



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

Διαστασιολόγηση γεωθερμικού εναλλάκτη

Πρόγραμμα Διά Βίου Μάθηση

Καινοτόμες Τεχνολογίες Εφαρμογών Α.Π.Ε.
και Εξοικονόμησης Ενέργειας



Συνδιοργάνωση:

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Πειραιά
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Αθήνας

Μεγέθη υπολογισμού

- Η μελέτη για την κάλυψη των αναγκών ενός κτηρίου με γεωθερμική αντλία θερμότητας περιλαμβάνει σαν πρώτο βήμα τον υπολογισμό του απαιτούμενου βάθους των γεωτρήσεων που θα χρειαστούν (κάθετος εναλλάκτης) ή το μήκος του σωληνώσεων που θα απαιτηθούν (οριζόντιος εναλλάκτης).
- Στη συνέχεια υπολογίζονται τα λοιπά μεγέθη της εγκατάστασης, τα οποία είναι:
 - ισχύς αντλίας θερμότητας
 - διάμετρος και υλικό σωληνώσεων



Διαστασιολόγηση κάθετου εναλλάκτη



Μεγέθη υπολογισμού

- Η μελέτη για την κάλυψη των αναγκών ενός κτηρίου με γεωθερμική αντλία θερμότητας περιλαμβάνει σαν πρώτο βήμα τον υπολογισμό του απαιτούμενου βάθους των γεωτρήσεων που θα χρειαστούν (κάθετος εναλλάκτης) ή το μήκος του σωληνώσεων που θα απαιτηθούν (οριζόντιος εναλλάκτης).
- Στη συνέχεια υπολογίζονται τα λοιπά μεγέθη της εγκατάστασης, τα οποία είναι:
 - ισχύς αντλίας θερμότητας
 - διάμετρος και υλικό σωληνώσεων.

Χαρακτηριστικά κάθετου εναλλάκτη

- Ο κάθετος γεωθερμικός εναλλάκτης 2 σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον οριζόντιο γεωθερμικό εναλλάκτη:
 - 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.
 - Οι οριζόντιοι εναλλάκτες, παρόλο που είναι ευκολότερο να εγκατασταθούν, απαιτούν σημαντικά περισσότερη περιοχή (περίπου $232,25\text{m}^2/\text{RT}$) από άλλους τύπους εναλλακτών. Αντίθετα οι κάθετοι βρόχοι απαιτούν μόνο περίπου $23,23 - 27,87\text{m}^2/\text{RT}$.

Βάθος γεώτρησης κάθετου εναλλάκτη

- ❑ Το βάθος της γεώτρησης επηρεάζει άμεσα το κόστος του συστήματος. Μεγαλύτερο βάθος γεώτρησης σημαίνει μεγαλύτερες δαπάνες διάτρησης και μεγαλύτερο μήκος σωλήνα.
- ❑ Επομένως ο ακριβής υπολογισμός του βάθους γεώτρησης είναι πολύ σημαντικός στην επίτευξη μιας ακριβής εκτίμησης του κόστους εγκατάστασης του συστήματος.
- ❑ Για μεγάλες (50RT και άνω) εφαρμογές, πρέπει να εξεταστεί το χώμα ώστε να διαπιστωθούν ακριβώς οι ιδιότητες του εδάφους.
- ❑ Το πλεονέκτημα στη δοκιμή είναι ότι τα ακριβέστερα στοιχεία εδάφους θα δώσουν στο σχεδιαστή ακριβείς πληροφορίες για τη θερμική αγωγιμότητα, ώστε να μπορέσει να υπολογίσει με μεγαλύτερη ασφάλεια το απαιτούμενο βάθος γεώτρησης.
- ❑ Επομένως οι εδαφολογικές ιδιότητες, δηλαδή η αγωγιμότητα και η θερμική διαχυτότητα, πρέπει να προέλθουν είτε από μια δοκιμή στην περιοχή της εγκατάστασης (ground testing) είτε από μια ακριβή εκτίμηση.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

- Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου βάθους εφαρμόζεται η μεθοδολογία που προτείνει η ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) και περιγράφεται στην ακόλουθη αναφορά:

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

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Μέση ετήσια ροή θερμότητας

- Σύμφωνα με τη μεθοδολογία, αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το ακόλουθο μέγεθος q_a , το οποίο ονομάζεται «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 κτηρίου αντίστοιχα σε Btu/h (το ψυκτικό φορτίο εισάγεται με αρνητικό πρόσημο στην ανωτέρω σχέση)
- EFL_{hoursc} και EFL_{hoursh} οι ισοδύναμες ώρες σε ολικό φορτίο 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 απαιτούμενου βάθους 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. Υπολογίζεται ως εξής:

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

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 απαιτούμενου βάθους Διορθωτικοί συντελεστής 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			
EER (ψύξη)	C_{fc}	COP (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 απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα υπολογισμού q_a

□ Έστω:

- $q_{lc} = -22.520\text{Btu/h}$
- $q_{lh} = 18.255\text{Btu/h}$
- $EFL_{\text{hoursc}} = 1.100\text{h}$
- $EFL_{\text{hoursh}} = 1.100\text{h}$
- $C_{fc} = 1,26$
- $C_{fh} = 0,76.$

□ Αντικαθιστώντας στη σχέση υπολογισμού της μέσης ετήσιας ροής θερμότητας έχουμε:

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

$$q_a = \frac{1,26 \cdot (-22.520\text{Btu/h}) \cdot 1.100\text{h} + 0,76 \cdot 18.255\text{Btu/h} \cdot 1.100\text{h}}{8.760\text{h}} \Leftrightarrow$$

$$q_a = -1.820,95\text{Btu/h}$$

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους 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 απαιτούμενου βάθους Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

- Η διάμετρος της σωλήνωσης έχει να κάνει με τη μεταφερόμενη ισχύ από τον κλιματιζόμενο χώρο προς το έδαφος και την παροχή του μέσου.
- Η επιλογή της διαμέτρου είναι τέτοια, ώστε συναρτήσει της απαιτούμενης μεταφερόμενης παροχής εντός των σωληνώσεων, η ταχύτητα ροής να μην υπερβαίνει το 1 – 1,5m/sec, ώστε να επιτυγχάνεται στρωτή ροή.
- 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 απαιτούμενου βάθους 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 θερμοχωρητικότητα 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.
- Από τις ανωτέρω σχέσεις, δοθείσης της $|t_{wi} - t_{wo}|$ και του θερμικού φορτίου, υπολογίζεται τελικά η απαιτούμενη παροχή μάζας εντός της σωλήνωσης.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

- Από την παροχή μάζας υπολογίζεται η παροχή όγκου με τη σχέση:

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

- Η ταχύτητα της ροής σχετίζεται με τη διατομή και τη διάμετρο της σωλήνωσης από τη σχέση:

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

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

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Έστω φορτίο ψύξης $q_{lc} = 22.520 \text{ Btu/h} = 6,60 \text{ kW}$
- Παροχή μάζας:

$$q_{lc} = \dot{m} \cdot C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo}) \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{q_{lc}}{C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo})} \Leftrightarrow$$

$$\dot{m} = \frac{6,60 \frac{\text{kJoule}}{\text{sec}}}{4,184 \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 4\text{K}} \Leftrightarrow \dot{m} = 0,394 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Παροχή 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 αυτή παροχή όγκου θα διαμοιραστεί στις γεωτρήσεις που θα διανοιχτούν και στους βρόγχους που θα εγκατασταθούν σε κάθε γεώτρηση.
- Ο αριθμός των γεωτρήσεων, με βάση την ακολουθούμενη μεθοδολογία, προκύπτει ίσος με το φορτίο σε RT.
- $1RT = 3,517\text{kW}$ και $1RT = 12.000,503\text{Btu/h}$.
- Για το παράδειγμα που αναφέρθηκε:
 - ψυκτικό φορτίο $q_{ic} = 22.520\text{Btu/h} = 1,877RT$.
 - άρα ο αριθμός των γεωτρήσεων επιλέγεται ίσος με 2.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Αν επιπλέον επιλέξουμε να έχουμε διπλό βρόγχο σε κάθε γεώτρηση, τότε η συνολική παροχή θα μοιραστεί σε τέσσερις κατακόρυφους εναλλάκτες, οπότε θα προκύψει ίση με:

