



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ**

του

Καραμολέγκου Ι. Νικόλαου

Επιβλέπων καθηγητής:

Δρ. Κοσμάς Α. Καβαδίας

Αιγάλεω 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της γεωθερμικής ενέργειας ως μέσον παραγωγής και απαγωγής θερμότητας για τη θέρμανση-ψύξη κτηρίων. Εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής κλειστού κυκλώματος αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης-ψύξης και ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για μια κατοικία στην περιοχή του Ν. Ηρακλείου, Αττικής με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Σε στάδιο προμελέτης πραγματοποιείται τεχνικό-οικονομική ανάλυση και περιβαλλοντική αποτίμηση του προτεινόμενου συστήματος.

Για την επίτευξη των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν ως υπολογιστικά εργαλεία τα λογισμικά easy-KENAK και RETScreen. Με το ανοιχτό λογισμικό easy-KENAK, το οποίο βασίζεται στην μέθοδο ημί-σταθερής κατάστασης μηνιαίου βήματος του Ευρωπαϊκού ΕΛΟΤ EN ISO 13790, υπολογίζεται η ετήσια ενεργειακή απαίτηση του κτηρίου για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης, βάσει των οποίων προσδιορίζεται η απαιτούμενη ισχύς της αντλίας θερμότητας του προτεινόμενου σεναρίου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το λογισμικό RETScreen, πραγματοποιείται η αξιολόγηση της επένδυσης τόσο με οικονομικά όσο και με περιβαλλοντικά κριτήρια.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν καταδεικνύουν τόσο τα οικονομικά όσο και τα περιβαλλοντικά οφέλη της προτεινόμενης επένδυσης.

Λέξεις κλειδιά: Γεωθερμική ενέργεια, αβαθής γεωθερμία, εξοικονόμηση ενέργειας, κλιματισμός κτηρίου, γεωθερμική αντλία θερμότητας, εναλλάκτης θερμότητας.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study of geothermal energy as a means of producing and dissipating heat for heating-cooling needs. The possibility of implementing a closed circuit operation of shallow geothermal energy to cover the heating-cooling and hot water usage needs for a house in the area of N. Heraklion, Attica, in order to save energy is being considered. In the preliminary design stage, a technical-economic analysis and environmental evaluation of the proposed system is carried out.

To achieve the above, easy-KENAK and RETScreen software were used as computational tools. The easy-KENAK is an open source software, based on the semi-stable monthly step method of the European ELOT EN ISO 13790, which calculates the building's annual energy requirement for heating, cooling and hot water use, based on which the required pump power is determined heat of the proposed solution . Then, using RETScreen software, the investment is evaluated with both financial and environmental criteria.

The results show both the economic and environmental benefits of the proposed investment.

Keywords: Geothermal energy, shallow geothermal energy, energy saving, building air conditioning, geothermal heat pump, heat exchanger.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
1 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	20
1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ	21
1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	21
1.2.1 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων	22
1.3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ	23
1.3.1 Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων	24
1.4 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ	25
1.4.1 Διαδικασία θέρμανσης γεωθερμικών ρευστών.....	26
1.4.2 Συστήματα παραγωγής και διάθεσης του γεωθερμικού ρευστού.....	27
1.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.....	27
1.5.1 Χρήση της γεωθερμίας για την παραγωγή ισχύος.....	29
1.5.2 Άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας.....	30
1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	32
1.6.1 Πλεονεκτήματα	32
1.6.2 Προβλήματα	33
2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	35
2.1 ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	35
2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	36
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.....	37
2.3.1 Εναλλάκτες θερμότητας	37
2.3.2 Γεωθερμική αντλία θερμότητας	40
2.3.3 Εσωτερικό σύστημα.....	43
2.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	43
2.4.1 Συστήματα ATES.....	43
2.4.2 Συστήματα BTES.....	44
2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	44
2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	45
2.6.1 Πλεονεκτήματα	45
2.6.2 Μειονεκτήματα	46
3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	47
3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ	48
3.1.1 Σχεδιασμός.....	49

3.1.2	Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων.....	50
3.1.3	Πλήρωση γεωτρήσεων	51
3.1.4	Δοκιμές ελέγχου.....	52
3.1.5	Ρευστά μεταφοράς θερμότητας	54
3.1.6	Εκκίνηση λειτουργίας και συντήρηση.....	55
3.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ.....	56
3.2.1	Είδη οριζοντίων γεωεναλλακτών.....	56
3.2.2	Σχεδιασμός.....	58
3.2.3	Εγκατάσταση συστήματος.....	60
3.2.4	Δοκιμές ελέγχου και ρευστά μεταφοράς θερμότητας.....	62
3.2.5	Εκκίνηση λειτουργίας και συντήρηση.....	62
3.2.6	Επιδράσεις λειτουργίας.....	62
4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ.....	65
4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ.....	66
4.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ EASY-KENAK.....	67
4.2.1	Αρχικοποίηση	67
4.2.2	Σχεδίαση.....	69
4.2.3	Κέλυφος.....	74
4.2.4	Συστήματα.....	75
4.2.5	Αποτελέσματα	75
4.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ-ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΣ.....	75
5	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.....	77
5.1	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	77
5.1.1	Υπολογισμός μήκους οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη.....	77
5.1.2	Επιλογή κυκλοφορητή	83
5.1.3	Υπολογισμός δοχείου διαστολής.....	85
5.1.4	Κόστος εγκατάστασης.....	86
5.2	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	87
5.2.1	Υπολογισμός βάθους γεωτρήσεων.....	87
5.2.2	Επιλογή κυκλοφορητή	96
5.2.3	Υπολογισμός δοχείου διαστολής.....	98
5.2.4	Κόστος εγκατάστασης.....	99
5.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	99
5.4	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ.....	100
5.4.1	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ.....	105

6	ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ	106
6.1	RETS-CREEN ΓΕΝΙΚΑ	106
6.2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	106
6.2.1	Φύλλο εισαγωγής.....	107
6.2.2	Συμβατικό σύστημα θέρμανσης.....	107
6.2.3	Συμβατικό σύστημα ψύξης.....	108
6.2.4	Ενεργειακό σύστημα θέρμανσης-ψύξης.....	109
6.2.5	Ανάλυση κόστους.....	110
6.2.6	Ανάλυση εκπομπών.....	111
6.2.7	Οικονομική ανάλυση.....	112
6.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	112
6.3.1	Οικονομική αξιολόγηση	112
6.3.2	Ανάλυση ευαισθησίας και επικινδυνότητας επένδυσης	114
6.3.3	Ανάλυση εκπομπών.....	117
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	118
8	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	119

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Διάγραμμα lindal.....	28
Σχήμα 2.1: Μέση θερμοκρασία εδάφους ανάλογα με την εποχή και το βάθος για την περιοχή της Αθήνας.....	36
Σχήμα 2.2: Διακύμανση COP/EER σε σχέση με τη θερμοκρασία της πηγής.....	42
Σχήμα 2.3: Διακύμανση COP/EER σε σχέση με τη θερμοκρασία του εσωτερικού συστήματος.....	42
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα δοκιμής SIA 384/6.....	54
Σχήμα 3.2: Απόδοση οριζοντίου συλλέκτη συναρτήσει της απόστασης των σωληνώσεων.....	60
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας κυκλοφορητή οριζοντίου γεωθερμικού συστήματος.....	85
Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας κυκλοφορητή κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος.....	97
Σχήμα 5.3: Σκαρίφημα γεωτρήσεων προτεινομένου συστήματος.....	100
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών έργου.....	113
Σχήμα 6.2: Ανάλυση επικινδυνότητας IRR.....	114
Σχήμα 6.3: Ανάλυση επικινδυνότητας NPV.....	115
Σχήμα 6.4: Ανάλυση επικινδυνότητας για την αποπληρωμή μέτοχων.....	116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Κατάταξη γεωθερμικών πηγών βάσει της θερμοκρασίας τους.....	21
Πίνακας 1.2: Πιθανότητα εμφάνισης και σοβαρότητα περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την άμεση γεωθερμική χρήση.....	34
Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οριζοντίου γεωθερμικού κλειστού βρόγχου.....	44
Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθετου γεωθερμικού κλειστού βρόγχου.....	44
Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθετου γεωθερμικού συστήματος ανοικτού βρόγχου.....	45
Πίνακας 3.1: Μέγιστος όγκος αποστράγγισης νερού κατά τη δοκιμή πίεσης ανάλογα τις διαστάσεις της σωλήνωσης.....	54
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά τυποποιημένης σωλήνωσης PE DN32 PN12.....	79
Πίνακας 5.2: Σταθερά μετατροπής εξίσωσης Hazen-Williams για διάφορους συνδυασμούς μονάδων μέτρησης	84
Πίνακας 5.3: Τιμές του συντελεστή τριβής Hazen -Williams για διάφορους τύπους σωληνώσεων	84
Πίνακας 5.4: Αναλυτικά κόστη εγκατάστασης οριζοντίου γεωθερμικού συστήματος	86
Πίνακας 5.5: Διορθωτικοί συντελεστές αντλιών θερμότητάς κατά ASHARE.....	89
Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά τυποποιημένης σωλήνωσης PE DN32 PN12.....	90
Πίνακας 5.7: Συντελεστής διόρθωσης θερμικής αντίστασης σωλήνωσης	93

