

Πρόγραμμα Διά Βίου Μάθηση

Καινοτόμες Τεχνολογίες Εφαρμογών Α.Π.Ε.
και εξοικονόμησης ενέργειας

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης



Διαστασιολόγηση οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη

Συνδιοργάνωση:

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.Ι. Αθήνας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

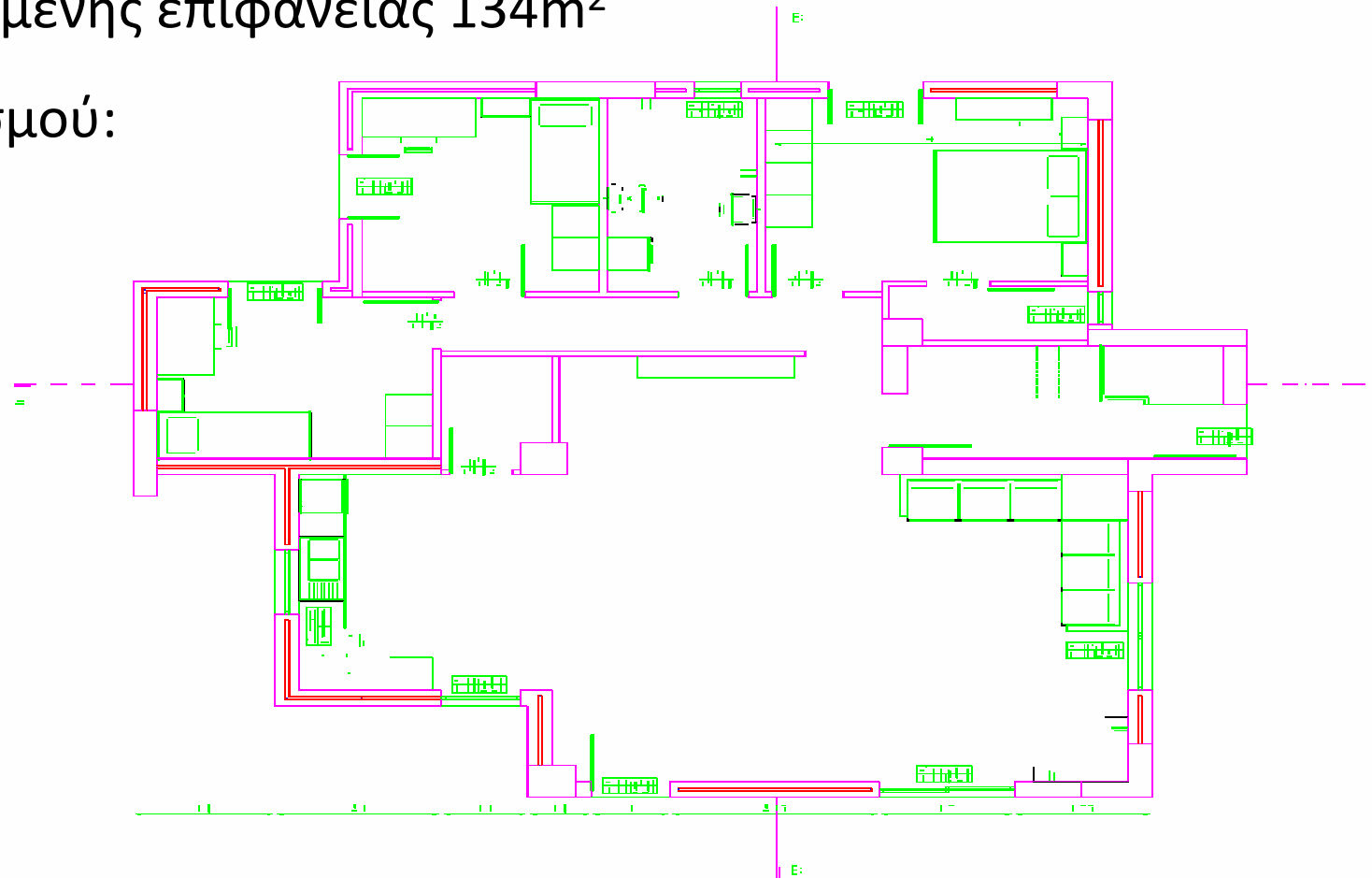


ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



Παράδειγμα εφαρμογής μεθοδολογίας

- Κτήριο κατοικίας, στεγασμένης επιφάνειας 134m²
- Μέγιστα φορτία κλιματισμού:
 - θέρμανση: 10,9kW
 - ψύξη: 9,6kW.