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

- Έστω ονομαστική διάμετρος σωλήνωσης 1-1/2". Η εσωτερική διάμετρος θα είναι:
 $d_i = 48,3\text{mm} - 2 \cdot 4,4\text{mm} \Leftrightarrow d_i = 39,5\text{mm}$
- 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 απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Αν επιλέξουμε σωλήνωση PE DN32 PN12, η εσωτερική διάμετρος θα είναι:

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

- Ταχύτητα ροής:

$$u = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2} \Leftrightarrow u = \frac{4 \cdot 0,0985 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{sec}}{\pi \cdot 0,032^2 \text{ m}^2} \Leftrightarrow u = 0,122 \text{ m} / \text{sec}$$

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

- Ο υπολογισμός του απαιτούμενου βάθους γεώτρησης βάσει του ψυκτικού φορτίου θα γίνει σύμφωνα με τον τύπο:

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

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 απαιτούμενου βάθους

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)

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

- Ο υπολογισμός του απαιτούμενου βάθους γεώτρησης βάσει του θερμικού φορτίου θα γίνει αντίστοιχα σύμφωνα με τον τύπο:

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

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους 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 απαιτούμενου βάθους

Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

- Ο αδιάστατος αριθμός Fourier ο οποίος αποδεικνύεται τελικά ότι σχετίζεται με τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους 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 απαιτούμενου βάθους Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

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

Rock Type	% ¹ Occurrence in Earth's Crust	k - All ² Ther. Con. Btu/h-ft°F	K - 80% ³ Ther. Con. Btu/h ft-°F	c_p Spec. Heat Btu/lb-°F	ρ Density lb/ft ³	α ($k/\rho c_p$) Ther. Diff. ft ² /day
Igneous Rocks						
Granite (10% Quartz)	10.4	1.1—3.0	1.3-4.9	0.21	165	0.9-4.3
Granite (25% Quartz)			1.5-2.1			1.0-1.4
Amphibolite	42.8	1.1-2.7	1.5-2.2	0.12	175-195	1.1-4.7
Andesite		0.8-2.8	0.9-4.4			
Basalt		1.2-1.4		0.17-0.21	180	0.7-0.9
Gabbro (Cen. Plains)		0.9-1.6		0.18	185	0.65-1.15
Gabbro (Rocky Mtns.)	1.2-2.1		0.85-1.5			
Diorites	11.2	1.2-1.9	1.2-4.7	0.22	180	0.7-1.0
Grandiorites		1.2-2.0		0.21	170	0.8-4.3
Sedimentary Rocks						
Claystone		1.1-4.7				
Dolomite		0.9-3.6	1.6-3.6	0.21	170-475	1.1-2.3
Limestone		0.8-3.6	1.4-2.2	0.22	150-475	1.0-4.4
Rock Salt		3.7		0.20	130-435	
Sandstone	1.7	1.2-2.0		0.24	160-470	0.7-4.2
Siltstone		0.8-1.4				
Wet Shale (25% Qtz.)	4.2	0.6-2.3	1.0-4.8	0.21	130-165	0.9-1.2
Wet Shale (No Qtz.)			0.6-0.9			0.5-0.6
Dry Shale (25% Qtz.)			0.8-4.4			0.7-1.0
Dry Shale (No Qtz.)			0.5-0.8			0.45-0.55
Metamorphic Rocks						
Gneiss	21.4	1.0-3.3	1.3-2.0	0.22	160-175	0.9-1.2
Marble	0.9	1.2-3.2	1.2-1.9	0.22	170	0.8-1.2
Quartzite		3.0-4.0		0.20	160	2.2-3.0
Schist	5.1	1.2-2.6	1.4-2.2		170-200	
Slate		0.9-4.5		0.22	170-475	0.6-0.9