Πίνακας 5.8: Συντελεστής θερμικών απωλειών κυκλώματος.....	94
Πίνακας 5.9: Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους κατά ASHARE	95
Πίνακας 5.10: Αναλυτικά κόστη εγκατάστασης κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος.....	99
Πίνακας 5.11: Σύγκριση γεωθερμικών συστημάτων.....	99
Πίνακας 5.12: Τυποποιημένες σωληνώσεις πολυαιθυλενίου	102
Πίνακας 5.13: Θερμική αγωγιμότητα εδαφών	103
Πίνακας 5.14: Κοστολόγηση γεωθερμικών συστημάτων σύμφωνα με την greenmatch	105

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Μοντέλο δημιουργίας γεωθερμικού πεδίου	24
Εικόνα 1.2: Μηχανισμοί θέρμανσης γεωθερμικού ρευστού	27
Εικόνα 1.3: Γεωθερμικές χρήσεις.....	28
Εικόνα 2.1: Επιφανειακό σύστημα ανοιχτού βρόγχου	38
Εικόνα 2.2: Σύστημα φρέατος ανοιχτού βρόγχου (αριστερά- μονού φρέατος, δεξιά- διπλού φρέατος)	38
Εικόνα 2.3: Μικτό σύστημα ανοιχτού βρόγχου	39
Εικόνα 2.4: Κατακόρυφο και οριζόντιο κύκλωμα κλειστού βρόγχου	40
Εικόνα 3.1: Τύποι κατακόρυφων γεωεναλλακτών ανάλογα τη διάταξη των αγωγών	48
Εικόνα 3.2: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής σε σειρά.....	57
Εικόνα 3.3: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής σε παράλληλη σύνδεση	57
Εικόνα 3.4: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής ενός βρόγχου	57
Εικόνα 3.5: Συστήματα οριζοντίου γεωεναλλάκτη σπειροειδούς διάταξης	58
Εικόνα 4.1: Κάτοψη κατοικίας	66
Εικόνα 4.2: Δομή εισαγωγής δεδομένων στο easy-KENAK	67
Εικόνα 4.3: Αρχικά στοιχεία κτηρίου easy-KENAK.....	68
Εικόνα 4.4: Ιδιότητες Θ.Ζ. κτηρίου easy-KENAK.....	71

Εικόνα 4.5 : Οροφές και δάπεδα κτηρίου easy-KENAK.....	73
Εικόνα 4.6: Περίγραμμα οικίας easy-KENAK.....	73
Εικόνα 4.7: Αδιαφανή στοιχεία κτηρίου easy-KENAK	74
Εικόνα 4.8: Αδιαφανη στοιχεία κτηρίου Easy-KENAK.....	75
Εικόνα 4.9: Ενεργειακές απαιτήσεις κτηρίου.....	75
Εικόνα 5.1: Θερμοκρασίες λειτουργίας ΓΑΘ	77
Εικόνα 5.2: Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού μοντέλου	101
Εικόνα 5.3: Επιλογή γεωεναλλάκτη	101
Εικόνα 5.4: Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος.....	102
Εικόνα 5.5: Υπολογισμός απαιτούμενου μήκους γεωεναλλακτη.....	103
Εικόνα 5.6: Υπολογισμός κυκλοφορητή.....	104
Εικόνα 5.7: Υπολογισμός δοχείου διαστολής	104
Εικόνα 5.8: Κοστολόγηση γεωθερμικού συστήματος	104
Εικόνα 6.1: Βήματα πρότυπης ανάλυσης RETS-screen.....	106
Εικόνα 6.2: Φύλλο εργασίας εισαγωγής	107
Εικόνα 6.3: Συμβατικό σύστημα θέρμανσης.....	108
Εικόνα 6.4: Συμβατικό σύστημα ψύξης.....	109
Εικόνα 6.5: Προτεινόμενο ενεργειακό σύστημα θέρμανσης κλιματισμού	110

εικόνα 6.6: Αρχικό κόστος επένδυσης	110
Εικόνα 6.7: Ετήσια κόστη και ετήσια εξοικονόμηση	111
εικόνα 6.8: Ανάλυση εκπομπών συμβατικού και προτεινομένου συστήματος.....	111
Εικόνα 6.9: Οικονομικοί παράμετροι έργου	112
Εικόνα 6.10: συντελεστές οικονομικής βιωσιμότητας έργου	113
Εικόνα 6.11: Ανάλυση ευαισθησίας IRR.....	114
Εικόνα 6.12: Ανάλυση ευαισθησίας NPV.....	115
Εικόνα 6.13: Ανάλυση ευαισθησίας για την αποπληρωμή μέτοχων	116
Εικόνα 6.14: Ετήσια μείωση εκπομπών.....	117

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Συμβολισμός	Ορισμός	Μονάδα
a_g	Θερμική διαχυτότητα εδάφους	ft ² /day
A_{hor}	Απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση του οριζόντιου γεωεναλλάκτη	m ²
A_{ver}	Απαιτούμενη επιφάνεια για την εγκατάσταση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη	m ²
C	Συντελεστής τριβής Hazen-Williams	-
C_{f-c}	Διορθωτικός συντελεστής που σχετίζεται με το ERR της Γ.Α.Θ.	-
C_{f-h}	Διορθωτικός συντελεστής που σχετίζεται με το COP της Γ.Α.Θ.	-
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού	(kJ/(kg·K))
d	Βάθος τοποθέτησης οριζοντίου γεωεναλλάκτη	m
d_{geo}	Διάμετρος γεωτρήσεων	m
D_{in}	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης	m
D_o	Εξωτερική διάμετρος σωλήνωσης	m
E_c	Ετήσια ενέργεια για ψύξη	Wh
EFL_{h-c}	Ισοδύναμες ώρες σε ολικό φορτίο ψύξης ετησίως	h
EFL_{h-h}	Ισοδύναμες ώρες σε ολικό φορτίο θέρμανσης ετησίως	h
E_h	Ετήσια ενέργεια για θέρμανση	Wh
f_{oi}	Αδιάστατος αριθμός fourier που σχετίζεται με τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους	-
F_{sc}	Συντελεστής θερμικών απωλειών του κυκλώματος σωληνώσεων	-
G_1, G_2, G_f	Συντελεστές που σχετίζονται με τον αδιάστατο αριθμό fourier	-
g_w	Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους	-
h_w	Συντελεστής συναγωγής του νερού	W/m ² ·K
i	Επιτόκιο αναγωγής	%
k_1	Σταθερά Hazen-Williams	-
L	Απαιτούμενο μήκος γεωεναλλάκτη	m
l	Μήκος θερμογέφυρας	m
L_{geo}	Απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων	m
L_{hor}	Μήκος οριζόντιου γεωεναλλάκτη	m
m_w	Παροχή μάζας νερού	kg/sec
n_{geo}	Αριθμός γεωτρήσεων	-
n_n	Παράμετρος υπολογισμού συντελεστή Nusselt	-
Nu	Συντελεστής Nusselt	-
p_1	Ελάχιστη πίεση δικτύου	Pa
p_2	Μέγιστη πίεση δικτύου	Pa
PLF_m	Μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου	-

