



ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ – ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Αλεξάνδρα Μπαρμπατζά



Μεγέθη Υπολογισμού

-Εφαρμογή σε κτίριο για την κάλυψη των αναγκών του κτιρίου με τη χρήση ΓΑΘ

- *Κάθετος Εναλλάκτης*
 - ✓ Υπολογισμός του βάθους της γεώτρησης που απαιτείται

- *Οριζόντιος Εναλλάκτης*
 - ✓ Υπολογισμός του μήκους των σωληνώσεων που απαιτούνται

- Υπολογισμός της ισχύος της αντλίας θερμότητας

- Υπολογισμός της διαμέτρου και του υλικού των σωληνώσεων



Σύγκριση Κάθετου και Οριζόντιου Εναλλάκτη

-Κάθετος Εναλλάκτης

- Σε μεγάλα βάθη η θερμοκρασία του εδάφους παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και ίση με το μέσο όρο των χειμερινών και θερινών μέσων θερμοκρασιών της ατμόσφαιρας
- Μικρότερες απαιτήσεις σε γη (μόνο περίπου $23,23 - 27,87\text{m}^2/\text{RT}$) σε σχέση με τους οριζόντιους εναλλάκτες που οι απαιτήσεις σε γη είναι της τάξης των $232,25\text{m}^2/\text{RT}$

(RT= Refrigeration Tons όπου $1 \text{ RT} = 3,517 \text{ KW}$)

-Οριζόντιος Εναλλάκτης

- Πιο εύκολη εγκατάσταση



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

- Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος της γεώτρησης, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος για τη διαδικασία της διάτρησης του εδάφους και ακολούθως αυξάνεται το μήκος της σωλήνωσης
- Για μεγάλες εφαρμογές > 50RT είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι ακριβείς ιδιότητες του εδάφους

-Υπό εξέταση ιδιότητες του εδάφους

- Θερμική Αγωγιμότητα
- Θερμική Διαχυτότητα

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου βάθους θα χρησιμοποιηθεί η προτεινόμενη από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) μεθοδολογία, η οποία περιγράφεται στην ακόλουθη αναφορά:

Steve Kavanaugh, Kevin Rafferty, Design of Geothermal Systems For Commercial and Institutional Buildings ASHRAE, Atlanta 1997.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Μέση Ετήσια Ροή Θερμότητας στο έδαφος

$$q_a = \frac{C_{fc} \cdot q_{lc} \cdot EFL_{hoursc} + C_{fh} \cdot q_{lh} \cdot EFL_{hoursh}}{T_a}$$

όπου:

q_{lc} και q_{lh} το ονομαστικό ψυκτικό και θερμικό φορτίο του κτιρίου αντίστοιχα σε Btu/h (το ψυκτικό φορτίο εισάγεται με αρνητικό πρόσημο στην ανωτέρω σχέση)

EFL_{hoursc} και EFL_{hoursh} οι ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου ψύξης και θέρμανσης ετησίως

C_{fc} και C_{fh} διορθωτικοί συντελεστές που σχετίζονται με τους συντελεστές COP και EER αντίστοιχα

T_a το ετήσιο χρονικό διάστημα σε ώρες (8.760h).



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Ορισμός COP και EER

Οι όροι **COP** (συντελεστής απόδοσης) και **EER** (δείκτης ενεργειακής απόδοσης) περιγράφουν τη θερμική και ψυκτική απόδοση της εκάστοτε μονάδας. Δείχνουν την αναλογία θέρμανσης ή ψύξης που παρέχεται από μια μονάδα σε σχέση με την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή της. Έτσι, εάν ένα κλιματιστικό παράγει 5 kW θερμότητας καταναλώνοντας 1 kW ηλεκτρικής ενέργειας, ο COP του θεωρείται ότι είναι 5.0. Παρομοίως, εάν ένα κλιματιστικό παράγει 5 kW ψύξης καταναλώνοντας 1 kW ηλεκτρικής ενέργειας, ο EER θεωρείται επίσης ότι είναι 5.0. Όσο υψηλότεροι είναι οι συντελεστές COP και EER, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το κλιματιστικό.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Ισοδύναμες ώρες θέρμανσης και ψύξης

Οι ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου EFL_{hoursc} και EFL_{hoursh} μπορούν να περιγραφούν ως το ποσό ωρών που θα λειτουργούσε με πλήρες φορτίο ένα σύστημα σχεδιασμένο για το μέγιστο φορτίο θέρμανσης κατά τη διάρκεια ενός έτους:

$$EFL_{\text{hoursc}} = \frac{E_c}{q_{lc}} \quad \& \quad EFL_{\text{hoursh}} = \frac{E_h}{q_{lh}}$$

όπου:

q_{lc} και q_{lh} το ονομαστικό (μέγιστο) ψυκτικό και θερμικό φορτίο του κτηρίου αντίστοιχα

E_c και E_h οι ετήσιες καταναλώσεις ενέργειας σε ψύξη και θέρμανση.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Διορθωτικοί συντελεστές C_{fc} και C_{fh}

Οι διορθωτικοί συντελεστές C_{fc} και C_{fh} σχετίζονται με τους χαρακτηριστικούς συντελεστές EER και COP της αντλίας θερμότητας αντίστοιχα. Οι τιμές τους, βάσει της μεθόδου της ASHRAE, δίνονται από τον πίνακα:

| Διορθωτικοί συντελεστές αντλιών θερμότητας | | | |
|--|----------|-------------------|----------|
| E.E.R. (ψύξη) | C_{fc} | C.O.P. (θέρμανση) | C_{fh} |
| 11,0 | 1,31 | 3,0 | 0,75 |
| 13,0 | 1,26 | 3,5 | 0,77 |
| 15,0 | 1,23 | 4,0 | 0,80 |
| 17,0 | 1,20 | 4,5 | 0,82 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα υπολογισμού του q_a

Έστω:

$$q_{lc} = -22.520 \text{ Btu/h}$$

$$q_{lh} = 18.255 \text{ Btu/h}$$

$$EFL_{\text{hoursc}} = 1.100 \text{ h}$$

$$EFL_{\text{hoursh}} = 1.100 \text{ h}$$

$$C_{fc} = 1,26$$

$$C_{fh} = 0,76$$

$$\dots q_a =$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα υπολογισμού του q_a

Έστω:

$$q_{lc} = -22.520 \text{ Btu/h}$$

$$q_{lh} = 18.255 \text{ Btu/h}$$

$$EFL_{\text{hoursc}} = 1.100 \text{ h}$$

$$EFL_{\text{hoursh}} = 1.100 \text{ h}$$

$$C_{fc} = 1,26$$

$$C_{fh} = 0,76$$

$$\dots q_a = -1820,95 \text{ Btu/h}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

| Τύπος | Υλικό | Εξωτερική διάμετρος (mm) | Πάχος τοιχώματος (mm) | Θερμική αγωγιμότητα (W/(m.K)) | Θερμική αντίσταση ((K.m)/W) |
|-----------------|---------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| PE DN25 PN8 | Πολυαιθυλένιο | 25,0 | 2,0 | 0,42 | 0,066 |
| PE DN32 PN8 | Πολυαιθυλένιο | 32,0 | 2,0 | 0,42 | 0,051 |
| PE DN40 PN8 | Πολυαιθυλένιο | 40,0 | 2,3 | 0,42 | 0,046 |
| PE DN50 PN8 | Πολυαιθυλένιο | 50,0 | 2,9 | 0,42 | 0,047 |
| PE DN20 PN12 | Πολυαιθυλένιο | 20,0 | 2,0 | 0,42 | 0,085 |
| PE DN25 PN12 | Πολυαιθυλένιο | 25,0 | 2,3 | 0,42 | 0,077 |
| PE DN32 PN12 | Πολυαιθυλένιο | 32,0 | 3,0 | 0,42 | 0,079 |
| PE DN40 PN12 | Πολυαιθυλένιο | 40,0 | 3,7 | 0,42 | 0,078 |
| PE DN50 PN12 | Πολυαιθυλένιο | 50,0 | 4,6 | 0,42 | 0,077 |
| SDR-11 3/4" " | Πολυαιθυλένιο | 26,7 | 2,5 | 0,42 | 0,079 |
| SDR-11 1" " | Πολυαιθυλένιο | 33,4 | 3,0 | 0,42 | 0,075 |
| SDR-11 1-1/4" " | Πολυαιθυλένιο | 42,2 | 3,9 | 0,42 | 0,077 |
| SDR-11 1-1/2" " | Πολυαιθυλένιο | 48,3 | 4,4 | 0,42 | 0,076 |
| SDR-11 2" " | Πολυαιθυλένιο | 60,3 | 5,5 | 0,42 | 0,076 |
| SDR-13 1" " | Πολυαιθυλένιο | 28,6 | 2,2 | 0,22 | 0,121 |
| SDR-13 1-1/4" " | Πολυαιθυλένιο | 34,9 | 2,6 | 0,22 | 0,117 |
| SDR-13 1-1/2" " | Πολυαιθυλένιο | 41,3 | 3,1 | 0,22 | 0,118 |
| SDR-13 2" " | Πολυαιθυλένιο | 54,0 | 4,0 | 0,22 | 0,116 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

- Η διάμετρος της σωλήνωσης σχετίζεται με τη μεταφερόμενη ισχύ από τον κλιματιζόμενο χώρο προς το έδαφος και την παροχή του μέσου.
- Προκειμένου η ροή να είναι στρωτή, η ταχύτητα της ροής δε θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 – 1,5m/sec.