Επιλογή αντλίας θερμότητας

- Με βάση τις αιχμές φορτίων κλιματισμού για θέρμανση και ψύξη, επιλέγεται εμπορική γεωθερμική αντλία θερμότητας, με χαρακτηριστικά:

Θέρμανση

- ονομαστική θερμική ισχύς: 11,3kW
- συνολική απορροφούμενη ισχύς: 3,6kW
- C.O.P.: 3,14
- θερμοκρασίες νερού:
συμπυκνωτής (είσοδος / έξοδος): 45 / 40°C,
εξατμιστής (πηγής): 5 / 10°C.



Επιλογή αντλίας θερμότητας

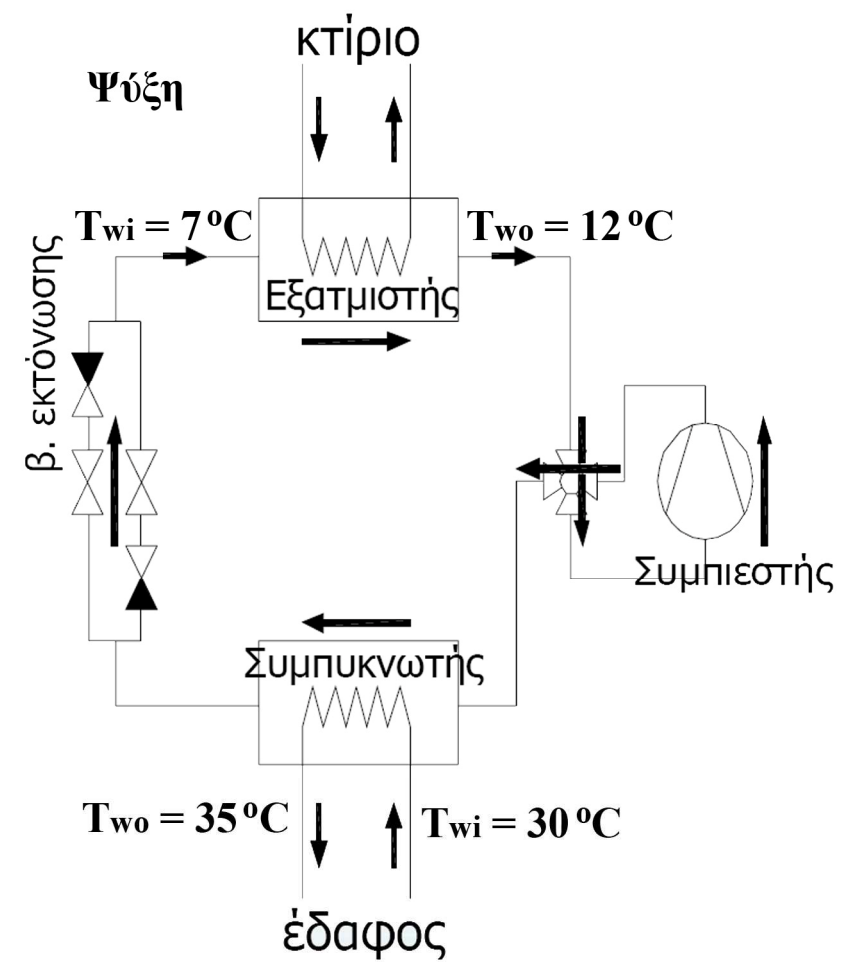
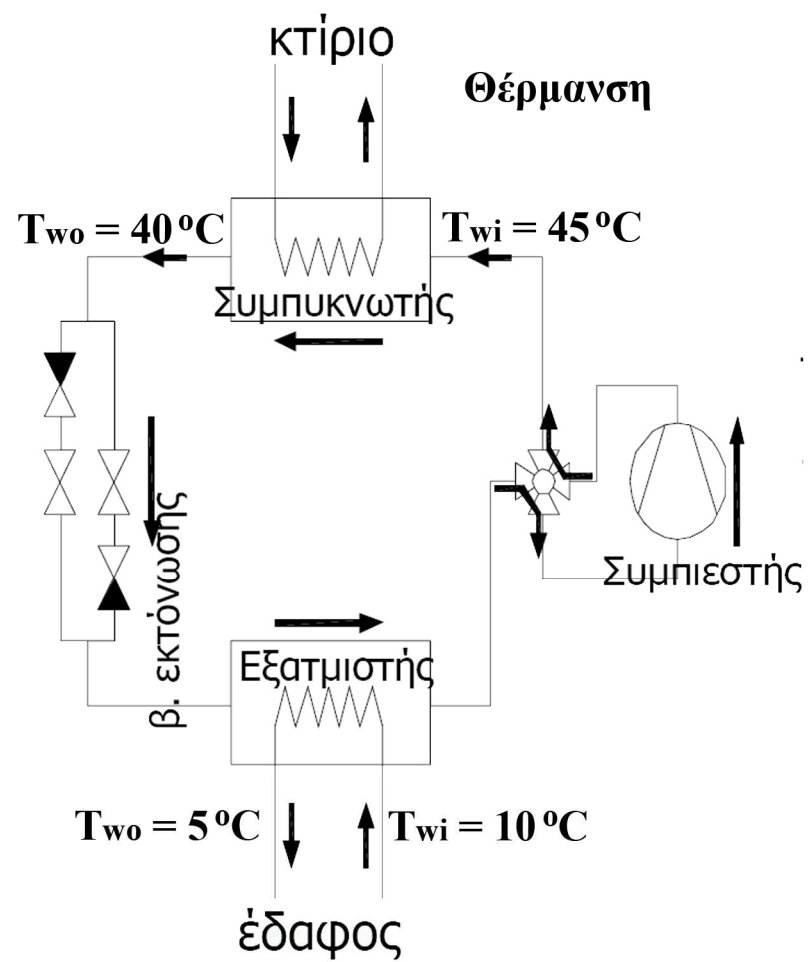
- Με βάση τις αιχμές φορτίων κλιματισμού για θέρμανση και ψύξη, επιλέγεται εμπορική γεωθερμική αντλία θερμότητας, με χαρακτηριστικά:

Ψύξη

- ονομαστική ψυκτική ισχύς: 11,3kW
- συνολική απορροφούμενη ισχύς: 3,2kW
- E.E.R.: 3,53
- θερμοκρασίες νερού:
συμπυκνωτής (είσοδος / έξοδος): 30 / 35°C,
εξατμιστής (είσοδος / έξοδος): 7 / 12°C.



Επιλογή αντλίας θερμότητας





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 |



Διάμετρος σωλήνωσης εναλλάκτη

- Η διάμετρος της σωλήνωσης έχει να κάνει με τη μεταφερόμενη ισχύ από το 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:

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

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



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. Στο ανωτέρω παράδειγμα ισούται με 5K.
- Από τις ανωτέρω σχέσεις, δοθείσης της $|t_{wi} - t_{wo}|$ και του θερμικού φορτίου, υπολογίζεται τελικά η απαιτούμενη παροχή μάζας εντός της σωλήνωσης.



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.



Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου εναλλάκτη

Ο υπολογισμός της διαμέτρου του εναλλάκτη γίνεται με βάση το μεγαλύτερο φορτίο, το οποίο θα απαιτήσει μεγαλύτερη παροχή. Στο παράδειγμά μας τούτο είναι το φορτίο θέρμανσης.

- Φορτίο θέρμανσης $q_{lh} = 10,90\text{kW}$

- Παροχή μάζας: $q_{lh} = \dot{m}_w \cdot C_V \cdot (t_{wo} - t_{wi}) \Leftrightarrow \dot{m}_w = \frac{q_{lh}}{C_V \cdot (t_{wo} - t_{wi})} \Leftrightarrow$

$$\dot{m}_w = \frac{10,90 \frac{\text{kJoule}}{\text{sec}}}{4,184 \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5\text{K}} \Leftrightarrow \dot{m}_w = 0,521 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$



Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Παροχή όγκου:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \Leftrightarrow \dot{V} = \frac{0,521\text{kg/sec}}{1.000\text{kg/m}^3} \Leftrightarrow \dot{V} = 0,521 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$$

- Αν επιλέξω μέγιστη ταχύτητα ροής ίση με 1m/sec, τότε η διάμετρος του εναλλάκτη θα πρέπει να είναι:

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

$$\Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,521 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 / \text{sec}}{\pi \cdot 1\text{m/s}}} \Leftrightarrow D = 0,026\text{m} \Leftrightarrow D = 26\text{mm}$$

