

Εκμεταλλεύσιμη Ηλιογενής και Γηγενής Θερμότητα στο Αβαθές Υπέδαφος της Αττικής

Μ.ΓΡ. ΒΡΑΧΟΠΟΥΛΟΣ
Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

† Ι. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΑΚΗΣ
Γεωλόγος, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην Ελλάδα οι ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης καλύπτονται σχεδόν αποκλειστικά από καύσιμα που ρυπαίνουν το περιβάλλον, δεν είναι ανανεώσιμα και επιβαρύνουν την εθνική οικονομία. Το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στις κτιριακές ανάγκες που απαιτούν θερμοκρασίες κάτω των 60°C και μπορούν να καλύπτονται από την περιβαλλοντική θερμότητα. Μία εκ των ειδών περιβαλλοντικής θερμότητας είναι και η ομαλή γεωθερμική ενέργεια. Ο τρόπος άντλησης της θερμότητας είναι μέσω υπογείου νερού ή μέσω των πετρωμάτων με χρήση γεωθερμικών εναλλακτών, των οποίων η απόδοση αναμένεται σε 50 - 60 watt/m βάθους, σύμφωνα με μετρήσεις στην Ελβετία για διπλού U τύπου εναλλάκτη, εκτός αν βρεθούν σε περιοχή περμαφρόστ, οπότε μειώνεται σημαντικά. Οι πρώτες μετρήσεις επιφανειακών θερμοκρασιών στην Ελλάδα έγιναν στον Αγ. Δημήτριο Κορωπίου, σε βάθη 1, 15, 30, 45 και 60 m, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Από σύγκριση με αντίστοιχες μετρήσεις διαπιστώθηκε η ύπαρξη υπερετήσιας καθοδικής θερμικής ροής που προφανώς οφείλεται στο ότι έχει προηγηθεί εδώ μια ψυχρότερη γεωλογική εποχή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα, μέχρι σήμερα, οι ενεργειακές ανάγκες των κτιρίων για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή νερού χρήσης καλύπτονται σχεδόν αποκλειστικά από ορυκτά καύσιμα (κυρίως πετρέλαιο) και ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο επίσης παράγεται από ορυκτά καύσιμα (τον εγχώριο λιγνίτη και τα εισαγόμενα πετρέλαιο, λιθάνθρακα και, προσεχώς, φυσικό αέριο). Οι ενεργειακές αυτές πηγές:

1. Δεν είναι ανανεώσιμες.
2. Ρυπαίνουν το περιβάλλον και συμβάλλουν στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
3. Επιβαρύνουν σημαντικά την εθνική οικονομία.

Μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973 πολλές ελπίδες βασίστηκαν διεθνώς στη χρήση των θερμοαντλιών (αντλιών θερμότητας), οι οποίες μπορούν να εκμεταλλεύονται την περιβαλλοντική θερμότητα, κυρίως του αέρα και, κατά δεύτερο λόγο, των επιφανειακών νερών. Εντούτοις, εξαιτίας:

1. της πτώσης των τιμών των καυσίμων που ακολούθησε, και

2. των τεχνικών προβλημάτων που παρουσίαζε η λειτουργία των θερμοαντλιών,

οι ελπίδες από τη χρήση των τελευταίων μετριάστηκαν και τα καύσιμα εξακολούθησαν να κυριαρχούν απόλυτα στον τομέα παραγωγής θερμικής ενέργειας.

Στη δεκαετία 1980-90, όταν η απειλή καταστροφής του φυσικού περιβάλλοντος από τα καύσιμα γινόταν όλο και πιο αντιληπτή, οι αντλίες θερμότητας επανήλθαν στο προσκήνιο, αφού η αρχή λειτουργίας τους διαγραφόταν πολύ πρόσφορη για την ανάκτηση δωρεάν καθαρής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας από το περιβάλλον. Το κύριο πρόβλημα, που έπρεπε να λυθεί, ήταν η πρωτογενής ενέργεια, που κατανάλωναν οι συμπιεστές τους για να λειτουργούν οι συσκευές αυτές, να είναι τόσο περιορισμένη, ώστε οι θερμοαντλίες να είναι όχι μόνο περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά αποδεκτές.

Από εκτιμήσεις που έχουν γίνει σε χώρες της Δυτικής Ευρώπης, περίπου 40% της ενεργειακής κατανάλωσής τους οφείλεται στις ανάγκες θέρμανσης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης των κτιρίων που χρησιμοποιούνται ως κατοικίες και ως χώροι εργασίας. Στις χώρες αυτές, όπως και στις Ε.Π.Α. και τον Καναδά, έχει γίνει κατανοητό ότι οι εν λόγω ενεργειακές ανάγκες, οι οποίες απαιτούν θερμοκρασίες κατώτερες των 60 °C, μπορούν να καλύπτονται από την περιβαλλοντική θερμότητα με τη χρήση θερμοαντλιών, ώστε να επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που συνεπάγεται και ανάλογη μείωση της χρήσης των ρυπογόνων καυσίμων.

Η θερμοαντλία (Α.Θ.) έχει την ικανότητα να παράγει θερμική ενέργεια $\Theta_{\pi\alpha}$, η οποία συντίθεται από δύο συνιστώσες: τη $\Theta_{\pi\epsilon}$ (θερμότητα περιβαλλοντική) και την E_{κ} (ενέργεια κίνησης του συμπιεστή της Α.Θ.), ήτοι:

$$\Theta_{\pi\alpha} = \Theta_{\pi\epsilon} + E_{\kappa} \quad (1.1)$$

Η ικανότητα μιας θερμοαντλίας να αποδίδει θερμική ενέργεια οικονομικώς ενδιαφέρονσα εξαρτάται από το συντελεστή συμπεριφοράς αυτής (COP = Coefficient Of Performance) που είναι:

$$\text{COP} = \Theta_{\pi\alpha} / E_{\kappa} \quad (1.2)$$

Η ενεργειακά επωφελής οριακή τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς θεωρείται το 3:1, αφού η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τις πρωτογενείς ενεργειακές πηγές (κυρίως ορυκτούς άνθρακες και υδρογονάνθρακες) με απώλειες 60-70%. Δηλαδή μια θερμαντλία αποδίδει συνολικά θερμική ενέργεια ίση περίπου με την καταναλισκόμενη πρωτογενή ενέργεια του καυσίμου που χρειάζεται ο θερμοηλεκτρικός σταθμός για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που θα δαπανήσει η θερμαντλία. Συνεπώς, η τελευταία, για να θεωρηθεί παραγωγική, θα πρέπει να έχει συντελεστή συμπεριφοράς τουλάχιστον 3:1.

Από πειραματικές μετρήσεις προέκυψε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς μιας θερμαντλίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι των οποίων είναι:

1. Η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) μεταξύ παραγόμενου από την Α.Θ. θερμικού ρευστού και της πηγής θερμότητας (που μπορεί να είναι ο περιβάλλον αέρας ή κάποια φυσική υδάτινη μάζα). Όσο μικρότερο είναι αυτό το ΔT , τόσο μεγαλύτερο είναι το COP.

2. Η σταθερότητα θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, καθώς και το ύψος αυτής, ιδιαίτερα στο μεταξύ των 0 °C και 30 °C διάστημα.

Έτσι, εάν χρησιμοποιηθεί χαμηλή θερμοκρασία θέρμανσης, π.χ. 40-50°C και διατεθεί για την Α.Θ. θερμική πηγή θερμοκρασίας 17-20°C, όπως συμβαίνει με τις υπεδαφικές θερμοκρασίες (σε βάθος 0-150m) στην Ελλάδα, μπορεί να επιτευχθεί συντελεστής απόδοσης θερμαντλίας αισθητά υψηλότερος, απ' ό,τι λ.χ. στην Ελβετία ή την Αυστρία, όπου οι υπεδαφικές θερμοκρασίες είναι 8-12°C.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$\Theta_{πα}$: Παραγόμενη θερμική ενέργεια

$\Theta_{πε}$: Περιβαλλοντική θερμική ενέργεια

E_k : Ενέργεια κίνησης συμπιεστή

Q_{con}^o = ισχύς συμπυκνωτή (υγροποιητή)

N_{com}^o = ισχύς συμπιεστή (καταναλισκόμενη)

Q_A^o = ισχύς ατμοποιητή

λ : Ειδική αγωγιμότητα (w/m²K)

c : Ειδική θερμοχωρητικότητα (Kj/KgK)

ρ : Πυκνότητα (Kg/m³)

2. ΥΠΕΡΓΕΙΑ Ή ΥΠΟΓΕΙΑ ΠΗΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ;

Με τις θερμαντλίες αξιοποιείται η καλούμενη περιβαλλοντική θερμική ενέργεια, δηλαδή αυτή που περιέχεται στις

υλικές μάζες του άμεσου περιβάλλοντος του κτιρίου, δηλαδή τις αέριες, τις υδάτινες και τις εδαφικές - υπεδαφικές (λιθογραφικές) μάζες. Η περιβαλλοντική θερμική ενέργεια έχει δύο πηγές προέλευσης:

1. Την ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι η κυριότερη ή η αποκλειστική πηγή θερμότητας των αερίων και των επιφανειακών υδάτινων μαζών. Στα υπόγεια νερά και στα πετρώματα μέχρι βάθους 100-150 m περιέχεται περισσότερη ή λιγότερη θερμική ενέργεια ηλιακής προέλευσης, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις κλιματικές και γεωμορφολογικές συνθήκες.

