
Οδηγός
Σχεδιασμού και Εγκατάστασης
Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας

Απόστολος Κ. Μιχόπουλος
Βασιλική Βούλγαρη
Θεόδωρος Ζαχαριάδης

Οδηγός Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας

Copyright © 2015 Απόστολος Κ. Μιχόπουλος

ISBN 978-9963-2224-1-4 (ηλεκτρονική έκδοση)

ISBN 978-9963-2224-0-7 (έντυπη έκδοση)

Ο Οδηγός σχεδιασμού και εγκατάστασης συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας συντάχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο: “Ground Source Heat Pump systems for nearly zero energy buildings: Energy, environmental and economic assessment for Cyprus”. Το έργο χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας της Κύπρου (ΙΠΕ) μέσω του προγράμματος «ΔΕΣΜΗ 2009-2010» (πρόγραμμα Νο. ΔΙΔΑΚΤΩΡ/0311/37), το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Κυπριακή Δημοκρατία και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης.

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος του οδηγού με οποιοδήποτε μέσο χωρίς την έγγραφη άδεια των συγγραφέων.

Οδηγός Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας

Συγγραφείς

Απόστολος Κ. Μιχόπουλος

Μηχανολόγος Μηχανικός, Dr.-Ing./Ph.D., Dipl.-Ing./M.Eng., M.Sc.

Βασιλική Βούλγαρη

Μηχανολόγος Μηχανικός, Dipl.-Ing./M.Eng.

Θεόδωρος Ζαχαριάδης

Μηχανολόγος Μηχανικός, Dr.-Ing./Ph.D., Dipl.-Ing./M.Eng.

Ομάδα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Οικονομίας και Πολιτικής (3EP)

Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Περιβάλλοντος

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Τ.Θ.: 50329, 3603, Λεμεσός, Κύπρος

Τηλ. 25 24 5026,

e-mail: a.michopoulos@cut.ac.cy

1. Εισαγωγή

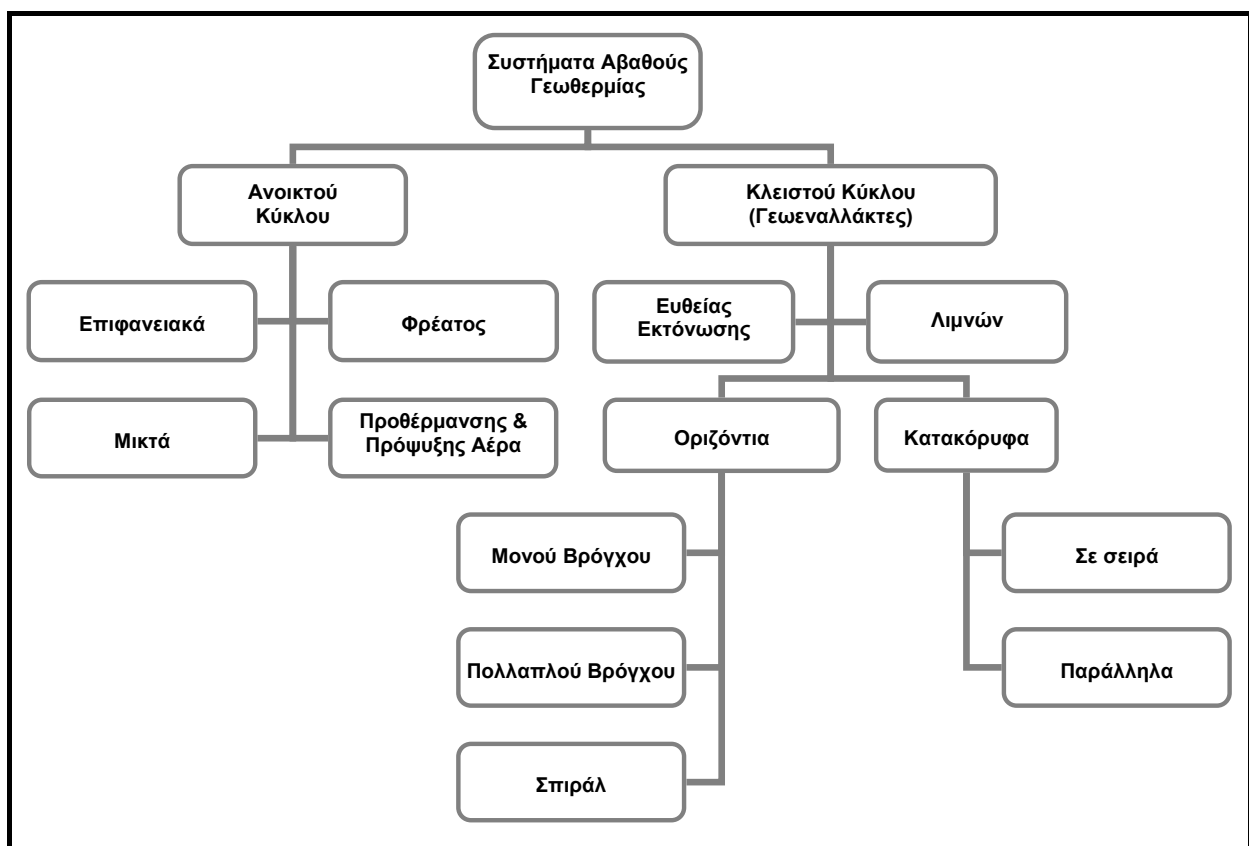
Η τεχνική αυτή έκθεση αποτελεί ένα σύντομο οδηγό για το σχεδιασμό, τη διαστασιολόγηση και την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας και απευθύνεται σε σχεδιαστές και εγκαταστάτες των εν λόγω συστημάτων. Ειδικότερα ο οδηγός απαρτίζεται από τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται τα διάφορα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας και περιγράφονται τα κύρια συστατικά τους μέρη. Το δεύτερο μέρος του οδηγού, περιλαμβάνει βασικές κατευθυντήριες οδηγίες για το σχεδιασμό, τη διαστασιολόγηση και την εγκατάσταση των συστημάτων αυτών. Ο οδηγός ολοκληρώνεται με μια σύντομη σύνοψη των αποτελεσμάτων του ερευνητικού έργου, τα οποία προσφέρουν στον αναγνώστη μια ολοκληρωμένη εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες που συνοδεύουν τη χρήση των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στον κτιριακό τομέα της Κύπρου.

2. Κατηγορίες συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας

Τα συστήματα αβαθούς γεωθερμίας, Εικόνα 1, χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- στα συστήματα ανοικτού κύκλου (open loop) και
- στα συστήματα κλειστού κύκλου (closed loop),

με τέσσερις υποκατηγορίες το καθένα.



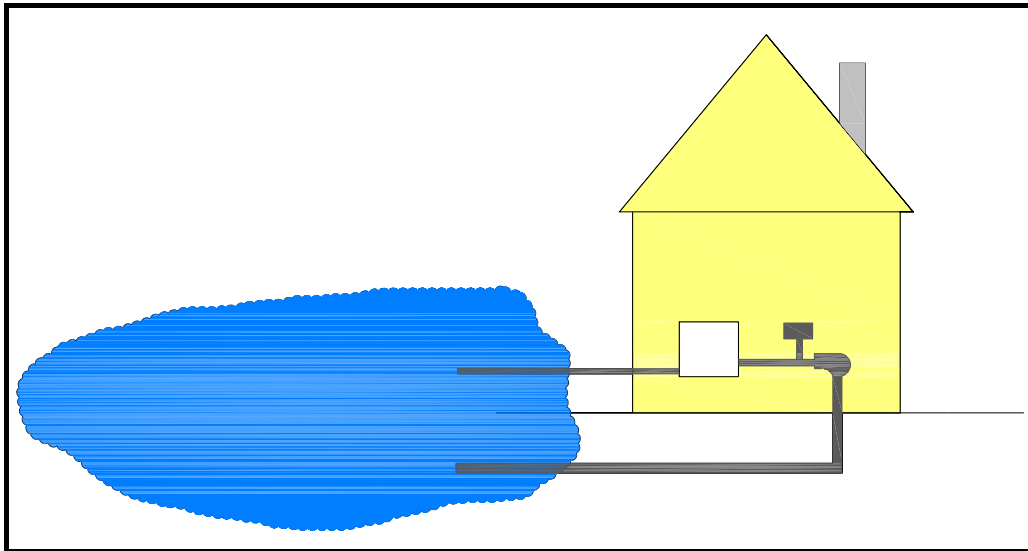
Εικόνα 1: Σχηματική παράσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας

2.1 Συστήματα ανοικτού κύκλου

Συστήματα ανοικτού κύκλου χαρακτηρίζονται κυρίως αυτά που το πρωτεύον κύκλωμά τους αντλεί νερό από υδροφόρο σχηματισμό. Το νερό χρησιμοποιείται για την απόδοση/απολαβή θερμότητας στο δευτερεύον κύκλωμα (κύκλωμα θέρμανσης-κλιματισμού κτιρίου), και στη συνέχεια απορρίπτεται είτε στην πηγή προέλευσής του είτε σε όμορο υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Για την απρόσκοπτη λειτουργία των συστημάτων αυτών, το νερό πρέπει να είναι διαθέσιμο σε κατάλληλη ποσότητα και ποιότητα καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής τα συστήματα ανοικτού κύκλου διακρίνονται σε:

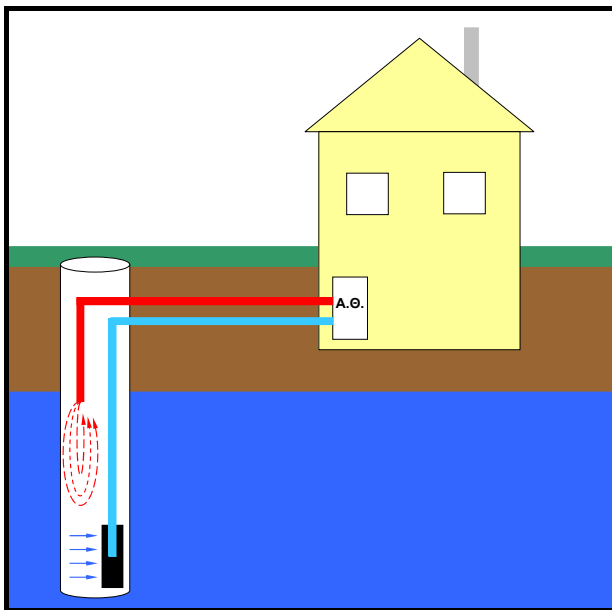
- επιφανειακά συστήματα,
- συστήματα φρέατος,
- μικτά συστήματα.

Επιφανειακά συστήματα ανοικτού κύκλου ονομάζονται τα συστήματα που αντλούν νερό για το πρωτεύον κύκλωμά τους από μια επιφανειακή πηγή π.χ. μία λίμνη ή έναν ποταμό, Εικόνα 2. Η απόρριψη του νερού γίνεται πάλι στην ίδια επιφανειακή πηγή.

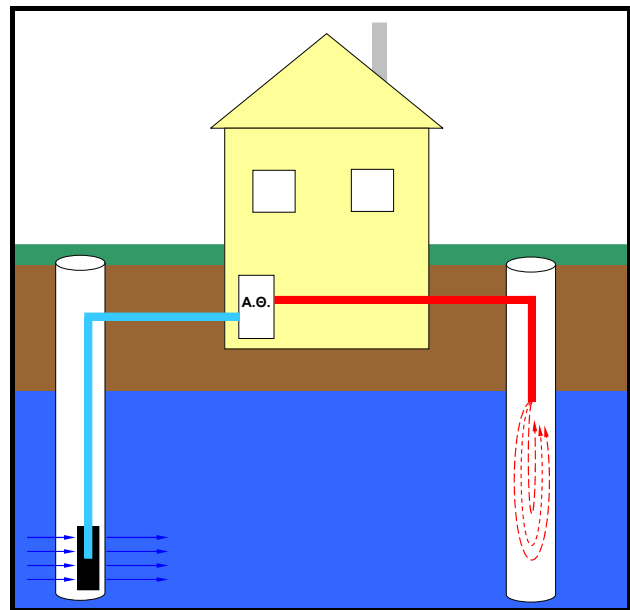


Εικόνα 2: Επιφανειακό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας

Τα συστήματα φρέατος αντλούν νερό από υπόγειο υδροφορέα μέσω μιας γεώτρησης (φρέαρ). Η απόρριψη στην περίπτωση αυτή γίνεται είτε μέσω του ίδιου φρέατος, Εικόνα 3, είτε σε έτερο φρέαρ στον ίδιο όμως υδροφορέα, Εικόνα 4. Στην περίπτωση της άντλησης/απόρριψης σε διπλό φρέαρ ο μόνος κατασκευαστικός περιορισμός είναι η απόρριψη να γίνεται σε σημείο κατάντη του σημείου άντλησης ώστε να αποφεύγεται η ανάμιξη των δύο ρευμάτων και η άντληση φυσικού νερού που έχει αναμιχθεί με νερό απόρριψης που θα αλλοιώσει έτσι τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος. Στην εναλλακτική περίπτωση όπου η άντληση και απόρριψη γίνεται στο ίδιο φρέαρ, η κατασκευή απαιτεί κατάλληλη τεχνική η οποία επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της αντλίας αναρρόφησης σε κατάλληλο βάθος ώστε να απέχει αρκετά από το σωλήνα απόρριψης του νερού στον υδροφορέα.

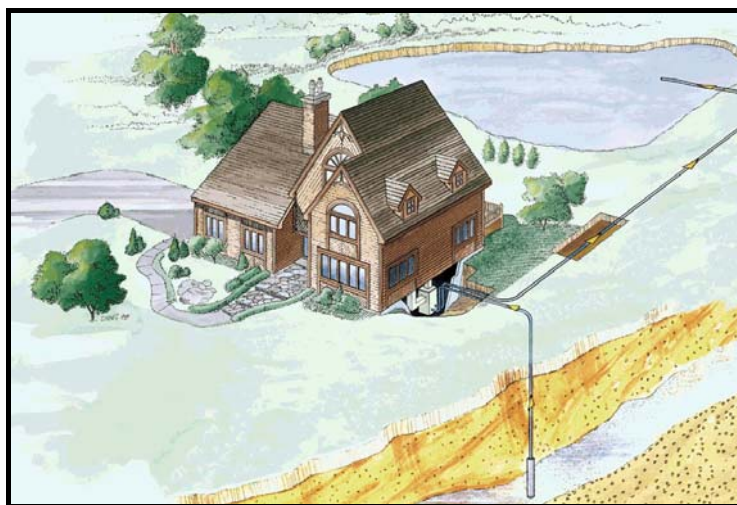


Εικόνα 3: Ανοικτό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας μονού φρέατος



Εικόνα 4: Ανοικτό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας διπλού φρέατος

Για την αποφυγή ανάμιξης των δυο ρευμάτων έχει αναπτυχθεί επίσης κατάλληλη τεχνολογία [1] η οποία χρησιμοποιεί κατάλληλα παρεμβύσματα στεγάνωσης που διαιρούν τη γεώτρηση σε τρεις περιοχές. Η άντληση του ρευστού γίνεται από τη βάση της κάτω περιοχής (περιοχή υποπίεσης) ενώ η απόρριψη γίνεται στο μέσο της μέσης περιοχής (περιοχή υπερπίεσης). Εξαιτίας της υπερπίεσης και των παρεμβυσμάτων το ρευστό αναγκάζεται να εξέλθει από τα τοιχώματα της μέσης περιοχής ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτό την πιθανότητα ανάμιξής του με το προς άντληση ρευστό. Εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης των δύο ρευμάτων στην ίδια γεώτρηση είναι η άντληση να πραγματοποιείται από βαθύτερα υδρολογικά στρώματα και η απόρριψη να γίνεται σε υδροφορέα ανεξάρτητο από τον υδροφορέα άντλησης ο οποίος όμως να βρίσκεται μικρότερο βάθος [2]. Στην περίπτωση αυτή η γεώτρηση διαιρείται σε δύο ζώνες, ζώνη απόρριψης και άντλησης αντίστοιχα, με διαφορετικές διαμέτρους στις οποίες επίσης παρεμβάλλεται κατάλληλο μεταλλικό και ελαστικό παρέμβυσμα (φλάντζα). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται και πάλι η άντληση φυσικού νερού που έχει αναμιχθεί με νερό απόρριψης.