Pr	Αριθμός Prandtl	-
p_{γ}	Γραμμικές απώλειες πίεσης δικτύου	mH ₂ O
$p_{\gamma-\gamma}$	Γραμμικές απώλειες κατακόρυφου γεωθερμικού δικτύου	mH ₂ O
$p_{\gamma-\varepsilon}$	Γραμμικές απώλειες ενδιάμεσου δικτύου	mH ₂ O
$p_{\tau,\gamma}$	Συνολικές τοπικές και γραμμικές απώλειες πίεσης δικτύου	mH ₂ O
$p_{\tau,\gamma\alpha\theta}$	Τοπικές απώλειες πίεσης γεωθερμικής αντλίας θερμότητας	mH ₂ O
$p_{\tau,\varepsilon\alpha\rho}$	Τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων	mH ₂ O
q_c	Μέγιστη ψυκτική ισχύς	kW
q_h	Μέγιστη θερμική ισχύς	kW
R_b	Θερμική αντίσταση σωλήνωσης-γεώτρησης	h·ft·°F/Btu
R_{con}	Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση	m·K/W
Re	Αριθμός Reynolds	-
R_{ga}	Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για ετήσιο παλμό	h·ft·°F/Btu
R_{gd}	Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για ημερήσιο παλμό	h·ft·°F/Btu
R_{gm}	Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για μηνιαίο παλμό	h·ft·°F/Btu
R_{pipe}	Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω της σωλήνωσης	m·K/W
R_{soil}	Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος	m·K/W
R_{tot}	Συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας	m·K/W
S	Συντελεστής διαμόρφωσης αγωγιμότητας	-
t_p	Διορθωτικός συντελεστής για τη θερμοκρασία εδάφους λόγω της παρεμβολής παρακείμενων σωληνώσεων	°C
t_{wi}	Θερμοκρασία εισόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη	°C
t_{wo}	Θερμοκρασία εξόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη	°C
T_y	Ετήσιο χρονικό διάστημα σε ώρες	h
U	Συντελεστής θερμοπερατότητας	W/m ² K
u	Ταχύτητα ροής	m/sec
V	Διείσδυση αέρα από χαραμάδες	m ³ /h
V_s	Συνολικός όγκος νερού εγκατάστασης	m ³
V_w	Παροχή όγκου νερού	m ³ /s
$V_{\beta\rho}$	Παροχή όγκου νερού ανά βρόγχο	m ³ /s
$V_{\Delta,\Delta}$	Όγκος δοχείου διαστολής	m ³
α	Συντελεστής απορροφητικότητας	-
β	Κλίση δομικού στοιχείου	μοίρες

γ	Προσανατολισμός δομικού στοιχείου	μοίρες
E	Εμβαδόν	m ²
ε	Συντελεστής εκπομπής	-
E _{ZNX}	Ετήσια ενέργεια για Z.N.X	kWh
λ_{pipe}	Θερμική αγωγιμότητα σωλήνωσης	W/(m·K)
λ_{soil}	Θερμική αγωγιμότητα εδάφους	W/(m·K)
μ_w	Δυναμικό ιξώδες νερού	N·s/m ²
v_1	Ειδικός όγκος νερού στη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας	m ³ /kg
v_2	Ειδικός όγκος νερού στην υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας	m ³ /kg
v_w	Κινηματικό ιξώδες νερού	
ρ_w	Πυκνότητα νερού	kg/s
τ_1, τ_2, τ_f	Χρονικός παλμός επίδρασης της θερμοκρασίας του εδάφους από το γεωεναλλάκτη	days
τ_g	Θερμοκρασία εδάφους	°C
Ψ	Συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας	W/mK

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ASTM	American Society for Testing and Material
ASHARE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BTES	Borehole Thermal Energy Storage
COP	Coefficient Of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
ISO	International Organization For Standardization
SDR	Special Drawing Rights
SIA	Swiss Standards
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΑΘ	Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας
IRR	Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης
E.E	Ευρωπαϊκή Ένωση
ZNX	Ζεστό Νερό Χρήσης
Θ.Ζ.	Θερμική Ζώνη
NPV	Net Present Value (Καθαρά Παρούσα Αξία)
Κ.Θ.Κ	Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτηρίων
ΜΘΧ	Μη Θερμαινόμενος Χώρος
MEG	Monoethylene glycol (Μονοαιθυλενογλυκόλη)
MPG	Monopropylene glycol (Μονοπροπυλενογλυκόλη)
PE	Polyethylene (Πολυαιθυλένιο)
T.O.T.E.E	Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
Υ/Δ	Υπνοδωμάτια

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτή επιφέρει, επιβάλλουν την άμεση μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) και συστημάτων ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών πηγών.

Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή επιτροπή έχει ήδη εφαρμόσει μια σειρά σχεδίων για μία «Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Ένωση». Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) έχει θέσει ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους για το 2020, το 2030 και το 2050.

Όσον αφορά τους στόχους για το 2020 αυτοί περιλαμβάνουν αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ τουλάχιστον στο 20% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά τουλάχιστον 20%. Τα έως τώρα στοιχεία, δείχνουν πως η Ε.Ε. είναι κοντά στην εκπλήρωση των στόχων αυτών.

Οι στόχοι του 2030 περιλαμβάνουν αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ τουλάχιστον στο 32% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 32,5%. Τέλος, προβλέπεται προώθηση των ηλεκτρικών διασυνδέσεων σε ποσοστό 15%.

Όσον αφορά τους στόχους του 2050, αυτοί περιλαμβάνουν μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 80%-95% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 (Σταμπόλης, et al., 2019).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο κτηριακός τομέας ευθύνεται για το 36% της κατανάλωσης ενέργειας και για το 30% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ενώ, στην Ελλάδα ο κτηριακός τομέας έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας με 43%.

Ο ελληνικός τομέας των κτηρίων έχει έντονο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λόγω χρήσης πρωτογενών υλικών, κατανάλωσης φυσικών πόρων και παραγωγής ρύπων και αποβλήτων. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων και η χρήση ΑΠΕ σε αυτά (Μπαλάρας, et al., 2015).

Η Ελλάδα, ως γνωστόν διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το οποίο με τη χρήση κατάλληλων συστημάτων μπορεί να αποτελέσει ιδανική λύση για το ενεργειακό πρόβλημα των κτηρίων. Ειδικότερα, η γεωθερμική ενέργεια (ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης) μπορεί να καταστήσει τα κτίρια ενεργειακά ανεξάρτητα. Η εκμετάλλευση των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας αποτελούν μια σύγχρονη, οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον λύση για τον κλιματισμό των κτηρίων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει τη γεωθερμική ενέργεια και πιο συγκεκριμένα την αβαθή γεωθερμία και τα συστήματα αξιοποίησης αυτής, ειδικότερα των γεωθερμικών συστημάτων κλειστού κυκλώματος.

Πραγματοποιείται διαστασιολόγηση και οικονομοτεχνική μελέτη γεωθερμικού συστήματος για την πλήρη κάλυψη ενεργειακών αναγκών θέρμανσης και ψύξης για μια κατοικία στην περιοχή της Αττικής.

Η θεματική διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Μέρος Α' «Βιβλιογραφική ανασκόπηση»

Κεφάλαιο 1 «Γεωθερμική ενέργεια», παρουσιάζονται βασικά στοιχεία για τη γεωθερμική ενέργεια, ορισμοί, τύποι γεωθερμικών πεδίων, χρήσεις της γεωθερμίας, τα γεωθερμικά ρευστά, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτής.

Κεφάλαιο 2 «Γεωθερμικός κλιματισμός», παρουσιάζεται η αβαθής γεωθερμία, οι παράγοντες που την επηρεάζουν καθώς και τα συστήματα αξιοποίησης αυτής για θερμική χρήση.

Κεφάλαιο 3 «Γεωθερμικά συστήματα κλειστού κυκλώματος», πραγματοποιείται εμβάθυνση στα γεωθερμικά συστήματα κλειστού κυκλώματος. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα στάδια κατασκευής αυτών, οι απαιτήσεις και τα πλέον κατάλληλα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτά. Τέλος, παρουσιάζονται οι απαραίτητες δοκιμές καλής χρήσης και οι απαιτήσεις σε συντήρηση αυτών.

Μέρος Β' «Υπολογισμοί»

Κεφάλαιο 4 «Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων κατοικίας», παρουσιάζεται η εξεταζόμενη κατοικία και πραγματοποιείται υπολογισμός των θερμικών και ψυκτικών αναγκών της μέσω του ανοιχτού λογισμικού easyKENAK.

Κεφάλαιο 5 «Σχεδιασμός συστημάτων κλειστού κυκλώματος», βάσει των αναγκών της εξεταζόμενης κατοικίας πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση οριζοντίου και κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου για την περίπτωση αυτή.