2. Την ομαλή γεωθερμική ενέργεια, η οποία οφείλεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες του εσωτερικού της Γης και η οποία με το φαινόμενο της θερμικής (γεωθερμικής) ροής οδεύει προς την εδαφική επιφάνεια και προσφέρει θερμική ενέργεια στα πετρώματα και υπόγεια νερά που διατρέχει¹.

Η ενέργεια κίνησης E_k του συμπιεστή της Α.Θ. είναι συνήθως ηλεκτρική, αλλά είναι δυνατό να είναι και άλλης προέλευσης, π.χ. από καύση φυσικού αερίου. Στην περίπτωση αυτή τα μειονεκτήματα του ηλεκτρικού ρεύματος (παραγωγή από ρυπογόνα καύσιμα, απώλειες παραγωγής και μεταφοράς) αποφεύγονται, οπότε η λειτουργία της θερμαντλίας γίνεται ενεργειακά συμφέρουσα ακόμη και με συντελεστή απόδοσης COP < 3:1, καθώς και περιβαλλοντικά πιο φιλική. Η προϋπόθεση για την παραπάνω διαπίστωση είναι ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα να μην είναι μικρότερος του β.α. του ηλεκτρικού συστήματος της χώρας (συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς και διανομής).

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, ο συντελεστής απόδοσης μιας Α.Θ. εξαρτάται κατά σημαντικό ποσοστό από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, δηλαδή του περιβάλλοντα αέρα ή της διαθέσιμης λιθογραφικής μάζας, η τιμή του COP δεν είναι σταθερή. Επίσης, επισημάνθηκε ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας στο διάστημα 0°-30°C και όσο περισσότερο αυτή πλησιάζει τη θερμοκρασία χρήσης, τόσο υψηλότερος είναι και ο συντελεστής COP. Συνεπώς, σε μια αντλία θερμότητας διακρίνεται:

1. Ο συντελεστής COP που εκφράζει την απόδοση της Α.Θ. με καθορισμένες θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας. Είναι η θεωρητική τιμή του COP που δίνεται από τον κατασκευαστή της Α.Θ.

2. Ο ετήσιος ή εποχιακός συντελεστής COP που δίνει το λόγο της θερμικής ενέργειας, που παρήγαγε η Α.Θ., προς την ενέργεια που κατανάλωσε μέσα σε ένα έτος ή σε μια εποχή λειτουργίας θέρμανσης ή και ψύξης. Όταν διατίθενται μετρήσεις ορισμένων ετών λειτουργίας, μπορεί να εκφραστεί ο μέσος ετήσιος συντελεστής συμπεριφοράς COP_m της Α.Θ.

Δεύτερος παράγοντας οικονομικής απόδοσης μιας Α.Θ. είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παράγει στη διάρκεια ενός έτους. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από:

¹ Η θερμική ενέργεια των καλούμενων ανώμαλων γεωθερμικών πεδίων, τα οποία οφείλονται σε ειδικές γεωλογικές συνθήκες, παρουσιάζεται σε γεωγραφικά περιορισμένες περιοχές, προκαλώντας στον ελληνικό χώρο θερμοκρασίες του αβαθούς υπεδαφούς υψηλότερες των 25°C. Στην παρούσα μελέτη δεν εξετάζεται η θερμική αυτή ενέργεια.

1. Το ενεργειακό δυναμικό της πηγής, δηλαδή της διατιθέμενης αέρας, υδάτινης ή λιθογραφικής μάζας, και
2. Το ύψος και το είδος των θερμικών αναγκών του κτιρίου.

Και οι δύο αυτοί παράγοντες είναι, σε σχέση με τις χώρες της Δυτικής και Βόρειας Ευρώπης, ευνοϊκότεροι στην Ελλάδα. Συνεπώς, τα κίνητρα για να αναπτυχθεί η χρήση θερμαντικών είναι ισχυρότερα, όπως αποδεικνύεται παρακάτω.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στην αποδοτική χρήση μιας αντλίας θερμότητας είναι η εξασφάλιση μιας πηγής περιβαλλοντικής θερμότητας που να παρέχει θερμική ενέργεια με σταθερή ισχύ και σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της.

Για την επιλογή της πηγής αυτής υπάρχουν για ένα κτίριο τέσσερις δυνατότητες.

1. Οι αέριες μάζες που περιβάλλουν το κτίριο.
2. Οι τυχόν υπάρχουσες επιφανειακές υδάτινες μάζες.
3. Οι τυχόν υπάρχουσες υπόγειες υδάτινες μάζες.
4. Οι υπεδαφικές λιθογραφικές μάζες.

Οι αέριες μάζες είναι η κατασκευαστικά πιο εύκολη λύση, αλλά η μεγάλη αστάθεια της θερμοκρασίας τους έχει ως συνέπεια το χαμηλό ετήσιο συντελεστή απόδοσης της Α.Θ., δηλαδή την υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, ο αέρας με τη σύστασή του (υγρασία, σκόνη, οξυγόνο, όξινα συστατικά) προκαλεί αυξημένα έξοδα συντήρησης της εγκατάστασης, ενώ τα εξαρτήματα τροφοδοσίας αέρα επιβαρύνουν το κτίριο από πλευράς χώρου και αισθητικής. Εξάλλου, η δημιουργία πάγου στους ατμοποιητές το χειμώνα και η αδυναμία του περιβάλλοντα αέρα να απορροφά και να αποθηκεύει την απορριπτόμενη ψυκτική ή θερμική ενέργεια της εγκατάστασης δημιουργούν, επίσης, προβλήματα λειτουργίας και μειώνουν την απόδοση της Α.Θ. Συνεπώς, οι Α.Θ. με τροφοδοσία αέρα, που είναι πολύ διαδεδομένες στην Ελλάδα (κλιματιστικές εγκαταστάσεις), προκαλούν ενεργειακή σπατάλη, καθώς και θερμική και οπτική ρύπανση του αστικού περιβάλλοντος.

Στις περιπτώσεις 2, 3 και 4 χρησιμοποιείται νερό για τη μεταφορά της θερμότητας από την πηγή στη θερμαντλία. Η συσκευή αυτή είναι σχεδιασμένη να δέχεται νερό αντί αέρα, έχει απλούστερη κατασκευή και, εξάλλου, έναντι του αέρα, το νερό έχει σαφή πλεονεκτήματα ως φορέας θερμότητας, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητάς του και της σταθερής πυκνότητάς του.

Το μειονέκτημα των υδάτινων μαζών είναι ότι σπάνια βρίσκονται διαθέσιμες στην άμεση γειτονία του κτιρίου σε ποσότητες επαρκείς για να παρέχουν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια. Ιδιαίτερα το επιφανειακό νερό (περίπτωση 2) στην Ελλάδα βρίσκεται με επαρκείς παροχές κοντά σε κτίρια εξαιρετικά σπάνια και μόνο όταν αυτά είναι κτισμένα πολύ κοντά στην ακτογραμμή ή στις όχθες μιας λίμνης, μπορούν να προμηθευθούν θερμική και ψυκτική ενέργεια από το

θαλασσινό ή λιμναίο νερό. Όμως, τα επιφανειακά νερά υπόκεινται, κατά τη διάρκεια του έτους, σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας τους, ενώ επιπλέον το θαλασσινό νερό, λόγω της αλμυρότητάς του, απαιτεί δαπανηρούς εναλλάκτες θερμότητας, ανθεκτικούς στη διαβρωτική επίδραση των αλάτων.

3. ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Το υπόγειο νερό αποτελεί τη βέλτιστη λύση για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών ενός κτιρίου με Α.Θ., αρκεί να είναι διαθέσιμο με μια ελάχιστη σταθερή παροχή. Και αυτό, διότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους έχει θερμοκρασία σταθερή ή σχεδόν σταθερή. Το θερμικό περιεχόμενο του είναι εν μέρει ηλιακής και εν μέρει γήινης προέλευσης.

Όταν υπόγειο νερό από πηγάδι ή γεώτρηση, με μια μικρή, έστω, παροχή μόνο 5m³/h και θερμοκρασίας 18 °C, οδηγηθεί στον ατμοποιητή της Α.Θ. και υποστεί ψύξη κατά 5K (18° → 13°C), θα αποδώσει θερμική ισχύ:

$$\dot{Q}_A = 5000 \text{ l/h} \times 5 \text{ K} \times 1 \text{ Kcal/ lK} = 25000 \text{ Kcal/h} = 29 \text{ kW}$$

Με τη δράση του συμπιεστή και με COP = 3, η ισχύς αυτή θα γίνει \dot{Q}_{con} , δηλαδή:

$$3 = \dot{Q}_{con} / \dot{N}_{com} \quad \text{ή} \quad 3 = \dot{Q}_{con} / (\dot{Q}_{con} - \dot{Q}_A), \quad \text{ήτοι}$$

$$\dot{Q}_{con} = 43.5 \text{ kW} \quad (3.1)$$

όπου: \dot{Q}_{con} = ισχύς συμπυκνωτή (υγροποιητή)

\dot{N}_{com} = ισχύς συμπιεστή (καταναλισκόμενη)

\dot{Q}_A = ισχύς ατμοποιητή

Με την ισχύ αυτή είναι δυνατό να θερμανθεί κτίριο με θερμαινόμενους χώρους εμβαδού μεταξύ 400-800 m² περίπου. Το πρόβλημα, όμως, με το υπόγειο νερό είναι ότι δεν είναι διαθέσιμο σε κάθε περίπτωση κτιρίου. Για το λόγο αυτό, οι προσπάθειες των ερευνητών στράφηκαν στην κατεύθυνση ανακάλυψης μεθοδολογίας αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας των πετρωμάτων του υπεδάφους ενός κτιρίου, τα οποία είναι πάντοτε παρόντα και παρουσιάζουν θερμοαποθηκευτική ικανότητα ενδιαφέρουσα, αν και κατώτερη από αυτή του νερού (βλέπε πίνακα 1). Πράγματι, οι τιμές της ιδιότητας αυτής κυμαίνονται στα υπεδαφικά υλικά από 0.8 - 3.6 MJ/m³K (0.22 - 1 kWh/m³K). Επειδή σε βάθη μεγαλύτερα των 10 m υπάρχει στους πόρους των υπεδαφικών υλικών (πετρωμάτων) σχεδόν πάντοτε νερό, η μέση τιμή

Πίνακας 1: Θερμοαποθηκευτικές ικανότητες μερικών υπεδάφικών υλικών (1).

Table 1: Thermal storage capacities of underground material.

Υλικά υπεδάφους	MJ/m ³ K	kWh/m ³ K
Στεγνός πηλός	0.80	0.22
Υγρός πηλός	3.60	1.00
Αμμοχάλικο μερικά υγρό	1.20	0.33
Γρανίτης	2.30	0.64
Έδαφος υγρό	2.50	0.69
Νερό	4.19	1.16
Πάγος	2.20	0.61

της θερμοαποθηκευτικής ικανότητας αυτών εκτιμάται ότι θα είναι γύρω στο 3 MJ/m³K (0.83 kWh/m³K).

Η μεθοδολογία αξιοποίησης, που αναπτύχθηκε, βασίζεται στην εξής αρχή: Σε γεώτρηση τοποθετείται κλειστό κύκλωμα νερού (με ή χωρίς αντιψυκτικό), το οποίο συνδέεται με τον ατμοποιητή μιας θερμαντλίας. Το νερό του κυκλώματος αυτού με την κυκλοφορία του λειτουργεί σαν μεταφορέας θερμότητας από το υπέδαφος στον ατμοποιητή. Συγκεκριμένα, το νερό, έχοντας αποκτήσει κατά την πορεία του μέσα στη γεώτρηση ορισμένη θερμοκρασία, λ.χ. 18 °C, επανέρχεται στον ατμοποιητή.

Προϋπόθεση αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος αυτού, το οποίο λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας και καλείται *γεωθερμικός εναλλάκτης* (vertical earth heat exchanger), είναι η ικανότητα του υπεδάφους να ανανεώνει επαρκώς τη θερμική ενέργεια που αφαιρείται από τα περιβάλλοντα τη γεώτρηση πετρώματα, δηλαδή να δημιουργεί μια θερμική ροή ορισμένης επαρκούς ισχύος.

Για οικονομικούς και πρακτικούς λόγους, που συνδέονται με τις δυνατότητες κατασκευής του αποδέκτη της θερμικής ενέργειας, δηλαδή του κτιρίου, το βάθος, μέχρι το οποίο μπορεί να φθάσει σήμερα ένας γεωθερμικός εναλλάκτης, είναι 60 - 120 m, σπανιότερα μέχρι 150 m. Θα πρέπει, λοιπόν, να εξετασθεί ποιο είναι το θερμικό περιεχόμενο του υπεδάφους μέχρι τα βάθη αυτά και τι δυνατότητες ανανέωσής του υπάρχουν στον ελληνικό χώρο.

Είναι γνωστό ότι η κανονική γεωθερμική βαθμίδα στις περιοχές, οι οποίες δεν βρίσκονται σε ανώμαλα γεωθερμικά πεδία, είναι περίπου 0.03 K/m. Με τη βαθμίδα αυτή προκαλείται θερμική ροή με φορά γενικά κατακόρυφη εκ των κάτω προς τα άνω, η οποία αποδίδει στο ανώτερο τμήμα του φλοιού της Γης ενέργεια ίση με 0.32 KJ/m².

Για να είναι δυνατή η αξιοποίηση της γεωθερμικής αυτής ενέργειας με θερμαντλίες, θα πρέπει να δημιουργούνται στην πηγή τροφοδοσίας αυτών, δηλαδή στα αβαθή υπόγεια νερά και πετρώματα (βάθος 0 - 150 m), θερμοκρασίες κατάλληλες για τη λειτουργία αυτών, δηλαδή ανώτερες του 0°C, ώστε να μη προκαλείται στερεοποίηση (πάγωμα) των υπόγειων νερών και των υγρών μεταφοράς στους γεωθερμικούς εναλ-

λάκτες (συνήθως νερό με αντιψυκτικό). Επίσης, οι θερμοκρασίες της πηγής τροφοδοσίας θα πρέπει να βρίσκονται σε μια στάθμη τέτοια, ώστε ο συντελεστής απόδοσης (COP) της Α.Θ. να είναι τουλάχιστον 3:1, που αντιστοιχεί με την οριακά αποδεκτή τιμή συντελεστή, εφόσον και η καταναλισκόμενη στην Α.Θ. ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με συντελεστή γύρω στο 1:3 από τα ενεργειακά στερεά ή υγρά καύσιμα.

Η κανονική γεωθερμική βαθμίδα των 0.03 K/m δεν είναι μόνη ικανή να δημιουργεί σε βάθη 0 - 150 m του υπεδάφους θερμοκρασίες ανώτερες των 0°C. Απαιτείται προς τούτο και η συμβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα της περιοχής, δηλαδή της εξωγενούς (ηλιακής) θερμικής ροής, για τη διαμόρφωση θερμοκρασιακών συνθηκών στο υπέδαφος ευνοϊκών για την οικονομικά και ενεργειακά συμφέρουσα λειτουργία των Α.Θ.

4. ΠΕΡΜΑΦΡΟΣΤ (PERMAFROST)

Στις αρκτικές περιοχές (Βόρειος Σιβηρία, βόρειο άκρο Σκανδιναβικής Χερσονήσου, Γροιλανδία, Βόρειος Καναδάς, Αλάσκα), οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του αέρα βρίσκονται υπό το 0°C και η γεωθερμική ροή αδυνατεί να αναπτύξει κάτω από την εδαφική επιφάνεια θερμοκρασίες υψηλότερες του 0°C. Έτσι, δημιουργείται το καλούμενο περμαφρόστ, δηλαδή εδαφικό στρώμα με υδάτινο περιεχόμενο μόνιμα παγωμένο. Η άνω επιφάνεια ενός περμαφρόστ καλείται οροφή αυτού.