Η μεταφερόμενη θερμική ισχύς και η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου σχετίζονται με τη σχέση:

$$q_{lc} = \dot{m} \cdot C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo}) \quad (\text{υπολογισμός βάσει ψύξης})$$

$$q_{lh} = \dot{m} \cdot C_V \cdot (t_{wo} - t_{wi}) \quad (\text{υπολογισμός βάσει θέρμανσης})$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

όπου:

\dot{m} η παροχή μάζας του νερού μέσα στη σωλήνωση

$C_v = 4,184 \text{ KJoule}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ η ειδική θερμότητα του νερού

t_{wi} η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο γεωθερμικό εναλλάκτη

t_{wo} η θερμοκρασία εξόδου του νερού από το γεωθερμικό εναλλάκτη.

Η απόλυτη τιμή της διαφοράς θερμοκρασίας $|t_{wi}-t_{wo}|$ επιλέγεται από την αντλία θερμότητας του συστήματος συνήθως να ισούται με 4K.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

Η παροχή όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

όπου ρ πυκνότητα του νερού ίση με 1000 Kg/m^3

Η ταχύτητα της ροής δίνεται από:

$$\dot{V} = u \cdot A \Leftrightarrow \dot{V} = u \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Leftrightarrow u = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2}$$

Από την ανωτέρω σχέση επιλέγεται η διάμετρος της σωλήνωσης, ώστε η ταχύτητα ροής να μην υπερβαίνει το **1 – 1,5m/sec**, ώστε να επιτυγχάνεται στρωτή ροή.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

Έστω ψυκτικό φορτίο $q_{lc} = 22.520 \text{ Btu/h} = 6,60 \text{ kW}$ (1 BTU/hr = 0.00029307107 kW)

Υπολογισμός παροχής μάζας: (1W= 1J/s)

$$q_{lc} = \dot{m} \cdot C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo}) \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{q_{lc}}{C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo})} \Leftrightarrow$$
$$\dot{m} = \frac{6,60 \frac{\text{kJoule}}{\text{sec}}}{4,184 \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 4\text{K}} \Leftrightarrow \dot{m} = 0,394 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

Υπολογισμός παροχής όγκου:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \Leftrightarrow \dot{V} = \frac{0,394\text{kg/sec}}{1.000\text{kg/m}^3} \Leftrightarrow \dot{V} = 0,394 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$$

- Η συνολική παροχή όγκου θα διαμοιραστεί στις γεωτρήσεις που θα διανοιχτούν και στους βρόχους που θα εγκατασταθούν σε κάθε γεώτρηση.
- **Ο αριθμός των γεωτρήσεων, με βάση την ακολουθούμενη μεθοδολογία, προκύπτει ίσος με το φορτίο σε RT.**
- (1RT = 3,517kW και 1RT = 12.000,503Btu/h)

Συνεπώς:

Επειδή το ψυκτικό φορτίο $q_{lc} = 22.520\text{Btu/h} = 1,877\text{RT}$, θα χρειαστούν δύο (2) γεωτρήσεις.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

Στην περίπτωση του διπλού βρόχου σε κάθε γεώτρηση, η συνολική παροχή θα μοιραστεί σε τέσσερις κατακόρυφους εναλλάκτες:

$$\dot{V}_{\beta\rho} = \dot{V}/4 = 0,394 \cdot 10^{-3} / 4 \text{ m}^3/\text{sec} = 0,0985 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

- Έστω ονομαστική διάμετρος σωλήνωσης 1-1/2". Η εσωτερική διάμετρος θα είναι:

$$d_i = 48,3\text{mm} - 2 \cdot 4,4\text{mm} \Leftrightarrow d_i = 39,5\text{mm}$$

Υπολογισμός της ταχύτητα ροής:

$$u = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2} \Leftrightarrow u = \frac{4 \cdot 0,0985 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{sec}}{\pi \cdot 0,0395^2 \text{ m}^2} \Leftrightarrow u = 0,080 \text{ m} / \text{sec}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί σωλήνωση PE DN32 PN12, η εσωτερική διάμετρος θα είναι:

$$d_i = 32\text{mm} - 2 \cdot 3\text{mm} \Leftrightarrow d_i = 26\text{mm}$$

και αντίστοιχα η ταχύτητα ροής θα υπολογιστεί ίση με:

$$u = 0,1856 \text{ m/sec}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

Το απαιτούμενο συνολικό μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη βάσει του ψυκτικού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (C_{fc} \cdot q_{lc}) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$

όπου:

R_{ga} , R_{gm} , R_{gd} : ισοδύναμες θερμικές αντιστάσεις εδάφους για ετήσιο, μηνιαίο και ημερήσιο παλμό αντίστοιχα (σε $h \cdot ft \cdot ^\circ F / Btu$)

R_b : θερμική αντίσταση σωλήνωσης - γεώτρησης (σε $h \cdot ft \cdot ^\circ F / Btu$)

PLF_m : ο μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου

F_{sc} : ο συντελεστής θερμικών απωλειών του κυκλώματος των σωληνώσεων

t_g : η θερμοκρασία του εδάφους (σε $^\circ F$)



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

t_{wi} : η θερμοκρασία εισόδου του υγρού στη γεωθερμική αντλία (σε °F)

t_{wo} : η θερμοκρασία εξόδου του υγρού από τη γεωθερμική αντλία (σε °F)

t_p : διορθωτικός συντελεστής για τη θερμοκρασία εδάφους λόγω της παρεμβολής παρακείμενων σωληνώσεων (σε °F)

Αντίστοιχα, το απαιτούμενο συνολικό μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη βάσει του θερμικού φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (C_{fh} \cdot q_{lh}) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Οι ισοδύναμες θερμικές αντιστάσεις του εδάφους R_{ga} , R_{gm} , R_{gd} δίνονται από τις σχέσεις:

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{k_g} \quad R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{k_g} \quad R_{gd} = \frac{G_2}{k_g}$$

όπου:

k_g : η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους σε $Btu/(h \cdot ft \cdot ^\circ F)$

G_1 , G_2 , G_f : συντελεστές που δίνονται από την παρακάτω σχέση ($i=1, 2, f$):

$$G_i = 0,0769 \cdot \ln(F_{oi}) + 0,0901$$

όπου:

F_{oi} , $i=1, 2, f$ αδιάστατοι αριθμοί Fourier.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Ο αδιάστατος αριθμός Fourier δίνεται από τη σχέση:

$$F_o = \frac{4 \cdot a_g \cdot \tau}{d^2}$$

όπου

a_g : η θερμική διαχυτότητα του εδάφους σε $\text{ft}^2/\text{ημέρα}$

τ : χρονική κλίμακα (χρονικός παλμός) επίδρασης της θερμοκρασίας του εδάφους από το γεωθερμικό εναλλάκτη σε ημέρες

d : η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης του εναλλάκτη σε ft .



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Η θερμική αγωγιμότητα k_g και η θερμική διαχυτότητα a_g του εδάφους δίνονται από τον παρακάτω πίνακα της ASHRAE:

| Τύπος πετρώματος | Συχνότητα εμφάνισης στη γη (%) | Θερμική αγωγιμότητα K-100% (Btu/hft°F) | Θερμική αγωγιμότητα K-80% (Btu/hft°F) | Ειδική θερμότητα C_p (Btu/hft°F) | Πυκνότητα ρ (lb/ft ³) | Θερμική διαχυτότητα α (ft ² /day) |
|-------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Πυρηγενή πετρώματα | | | | | | |
| Γρανίτης (10% χαλαζίας) | 10,4 | 1,1-3,0 | 1,3-4,9 | 0,21 | 165 | 0,9-4,3 1,0-1,4 |
| Γρανίτης (25% χαλαζίας) | | | 1,5-2,1 | | | |
| Αμφιβολίτης | 42,8 | 1,1-2,7 | 1,5-2,2 | 0,12 | 175-195 | 1,1-4,7 0,7-0,9 0,65-1,15 0,85-1,5 |
| Ανδεσίτης | | 0,8-2,8 | 0,9-1,6 | | 160 | |
| Βασάλτης | | 1,2-1,4 | | | 0,17-0,21 | |
| Gabbro (Cen. Plains) | | 0,9-1,6 | | 0,18 | 185 | |
| Gabbro (Rocky Mtns) | | 1,2-2,1 | | | | |
| Διορίτης | 11,2 | 1,2-1,9 | 1,2-4,7 | 0,22 | 180 | 0,7-1,0 |
| Γρανοδιορίτης | | 1,2-2,0 | | 0,21 | 170 | 0,8-4,3 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Η θερμική αγωγιμότητα k_g και η θερμική διαχυτότητα a_g του εδάφους δίνονται από τον παρακάτω πίνακα της ASHRAE:

| Τύπος πετρώματος | Συχνότητα εμφάνισης στη γη (%) | Θερμική αγωγιμότητα $K-100\%$ (Btu/hft ^{°F}) | Θερμική αγωγιμότητα $K-80\%$ (Btu/hft ^{°F}) | Ειδική θερμότητα C_p (Btu/hft ^{°F}) | Πυκνότητα ρ (lb/ft ³) | Θερμική διαχυτότητα α (ft ² /day) |
|--------------------------|--------------------------------|--|---|---|--|---|
| Ιζημετογενή πετρώματα | | | | | | |
| Claystone | | 1,1-4,7 | | | | |
| Δολομίτης | | 0,9-3,6 | 1,6-3,6 | 0,21 | 170-475 | 1,1-2,3 |
| Ασβεστόλιθος | | 0,8-3,6 | 1,4-2,2 | 0,22 | 150-475 | 1,0-4,4 |
| Rock Salt | | 3,7 | | 0,2 | 130-435 | |
| Χαλαζιακή άμμος | 1,7 | 1,2-2,0 | | 0,24 | 160-470 | 0,7-4,2 |
| Siltstone | | 0,8-1,4 | | | | |
| Wet shale (25% χαλαζίας) | 4,2 | 0,6-2,3 | 1,0-4,8 | 0,21 | 130-165 | 0,9-1,2 |
| Wet shale (0% χαλαζίας) | | | 0,6-0,9 | | | 0,5-0,6 |
| Dry shale (25% χαλαζίας) | | | 0,8-4,4 | | | 0,7-1,0 |
| Dry shale (0% χαλαζίας) | | | 0,5-0,8 | | | 0,45-0,55 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Η θερμική αγωγιμότητα k_g και η θερμική διαχυτότητα a_g του εδάφους δίνονται από τον παρακάτω πίνακα της ASHRAE:

| Τύπος πετρώματος | Συχνότητα εμφάνισης στη γη (%) | Θερμική αγωγιμότητα K-100% (Btu/hft°F) | Θερμική αγωγιμότητα K-80% (Btu/hft°F) | Ειδική θερμότητα Cp (Btu/hft°F) | Πυκνότητα ρ (lb/ft ³) | Θερμική διαχυτότητα α (ft ² /day) |
|-------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Μεταμορφωγενή πετρώματα | | | | | | |
| Γνευσίτης | 21,4 | 1,0-3,3 | 1,3-2,0 | 0,22 | 160-175 | 0,9-1,2 |
| Μάρμαρο | 0,9 | 1,2-3,2 | 1,2-1,9 | 0,22 | 170 | 0,8-1,2 |
| Χαλαζίας | | 3,0-4,0 | | 0,2 | 160 | 2,2-3,0 |
| Σχιστόλιθος (schist) | 5,1 | 1,2-2,6 | 1,4-2,2 | | 170-200 | |
| Σχιστόλιθος (slate) | | 0,6-4,5 | | 0,22 | 170-475 | 0,6-0,9 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους δεν μένει σταθερή.

Στα συστήματα οριζόντιου βρόχου, οι σωληνώσεις βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της γης, όπου η θερμοκρασία αλλάζει εποχιακά.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο γεωθερμικός εναλλάκτης επηρεάζει τη θερμοκρασία εδάφους ως εξής:

- **Μακροπρόθεσμη Επίδραση:** Αυτή είναι η αλλαγή στην επίγεια θερμοκρασία κατά τη διάρκεια πολλών ετών. Για παράδειγμα, η επίγεια θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί κατά 6°F σε 10 έτη λόγω της θερμότητας που προστίθεται από τον εναλλάκτη.
- **Ετήσια Επίδραση:** Κατά τη διάρκεια ενός έτους, το φορτίο θερμότητας σε ένα τομέα γεώτρησης θα αλλάξει και αυτό θα έχει επιπτώσεις στην επίγεια θερμοκρασία σε μηνιαία βάση.
- **Βραχυπρόθεσμη Επίδραση:** Το πραγματικό ωριαίο φορτίο έχει επίσης επιπτώσεις στη δυνατότητα του τομέα των γεωτρήσεων να διαλύσει την θερμότητα. Έτσι, η επίγεια θερμοκρασία θα αλλάξει με το ωριαίο φορτίο.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Επομένως οι τρεις αυτές χρονικές επιδράσεις πρέπει να υπολογιστούν, ώστε να ληφθούν υπόψη οι μακροπρόθεσμες αλλαγές θερμότητας στο χώμα, που μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, και να βρεθεί έτσι επακριβώς το απαραίτητο μήκος σωλήνων.

Έτσι εισάγονται οι τιμές αντίστασης R_{ga} (ετήσια), R_{gm} (μηνιαία) και R_{gd} (καθημερινή), που είναι υπολογισμένες με βάση τρεις διαφορετικούς παλμούς:

- ένα δεκαετή παλμό των 3.650 ημερών
- ένα μηνιαίο παλμό των 30 ημερών
- ένα 6ωρο παλμό του 25% της ημέρας

Οι τρεις αυτοί χρόνοι ορίζονται ως εξής:

- $\tau_1 = 3.650$ ημέρες
- $\tau_2 = 3.650 + 30 = 3.680$ ημέρες
- $\tau_f = 3.650 + 30 + 0,25 = 3.680,25$ ημέρες



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

Συνεπώς ο αριθμός Fourier για τον κάθε παλμό υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{o1} = \frac{4 \cdot a_g \cdot (\tau_f - \tau_1)}{d^2}$$

$$F_{o2} = \frac{4 \cdot a_g \cdot (\tau_f - \tau_2)}{d^2}$$

$$F_{of} = \frac{4 \cdot a_g \cdot \tau_f}{d^2}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων εδάφους

Έστω έδαφος με τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$k_g = 1,5 \text{ Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$$

$$a_g = 1,4 \text{ ft}^2/\text{ημέρα}$$

$$d \approx 1,0 \text{ in} = 0,083 \text{ ft} \quad (1 \text{ m} = 39,3 \text{ in} \text{ και } 1 \text{ ft} = 12 \text{ in})$$

Οι χρονικές σταθερές υπολογίζονται:

$$\tau_f - \tau_1 = 3.680,25 - 3.650 = 30,25 \text{ ημέρες}$$

$$\tau_f - \tau_2 = 3.680,25 - 3.680 = 0,25 \text{ ημέρες}$$

$$\tau_f = 3.680,25 \text{ ημέρες}$$

Οι τρεις αδιάστατοι αριθμοί Fourier προκύπτουν:

$$F_{o1} = 24.589,93$$

$$F_{o2} = 203,22$$

$$F_{of} = 2.991.638,84$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων εδάφους

Οι συντελεστές G υπολογίζονται από τη σχέση $G_i = 0,0769 \cdot \ln(F_{oi}) + 0,0901$:

$$G_1 = 0,8675$$

$$G_2 = 0,4987$$

$$G_f = 1,2367$$

Και στη συνέχεια υπολογίζονται οι θερμικές αντιστάσεις του εδάφους:

$$R_{ga} = 0,2461 \text{ (h} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F)/Btu}$$

$$R_{gm} = 0,2459 \text{ (h} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F)/Btu}$$

$$R_{gd} = 0,3325 \text{ (h} \cdot \text{ft} \cdot \text{°F)/Btu}$$



Υπολογισμός του βάρους γεώτρησης που απαιτείται

-Μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου

Ο μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου ορίζεται ως το ποσοστό λειτουργίας της εγκατάστασης ως προς ισχύ και χρόνο, σε σχέση με τη διαρκή λειτουργία της εγκατάστασης σε ονομαστικό φορτίο.