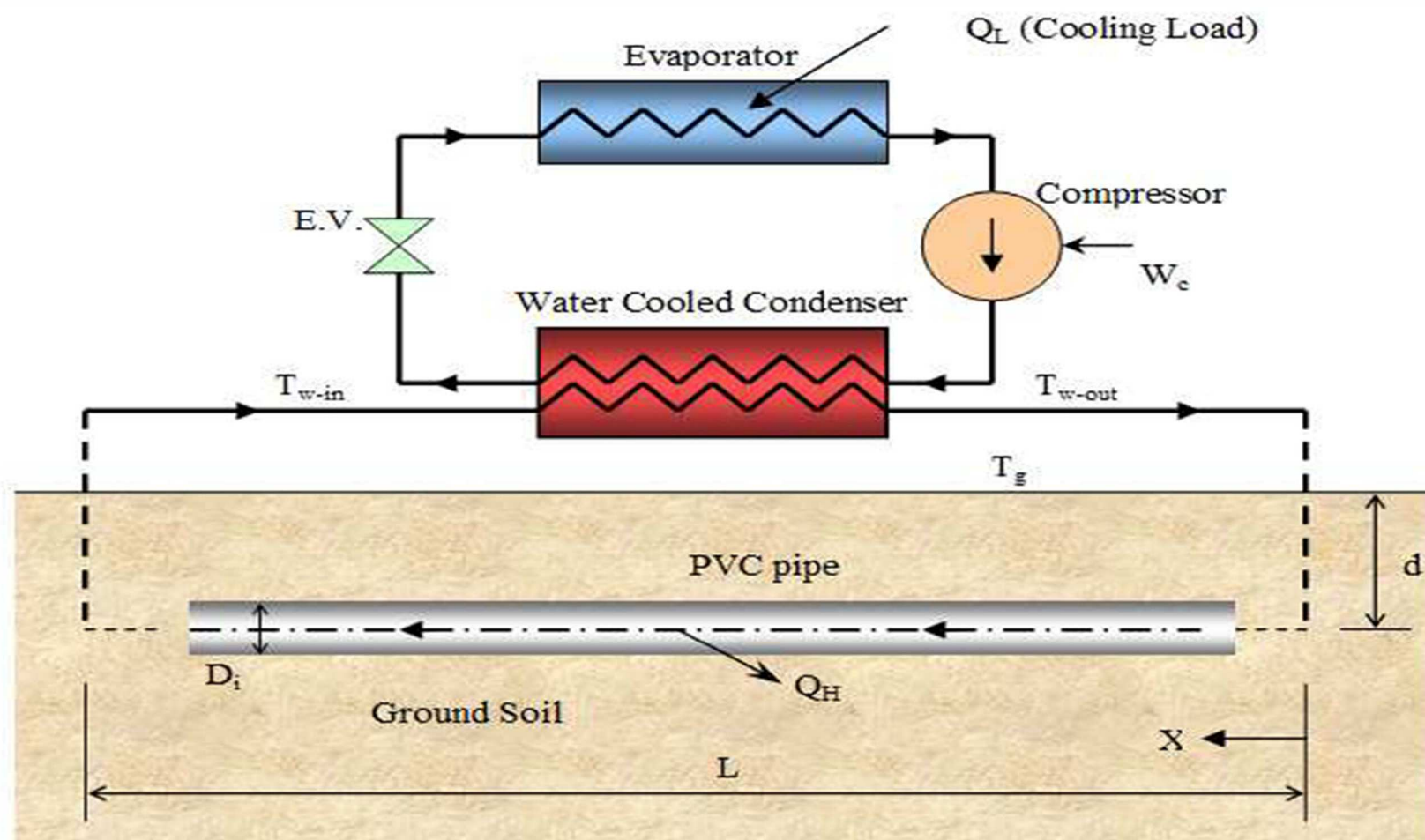


Παράδειγμα επιλογής διαμέτρου

- Σημειώνεται ότι η ανωτέρω υπολογισθείσα διάμετρος είναι η εσωτερική διάμετρος του εναλλάκτη.
- Αν επιλέξουμε σωλήνωση PE DN32 PN12, με εξωτερική διάμετρο 32mm και πάχος 3mm, η εσωτερική διάμετρος θα είναι:
 $d_i = 32\text{mm} - 2 \cdot 3\text{mm} \Leftrightarrow d_i = 26\text{mm}$



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος





Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_w}$$

όπου ο συντελεστής συναγωγής του νερού, που ισούται με:

$$h_w = 4.017,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ για θέρμανση}$$

$$h_w = 3.306,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ για ψύξη.}$$

- $R_{\text{conv-h}}$ (Ρελικά) := 0,0030 mK/W

$$R_{\text{conv-c}} = 0,0037 \text{ mK/W} \text{ για θέρμανση}$$

για ψύξη.



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Συντελεστής συναγωγής νερού:

ορίζεται μέσω του αριθμού Nusselt:
$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$$

όπου h ο συντελεστής συναγωγής του ρευστού, L ένα χαρακτηριστικό μήκος ροής και λ ο συντελεστής αγωγιμότητας του ρευστού.

Στην περίπτωση ροής σε κλειστούς αγωγούς, το μήκος L λαμβάνεται ίσο με την εσωτερική διάμετρο του αγωγού, δηλαδή $L = D_i$.

Όπως φαίνεται από τη σχέση ορισμού, ο αριθμός Nusselt εκφράζει το λόγο μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του ρευστού μέσω συναγωγής προς τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής.



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Υπολογισμός συντελεστή Nusselt:

Ο συντελεστής Nusselt προσεγγίζεται από διάφορες εμπειρικές σχέσεις, όπως η σχέση Dittus - Boelter:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,80} \cdot Pr^n$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds της ροής και Pr ο αριθμός Prandtl:

$$Re = \frac{u \cdot D_i}{\nu} \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

Η παράμετρος n ισούται με 0,4 για θέρμανση του ρευστού και με 0,3 για ψύξη του ρευστού.