Σε περιοχές περμαφρόστ, το πάνω από την οροφή τους επιφανειακό στρώμα παγώνει στη διάρκεια του χειμώνα και τήκεται στη διάρκεια του θέρους· καλείται δε *ενεργό εδαφικό στρώμα*. Το πάχος του στρώματος αυτού εξαρτάται από την υγρασία του, κυμαινόμενο από μερικά εκατοστά σε υγρά οργανικά εδάφη έως μερικές δεκάδες εκατοστά σε καλά αποστραγγιζόμενα αμμοχάλικα.

Το περμαφρόστ παρουσιάζεται περίπου στο 20% της εδαφικής επιφάνειας της Γης. Καλύπτει το 85% της Αλάσκας, το 59% της πρώην Σοβιετικής Ένωσης και του Καναδά, και πιθανότατα όλη την Ανταρκτική. Το πάχος του φτάνει 1.500 m στη Βόρεια Σιβηρία και 610 m στη Βόρεια Αλάσκα, και βαθ-

μιαία μηδενίζεται προς Ν. Παρατηρείται μια αξιοσημείωτη γεωγραφική συσχέτιση του νότιου ορίου του περμαφρόστ και της μέσης ετήσιας ισόθερμης του αέρα των 0°C [1].

Στον ευρωπαϊκό χώρο παρουσιάζεται περμαφρόστ στο βορειότερο τμήμα της Σκανδιναβικής Χερσονήσου και της Φιλανδίας, και στο κεντρικό ορεινό τμήμα της Ισλανδίας. Το πάχος του στρώματος του περμαφρόστ ελέγχεται από το θερμικό ισοζύγιο της ανοδικής γεωθερμικής ροής και της θερμικής ενέργειας που ακτινοβολείται στην ατμόσφαιρα, δηλαδή εξαρτάται από τη γεωθερμική βαθμίδα και τη μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα. Η μέση γεωθερμική βαθμίδα είναι 1 K ανά 30.5 - 61 m βάθους. Έτσι, η αύξηση του πάχους φθάνει μέχρι το βάθος, όπου η ποσότητα της γεωθερμικής ενέργειας, που εισρέει στο περμαφρόστ, εξισούται με τη θερμική ενέργεια που χάνεται στην ατμόσφαιρα.

Για να επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας σε ένα στρώμα περμαφρόστ πάχους λίγων εκατοντάδων μέτρων, χρειάζονται χιλιάδες έτη σταθερού κλίματος.

Η ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα από το χειμώνα στο θέρος αναπαράγεται μόνο στα ανώτερα δεκατόμετρα του εδάφους. Η θερμοκρασιακή διακύμανση στη συνέχεια ελαττώνεται γρήγορα με το βάθος, αφού στα 7.5 m φτάνει μόνο λίγους βαθμούς και μεταξύ 9.5 - 15 m σχεδόν μηδενίζεται. Η στάθμη της μηδενικής διακύμανσης έχει συνήθως τη χαμηλότερη θερμοκρασία, εφόσον έχει επιτευχθεί κατάσταση ισορροπίας στην ανάπτυξη του περμαφρόστ. Η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου ίση με την ετήσια θερμοκρασία της εδαφικής επιφάνειας και ακόμη βαθύτερα αυξάνει υπό την επίδραση της ανοδικής γεωθερμικής ροής.

Τα περμαφρόστ, όπως είναι σήμερα, είναι σχηματισμοί του παρόντος κλίματος της Γης. Εν τούτοις, πολλά από τα γνωστά περμαφρόστ δεν βρίσκονται σε ισορροπία με το σημερινό κλίμα και είναι, ασφαλώς, προϊόντα μιας προγενέστερης ψυχρότερης εποχής. Το παλαιότερο γνωστό περμαφρόστ της Βόρειας Αμερικής έχει ηλικία μεσοτεταρτογενή, δηλαδή μικρότερη των 2.000.000 ετών, ενώ τα περισσότερα υπάρχοντα σήμερα περμαφρόστ σχηματίστηκαν στη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους περιόδου που άρχισε πριν από 70.000 έτη και τελείωσε πριν από 10.000 έτη περίπου.

Το περμαφρόστ παριστά αποθηκευμένη ψυκτική ενέργεια που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί, εάν στην αντίστοιχη περιοχή υπήρχαν ανάγκες σε τέτοια ενέργεια. Όπως στις αρκτικές περιοχές οι κλιματικές συνθήκες έχουν προκαλέσει αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας, κατ' ανάλογο τρόπο στις υποτροπικές και τροπικές κλιματικές ζώνες έχει προκληθεί αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο υπέδαφος. Η ποσότητα της αποθηκευμένης θερμότητας είναι σταθερή ή αυξάνει ή μειώνεται, εφόσον το κλίμα της περιοχής παρουσιάζει αντίστοιχη σταθερότητα, αύξηση ή μείωση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα.

5. ΘΕΡΜΑΝΤΑΙΕΣ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ

Στις περιοχές με περμαφρόστ, οι Α.Θ. οι συζευγμένες με το υπέδαφος δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά, διότι τα παγωμένα υπόγεια νερά μειώνουν τη θερμοαγωγιμότητα των υπεδαφικών υλικών, ενώ, εξάλλου, οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν το COP των Α.Θ.

Στη Σουηδία, χώρα αμέσως νότια της ζώνης περμαφρόστ, έχουν δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί Α.Θ. συζευγμένες με το αβαθές υπέδαφος, πλην όμως το COP αυτών είναι χαμηλό, λόγω χαμηλών υπεδαφικών θερμοκρασιών (0°- 6°C), οι οποίες δημιουργούνται από τη γεωθερμική ροή αμέσως κάτω από την εδαφική επιφάνεια σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς να μπορεί η ασθενής ηλιακή θερμική διείσδυση να τις ανεβάσει περισσότερο. Προκειμένου στη χώρα αυτή να αξιοποιηθεί η ομαλή γεωθερμική ενέργεια για θέρμανση κτιρίων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, ώστε να περιορισθεί η χρήση του πετρελαίου, αναζητούνται, με γεωτρήσεις, υπόγεια νερά μεγάλου βάθους, όπου αυτά έχουν υψηλότερες θερμοκρασίες. Επειδή το ομαλό γεωθερμικό πεδίο της Γης δεν επηρεάζεται από το γεωγραφικό πλάτος, οι υψηλότερες θερμοκρασίες οφείλονται εδώ στη μεγαλύτερη διείσδυση της ηλιακής θερμικής ενέργειας στο υπέδαφος. Έτσι, στη Γαλλία, τη Γερμανία, την Ελβετία και την Αυστρία οι Α.Θ., που αξιοποιούν την υπεδαφική θερμότητα από μικρά βάθη (0 - 150 m), είναι πολύ διαδεδομένες. Εκτός από τα υπόγεια νερά, τα οποία, όπως αναφέρθηκε, παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, χρησιμοποιούνται στις χώρες αυτές και οι γεωθερμικοί εναλλάκτες. Έτσι, στην Ελβετία λειτουργούν ήδη σε 5.000 κτίρια γεωθερμικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν 10.000 γεωθερμικούς εναλλάκτες συνολικού μήκους 700.000 m και που παράγουν συνολική θερμική ισχύ περίπου 3.5 MW. Βάσει εθνικού προγράμματος, ο αριθμός των εγκαταστάσεων με γεωθερμικούς εναλλάκτες το έτος 2.000 θα φτάσει τις 100.000.

Στην Ελλάδα, όπου τα ανωτέρω γεωθερμικά συστήματα είναι ακόμη άγνωστα από πλευράς εφαρμογής, οι κλιματικές συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε η ηλιακή θερμική διείσδυση ανεβάζει τις υπεδαφικές θερμοκρασίες σε βάθη 0 - 150 m στους 16°- 22°C και συνεπώς, εκτιμάται ότι το θερμικό δυναμικό του ελληνικού υπεδαφους θα είναι της τάξης του διπλάσιου από αυτό της Ελβετίας, εάν τεθεί ως ενεργειακή βάση τους 0°C.