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

- ❑ Η θερμοκρασία του εδάφους δεν μένει σταθερή.
- ❑ Για τους οριζόντιους βρόχους, όπου ο σωλήνας είναι κοντά στην επιφάνεια, η επίγεια 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 απαιτούμενου βάθους

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 απαιτούμενου βάθους

Θερμικές αντιστάσεις εδάφους

- Τελικά ο υπολογισμός του αριθμού Fourier για τον κάθε παλμό γίνεται σύμφωνα με τους τύπους:

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

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

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

Παράδειγμα υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων εδάφους

- Έστω έδαφος με τις ακόλουθες ιδιότητες:
 - $k_g = 1,5 \text{ Btu}/(\text{h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F})$
 - $a_g = 1,4 \text{ ft}^2/\text{ημέρα}$
 - $d = 1,0\text{in} = 0,083\text{ft}$ ($1\text{ft} = 12\text{in}$).
- Οι χρονικές σταθερές υπολογίζονται:
 - $\tau_f - \tau_1 = 3.680,25 - 3.650 = 30,25 \text{ ημέρες}$
 - $\tau_f - \tau_2 = 3.680,25 - 3.680 = 0,25 \text{ ημέρες}$
 - $\tau_f = 3.680,25$.
- Οι τρεις αδιάστατοι αριθμοί Fourier προκύπτουν:
 - $F_{o1} = 24.393,60$
 - $F_{o2} = 201,60$
 - $F_{of} = 2.967.753,60$.

Παράδειγμα υπολογισμού θερμικών αντιστάσεων εδάφους

- Οι συντελεστές G υπολογίζονται από τη σχέση $G_i = 0,0769 \cdot \ln(F_{oi}) + 0,0901$:
 - $G_1 = 0,8669$
 - $G_2 = 0,4982$
 - $G_f = 1,2362$.
- Τελικά υπολογίζονται οι θερμικές αντιστάσεις του εδάφους από τις σχέσεις ορισμού:
 - $R_{ga} = 0,2461 \text{ (h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F)/Btu}$
 - $R_{gm} = 0,2459 \text{ (h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F)/Btu}$
 - $R_{gd} = 0,3321 \text{ (h}\cdot\text{ft}\cdot\text{°F)/Btu}$.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους Μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου

- Εκφράζει το ποσοστό λειτουργίας της εγκατάστασης ως προς ισχύ και χρόνο, σε σχέση με τη διαρκή λειτουργία της 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 λειτουργούσε 30% των συνολικών ωρών αν ο χώρος χρησιμοποιούνταν επτά ημέρες την εβδομάδα.
 - Ο χώρος όμως χρησιμοποιείται 5 μέρες την εβδομάδα κι έτσι ο μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου υπολογίζεται:
$$PLF_m = 0,30 \cdot (5/7) = 0,21.$$

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους 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 προ το έδαφος, διαμέσου της σωλήνωσης και της γεώτρησης.
- Η μεθοδολογία που ακολουθείται δίνει τους ακόλουθους πίνακες για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης σωλήνωσης – γεώτρησης.
- Μετατροπές μονάδων:
 - 1gallon = 3,785lt
 - 1gpm (gallon per minute) = $3,785 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / 60 \text{sec}$ \Leftrightarrow
1gpm = $0,0631 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{sec}$.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

Στον ακόλουθο πίνακα δίνεται η 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
1-1/2in	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 απαιτούμενου βάθους Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

Διόρθωση θερμικής αντίστασης. 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