Η ανωτέρω σχέση ισχύει για $Re > 10.000$ και $0,6 < Pr < 160$.



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Ιδιότητες νερού:

Για μέση θερμοκρασία 15°C,
επιλέγουμε:

α. κινηματική συνεκτικότητα:

$$\nu = 1,139 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$$

β. δυναμική συνεκτικότητα:

$$\mu = 1,139 \cdot 10^{-3} \text{Nt} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$$

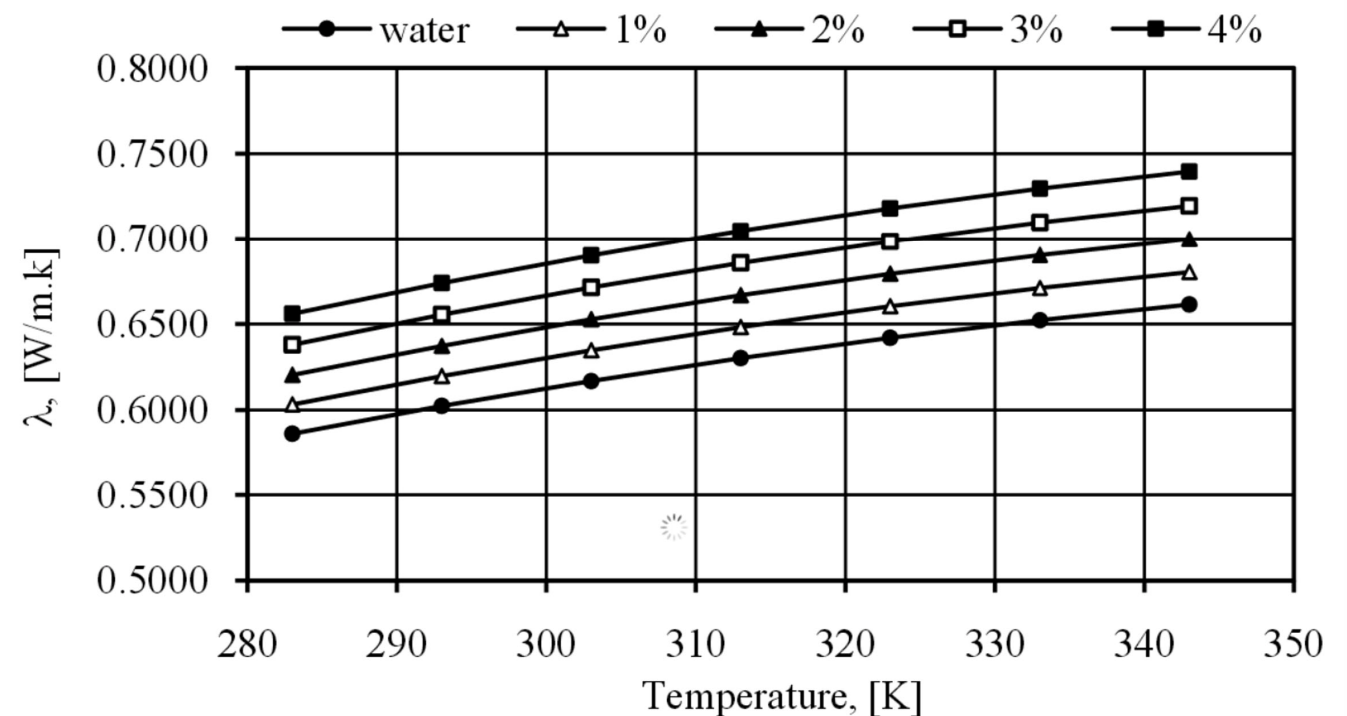
| Θερμοκρασία [°C] | Ειδικό βάρος [kN/m ³] | Πυκνότητα μάζας [kg/m ³] | Μέτρο ελαστικότητας [GPa] | Δυναμική συνεκτικότητα [N s/m ²] | Κινηματική συνεκτικότητα [m ² /s] | Επιφανειακή τάση [N/m] | Πίεση υδρατμών [kPa] |
|---------------------|---|--|---------------------------------|--|--|------------------------------|----------------------------|
| 0 | 9,805 | 999,8 | 1,98 | 1,781(10) ⁻³ | 1,785(10) ⁻⁶ | 0,0756 | 0,61 |
| 5 | 9,807 | 1000,0 | 2,05 | 1,518(10) ⁻³ | 1,519(10) ⁻⁶ | 0,0749 | 0,87 |
| 10 | 9,804 | 999,7 | 2,10 | 1,307(10) ⁻³ | 1,306(10) ⁻⁶ | 0,0742 | 1,23 |
| 15 | 9,798 | 999,1 | 2,15 | 1,139(10) ⁻³ | 1,139(10) ⁻⁶ | 0,0735 | 1,70 |
| 20 | 9,789 | 998,2 | 2,17 | 1,002(10) ⁻³ | 1,003(10) ⁻⁶ | 0,0728 | 2,34 |
| 25 | 9,777 | 997,0 | 2,22 | 0,890(10) ⁻³ | 0,893(10) ⁻⁶ | 0,0720 | 3,17 |
| 30 | 9,764 | 995,7 | 2,25 | 0,798(10) ⁻³ | 0,800(10) ⁻⁶ | 0,0712 | 4,24 |
| 40 | 9,730 | 992,2 | 2,28 | 0,653(10) ⁻³ | 0,658(10) ⁻⁶ | 0,0696 | 7,38 |
| 50 | 9,689 | 988,0 | 2,29 | 0,547(10) ⁻³ | 0,553(10) ⁻⁶ | 0,0679 | 12,33 |
| 60 | 9,642 | 983,2 | 2,28 | 0,466(10) ⁻³ | 0,474(10) ⁻⁶ | 0,0662 | 19,92 |
| 70 | 9,589 | 977,8 | 2,25 | 0,404(10) ⁻³ | 0,413(10) ⁻⁶ | 0,0644 | 31,16 |
| 80 | 9,530 | 971,8 | 2,20 | 0,354(10) ⁻³ | 0,364(10) ⁻⁶ | 0,0626 | 47,34 |
| 90 | 9,466 | 965,3 | 2,14 | 0,315(10) ⁻³ | 0,326(10) ⁻⁶ | 0,0608 | 70,10 |
| 100 | 9,399 | 958,4 | 2,07 | 0,282(10) ⁻³ | 0,294(10) ⁻⁶ | 0,0589 | 101,33 |