Οι υπεδαφικές θερμοκρασίες του ελληνικού χώρου μπορούν να γίνουν γνωστές τόσο από τις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του αέρα όσο και από άμεσες μετρήσεις, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε υπόγεια νερά (γεωτρήσεων, φρεάτων, πηγών) καθώς και στην πειραματική γεωθερμική εγκατάσταση του Αγίου Δημητρίου Κορωπίου (βλέπε παρακάτω)[2].

Για την ακριβέστερη εκτίμηση του θερμικού δυναμικού του υπεδάφους μιας περιοχής είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το θερμοκρασιακό πεδίο, όπως αυτό διαμορφώνεται από τις διάφορες θερμικές ροές που αναπτύσσονται μέσα σε αυτό και που είναι:

1. Η ανοδική γεωθερμική ροή, η οποία προκαλείται από τη γεωθερμική βαθμίδα. Αυτή, εφόσον δεν υφίσταται ειδικές γεωλογικές συνθήκες, π.χ. γειτονία ηφαιστειακής δραστηριότητας, έχει τιμές κυμαινόμενες στους $3.3 \text{ K} \pm 0.5\text{K}/100 \text{ m}$.
2. Πλευρικές θερμικές ροές μεταφερόμενες δι' αγωγής και με ρεύματα μεταφοράς με τη βοήθεια υπόγειων νερών (εάν είναι παρόντα) και,
3. Θερμικές ροές καθοδικές το καλοκαίρι και ανοδικές το χειμώνα, προκαλούμενες από τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της εδαφικής επιφάνειας και του υπεδάφους.

Ειδικότερα, οι τελευταίες θερμικές ροές έχουν για τη χώρα μας ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής αξιοποίησης. Στη διάρκεια του καλοκαιριού και συγκεκριμένα από το Μάιο μέχρι και το Σεπτέμβριο, παρατηρείται καθοδική θερμική ροή, η οποία έχει δημιουργήσει ένα τεράστιο απόθεμα θερμότητας στο υπέδαφος στη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου που ακολούθησε την τελευταία παγετώδη περίοδο.

6. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΕΔΑΦΙΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Μέχρι σήμερα στην Ελλάδα, έχουν γίνει μετρήσεις των θερμοκρασιών του υπεδάφους σε βάθη μεγαλύτερα των 50 m και σε υδατικό περιβάλλον στις στήλες ύδατος βαθιών γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν για αναζήτηση ορυκτών υδρογονανθράκων και γεωθερμικών ρευστών. Οι μετρήσεις αυτές είχαν σκοπό τον προσδιορισμό της γεωθερμικής βαθμίδας σε βάθος. Έτσι, δεν ήταν δυνατό να βρεθούν οι θερμοκρασιακές μεταβολές στο στερεό λιθολογικό περιβάλλον του αβαθούς υπεδάφους, δηλαδή στη ζώνη διείσδυσης της ηλιογενούς θερμότητας, στη διάρκεια του έτους. Οι μετρήσεις υπεδαφικών θερμοκρασιών σε βάθη 0.3, 0.6, 0.9 και 1.20 m, που εκτελέστηκαν στο Εθνικό Αστεροσκοπείο της Αθήνας^[3], δεν μπορούσαν να δώσουν αποτελέσματα ενδιαφέροντα για τη μελέτη της βαθύτερης διείσδυσης της ηλιογενούς θερμικής ροής.

Οι πρώτες στην Ελλάδα μετρήσεις υπεδαφικών θερμοκρασιών σε λιθογραφικό περιβάλλον πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική γεωθερμική εγκατάσταση του Αγίου Δημητρίου Κορωπίου, η οποία περιλαμβάνει γεώτρηση με γεωθερμικό εναλλάκτη σε μορφή διπλής φουρκέτας, μήκους (βάθους) 60 m. Στην εν λόγω γεώτρηση τοποθετήθηκαν πέντε θερμοστοιχεία Cu - CuNi σε βάθη 1, 15, 30, 45 και 60 m, με προορισμό τη μέτρηση της θερμοκρασίας πριν και κατά

τη λειτουργία της εγκατάστασης για θέρμανση - ψύξη κατοικίας. Ο γεωθερμικός εναλλάκτης τροφοδοτεί την Α.Θ. με θερμική ή ψυκτική ενέργεια, χρησιμοποιώντας το υπέδαφος σαν χώρο άντλησης (απορρόφησης) και απόρριψης (αποθήκευσης) θερμότητας.

Στις μετρήσεις ενός έτους στην πειραματική εγκατάσταση παρατηρούνται τα εξής:

1. Οι θερμοκρασίες εμφανίζουν διακύμανση της τάξης του μισού βαθμού Κέλβιν στα βάθη των 30, 45 και 60 m.
2. Η ηλιακή ενέργεια εμφανίζει την ετήσια επίδρασή της μέχρι και το βάθος των 15 m, με πιθανή πολύ μικρή επίδραση μέχρι το βάθος των 30 m. Οι μεταβολές είναι της τάξης μεγέθους των 0.2 K, δηλαδή πολύ κοντά στην ακρίβεια της μέτρησης του θερμοστοιχείου που είναι της τάξης μεγέθους $\pm 0.1\text{K}$. Είναι, εξάλλου, γνωστό και από τη βιβλιογραφία ότι ετήσιες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις διαπιστώνονται από τα όργανα μέχρι το βάθος των 15 m περίπου.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η μέγιστη θερμοκρασία, που εμφανίζεται κατά την περίοδο του χειμώνα μα και σε όλη τη διάρκεια, του έτους για όλα τα θερμοστοιχεία που είναι σε βάθος πέραν των 30 m, είναι αυτή του θερμοστοιχείου των 60 m βάθους, τάξης μεγέθους των 20°C και δεν αποτελεί μέρος κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας.

Είναι γνωστό ότι μια τυπικά κανονική γεωθερμική βαθμίδα εμφανίζει αύξηση θερμοκρασίας για βάθη πέραν των 18 m της τάξης των 3 - 4 K ανά 100 m. Αναμένεται, λοιπόν, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των θερμοστοιχείων των 30 και 60 m βάθους να βρίσκεται μόνιμα στο ύψος του 1 - 1.3 K.

Η ακρίβεια των μετρήσεων με θερμοστοιχεία Cu - CuNi είναι της τάξης του 0.1 K, όταν τα καλώδια σύνδεσης δεν έχουν μεγάλο μήκος. Στην περίπτωση αυτή, η ολική αντίσταση των καλωδίων μέσα στο έδαφος είναι μικρή και δεν επηρεάζει αισθητά τις μετρήσεις.

Η διαπίστωση, λοιπόν, μιας θερμοκρασιακής μεταβολής με το βάθος της μέτρησης το πολύ της τάξης του μισού βαθμού Κέλβιν - αφού παράλληλα έχει ληφθεί υπόψη η ακρίβεια του οργάνου - δείχνει ότι στην περιοχή του Αγ. Δημητρίου Κορωπίου δεν επιβεβαιώνεται η τυπικά κανονική γεωθερμική βαθμίδα, τουλάχιστον για την περιοχή βάθους μέχρι 60 m.

7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Οι μετρήσεις των θερμοκρασιών πραγματοποιήθηκαν με τα θερμοστοιχεία, τα οποία έχουν τοποθετηθεί στη γεώτρηση σε βάθη 1, 15, 30, 45 και 60 m και αποτελούνται από ζεύγος χαλκού και κωνσταντάνης (Cu - CuNi). Η ακρίβεια των θερμοστοιχείων αυτών είναι της τάξης του 0.1 K. Το όργανο καταγραφής των τιμών των θερμοκρασιών είναι ψηφιακό βολτόμετρο ακριβείας με ηλεκτρονικό σημείο πάγου (σημείο

αναφοράς). Θα μπορούσε, φυσικά, να είναι ένα απλό βολτόμετρο ακριβείας με φυσικό σημείο πάγου και με χρήση ενός ακόμα θερμοστοιχείου (Cu - CuNi) για τη θερμοκρασία αναφοράς (0°C).

Η συχνότητα των μετρήσεων ήταν αρχικά ανά 15 - 30 ημέρες για διάστημα 2 ετών, πριν τεθεί σε λειτουργία η θερμαντλία, δηλαδή πριν διαταραχθεί το θερμικό πεδίο γύρω από τη γεώτρηση. Όταν άρχισε η λειτουργία αυτή, διακόπηκαν οι μετρήσεις των μεταβολών των θερμοκρασιών στα παραπάνω βάθη, λόγω των φυσικών φαινομένων, εφόσον εκκίνησε η διαταραχή του πεδίου, καθώς και σε άλλα σημεία της εγκατάστασης, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ανταπόκριση του συστήματος της θερμαντλίας και κατ' επέκταση τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης της κατοικίας. Η επέκταση των μετρήσεων κατά τη λειτουργία της ως άνω εγκατάστασης θα αναπτυχθεί σε επόμενη ανακοίνωση, όταν επέλθει χρόνος, ώστε τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων να είναι αξιόπιστα.