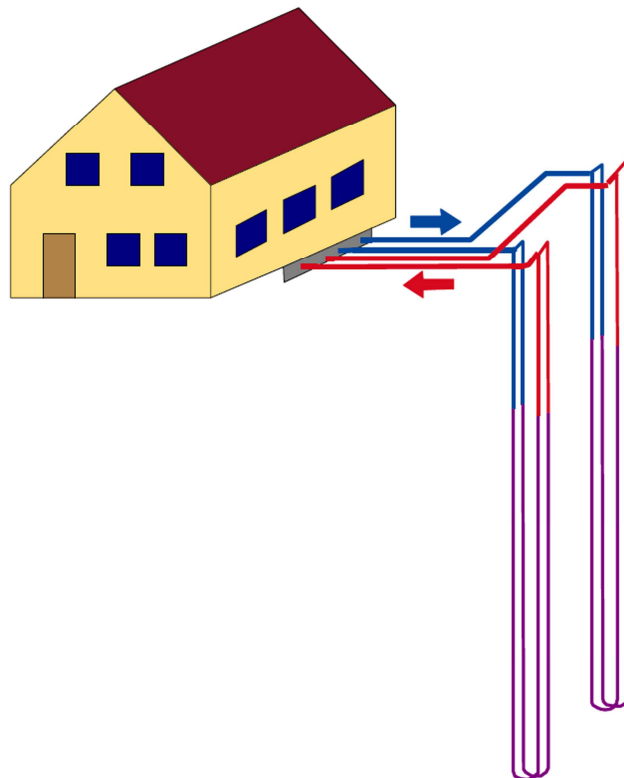
Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους Θερμική αντίσταση σωλήνωσης

Θερμική αγωγιμότητα υλικών πλήρωσης γεωτρήσεων.

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 απαιτούμενου βάθους Συντελεστής θερμικών απωλειών F_{sc}

- Ο συντελεστής θερμικών απωλειών του κυκλώματος των σωληνώσεων F_{sc} , που εκφράζει τη θερμότητα που χάνεται μεταξύ των παρακείμενων σωληνώσεων στην ίδια γεώτρηση υπολογίζεται με βάση 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 απαιτούμενου βάθους