Εκτιμάται ως εξής για την περίπτωση ενός επαγγελματικού χώρου:

- Έστω ότι μία μονάδα δεν θα δουλεύει κατά τη διάρκεια της νύχτας δηλαδή το 50% του χρόνου.
- Κατά τις υπόλοιπες 12 ώρες θεωρούμε ότι η μονάδα λειτουργεί το 60% του χρόνου. Άρα τελικά ο εξοπλισμός θα λειτουργεί σε 30% των συνολικών ωρών αν ο χώρος χρησιμοποιούνται επτά ημέρες την εβδομάδα.
- Τέλος θεωρούμε ότι ο χώρος χρησιμοποιείται 5 μέρες την εβδομάδα (αντί για επτά)

Συνεπώς ο μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου θα δοθεί από τη σχέση:

$$PLF_m = 0,30 \cdot (5/7) = 0,21$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

- Η θερμική αντίσταση της σωλήνωσης και της γεώτρησης είναι συνάρτηση αφενός του υλικού και του πάχους της σωλήνωσης και αφετέρου του υλικού πλήρωσης της γεώτρησης.
- Εκφράζει την αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας από το ρευστό εντός του εναλλάκτη προς το έδαφος, διαμέσου της σωλήνωσης και της γεώτρησης.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμοκρασία εδάφους

- Η θερμοκρασία εδάφους είναι ισχυρά εξαρτώμενη από τη γεωγραφική περιοχή της μελέτης.
- Έχει διαπιστωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, συνήθως μέχρι τα 5m, ενώ έχουν μηδενική επίδραση κάτω των 31m.
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας στα 2m βάθος από την επιφάνεια του εδάφους δεν μεταβάλλεται περισσότερο από $\pm 2^{\circ}\text{C}$ κατά τη διάρκεια του έτους.
- Όλα αυτά εξαρτώνται βέβαια και από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού του υπεδάφους.
- Από τη διεθνή βιβλιογραφία δίνεται για το υπέδαφος της Αθήνας μέση ετήσια θερμοκρασία ίση με $67^{\circ}\text{F} = 19,4^{\circ}\text{C}$.

Μετατροπές μονάδων:

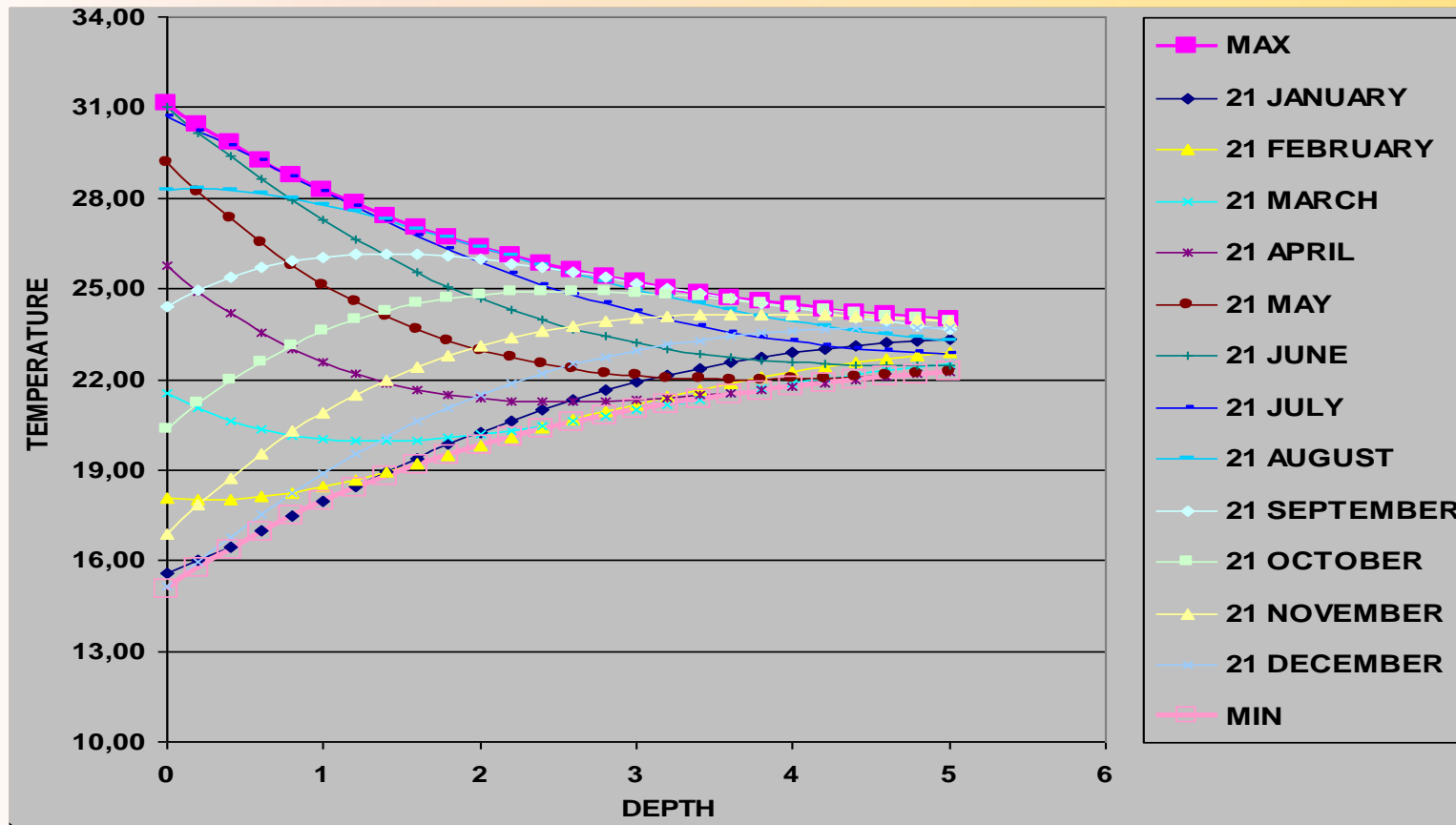
$$\Theta(^{\circ}\text{C}) = [\Theta(^{\circ}\text{F}) - 32] \cdot 5/9.$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμοκρασία εδάφους

Καμπύλες μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας υπεδάφους συναρτήσει του βάθους (θεωρούμε μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα 23°C)





Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμοκρασία εδάφους

| State | City | GWT (F) | State/Country | City | GWT (F) | State/Country | City | GWT (F) |
|-------------|---------------|---------|----------------------|----------------|---------|------------------------|--------------|---------|
| Alabama | Birmingham | 65 | South Carolina | Charleston | 66 | Germany | Frankfurt | 52 |
| Alabama | Mobile | 70 | South Carolina | Columbia | 64 | Germany | Hamburg | 51 |
| Alabama | Montgomery | 67 | South Carolina | Greenville | 62 | Germany | Munich | 49 |
| Alaska | Anchorage | 40 | South Dakota | Sioux Falls | 51 | Germany | Stuttgart | 51 |
| Alaska | Fairbanks | 0 | Tennessee | Knoxville | 61 | Greece | Athens | 67 |
| Arizona | Phoenix | 73 | Tennessee | Memphis | 63 | Hungary | Budapest | 53 |
| Arkansas | Little Rock | 64 | Tennessee | Nashville | 60 | Indonesia | Jakarta | 83 |
| California | Fresno | 68 | Texas | Austin | 71 | Ireland | Dublin | 52 |
| California | Los Angeles | 64 | Texas | Dallas | 68 | Israel | Jerusalem | 63 |
| California | Sacramento | 67 | Texas | Houston | 71 | Italy | Genova | 60 |
| California | San Diego | 64 | Texas | San Antonio | 72 | Italy | Milan | 57 |
| California | San Francisco | 60 | Utah | Salt Lake City | 53 | Italy | Naples | 63 |
| Colorado | Denver | 52 | Vermont | Burlington | 46 | Italy | Palermo | 66 |
| Connecticut | Hartford | 51 | Virginia | Norfolk | 61 | Italy | Rome | 61 |
| Delaware | Dover | 57 | Virginia | Richmond | 60 | Italy | Torino | 58 |
| Florida | Daytona Beach | 70 | Virginia | Roanoke | 59 | Italy | Trieste | 58 |
| Florida | Jacksonville | 71 | DC | Washington | 57 | Italy | Venice | 58 |
| Florida | Miami | 78 | Washington | Seattle | 53 | Japan | Nagoya | 62 |
| Florida | Tallahassee | 69 | Washington | Spokane | 49 | Japan | Osaka | 63 |
| Florida | Tampa | 75 | West Virginia | Charleston | 58 | Japan | Sapporo | 51 |
| Georgia | Atlanta | 62 | Wisconsin | La Crosse | 48 | Japan | Tokyo | 64 |
| Georgia | Savannah | 67 | Wisconsin | Milwaukee | 47 | Korea | Inch'on | 56 |
| Hawaii | Honolulu | 79 | Wyoming | Cheyenne | 48 | Korea | Pusan | 59 |
| Idaho | Boise | 47 | Alberta | Calgary | 42 | Korea | Seoul | 57 |
| Illinois | Chicago | 51 | Alberta | Edmonton | 40 | Kuwait | Kuwait City | 80 |
| Illinois | Springfield | 56 | British Columbia | Vancouver | 53 | Libyan Arab Jamahiriya | Tripoli | 71 |
| Indiana | Fort Wayne | 53 | Manitoba | Winnipeg | 40 | Malaysia | George Town | 84 |
| Indiana | Indianapolis | 55 | New Brunswick | Moncton | 42 | Malaysia | Kuala Lumpur | 83 |
| Iowa | Des Moines | 53 | Newfoundland | Saint John's | 43 | Mexico | Acapulco | 78 |
| Kansas | Wichita | 59 | Nova Scotia | Halifax | 45 | Mexico | Mexico City | 65 |
| Ohio | Cincinnati | 57 | Ontario | Ottawa | 45 | Mexico | Veracruz | 75 |
| Kentucky | Lexington | 60 | Ontario | Toronto | 48 | Morocco | Casablanca | 66 |
| Kentucky | Louisville | 60 | Prince Edward Island | Charlottetown | 42 | Netherlands | Amsterdam | 52 |
| Louisiana | New Orleans | 70 | Quebec | Montreal | 46 | New Zealand | Auckland | 56 |
| Louisiana | Shreveport | 66 | Saskatchewan | Regina | 39 | New Zealand | Christchurch | 54 |
| Maine | Caribou | 46 | Argentina | Buenos Aires | 64 | New Zealand | Wellington | 57 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμοκρασία εδάφους

| | | | | | | | | |
|----------------|---------------|----|----------------|------------|----|----------------------|------------|----|
| Maine | Portland | 48 | Australia | Adelaide | 64 | Norway | Oslo | 46 |
| Maryland | Baltimore | 57 | Australia | Brisbane | 72 | Paraguay | Asuncion | 64 |
| Massachusetts | Boston | 50 | Australia | Canberra | 67 | Peru | Lima | 70 |
| Massachusetts | Worcester | 50 | Australia | Melbourne | 59 | Philippines | Manila | 67 |
| Michigan | Detroit | 50 | Australia | Perth | 67 | Poland | Krakow | 48 |
| Michigan | Flint | 49 | Australia | Sydney | 67 | Poland | Warsaw | 49 |
| Michigan | Grand Rapids | 46 | Austria | Salzburg | 51 | Portugal | Porto | 64 |
| Minnesota | Duluth | 41 | Austria | Vienna | 50 | Puerto Rico | San Juan | 84 |
| Minnesota | Minneapolis | 47 | Bahrain | Manama | 80 | Qatar | Doha | 83 |
| Mississippi | Jackson | 67 | Belgium | Brussels | 52 | Romania | Bucharest | 54 |
| Missouri | Kansas City | 58 | Bolivia | La Paz | 50 | Saudi Arabia | Riyadh | 82 |
| Missouri | St. Louis | 58 | Brazil | Belem | 82 | Singapore | Singapore | 82 |
| Montana | Billings | 49 | Brazil | Brasilia | 80 | Spain | Barcelona | 62 |
| Montana | Helena | 47 | Brazil | Recife | 78 | Spain | Madrid | 60 |
| Nebraska | Omaha | 53 | Brazil | Sao Paulo | 78 | Spain | Sevilla | 67 |
| Nevada | Las Vegas | 69 | Bulgaria | Sofia | 55 | Spain | Valencia | 65 |
| Nevada | Reno | 50 | Chile | Santiago | 61 | Sweden | Stockholm | 47 |
| New Hampshire | Concord | 50 | China | Beijing | 58 | Switzerland | Geneva | 53 |
| New Jersey | Trenton | 55 | China | Guangzhou | 77 | Syria | Damascus | 71 |
| New Mexico | Albuquerque | 59 | China | Harbin | 53 | Taiwan | Taipei | 75 |
| New York | Albany | 50 | China | Hong Kong | 77 | Thailand | Bangkok | 85 |
| New York | Buffalo | 50 | China | Shanghai | 62 | Tunisia | Tunis | 69 |
| New York | New York City | 52 | China | Shenyang | 55 | Turkey | Ankara | 52 |
| North Carolina | Asheville | 59 | Colombia | Bogota | 58 | Turkey | Istanbul | 60 |
| North Carolina | Charlotte | 62 | Cuba | Havana | 77 | Turkey | Izmir | 64 |
| North Carolina | Greensboro | 60 | Czech Republic | Prague | 50 | United Arab Emirates | Abu Dhabi | 80 |
| North Carolina | Raleigh | 62 | Denmark | Copenhagen | 47 | United Arab Emirates | Dubai | 80 |
| North Dakota | Bismarck | 44 | Ecuador | Quito | 60 | United Kingdom | Aberdeen | 49 |
| North Dakota | Fargo | 42 | Egypt | Aswan | 78 | United Kingdom | Belfast | 51 |
| Ohio | Cleveland | 51 | Egypt | Cairo | 73 | United Kingdom | Birmingham | 52 |
| Ohio | Columbus | 55 | Finland | Helsinki | 47 | United Kingdom | Edinburgh | 50 |
| Ohio | Dayton | 50 | France | Bordeaux | 61 | United Kingdom | Liverpool | 54 |
| Oklahoma | Oklahoma City | 62 | France | Lyon | 57 | United Kingdom | London | 54 |
| Oregon | Portland | 54 | France | Marseille | 59 | Uruguay | Montevideo | 64 |
| Pennsylvania | Harrisburg | 52 | France | Nantes | 56 | Venezuela | Caracas | 78 |
| Pennsylvania | Philadelphia | 55 | France | Paris | 54 | Vietnam | Hanoi | 84 |
| Pennsylvania | Pittsburgh | 52 | Germany | Berlin | 52 | Yugoslavia | Belgrade | 55 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου του υγρού

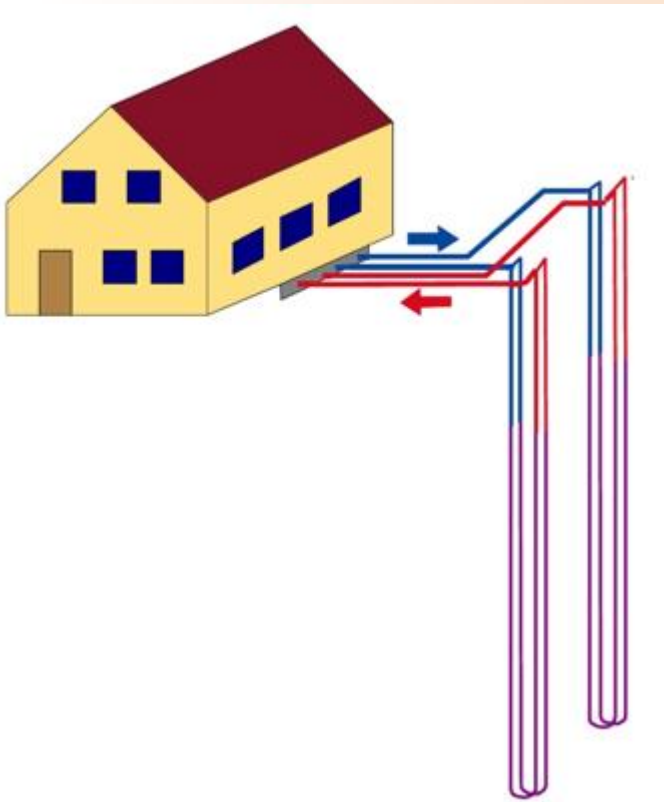
- Οι θερμοκρασίες εισόδου t_{wi} και εξόδου t_{wo} του υγρού στο γεωθερμικό εναλλάκτη εξαρτώνται από τη ρύθμιση της αντλίας θερμότητας και από τη θερμοκρασία του εδάφους.
- Έστω ότι η αντλία θερμότητας ρυθμίζεται ώστε $|t_{wi}-t_{wo}|=4^{\circ}\text{C}$.
- Η θερμοκρασία t_{wi} κατά τη διαδικασία της ψύξης μπορεί να πάρει τιμές από 80 έως 95°F. Τούτο ρυθμίζεται επίσης από την αντλία θερμότητας και είναι παράμετρος επιλογής.
- Η θερμοκρασία t_{wi} κατά τη διαδικασία της θέρμανσης μπορεί να πάρει τιμές από 35 έως 60°F. Τούτο ρυθμίζεται επίσης από την αντλία θερμότητας και είναι παράμετρος επιλογής.
- Η θερμοκρασία t_{wo} υπολογίζεται αντίστοιχα από τη ρυθμισμένη θερμοκρασιακή διαφορά $|t_{wi}-t_{wo}|$.
- Η θερμοκρασία t_{wo} κατά την ψύξη δεν μπορεί να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία εδάφους.
- Η θερμοκρασία t_{wi} κατά τη θέρμανση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εδάφους.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Συντελεστής θερμικών απωλειών F_{sc}

Εκφράζει τη θερμότητα που χάνεται μεταξύ των παρακείμενων σωληνώσεων στην ίδια γεώτρηση και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:



| Παροχή ανά σωλήνωση (gpm) | Αριθμός βρόγχων ανά γεώτρηση | | |
|---------------------------|------------------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 1,06 | 1,03 | 1,02 |
| 3 | 1,04 | 1,02 | 1,01 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

Έστω ψυκτική διαδικασία με:

- Θερμοκρασία εδάφους $t_g = 65^\circ\text{F}$
- $t_{wi} - t_{wo} = 4^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία εισόδου του υγρού στον εναλλάκτη $t_{wi} = 85^\circ\text{F} = 29,4^\circ\text{C}$.
- Συνεπώς υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του υγρού από τον εναλλάκτη ίση με $t_{wo} = t_{wi} - 4^\circ\text{C} = 25,4^\circ\text{C} = 77,7^\circ\text{F}$
- Έχουμε επίσης ήδη υπολογίσει από πριν την παροχή όγκου ανά βρόχο:
 $\dot{V}_{\beta\rho} = 0,0985 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec} = 1,561 \text{gpm}$
- Τέλος εφόσον έχω την παροχή και για δύο βρόχους ανά γεώτρηση, από τον πίνακα προκύπτει $F_{sc} = 1,03$.

Ισοδυναμίες μονάδων:

$$1 \text{gallon} = 3,785 \text{lt}$$

$$1 \text{gpm (gallon per minute)} = 3,785 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/60 \text{sec} \quad \Leftrightarrow$$

$$1 \text{gpm} = 0,0631 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$$



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

Ο πίνακας δίνει τη θερμική αντίσταση σωλήνωσης σε $h \cdot ft \cdot ^\circ F / Btu$

| Διάμετρος σωλήνωσης τύπου U | SDR | Παροχή νερού άνω των 2 gpm | Παροχή μίγματος 20% γλυκόλης 3 gpm | Παροχή μίγματος 20% γλυκόλης 5 gpm | Παροχή μίγματος 20% γλυκόλης 10 gpm |
|-----------------------------|--------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 3/4 in | SDR 11 | 0,09 | 0,12 | - | - |
| | SDR 9 | 0,11 | 0,15 | - | - |
| | SDR 40 | 0,10 | 0,14 | - | - |
| 1 in | SDR 11 | 0,09 | 0,14 | 0,10 | - |
| | SDR 9 | 0,11 | 0,15 | 0,12 | - |
| | SDR 40 | 0,10 | 0,16 | 0,11 | - |
| 1-1/4 in | SDR 11 | 0,09 | 0,15 | 0,12 | 0,09 |
| | SDR 9 | 0,11 | 0,17 | 0,15 | 0,11 |
| | SDR 40 | 0,09 | 0,15 | 0,12 | 0,09 |
| 1-1/2 in | SDR 11 | 0,09 | 0,16 | 0,15 | 0,09 |
| | SDR 9 | 0,11 | 0,18 | 0,17 | 0,11 |
| | SDR 40 | 0,08 | 0,14 | 0,14 | 0,08 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

Διόρθωση θερμικής αντίστασης. Με κίτρινο φόντο δεν συνιστάται.

| Αγωγιμότητα εδάφους (Btu/(h·ft·°F)) | 0,9 | | 1,3 | | | 1,7 | |
|---|------|-------|------|------|-------|------|------|
| Αγωγιμότητα υλικού πλήρωσης γεώτρησης (Btu/(h·ft·°F)) | 0,5 | 2 | 0,5 | 1 | 2 | 0,5 | 1 |
| Διάμετρος γεώτρησης 4 in | | | | | | | |
| 3/4 in σωλήνωση τύπου U | 0,11 | -0,05 | 0,14 | 0,03 | -0,02 | 0,17 | 0,05 |
| 1 in σωλήνωση τύπου U | 0,07 | -0,03 | 0,09 | 0,02 | -0,02 | 0,13 | 0,04 |
| Διάμετρος γεώτρησης 5 in | | | | | | | |
| 3/4 in σωλήνωση τύπου U | 0,14 | -0,06 | 0,18 | 0,04 | -0,04 | 0,21 | 0,06 |
| 1 in σωλήνωση τύπου U | 0,11 | -0,04 | 0,14 | 0,03 | -0,02 | 0,16 | 0,05 |
| 1-1/4 in σωλήνωση τύπου U | 0,06 | -0,03 | 0,09 | 0,02 | -0,02 | 0,12 | 0,04 |
| Διάμετρος γεώτρησης 6 in | | | | | | | |
| 3/4 in σωλήνωση τύπου U | 0,18 | -0,07 | 0,21 | 0,04 | -0,05 | 0,24 | 0,07 |
| 1 in σωλήνωση τύπου U | 0,14 | -0,06 | 0,17 | 0,03 | -0,04 | 0,21 | 0,06 |
| 1-1/4 in σωλήνωση τύπου U | 0,09 | -0,04 | 0,12 | 0,03 | -0,02 | 0,15 | 0,05 |
| 1-1/2 in σωλήνωση τύπου U | 0,07 | -0,03 | 0,09 | 0,02 | -0,02 | 0,11 | 0,04 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

| Υλικό πλήρωσης γεώτρησης | Αγωγιμότητα υλικού πλήρωσης γεώτρησης (Btu/(h·ft·°F)) | Υλικό πλήρωσης γεώτρησης | Αγωγιμότητα υλικού πλήρωσης γεώτρησης (W/(m·K)) |
|---------------------------------------|---|---|---|
| 20% μπετονίτης | 0,42 | Αμμοχάλικο ξηρό | 0,4 |
| 30% μπετονίτης | 0,43 | Νερό στάσιμο | 0,6 |
| Τσιμέντο | 0,40 - 0,45 | Μπετονίτης 10%, νερό | 0,7 |
| Σκυρόδεμα 130/150 lb/ft ³ | 0,60 - 0,80 | Μπετονίτης/ τσιμέντο/ άμμος 9/9/20%, νερό | 0,7 - 0,8 |
| Σκυρόδεμα 50% χαλαζιακή άμμος | 1,10 -1,70 | Υγρή άμμος | 1,0 |
| 20% μπετονίτης - 40% χαλαζίτης | 0,85 | Παγωμένος μπετονίτης 10% | 1,4 |
| 30% μπετονίτης - 30% χαλαζίτης | 0,70 - 0,75 | Μπετονίτης/ χαλαζίτης 12/50%, νερό | 1,5 |
| 30% μπετονίτης - 30% σιδηρομετάλλευμα | 0,45 | Χαλίκι, νερό | 1,8 |
| 60% χαλαζίτης - τέφρα - άμμος | 1,07 | Πάγος | 2,3 |
| | | Τσιμέντο/ άμμος 27%/58%, νερό | 2,4 |
| | | Χαλαζίτης, νερό | 2,4- 2,7 |
| | | Τσιμέντο/ γραφίτης | 2,0 |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

Υπολογισμός θερμικής αντίστασης σωλήνωσης - γεώτρησης:

- Η σωλήνωση PE DN32 PN12 που επιλέγεται προσεγγίζεται από την SDR11 1''
- Για αυτή τη σωλήνωση και για παροχή νερού $\dot{V}_{\beta\rho} = 1,561 \text{ gpm}$ επιλέγεται **από τον πίνακα** θερμική αντίσταση $0,09 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$
- Η διάμετρος της γεώτρησης επιλέγεται 6in για εγκατάσταση διπλού βρόχου σωληνώσεων.
- Για αγωγιμότητα εδάφους $1,3 \text{ Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$ και αγωγιμότητα υλικού πλήρωσης γεώτρησης $1,0 \text{ Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$ επιλέγεται **από τον πίνακα** διόρθωση θερμικής αντίστασης $0,03 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$.
- Συνεπώς η τελική θερμική αντίσταση υπολογίζεται $R_b = (0,09 + 0,03)$
 $\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu} = 0,12 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

Η μέθοδος υπολογισμού του βάθους που απαιτείται για τις γεωτρήσεις βασίζεται κατά πολύ στην εκτίμηση του τελευταίου συντελεστή t_p .

Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει τη μακροπρόθεσμη αλλαγή θερμοκρασίας του εδάφους λόγω της υπερβολικής απόρριψης ή εξαγωγής θερμότητας μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον κατάλληλο πίνακα στο βιβλίο της μεθόδου της ASHRAE που παρουσιάζεται γίνεται η εκτίμηση του συντελεστή αυτού και συγκρίνεται το αναμενόμενο βάθος με το εξαγόμενο από τους υπολογισμούς.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

| Αριθμός ισοδύναμων ωρών (Θέρμανση / Ψύξη) | Απόσταση γεωτρήσεως v (ft) | Θερμοκρασία εδάφους και εισαγωγής υγρού στον εναλλάκτη (°F) | | | | | |
|---|----------------------------------|---|------------|--|------------|--|------------|
| | | $t_g = 50^\circ\text{F} (t_w = 35/80)$ | | $t_g = 60^\circ\text{F} (t_w = 45/85)$ | | $t_g = 70^\circ\text{F} (t_w = 60/95)$ | |
| | | $k_g \text{ (Btu/(h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F))}$ | | | | | |
| | | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| | | Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας εδάφους t_p (°F) - Απαιτούμενο βάθος γεώτρησης ανά RT | | | | | |
| 1.500 / 500 | 15 | -4,4 (318) | -4,4 (248) | - | - | - | - |
| | 20 | -2,3 (276) | -2,3 (216) | - | - | - | - |
| | 25 | -1,2 (258) | -1,2 (202) | - | - | - | - |
| 1.000 / 1.000 | 10 | 12,9 (318) | 11,8 (245) | - | 11,8 (313) | - | - |
| | 15 | 5,4 (237) | 4,3 (186) | 4,7 (245) | 4,7 (225) | - | - |
| | 20 | 3,4 (220) | 1,9 (172) | 2,5 (263) | 2,4 (206) | - | - |
| 500 / 1.500 | 15 | 15,1 (379) | 15,1 (294) | - | 12,8 (345) | - | - |
| | 20 | 7,8 (277) | 8 (216) | 6,7 (326) | 6,7 (254) | 6,7 (336) | 6,7 (259) |
| | 25 | 4,1 (224) | 4,3 (190) | 3,5 (287) | 3,5 (224) | 3,5 (293) | 3,5 (229) |
| 0 / 2.000 | 15 | - | - | - | - | - | - |
| | 20 | - | - | 10,3 (406) | 10,4 (316) | 10,4 (414) | 10,5 (322) |
| | 25 | - | - | 5,4 (325) | 5,5 (252) | 5,4 (332) | 5,5 (257) |



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

Για θερμική αγωγιμότητα εδάφους $k_g = 1,5 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F})$,

$$t_g = 65^\circ\text{F}$$

$$t_{wi} = 85^\circ\text{F}$$

ισοδύναμες ώρες θέρμανσης & ψύξης 1.000 & 1.000

και

απόσταση γεωτρήσεων 20ft,

Επιλέγεται **από τον πίνακα** συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους $t_p = 2,4^\circ\text{F}$.

Το απαιτούμενο βάθος γεώτρησης ανά RT αναμένεται να προκύψει της τάξης του 206 ft/RT.



Υπολογισμός του βάθους γεώτρησης που απαιτείται

-Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

Έχοντας πλέον υπολογίσει και επιλέξει όλα τα απαιτούμενα μεγέθη, μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος γεώτρησης:

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (C_{fc} \cdot q_{lc}) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p} \Leftrightarrow$$

$$= \frac{(-1820,95 \frac{Btu}{h} * 0,2461 \frac{h*ft*^{\circ}F}{Btu}) + [1,26 * (-22.520 \frac{Btu}{h}) * [0,12 \frac{h*ft*^{\circ}F}{Btu} + (0,21 * 0,2459 \frac{h*ft*^{\circ}F}{Btu}) + (0,3325 \frac{h*ft*^{\circ}F}{Btu} * 1,03)]}{65^{\circ}F - \frac{85^{\circ}F + 77,7^{\circ}F}{2} - 2,4^{\circ}F}$$

$$\Rightarrow L_c = 801,93 \text{ ft} = 244,43 \text{ m} \quad (1\text{ft}=0.3048 \text{ m})$$

Με βάση την απαιτούμενη ψυκτική ισχύ ($q_{lc} = 1,88RT = 6,6\text{kW}$), υπολογίζεται ότι απαιτούνται 427,2ft/RT ή 27 W/m εναλλάκτη.

Έχοντας επιλέξει δύο γεωτρήσεις με διπλό βρόχο, το βάθος κάθε γεώτρησης προκύπτει $244,43\text{m}/(4) = 61,10\text{m}$.



Υπολογισμός δικτύου

-Πτώση πίεσης στο υδραυλικό δίκτυο

Το επόμενο στάδιο είναι να υπολογιστούν οι απώλειες πίεσης μέσα στο γεωθερμικό εναλλάκτη θερμότητας καθώς και στο συνολικό κύκλωμα των σωληνώσεων με σκοπό την επιλογή του κατάλληλου κυκλοφορητή.

Οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των παρακάτω απωλειών:

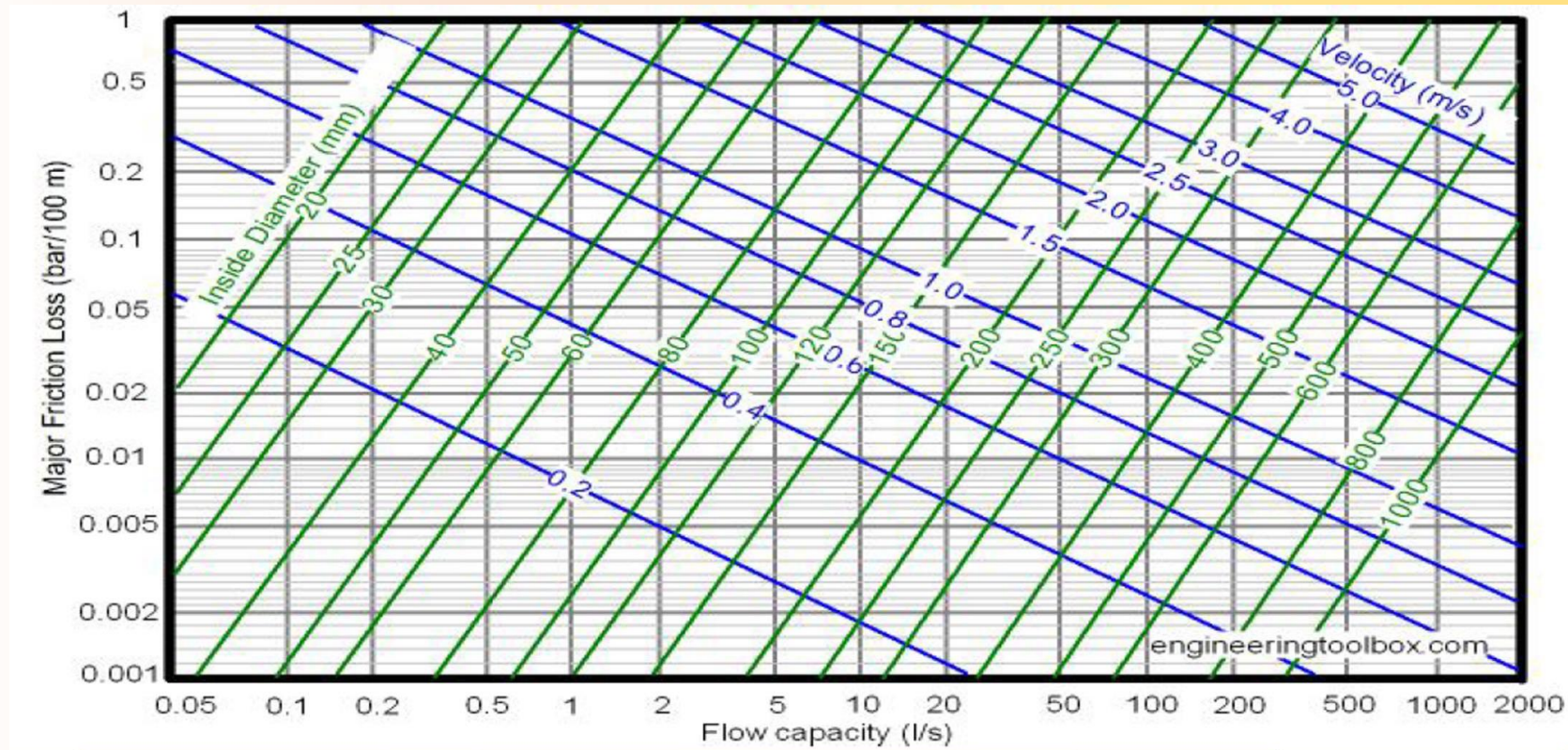
- γραμμικές απώλειες γεωθερμικών εναλλακτών
- απώλειες ενδιάμεσου δικτύου (μέχρι την αντλία θερμότητας)
- τοπικές απώλειες πίεσης δικτύου γεωτρήσεων με τυπική τιμή ίση με 0,005bar
- τοπικές απώλειες πίεσης ΓΑΘ με τυπική τιμή 0,25-0,3bar
- τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων με τυπική τιμή 0,2bar.



Υπολογισμός δικτύου

-Πτώση πίεσης στον εναλλάκτη

- Οι σωληνώσεις είναι κατασκευασμένες από ενισχυμένης πυκνότητας πολυαιθυλένιο, υλικό που συνηθίζεται στις γεωθερμικές εφαρμογές λόγω των σημαντικών ιδιοτήτων του στη μεταφορά θερμότητας.
- Το ακόλουθο διάγραμμα δίνει την απώλεια πίεσης σε bar ανά 100 μέτρα σωλήνωσης, σε σχέση με την παροχή, την ταχύτητα και τη διάμετρο της σωλήνωσης.





Υπολογισμός δικτύου

-Πτώση πίεσης στον εναλλάκτη

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα οι απώλειες πίεσης ανά 100m σωλήνωσης, όσο αφορά το τμήμα του κάθετου γεωεναλλάκτη θερμότητας, για παροχή ρευστού $V_{br}=0,0985\text{lt/sec}$ και $d_{in}=26\text{mm}$, θα είναι: $\Delta p/100\text{m}=0,028\text{bar}$.
- Επειδή οι σωληνώσεις στις 2 γεωτρήσεις είναι παράλληλες, η πτώση πίεσης είναι ίδια και έτσι υπολογίζεται για τον ένα γεωθερμικό εναλλάκτη θερμότητας.
- Το μήκος του κάθε εναλλάκτη θα είναι 122,2m (το μισό του βάθους της γεώτρησης).
- Έτσι οι γραμμικές απώλειες πίεσης θα είναι $0,028*(122,2/100)=0,034\text{ bar}$.



Υπολογισμός δικτύου

-Πτώση πίεσης στο ενδιάμεσο δίκτυο

- Το υδραυλικό δίκτυο από την έξοδο της γεώτρησης ως την είσοδο της αντλίας θερμότητας ονομάζεται ενδιάμεσο δίκτυο.
- Οι απώλειες του δικτύου αυτού θα υπολογιστούν με την τιμή που θα προκύψει από το παραπάνω διάγραμμα, πολλαπλασιασμένη με το συνολικό μήκος του δικτύου αυτού.
- Η παροχή στο μέρος αυτό του συστήματος ισούται με τη συνολική παροχή του δικτύου $V=0,394\text{lt/sec}$ ενώ η εσωτερική διάμετρος των σωληνώσεων επιλέγεται να είναι 60mm.
- Η πτώση πίεσης από το διάγραμμα προκύπτει $\Delta p/100\text{m}=0,008\text{ bar}$.
- Έστω ότι το ενδιάμεσο δίκτυο των σωληνώσεων έως την πιο απομακρυσμένη γεώτρηση από την αντλία θερμότητας έχει μήκος 100m.
- Οι απώλειες πίεσης στο ενδιάμεσο δίκτυο προκύπτουν ίσες με 0,008bar.



Υπολογισμός δικτύου

-Συνολική πτώση πίεσης

Οι συνολικές απώλειες του συστήματος θα είναι ίσες με το άθροισμα των παρακάτω επιμέρους απωλειών:

- τοπικές απώλειες πίεσης δικτύου γεωτρήσεων: 0,005bar
- τοπικές απώλειες πίεσης ΓΑΘ: 0,3bar
- τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων: 0,2bar
- γραμμικές απώλειες πίεσης γεωεναλλάκτη: 0,034bar
- γραμμικές απώλειες πίεσης στο ενδιάμεσο δίκτυο: 0,008bar

Το άθροισμα των ανωτέρω απωλειών πίεσης δίνει τη συνολική πτώση πίεσης στο συνολικό υδραυλικό δίκτυο:

- συνολική πτώση πίεσης: 0,547bar = 5,58m H₂O.

Μετατροπές μονάδων:

- 1bar = 10,197162m H₂O.

Με τη συνολική πτώση πίεσης και τη συνολική παροχή επιλέγεται ο κυκλοφορητής του υδραυλικού δικτύου.



Υπολογισμός δικτύου

-Δοχείο Διαστολής

Σε κάθε υδραυλικό σύστημα είναι απαραίτητη η ύπαρξη δοχείου διαστολής.

Το δοχείο διαστολής είναι ένα μικρό δοχείο που χρησιμοποιείται σε κλειστά συστήματα θέρμανσης με σκοπό να απορροφά την αύξηση πίεσης του νερού και έτσι να διατηρεί την πίεση του δικτύου σε αποδεκτά όρια.

Η διατήρηση της πίεσης είναι απαραίτητη για:

- να αναπληρώνονται οι απώλειες του νερού του δικτύου που οφείλονται σε τυχόν μικροδιαρροές
- να προλαμβάνεται η θερμική διαστολή του νερού λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του
- να μην δημιουργούνται υποπίεσεις οι οποίες γίνονται αιτία ατμοποιήσεων στο δίκτυο
- να αποτρέπεται η σπηλαίωση στην αναρρόφηση των κυκλοφορητών



Σπηλαιώση

-Τι είναι η σπηλαιώση?

Η σπηλαιώση συμβαίνει στα υγρά όταν η πίεση μέσα στον κύλινδρο του κινητήρα ή σε έναν αγωγό είναι μικρότερη από την ταξινομημένη πίεση βρασμού. Αν η σπηλαιώση συμβαίνει πάνω σε στερεή επιφάνεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή των τοιχωμάτων του υλικού.



Σπηλαιώση σε τροχό αντλίας



Φθορά από σπηλαιώση σε τουρμπίνα



Υπολογισμός δικτύου

-Δοχείο Διαστολής

Ο όγκος του δοχείου διαστολής δίνεται από τη σχέση:

$$V_t = V_s \cdot \frac{\left(\frac{v_2}{v_1}\right) - 1}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)}$$

όπου:

V_t : ο όγκος του δοχείου διαστολής σε m^3

V_s : ο όγκος του νερού στην εγκατάσταση σε m^3

t_1 : η χαμηλότερη θερμοκρασία του δικτύου ($0^\circ C$)

t_2 : η υψηλότερη θερμοκρασία του δικτύου ($50^\circ C$)

P_1 : η χαμηλότερη πίεση του δικτύου σε kPa

P_2 : η υψηλότερη πίεση του δικτύου σε kPa

v_1 : ο ειδικός όγκος του νερού στη χαμηλότερη θερμοκρασία σε m^3/kg

v_2 : ο ειδικός όγκος του νερού στην υψηλότερη θερμοκρασία σε m^3/kg .



Υπολογισμός δικτύου

-Δοχείο Διαστολής

Ο όγκος του νερού στην εγκατάσταση είναι άθροισμα δύο μεγεθών:
του όγκου στις σωληνώσεις του γεωθερμικού εναλλάκτη
του όγκου στις σωληνώσεις του κάθετου συστήματος

Θεωρώντας και στις δύο περιπτώσεις τις σωληνώσεις ως απλούς κυλίνδρους έχουμε:

$$V_{\gamma.\epsilon\nu.} = 4 \cdot L_{\gamma.\epsilon\nu.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} \Leftrightarrow$$

$$V_{\gamma.\epsilon\nu.} = 4 * 122,2 \frac{\pi * 0,026^2}{4} = 0,259 \text{ m}^3$$

$$V_{\epsilon\nu.\delta.} = L_{\epsilon\nu.\delta.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} \Leftrightarrow V_{\epsilon\nu.\delta.} = 100 \cdot \frac{\pi \cdot 0,060^2}{4} \Leftrightarrow V_{\epsilon\nu.\delta.} = 0,2826 \text{ m}^3$$

Συνεπώς ο συνολικός όγκος νερού στο δίκτυο είναι ίσος με: $0,5416 \text{ m}^3$



Υπολογισμός δικτύου

-Δοχείο Διαστολής

Ο ειδικός όγκος του νερού σε πίεση 1atm και στη θερμοκρασία των 0°C είναι $v_1=0,0010002\text{m}^3/\text{kg}$ ενώ στη θερμοκρασία των 50°C είναι $v_2=0,0010121\text{m}^3/\text{kg}$.

Ως χαμηλότερη πίεση λαμβάνεται η απαραίτητη στατική πίεση του δικτύου προσαυξημένη κατά 0,7bar ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος να παρουσιαστεί υποπίεση, ατμοποίηση ή σπηλαίωση.

Η ελάχιστη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης λαμβάνεται 2m (0,2bar).

Συνεπώς, η χαμηλότερη πίεση στο δίκτυο λαμβάνεται:
 $P_1=0,7+0,2=0,9\text{bar}=90\text{kPa}$.

Ως υψηλότερη πίεση λαμβάνεται το άνω επιτρεπτό όριο πίεσης πριν το άνοιγμα της βαλβίδας ασφαλείας. Αυτή σύμφωνα με τις προδιαγραφές πρέπει να είναι η χαμηλότερη πίεση προσαυξημένη με το πολύ επιπλέον 1,3 bar.

Συνεπώς: $P_2 = P_1+1,3\text{bar} =2,2\text{bar} =220\text{kPa}$.



Υπολογισμός δικτύου

-Δοχείο Διαστολής

Μετά τον καθορισμό των απαιτούμενων μεγεθών, υπολογίζεται ο όγκος του δοχείου διαστολής:

$$V_t = V_s \cdot \frac{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1}}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)} \Leftrightarrow V_t = 0,347 \cdot \frac{\left(\frac{0,0010121}{0,0010002}\right)^{-1}}{1 - \left(\frac{90}{220}\right)} \Leftrightarrow V_t = 0,007 \text{ m}^3$$