Κεφάλαιο 6 «Οικονομοτεχνική μελέτη και περιβαλλοντική αποτίμηση», πραγματοποιείται η οικονομοτεχνική μελέτη και η περιβαλλοντική αποτίμηση της προτεινόμενης επένδυσης σε σχέση με ένα πρότυπο συμβατικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης για να ελεγχθεί η σκοπιμότητα και η βιωσιμότητα του έργου, με τη χρήση του λογισμικού RETScreen.

Κεφάλαιο 7 «Συμπεράσματα», παρατίθεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

ΜΕΡΟΣ Α΄

(ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ)

1 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα, η οποία προέρχεται από τον πυρήνα της γης και ρέει προς την επιφάνεια της σύμφωνα με τους βασικούς νόμους μετάδοσης της θερμότητας, δηλαδή είτε δια αγωγής μέσω των πετρωμάτων, είτε δια συναγωγής μέσω των κυκλοφορούντων ρευστών (Καλδέλλης, 1994, p. 1).

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική πηγή ενέργειας, καθώς είναι κατάλληλη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, αντικαθιστώντας την παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Μπορεί να συνδυαστεί με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια τονώνοντας έτσι την περιφερειακή οικονομία (Kolditz, et al., 2013).

Η πυκνότητα της γεωθερμικής ενέργειας στην επιφάνεια της γης εκτιμάται πως είναι 40-50 W/m². Παράλληλα η μέση γεωθερμική βαθμίδα¹ είναι 30 °C/km (Καλδέλλης, 1994, p. 1).

Το μεγαλύτερο εμπόδιο κατά την ανάπτυξη γεωθερμικών συστημάτων εντοπίζεται στην εύρεση και αξιολόγηση των πόρων. Η κατανομή των γεωθερμικών πόρων λόγω της άνισης κατανομής των ηφαιστειών και των θερμικών πηγών σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στην επιφάνεια της γης είναι δυσεύρετη. Οι εκτιμήσεις των γεωθερμικών πόρων πραγματοποιούνται βάσει γεωλογικών και γεωφυσικών δεδομένων όπως: **α)** το βάθος, το πάχος και την έκταση των γεωθερμικών πεδίων, **β)** τις ιδιότητες των πετρωμάτων, **γ)** την αλατότητα και τη γεωχημεία των γεωθερμικών ρευστών που ενδέχεται να υπάρχουν στους υδροφόρους ορίζοντες και **δ)** τη θερμοκρασία, το πορώδες και τη διαπερατότητα των πετρωμάτων. Φυσικά, ευνοημένες είναι οι περιοχές με αυξημένη θερμική ροή και επιφανειακά πετρώματα μικρής θερμικής αγωγιμότητας, διότι σε αυτές ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος είναι μεγαλύτερος (Rummel & Kappelmeyer, 1993) (Κατσιφαράκης, 2015).

Γενικά, οι υψηλές τιμές θερμικής ροής συνδέονται με την ύπαρξη διάπυρου μαγματικού υλικού σε σχετικά μικρό βάθος και παρατηρούνται κυρίως σε: (Κατσιφαράκης, 2015)

- i. Περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης
- ii. Περιοχές βύθισης λιθοσφαιρικών πλακών
- iii. Περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων
- iv. Ηπειρωτικές περιοχές διογκώσεων.

Σημαντικός περιορισμός για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, αποτελεί το βάθος εύρεσης των γεωθερμικών ρευστών. Το εκμεταλλεύσιμο βάθος περιορίζεται από τις υφιστάμενες τεχνικές δυνατότητες και οικονομικές συνθήκες στα 3 km . Παράλληλα, τα γεωθερμικά ρευστά δεν μεταφέρονται από τον τόπο παραγωγής τους, γεγονός το οποίο

¹ Γεωθερμική βαθμίδα: ονομάζεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με το βάθος.

υπαγορεύει την επί τόπου μόνον αξιοποίηση τους (Ανδρίτσος & Φυτικάς, 2004, pp. 15-23) (Κατσιφαράκης, 2015).

Αντιθέτως, οι συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές στα υδροθερμικά συστήματα, στα οποία υπάρχουν φυσικά αποθέματα νερού και υδρατμού και η άντλησή τους είναι σχετικά εύκολη. Όλες οι έως σήμερα εκμεταλλεύσιμες γεωθερμικές πηγές ανήκουν σε αυτήν τη κατηγορία. Από ενεργειακής άποψης, οι πηγές αυτές περιέχουν μικρό μέρος της θερμικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα προσιτά για τον άνθρωπο βάθη (Κατσιφαράκης, 2015).

1.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ

Η ταξινόμηση των γεωθερμικών πηγών βασίζεται στη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως φορέας μεταφοράς θερμότητας από βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια της γης. Η θερμοκρασία τους είναι πρακτικά ανάλογη της ενθαλπίας τους. Ειδικότερα, οι γεωθερμικές πηγές διακρίνονται σε πολύ χαμηλής, χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας, βάσει του ενεργειακού τους περιεχόμενου (Πίνακας 1.1) (Κατσιφαράκης, 2015).

Πίνακας 1.1: Κατάταξη γεωθερμικών πηγών βάσει της θερμοκρασίας τους

Τύπος πηγής	Θερμοκρασία
Πολύ χαμηλής ενθαλπίας	$T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Χαμηλής ενθαλπίας	$T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
Μέσης ενθαλπίας	$90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Υψηλής ενθαλπίας	$T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Οι υψηλής και μέσης ενθαλπίας πηγές χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στο βιομηχανικό τομέα, ενώ οι χαμηλής ενθαλπίας πηγές για θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, γεωργικές χρήσεις (θέρμανση θερμοκηπίων) καθώς και σε ορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες. Σε κάθε περίπτωση η υποκατάσταση συμβατικών ενεργειακών πηγών από γεωθερμικές βοηθά στην επίλυση του ποσοτικού και ποιοτικού σκέλους του ενεργειακού προβλήματος.

Αξίζει να αναφερθεί όμως, πως για να θεωρηθεί μια γεωθερμική πηγή ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η δυνατότητα αλλά και ο ρυθμός της πλήρους ενεργειακής αναφόρτισής της (Κατσιφαράκης, 2015).

1.2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται κυρίως σε περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι σε τιμές της κανονικής ή και λίγο μεγαλύτερες και σε περιοχές όπου η γεωθερμική βαθμίδα είναι σε πολύ υψηλότερες τιμές της κανονικής. Κατά την πρώτη περίπτωση, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) σε προσιτά οικονομικά και τεχνικά για τον άνθρωπο βάθη. Κατά τη δεύτερη

περίπτωση, οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές, ορισμένες φορές και μεγαλύτερες από 400 °C, σε μεγάλα βάθη όμως (Κατσιφαράκης, 2015).

Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τα παρακάτω γεωλογικά στοιχεία:

- ❖ Εστία θερμότητας: όπου μπορεί να είναι είτε μια μαγματική διείσδυση πολύ υψηλής θερμοκρασίας ($T > 600$ °C), που έχει φθάσει σε μικρά βάθη περίξ των 5-10 km, είτε η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης.
- ❖ Ταμιευτήρας: πρόκειται για ένα σχηματισμό από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα σε αυτόν και από τον οποίο τα ρευστά αντλούν θερμότητα.
- ❖ Γεωθερμικό ρευστό: είναι νερό και συνήθως μετεωρικής προέλευσης, το οποίο ανάλογα με τη πίεση και τη θερμοκρασία στον ταμιευτήρα, είναι σε υγρή ή αέρια (κεκορεσμένος ατμός) φάση. Τις περισσότερες φορές το γεωθερμικό ρευστό έχει σύνθετη χημική σύσταση (Dickson & Fanelli, 2003, pp. 12-13).

1.2.1 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα χωρίζονται σε συμβατικά, μη συμβατικά και τεχνητά. Ο όρος “συμβατικά” σχετίζεται με το αν υπάρχουν οι τεχνικές δυνατότητες να τα εκμεταλλευτεί ο άνθρωπος. Τα μη συμβατικά βρίσκονται στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης, χωρίς μέχρι τώρα να χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ενέργειας. Τέτοια συστήματα είναι τα ενισχυμένα και τα γεωπεπισμένα.

Τα τεχνικά από την άλλη, βασίζονται σε “ιδέες” που σκοπό έχουν να δημιουργήσουν γεωθερμική πηγή, όπως η έκρηξη θερμοπυρηνικών που είχε προτείνει ο Armstead το 1978 με σκοπό την παράγεια της θερμότητας που θα απελευθερωνόταν κατά την έκρηξη. Φυσικά, δεν προχώρησε ποτέ λόγω της υψηλής ραδιενέργειας που θα είχε το γεωθερμικό ρευστό που τελικά θα έφτανε στην επιφάνεια της γης.