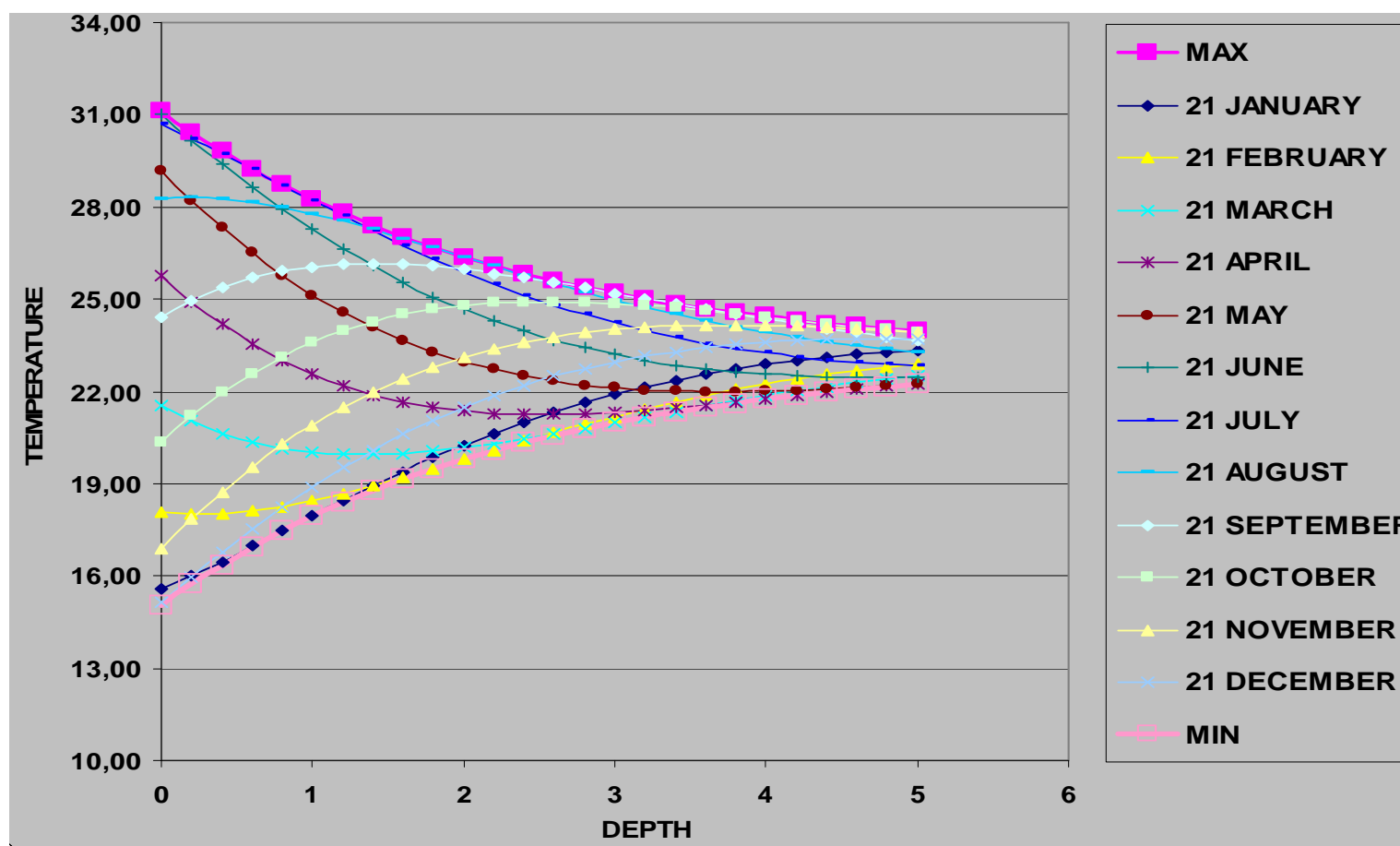
Θερμοκρασία εδάφους

- 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 βάθους 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 απαιτούμενου βάθους

Θερμοκρασία εδάφους

- Καμπύλες μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας υπεδάφους αναλόγως του βάθους, (μέση ετήσια θερμοκρασία αέρα 23°C).



Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους 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 απαιτούμενου βάθους

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	Krakov	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 απαιτούμενου βάθους

Θερμοκρασίες εισόδου – εξόδου 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 $|t_{wi} - t_{wo}| = 4^{\circ}\text{C} = 39,2^{\circ}\text{F}$.
- ❑ 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_{wo} κατά τη θέρμανση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εδάφους.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

- Στο παράδειγμα που αναπτύσσουμε έστω κατά τη διαδικασία της ψύξης:
 - θερμοκρασία εδάφους $t_g = 65^\circ\text{F}$
 - $t_{wi} - t_{wo} = 4^\circ\text{C}$
 - θερμοκρασία εισόδου του υγρού στον εναλλάκτη $T_{wi} = 85^\circ\text{F} = 29,4^\circ\text{C}$.
 - θερμοκρασία εξόδου του από τον εναλλάκτη $t_{wo} = T_{wi} - 4^\circ\text{C} = 25,4^\circ\text{C} = 77,7^\circ\text{F}$
 - για παροχή όγκου ανά βρόγχο: $0,0985 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec} = 1,561 \text{grm}$ και δύο βρόγχους ανά γεώτρηση, $F_{sc} = 1,03$.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

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 επιλέγεται αρχικά θερμική αντίσταση $0,09 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$
 - 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 διόρθωση θερμικής αντίστασης $0,03 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$
 - συνεπώς η τελική θερμική αντίσταση υπολογίζεται $R_b = 0,12 \text{ h}\cdot\text{ft}\cdot^\circ\text{F}/\text{Btu}$.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

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 απαιτούμενου βάθους

Παράδειγμα καθορισμού παραμέτρων

Αριθμός ισοδύναμων ωρών (Θέρμανση / Ψύξη)	Απόσταση γεωτρήσεων (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 (Btu/(h·ft·°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 απαιτούμενου βάθους

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 συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους $2,4^\circ\text{F}$.
- Το απαιτούμενο βάθος γεώτρησης ανά RT αναμένεται να προκύψει της τάξης του 206ft/RT.