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας νερού:

Για νερό θερμοκρασίας 7°C – 45°C μία μέση τιμή είναι $\lambda=0,68\text{W}/(\text{mK})$.





Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Αριθμός Reynolds ροής: $Re = \frac{u \cdot D_i}{\nu} \Leftrightarrow Re = \frac{1\text{m/sec} \cdot 0,026\text{m}}{1,14 \cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}} \Leftrightarrow Re = 22.807$
- Αριθμός Prandtl: $Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \Leftrightarrow Pr = \frac{4.184\text{Joule}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 1,139 \cdot 10^{-3}\text{Nt} \cdot \text{sec}/\text{m}^2}{0,68\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} \Leftrightarrow Pr = 7,008$
- Αριθμός Nusselt για θέρμανση: $Nu = 0,023 \cdot 22.807^{0,80} \cdot 7,008^{0,4} \Leftrightarrow Nu = 153,61$
- Αριθμός Nusselt για ψύξη: $Nu = 0,023 \cdot 22.807^{0,80} \cdot 7,008^{0,3} \Leftrightarrow Nu = 126,43$



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Τελικά ο συντελεστής συναγωγής του νερού υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού του αριθμού Nusselt:

$$Nu = \frac{h_w \cdot D_i}{\lambda} \Leftrightarrow h_w = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_i}$$

- Συντελεστής συναγωγής για θέρμανση:

$$h_w = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_i} \Leftrightarrow h_w = \frac{153,61 \cdot 0,68 \text{W}/(\text{mK})}{0,026\text{m}} \Leftrightarrow h_w = 4.017,49 \text{W}/(\text{m}_2\text{K})$$

- Συντελεστής συναγωγής για ψύξη:

$$h_w = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_i} \Leftrightarrow h_w = \frac{126,43 \cdot 0,68 \text{W}/(\text{mK})}{0,026\text{m}} \Leftrightarrow h_w = 3.306,63 \text{W}/(\text{m}_2\text{K})$$



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω της σωλήνωσης:

$$R_{\text{pipe}} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot K_{\text{pipe}}} \cdot \Leftrightarrow R_{\text{pipe}} = \frac{\ln\left(\frac{32}{26}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,42 \text{ W / (mK)}}$$

$$\Leftrightarrow R_{\text{pipe}} = 0,0787 \text{ mK/W}$$

όπου $K_{\text{pipe}} = 0,42 \text{ W / (mK)}$ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της σωλήνωσης.