Η πιο ενδιαφέρουσα τεχνολογία μέχρι στιγμής ήταν του Bar που πρότεινε την ηλιό-γεωθερμία. Πολύ συνοπτικά, πρόκειται στην ουσία για ένα υβριδικό σύστημα το οποίο αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες και γεωθερμική αντλία θερμότητας. Το καλοκαίρι η περίσσεια της ηλιακής ενέργειας θα θερμαίνει νερό και θα αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα με σκοπό να χρησιμοποιείται το χειμώνα για θέρμανση χώρων. Ωστόσο, το κόστος ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά μεγάλο, ενώ και η κατανάλωση ενέργειας θα είναι μεγάλη για τη μεταφορά του νερού.

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια όπως το είδος των γεωθερμικών πόρων, τον τύπο και τη θερμοκρασία των ρευστών, τον τύπο του πετρώματος που σχηματίζει τον υδροφορέα, το είδος της εστίας θερμότητας και άλλα.

Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται στα εξής:

1. Υδροθερμικά συστήματα: είναι τα φυσικά υπόγεια θερμά νερά που βρίσκονται σε έναν ή και περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μια εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων.

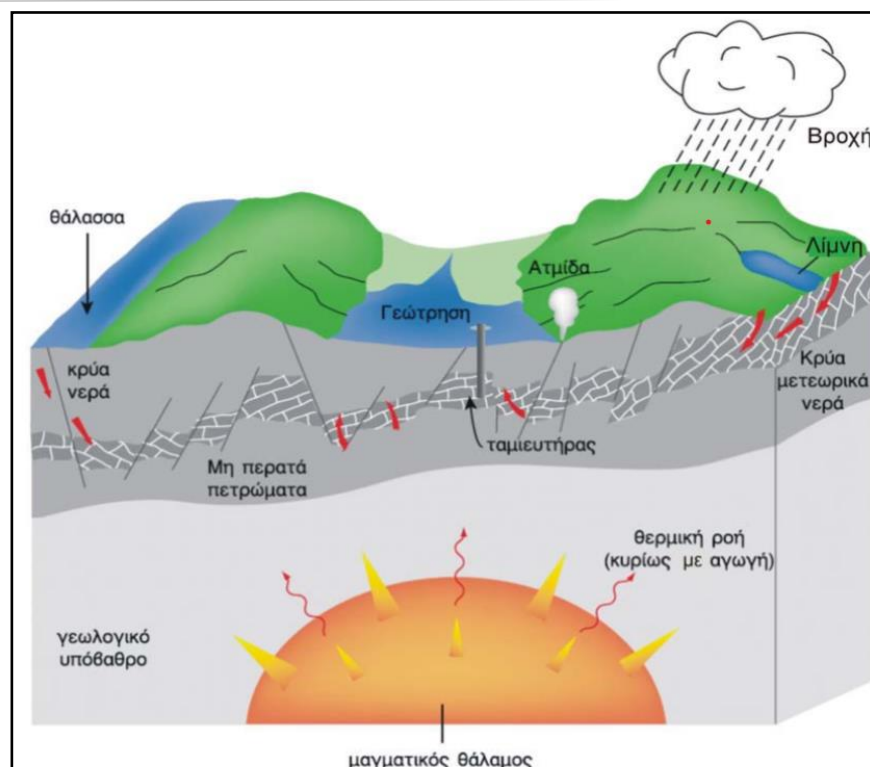
2. Αβαθής γεωθερμία: πρόκειται για συστήματα με σχετικά μικρό βάθος, έως και 100 m από την επιφάνεια της γης, από τα οποία λαμβάνεται ή και απορρίπτεται θερμότητα με την ανακυκλοφορία νερού οποιασδήποτε φυσικής προέλευσης (φυσικά υπόγεια, λίμνες, θάλασσα κ.λπ.). Η αβαθής γεωθερμία χρησιμοποιείται ευρέως για τη θέρμανση-ψύξη εσωτερικών χώρων αλλά και για τη παραγωγή ζεστού νερού χρήσης μέσω των αντλιών θερμότητας. Αυτή τη στιγμή, η αβαθής γεωθερμία είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή της γεωθερμικής ενέργειας.
3. Προχωρημένα γεωθερμικά συστήματα: αποτελούνται από θερμά πετρώματα σε βάθος 2 km έως 10 km, από τα οποία ανακτάται ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων και στη συνέχεια επιστρέφει πολύ θερμότερο σε υγρή ή και αέρια μορφή μέσω άλλων κατάλληλων γεωτρήσεων.
4. Γεωπεπισμένα συστήματα: αποτελούνται από ρευστά με πίεση μεγαλύτερης της υδροστατικής, εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος και περιορισμένα από αδιαπερατά πετρώματα.
5. Μαγματικά συστήματα: στα οποία πραγματοποιείται απόληψη θερμότητας, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων σε μαγματικές διεισδύσεις μικρού σχετικά βάθους (Zarroyk & Mclean, 2019, pp. 21-36).

1.3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

Γεωθερμικά πεδία είναι περιοχές στις οποίες οι συνθήκες για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ευνοϊκές και παρουσιάζουν τα παρακάτω γεωλογικά χαρακτηριστικά (Κατσιφαράκης, 2015) :

- i.* Αυξημένη θερμική ροή, διότι συνδέεται με την ύπαρξη μαγματικού όγκου σε μικρό σχετικά βάθος.
- ii.* Ύπαρξη υπόγειου υδροφορέα σε βάθος μικρότερο των 3 km, του οποίου το νερό θερμαίνεται από τον μαγματικό όγκο. Μεταξύ του υδροφορέα και της πηγής θερμότητας πρέπει να υπάρχουν θερμοπερατά στρώματα ή ρήγματα, έτσι ώστε να διευκολύνουν την κυκλοφορία των ρευστών.
- iii.* Ύπαρξη πρακτικά αδιαπερατού στρώματος, θερμικά και υδραυλικά, πάνω από τον υδροφορέα με σκοπό την προστασία του θερμικού περιεχομένου του.
- iv.* Έκταση τουλάχιστον 2 km², για να έχουν οικονομική σημασία.

Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται το μοντέλο δημιουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου, που παρέχει ατμό και τα κύρια χαρακτηριστικά του γνωρίζονται από πάνω προς τα κάτω είναι: **α)** η περιοχή επαναφόρτισης, **β)** το αδιαπερατό κάλυμμα, **γ)** ο ταμειυτήρας γεωθερμικών ρευστών και **δ)** η πηγή ενέργειας.



Εικόνα 1.1: Μοντέλο δημιουργίας γεωθερμικού πεδίου

Πηγή: Μαμάσης, 2018

Το οικονομικό ενδιαφέρον των γεωθερμικών πεδίων, εξαρτάται και από την βιώσιμη διαχείριση της ανανεώσιμης ενεργειακής πηγής. Δηλαδή, από τη μέγιστη παροχή γεωθερμικού ρευστού που μπορεί να αντληθεί, χωρίς την εξάντληση του νερού του υδροφορέα και χωρίς σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του. Η παροχή αυτή εξαρτάται από τον όγκο και τη διαπερατότητα του υδροφόρου στρώματος, από την τροφοδοσία του σε νερό και τη διαδικασία θέρμανσης του (Κατσιφαράκης, 2015).

1.3.1 Ταξινόμηση γεωθερμικών πεδίων

Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται, όπως και οι γεωθερμικές πηγές, σε υψηλής, μέσης, χαμηλής και πολύ χαμηλής ενθαλπίας. Τα πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι πολύ πιο αποδοτικά τόσο από οικονομικής, όσο και τεχνικής άποψης, ωστόσο, τα χαμηλής ενθαλπίας είναι πολύ περισσότερα σε αριθμό (Κατσιφαράκης, 2015).

Αντίστοιχα, βάσει των ιδιοτήτων του παρεχόμενου ρευστού τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες (Καλδέλλης, 1994, pp. 3-4) :

Α. Πεδίο ζεστού νερού

Ο ταμιευτήρας του πεδίου περιέχει νερό θερμοκρασίας 60 °C έως 100 °C και η γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται από 30 °C/km έως 60 °C/km.