Υπολογισμός απαιτούμενου βάθους

Απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη

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

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

$$L_c = \frac{-1.820,95 \cdot 0,2461 - 1,26 \cdot 22.520,12 \cdot (0,12 + 0,21 \cdot 0,2459 + 0,3321 \cdot 1,03)}{65 - \frac{85 + 77,7}{2} - 2,4} \Leftrightarrow$$

$$L_c = 794,95 \text{ft} = 242,30 \text{m}$$

Με βάση την απαιτούμενη ψυκτική ισχύ ($1,88 \text{RT} = 6,6 \text{kW}$), υπολογίζεται ότι απαιτούνται $423,6 \text{ft/RT}$ ή $27,2 \text{W/m}$ εναλλάκτη.

- Έχοντας επιλέξει δύο γεωτρήσεις με διπλό βρόγχο, το βάθος κάθε γεώτρησης προκύπτει $242,3 \text{m}/4 = 60,6 \text{m}$.
- Η διάμετρος της γεώτρησης επιλέγεται 6in για εγκατάσταση διπλού βρόγχου σωληνώσεων.

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 δικτύου
 - 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.

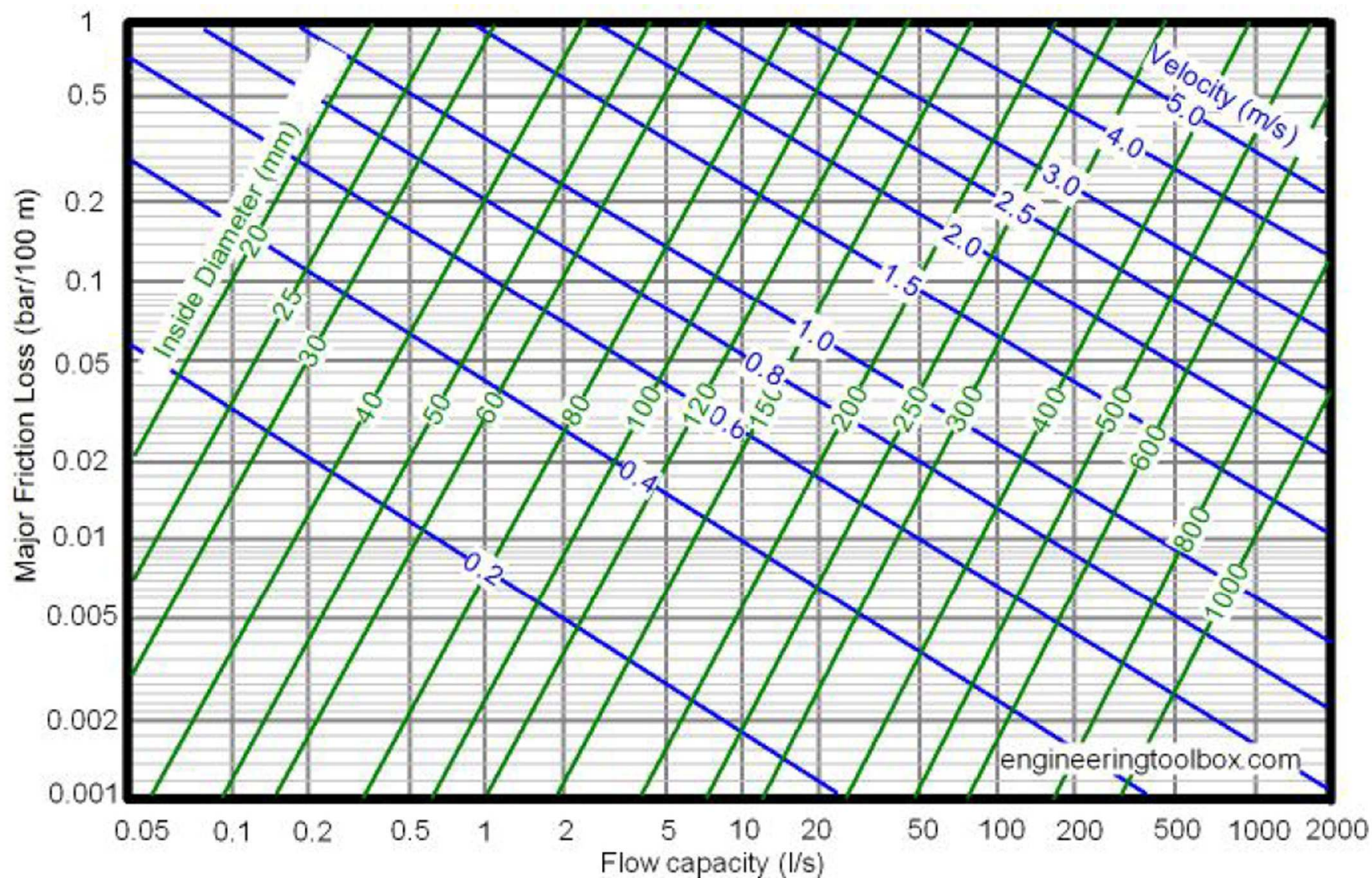
Υπολογισμός δικτύου

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



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 0,0985lt/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 121,2m (διπλάσιο του βάθους της γεώτρησης).
- Έτσι οι γραμμικές απώλειες πίεσης θα είναι 0,034bar.

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 $Q=0,394\text{lt/sec}$ 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 πίεση στο συνολικό υδραυλικό δίκτυο:
 - συνολική πτώση πίεσης: 0,547bar = 5,58m H₂O.
- Μετατροπές μονάδων:
 - 1bar = 10,197162 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 παραλαμβάνεται 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 σπηλαιώση στην αναρόφηση των κυκλοφορητών.

Υπολογισμός δικτύου

Δοχείο διαστολής

- Ο όγκος του δοχείου διαστολής δίνεται από τη σχέση:

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

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