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος:

$$R_{\text{soil}} = \frac{1}{S \cdot K_{\text{soil}}} \cdot \Leftrightarrow R_{\text{soil}} = \frac{1}{1,14 \cdot 2W / (\text{mK})} \Leftrightarrow R_{\text{soil}} = 0,4386 \text{mK/W}$$

όπου

$K_{\text{soil}} = 2W / (\text{mK})$ η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους

και ο συντελεστής S (conduction shape factor) δίνεται από την ακόλουθη σχέση ($d=2\text{m}$ το βάθος τοποθέτησης του οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη):

$$S = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \left[\frac{2 \cdot d}{D_o} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot d}{D_o} \right)^2 - 1} \right]} \Leftrightarrow S = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \left[\frac{2 \cdot 2}{0,032} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2}{0,032} \right)^2 - 1} \right]} \Leftrightarrow S = 1,14$$



Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

- Η συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος υπολογίζεται:

για θέρμανση:

$$R_{\text{total-h}} = R_{\text{conv-h}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} = (0,0030 + 0,0787 + 0,4386) \text{ mK/W} \Leftrightarrow R_{\text{total-h}} = 0,5203 \text{ mK/W}$$

για ψύξη:

$$R_{\text{total-c}} = R_{\text{conv-c}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} = (0,0037 + 0,0787 + 0,4386) \text{ mK/W} \Leftrightarrow R_{\text{total-c}} = 0,5260 \text{ mK/W}$$

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη θερμική αντίσταση στη συναλλαγή της θερμότητας εμφανίζεται κατά τη μεταφορά με το έδαφος. Αντίστοιχα η μικρότερη εμφανίζεται κατά τη μεταφορά θερμότητας εντός του νερού.



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί:
για θέρμανση:

$$L_h = q_{lh} \cdot \frac{\frac{COP - 1}{COP} (R_{conv-h} + R_{pipe} + R_{soil} \cdot F_h)}{t_{g-min} - t_{wi-min}}$$

όπου

F_h ο συντελεστής απασχόλησης της αντλίας θερμότητας για τη θέρμανση

t_{g-min} η ελάχιστη επίγεια θερμοκρασία

t_{wi-min} η ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην αντλία θερμότητας



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη μπορεί να υπολογιστεί:

για ψύξη:

$$L_c = q_{lc} \cdot \frac{\frac{EER + 1}{EER} (R_{conv-c} + R_{pipe} + R_{soil} \cdot F_c)}{t_{wi-max} - t_{g-max}}$$

όπου

F_c ο συντελεστής απασχόλησης της αντλίας θερμότητας για την ψύξη

t_{g-max} η μέγιστη επίγεια θερμοκρασία

t_{wi-max} η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην αντλία θερμότητας



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Για τον υπολογισμό των συντελεστών απασχόλησης για θέρμανση και ψύξη πρέπει να είναι γνωστές οι αντίστοιχες ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις. Για το παράδειγμά μας τούτες είναι:

ετήσια κατανάλωση τελικής θερμικής ενέργειας για θέρμανση: 8.284kWh

ετήσια κατανάλωση τελικής θερμικής ενέργειας για ψύξη: 6.912kWh

Συνεπώς οι συντελεστές απασχόλησης υπολογίζονται:

$$F_h = \frac{E_h}{P_h \cdot T} \Leftrightarrow F_h = \frac{8.284\text{kWh}}{10,9\text{kW} \cdot 8.760\text{h}} \Leftrightarrow F_h = 8,68\%$$

$$F_c = \frac{E_c}{P_c \cdot T} \Leftrightarrow F_c = \frac{6.912\text{kWh}}{9,6\text{kW} \cdot 8.760\text{h}} \Leftrightarrow F_c = 8,22\%$$



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Οι θερμοκρασίες εδάφους και εισόδου νερού στην αντλία θερμότητας λαμβάνονται ως εξής:

Θέρμανση

- ελάχιστη επίγεια θερμοκρασία $t_{g-\min} = 14^{\circ}\text{C}$
- ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην αντλία θερμότητας: $t_{wi-\min} = 10^{\circ}\text{C}$.

Ψύξη

- μέγιστη επίγεια θερμοκρασία: $t_{g-\max} = 25^{\circ}\text{C}$
- μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην αντλία θερμότητας: $t_{wi-\max} = 30^{\circ}\text{C}$



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη τελικά υπολογίζεται:

Θέρμανση:

$$L_h = q_{lh} \cdot \frac{\frac{COP - 1}{COP} (R_{conv-h} + R_{pipe} + R_{soil} \cdot F_h)}{t_{g-min} - t_{wi-min}} \Leftrightarrow$$

$$L_h = 10.900W \cdot \frac{\frac{3,14 - 1}{3,14} (0,0030 + 0,0787 + 0,4386 \cdot 0,0868) \frac{mK}{W}}{(14 - 10)K} \Leftrightarrow L_h = 222,43m$$



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη

- Το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη τελικά υπολογίζεται:

Ψύξη:

$$L_c = q_{lc} \cdot \frac{\frac{EER + 1}{EER} (R_{conv-c} + R_{pipe} + R_{soil} \cdot F_c)}{t_{wi-max} - t_{g-max}} \Leftrightarrow$$

$$L_c = 9.600W \cdot \frac{\frac{3,53 + 1}{3,53} (0,0037 + 0,0787 + 0,4386 \cdot 0,0822) \frac{mK}{W}}{(30 - 25)K} \Leftrightarrow L_c = 291,86m$$