Ο προσδιορισμός των θερμοκρασιακών μεταβολών γύρω από τη γεώτρηση, που επιτυγχάνεται με τις υπεδάφικες μετρήσεις, επιτρέπει τη μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων λ (ειδική θερμική αγωγιμότητα), c (ειδική θερμοχωρητικότητα) και ρ (πυκνότητα) του υπεδάφους, και τη δυνατότητα αξιοποίησης της περιεχόμενης σε αυτό ενέργειας, βασιζόμενοι στη μεγάλη θερμοχωρητικότητα και τη μέτρια θερμοαγωγιμότητα αυτών σε σχέση με τον αέρα.

Μέσα στο γεωθερμικό εναλλάκτη, που ενσωματώνεται στη γεώτρηση, κυκλοφορεί νερό σε κλειστό κύκλωμα που οδηγεί στο συμπυκνωτή ή στον ατμοποιητή της θερμαντλίας. Κατά την περίοδο του θέρους, ο γεωθερμικός εναλλάκτης χρησιμεύει για τη μεταφορά θερμότητας από το κτίριο μέσω της θερμαντλίας στα υλικά του υπεδάφους, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασιακής στάθμης του υπεδάφους γύρω από τη γεώτρηση σε ύψος τέτοιο, ώστε στη διάρκεια της λειτουργίας να επέρχεται ισορροπία της θερμικής ροής μεταξύ γεωθερμικού εναλλάκτη και των υλικών του υπεδάφους. Αντίστροφα, κατά την περίοδο του χειμώνα ο γεωθερμικός εναλλάκτης απορροφά θερμότητα από το υπέδαφος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πτώση της θερμοκρασιακής στάθμης γύρω από τη γεώτρηση, πάλι μέχρι ενός σημείου ισορροπίας.

Από μετρήσεις που εκτελέστηκαν στην Ελβετία, βρέθηκε ότι η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 30 - 40 W/m βάθους του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας σχήματος U και τεσσάρων σωλήνων διαμέτρου 32 mm. Η παροχή νερού πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή των απαιτήσεων της θερμαντλίας.

Από εναλλάκτη θερμότητας μήκους 100 m δύναται να αντληθεί θερμότητα με ισχύ της τάξης των 4 kW υπό συνεχή θερμική άντληση. Η θερμαντλία με τη δράση του συμπιεστή

της ανεβάζει την τελική ισχύ στα 5 - 6 kW. Με την τιμή αυτή μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης κατοικίας με καλή θερμομόνωση, εμβαδού 100 m² περίπου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η λειτουργία της γεωθερμικής εγκατάστασης προκαλεί στο υπέδαφος γύρω από τη γεώτρηση ταπείνωση της θερμοκρασιακής στάθμης το χειμώνα και ανύψωση αυτής το καλοκαίρι. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να φτάσουν τους 10 K και προκαλούν αύξηση του συντελεστή απόδοσης της θερμαντλίας, δηλαδή COP, κατά 20 - 30 %.

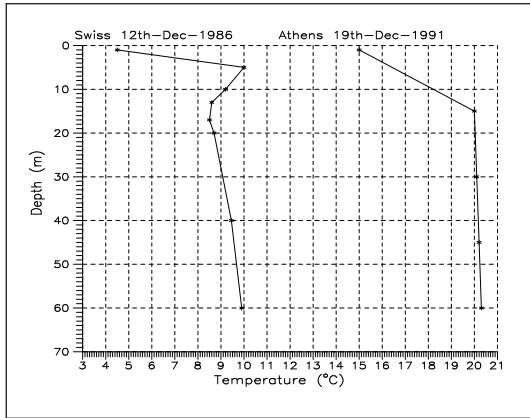
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μετρήσεις υπεδάφικών θερμοκρασιών στη γεωθερμική εγκατάσταση Αγίου Δημητρίου Κορωπίου άρχισαν την 1-7-1991 και με διακοπές συνεχίστηκαν μέχρι το Μάρτιο 1995.

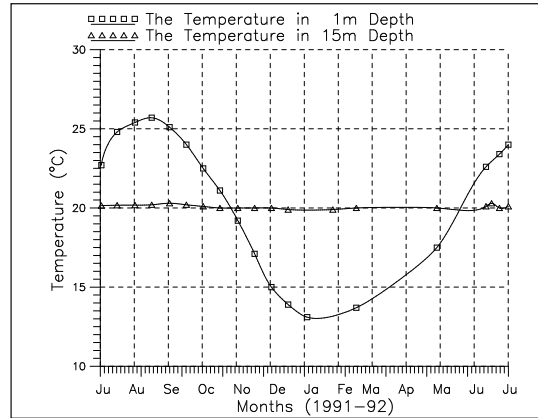
Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν μέχρι το Μάρτιο 1995, έδειξαν ότι η εποχιακή (ετήσια) διακύμανση της θερμοκρασίας στα στρώματα του υπεδάφους οφείλεται στη θερινή διείσδυση ηλιακής θερμότητας σε αυτό, φτάνει μέχρι βάθος 15 - 20 m, ενώ βαθύτερα και μέχρι τα 60 m (όπου έγιναν οι μετρήσεις) η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή, χωρίς να εμφανίζει σαφή επηρεασμό από τη γεωθερμική βαθμίδα. Η διαπίστωση αυτή ερμηνεύεται ως συνέπεια της υπερετήσιας διείσδυσης της ηλιακής θερμότητας μέχρι βάθος τουλάχιστον 60 m. Το φαινόμενο αυτό δεν έχει παρατηρηθεί σε αντίστοιχες μετρήσεις θερμοκρασιών στην Ελβετία, όπου από το βάθος των 15 m και κάτω διαπιστώνεται με σαφήνεια η επίδραση της γεωθερμικής βαθμίδας. Ασφαλώς το φαινόμενο αυτό είναι απόρροια των διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών στη χώρα αυτή σε σχέση με τη χώρα μας.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτουν από τα σχήματα 1 έως 6 και δείχνουν ότι στο υπέδαφος της περιοχής της γεωθερμικής εγκατάστασης και, πιθανότατα, στο υπέδαφος της ευρύτερης περιοχής της Αττικής, σε βάθη τουλάχιστον μέχρι 60 m, είναι αποθηκευμένες σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας προερχόμενες από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην εδαφική επιφάνεια.

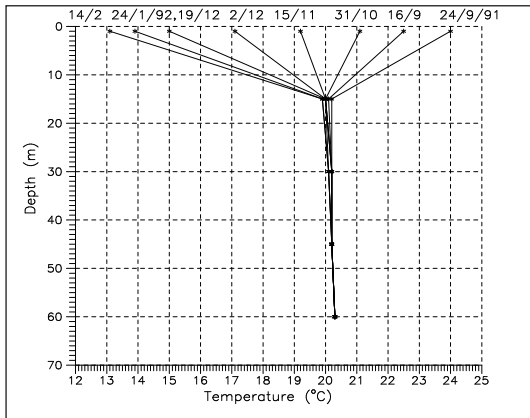
Στο διάγραμμα του σχήματος 1 υπολογίστηκαν από τις κλήσεις των θερμοκρασιακών καμπυλών στα βάθη από 15m έως 60m τιμές γεωθερμικής βαθμίδας 3.3 K/100m στο υπέδαφος της εγκατάστασης του Elgg της Ελβετίας (μετρήσεις στις 12-12-86) και 0.6 K/100m στο υπέδαφος της εγκατάστασης του Αγίου Δημητρίου Κορωπίου (μετρήσεις 19-12-91). Στη δεύτερη περίπτωση, η υπολογισθείσα τιμή βρίσκεται σχεδόν στα όρια του σφάλματος του οργάνου. Εάν πράγματι η τιμή 0.6 K δίνει κάποια τάξη μεγέθους της γεωθερμικής βαθμίδας, αυτή μπορεί να ερμηνευθεί ως ένδειξη ύπαρξης ασθενούς ανοδικής γεωθερμικής ροής που αναπτύσσεται το



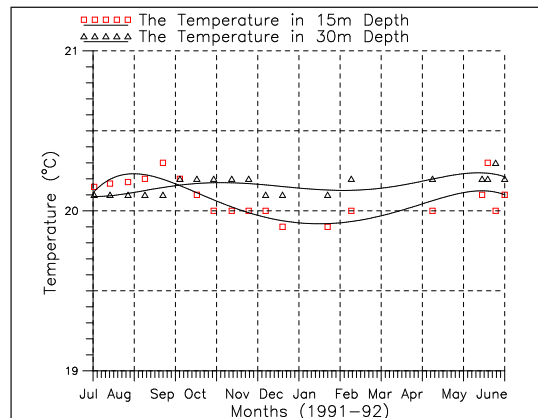
Σχήμα 1: Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ Ελβετίας και Ελλάδας.
Fig 1: Comparison of measurements between Switzerland and Hellas (Athens).