Υπολογισμός δικτύου

Δοχείο διαστολής

όπου:

- \mathbf{v}_1 : ο ειδικός όγκος του νερού στη χαμηλότερη θερμοκρασία σε m^3/kgr
- \mathbf{v}_2 : ο ειδικός όγκος του νερού στην υψηλότερη θερμοκρασία σε m^3/kgr .

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 οριζοντίου συστήματος.
- Θεωρώντας και στις δύο περιπτώσεις τις σωληνώσεις ως απλούς κυλίνδρους έχουμε:

$$V_{\gamma.εν.} = 4 \cdot L_{\gamma.εν.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} \Leftrightarrow V_{\gamma.εν.} = 4 \cdot 121,2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,026^2}{4} \Leftrightarrow V_{\gamma.εν.} = 0,257 \text{m}^3$$

$$V_{εν.δ.} = L_{εν.δ.} \cdot \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} \Leftrightarrow V_{εν.δ.} = 100 \cdot \frac{\pi \cdot 0,060^2}{4} \Leftrightarrow V_{εν.δ.} = 0,090 \text{m}^3$$

- Συνεπώς ο συνολικός όγκος νερού στο δίκτυο είναι ίσος με: $0,347 \text{m}^3$.

Υπολογισμός δικτύου

Δοχείο διαστολής

- Ο ειδικός όγκος του νερού 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 $0,7\text{bar}$ ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος να παρουσιαστεί υποπίεση, ατμοποίηση ή σπηλαιώση.
- Η ελάχιστη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης λαμβάνεται 2m ($0,2\text{bar}$).
- 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:
 $P_2 = P_1+1,3\text{bar} =2,2\text{bar} =220\text{kPa}$.

Υπολογισμός δικτύου

Δοχείο διαστολής

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

$$V_t = V_s \cdot \frac{\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma} - 1}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \Leftrightarrow V_t = 0,347 \cdot \frac{\left(\frac{0,0010121}{0,0010002}\right)^{\gamma} - 1}{1 - \left(\frac{90}{220}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \Leftrightarrow V_t = 0,007 \text{m}^3$$

Σκαρίφημα εγκατάστασης κάθετης ΓΑΘ