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη Εναλλακτικός υπολογισμός

- Το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη δίνεται εναλλακτικά από τη σχέση (οι θερμοκρασίες t_w σε °C):

$$L_h = \dot{m}_{wh} \cdot C_v \cdot R_{total-h} \cdot \ln\left(\frac{t_{wo}}{t_{wi}}\right)$$

$$L_c = \dot{m}_{wc} \cdot C_v \cdot R_{total-c} \cdot \ln\left(\frac{t_{wi}}{t_{wo}}\right)$$

όπου οι δείκτες h και c υποδηλώνουν αντίστοιχα λειτουργία θέρμανσης και ψύξης.



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη Εναλλακτικός υπολογισμός

- Για τη λειτουργία θέρμανσης έχουμε ήδη υπολογίσει: $\dot{m}_{wh} = 0,521 \text{kg/sec}$
- Για τη λειτουργία ψύξης, έχουμε αιχμή φορτίου $q_{lc} = 9,6 \text{kW}$, συνεπώς:

$$q_{lc} = \dot{m}_{wc} \cdot C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo}) \Leftrightarrow \dot{m}_{wc} = \frac{q_{lc}}{C_V \cdot (t_{wi} - t_{wo})} \Leftrightarrow \dot{m}_{wc} = \frac{9,60 \text{kJoule/sec}}{4,184 \frac{\text{kJoule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 5 \text{K}} \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_{wc} = 0,459 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$



Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη Εναλλακτικός υπολογισμός

- Απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη για θέρμανση:

$$L_h = \dot{m}_{wh} \cdot C_v \cdot R_{total-h} \cdot \ln\left(\frac{t_{wo}}{t_{wi}}\right) \Leftrightarrow L_h = 0,521 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot 4.184 \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,5203 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot \ln\left(\frac{10^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}}\right)$$

$$\Leftrightarrow L_h = 786,16\text{m}$$

- Απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη για ψύξη:

$$L_c = \dot{m}_{wc} \cdot C_v \cdot R_{total-c} \cdot \ln\left(\frac{t_{wi}}{t_{wo}}\right) \Leftrightarrow L_c = 0,459 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot 4.184 \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,5260 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot \ln\left(\frac{35^\circ\text{C}}{30^\circ\text{C}}\right)$$

$$\Leftrightarrow L_c = 155,72\text{m}$$



Συμπεράσματα

- Ανάμεσα στις δύο μεθόδους υπολογισμού παρατηρείται σημαντική απόκλιση.
- Γενικότερα στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποια σαφής μέθοδος η οποία ακολουθείται ως η πλέον αξιόπιστη. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι σε μικρά βάση από την επιφάνεια του εδάφους, και σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική.
- Στις περιπτώσεις αυτές είναι πολύ σημαντική η εμπειρία του μελετητή για τη λήψη της τελικής απόφασης.
- Ένας χρήσιμος εμπειρικός κανόνας είναι ότι για τοποθέτηση του οριζόντιου εναλλάκτη σε βάθος 1,5 – 2m και απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων 0,35 – 0,50m, η απόδοση του εναλλάκτη σε ισχύ ισούται περίπου με $30\text{W}/\text{m}^2$.



Συμπεράσματα

- Υιοθετώντας τον ανωτέρω κανόνα, για μέγιστο φορτίο κλιματισμού (θέρμανση) 10,90kW, θα απαιτηθούν: $10.900\text{W} / 30\text{W}/\text{m}^2 = 363\text{m}^2$.
- Έστω ότι επιλέγουμε το μεγαλύτερο από τα υπολογισμένα μήκη του οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη, το οποίο ισούται με 786,16m.
- Αν υποθέσουμε ότι θα εγκατασταθεί οριζόντιος εναλλάκτης συνολικού μήκους 800m σε 10 παράλληλες σειρές απόστασης 0,5 μέτρου μεταξύ τους, τότε το μήκος κάθε σειράς θα ισούται με $800\text{m}/10 = 80\text{m}$ και το πλάτος της εγκατάστασης θα ισούται με $9 \times 0,5\text{m} = 4,5\text{m}$. Συνεπώς, η απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση του εναλλάκτη υπολογίζεται σε $4,5\text{m} \times 80\text{m} = 360\text{m}^2$.
- Άρα υιοθετείται η τιμή των 800m για το μήκος του γεωεναλλάκτη, καθώς συμφωνεί με τα εμπειρικά δεδομένα.



Ευχαριστώ πολύ

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης