



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 5: Αντλίες Θερμότητας

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Τι είναι Αντλία Θερμότητας;

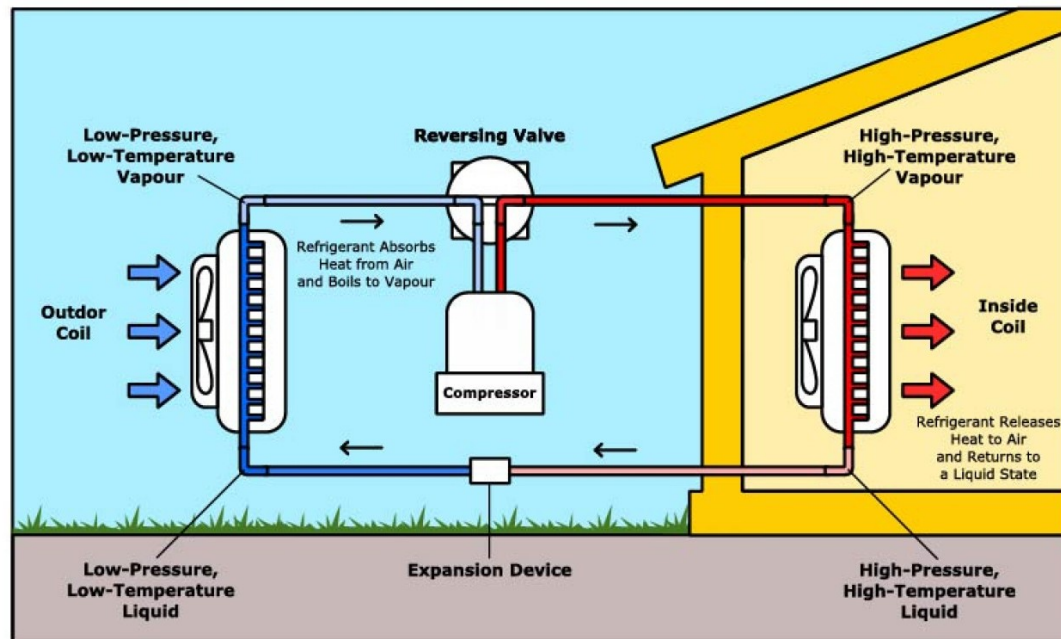
Αντλία θερμότητας (Heat Pump) είναι μια θερμική μηχανή που:

- ▶ **αντλεί θερμότητα** από μια πηγή χαμηλής θερμοκρασίας
- ▶ την **μεταφέρει** σε μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας
- ▶ **καταναλώνοντας ηλεκτρικό έργο** στο συμπιεστή.

Αποτελεί την **αντίστροφη λειτουργία** ενός ψυγείου/κλιματιστικού.
Χρησιμοποιείται για:

- ▶ θέρμανση χώρων
- ▶ ψύξη χώρων
- ▶ παραγωγή ζεστού νερού χρήσης
- ▶ βιομηχανική θέρμανση/ψύξη

Air Source Heat Pumps Heating Cycle



Ο Αντίστροφος Κύκλος Rankine

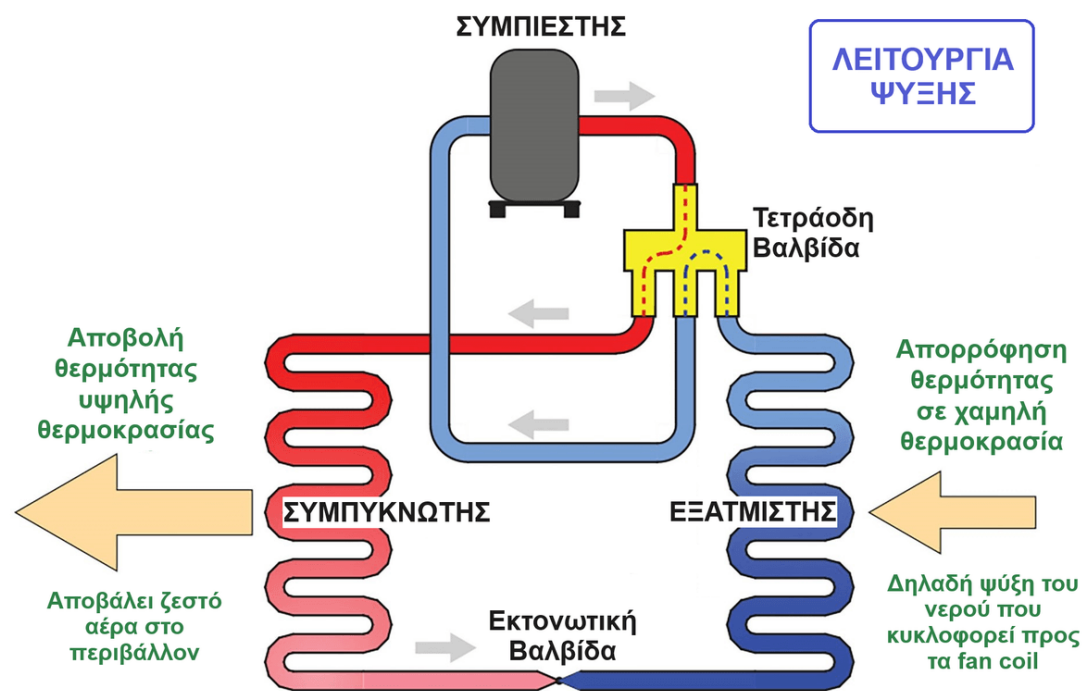


Αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια:

- ▶ **Εξάτμιση** (απόψυξη ρευστού → απορρόφηση θερμότητας Q_L)
- ▶ **Συμπίεση** (αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας)
- ▶ **Συμπύκνωση** (απόδοση θερμότητας Q_H στο νερό ή στον αέρα)
- ▶ **Εκτόνωση / Θρόμβωση** (πτώση πίεσης και θερμοκρασίας)

Στόχος: μεταφορά θερμότητας με την **ελάχιστη** κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος.

Στοιχεία Ψυκτικού Κυκλώματος



- ▶ **Συμπιεστής:** αυξάνει πίεση και θερμοκρασία ψυκτικού
- ▶ **Συμπυκνωτής:** παραδίδει θερμότητα στο κύκλωμα νερού/αέρα
- ▶ **Εκτονωτική Βαλβίδα:** μειώνει πίεση → πτώση θερμοκρασίας
- ▶ **Εξατμιστής:** απορροφά θερμότητα από τον αέρα/έδαφος/νερό

Δείκτες Απόδοσης (COP - SCOP - EER - SEER)

Θέρμανση:

$$\blacktriangleright \text{COP} = \frac{Q_H}{W_{comp}}$$

Ψύξη:

$$\blacktriangleright \text{EER} = \frac{Q_L}{W_{comp}}$$

Εποχικοί δείκτες (ευρωπαϊκή οδηγία EN 14825):

- ▶ **SCOP:** εποχικός COP (θέρμανση)
- ▶ **SEER:** εποχικός EER (ψύξη)

Οι εποχικοί δείκτες λαμβάνουν υπόψη:

- ✓ μερικά φορτία
- ✓ εξωτερική θερμοκρασία
- ✓ απόψυξη
- ✓ πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

Μετάδοση Θερμότητας στον Συμπυκνωτή

Σύμφωνα με το ισοζύγιο:

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

Παράγοντες που αυξάνουν το Q_H :

- ▶ Μεγάλη επιφάνεια εναλλάκτη
- ▶ Σωστή παροχή νερού
- ▶ Μικρή προσέγγιση θερμοκρασιών ($\Delta T_{app} \approx 3-5^\circ \text{C}$)