Για να είναι οικονομικά ενδιαφέρον ένα τέτοιο πεδίο θα πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- i. Μεγάλο ταμιευτήρα νερού θερμοκρασίας άνω των 60 °C και βάθος μικρότερο των 2 km.
- ii. Πυκνότητα ροής θερμότητας τουλάχιστον 50% μεγαλύτερη της κανονικής.
- iii. Πολύ μεγάλη παροχή νερού ανά γεώτρηση.

Αυτά τα γεωθερμικά πεδία χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση χώρων, γεωργικούς και βιομηχανικούς σκοπούς.

B. Πεδίο υγρού ατμού

Ο ταμιευτήρας του πεδίου αυτού περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και θερμοκρασίας άνω των 100 °C. Κατά την άνοδο του νερού στο πηγάδι, μειώνεται η πίεση του και ένα μέρος από αυτό εξατμίζεται. Με τον τρόπο αυτό, στην έξοδο επιτυγχάνεται μείγμα νερού και υγρού κορεσμένου ατμού.

Αυτά τα πεδία παρουσιάζουν ενεργειακό ενδιαφέρον και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ισχύος.

C. Πεδίο ξηρού ατμού

Τα πεδία αυτά στην έξοδο τους δίνουν ξηρό ατμό, κεκορεσμένο, ή υπέρθερμο και πίεση υψηλότερη της ατμοσφαιρικής. Αυτά τα πεδία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισχύος.

1.4 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το κύριο γεωθερμικό ρευστό είναι το νερό, είτε σε υγρή είτε σε αέρια κατάσταση. Όμως το γεωθερμικό ρευστό, περιέχει και άλλα στερεά ή και αέρια συστατικά τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και δυσχεραίνουν τη θερμική εκμετάλλευση.

Το γεωθερμικό ρευστό μπορεί να προέρχεται από (Κατσιφάρακης, 2015) :

A) Μετεωρικό νερό: νερό που πρόσφατα συμμετείχε στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία και κατέιδυσε μέχρι το θερμό υδροφορέα.

B) Ωκεάνιο νερό: που είσδυσε στο φλοιό της γης στις περιοχές ωκεάνιας απομάκρυνσης.

Γ) Νέο νερό: που προέρχεται από το μάγμα και δεν συμμετείχε προηγουμένως στην υδρόσφαιρα.

Δ) Συγγενές νερό: απολιθωμένο νερό, που εμπεριέχεται σε ιζήματα από τον χρόνο εναπόθεσης του.

Ε) Μαγματικό νερό: νερό άλλων κατηγοριών, που σε κάποια φάση αποτέλεσε μέρος τους μάγματος.

ΣΤ) Μεταμορφικό νερό: που προκύπτει από την ανακρυστάλλωση υδρομεταλλικών ενώσεων κατά τη διαδικασία της μεταμόρφωσης.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση των σταθερών ισotόπων του υδρογόνου και του οξυγόνου, το γεωθερμικό νερό έχει κυρίως μετεωρική προέλευση. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύθηκε με πειράματα, που αφορούν στη σύσταση του γεωθερμικού ρευστού.

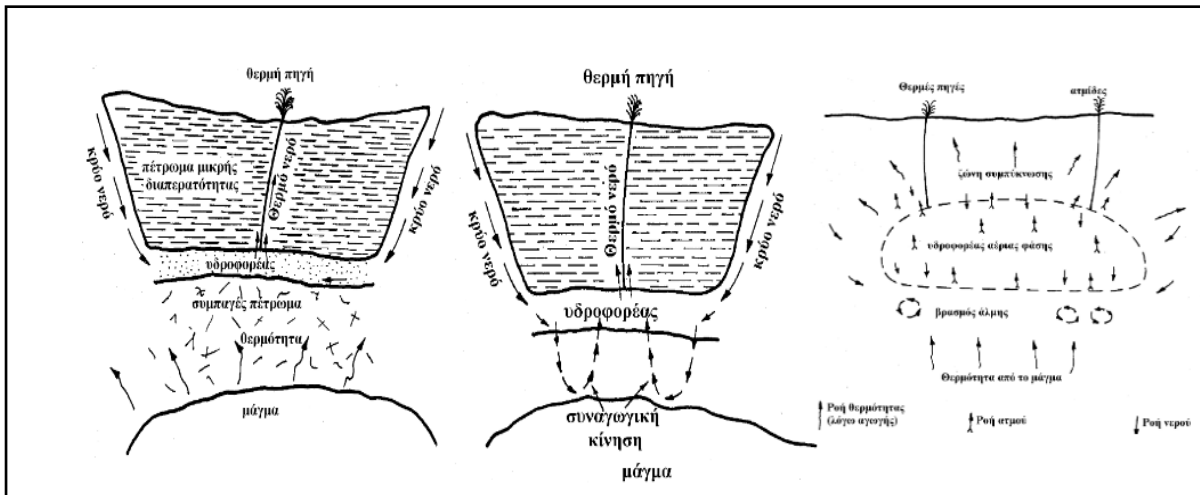
Το ωκεάνιο νερό αποτελεί την κύρια πηγή των υποθαλάσσιων γεωθερμικών συστημάτων, που βρίσκονται κοντά σε ωκεάνιες ράχες, αλλά και ορισμένων γεωθερμικών πεδίων, που βρίσκονται στην ξηρά. Τα ρευστά των πεδίων αυτών διακρίνονται από την μεγάλη περιεκτικότητά τους σε μέταλλα, που είναι αποτέλεσμα της μεγάλης οξύτητάς τους (Κατσιφαράκης, 2015).

1.4.1 Διαδικασία θέρμανσης γεωθερμικών ρευστών

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.2, το γεωθερμικό ρευστό έχει συνήθως μετεωρική προέλευση, προέρχεται δηλαδή από κατακρημνίσεις. Η θέρμανση του κρύου νερού των επιφανειακών στρωμάτων, που κατεισδύει και συγκεντρώνεται τελικά στο γεωθερμικό υδροφορέα, ακολουθεί μια από τις τρεις διαδικασίες (Κατσιφαράκης, 2015):

- i.* Το νερό κατεισδύει μέσα από ρηγματώσεις, μέχρι το γεωθερμικό υδροφορέα όπου και θερμαίνεται με αγωγή. Πηγή θερμότητας είναι κάποιος μαγματικός όγκος, που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, ή η γενική θερμική ροή της γης. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε γεωθερμικά συστήματα με σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, που κατά κανόνα δεν ξεπερνά τους 150 °C στα προσιτά για τον άνθρωπο βάθη.
- ii.* Το νερό του γεωθερμικού υδροφορέα κατεισδύει σε μεγαλύτερο βάθος μέσα από σχισμές και ρήγματα, και πλησιάζει τον μαγματικό όγκο, ο οποίος αποτελεί την πηγή της θερμότητας. Κατά την κίνησή του αυτή το νερό θερμαίνεται (με αγωγή από τα πετρώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή) και ανεβαίνει πάλι στο γεωθερμικό υδροφορέα μέσα από άλλα ρήγματα, λόγω άνωσης.
- iii.* Το μετεωρικό νερό κατεισδύει σε μεγάλο βάθος, θερμαίνεται συναγωγικά από κάποιο μαγματικό όγκο και βράζει. Ο υδρατμός που δημιουργείται, τροφοδοτεί τον υδροφορέα του γεωθερμικού πεδίου, που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος. Οι απώλειες λόγω αγωγής από τα τοιχώματα του υδροφορέα αυτού, ισοσταθμίζονται από τη συμπύκνωση μέρους του ατμού. Το συμπύκνωμα επιστρέφει στο βαθύτερο στρώμα (στο οποίο συμβαίνει ο βρασμός) ακολουθώντας τους μικρότερους πόρους, αντίθετα με τον ατμό, που κατά την άνοδό του προς το γεωθερμικό υδροφορέα ακολουθεί τις ευρύτερες διόδους.

Στην Εικόνα 1.2 φαίνονται οι παραπάνω μηχανισμοί θέρμανσης του γεωθερμικού ρευστού από τα αριστερά προς τα δεξιά : *i)* μέσω αγωγής, *ii)* μέσω συναγωγής, *iii)* με γεωθερμικό υδροφορέα στον οποίο κυριαρχεί η αέρια φάση.



Εικόνα 1.2: Μηχανισμοί θέρμανσης γεωθερμικού ρευστού

Πηγή: Κατσιφάρακης, 2015

1.4.2 Συστήματα παραγωγής και διάθεσης του γεωθερμικού ρευστού

Για την παραγωγή του γεωθερμικού ρευστού και τη διάθεση του μετά τη χρήση του, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω συστήματα:

A) Σύστημα με ένα πηγάδι άντλησης: Το γεωθερμικό ρευστό μετά τη χρησιμοποίηση του διοχετεύεται στο επιφανειακό δίκτυο απορροής. Η λύση αυτή έχει μικρό αρχικό κόστος αλλά δημιουργεί τους ακόλουθους κινδύνους:

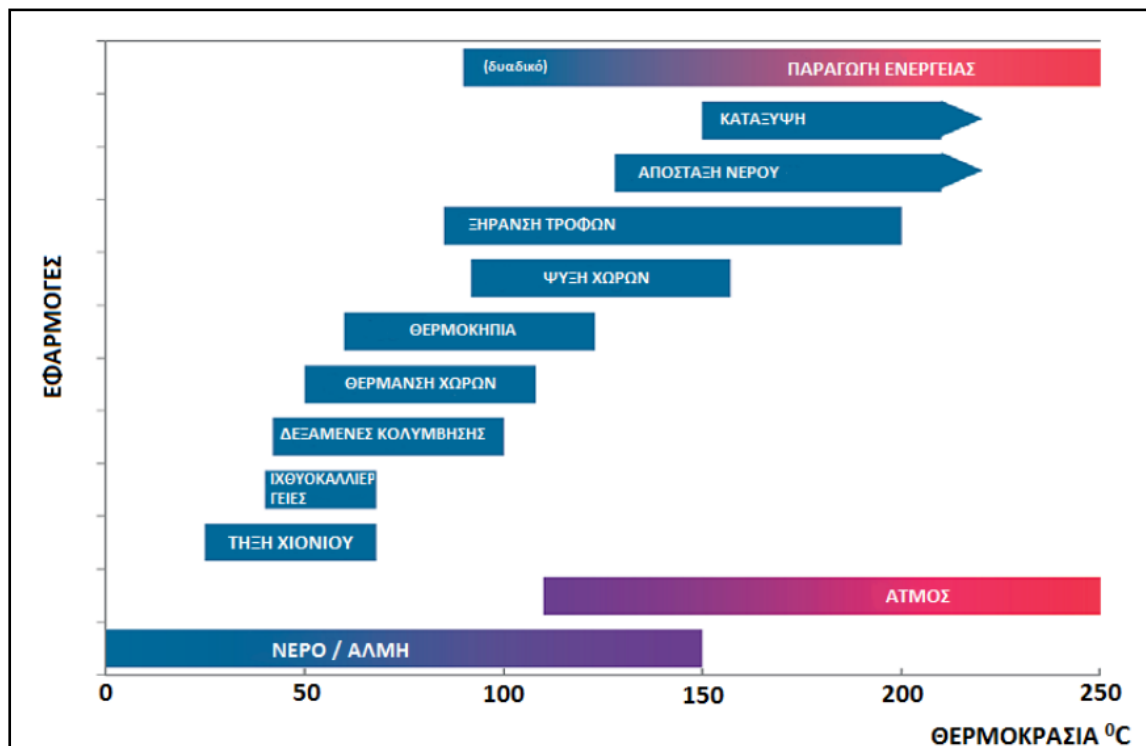
- i. Εξάντληση του υδροφορέα
- ii. Καθίζηση του εδάφους
- iii. Αλλοίωση της ποιότητας των επιφανειακών νερών από τυχόν άλατα, υδρόθειο ή και άλλα συστατικά που πιθανόν να υπάρχουν στο γεωθερμικό ρευστό.

Συνεπώς, η δυνατότητα εφαρμογής αυτού του συστήματος εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα του αντλούμενου ρευστού.

B) Συστήματα με πηγάδι άντλησης και πηγάδι επαναεισαγωγής: Το γεωθερμικό ρευστό μετά τη χρήση του για κλιματισμό (κυρίως) επαναφέρεται στον υδροφορέα. Με τη χρήση αυτού του συστήματος αποτρέπονται οι κίνδυνοι που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο σύστημα. Επιπλέον, το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται σχεδόν στο 100% τη περιεχόμενη θερμότητα του πεδίου, μέσω της επαναχρησιμοποίησης. Ωστόσο, πέραν από το αυξημένο αρχικό κόστος, υπάρχει κίνδυνος μείωσης της θερμικής ισχύς της πηγής, λόγω της ύπαρξης ψυχρού μετώπου κοντά σε αυτή (Κατσιφάρακης, 1986, pp. 14-16).

1.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Τα γεωθερμικά ρευστά χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (σύνθεση, θερμοκρασία, πίεση, ενθαλπία κ.λπ.) σε μεγάλο εύρος χρήσεων, όπως παραγωγή ισχύος, θέρμανση-ψύξη κτηρίων, βιομηχανικές και αγροτικές χρήσεις. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι δυνατικές εφαρμογές για διάφορες θερμοκρασίες των γεωθερμικών ρευστών, μέσω του διαγράμματος Lindal.



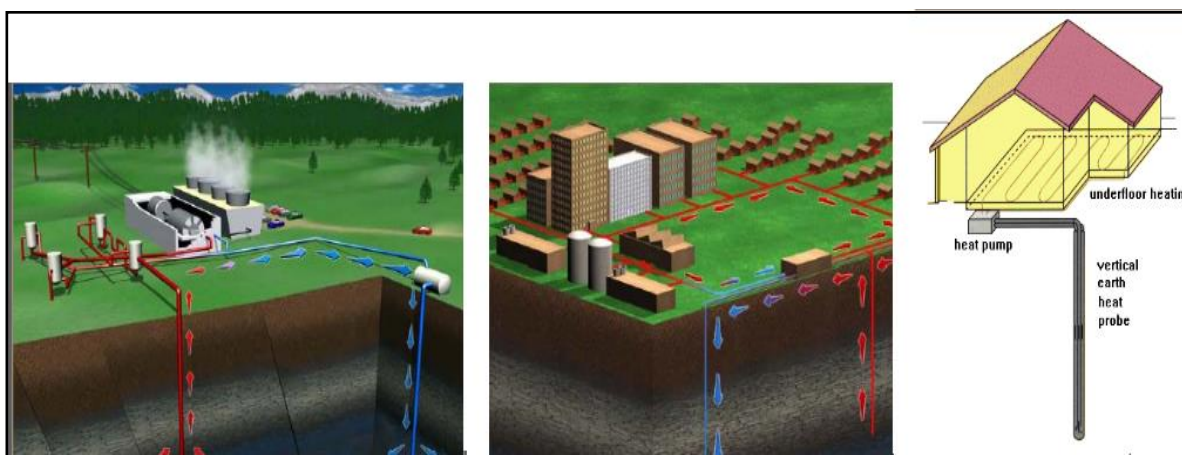
Σχήμα 1.1: Διάγραμμα lindal

Πηγή: Gehringer & Loksha, 2012, p. 37

Γενικότερα, οι κατηγορίες γεωθερμικών χρήσεων είναι τρεις:

- i.* Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος
- ii.* Άμεσες χρήσεις
- iii.* Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (αβαθής/κανονική γεωθερμία)

Στην Εικόνα 1.3 φαίνονται οι τρεις παραπάνω γεωθερμικές χρήσεις από τα αριστερά προς τα δεξιά: *i)* Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, *ii)* Άμεσες χρήσεις, *iii)* Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Ανδρίτσος, p. 5).



Εικόνα 1.3: Γεωθερμικές χρήσεις

Πέραν όμως των χαρακτηριστικών της πηγής, το είδος των χρήσεων της γεωθερμικής πηγής εξαρτάται και από τους παρακάτω παράγοντες (Καλδέλλης, 1994, pp. 21-22) :

1) Ευρύτερος γεωγραφικός χώρος του γεωθερμικού πεδίου

Η θέση της γεωθερμικής μονάδας είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις ενεργειακές ανάγκες αλλά και τις δυνατότητες της περιοχής. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ενεργειακές απαιτήσεις των περιοχών που πρόκειται να εγκατασταθεί η μονάδα είναι μικρότερες από την ικανότητα παραγωγής αυτής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα μικρά νησιά του Αιγαίου. Βέβαια, ο παράγοντας αυτός δεν είναι περιοριστικός διότι η περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας μπορεί να μεταφερθεί, να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση ή και για αφαλάτωση αυξάνοντας όμως αρκετά το αρχικό κόστος.