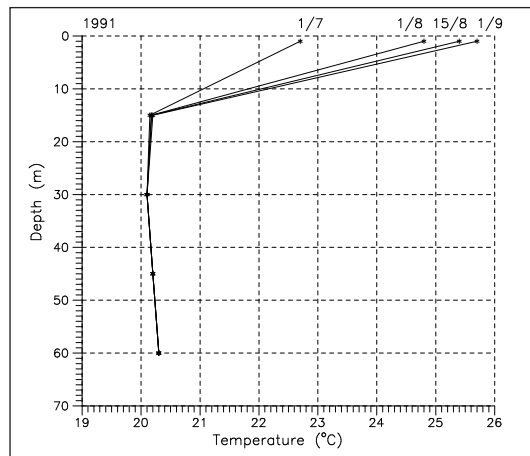
Σχήμα 4: Μετρήσεις σε βάθος 1m και 15m.
Fig 4: Measurements at depth 1m and 15m.



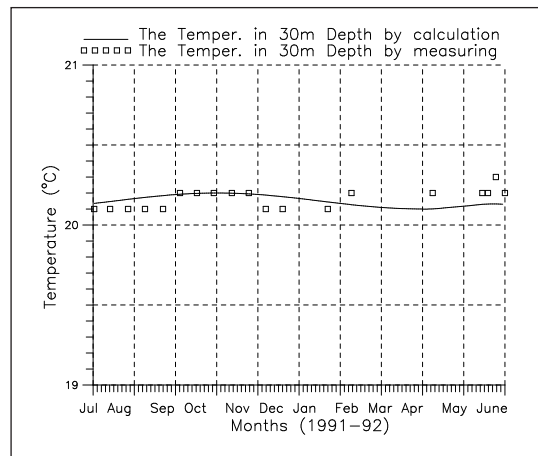
Σχήμα 2: Μετρήσεις περιόδου 24/9/91 - 14/2/92.
Fig 2: Measurements of period 24/9/91 - 14/2/92.



Σχήμα 5: Μετρήσεις σε βάθος 15m και 30m.
Fig 5: Measurements at depth 15m and 30m.



Σχήμα 3: Μετρήσεις περιόδου 1/7/91 - 1/9/91.
Fig 3: Measurements of period 1/7/91 - 1/9/91.



Σχήμα 6: Σύγκριση μετρήσεων και υπολογιστικής μεθόδου.
Fig 6: Comparison between measurements and calculating method.

χειμώνα λόγω απουσίας καθοδικής ηλιοθερμικής ροής στην περιοχή της Αττικής.

Στο διάγραμμα των σχημάτων 2 και 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμοκρασιακών μετρήσεων του υπεδάφους κατά μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη της εγκατάστασης του Αγίου Δημητρίου. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν την απόσβεση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων της ηλιακής επενέργειας στο βάθος των 15 m. Στο σχήμα 4 φαίνονται η έντονη ετήσια διακύμανση της θερμοκρασίας στο βάθος του 1m και η ασθενέστατη διακύμανση γύρω στους 20°C στο βάθος των 15 m. Στο σχήμα 5 συγκρίνονται οι ετήσιες διακυμάνσεις των θερμοκρασιών στα βάθη των 15m και των 30m, ενώ στο σχήμα 6 συγκρίνονται οι καμπύλες των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων σε βάθος 30m που σχεδιάστηκαν αφ' ενός από τα αποτελέσματα μετρήσεων με τα γεωθερμόμετρα και αφ' ετέρου από το υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της θερμικής διείσδυσης στο φλοιό της Γης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και έχοντας λάβει υπόψη τα θερμικά χαρακτηριστικά των υπεδάφικών υλικών στη θέση της γεώτρησης. Οι καμπύλες των δύο μεθοδολογιών συμπίπτουν σημαντικά.

Συγκρίνοντας στο σχήμα 1 το διάγραμμα (αριστερά) των μετρήσεων, που έχουν γίνει στο Elgg της Ελβετίας την 12 Δεκεμβρίου 1986, με το διάγραμμα (δεξιά) των μετρήσεων στον Άγιο Δημήτριο Κορωπίου Αττικής της 19ης Δεκεμβρίου 1991, παρατηρείται ότι στο διάγραμμα του Elgg παρουσιάζεται σαφώς η κανονική γεωθερμική βαθμίδα, ενώ στο διάγραμμα της περιοχής Αγίου Δημητρίου διαπιστώνεται η ύπαρξη υπερετήσιας καθοδικής θερμικής ροής, η οποία διακρίνεται μέχρι το βάθος των 30m και στα σχήματα 2 και 3. Αυτό οφείλεται, προφανώς, στο ότι έχει προηγηθεί εδώ μια ψυχρότερη γεωλογική εποχή, η οποία πρέπει να συμπίπτει με την τελευταία φάση της περιόδου των παγετώνων. Η φάση αυτή, όπως είναι γνωστό, άρχισε πριν 90.000 έτη περίπου και έληξε πριν 10.000 έτη περίπου. Έτσι, μπορεί από τα διαγράμματα των σχημάτων 2 και 3 να εξαχθεί το συμπέρασμα

της ύπαρξης εναπομείνουσας σχετικά ψυχρής υπεδάφικης ζώνης με θερμοκρασίες μικρότερες από τις αναμενόμενες από μια κανονική γεωθερμική βαθμίδα κάτω από τα 15m και μέχρι τα 60m. Εδώ παρατηρείται πολύ μικρή μέχρι μηδενική μεταβολή των θερμοκρασιών μετά του βάθους λόγω της θερμικής διείσδυσης από την ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας, π.χ. μεταξύ 30 και 60 m βάθους σε μέγεθος 0.1 K, η οποία βρίσκεται μέσα στο σφάλμα μέτρησης, είναι ασήμαντη σε σχέση με το 1 K που περιμένουμε για τα 30m βάθους ($60 - 30 = 30m$) σε μια κανονική γεωθερμική βαθμίδα. Συνεπώς, στο μεν Elgg της Ελβετίας διακρίνεται σαφώς η εκδήλωση της κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας, ενώ στον Άγιο Δημήτριο Κορωπίου αυτή διαταράσσεται από την καθοδική υπερετήσια θερμική ροή ηλιογενούς προέλευσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπαγεωργάκης, Ι. (1993): "Η πρώτη στην Ελλάδα κατοικία με γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης - ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού". Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Παπαγεωργάκης, Ι. (1992): "Θέρμανση - ψύξη κτιρίων με αβαθή γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα". Ανακοίνωση στο 4ο Συνέδριο του Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνολογίας για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Ξάνθη.
3. Mihalakakou, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. (1992): "Modeling the earth temperature using multiyear measurements". Energy and Buildings, 19 (1-9). Elsevier Sequoia.
4. Hadorn, J.C. (1989): "Weigleitung zur saisonalen Waerme-speicherung". Schweizerischer Ingenieur- und Architekten - Verein.
5. Kapp, Chr. (1994): "Untiefe geothermische Energieressourcen: Theorie und praktische Anwendungen". Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, 87. Band.
6. Παπαγεωργάκης, Ι. (1992): "Αξιοποίηση της ομαλής γεωθερμικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο". Ανακοίνωση στο 6ο Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Αθήνα.
7. Παπαγεωργάκης, Ι. (1994): "Ηλιογεωθερμία κατά του νέφους της Αθήνας". Πυρφόρος, τ. 15, Ε.Μ.Π, Ι. (1994): "Το ενεργειακό πρόβλημά μας και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας". Πυρφόρος, τ. 16, Ε.Μ.Π.
8. Pewe, T. (1969): "The Periglacial Environment; Past and Present". Mc Gill-Queens University Press.
9. Rybach, L. and Hopkirk, R. (1995): "Shallow and deep borehole heat exchangers - Achievements and prospects". World Geothermal Congress, Florence.