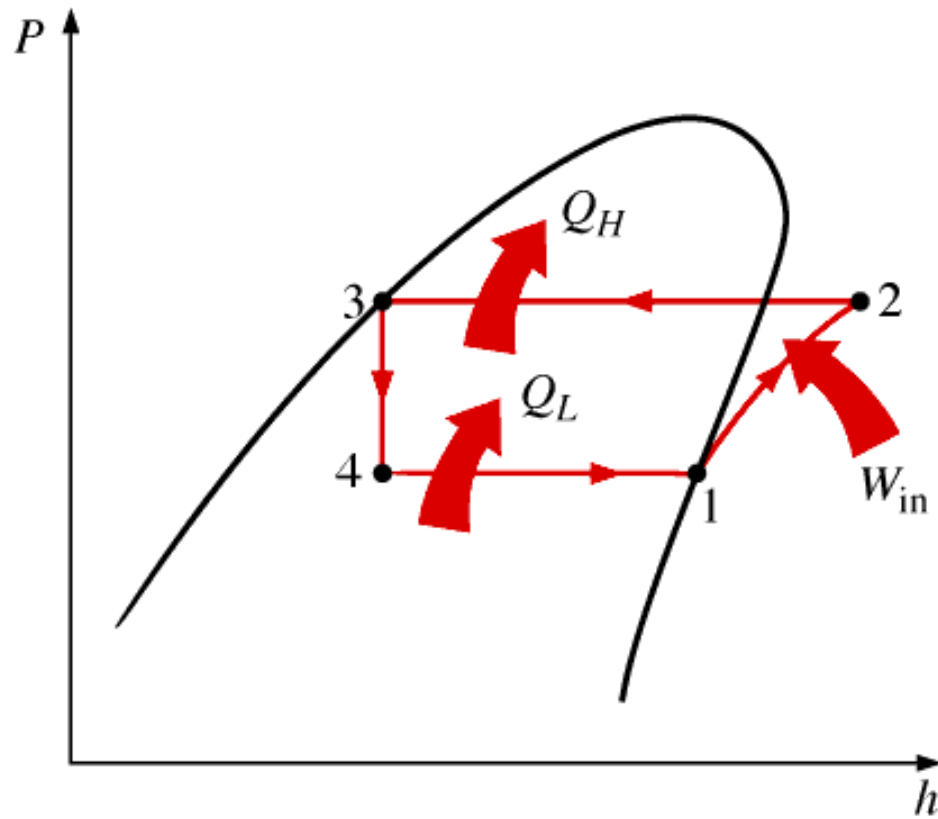
Χαρακτηριστικά Ψυκτικών Μέσων

Σύγχρονα ψυκτικά:

Ψυκτικό	GWP	Πλεονέκτημα	Χρήση
R410A	2088	αξιόπιστο αλλά υψηλό GWP	παλιότερα A/W
R32	675	καλύτερη απόδοση	νέες A/W
R290 (προπάνιο)	3	φυσικό, υψηλός COP	οικιακές A/Θ
R744 (CO ₂)	1	transcritical cycle	ZNΧ, supermarkets

Διάγραμμα P-h

- 1–2: Συμπύεση
- 2–3: Συμπύκνωση (απόδοση θερμότητας)
- 3–4: Εκτόνωση
- 4–1: Εξάτμιση (απορρόφηση θερμότητας)



Βαθμός Απόδοσης Carnot

Ο ανώτατος θεωρητικός βαθμός:

$$COP_{H,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

π.χ.

- ▶ $T_L = 5^{\circ}C = 278K$
- ▶ $T_H = 40^{\circ}C = 313K$
- ▶ $COP_{Carnot} = \frac{313}{313-278} = 8.94$
- ▶ Στην πράξη $\rightarrow$ 4.0-5.5 για A/W και 5.0-7.0 για G/W.

Παράγοντες που μειώνουν τον COP

- ▶ Μεγάλο ΔT μεταξύ πηγής και νερού προσαγωγής
- ▶ Ανεπαρκής απόψυξη
- ▶ Υψηλή σχετική υγρασία (frosting)
- ▶ Μικρή ροή αέρα ή νερού
- ▶ “Thermal drift” του εδάφους σε GSHP

Θερμοδυναμικές Απώλειες

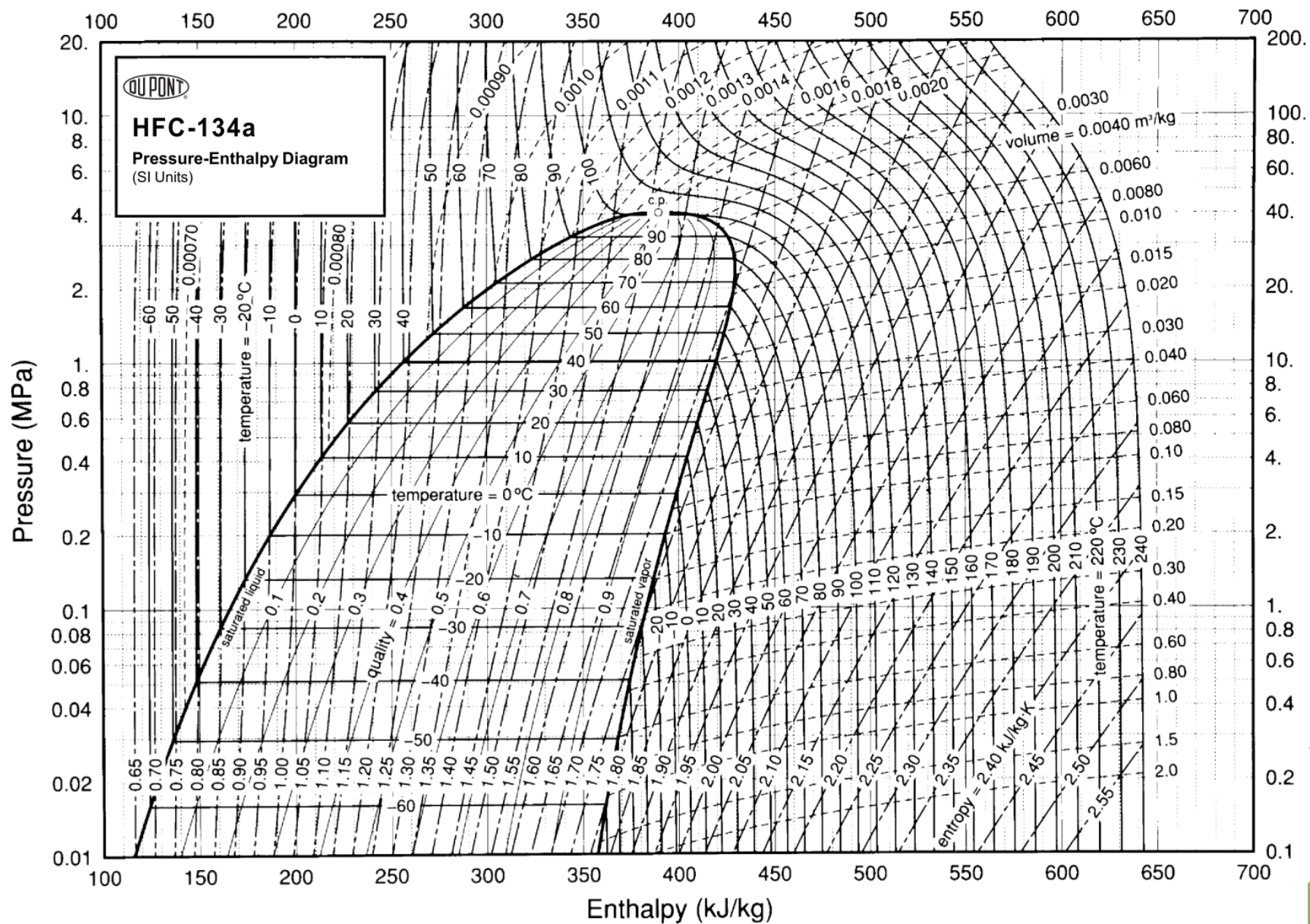
- ▶ Μη ισεντροπική συμπίεση
- ▶ Απώλειες στο ελαιολόγο
- ▶ Μη ιδανική ανταλλαγή θερμότητας
- ▶ Superheat / subcooling που αποκλίνει από το optimum
- ▶ Απώλειες μετατροπέα (inverter)

