund J.W., Freeston D.H. (2023). World Geothermal Utilization Update. GRC Transactions.
- ▶ Dickson M.H., Fanelli M. (2020). Geothermal Energy: Utilization and Technology. UNESCO.
- ▶ Fridleifsson I.B. (2019). “Geothermal Energy for the World”, Renewable Energy Review.
- ▶ ΕΑΓΜΕ (2023). Χάρτης Γεωθερμικού Δυναμικού Ελλάδας.
- ▶ ΚΑΠΕ (2022). Ενεργειακές Εφαρμογές ΑΠΕ στη Θέρμανση και Ψύξη.
- ▶ UN IRENA (2024). Renewable Energy Statistics.
- ▶ ΕΜΠ (2024). Μελέτη Αντλιών Θερμότητας Εδάφους στην Ελλάδα.
- ▶ Lior N. (2021). “Advanced Energy Conversion Systems”, Elsevier.
- ▶ EUREC (2023). Geothermal Roadmap Europe 2030.