Εικόνα 5: Μικτό ανοικτό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας

Τα μικτά συστήματα, Εικόνα 5, ανοικτού κύκλου αποτελούν συνδυασμό των δυο προηγούμενων. Σε αυτά η άντληση και η απόρριψη γίνεται από διαφορετικούς υδροφόρους σχηματισμούς, που μπορεί να βρίσκονται ακόμη και σε διαφορετικό επίπεδο.

Η επιλογή της εγκατάστασης ενός ανοικτού συστήματος αβαθούς γεωθερμίας εμφανίζει έναντι των λοιπών συστημάτων οικονομικά πλεονεκτήματα αλλά και σημαντικά μειονεκτήματα τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η δυνατότητα κατασκευής ενός ανοικτού συστήματος εξαρτάται βασικά από τη διαθεσιμότητα υδροφόρου σχηματισμού ικανοποιητικής παροχής η οποία να παραμένει σταθερή στη διάρκεια του χρόνου και να είναι διαθέσιμη σε ικανή (κοντινή) απόσταση από τη θέση εγκατάστασης. Η εξάρτηση όμως της διαθεσιμότητας και της παροχής των υδροφορέων τόσο από τις κλιματικές όσο και από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής δημιουργεί ισχυρή αβεβαιότητα ως προς τη διαχρονική ικανότητα χρήσης τους. Αυτός άλλωστε είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο προτιμείται τις περισσότερες φορές η εγκατάσταση ενός κλειστού αβαθούς γεωθερμικού συστήματος ακόμα και όταν υπάρχει η διαθεσιμότητα υδροφορέα για την εγκατάσταση ανοικτού.

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας ανοικτού κύκλου	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλότερο κόστος συντήρησης από τα συμβατικά συστήματα.	Προβλήματα στην απόρριψη του νερού μετά την κυκλοφορία του στην αντλία θερμότητας.
Μικρότερες απώλειες κατά τη μεταφορά θερμότητας.	Το θερμό νερό της ψυκτικής περιόδου εγκυμονεί κινδύνους θερμικής ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής.
Χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας στους κυκλοφορητές.	Απαιτούν νερό καλής ποιότητας για την τροφοδοσία της αντλίας.
Μεγαλύτερη ευελιξία στην λειτουργία, στην επέκταση και στον περιορισμό.	Απαιτούν νερό σταθερής παροχής και ποιότητας.
	Ανάγκη εγκατάστασης συστημάτων καθαρισμού και αποσκλήρυνσης του νερού.
	Υψηλή αβεβαιότητα για την εύρεση της κατάλληλης ποσότητας και ποιότητας νερού με αντίστοιχη οικονομική επιβάρυνση.
	Κόστος κατασκευής των φρεατίων.
	Ανάγκη εγκατάστασης εφεδρικών βοηθητικών συμβατικών συστημάτων.

2.2 Συστήματα κλειστού κύκλου

Η δεύτερη κατηγορία συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας όπως προαναφέρθηκε είναι τα συστήματα κλειστού κύκλου. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά και ως συστήματα γεωεναλλακτών (ground heat exchangers, GHE), λόγω ακριβώς της ύπαρξης εναλλάκτη θερμότητας που είναι τοποθετημένος μέσα στο έδαφος. Με τη χρήση του εναλλάκτη επιτυγχάνεται η μεταφορά θερμότητας από το έδαφος προς το νερό ή προς το διάλυμα νερού/αντιπηκτικού που κυκλοφορεί στο πρωτεύων κύκλωμα (γεωεναλλάκτης) των συστημάτων. Ο γεωεναλλάκτης κατασκευάζεται συνήθως από σωλήνες πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) διαμέτρου 19 ως 40 mm, και σπανιότερα από πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Σπανιότερα και σε ειδικές εφαρμογές ο γεωεναλλάκτης δύναται να κατασκευαστεί από σωλήνες χαλκού με κατάλληλη αντιδιαβρωτική προστασία. Ανάλογα με το είδος του εναλλάκτη, τα συστήματα κλειστού κύκλου χωρίζονται σε: (α) οριζόντια συστήματα και (β) κατακόρυφα συστήματα.

2.2.1 Οριζόντια συστήματα κλειστού κύκλου

Οριζόντια ονομάζονται τα συστήματα στα οποία ο γεωεναλλάκτης οδεύει παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους και σε βάθη από 1,2 έως 2,5 m. Για την κατασκευή των συστημάτων αυτών διανοίγεται στο έδαφος όρυγμα κατάλληλων διαστάσεων μέσα στο οποίο τοποθετείται ο γεωεναλλάκτης.

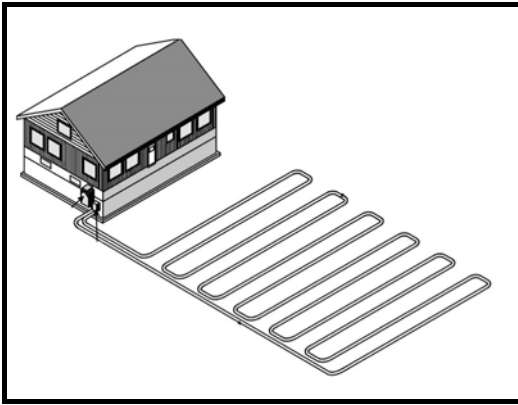
Η κατασκευή του γεωεναλλάκτη ξεκινά με την επίστρωση του πυθμένα του ορύγματος με λεπτόκοκκη άμμο ικανού πάχους η οποία σκοπό έχει την προστασία του από τραυματισμούς που μπορούν να τον καταστρέψουν λόγω της επαφής του με αιχμηρές επιφάνειες του ορύγματος. Στη συνέχεια τοποθετείται ο σωλήνας, γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις-κολλήσεις των επιμέρους τμημάτων του και πραγματοποιούνται οι απαραίτητες δοκιμές και έλεγχοι για τυχόν διαρροές. Ο γεωεναλλάκτης για λόγους προστασίας καλύπτεται και πάλι με στρώμα λεπτόκοκκης άμμου ενώ το υπόλοιπο του ορύγματος πληρώνεται με τα υλικά της εκσκαφής. Ανάλογα με το είδος των βρόχων του γεωεναλλάκτη τα οριζόντια συστήματα αβαθούς γεωθερμίας κλειστού κύκλου διακρίνονται σε:

- συστήματα μονού βρόχου,
- συστήματα πολλαπλού βρόχου και
- συστήματα με σπειροειδή γεωεναλλάκτη.

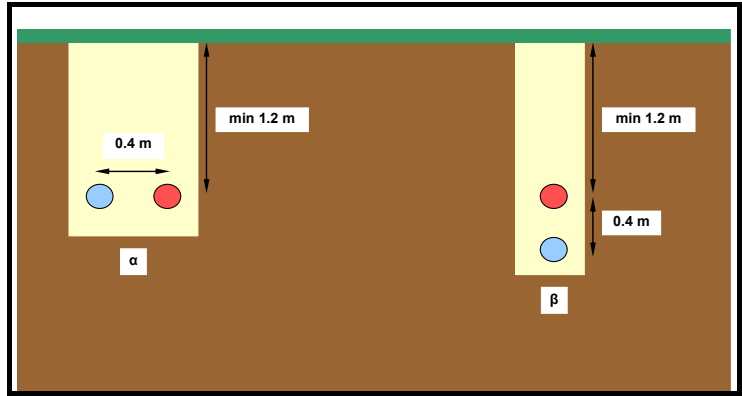
Στα συστήματα μονού βρόχου, Εικόνα 6, το ρευστό του πρωτεύοντος κυκλώματος της αντλίας θερμότητας διατρέχει το γεωεναλλάκτη σε όλο του το μήκος. Ο γεωεναλλάκτης κατασκευάζεται σε βάθος τουλάχιστον 1,2 m από την επιφάνεια του εδάφους με την απόσταση μεταξύ των σωλήνων ίση με 0,4 m. Η διάταξη των σωλήνων του γεωεναλλάκτη γίνεται είτε σε οριζόντιο επίπεδο, Εικόνα 7α, είτε σε κατακόρυφο επίπεδο, Εικόνα 7β, αλλά σε κάθε περίπτωση η δεσμευόμενη επιφάνεια του εδάφους είναι σημαντική και η διαθεσιμότητά της αποτελεί βασικό κριτήριο για την εγκατάσταση του συστήματος.

Στα συστήματα πολλαπλού βρόχου, οι βρόχοι του εναλλάκτη οδεύουν είτε σε παράλληλα επίπεδα Εικόνα 8γ και 8δ, είτε σε κατακόρυφη διάταξη με την τοποθέτησή τους να γίνεται στο ίδιο επίπεδο, και τον έναν βρόχο να διαδέχεται τον άλλο, Εικόνα 8α και 8β. Ο υδραυλικός σχεδιασμός των συστημάτων πολλαπλού βρόχου περιλαμβάνει συστήματα όπου το ρευστό να διατρέχει όλο το μήκος του εναλλάκτη, οπότε ο εναλλάκτης χαρακτηρίζεται μίας διαδρομής, ή να κινείται μόνο σε

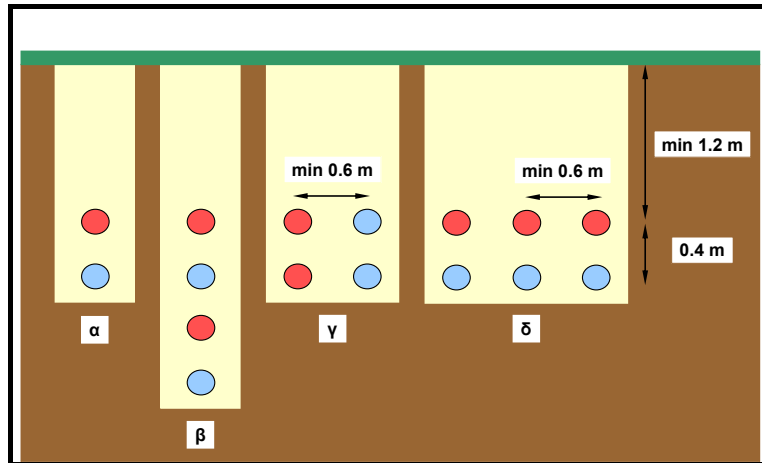
ένα βρόχο και μέσω συλλέκτη να οδηγείται στην αντλία θερμότητας. Στη δεύτερη περίπτωση ο γεωεναλλάκτης χαρακτηρίζεται ως εναλλάκτης πολλαπλών διαδρομών, Εικόνα 9.



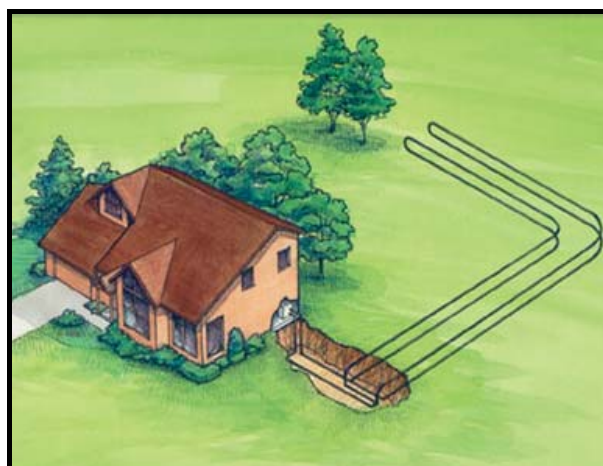
Εικόνα 6: Σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με οριζόντιο γεωεναλλάκτη μονού βρόχου



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση όδευσης σωλήνων οριζόντιου γεωεναλλάκτη μονού βρόγχου: (α) οριζόντια διάταξη, (β) κατακόρυφη διάταξη

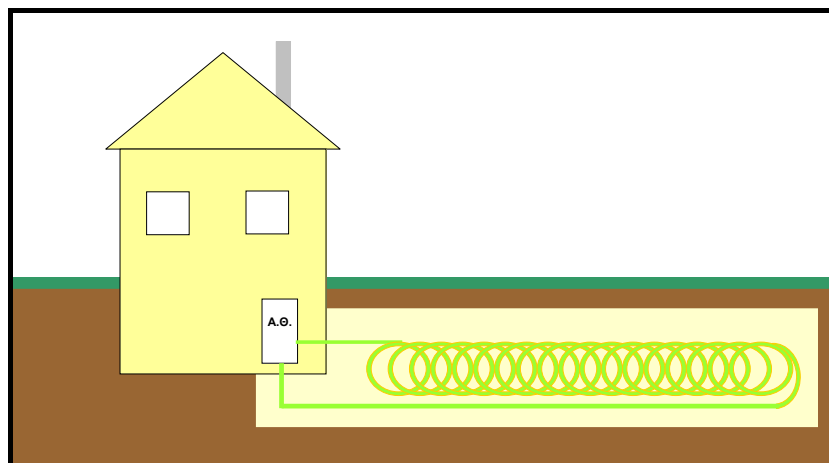


Εικόνα 8: Σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με οριζόντιο γεωεναλλάκτη πολλαπλού βρόγχου: (α), (β) κατακόρυφη διάταξη, (γ), (δ) οριζόντια διάταξη



Εικόνα 9: Οριζόντιο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με οριζόντιο γεωεναλλάκτη πολλαπλών βρόχων και πολλαπλών διαδρομών

Τα οριζόντια συστήματα με σπειροειδή γεωεναλλάκτη, Εικόνα 10, αποτελούν ίσως την πιο σπάνια μορφή συστημάτων της οικογένειας αυτής. Τα συστήματα αυτά κατασκευάζονται όταν η διαθέσιμη έκταση γης δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την εγκατάσταση ενός συστήματος μονού/πολλαπλού βρόχου. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή της ελικοειδούς μορφής του γεωεναλλάκτη μειώνει έως και 70% το απαιτούμενο μήκος του, προσφέροντας ανάλογο θερμικό αποτέλεσμα με περισσότερα όμως μέτρα σωλήνωσης. Η κατασκευή των σπειροειδών συστημάτων γίνεται με οποιαδήποτε πυκνότητα ελίκωσης σπείρας και με τη διάταξή της είτε οριζόντια είτε κάθετα ως προς την επιφάνεια του εδάφους.

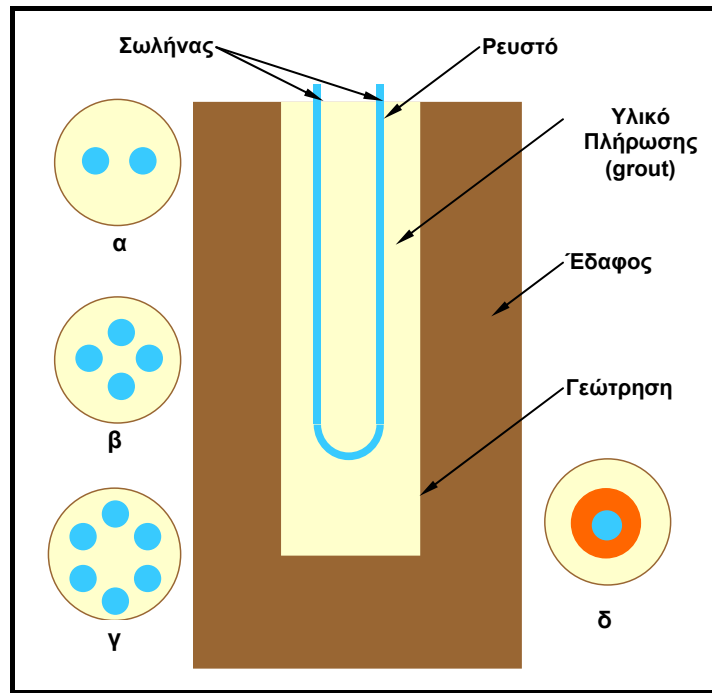


Εικόνα 10. Οριζόντιο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με σπειροειδή γεωεναλλάκτη

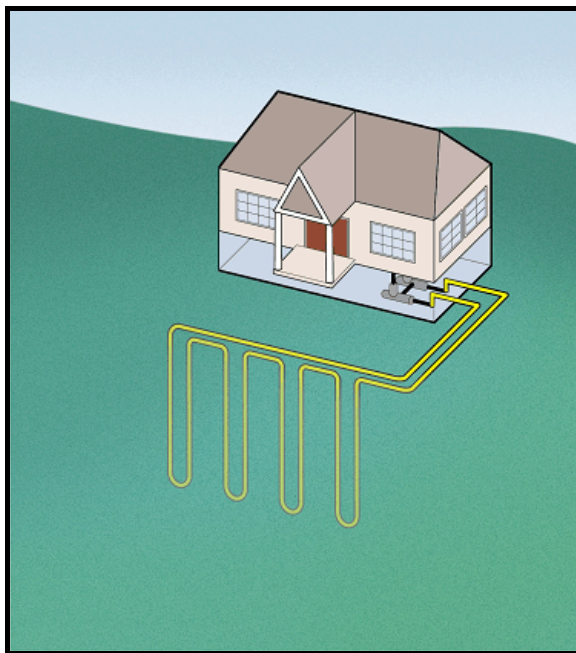
2.2.2 Κατακόρυφα συστήματα κλειστού κύκλου

Κατακόρυφα ονομάζονται τα συστήματα, στα οποία ο γεωεναλλάκτης τοποθετείται κάθετα στην επιφάνεια του εδάφους και σε μήκη που συνήθως κυμαίνονται από 50 έως 150 m. Τα συστήματα αυτά αποτελούν τη συνήθη μορφή εγκατάστασης των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Η κατασκευή ενός κατακόρυφου συστήματος ξεκινά με τη διάνοιξη γεωτρήσεων στο επιθυμητό βάθος σχεδιασμού με τη μεταξύ τους απόσταση να κυμαίνεται από 3 ως 6 m. Στην κάθε γεώτρηση τοποθετείται σωλήνωση τύπου φουρκέτας (U-tube) με πυκνότητα μεταξύ ενός έως και τεσσάρων βρόχων. Η πυκνότητα των βρόχων της κάθε γεώτρησης εξαρτάται τόσο από τα φορτία σχεδιασμού, τα οποία θα κλιθεί να αντιμετωπίσει ο γεωεναλλάκτης, όσο και από τη διαθέσιμη για την εγκατάσταση του συστήματος έκταση εδάφους. Εναλλακτική σωλήνωση για την κατασκευή του γεωεναλλάκτη αποτελεί ο διπλός ομοαξονικός σωλήνας, με μικρής όμως έκτασης χρήση. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται μία τυπική απεικόνιση γεώτρησης κατακόρυφου γεωεναλλάκτη με τις δυνατές εναλλακτικές κατασκευαστικές παραλλαγές της.

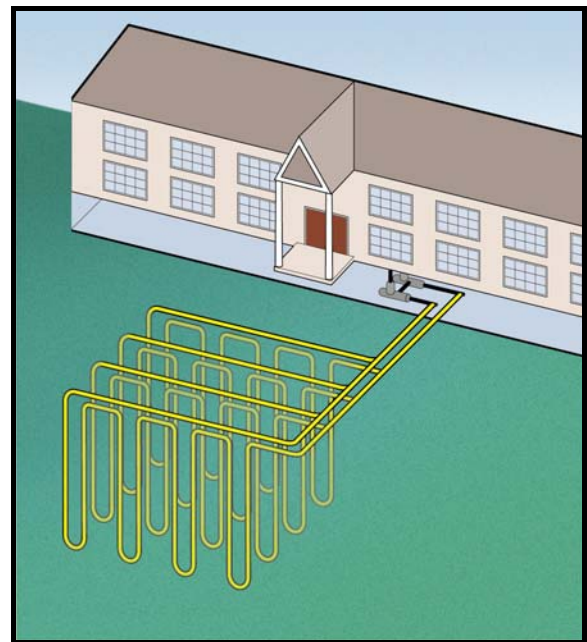
Μετά την τοποθέτηση της σωλήνωσης η γεώτρηση πληρώνεται με συμπαγές υλικό, συνήθως μίγμα τσιμέντου, μπετονίτη και χαλαζιακής άμμου σε διάφορες αναλογίες. Σκοπός του υλικού πλήρωσης είναι να προστατέψει τη σωλήνωση από πιθανές καθιζήσεις του εδάφους αλλά παράλληλα και να βελτιώσει τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ρευστού του γεωεναλλάκτη. Για τη βελτίωση της ροής θερμότητας από και προς το γεωεναλλάκτη έχουν αναπτυχθεί σήμερα ειδικά ρευστοκονιάματα, προϊόντα της βιομηχανίας υλικών, τα οποία βελτιώνουν σημαντικά τη ροή θερμότητας και αυξάνουν συγχρόνως την απόδοση των συστημάτων.



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση κατακόρυφου γεωεναλλάκτη σε τομή



Εικόνα 12: Κατακόρυφο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με γεωεναλλάκτη σε σειρά



Εικόνα 14: Κατακόρυφο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με γεωεναλλάκτη μικτού τύπου.

Όπως τα οριζόντια έτσι και τα κατακόρυφα συστήματα χωρίζονται σε παράλληλα και σε συστήματα σε σειρά, Εικόνα 12. Στα συστήματα σε σειρά όλη η μάζα του ρευστού διατρέχει το γεωεναλλάκτη σε όλο το μήκος του, ενώ στα παράλληλα το ρευστό μέσω συλλέκτη διανέμεται στα επιμέρους κατακόρυφα τμήματα (βρόχους) του γεωεναλλάκτη και με τη βοήθεια δεύτερου συλλέκτη οδηγείται στις αντλίες θερμότητας, Εικόνα 13. Από το συνδυασμό των δυο παραπάνω κατασκευαστικών μορφών γεωεναλλάκτη προκύπτει και μια ενδιάμεση μορφή συστήματος που ονομάζεται μικτό. Στα μικτά συστήματα το ρευστό μετά το συλλέκτη διανομής διατρέχει περισσότερους από έναν βρόγχους του γεωεναλλάκτη, για να επιστρέψει στο συλλέκτη συλλογής, Εικόνα 14.



Εικόνα 13: Κατακόρυφο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με παράλληλο γεωεναλλάκτη

Συγκρίνοντας γενικότερα τους δύο τύπους γεωεναλλακτών δηλαδή τους οριζόντιους και τους κατακόρυφους, προκύπτει πως η κατασκευή κατακόρυφων γεωεναλλακτών υπερέχει σε εφαρμογές από τους οριζόντιους [3]. Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες:

- Τα κατακόρυφα συστήματα δεσμεύουν λιγότερη επιφάνεια γης για την εγκατάστασή τους, ειδικά σε οικιστικές περιοχές όπου το κόστος απόκτησης γης είναι πολύ υψηλό.
- Τα κατακόρυφα συστήματα είναι πιο «σταθερά» διότι δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από τις εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας, λόγω του μεγάλου βάθους εγκατάστασής τους.

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κατακόρυφων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας κλειστού κύκλου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<p>Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και επισκευής και υψηλότερη διάρκεια ζωής από τα συμβατικά συστήματα.</p> <p>Δεν επηρεάζονται έντονα από τα καιρικά φαινόμενα.</p> <p>Παρουσιάζουν υψηλή ευελιξία.</p> <p>Απαιτούν μικρότερο χώρο εγκατάστασης.</p>	<p>Υψηλότερο κόστος εγκατάστασης.</p> <p>Δέσμευση γης για την εγκατάσταση του συστήματος.</p> <p>Ύπαρξη κατάλληλης τεχνογνωσίας για το σχεδιασμό, εγκατάσταση και εκκίνηση του συστήματος.</p> <p>Ηλεκτρική και υδραυλική συντήρηση.</p>

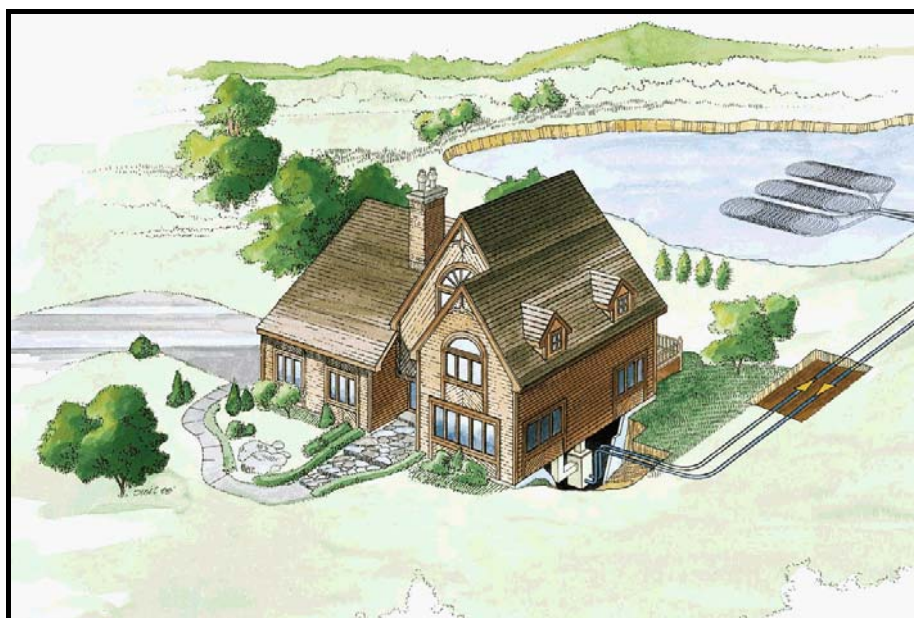
Από τους παραπάνω τύπους γεωεναλλακτών με κατάλληλες κατασκευαστικές τροποποιήσεις μπορούν προκύψουν και τα συστήματα: (α) λιμνών, απευθείας εκτόνωσης (DX).

2.3 Συστήματα λιμνών

Τα συστήματα λιμνών, Εικόνα 15, είναι ουσιαστικά οριζόντια συστήματα με σπειροειδή εναλλάκτη, τα οποία βυθίζονται μέσα σε μια λίμνη. Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος οι επιπρόσθετες ανάγκες που παρουσιάζονται είναι:

- η ύπαρξη ελάχιστου βάθους της λίμνης για την εγκατάσταση (25 m),
- η ανάγκη προσθήκης αντιπηκτικού, τουλάχιστον 20% κ.ο.,
- η λίμνη να βρίσκεται κοντά στην εγκατάσταση.

Για την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας σε λίμνες ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επίδραση που έχουν στο οικοσύστημα του υδροβιότοπου. Η άντληση/απόρριψη θερμότητας μεταβάλλει τις συνθήκες του συστήματος και εγκυμονεί συχνά κινδύνους θερμικής ρύπανσης. Επίσης στα συστήματα αυτά απαιτείται η λήψη πρόσθετων μέτρων ασφαλείας για την αποφυγή διαρροής του αντιπηκτικού διαλύματος, που ανεβάζουν αρκετά το κόστος της συνολικής εγκατάστασης.



Εικόνα 15: Οριζόντιο σύστημα αβαθούς γεωθερμίας με σπειροειδή γεωεναλλάκτη

2.4 Συστήματα απευθείας εκτόνωσης

Τα συστήματα απευθείας εκτόνωσης (Direct Expansion - DX) αποτελούν την πιο ειδική μορφή συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με περιορισμένες εφαρμογές. Χώρες στις οποίες εγκαθίστανται συστήματα ευθείας εκτόνωσης είναι οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, οι Σκανδιναβικές χώρες, η Γερμανία και η Αυστρία. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και εξασφαλίζουν τη μεγαλύτερη αξιοπιστία επειδή διαθέτουν λιγότερα μηχανολογικά μέρη. Ο γεωεναλλάκτης αυτών των συστημάτων κατασκευάζεται σε οποιαδήποτε μορφή οριζόντιος, κατακόρυφος ή και πλεγματικός και με οποιαδήποτε διάταξη. Συνήθως ο γεωεναλλάκτης των συστημάτων απευθείας εκτόνωσης δεν ξεπερνά σε μήκος τα 75 m [4] και λειτουργεί ως εξαμιστής/συμπυκνωτής της αντλίας θερμότητας. Για το λόγο αυτό απαιτείται η κατασκευή του από χαλκό, με προφανείς επιπτώσεις στο κόστος εγκατάστασης. Συχνά οι χάλκινες σωληνώσεις εντός του εδάφους

καλύπτονται από έναν εξωτερικό μανδύα πολυαιθυλενίου για προστασία έναντι της διάβρωσης. Οι μέθοδοι εγκατάστασης των συστημάτων απευθείας εκτόνωσης ποικίλουν παρότι καλύπτονται ήδη από θεσμοθετημένα πρότυπα π.χ. DIN 8901:2002 [5], τα οποία θα πρέπει να εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση.

Για την εγκατάσταση συστήματος απευθείας εκτόνωσης είναι σημαντικό ο χώρος τοποθέτησης να έχει ισοπεδωθεί και έχει υποστεί κατάλληλη μηχανική συμπίεση ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε καθίζηση ή άλλη εδαφική ανωμαλία η οποία θα καταστρέψει τον εναλλάκτη. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται επίσης στην ορθή διαχείριση των όμβριων υδάτων τα οποία παρότι επιδρούν θετικά στη μεταφορά θερμότητας από/προς το έδαφος εντούτοις η συγκέντρωσή τους στη θέση εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος εγκυμονεί κίνδυνο καθίζησης του εδάφους με συνέπεια την καταστροφή του γεωεναλλάκτη. Για το λόγο αυτό συνιστάται η εγκατάσταση συστήματος απορροής των όμβριων. Τέλος, είναι αναγκαία και η μέριμνα για την αποφυγή της διαρροής ψυκτικού ρευστού στο έδαφος μέσω της εγκατάστασης ηλεκτρομαγνητικής βάνας και ελεγκτή πίεσης στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη, έτσι ώστε πιθανή διαρροή να ανιχνεύεται άμεσα και να διακόπτεται η παροχή του ψυκτικού μέσου.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων ευθείας εκτόνωσης αβαθούς γεωθερμίας	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<p>Μικρότερο μήκος σωλήνων.</p> <p>Απουσία αντιψυκτικού διαλύματος.</p> <p>Απευθείας μετάδοση θερμότητας μεταξύ ψυκτικού ρευστού - γης.</p> <p>Απουσία κυκλοφορητών στο πρωτεύον κύκλωμα.</p> <p>Χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα.</p>	<p>Περιορισμός στο μήκος των σωλήνων, για αποφυγή μεγάλης πτώσης πίεσης.</p> <p>Απαιτήση μεγαλύτερης ποσότητας ψυκτικού μέσου με αντίστοιχη περιβαλλοντική επιβάρυνση.</p> <p>Ανάγκη ανοδικής προστασίας του σωλήνα από όξινα εδάφη.</p> <p>Υψηλότερος κίνδυνος αστοχίας του συστήματος λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας του πρωτεύοντος κυκλώματος.</p>

2.5 Υβριδικά Συστήματα

Η εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας συχνά γίνεται παράλληλα και σε συνδυασμό με την εγκατάσταση εναλλακτικών βοηθητικών συστημάτων πρόσδοσης ή απόρριψης θερμότητας όπως π.χ. θερμαντήρες ή ψύκτες νερού. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται υβριδικά και αποσκοπούν στην πρόσδοση θερμότητας στο σύστημα όταν η θερμοκρασία του πρωτεύοντος κυκλώματος (γεωεναλλάκτης) μειωθεί κάτω από την ελάχιστη αποδεκτή θερμοκρασία λειτουργίας των αντλιών θερμότητας (ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού) ή αντίστοιχα στην απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον όταν η αποθήκευσή της στο έδαφος για χρήση σε επόμενη θερμαντική περίοδο δεν είναι επιθυμητή ή θερμοκρασία του ρευστού στο γεωεναλλάκτη υπερβεί την ανώτερη αποδεκτή θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος (μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού). Η

κατασκευή των συστημάτων αυτών γίνεται στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται σημαντική διαφορά μεταξύ των θερμικών και ψυκτικών φορτίων του οικοδομήματος. Στις περιπτώσεις αυτές η επιλογή της εγκατάστασης ενός αμιγούς αβαθούς γεωθερμικού συστήματος θα έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός υπερδιαστασιοποιημένου γεωεναλλάκτη για τη μία χρήση (π.χ. θέρμανση) ο οποίος όμως επιβάλλεται για να καλύψει τις ανάγκες της ετέρας (π.χ. ψύξης), με καταρχήν συνέπεια το αυξημένο κόστος εγκατάστασης.

Η διαφορά όμως του ισοζυγίου απολαβής/απόρριψης θερμότητας στο έδαφος έχει επίσης ως αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις τη σημαντική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας του εδάφους στην περιοχή του γεωεναλλάκτη σε βάθος χρόνου. Προφανώς στην περίπτωση όπου το κτίριο εμφανίζει μεγαλύτερο θερμικό φορτίο το ισοζύγιο είναι αρνητικό για το έδαφος οπότε αναμένεται η μείωση της θερμοκρασίας του με την πάροδο του χρόνου, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το υψηλότερο ψυκτικό φορτίο οδηγεί σε θετικό ισοζύγιο με αποτέλεσμα την αύξηση αντίστοιχα της θερμοκρασίας του εδάφους. Το τελευταίο φαινόμενο είναι αρκετά επωφελές στη θερμαντική λειτουργία όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους θα βελτίωνε σημαντικά το βαθμό απόδοσης των αντλιών θερμότητας (SCOP). Στην ψυκτική όμως περίοδο η απόδοση του συστήματος θα μειώνονταν ενώ παράλληλα θα αύξανε η πιθανότητα αστοχίας του λόγω υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας του πρωτεύοντος κυκλώματος των αντλιών θερμότητας. Η αντίθετη προφανώς συμπεριφορά του συστήματος αναμένεται στην περίπτωση της μείωσης της θερμοκρασίας του εδάφους λόγω υψηλότερων θερμικών φορτίων. Στις περιπτώσεις λοιπόν αυτές η επιλογή ενός υβριδικού συστήματος περιορίζει στο ελάχιστο την πιθανότητα αστοχίας του, διατηρεί το συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος σε αποδοτικά όρια ενώ συγχρόνως με τον περιορισμό του μήκους του γεωεναλλάκτη επιτυγχάνεται και μείωση του αρχικού κόστους εγκατάστασης.

Τα υβριδικά συστήματα στην περίπτωση που απαιτείται απόρριψη θερμότητας εκτός του εδάφους, υψηλά ψυκτικά φορτία, αναπτύσσονται κυρίως στις νότιες περιοχές της εύκρατης ζώνης με χαρακτηριστική περιοχή εκτεταμένων εφαρμογών το νότιο τμήμα των Η.Π.Α., δύναται να περιλαμβάνουν:

- Ανοικτό πύργο ψύξης από τον οποίο η θερμότητα αποβάλλεται απευθείας στον αέρα.
- Κλειστό πύργο ψύξης ή ψυκτικό μηχάνημα εξάτμισης (evaporative cooler).
- Απόρριψη της πλεονάζουσας θερμότητας μέσω εναλλάκτη θερμότητας νερού-νερού σε κοντινό υδροφορέα π.χ. λίμνη, ποτάμι.
- Συμβατικό ψύκτη (chiller).

Αντίστοιχα σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα, όπου οι ανάγκες θέρμανσης είναι μεγαλύτερες από αυτές της ψύξης, η εγκατάσταση ενός υβριδικού αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με συμπληρωματική πηγή θερμότητας δύναται να περιλαμβάνει τις ακόλουθες συσκευές:

- Ηλεκτρικό θερμαντήρα.
- Λέβητα με καυστήρα στερεού, υγρού ή αερίου καυσίμου.
- Εναλλάκτη θερμότητας στην περίπτωση ύπαρξης κεντρικά διανεμόμενου θερμού νερού ή ατμού.
- Πεδίο ηλιακών συλλεκτών, το οποίο όμως συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με κάποιο από τα προαναφερθέντα βοηθητικά συστήματα.

3. Οδηγίες για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας λαμβάνει υπόψη μία σειρά από καθοριστικούς παράγοντες οι οποίοι εξαρτώνται: (α) από το είδος και τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, (β) από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης και (γ) από την επιλογή των συστατικών στοιχείων του συστήματος που θα προβεί ο μελετητής. Οποιαδήποτε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση παραγόντων οδηγεί είτε στην υποδιαστασιολόγηση του συστήματος, είτε στην υπερδιαστασιολόγησή του. Οι καταστάσεις αυτές δεν ευνοούν την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος, αλλά αντιθέτως οδηγούν σε αστοχία στην πρώτη περίπτωση και σε αυξημένο κόστος εγκατάστασης στη δεύτερη, γεγονός που μειώνει σημαντικά την οικονομική σκοπιμότητα της εγκατάστασης των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Επομένως συστήνεται ο μελετητής να προσεγγίζει με ιδιαίτερη προσοχή και ακρίβεια το σχεδιασμό αυτών των συστημάτων.

Η εγκατάσταση ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας απαιτεί ιδιαίτερη τεχνική και θα πρέπει να γίνεται από εγκαταστάτες που διαθέτουν τη σχετική εμπειρία ή πιστοποίηση. Αστοχίες συστημάτων έχουν καταγραφεί και σε περιπτώσεις κακής κατασκευής ή/και πλημμελούς προσοχής του εγκαταστάτη στο στάδιο της εγκατάστασης. Σε αυτό το στάδιο προκύπτουν συχνά δεδομένα που επιβάλλουν την αλλαγή ή και την τροποποίηση του αρχικού σχεδιασμού, λόγω πχ. αλλαγής των γεωλογικών παραμέτρων, κ.α. Θα πρέπει επομένως να υπάρχει διαρκής επίβλεψη του εγκαταστάτη από το μηχανικό εφαρμογής, αεραστή συνεργασία και αμφίδρομη ενημέρωση ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή και αποδοτική κατασκευή.

3.1 Παράμετροι σχεδιασμού των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας

Όπως προαναφέρθηκε βασική παράμετρος σχεδιασμού των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας αποτελούν τα χαρακτηριστικά του κτιρίου για το οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί το σύστημα. Στην κατηγορία αυτή λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Είδος κτιρίου (κατοικία, γραφεία, κτίριο εκπαίδευσης, κτλ),
- Συχνότητα χρήσης του κτιρίου (συνεχής, οκτάωρη, πενθήμερη, κτλ),
- Θερμικά και ψυκτικά φορτία ή,
- Ανάγκες σε ενέργεια για θέρμανση και ψύξη.

Από τις παραπάνω παραμέτρους ιδιαίτερης βαρύτητας για τον αποδοτικό σχεδιασμό των συστημάτων αποτελούν είτε τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου, είτε οι ανάγκες σε θερμική και ψυκτική ενέργεια και η συχνότητα χρήσης του κτιρίου. Η επιλογή της χρήσης των φορτίων ή της ενέργειας εξαρτάται από την επιλογή της μεθοδολογίας υπολογισμού του απαιτούμενου μήκους και των χαρακτηριστικών του γεωεναλλάκτη που θα ακολουθήσει ο μελετητής. Σήμερα διατίθενται στην αγορά πλειάδα λογισμικών που ακολουθούν την πρώτη ή τη δεύτερη προσέγγιση με εφάμιλλη ακρίβεια υπολογισμών. Ως εκ τούτου η επιλογή οποιασδήποτε προσέγγισης δεν εμφανίζει ιδιαίτερο πλεονέκτημα, με απόδειξη το πλήθος των επιτυχημένων εφαρμογών που έχουν να επιδείξουν παγκοσμίως και οι δύο μέθοδοι.

Ο υπολογισμός του θερμικού φορτίου του κτιρίου ακολουθεί σήμερα τυποποιημένες και επαληθευμένες μεθοδολογίες, πχ. EN 12831:2004 [6], με τις οποίες είναι πλέον εξοικειωμένοι οι μελετητές. Αντίστοιχη λογική υπάρχει και για τις μεθοδολογίες υπολογισμού του ψυκτικού φορτίου,

πχ. μεθοδολογίες ASHRAE, Carrier, κτλ. Η σωστή εφαρμογή των εν λόγω μεθοδολογιών με χρήση των κατάλληλων κλιματικών και εσωτερικών συνθηκών σχεδιασμού αποτελεί τη βάση ενός σωστού και ολοκληρωμένου σχεδιασμού. Στην περίπτωση που ο μελετητής-σχεδιαστής του συστήματος επιλέξει για τη διαστασιολόγηση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας τη χρήση μεθοδολογίας που βασίζεται στις ανάγκες ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, τότε ο προσδιορισμός των εν λόγω αναγκών θα πρέπει να γίνεται με υψηλή ακρίβεια και με τη χρήση λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης. Συνιστάται στην περίπτωση αυτή η ανάλυση του κτιρίου να πραγματοποιείται σε ωριαία βάση στην οποία και να προσδιορίζεται η ζήτηση ενέργειας. Η χρήση μηνιαίων μεθόδων ενεργειακής ανάλυσης θα πρέπει να αποφεύγεται καθώς αυτές οι μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη σημαντικές παραμέτρους της λειτουργίας του κτιρίου και υπο/υπερεκτιμούν ορισμένες άλλες, πχ. θερμική μάζα, θερμοχωρητικότητα, αλλαγή των εσωτερικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας, κτλ, με συνέπεια τα αποτελέσματά τους να εμπεριέχουν υψηλή αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή είναι μη επιθυμητή και η χρήση των αποτελεσμάτων αυτών στη διαστασιολόγηση των γεωεναλλακτών οδηγεί σε εκτίμηση της τάξης μεγέθους του συστήματος αλλά σε καμία περίπτωση σε υπολογισμό εφαρμογής.

Όπως προαναφέρθηκε, δεύτερη κατηγορία παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας είναι οι γεωλογικοί παράμετροι. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται κυρίως παράμετροι που αφορούν:

- τη διαθέσιμη επιφάνεια της γης,
- το είδος του εδάφους (άργιλος, αμμώδες, βραχώδες, κτλ),
- τις θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους (θερμοκρασία, πυκνότητα, θερμική αγωγιμότητα, κτλ),
- την ύπαρξη υδροφορέα και το βάθος κορεσμού,
- την ύπαρξη φυσικών εμποδίων (δένδρα, κτίσματα, κτλ).

Στόχος του σχεδιασμού είναι η κατασκευή ενός οικονομικά βιώσιμου συστήματος το οποίο προϋποθέτει το ελάχιστο αρχικό κόστος κατασκευής με την υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης που θα εξασφαλίσει αντίστοιχα χαμηλό κόστος λειτουργίας. Σε αυτή την κατεύθυνση το κόστος δέσμευσης της γης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή του είδους του συστήματος σε περιοχές όπου η γη είτε εμφανίζει υψηλό κόστος δέσμευσης, είτε η διαθεσιμότητά της είναι περιορισμένη. Αυτός άλλωστε είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο τα κατακόρυφα συστήματα προτιμώνται στις αστικές περιοχές.

Το είδος και η συνεκτικότητα του εδάφους σε συνδυασμό με τις θερμοφυσικές ιδιότητες που αυτό παρουσιάζει επιδρούν τόσο στη στατικότητα του γεωεναλλάκτη, όσο και στη δυνατότητα άντλησης/απόρριψης θερμότητας από/προς αυτό. Εδάφη με χαμηλή συνεκτικότητα παρουσιάζουν μικρότερη ικανότητα άντλησης/απόρριψης θερμότητας σε σχέση πχ. με τα αργιλώδη και βραχώδη εδάφη, γεγονός που επιδρά άμεσα στο μήκος και τη γεωμετρία του γεωεναλλάκτη που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες της εγκατάστασης. Η εκτίμηση της συνεκτικότητας του εδάφους πραγματοποιείται μέσω των γεωλογικών μελετών ή των γεωλογικών χαρτών της περιοχής και αποτελεί βασικό παράγοντα της μελέτης. Ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους συνιστά επίσης μια σημαντική παράμετρο της μελέτης και πραγματοποιείται με τη διάνοιξη δοκιμαστικής γεώτρησης στη θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η γεώτρηση αυτή θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως μια από τις γεωτρήσεις του συστήματος. Η

μεθοδολογία υπολογισμού του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους (k-test), αποτελεί μια τυποποιημένη διαδικασία, πχ. prEN ISO 17628:2013 [7], ASTM D5334-14 [8], και η μέτρηση διεξάγεται κατά το στάδιο σχεδιασμού του συστήματος.

Η ύπαρξη υδροφορέα με ικανοποιητική ροή και ποιοτικά χαρακτηριστικά στην περιοχή εγκατάστασης του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος, οδηγεί στη διερεύνηση της δυνατότητας εγκατάστασης ανοικτού συστήματος. Στην αντίθετη περίπτωση η κίνηση υπογείων νερών λειτουργεί ευεργετικά ως προς τη λειτουργία του συστήματος όταν η ροή χαρακτηρίζεται από αριθμό Peclet μεγαλύτερο της μονάδας. Σε διαφορετική περίπτωση ο υπόγειος υδροφορέας δεν επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος [9,10].

Η τρίτη κατηγορία παραμέτρων που επιδρούν στο σχεδιασμό ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος είναι οι επιλογές του μελετητή που αφορούν τα επιμέρους λειτουργικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του συστήματος. Σε αυτή την ενότητα κατατάσσονται παράμετροι που αφορούν:

- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης (βάθος, διάμετρος, κτλ),
- η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων,
- ο αριθμός και η διάμετρος των σωληνώσεων ανά γεώτρηση,
- το είδος του κανάβου (κλειστός, ανοικτός κάναβος),
- το είδος του ρευστοκονιάματος με το οποίο θα πληρωθεί η γεώτρηση,
- η υδραυλική ισχύς,
- η απόδοση των αντλιών θερμότητας.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης εξαρτώνται από τη σκληρότητα του εδάφους και τον αριθμό των σωληνώσεων που πρόκειται να εγκατασταθούν σε αυτή. Το βάθος των γεωτρήσεων στα κατακόρυφα συστήματα συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 50 m και 150 m, μπορεί όμως ανάλογα με την εφαρμογή να εγγίσει και τα 200 m. Η διάμετρος της γεώτρησης ξεκινά από τις 4 in (100 mm). Βασική παράμετρος για την επιλογή της διαμέτρου αποτελεί το πλήθος των σωληνώσεων που πρόκειται να τοποθετηθούν. Η χρήση του μονού σωλήνα τύπου φουρκέτας (U-tube) είναι δυνατή σε αυτή τη διάμετρο, ενώ η τοποθέτηση διπλού σωλήνα τύπου φουρκέτας ανεβάζει τη διάμετρο κατ' ελάχιστο στις 6 in (150 mm). Η αύξηση όμως της διαμέτρου οδηγεί και σε αύξηση της ποσότητας αλλά και των θερμικών χαρακτηριστικών του ρευστοκονιάματος με το οποίο θα πληρωθεί η γεώτρηση, γεγονός το οποίο θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη από το μελετητή.

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων στον κάναβο ενός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη αλλά και μεταξύ του γεωεναλλάκτη και των παρακείμενων κατασκευών, αποτέλεσε πεδίο εκτεταμένης συζήτησης σε ερευνητικό και τεχνικό επίπεδο. Σήμερα, συστήνεται οι γεωτρήσεις να τοποθετούνται με απόσταση μεταξύ 3 m έως και 6 m για τις περιπτώσεις όπου δεν είναι επιθυμητή η θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ακριβής απόσταση προσδιορίζεται από την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για χρονική περίοδο 15-20 έτη ή και μεγαλύτερη. Αντιθέτως, όταν ο σχεδιασμός του γεωεναλλάκτη γίνεται με κριτήριο τη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας στο έδαφος η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων συχνά επιλέγεται στο 1,5 m ή και ακόμα μικρότερη. Σε κάθε περίπτωση όμως, η αλληλουχία της έντασης του φορτίου ή της ενέργειας που εναλλάσσει το κτίριο με το έδαφος αποτελεί το βασικό παράγοντα ο οποίος προσδιορίζει εν τέλει την εν λόγω απόσταση. Να σημειωθεί επίσης πως η απόσταση

αυτή αποτελεί σημαντικό στοιχείο που καθορίζει τόσο τη μακροχρόνια απόδοση του συστήματος, όσο και την απαιτούμενη έκταση γης για την εγκατάστασή του.

Οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των γεωεναλλακτών κατασκευάζονται από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HPDE) με αντοχή στις 16 atm ή 20 atm. Χαρακτηριστικές διαστάσεις σωλήνων είναι σήμερα οι 20 x 1,9 mm, 25 x 2,3 mm, 32 x 2,9 mm και 40 x 3,7 mm με τις διαστάσεις των 25 x 2,3 mm και 32 x 2,9 mm να κυριαρχούν στις περισσότερες εφαρμογές. Κριτήριο για την επιλογή της διαμέτρου αποτελεί η πτώση πίεσης που αυτή εισάγει. Στόχος του μελετητή είναι να διατηρήσει τη ροή στο σωλήνα σε περιοχές με τυρβώδη χαρακτηριστικά ώστε να μεγιστοποιήσει τη μετάδοση θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του εδάφους, και συγχρόνως να περιορίσει την πτώση πίεσης και την ισχύ του κυκλοφορητή. Έτσι για μικρού μεγέθους συστήματα η διάσταση των 20 x 1,9 mm φαντάζει ως η ιδανική περίπτωση, ενώ για σύνθετα συστήματα μεγάλης έκτασης η διάσταση των 40 x 3,7 mm προκύπτει ως η πλέον συμφέρουσα. Το πλήθος των σωλήνων που θα τοποθετηθούν ανά γεώτρηση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του συστήματος και το συνεπαγόμενο κόστος. Για μικρού μεγέθους συστήματα ο μονός σωλήνας τύπου φουρκέτας (U-tube) αποτελεί τη συνηθέστερη λύση. Αντιθέτως σε συστήματα σημαντικής έκτασης προτιμάται ο διπλός ή σπανιότερα ο τριπλός σωλήνας. Η επιλογή του διπλού σωλήνα εξασφαλίζει επίσης υψηλότερη απόδοση ανά τρέχον μέτρο γεώτρησης καθώς από τις σχετικές μελέτες προκύπτει αύξηση της δυνατότητας άντλησης/απόρριψης θερμότητας έως και 40% σε σχέση με το μονό σωλήνα.

Ως κánaβος γεωεναλλάκτη ορίζεται η διάταξη των γεωτρήσεων στη θέση εγκατάστασης. Οι διατάξεις ανοικτού κανάβου διατάσσουν τις γεωτρήσεις σε ευθεία διάταξη, σε δύο κάθετα σε ένα σημείο ευθύγραμμα τμήματα (διάταξη τύπου L), ή σε διάταξη φουρκέτας (διάταξη τύπου U). Αντιθέτως, διατάξεις κλειστού κανάβου αποτελούν οι ρομβικές και οι επάλληλες διατάξεις. Το είδος της διάταξης αποτελεί αντικείμενο της μελέτης του συστήματος, αλλά γενικά οι ανοικτές διατάξεις προτιμώνται στις περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των αναγκών σε θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, ενώ οι κλειστές εκεί όπου οι ανάγκες είναι ισοσκελισμένες.

Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ρευστοκονιάματος πλήρωσης της γεώτρησης είναι υψηλή θερμική αγωγιμότητα που θα συμβάλει στη μείωση της θερμικής αντίστασης κατά τη ροή της θερμότητας από/προς το ρευστό του γεωεναλλάκτη προς/από το έδαφος και η αντοχή που θα προστατέψει το σωλήνα από εκδορές καθώς και από πιθανές καθιζήσεις του εδάφους. Σύνηθες υλικό πλήρωσης αποτελούσε και αποτελεί το μείγμα τσιμέντου, μπετονίτη και χαλαζιακής άμμου σε διάφορες αναλογίες οι οποίες καθόριζαν τις τελικές ιδιότητες του κονιάματος ανά εφαρμογή. Η πρόοδος όμως της τεχνολογίας των υλικών επέφερε νέα δεδομένα για τα ρευστοκονιάματα πλήρωσης. Σήμερα αρκετές εταιρίες παρέχουν τυποποιημένα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως ρευστοκονιάματα με βελτιωμένα θερμικά χαρακτηριστικά (thermal enhanced grouts) τα οποία προσφέρουν καλύτερη θερμική συμπεριφορά και υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα συνήθη μείγματα. Η χρήση ρευστοκονιάματος με βελτιωμένα θερμικά χαρακτηριστικά παρέχει επίσης τη δυνατότητα μείωσης του απαιτούμενου μήκους του γεωεναλλάκτη και καλύτερης διαχείρισης των θερμικών ροών. Ως εκ τούτου η χρήση αυτών των ρευστοκονιαμάτων είναι σε κάθε περίπτωση προτιμητέα.

Η υδραυλική ισχύς, ή αντίστοιχα η ισχύς του κυκλοφορητή στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη, αποτελεί βασική παράμετρο επιλογής των χαρακτηριστικών του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο στόχος του ορθού σχεδιασμού είναι η διατήρηση της υδραυλικής ισχύος σε χαμηλά επίπεδα ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος της παρασιτικής

ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος. Σύμφωνα με τον Dr. S.P. Kavanaugh η υδραυλική ισχύς ενός γεωθερμικού συστήματος πρέπει να κινείται μεταξύ 3,7 kW έως 7,5 kW για κάθε 350 kW ψυκτικής ισχύος. Σημειώνεται πως η ισχύς αυτή είναι ενδεικτική καθώς σήμερα η τεχνολογία των κυκλοφορητών με μεταβαλλόμενες στροφές και η χρήση των ολοκληρωμένων συστημάτων ελέγχου και ρύθμισης (BEMS), παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης ρύθμισης της λειτουργίας του συστήματος με συνέπεια τη μείωση της καταναλισκόμενης υδραυλικής ενέργειας.

Η επιλογή των αντλιών θερμότητας αποτελεί μία ακόμα βασική παράμετρο του ορθού σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας. Χαρακτηριστικά με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελούν οι καμπύλες των βαθμών απόδοσης σε θέρμανση και ψύξη (COP και EER) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του ρευστού στο γεωεναλλάκτη αλλά και το εύρος λειτουργίας των συσκευών αυτών. Η επιλογή συσκευών με υψηλούς βαθμούς απόδοσης οδηγεί στη μείωση του απαιτούμενου μήκους του γεωεναλλάκτη και κατά συνέπεια και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως ένα ορθά σχεδιασμένο σύστημα με κριτήριο την ενεργειακή απόδοση θα πρέπει να επιτυγχάνει σήμερα ετήσιες αποδόσεις, SCOP και SEER αντίστοιχα, της τάξης του 5,0 με 6,0.

3.2 Σύνοψη ανασκόπηση των μεθοδολογιών διαστασιολόγησης κατακόρυφου γεωεναλλάκτη

Στην ενότητα που ακολουθεί θα παρουσιαστούν εν συντομία τα κύρια χαρακτηριστικά των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους γεωεναλλάκτη σε κατακόρυφο κλειστό σύστημα αβαθούς γεωθερμίας. Εκτεταμένη ανάλυση και παρουσίαση των μεθοδολογιών τόσο για τα κατακόρυφα κλειστά συστήματα όσο και για τα υπόλοιπα συστήματα καθώς και των επιμέρους παραμέτρων που αυτές λαμβάνουν υπόψη, ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει στη σχετική βιβλιογραφία [11-14], καθώς αυτό υπερβαίνει το αντικείμενο του εν λόγω οδηγού.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα οι μεθοδολογίες υπολογισμού του απαιτούμενου μήκους κατακόρυφου γεωεναλλάκτη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) τις μεθόδους υπολογισμού με βάση τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και (β) τις μεθόδους με βάση την εναλλαγή ενέργειας μεταξύ κτιρίου και γης. Οι μεθοδολογίες της πρώτης κατηγορίας χρησιμοποιούν τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου τα οποία ανάγουν σε θερμικούς παλμούς στο έδαφος και υπολογίζουν αντίστοιχα δύο μήκη γεωεναλλάκτη, το απαιτούμενο μήκος για την κάλυψη του φορτίου της θέρμανσης και το απαιτούμενο μήκος για την κάλυψη του φορτίου της ψύξης. Από τα δύο αυτά μήκη ο μελετητής επιλέγει και σχεδιάζει στο μεγαλύτερο. Οι μεθοδολογίες της δεύτερης κατηγορίας αναπτύχθηκαν παράλληλα με αυτές της πρώτης αλλά η χρήση στους διευρύνθηκε με την ανάπτυξη των λογισμικών ενεργειακής ανάλυσης και τη βελτίωση της υπολογιστικής ικανότητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σε αυτές τις μεθόδους απαραίτητα δεδομένα αποτελούν η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου σε μηνιαία βάση, η διάρκεια της μέγιστης ζήτησης ενέργειας ανά μήνα και οι αποδόσεις των αντλιών θερμότητας. Με βάση αυτά τα στοιχεία, οι μεθοδολογίες προσομοιάζουν τη λειτουργία του συστήματος για χρονικό διάστημα 15-20 έτη και προσδιορίζουν το μέγεθος και τη διάταξη του γεωεναλλάκτη μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας με κριτήριο τη μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το γεωεναλλάκτη. Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων είναι ισότιμα, παρότι η μεθοδολογία της δεύτερης κατηγορίας θεωρούν ως πιο αξιόπιστες, και στην πράξη η ακρίβεια των

υπολογισμών και η ορθότητα του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται από την εμπειρία του μελετητή και τη δυνατότητα ορθής εκτίμησης ορισμένων βασικών παραμέτρων.

4. Αποτελέσματα ερευνητικού έργου

Το ερευνητικό έργο με τίτλο: «Συστήματα αβαθούς γεωθερμίας σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας: Ενεργειακή, Περιβαλλοντική και Οικονομική αξιολόγηση στον κτιριακό τομέα της Κύπρου» συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης και το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας της Κύπρου στο πλαίσιο των προγραμμάτων της ΔΕΣΜΗΣ 2009-2010, δράση ΔΙΔΑΚΤΩΡ. Αντικείμενο του έργου αποτελεί η αξιολόγηση της εγκατάστασης συστήματος αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη στα υφιστάμενα και στα μελλοντικά κτίρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας της Κύπρου. Το ερευνητικό έργο υλοποιήθηκε στην Ομάδα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Οικονομίας και Πολιτικής (3EP) του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου της Κύπρου κατά τη διετία 2013-2015.

4.1 Σύντομη περιγραφή του έργου

Η εγκατάσταση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας αποτελεί μία από τις βασικές επιλογές συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, η οποία συμβάλλει στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας των κτιριακών μονάδων. Παράλληλα τα συστήματα αυτά συμβάλλουν και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) του κτιριακού τομέα ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό την αειφορία του.

Στο ερευνητικό αυτό έργο μελετάται και αξιολογείται η εγκατάσταση ενός αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη και αντλίες θερμότητας νερού-νερού σε τρία τυπικά κτίρια της Κύπρου, μία μονοκατοικία, μία πολυκατοικία και ένα κτίριο γραφείων. Τα κτίρια σχεδιάστηκαν ώστε να ακολουθούν την τυπολογία του κτιριακού αποθέματος με τη συγκεκριμένη χρήση της Κύπρου και να ικανοποιούν αρχικά τις ελάχιστες απαιτήσεις θερμομονωτικής προστασίας σύμφωνα με τον Κυπριακό Οδηγό Θερμομόνωσης των Κτιρίων. Οι θερμικές και ψυκτικές ανάγκες των κτιρίων υπολογίστηκαν σε ωριαία βάση με τη βοήθεια του προγράμματος ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus για πέντε χαρακτηριστικές περιοχές της Κύπρου. Στη συνέχεια με βάση τις απαιτήσεις αυτές και με τη χρήση του λογισμικού EED 3.16, διαστασιολογήθηκε ο κατακόρυφος γεωεναλλάκτης για κάθε τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή. Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος προσδιορίστηκε μέσω εικοσαετούς ενεργειακής ανάλυσης του συστήματος με τη βοήθεια ίδιου κώδικα ενεργειακής προσομοίωσης των συστημάτων αυτών, ο οποίος αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε κατά το παρελθόν. Η ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος ανάχθηκε κατόπιν σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τη λειτουργία του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος με βάση τους συντελεστές εκπομπής του Κυπριακού ενεργειακού συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με την αντίστοιχη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τη χρήση του τυπικού συστήματος θέρμανσης και ψύξης των Κυπριακών κτιρίων. Ως τυπικό σύστημα θεωρήθηκε λέβητας πετρελαίου ή υγραερίου και αερόψυκτη αντλία θερμότητας. Το πρώτο στάδιο της έρευνας ολοκληρώνεται με την οικονομική αξιολόγηση της χρήσης των δυο συστημάτων με βάση τη μεθοδολογία του Κανονισμού 244/2012/EK [15] μέσω της οποίας προσδιορίζεται το οικονομικό όφελος από τη χρήση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη στα τρία τυπικά κτίρια του κτιριακού αποθέματος της Κύπρου.

Στο δεύτερο στάδιο της έρευνας με τη βοήθεια κατάλληλης μεθοδολογίας ενεργειακής ανάλυσης η οποία λαμβάνει υπόψη τις πρόνοιες του Κανονισμού 244/2012/EK [15] προσδιορίζονται τα

βέλτιστα χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους τα οποία οδηγούν στην χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από αυτό με κριτήριο την οικονομική σκοπιμότητα υλοποίησης των πρόσθετων μέτρων. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μια δεύτερη σειρά τυπικών κτιρίων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως κτίρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ή ως κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μεθοδολογία του πρώτου σταδίου της έρευνας και αξιολογείται η ενεργειακή, περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιμότητα εγκατάστασης συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας σε αυτά, έναντι της συμβατικής λύσης με λέβητα καυστήρα πετρελαίου ή υγραερίου και αερόψυκτη αντλία θερμότητας.

Το ερευνητικό έργο ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση της εγκατάστασης συζευγμένων συστημάτων, συστήματα που συνδυάζουν και φωτοβολταϊκό σύστημα, υβριδικών συστημάτων, σύστημα αβαθούς γεωθερμίας σε συνδυασμό με αερόψυκτη αντλία θερμότητας για την περίπτωση του τυπικού κτιρίου γραφείων, καθώς και του συνδυασμού συζευγμένου και υβριδικού συστήματος.

4.2 Σύντομη περιγραφή των τυπικών κτιρίων

Ο προσδιορισμός των γεωμετρικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών των τυπικών κτιρίων βασίστηκε στην ανάλυση της τυπολογίας του κτιριακού δυναμικού της χώρας με τη συγκεκριμένη χρήση, αντλώντας πληροφορίες από την Κυπριακή Στατιστική Υπηρεσία, από μελετητές και κατασκευαστές μηχανικούς, καθώς και από επιτόπιες επισκέψεις. Από αυτή την ανάλυση προέκυψε πως το τυπικό κτίριο μονοκατοικίας αποτελείται από 2 ορόφους με επιφάνεια περίπου 200 m², αντίστοιχα το τυπικό κτίριο πολυκατοικίας περιλαμβάνει 4 ορόφους και συνολική επιφάνεια περί τα 900-1000 m², ενώ το τυπικό κτίριο γραφείων αποτελείται επίσης από 4 ορόφους αλλά με συνολική επιφάνεια μεταξύ 1300 m² και 1500 m².

Με κριτήριο τα ανωτέρω χαρακτηριστικά σχεδιάστηκε το τυπικό κτίριο της μονοκατοικίας το οποίο διαθέτει συνολική επιφάνεια 205 m² και εκτίνεται σε δύο ορόφους. Ο ισόγειος όροφος επιφάνειας 104 m² περιλαμβάνει την κουζίνα, το καθιστικό, την τραπεζαρία και χώρο υγιεινής. Ο χώρος αυτός συνδέεται με εσωτερική σκάλα με τον υπέργειο στον οποίο υπάρχουν τρία υπνοδωμάτια, καθιστικό, χώροι υγιεινής και βοηθητική χώροι. Αντίστοιχα το τυπικό κτίριο πολυκατοικίας αποτελείται από 4 ορόφους επιφάνειας 248 m² οι οποίοι περιλαμβάνουν 2 διαμπερή διαμερίσματα με τρία υπνοδωμάτια συνολικής επιφάνειας 113,5 m². Στο ισόγειο της πολυκατοικίας περιλαμβάνει την είσοδο του κτιρίου, χώρο για τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις και ανοικτός υπόστυλος χώρος στάθμευσης. Τα τυπικά κτίρια κατοικιών είναι ελεύθερα και στις τέσσερις όψεις.

Το τυπικό κτίριο γραφείων πρόκειται για τετραώροφο κτίριο με πυλωτή στο ισόγειο και ορθογωνική κάτοψη εμβαδού περίπου 365 m², η οποία επαναλαμβάνεται σε όλους τους ορόφους. Το κτίριο έχει δύο ελεύθερες πλευρές, τη νότια και τη δυτική, ενώ η βορεινή και η ανατολική πλευρά έρχονται σε επαφή με όμορες ιδιοκτησίες και φιλοξενούν τους βοηθητικούς και τους κοινόχρηστους χώρους. Τα γραφεία αναπτύσσονται κατά μήκος των ελεύθερων πλευρών, ενώ στον πυρήνα του κτιρίου βρίσκεται η αίθουσα συνεδριάσεων.

Τα τυπικά κτίρια έχουν φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιίες πλήρωσης από διάτρητες οπτόπλινθους. Τα εξωτερικά κατακόρυφα δομικά στοιχεία είναι θερμομονωμένα με εξηλασμένη πολυστερίνη ($\lambda = 0,035 \text{ W/(m K)}$), η οποία τοποθετείται στην εξωτερική τους πλευρά. Το ίδιο υλικό χρησιμοποιείται στην επιστέγαση των κτιρίων, η οποία γίνεται με αντεστραμμένο οριζόντιο δώμα, καθώς και στα δάπεδα του πρώτου ορόφου που είναι επάνω από τον εξωτερικό

αέρα. Το πάχος της θερμομονωτικής προστασίας σε κάθε δομικό στοιχείο προέκυψε με βάση τις αντίστοιχες απαιτήσεις για το μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας του ισχύοντος κανονισμού [16] και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Πάχη και συντελεστές θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων των τυπικών κτιρίων			
Δομικό στοιχείο	Πάχος θερμομόνωσης [m]	U-value [W/(m ² ·K)]	U _{max} [W/(m ² ·K)]
Κατακόρυφα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα σε επαφή με εξωτερικό αέρα	0,035	0,691	0,72
Εξωτερική οπτοπλινθοδομή	0,030	0,586	0,72
Κατακόρυφα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο	0,035	0,648	0,72
Οπτοπλινθοδομή σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο	0,030	0,651	0,72
Δάπεδο επάνω από πυλωτή	0,040	0,591	0,63
Οροφή	0,040	0,610	0,63
Εξωτερικά ανοίγματα	-	U _f : 2,8 U _g : 2,8	U _m : 3,23

4.3 Ενεργειακές απαιτήσεις τυπικών κτιρίων

Η ενεργειακή ανάλυση των τυπικών κτιρίων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus. Τα κτίρια διαιρέθηκαν σε ανεξάρτητες θερμικές ζώνες λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση του κάθε χώρου και τον προσανατολισμό του. Σε κάθε θερμική ζώνη θεωρήθηκαν με βάση τις υποδείξεις της ASHRAE [17] και του προτύπου EN 15251:2007 [18] οι αντίστοιχες επιθυμητές τιμές των εσωκλιματικών συνθηκών, δηλαδή της θερμοκρασίας χειμώνα-θέρους, το ρυθμό αερισμού, το επίπεδο φωτισμού, καθώς και οι τιμές που αφορούν στον αριθμό των ατόμων και στην ισχύ των ηλεκτρικών συσκευών. Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη και πάλι τις συστάσεις της ASHRAE δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχες ημερήσιες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες κατανομές χρήσης των παραπάνω μεγεθών, θεωρώντας πως ως τα τυπικά κτίρια κατοικιών λειτουργούν σε 7ήμερη 24ώρη βάση και το τυπικό κτίριο γραφείων λειτουργεί σε 5ήμερη εβδομαδιαία βάση μεταξύ των ωρών 07:00-17:00.

Απαραίτητο δεδομένο για την ενεργειακή προσομοίωση είναι επίσης και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής της μελέτης. Ειδικότερα, κρίθηκε αναγκαία η επιλογή χαρακτηριστικών περιοχών, δεδομένου ότι στόχος της παρούσας μελέτης ήταν η κάλυψη του συνόλου των κλιματικών συνθηκών της Κύπρου και λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό ανάγλυφο της νήσου, το οποίο δημιουργεί διαφορετικά τοπικά κλίματα [19]. Στην κατεύθυνση αυτή επιλέχθηκαν περιοχές με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση πληθυσμού (Λευκωσία, Λεμεσός, Λάρνακα, Πάφος και το χωριό του Σαϊττά), οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν χαρακτηριστικές του Κυπριακού κλίματος. Κατά συνέπεια το κλίμα αυτών των πόλεων θεωρείται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης ως αντιπροσωπευτικό των αντίστοιχων περιοχών-επαρχιών, και τα αποτελέσματα της κάθε πόλης θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για την ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Οι πόλεις της

Πίνακας 5: Απαιτήσεις ενέργειας τυπικών κτιρίων

Τυπικό κτίριο	Περιοχή									
	Λευκωσίας		Λάρνακας		Λεμεσού		Πάφου		Σαϊπτά	
	Θέρμανση [kWh/m ²]	Ψύξη [kWh/m ²]	Θέρμανση [kWh/m ²]	Ψύξη [kWh/m ²]	Θέρμανση [kWh/m ²]	Ψύξη [kWh/m ²]	Θέρμανση [kWh/m ²]	Ψύξη [kWh/m ²]	Θέρμανση [kWh/m ²]	Ψύξη [kWh/m ²]
Μονοκατοικίας	25,4	94,9	22,4	90,7	17,7	91,7	19,1	80,7	47,5	63,4
Πολυκατοικίας	13,2	83,0	11,9	81,4	9,5	81,1	9,8	73,6	25,7	56,9
Γραφείων	6,6	52,4	5,9	52,0	4,7	51,8	4,9	48,9	12,5	39,8
Μονοκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	18,0	58,4	16,5	54,6	13,1	57,4	14,0	45,5	31,4	32,1
Πολυκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	9,5	50,9	8,8	48,1	7,3	50,4	7,5	40,2	16,1	27,2
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	7,7	23,5	7,0	22,3	5,7	30,9	5,9	28,4	12,3	14,1

Λεμεσού, Λάρνακας και Πάφου, πρωτεύουσες των αντίστοιχων επαρχιών, βρίσκονται στη νότια ακτογραμμή της νήσου και χαρακτηρίζονται από θερμό και υγρό κλίμα. Αντίστοιχα η πόλη της Λευκωσίας, πρωτεύουσα της ομώνυμης επαρχίας και πρωτεύουσα του Κυπριακού κράτους, βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του νησιού και παρουσιάζει θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Τέλος ο Σαϊπτάς αποτελεί ένα τυπικό χαρακτηριστικό χωριό του Τροόδους και κλιματολογικά αντιπροσωπεύει το ορεινό κλίμα της νήσου με ψυχρούς χειμώνες και ήπια καλοκαίρια. Κριτήριο επίσης για την επιλογή των χαρακτηριστικών πόλεων ήταν αυτές να διαθέτουν αξιόπιστο κλιματολογικό αρχείο στη μετεωρολογική βάση του προγράμματος Meteonorm, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργειακή προσομοίωση των κτιρίων στις αντίστοιχες περιοχές. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται η ετήσιες απαιτήσεις ενέργειας των τυπικών κτιρίων για θέρμανση και ψύξη για τις πέντε χαρακτηριστικές περιοχές της Κύπρου, όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση με το πρόγραμμα ενεργειακής ανάλυσης EnergyPlus.

4.4 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών κτιρίων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας

Τα χαρακτηριστικά των τυπικών κτιρίων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για κάθε χαρακτηριστική περιοχή προσδιορίστηκαν μέσω ενεργειακής και τεχνοοικονομικής ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψη τις πρόνοιες του κανονισμού 244/2012/ΕΚ [15]. Στους Πίνακες 6-8 που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των κτιρίων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά τυπικής μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας					
Δομικό στοιχείο	Περιοχή				
	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαϊπτά
	Συντελεστής θερμοπερατότητας U-value [$W/(m^2 \cdot K)$]				
Κατακόρυφα δομικά	0,42	0,42	0,42	0,42	0,36
Δάπεδο πάνω από το έδαφος	0,34	0,38	0,38	0,38	0,25
Οροφή	0,30	0,34	0,34	0,34	0,25
Εξωτερικά ανοίγματα [$U_f / U_g / g_w$]	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54
Συντελεστής σκίασης	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Φυσικός αερισμός	Άνοιγμα των εξωτερικών ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών (16/05-30/09) και μεταξύ των ωρών 23:00-07:00 όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη των 27°C και η ταχύτητα του ανέμου μικρότερη των 20 m/s.				

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά τυπικής πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας					
Δομικό στοιχείο	Περιοχή				
	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαϊπτά
	Συντελεστής θερμοπερατότητας U-value [W/(m ² ·K)]				
Κατακόρυφα δομικά	0,42	0,42	0,42	0,42	0,33
Δάπεδο πάνω από το πυλωτή	0,37	0,42	0,49	0,49	0,27
Οροφή	0,34	0,34	0,38	0,38	0,25
Εξωτερικά ανοίγματα [U _f / U _g / g _w]	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54	2,0/1,6/0,54
Συντελεστής σκίασης	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Φυσικός αερισμός	Άνοιγμα των εξωτερικών ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών (16/05-30/09) και μεταξύ των ωρών 23:00-07:00 όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη των 27°C και η ταχύτητα του ανέμου μικρότερη των 20 m/s.				

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά τυπικού κτιρίου γραφείων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας					
Δομικό στοιχείο	Περιοχή				
	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαϊπτά
	Συντελεστής θερμοπερατότητας U-value [W/(m ² ·K)]				
Κατακόρυφα δομικά	0,49	0,49	0,49	0,49	0,42
Δάπεδο πάνω από το πυλωτή	0,37	0,42	0,49	0,49	0,27
Οροφή	0,50	0,50	0,50	0,50	0,38
Εξωτερικά ανοίγματα [U _f / U _g / g _w]	2,0/1,4/0,2	2,0/1,4/0,2	2,0/1,4/0,2	2,0/1,4/0,2	2,0/1,4/0,2
Συντελεστής σκίασης	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Φυσικός αερισμός	Άνοιγμα των εξωτερικών ανοιγμάτων κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών (16/05-30/09) και μεταξύ των ωρών 23:00-07:00 όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη των 27°C και η ταχύτητα του ανέμου μικρότερη των 20 m/s.				

4.5 Σχεδιασμός και ενεργειακή ανάλυση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας

Ο σχεδιασμός του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας περιλαμβάνει την επιλογή των αντλιών θερμότητας, τη διαστασιολόγηση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη κλειστού βρόχου και της αντλίας κυκλοφορίας. Ειδικότερα, η επιλογή των αντλιών θερμότητας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος πραγματοποιήθηκε με βάση τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου, όπως αυτά προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Elite Chvac.

Η διαστασιολόγηση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη σε κάθε χαρακτηριστική πόλη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού EED 3.16. Σύμφωνα με αυτό, ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους του γεωεναλλάκτη βασίζεται στις μηνιαίες καταναλώσεις θερμικής και ψυκτικής ενέργειας του κτιρίου, στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης, στον αριθμό των σωλήνων ανά γεώτρηση και στις θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού πλήρωσης της γεώτρησης και του εδάφους. Οι μηνιαίες ενεργειακές καταναλώσεις προσδιορίστηκαν με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιριακού κελύφους όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, λαμβάνοντας υπόψη τους βαθμούς απόδοσης των συστημάτων εκπομπής και διανομής της θερμότητας με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 15316-2-1:2008 [20] και EN 15316-2-3:2008 [21]. Ως σύστημα εκπομπής της θερμότητας θεωρήθηκε η τερματική μονάδα ανεμιστήρα-στοιχείου (fan-coil) με βαθμό απόδοσης 0,93. Αντίστοιχα ως σύστημα διανομής της θερμότητας θεωρήθηκε το δισωλήνιο σύστημα με επαρκή θερμομονωτική προστασία και με βαθμό απόδοσης 0,96.

Πίνακας 9: Μήκος γεωεναλλάκτη ανά τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή					
Τυπικό κτίριο	Περιοχή				
	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαϊπτά
	Μήκος γεωεναλλάκτη [m]				
Μονοκατοικίας	260	268	256	208	150
Πολυκατοικίας	1062	1125	1080	896	590
Γραφείων	1440	1512	1476	1180	1125
Υβριδικό Γραφείων	490	471	456	462	-
Μονοκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	184	179	181	145	117
Πολυκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	666	639	675	580	441
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	1236	1044	1170	1140	1104
Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	560	546	490	584	-

Ο κατακόρυφος γεωεναλλάκτης επιλέχθηκε να κατασκευαστεί με γεωτρήσεις διπλού βρόχου σωλήνα (u-tube). Ως υλικό κατασκευής του γεωεναλλάκτη επιλέχθηκε ο πλαστικός σωλήνας πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) με αντοχή στα 16 bar και ως μέσο πλήρωσης της κάθε γεώτρησης το θερμικά βελτιωμένο ρευστοκονίαμα Fischer GeoSolid 240, με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 2,4 W/(m·K). Τέλος όσο αφορά στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών εδάφους σύμφωνα με την υφιστάμενη βιβλιογραφία [22]. Η επιλογή του μήκους και της διάταξης του κανάβου των γεωτρήσεων του γεωεναλλάκτη πραγματοποιήθηκε μετά από εικοσαετή ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος με ελάχιστη και μέγιστη αποδεκτή θερμοκρασία του νερού στο γεωεναλλάκτη τους

5°C και τους 38°C αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για κάθε χαρακτηριστική περιοχή παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

Η επιλογή της αντλίας κυκλοφορίας του ρευστού στο γεωεναλλάκτη σε κάθε τυπικό κτίριο χαρακτηριστική περιοχή πραγματοποιήθηκε με βάση την πτώση πίεσης που το δίκτυο και η αντλία θερμότητας εισήγαγε σε κάθε περίπτωση. Ειδικότερα θεωρήθηκε πως κάθε γεώτρηση συνδέεται ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες σε κοινό συλλέκτη και στη συνέχεια το ρευστό οδηγείται στην αντλία θερμότητας. Με βάση αυτό το σχεδιασμό και τα χαρακτηριστικά του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας σε κάθε τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή επιλέχθηκε η κατάλληλη αντλία κυκλοφορίας υψηλής απόδοσης.

Πίνακας 10: Κατανάλωση ενέργειας αβαθούς γεωθερμικού συστήματος ανά τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή					
Τυπικό κτίριο	Περιοχή				
	Λευκωσίας	Λάρνακας	Λεμεσού	Πάφου	Σαϊπτά
	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/m ²]				
Μονοκατοικίας	29,0	26,9	26,6	24,3	27,2
Πολυκατοικίας	19,4	18,5	18,4	16,9	17,5
Γραφείων	13,7	13,0	12,9	13,0	11,3
Υβριδικό Γραφείων*	17,2	15,7	15,2	14,6	-
Μονοκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	17,8	16,5	16,5	13,9	14,8
Πολυκατοικία χαμηλής κατανάλωσης	13,0	12,3	12,5	10,1	8,8
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	6,3	6,2	7,9	7,0	5,1
Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης*	8,2	7,3	9,5	8,9	-

(*) συμπεριλαμβάνεται και η ηλεκτρική κατανάλωση της αερόψυκτης αντλίας θερμότητας (ψύκτης)

Η προσομοίωση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας αποσκοπεί στον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την πλήρη κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών απαιτήσεων του κάθε τυπικού κτιρίου σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή. Κατά τη λειτουργία του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος απαιτείται κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας και της αντλίας κυκλοφορίας του ρευστού στο γεωεναλλάκτη. Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιών θερμότητας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κώδικα προσομοίωσης της λειτουργίας κατακόρυφων συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας που αναπτύχθηκε και επαληθεύτηκε παλαιότερα από συγγραφέα του εγχειριδίου [23]. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας κυκλοφορίας

χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που προτάθηκε από τους Sfeir et. al. [24] για τα αποκεντρωμένα αντλητικά συστήματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

4.6 *Ενεργειακή αξιολόγηση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας*

Η ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ) πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του συστήματος με την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας που παρουσιάζει το συμβατικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης, το οποίο χρησιμοποιείται εκτεταμένα στην Κύπρο. Ως συμβατικό σύστημα θεωρήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης η λύση που περιλαμβάνει λέβητα-καυστήρα πετρελαίου ή υγραερίου για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και αερόψυκτη αντλία θερμότητας (αντλία θερμότητας αέρα-αέρα διαιρούμενου τύπου για την περίπτωση των κτιρίων κατοικιών και αερόψυκτο ψύκτη για την περίπτωση του κτιρίου γραφείων) για την κάλυψη αντίστοιχα των αναγκών της ψύξης.

Ειδικότερα, για τη θέρμανση θεωρήθηκε σύστημα λέβητα-καυστήρα πετρελαίου ή υγραερίου υψηλής απόδοσης που καλύπτει τον ελάχιστο αποδεκτό βαθμό απόδοσης σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 92/42/EC, ο οποίος για την περίπτωση αυτή θεωρήθηκε ίσος με 0,92 για τα κτίρια κατοικιών και 0,93 για το κτίριο γραφείων. Με βάση αυτό το βαθμό απόδοσης και την αντίστοιχη κατανάλωση θερμικής ενέργειας για κάθε χαρακτηριστική πόλη προσδιορίστηκε η κατανάλωση τελικής ενέργειας και στη συνέχεια με τη χρήση του νομοθετημένου συντελεστή μετατροπής της τελικής κατανάλωσης πετρελαίου ή υγραερίου σε πρωτογενή (1,1) για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα, υπολογίστηκε η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος θέρμανσης σε κάθε χαρακτηριστική πόλη.

Για τον υπολογισμό αντίστοιχα της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος ψύξης με αερόψυκτο ψύκτη, αρχικά επιλέχθηκαν οι συσκευές που θα εγκατασταθούν στο κτίριο σε κάθε χαρακτηριστική περιοχή με βάση την απαιτούμενη ψυκτική ισχύ του κάθε χώρου, όπως αυτή πρόκυψε κατά τον υπολογισμό της ψυκτικής ισχύος σχεδιασμού. Στη συνέχεια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή δημιουργήθηκαν οι καμπύλες του δείκτη αποδοτικότητας (EER) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος. Με βάση αυτές τις καμπύλες, τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, όπως αυτή προκύπτει από το αντίστοιχο για κάθε πόλη κλιματικό αρχείο του Meteororm σε ωριαία βάση, και την ωριαία ζήτηση ψυκτικής ενέργειας, όπως αυτή υπολογίστηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus, προσδιορίστηκε η τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των αερόψυκτων αντλιών θερμότητας για κάθε τυπικό κτίριο και για κάθε χαρακτηριστική πόλη. Η ηλεκτρική κατανάλωση ανάχθηκε και πάλι σε κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας με τη βοήθεια του αντίστοιχου συντελεστή μετατροπής (2,7) που ισχύει για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα. Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την κάλυψη των ψυκτικών αναγκών του κάθε κτιρίου προστέθηκε στη συνέχεια με την αντίστοιχη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και προέκυψε έτσι η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για το συμβατικό σύστημα με λέβητα πετρελαίου (ΠΣΥΒ) και με λέβητα υγραερίου (ΥΣΥΒ). Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανάχθηκε τελικά ανά τετραγωνικό μέτρο θερμαινόμενης/ψυχόμενης επιφάνειας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος (ΓΑΘ) πραγματοποιήθηκε με βάση την ηλεκτρική κατανάλωση του κάθε εναλλακτικού συστήματος

Πίνακας 11: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [kWh/m²/a] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊπτά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας	78,3	84,7	84,7	72,5	78,6	78,6	71,7	71,7	71,7	65,7	66,8	66,8	73,4	95,8	95,8
Συζευγμένο Μονοκατοικίας	-54,0	-47,7	-47,7	-61,4	-55,3	-55,3	-64,2	-64,2	-64,2	-70,5	-69,5	-69,5	-59,5	-37,0	-37,0
Πολυκατοικίας	52,4	64,9	64,9	49,9	62,3	62,3	49,5	57,7	57,7	45,5	52,6	52,6	47,3	63,4	63,4
Συζευγμένο Πολυκατοικίας	-3,5	9,0	9,0	-6,7	5,7	5,7	-7,9	0,3	0,3	-12,1	-5,0	-5,0	-8,9	7,2	7,2
Γραφείων	37,0	53,6	53,6	34,9	48,1	48,1	34,8	45,6	45,6	35,1	44,3	44,3	30,4	47,8	47,8
Συζευγμένο Γραφείων	-18,0	-1,4	-1,4	-20,7	-7,5	-7,5	-21,7	-10,8	-10,8	-21,5	-12,3	-12,3	-24,8	-7,4	-7,4
Υβριδικό Γραφείων	22,1	53,6	53,6	19,9	48,1	48,1	25,6	45,6	45,6	24,0	44,3	44,3	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων	-8,5	-1,4	-1,4	-13,3	-7,5	-7,5	-15,4	-10,8	-10,8	-17,2	-12,3	-12,3	-	-	-

Πίνακας 11: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [kWh/m²/a] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή (συνέχεια)

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊπτά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	48,1	55,4	55,4	44,6	51,7	51,7	44,6	47,8	47,8	37,5	49,0	49,0	40,0	58,4	58,4
Συζευγμένο Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-54,1	-47,7	-47,7	-61,4	-55,3	-55,3	-64,2	-64,2	-64,2	-70,6	-69,5	-69,5	-59,5	-37,0	-37,0
Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	35,1	55,4	55,4	33,1	51,7	51,7	33,7	47,8	47,8	27,3	49,0	49,0	23,8	58,4	58,4
Συζευγμένο Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-20,8	-0,6	-0,6	-23,5	-4,9	-4,9	-23,7	-9,6	-9,6	-30,3	-8,6	-8,6	-32,3	2,3	2,3
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	17,1	55,4	55,4	16,7	51,7	51,7	21,3	47,8	47,8	19,0	49,0	49,0	13,7	58,4	58,4
Συζευγμένο Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-37,9	0,4	0,4	-39,0	-3,9	-3,9	-35,1	-8,6	-8,6	-37,6	-7,6	-7,6	-41,5	3,2	3,2
Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	22,1	55,4	55,4	19,9	51,7	51,7	25,6	47,8	47,8	24,0	49,0	49,0	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-32,9	0,4	0,4	-35,7	-3,9	-3,9	-30,8	-8,6	-8,6	-32,6	-7,6	-7,6	-	-	-

για κάθε χαρακτηριστική περιοχή, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια ανάχθηκε και πάλι σε πρωτογενή με βάση το συντελεστή μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή (2,7) που δίδεται για το Κυπριακό ενεργειακό σύστημα. Η πρωτογενής ενέργεια ανάχθηκε τελικά σε κατανάλωση ανά τετραγωνικό μέτρο θερμαινόμενης/ψυχόμενης επιφάνειας κτιρίου και αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 11.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση σημαντικά χαμηλότερη από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του συμβατικού συστήματος. Αυτό το γεγονός που υποδηλώνει τη σκοπιμότητα χρήσης συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας για τη θέρμανση και ψύξη κτιρίων στο ενεργειακό σύστημα της Κύπρου λόγω της μείωσης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας που αυτά επιτυγχάνουν.

4.7 Περιβαλλοντική αξιολόγηση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση και ποσοτικοποίηση του αντίστοιχου οφέλους που προκύπτει από την εφαρμογή συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στα τυπικά κτίρια της Κύπρου πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού και της σύγκρισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από τη χρήση του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας και του συμβατικού συστήματος. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπολογίστηκαν από την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας των δύο συστημάτων με τη χρήση των νομοθετημένων συντελεστών εκπομπής ανά καύσιμο για το ενεργειακό σύστημα της Κύπρου. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ), το συμβατικό σύστημα με λέβητα-καυστήρα πετρελαίου και αερόψυκτη αντλία θερμότητας (ΠΣΥΒ) και το συμβατικό σύστημα με λέβητα-καυστήρα υγραερίου και αερόψυκτη αντλία θερμότητας (ΥΣΥΜ) για κάθε τυπικό κτίριο και για κάθε χαρακτηριστική περιοχή, αντίστοιχα.

Από τον Πίνακα 12 προκύπτει καταρχήν πως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το συμβατικό σύστημα δεν διαφοροποιούνται σημαντικά για τα δύο εναλλακτικά καύσιμα (πετρέλαιο και υγραέριο). Αντιθέτως η σύγκριση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ των συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας και των συμβατικών παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση. Ειδικότερα οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος προκύπτουν πάντα υψηλότερες από τις αντίστοιχες εκπομπές των συμβατικών συστημάτων για την περίπτωση του τυπικού κτιρίου της μονοκατοικίας και πάντα χαμηλότερες για την περίπτωση του τυπικού κτιρίου γραφείων, ενώ στην περίπτωση του τυπικού κτιρίου της πολυκατοικίας οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας άλλοτε υπολείπονται και άλλοτε υπερέχουν του συμβατικού.

Πίνακας 12: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [kg/m²/a] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊπτά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας	62,2	49,3	48,7	57,6	46,6	46,1	56,9	44,4	44,0	52,2	39,6	39,1	58,3	42,5	41,4
Συζευγμένο Μονοκατοικίας	-42,9	-55,8	-56,4	-48,7	-59,8	-60,3	-51,0	-63,5	-63,9	-56,0	-68,6	-69,1	-47,2	-63,0	-64,1
Πολυκατοικίας	41,6	42,2	41,9	39,6	41,1	40,8	39,3	39,1	38,9	36,2	34,9	34,7	37,5	32,1	31,5
Συζευγμένο Πολυκατοικίας	-2,8	-2,2	-2,5	-5,3	-3,9	-4,2	-6,3	-6,5	-6,7	-9,6	-10,8	-11,1	-7,1	-12,5	-13,0
Γραφείων	29,4	37,9	37,8	27,7	34,1	34,0	27,6	33,0	32,8	27,9	31,8	31,7	24,1	29,2	28,9
Συζευγμένο Γραφείων	-14,3	-5,7	-5,9	-16,4	-10,1	-10,2	-17,2	-11,9	-12,0	-17,0	-13,1	-13,3	-19,7	-14,6	-14,9
Υβριδικό Γραφείων	36,9	37,9	37,8	33,6	34,1	34,0	32,6	27,6	33,0	31,3	31,8	31,7	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων	-6,8	-5,7	-5,9	-10,6	-10,1	-10,2	-12,3	-11,9	-12,0	-13,7	-13,1	-13,3	-	-	-

Πίνακας 12: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [kg/m²/a] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή (συνέχεια)

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊπτά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	38,2	31,2	30,8	35,4	29,4	29,0	35,5	28,7	28,4	29,8	25,4	25,0	31,8	24,2	23,5
Συζευγμένο Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-47,5	-54,5	-54,9	-51,3	-57,3	-57,7	-52,6	-59,3	-59,6	-48,3	-52,7	-53,1	-45,2	-52,7	-53,5
Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	27,9	24,7	24,5	26,3	23,3	23,1	26,8	23,6	23,1	21,7	18,8	18,6	18,9	16,4	16,0
Συζευγμένο Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-16,5	-19,7	-20,0	-18,6	-21,6	-21,8	-18,9	-22,4	-22,5	-24,0	-26,9	-27,1	-25,7	-28,2	-28,6
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	13,5	18,9	18,8	13,2	16,5	16,4	16,9	20,8	20,7	15,0	19,6	19,5	10,9	13,3	13,0
Συζευγμένο Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-30,1	-24,7	-24,9	-30,9	-27,6	-27,8	-27,9	-24,0	-24,1	-29,9	-25,3	-25,4	-33,0	-30,5	-30,8
Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	17,6	18,9	18,8	15,8	16,5	16,4	20,4	20,8	20,7	19,0	19,6	19,5	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-26,1	-24,7	-24,9	-28,4	-27,6	-27,8	-24,5	-24,0	-24,1	-25,9	-25,3	-25,4	-	-	-

4.8 Οικονομική αξιολόγηση συστήματος αβαθούς γεωθερμίας

Η οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας Στα τυπικά κτίρια της Κύπρου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του οικονομικού δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας σύμφωνα με την προβλεπόμενη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Κανονισμού 244/2012/EK [15] και του προτύπου EN 15459:2007 [25] για οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης τα 15 έτη και επιτόκιο αναγωγής 6%. Το αρχικό κόστος κατασκευής, τόσο του συστήματος αβαθούς γεωθερμίας όσο και των εναλλακτικών συμβατικών συστημάτων με λέβητα πετρελαίου ή υγραερίου και αερόψυκτη αντλία θερμότητας καθώς και των αντίστοιχων υβριδικών και συζευγμένων συστημάτων, για κάθε τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή, προσδιορίστηκε με βάση τις τιμές της αγοράς, οι οποίες λήφθηκαν από τοπικούς κατασκευαστές και εμπόρους αυτών των συστημάτων κατά την περίοδο της άνοιξης του 2014.

Ο υπολογισμός του ετήσιου κόστους καυσίμου βασίστηκε στις μέσες καταναλισκόμενες ποσότητες ηλεκτρισμού, πετρελαίου και υγραερίου, όπως αυτές προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης. Οι ποσότητες αυτές ανάχθηκαν στη συνέχεια με βάση την πρόβλεψη της εξέλιξης της τιμής του αντίστοιχου καυσίμου σε εθνικό επίπεδο [26] σε χρηματική αξία για κάθε οικονομικό έτος της αξιολόγησης. Σε αυτό το κόστος προστέθηκε και το ετήσιο κόστος συντήρησης, θεωρώντας το ως ποσοστό του αρχικού κόστους εγκατάστασης του κάθε συστήματος, ίσο με 3% και 4% για τον ψύκτη (κτίριο γραφείων) και την αντλία θερμότητας διαιρούμενου τύπου (κτίρια κατοικιών) και 2% για τους λέβητες, με βάση τις υποδείξεις του προτύπου EN 15459:2007 [25]. Από το άθροισμα των τιμών αυτών προέκυψε τελικά το τρέχον συνολικό ετήσιο κόστος χρήσης του κάθε εναλλακτικού συστήματος για κάθε τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή.

Με βάση τα αποτελέσματα του οικονομικού δείκτη της καθαρής παρούσας αξίας, όπως αυτά παρουσιάζονται Στον Πίνακα 13, προκύπτει ότι για τις κεντρικές και νότιες περιοχές της Κύπρου, το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας (ΓΑΘ) παρουσιάζει υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα (ΠΣΥΒ, ΥΣΥΒ) γεγονός που το καθιστά ως επένδυση οικονομικά μη αποδεκτή. Αντίθετως για την περιοχή του Σαϊπτά το σύστημα αβαθούς γεωθερμίας παρουσιάζει σημαντικά καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα, μείωση κόστους, με αποτέλεσμα η εγκατάστασή του να είναι ελκυστική.

Πίνακας 13: Καθαρή παρούσα αξία του ολικού κόστους [κ€] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή για 15ετή διάρκεια χρήσης

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊττά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας	-30,5	-29,4	-28,8	-29,4	-28,1	-27,5	-29,0	-26,5	-26,0	-26,8	-25,4	-24,9	-27,9	-30,9	-29,6
Συζευγμένο Μονοκατοικίας	-13,3	-11,6	-10,9	-11,3	-9,9	-9,3	-10,5	-7,9	-7,5	-8,3	-6,8	-6,3	-9,9	-13,0	-11,8
Πολυκατοικίας	-82,03	-82,7	-81,3	-80,7	-80,2	-78,9	-79,5	-75,8	-74,7	-72,8	-70,9	-69,9	-69,4	-81,4	-78,6
Συζευγμένο Πολυκατοικίας	-44,4	-49,5	-48,0	-39,1	-46,4	-45,1	-38,4	-41,3	-40,2	-32,3	-36,3	-35,2	-33,6	-48,1	-45,2
Γραφείων	-131,5	-114,1	-113,0	-117,0	-100,1	-99,1	-116,0	-96,4	-95,6	-111,6	-97,7	-96,9	-90,9	-99,1	-97,0
Συζευγμένο Γραφείων	-78,7	-61,3	-54,7	-63,3	-46,5	-36,6	-61,2	-41,7	-30,7	-56,6	-42,8	-30,7	-37,9	-46,1	-30,5
Υβριδικό Γραφείων	-130,9	-114,1	-113,0	-119,3	-100,1	-99,1	-117,0	-96,4	-95,6	-118,2	-97,7	-96,9	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων	-78,1	-61,3	-54,7	-65,7	-46,5	-36,6	-62,3	-41,7	-30,7	-63,2	-42,8	-30,7	-	-	-

Πίνακας 13: Καθαρή παρούσα αξία ολικού κόστους [κ€] ανά σύστημα, τυπικό κτίριο και χαρακτηριστική περιοχή για 15ετή διάρκεια χρήσης

Τυπικό κτίριο	Περιοχή														
	Λευκωσίας			Λάρνακας			Λεμεσού			Πάφου			Σαϊπτά		
	Σύστημα														
	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ	ΓΑΘ	ΠΣΥΜ	ΥΣΥΜ
Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-22,6	-22,8	-22,4	-21,8	-21,0	-20,5	-21,8	-20,1	-19,7	-19,5	-20,3	-19,8	-19,9	-21,4	-20,6
Συζευγμένο Μονοκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-8,5	-7,9	-7,5	-6,6	-5,8	-5,3	-6,2	-4,5	-4,2	-6,4	-7,2	-6,7	-7,1	-8,5	-7,7
Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-59,1	-58,5	-57,4	-56,9	-56,1	-55,1	-57,8	-54,8	-54,0	-49,5	-49,6	-48,8	-44,6	-54,1	-52,4
Συζευγμένο Πολυκατοικίας χαμηλής κατανάλωσης	-27,9	-25,2	-24,2	-23,1	-22,3	-21,3	-23,2	-20,2	-19,4	-14,9	-14,9	-14,1	-11,2	-20,7	-18,9
Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-93,4	-80,1	-78,7	-80,6	-68,7	-67,5	-89,3	-75,0	-74,0	-85,5	-76,3	-75,3	-65,2	-69,2	-67,0
Συζευγμένο Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-40,7	-27,3	-26,0	-27,0	-15,0	-13,8	-34,5	-20,2	-19,2	-30,5	-21,3	-20,3	-12,1	-16,1	-14,0
Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-96,0	-80,1	-78,7	-86,8	-68,7	-67,5	-94,4	-75,0	-74,0	-96,6	-76,3	-75,3	-	-	-
Συζευγμένο και Υβριδικό Γραφείων χαμηλής κατανάλωσης	-43,2	-27,3	-26,0	-33,2	-27,0	-15,0	-39,6	-20,2	-19,2	-41,6	-21,3	-20,3	-	-	-

References

- [1] Heng S., X., Rybach L. Operational Experience with a New, Powerful Groundwater Heat Pump System for Space Heating and Cooling. Proceedings of the Renewable Energy 2006 Conference, Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2006:1508-1511.
- [2] Ανδρίτσος Ν., Αρβανίτης Α., Κολιός Ν., Κουτσινός Σ. Εφαρμογή Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας σε Σύστημα μιας Γεώτρησης και η Συμβολή τους στην Εξοικονόμηση Ενέργειας. Πρακτικά 8^{ου} Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, Θεσσαλονίκη 2006:525-530.
- [3] Κυριάκης Ν., Μιχόπουλος Α. Συστήματα Θέρμανσης και Κλιματισμού με Εκμετάλλευση της Αβαθούς Γεωθερμικής Ενέργειας, Τεχνικό Περιοδικό «ΚΤΙΡΙΟ», Τεύχος 174, σελ. 49-54, Οκτώβριος 2005.
- [4] Ochsner K. Geothermal Heat Pumps, a Guide for Planning and Installing. Earthscan Publications, U.K., ISBN: 978-1-84407-406-8, 2008.
- [5] DIN 8901:2002. Product image - Refrigerating systems and heat pumps - Protection of soil, ground and surface water - Safety and environmental requirements and testing.
- [6] EN 12831:2004. Heating systems in buildings - Method for calculation of the design heat load.
- [7] prEN ISO 17628:2013. Geotechnical investigation and testing - Geothermal testing - Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger.
- [8] ASTM D5334-14. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.
- [9] Molina-Giraldo N, Blum P., Zhu K., Bayer P., Fang, Z. A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. International Journal of Thermal Sciences, 50 (2011) 2506-2513.
- [10] Chiasson A., Rees S., Spitler, J. A Preliminary Assessment of the Effects of Groundwater Flow on Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems. ASHRAE Transactions, 106(1) (2000) 380-393.
- [11] OSU, Closed-loop/ground-source heat pumps systems installation guide. International Ground Source Heat Pump Association, Oklahoma State University, Stillwater, OK; 1988.
- [12] OSU, Closed loop ground source heat pumps systems. Oklahoma State University, Stillwater, OK; 1988.
- [13] Kavanaugh, S. P., Rafferty, K. Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. 1st ed. U.S.A.: American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.; 1997.
- [14] ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, Atlanta, USA, 2013.
- [15] Regulation No. 244/2012/EU supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements. Brussels.

- [16] ΚΔΠ 432/2013, 2013, Ο περί ρύθμισης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων νόμος, Διάταγμα δυνάμει του άρθρου 15, Λευκωσία.
- [17] ASHRAE Handbook-Fundamentals, 2013, American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- [18] EN 15251:2012. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels: European Committee for Standardization.
- [19] Hadjinicolaou, P., Giannakopoulos, C., Zerefos, C., Lange, M. A., Pashiardis, S., Lelieveld, J., 2011, "Mid-21st century climate and weather extremes in Cyprus as projected by six regional climate models", Reg. Environ. Change, 11, pp. 441-457.
- [20] EN 15316-2-1:2007. Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-1: Space heating emission systems. Brussels: European Committee for Standardization.
- [21] EN 15316-2-3:2007. Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-3: Space heating distribution systems. Brussels: European Committee for Standardization.
- [22] Morgan, P., 1973, Terrestrial heat flow studies in Cyprus and Kenya, PhD thesis published by Imperial College, University of London.
- [23] Michopoulos, A., Kyriakis, N., 2009, "A new energy analysis tool for ground source heat pump systems", Energ. Buildings, 41, pp. 937-941.
- [24] Sfeir, A., Bernier, M., Million, T., Joly, A., 2005, "A methodology to evaluate pumping energy consumption in GCHP systems", ASHRAE Tran., 111(1), pp. 714-729.
- [25] EN 15459:2007. Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
- [26] Zachariadis, T., Michael, M., 2013, Update of National Energy Forecasts for the Republic of Cyprus, Report submitted to the Ministry of Energy of Cyprus.

Σημειώσεις

A series of horizontal dotted lines for taking notes, consisting of 25 lines.