Παράδειγμα P-h

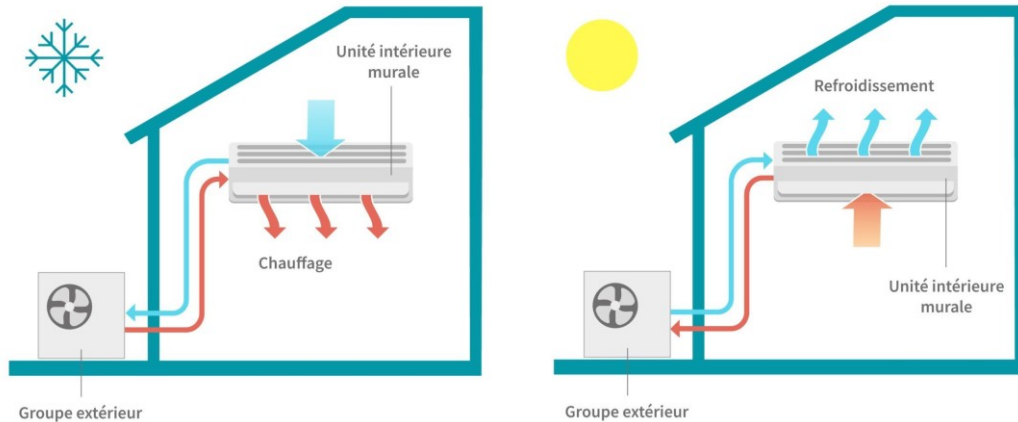
- ▶ Υποθέτουμε R134a:
- ▶ Εξάτμιση στους 0°C , superheat 5 K
- ▶ Συμπύκνωση στους 40°C , subcooling 3 K
- ▶ Συμπιεστής 65 % ισεντροπικός

Υπολογίζονται:

- ▶ h_1, h_2, h_3, h_4
- ▶ Ισχύς εξάτμισης
- ▶ Ισχύς συμπυκνωτή
- ▶ COP



A/W Heat Pumps (Air-to-Water)



Πλεονεκτήματα:

- ▶ Χαμηλό κόστος εγκατάστασης
- ▶ Ευέλικτη τοποθέτηση
- ▶ Ιδανικές για κλίμα Ελλάδας

Μειονεκτήματα:

- ▶ Μείωση COP σε χαμηλές T
- ▶ Παγετός/απόψυξη
- ▶ Θόρυβος

Air-to-Air Heat Pumps (Κλιματιστικά)

Ιδανικά για:

- ▶ κατοικίες
- ▶ γραφεία
- ▶ Καταστήματα

COP μέχρι 6 σε ήπιες κλιματικές συνθήκες.

Υδρόψυκτες / Υδροθερμικές Α/Θ

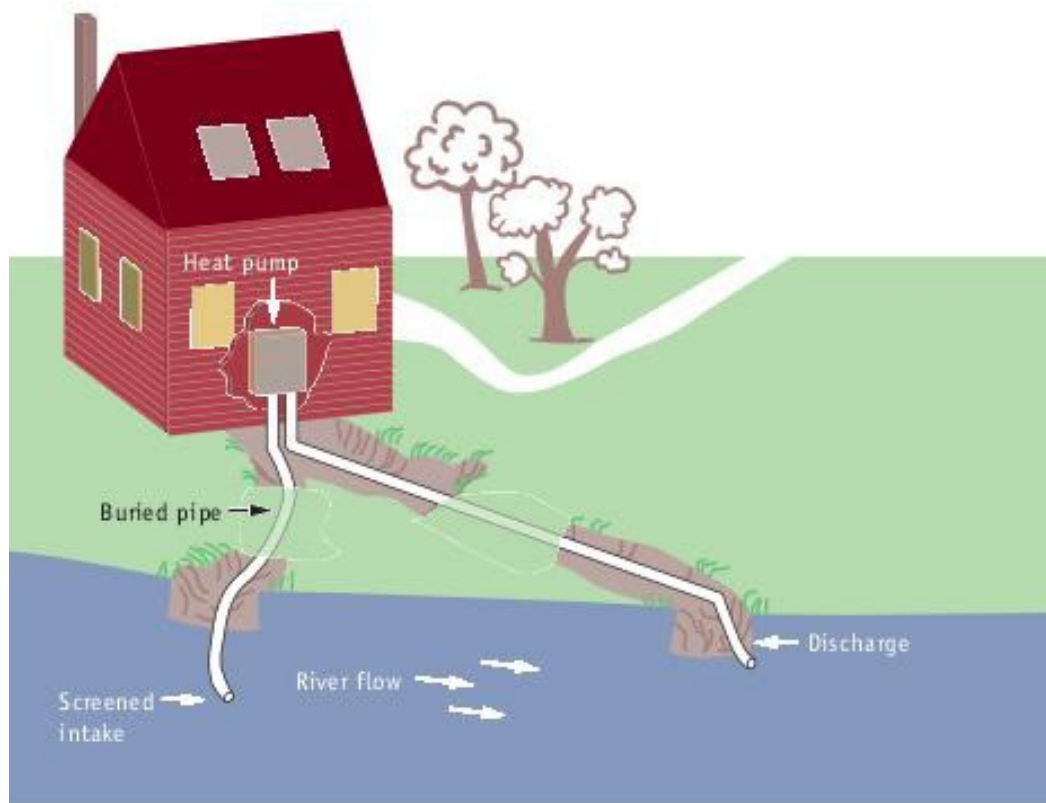
Πηγές:

- ▶ λίμνες
- ▶ ποτάμια
- ▶ θάλασσα (θαλάσσια Α/Θ υψηλής απόδοσης)

COP: 6-8

Σταθερή θερμοκρασία νερού → ιδανική συμπεριφορά.

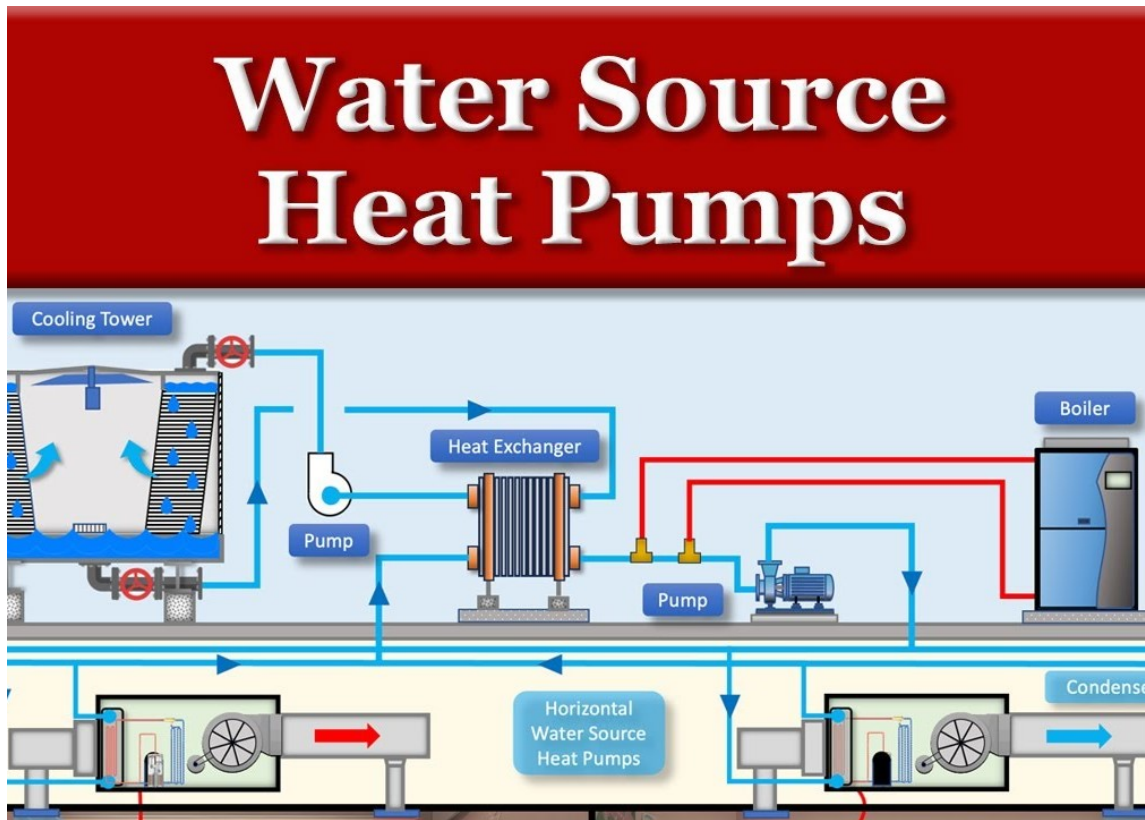
Υπόγειου Νερού (Open-loop)