Μ.Γρ. Βραχόπουλος,

Δρ μηχανολόγος μηχανικός, καθηγητής ΣΕΛΕΤΕ, επιστημονικός συνεργάτης Τομέα Θερμότητας Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

† **Ι. Παπαγεωργάκης,**

Γεωλόγος, ομότιμος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Extended summary

Exploitable Solargenous and Indigenous Heating in the Flat Subsoil of Attiki

M.GR. VRACHOPOULOS
Dr Mechanical Engineer N.T.U.A.

† **J. PAPAGEORGAKIS**
Professor Emeritus N.T.U.A.

Abstract

Until now in Hellas, the needs of energy for heating buildings, refrigeration and the production of hot water are covered almost completely by mining fuels that pollute the environment, are not renewable and burden the national economy. 40% of the energy consumption is due to building needs, which require temperatures below 60°C and can be satisfied by environmental heat using heat pumps, with a corresponding reduction of the use in polluting fuels. From the point of view of energy economy, a heat pump is attractive when its coefficient of performance is higher than 3:1. One type of environmental heat is the normal geothermal energy. This is due to the penetration of solar radiation and the ascending geothermal energy. The method of pumping heat is either through subsoil water or through rocks using geothermal exchangers (vertical earth heat exchangers). The system's geothermal exchanger capacity is expected to reach 50 - 60 watt/m depth, unless it is located in a permafrost area where its efficiency is greatly reduced. The first measurements of surface temperatures in Hellas were performed at Ag. Dimitrios Koropi, at depths of 1, 15, 30, 45 and 60 m during the whole year. Compared to the corresponding measurements in Switzerland, the existence of an overyear descending thermal flow has been confirmed and has been recorded up to 30 m depth. Obviously, this is due to the fact that a colder geologic period has preceded here.

1. INTRODUCTION

Until now in Hellas, the requirements of energy for heating buildings, refrigeration and production of water have being fulfilled almost completely by mining fuels that pollute the environment, are not renewable and burden the national economy.

3. OVERGROUND OR UNDERGROUND THERMAL SPRING?

Environmental thermal energy can be used with heat pumps, that is, the energy included in the material mass of the

direct environment of the building, in air, in water and in ground or underground. The environmental thermal energy derives from:

1. solar energy,
2. normal geothermal energy.

The capacity of a heat pump to produce thermal energy which is financially feasible depends on the coefficient of performance (COP).

The energy of the compressor (E_c) is usually electrical but it may be of some other origin. In that case we avoid the disadvantages of electric power consumption so the operation of the heat pump is energetically interest and environmental-friendly, even with a coefficient of performance <3:1.

3. ENERGY OF UNDERGROUND WATER AND ROCKS

The underground water is the best solution for satisfying the heating and cooling requirements of a building with a heat pump provided that it is available with a minimum stable provision.

The methodology of use that has been developed is based on the following principle: In a drilling, a closed circuit of water is placed which is connected with the steamer (evaporator) of a heat pump. Water through this circuit transfers heat from the subsoil to the steamer.

4. PERMAFROST

In arctic areas the average annual temperatures of air are below 0°C and the geothermal flow is not able to develop temperatures above 0°C under the ground. In this way, Permafrost is formed, that is, a ground layer with a water content permanently frosted. The upper surface of a permafrost is called the roof.

5. HEAT PUMPS CONNECTED WITH UNDERGROUND

In the areas with permafrost the heat pumps that are connected with the subsoil can operate efficiently because the frosted underground water reduces the conductivity of the subsoil substances, while the low temperatures reduce the COP of the heat pumps.

In Hellas, where the above geothermal systems are still unknown, as far as their application is concerned, the climatological conditions are such that the solar thermal penetration increases the subsoil temperatures at depths of 0 - 150 m to 16°-22°C and so we estimate that the thermal potential of the Hellenic subsoil will be double that in Switzerland if we accept 0°C as an energy base.

The subsoil temperatures in Hellas can be known from the average annual temperatures of air and from the direct measurements that have taken place in underground water (drillings, wells, springs), as well as from the experimental geothermal installation at Ag. Dimitrios, Koropi.

6. MEASUREMENTS OF UNDERGROUND TEMPERATURES IN HELLAS

Until now in Hellas, measurements of subsoil temperatures have taken place at depths of greater than 50 m and in the water environment of deep drillings that have been made in order to seek mineral hydrocarbons and geothermal liquids.

In Hellas, the first measurements of subsoil temperatures in rock environment were made in the experimental geothermal installation at Ag. Dimitrios, Koropi, which includes drilling, with a geothermal exchanger (vertical earth heat exchanger) of double U type tubes and at a depth of 60 m. In this drilling five thermocouples Cu - CuNi at depths of 1, 15, 30, 45 and 60 m were placed in order to measure the temperature before and during the operation of the installation for heating - cooling a house.

The geothermal exchanger supplies the heat pump with thermal or cooling energy using the subsoil as a place of heat pumping and heat rejection.

During the measurements of one year in the experimental installation we observed the following:

1. The temperatures show a fluctuation of half a degree of Kelvin at depths of 30, 45 and 60 m.
2. Solar energy exhibits its annual effect at a depth of 15 m, with a possible very small effect at a depth of 30 m. Fluctuations are in the range of 0.2K that is, very close to the measurement accuracy of the thermocouple which is in the range of 0.1 K. Moreover, it is known through the bibliography that the annual temperature fluctuations are confirmed by the instruments at the depth of 15 m.

It is important to notice that the maximum temperature which appears during the winter is the one of the 60m depth thermocouple. This temperature is 20°C and it does not comprise a part of the normal geothermal grade.

It is known that a typically normal geothermal grade shows an increase of temperature, in depths higher than 18 m, of 3-4K per 100 m. So, we expect the difference of temperature between the 30 and 60 m depth thermocouples to be permanently at the level of 1-1.3 K.

So the confirmation for a temperature change of half a degree Kelvin (we have taken under consideration the accuracy of the instrument) along with the depth of the measurement, shows that in the area of Ag. Dimitrios, Koropi, we do not have the certainty of a typically normal geothermal grade, at least in depths down to 60m.

7. MEASUREMENTS AT THE AG. DIMITRIOS INSTALLATION

The measurements of temperatures were made with the thermocouples which were placed in the drilling at depths of 1, 15, 30, 45 and 60 m and which consist of a copper and constantane couple.

The accuracy of these thermocouples is 0.1K.

The instrument for recording the temperature values is a digital voltmeter with electronic ice point.

The frequency of measurements had initially been every 15 - 30 days for 2 years before the heat pump was put into operation, that is, before the thermal field round the drilling was disturbed.

When this operation started, the measurements of the temperature changes at the above depths stopped, as well as at the other points of the installation, so that conclusions could be drawn concerning the correspondence of the heat pump system and therefore the heating and cooling requirements of the house.

8. RESULTS AND CONCLUSIONS

The measurements of subsoil temperatures at the Ag. Dimitrios' Koropi geothermal installation began on July 1st 1991 and continued with some interruptions till March 1995.

Figure 1 shows the temperature curves at depths of 15 - 30m values of geothermal grade 3.3K/100m at Elgg's installation subsoil in Switzerland (measurements on December 12th 1986) and 0.6K/100m at Ag. Dimitrios' Koropi installation subsoil were calculated by the inclinations of temperature curves at depths of 15 - 30 m (measurements on December 19th 1991).

In the diagrams of figs 2 and 3 the results of subsoil temperature measurements along the geothermal exchanger of

Ag. Dimitrios installation are presented. These results show the attenuation of the temperature fluctuation of solar effect at a depth of 15 m. In fig. 4, the intense annual temperature fluctuation at the depth of 1 m and the weakest fluctuation at about 20°C at the depth of 15 m are shown.

In fig. 5, the annual temperature fluctuation at the depths of 15 and 30 m are compared. Fig. 6 compares the curves of

the temperature fluctuations at the depth of 30 m, drawn from the results of measurements with geothermometers as well as from the calculating equivalent model of thermal penetration into the crust of the earth with the method of finite differences and taking into account the thermal characteristics of subsoil materials at the point of the drilling. The curves of the two methods essentially coincide.

M.Gr. Vrachopoulos,

Dr mechanical engineer N.T.U.A., professor SELETE, scientific contributor N.T.U.A.

† **J. Papageorgakis,**

Professor emeritus N.T.U.A.