- ▶ άντληση υδροφόρου ορίζοντα
- ▶ χρήση θερμότητας
- ▶ Επανεισαγωγή

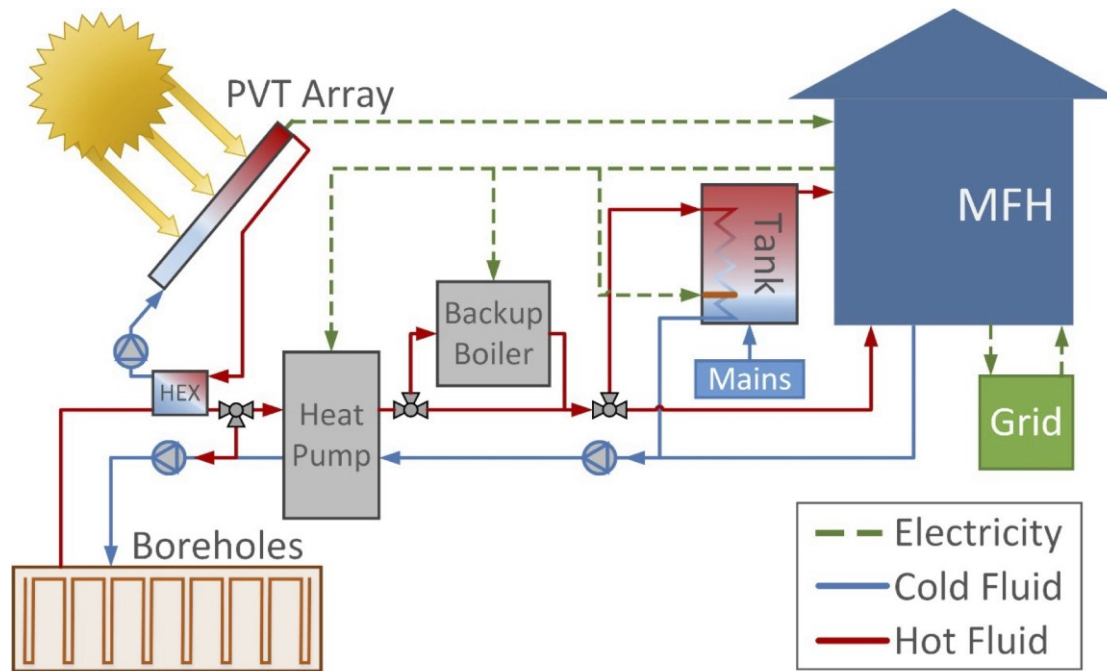
Περιορισμός: χημική σύσταση νερού + νομοθεσία

Πύργος Ψύξης + Α/Θ



- ▶ Σε μεγάλα κτίρια → συνδυασμός cooling tower + heat pump
- ▶ Για υψηλής θερμοκρασίας ζεστό νερό (45-55 °C).

Υβριδικές Α/Θ

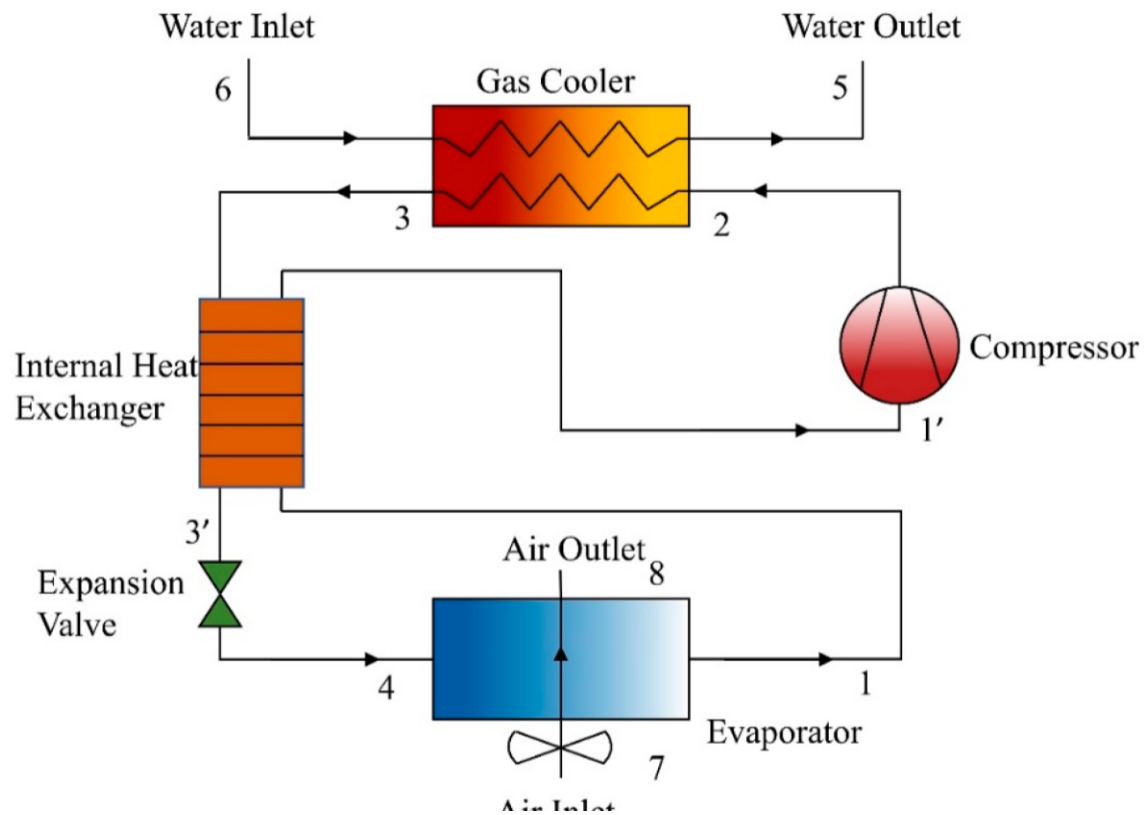


Συνδυασμός:

- ▶ Α/Θ
- ▶ ηλιακών συλλεκτών
- ▶ θερμικής αποθήκευσης
- ▶ ή GHP

Αύξηση SCOP έως +20%.

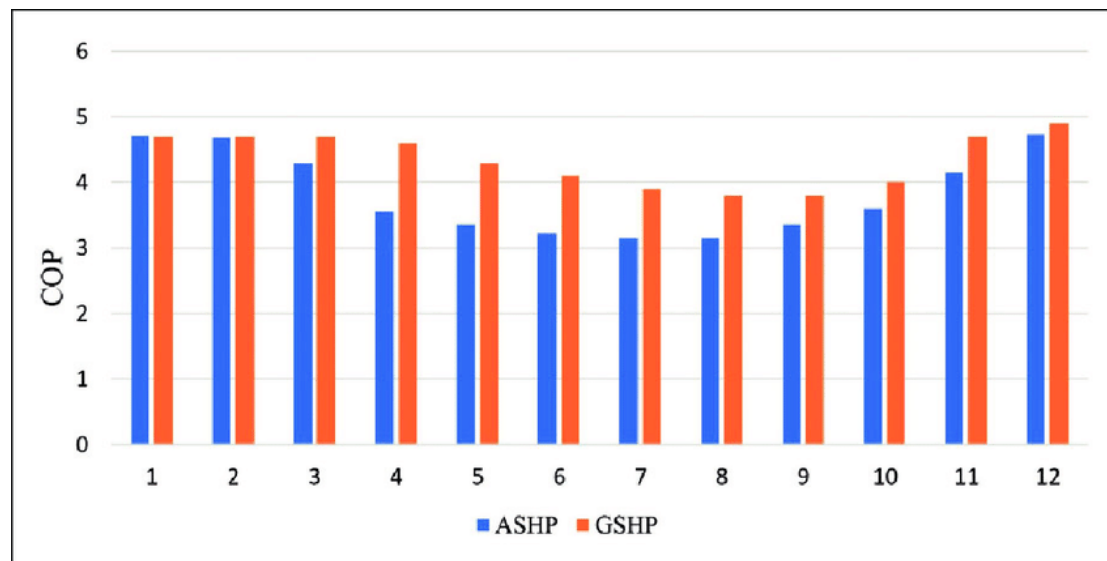
CO₂ Heat Pumps



- Transcritical κύκλος:
- gas cooler
- υψηλές θερμοκρασίες εξόδου (70-90° C)

Ιδανικές για ΖΝΧ και εμπορικές/βιομηχανικές εφαρμογές.

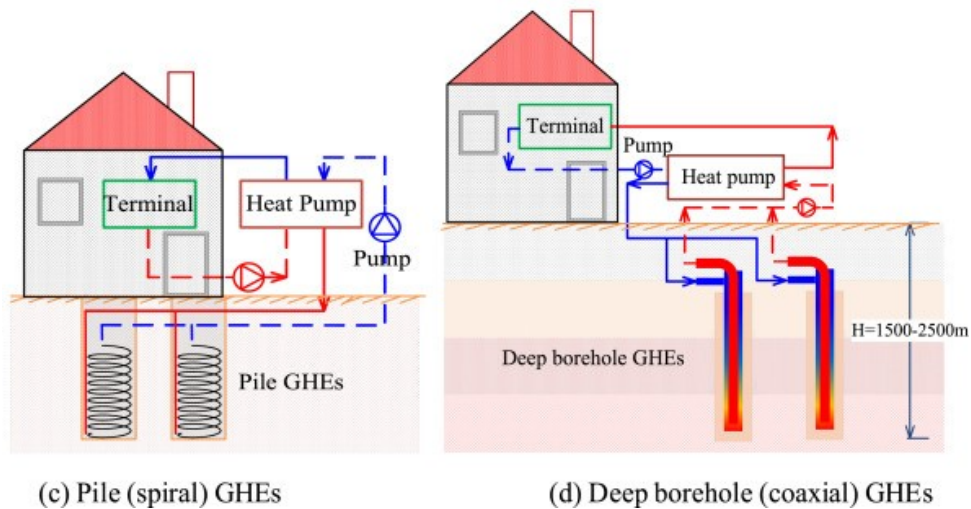
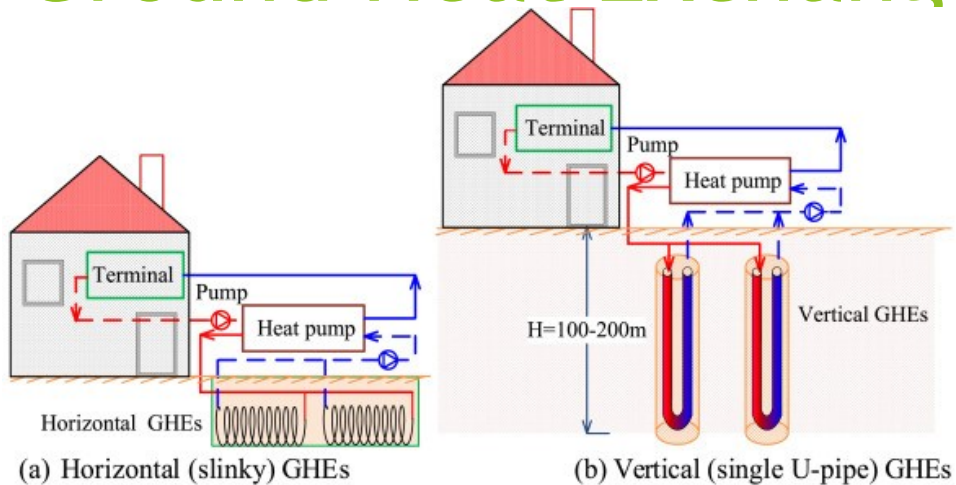
GSHP vs ASHP



Πίνακας σύγκρισης με COP σε εξωτερικές θερμοκρασίες:

- ▶ ASHP: COP = 2.8 (0°C), 3.3 (5°C), 4.5 (15°C)
- ▶ GSHP: COP = 4.5-5.5 σταθερά

Ground Heat Exchanger Types



Οριζόντιοι:

- φθηνοί
- χρειάζονται μεγάλη έκταση

Κατακόρυφοι:

- υψηλότερο κόστος
- σταθερή απόδοση
- Βάθη 50-150 m

G-Functions & Εδαφική Αντίσταση

- ▶ Θεωρία Eskilson
- ▶ Απόκριση εδάφους στη φόρτιση
- ▶ Μακροχρόνιο thermal drift
- ▶ Χρήση υπολογιστικών εργαλείων (EED, TRNSYS)

Τι είναι οι G-Functions

Οι **G-functions** (ή **G-functions of borehole fields**) είναι διαστασιοποιημένες συναρτήσεις απόκρισης του εδάφους στις θερμικές φορτίσεις ενός πεδίου γεωτρήσεων.

ποτέλεσμα της διδακτορικής μελέτης του **Eskilson (1987)**.

Γιατί χρειάζονται:

- ▶ Ο γεωεναλλάκτης (GHE) δεν είναι απλώς ένας σωλήνας. Το έδαφος γύρω του **αντιδρά με χρόνο** στις θερμικές μεταβολές:
- ▶ Άμεση αντίδραση → λίγα δευτερόλεπτα-λεπτά
- ▶ Βραχυπρόθεσμη → ώρες
- ▶ Εποχική → μήνες
- ▶ Μακροχρόνια → χρόνια

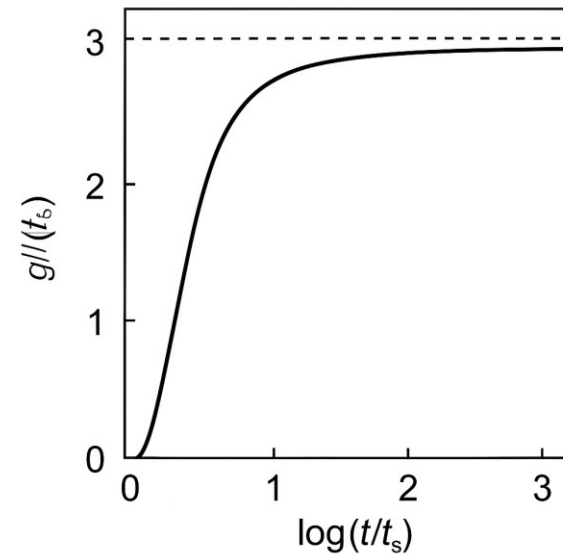
Αυτό το **χρονοεξαρτώμενο φαινόμενο** δεν μπορεί να περιγραφεί με απλές εξισώσεις. Γι' αυτό:

Οι **G-functions** δίνουν τη θερμοκρασιακή απόκριση του εδάφους σε θερμικό φορτίο Q ανά γεώτρηση, για συγκεκριμένες χρονικές κλίμακες:

$$\Delta T_b(t) = \frac{Q}{2\pi k_s} g\left(\frac{t}{t_s}\right)$$

όπου:

- ▶ ΔT_b :άνοδος θερμοκρασίας στον τοίχο της γεώτρησης
- ▶ k_s :θερμική αγωγιμότητα εδάφους
- ▶ $g(t/t_s)$:η G-function
- ▶ $t_s = \frac{H^2}{9\alpha_s}$:characteristic time
- ▶ α_s :θερμική διαχυτότητα εδάφους
- ▶ H : Βάθος γεώτρησης



Τι είναι η Εδαφική Θερμική Αντίσταση (Ground Thermal Resistance)

Η εδαφική αντίσταση R_g μετρά πόσο εύκολα το έδαφος “δέχεται” ή “δίνει” θερμότητα.

Αναλογία:

- υψηλή αντίσταση → το έδαφος θερμαίνεται γρήγορα (όχι καλό)
- χαμηλή αντίσταση → το έδαφος “τραβάει” θερμότητα εύκολα (καλό)

Σημαντικά μέρη:

A. Borehole Thermal Resistance - R_b

Αντίσταση μέσα στη γεώτρηση, από τον σωλήνα → grout → τοίχωμα.

Εξαρτάται από:

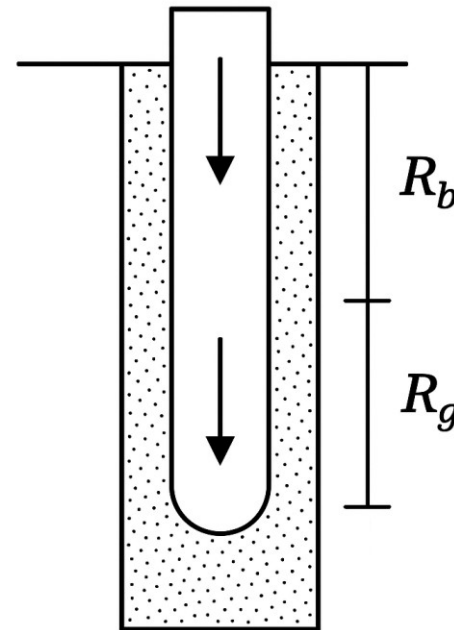
- υλικό σωλήνα
- διάμετρο
- conductivity grout
- ροή ρευστού
- σχήμα (U-tube vs coaxial)

B. Ground Thermal Resistance - R_g

Αντίσταση του εδάφους γύρω από τη γεώτρηση.

Ορίζεται ως:

$$R_g = \frac{\Delta T_s}{Q}$$



Τι είναι η Θεωρία Eskilson

Ο Eskilson έλυσε το τρισδιάστατο πρόβλημα θερμικής αγωγής για γεωεναλλάκτες κατακόρυφης γεώτρησης με γενική αναλυτική-αριθμητική μέθοδο.

Αυτός:

★ Ανέπτυξε:

- ▶ τον ορισμό των **G-functions**
- ▶ μοντέλα για **single boreholes**
- ▶ μοντέλα για **borehole fields** (συστοιχίες)
- ▶ ιδέα characteristic time t_s

★ Κατέγραψε:

- ▶ short-term response (λεπτά-ώρες)
- ▶ mid-term response (ημέρες-μήνες)
- ▶ long-term drift (έτη)

Αυτά έγιναν η βάση για όλα τα λογισμικά:

- ▶ **EED (Earth Energy Designer)**
- ▶ **TRNSYS Type 557**
- ▶ **EnergyPlus GHE modules**
- ▶ **GLHEPRO**

Πώς χρησιμοποιούνται οι G-Functions στα λογισμικά

Είσοδοι που δίνει ο μελετητής:

- ▶ Building load profile
- ▶ BHE (borehole heat exchanger) geometry
- ▶ k_s , α_s του εδάφους
- ▶ Grout properties
- ▶ Pipe dimensions & material

Το λογισμικό:

- ✓ Υπολογίζει $Q(t)$ (dynamic load)
- ✓ Το μετατρέπει σε **load pulses**
- ✓ Τα “διπλώνει” με τις G-functions → convolution
- ✓ Προβλέπει:
 - ▶ Temperatures of brine (T_{in} , T_{out})
 - ▶ Long-term drift (20+ χρόνια)
 - ▶ Sizing U-loop field length

Στόχος: να βρεθεί η ελάχιστη απαιτούμενη συνολική γεώτρηση H ώστε:

$$T_{brine,min}(t) > T_{limit}$$

Thermal Drift - τι είναι;

Σε GSHP, το έδαφος δεν είναι ανεξάντλητη πηγή θερμότητας.

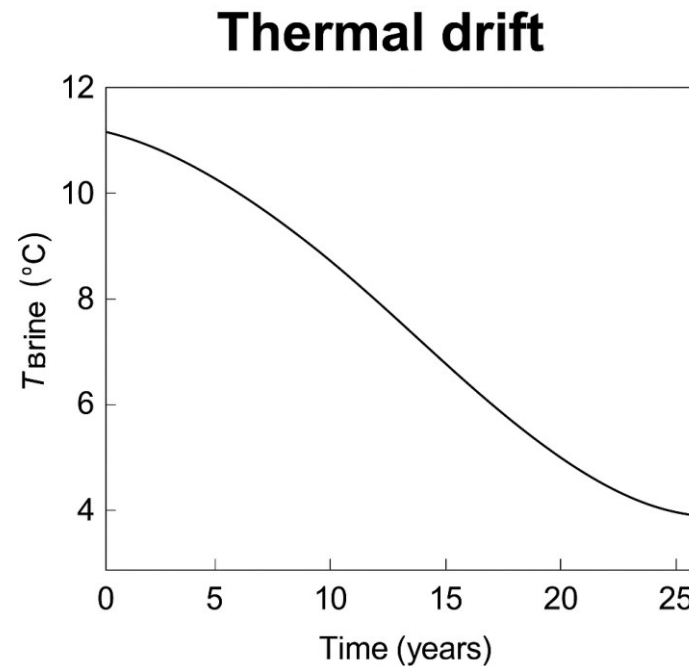
Αν “τραβάμε” θερμότητα για πολλά χρόνια:

- ▶ το έδαφος ψύχεται σταδιακά
- ▶ μειώνεται το T_{brine}
- ▶ μειώνεται ο COP της A/Θ
- ▶ απαιτείται μεγαλύτερο πεδίο γεωτρήσεων

Αυτό είναι το **long-term thermal drift**.

Μπορεί να φτάσει:

- ▶ 1-2°C μείωση σε 10 χρόνια
- ▶ 3-5°C σε 25 χρόνια
- ▶ αν ο σχεδιασμός είναι κακός → κατάρρευση συστήματος



Πώς σχεδιάζουμε σωστά έναν γεωεναλλάκτη (με βάση G-functions)

Βασικές συνθήκες για σωστή διάσταση:

- ▶ **Ισορροπία ετήσιου φορτίου** (annual load balance)
Το έδαφος πρέπει να αναπληρώνεται θερμικά.
- ▶ **Μέγιστο linear load** ανά μέτρο γεώτρησης
$$q'_{max} \approx 40-60 \text{ W/m}$$

για θέρμανση στην Ελλάδα.

- ▶ **Απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων**
Πρέπει να είναι 5-7 m για να μειώσουμε thermal interference.
- ▶ **Χρήση G-functions** για πρόβλεψη T_{out} σε βάθος χρόνου.

Πλήρης εξήγηση βήμα-βήμα

Δεδομένα:

- ▶ 10 κατακόρυφες γεωτρήσεις $\rightarrow H = 100 \text{ m}$
- ▶ $k_s = 2.5 \text{ W/mK}$
- ▶ $q' = 45 \text{ W/m}$
- ▶ Seasonal load: 12 kW
- ▶ Load duration: 1800 hours

Υπολογισμός:

- ▶ Χρησιμοποιείται G-function για 10-borehole field σε 6×6 m spacing.
- ▶ Υπολογίζεται η θερμική αντίσταση R_g από G-function.
- ▶ Υπολογίζεται:

$$\Delta T_b = \frac{Q}{2\pi k_s} g(t/t_s)$$

- ▶ Προβλέπεται θερμοκρασία άλμης για 20 χρόνια.
- ▶ Αν $T_b < 0^\circ \text{C} \rightarrow$ προσαυξάνουμε το πεδίο.

Αυτό κάνει το EED αυτόματα.

Συνοπτική Επεξήγηση

- ▶ Οι G-functions είναι σαν “δακτυλικό αποτύπωμα” της συμπεριφοράς του εδάφους στη θερμότητα.
- ▶ Η θεωρία Eskilson περιγράφει πώς το έδαφος θερμαίνεται ή ψύχεται σταδιακά με το χρόνο.
- ▶ Η εδαφική αντίσταση δείχνει πόσο εύκολα μεταφέρεται η θερμότητα από τη γεώτρηση στο έδαφος.
- ▶ Το thermal drift είναι η κούραση του εδάφους μετά από χρόνια συνεχούς φορτίου.
- ▶ Το EED, το TRNSYS κ.ά κάνουν ακριβώς αυτές τις προβολές για 5-25 χρόνια.

Long-term Degradation

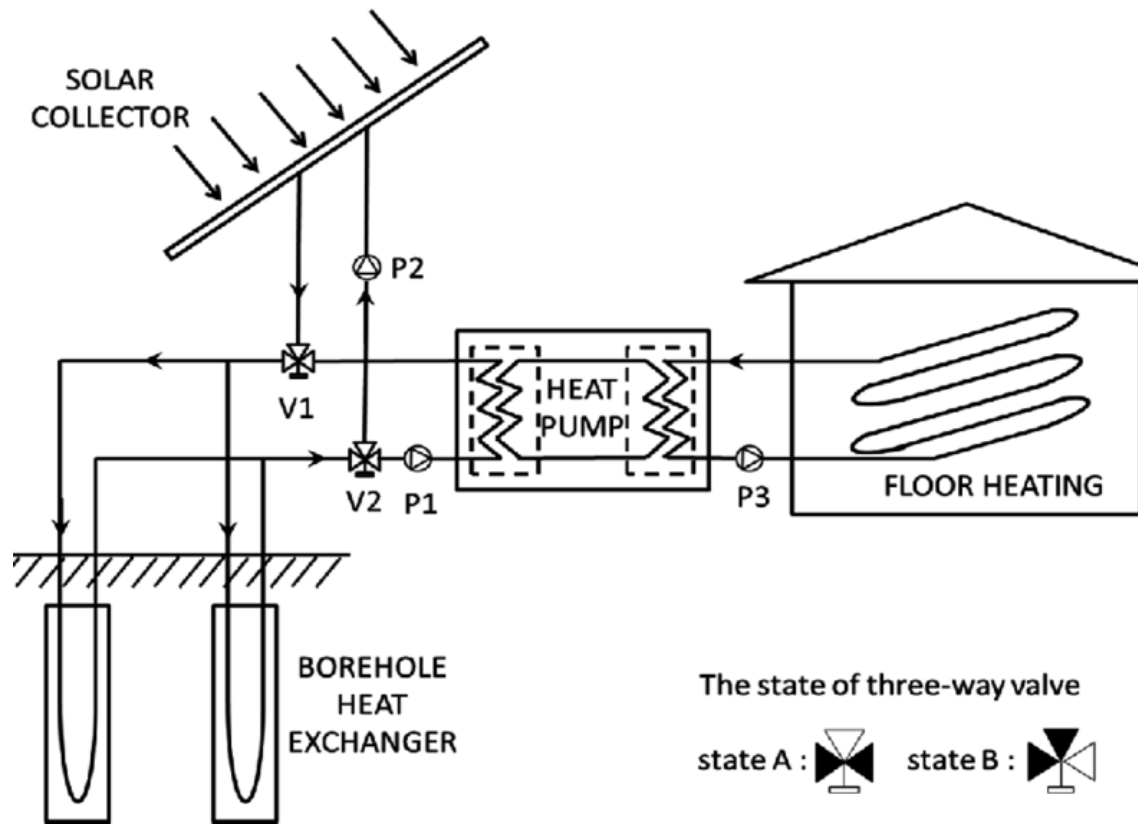
Σε συστήματα GSHP:

- ▶ μείωση θερμοκρασίας εδάφους
- ▶ ανάγκη θερμικής αναπλήρωσης
- ▶ λύση: solar regeneration

Είναι η διαδικασία στην οποία **ηλιακά θερμικά συλλέγουν θερμότητα** και την **εισάγουν στο έδαφος**, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του borefield.

- ▶ Δηλαδή:
 - Τη μέρα το ηλιακό σύστημα θερμαίνει νερό/άλμη
 - Το ζεστό ρευστό κυκλοφορεί στις γεωτρήσεις
 - Το έδαφος **ξαναθερμαίνεται**
 - Η GSHP ξεκινά σε επόμενη περίοδο με **υψηλότερη T_{in}** , άρα **υψηλότερο COP**.

Solar-assisted GSHP



Υβριδικά:

- ηλιακό κύκλωμα θερμαίνει το GHE
- αύξηση COP κατά 10-25%
- επέκταση διάρκειας ζωής εναλλάκτη

Βασική διάταξη του συστήματος

Το σύστημα έχει τρία «κυκλώματα»:

Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών

Θερμικοί συλλέκτες (συνήθως επίπεδοι ή vacuum) ζεσταίνουν ένα ρευστό (νερό ή νερό-γλυκόλη). Το ρευστό αυτό μπορεί:

- ▶ είτε να πηγαίνει σε δοχείο αποθήκευσης (buffer tank),
- ▶ είτε να κυκλοφορεί μέσα από τον γεωεναλλάκτη για regeneration.

Γεωθερμικός εναλλάκτης (Ground Heat Exchanger - GHE)

Κατακόρυφες ή οριζόντιες γεωτρήσεις όπου κυκλοφορεί άλμη.

Το έδαφος λειτουργεί ως **θερμική μπαταρία**.

Από εδώ αντλεί θερμότητα η αντλία θερμότητας τον χειμώνα και απορρίπτει θερμότητα (ή λαμβάνει ηλιακή) σε φάσεις regeneration.

Αντλία Θερμότητας (GSHP)

Ψυκτικό κύκλωμα (συμπιεστής-εξατμιστής-συμπυκνωτής-εκτονωτική), που:

- ▶ στον εξατμιστή παίρνει θερμότητα από το GHE (άρα από έδαφος ή/και ηλιακό),
- ▶ στον συμπυκνωτή δίνει θερμότητα στο κύκλωμα θέρμανσης κτιρίου (νερό 35-45°C).

Η «μαγεία» του συστήματος είναι ότι το **ηλιακό κύκλωμα δουλεύει όχι μόνο για το κτίριο, αλλά και για το έδαφος**.

Λειτουργία σε θέρμανση (χειμώνας)

Σε κλασική GSHP χωρίς ηλιακό:

- ▶ Η άλμη μπαίνει στον γεωεναλλάκτη στους $T_{in,b}$ (π.χ. 5-7°C)
- ▶ Απορροφά από το έδαφος ισχύ Q_g
- ▶ Βγαίνει στους $T_{out,b}$ (π.χ. 8-10°C) και πάει στον εξατμιστή
- ▶ Η Α/Θ αντλεί αυτή τη θερμότητα, ανεβάζει επίπεδο θερμοκρασίας και αποδίδει Q_{cond} στο κτίριο.

Με solar-assisted GSHP στην ίδια φάση:

- ▶ Ο γεωεναλλάκτης έχει **υψηλότερη μέση θερμοκρασία** γιατί κατά την προηγούμενη περίοδο φορτίστηκε με ηλιακή θερμότητα.
- ▶ Άρα η άλμη μπορεί να κινείται π.χ. από 9→13°C αντί για 5→9°C.
- ▶ Αυτό ανεβάζει τη θερμοκρασία εξατμίσσης T_{evap} και μειώνει το ΔT με το έδαφος.
- ▶ Άμεσο αποτέλεσμα: **αυξημένος COP** της αντλίας.

Το ισοζύγιο στον εξατμιστή είναι:

$$Q_{evap} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_4) = \dot{m}_b c_{p,b}(T_{in,evap} - T_{out,evap})$$

Με μεγαλύτερη $T_{in,evap}$ (λόγω θερμότερου GHE), ο κύκλος κινείται σε ευνοϊκότερο σημείο στο P-h → μικρότερο W_{comp} για ίδια Q_{cond} .

Solar regeneration - πώς “φορτίζω” το έδαφος

Όταν υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια και το κτίριο είτε δεν χρειάζεται πλήρη θέρμανση είτε βρισκόμαστε εκτός περιόδου θέρμανσης (φθινόπωρο/άνοιξη/καλοκαίρι), κάνουμε:

- ▶ Οι ηλιακοί συλλέκτες ζεσταίνουν ρευστό στους, π.χ., 25-35°C.
- ▶ Το ζεστό ρευστό οδηγείται μέσω αντλίας κυκλοφορίας στο πεδίο γεωτρήσεων (GHE).
- ▶ Εκεί απορρίπτουμε θερμότητα στο έδαφος:

$$Q_{regen} = \dot{m}_s c_{p,s} (T_{col,out} - T_{col,in})$$

κι αυτή εμφανίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας τοίχου γεώτρησης/εδάφους:

$$\Delta T_b(t) = \frac{Q_{regen}}{2\pi k_s} g \left[\frac{t}{t_s} \right]$$

- ▶ Σταδιακά, το πεδίο γεωτρήσεων έχει υψηλότερη μέση θερμοκρασία → μειώνεται το **thermal drift**.

Αντίστροφα, μπορείς να έχεις και λειτουργία **free cooling** όπου η Α/Θ δουλεύει ψύξη και απορρίπτει θερμότητα στο έδαφος. Και αυτό είναι “regeneration”, απλώς όχι ηλιακό αλλά από ψυκτικά φορτία.

Ενεργειακή ανάλυση και επίδραση στον COP

Ας συγκρίνουμε απλά:

Χωρίς solar regeneration:

- ▶ Θερμοκρασία άλμης στον εξατμιστή: $T_{b,mean} = 7^{\circ}\text{C}$
- ▶ Εξάτμιση περίπου στους $T_{evap} \approx 2^{\circ}\text{C}$
- ▶ Συμπύκνωση για θέρμανση στους 40°C
- ▶ Θεωρητικός Carnot:

$$COP_{H,carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{313}{313 - 275} \approx 8.2$$

Πραγματικός COP_H ~ 4.0-4.5

Με solar regeneration:

- ▶ Θερμοκρασία άλμης π.χ. $11-12^{\circ}\text{C}$
- ▶ Εξάτμιση ανεβαίνει σε $\sim 6-7^{\circ}\text{C}$
- ▶ Τότε:

$$COP_{H,carnot} = \frac{313}{313 - 280} \approx 9.5$$

και ο πραγματικός COP μπορεί να ανέβει σε 4.8-5.2.

Εμπειρικά, σε συστήματα όπου έχει γίνει σοβαρή μελέτη, βλέπεις:

- ▶ αύξηση SCOP 10-25 %,
- ▶ με μικρότερο απαιτούμενο συνολικό μήκος boreholes.

Μαθηματική προσέγγιση thermal drift + regeneration

Χωρίς αναπλήρωση, η μακροχρόνια μείωση T εδάφους μπορεί να προσεγγιστεί ως:

$$\Delta T_{drift}(t) \approx \frac{Q_{annual}}{2\pi k_s H} g \left(\frac{t}{t_s} \right)$$

Με solar regeneration προσθέτεις ένα “θετικό” ισοδύναμο φορτίο:

$$\Delta T_{regen}(t) \approx -\frac{Q_{solar,annual}}{2\pi k_s H} g \left(\frac{t}{t_s} \right)$$

Άρα η καθαρή μεταβολή είναι:

$$\Delta T_{net}(t) = \Delta T_{drift}(t) + \Delta T_{regen}(t)$$

Στόχος σχεδιασμού:

να κρατάς ΔT_{net} σε επίπεδα ώστε

$T_{brine,min} > 0-2^\circ\text{C}$ σε όλο τον ορίζοντα 20-25 ετών.

Πώς φαίνεται αυτό στην πράξη - απλό παράδειγμα

Έστω:

- ▶ GSHP 50 kW, πεδίο 8 γεωτρήσεων $\times$ 100 m
- ▶ Ετήσια θερμική άντληση από έδαφος: $Q_{annual} = 120MWh$
- ▶ Ετήσια ηλιακή θερμότητα προς έδαφος: $Q_{solar} = 30MWh$ (% 25)

Χωρίς ηλιακό, μετά από 10 χρόνια το μοντέλο δίνει πτώση μέσης θερμοκρασίας εδάφους κατά ~ 3 K.

Με solar regeneration, η καθαρή πτώση μπορεί να είναι ~ 1 K ή και μικρότερη.

Αυτό μεταφράζεται σε:

- ▶ περίπου **+0.3-0.5** μονάδες στον COP
- ▶ ή/και **20-30 m** λιγότερο συνολικό βάθος γεωτρήσεων στον αρχικό σχεδιασμό.

Παράδειγμα Ελλάδας

GSHP 120 kW στη Βόρεια Ελλάδα

- ▶ θερμοκρασία εδάφους: 15°C
- ▶ κατακόρυφες γεωτρήσεις: 14 × 90 m
- ▶ SCOP = 4.7

Εφαρμογές Κτιρίων

- ▶ ενδοδαπέδια θέρμανση
- ▶ fan coils
- ▶ ZNX
- ▶ θέρμανση/ψύξη ξενοδοχείων
- ▶ σχολικά κτίρια

Μελέτη Περίπτωσης 50 kW

- ▶ Σύστημα A/W, R32
- ▶ Εξωτερική $5^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{COP} = 3.8$
- ▶ Θέρμανση ενδοδαπέδιας $35\text{-}40^{\circ}\text{C}$
- ▶ Εξοικονόμηση έναντι πετρελαίου: ~60%.

Βιβλιογραφία

1. Eskilson, P. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. PhD Thesis, University of Lund.
(Βασικό έργο: G-functions, θεμέλιο όλων των GSHP μοντέλων)
2. Kavanaugh, S. & Rafferty, K. (2014). *Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*. ASHRAE.
(Πρακτικός σχεδιασμός GSHP & borefields)
3. ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment (Chapter: GSHP).
(Στάνταρ διεθνής τεχνική τεκμηρίωση)
4. IGSHPA (2017). *Design and Installation Standards for GSHP Systems*.
(Κανόνες εγκατάστασης & μελέτης)
5. Lamarche, L., & Beauchamp, B. (2007). *A fast algorithm for g-functions using the Finite Line Source model*. Geothermics.
(Κορυφαία εργασία υπολογισμού G-functions)
6. Claesson, J. & Javed, S. (2011). *A load-aggregation method to calculate extraction temperatures of borehole heat exchangers*. ASHRAE Transactions.
(Σύγχρονη μαθηματική μεθοδολογία GSHP)
7. Safa, A., Fung, A., & Kumar, R. (2015). *Performance of a hybrid solar-geothermal heat pump system*. Energy and Buildings.
(Βασική πηγή για Solar Regeneration)
8. Nam, Y., & Ooka, R. (2012). *Energy and exergy analysis of solar-assisted GSHP systems*. Renewable Energy.
(Αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων)
9. Hellström, G. (1991). *Ground Heat Storage: Thermal Analysis of Duct Storage Systems*.
(TRT, thermal drift, long-term behavior)
10. Cengel & Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*.
(Βασική θερμοδυναμική - COP, Carnot, ψυκτικός κύκλος)