2) Ευκολία μεταφοράς της ενέργειας και των παραγόμενων προϊόντων από την αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου

Γενικότερα, η καλύτερη μορφή μεταφοράς ενέργειας, είναι αναμφισβήτητα η ηλεκτρική ενέργεια. Εάν το γεωθερμικό πεδίο βρίσκεται κοντά στο διασυνδεδεμένο εθνικό δίκτυο, το κόστος μεταφοράς μειώνεται σημαντικά.

Αντιθέτως, η μεταφορά του γεωθερμικού ρευστού σε μεγάλες αποστάσεις με σκοπό την αξιοποίηση της θερμότητας του για τη θέρμανση χώρων θεωρείται αντιοικονομική.

3) Οικονομικοί παράγοντες

Η αξία των απαιτούμενων εγκαταστάσεων για ορισμένη χρήση καθώς και το κόστος της μονάδας του παραγόμενου προϊόντος, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες του τρόπου χρησιμοποίησης μιας γεωθερμικής πηγής.

Η συνεχώς αυξανόμενη τιμή των συμβατικών καυσίμων και ειδικότερα του πετρελαίου έχει ως αποτέλεσμα, η αξιοποίηση γεωθερμικών πηγών χαμηλής ενθαλπίας να γίνεται ολοένα και πιο ανταγωνιστική τα τελευταία χρόνια.

1.5.1 Χρήση της γεωθερμίας για την παραγωγή ισχύος

Η βασικότερη και σημαντικότερη χρησιμοποίηση του γεωθερμικού ρευστού είναι η ηλεκτροπαραγωγή. Βασικό κριτήριο για την εν λόγω χρήση αποτελεί η ενθαλπία του γεωθερμικού ρευστού. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί είτε με αεροστροβίλους υγρού ατμού, είτε από μηχανές ηλεκτροπαραγωγής δυαδικού κύκλου (Rankine) οργανικής ουσίας ή αμμωνίας που θερμαίνονται με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας τουλάχιστον 80 °C. Το ζεστό νερό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για άλλες συμπληρωματικές χρήσεις, στα πλαίσια λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής. (Καλδέλλης, 1994, pp. 24-25) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 18)

Όσον αφορά τους συνηθέστερους τρόπους αξιοποίησης των διαθέσιμων γεωθερμικών ρευστών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των παρακάτω εναλλακτικών λύσεων (Καλδέλλης & Καββαδίας, 2001, pp. 354-356) :

I. Απευθείας εκτόνωση στο περιβάλλον

Με τη μέθοδο αυτή το γεωθερμικό ρευστό αποτονώνεται στο στρόβιλο και ακολούθως αποβάλλεται απευθείας στο περιβάλλον με πίεση 1 bar και θερμοκρασία 100 °C.

Σε περιπτώσεις μακροχρόνιας αξιοποίησης σημαντικών γεωθερμικών αποθεμάτων, η εν λόγω μέθοδος δεν αποτελεί καλή τεχνικοοικονομική επιλογή, δεδομένου ότι σημαντικό μέρος της ενθαλπίας του γεωθερμικού ρευστού, παραμένει ανεκμετάλλευτο. Αντιθέτως, η μέθοδος είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις μονάδων συμπαραγωγής, για την αξιοποίηση της ενθαλπίας στην έξοδο της μονάδος ισχύος, με σκοπό την κάλυψη θερμικών φορτίων.

II. Απευθείας εκτόνωση σε ψυγείο κενού

Με τη μέθοδο αυτή το γεωθερμικό ρευστό αποτονώνεται σε ειδικό ατμοστρόβιλο, η έξοδος του οποίου καταλήγει σε ψυγείο κενού.

Αξίζει να σημειωθεί πως όταν το διαθέσιμο γεωθερμικό ρευστό έχει χαμηλή πίεση και θερμοκρασία, το τμήμα της αποτόνωσης κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση αντιστοιχεί σε μηχανικό έργο, ίσο ή και μεγαλύτερο από αυτό που αποδίδεται στο τμήμα της αποτόνωσης μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό σημαίνει πως η μέθοδος αυτή δίνει υψηλότερο βαθμό εκμετάλλευσης της διαθέσιμης ενθαλπίας του γεωθερμικού ρευστού. Επιπλέον, είναι η μοναδική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το γεωθερμικό ρευστό είναι ατμός χαμηλής πίεσης. Από οικονομικής άποψης, η εν λόγω μέθοδος έχει σημαντικά αυξημένο αρχικό κόστος εγκατάστασης, λόγω ύπαρξης του ψυκτικού κυκλώματος.

III. Έμμεσο σύστημα αξιοποίησης με ή χωρίς ψυγείο

Με τη μέθοδο αυτή το γεωθερμικό ρευστό δεν εκτονώνεται απευθείας στο στρόβιλο, αλλά παρέχει τη θερμότητά του σε άλλο ενδιάμεσο ρευστό, το οποίο θερμαίνει ο πρωτογενής ατμός του γεωθερμικού πεδίου, μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το γεωθερμικό ρευστό είναι επιβαρυνμένο με πολλούς ρυπαντές, που προκαλούν διαβρώσεις, διότι δεν κρίνεται οικονομοτεχνικά συμφέρουσα η κατασκευή στρόβιλων με μέταλλα υψηλής αντοχής σε διαβρώσεις. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε εργοστάσια παραγωγής χημικών προϊόντων. Τέλος, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για παραγωγή ισχύος από γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής από διαθέσιμη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας.

Η μέθοδος αυτή, πέραν του αυξημένου αρχικού κόστους εγκατάστασης, λόγω της ύπαρξης του εναλλάκτη παρουσιάζει και μεγάλες ενεργειακές απώλειες.

1.5.2 Άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας

Οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, δηλαδή ή εκμετάλλευση της χωρίς να παραχθεί ενδιάμεσα ηλεκτρική ενέργεια, κατατάσσονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες (Ανδρίτσος, 2012, p. 6) :

- ✓ Θέρμανση χώρων (τηλεθέρμανση και τηλεκλιματισμός)
- ✓ Αγροτικές χρήσεις
- ✓ Υδατοκαλλιέργειες

- ✓ Βιομηχανικές χρήσεις
- ✓ Λουτροθεραπεία

❖ Γεωθερμική τηλεθέρμανση και τηλεκλιματισμός

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας έως σήμερα. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο αποτελεί περίπου το 50% της συνολικής άμεσης γεωθερμικής χρήσης (Παπαχρήστου, et al., 2018, p. 464).

Εγκατάσταση τηλεθέρμανσης χαρακτηρίζεται η εγκατάσταση που σκοπό έχει να τροφοδοτήσει με θερμότητα σύνολο καταναλώσεων, μέσω ενός δικτύου μεταφοράς και διανομής από μια ή και περισσότερες εγκαταστάσεις παραγωγής θερμότητας. Εφαρμόζεται σε σύνολα κτηρίων και διαφέρει από την κλασική μέθοδο παραγωγής και κατανάλωσης θερμότητας (π.χ. λέβητας πετρελαίου), διότι η εγκατάσταση παραγωγής δεν βρίσκεται στον τόπο κατανάλωσης. Για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου απαιτείται τόσο γεώτρηση παραγωγής, όσο και γεώτρηση επανεισαγωγής των αντλούμενων από το υπέδαφος ρευστών.

Τέτοιες εγκαταστάσεις είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών σε κλιματισμό και ζεστό νερό χρήσης, ακόμα και σε ολόκληρους οικισμούς, ενώ χρησιμοποιούνται και για γεωργική και βιομηχανική χρήση. Οι απαιτούμενες θερμοκρασίες στα συστήματα αυτά είναι από 50 °C έως και 80 °C (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 19-20).

❖ Αγροτικές χρήσεις

Οι βασικότερες αγροτικές χρήσεις του γεωθερμικού ρευστού είναι τα θερμοκήπια, για τη θέρμανση του εδάφους, την καλλιέργεια ψαριών και την εκτροφή ζώων.

Η θέρμανση των θερμοκηπίων γίνεται συνήθως με ακτινοβολία, από αγωγούς μέσα στους οποίους κυκλοφορεί γεωθερμικό ρευστό 80 °C-100 °C. Στα θερμοκήπια αυτά καλλιεργούνται κυρίως λαχανικά και λουλούδια.

Σε περιπτώσεις ιχθυοκαλλιέργειας, η επιθυμητή θερμοκρασία στη λίμνη εκτροφής (12-32 °C) επιτυγχάνεται συνήθως με την απευθείας ροή ζεστού νερού μέσα στη λίμνη.

Τέλος, η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται ενδεικτικά στην εκτροφή ζώων, για τη θέρμανση χώρων σταύλωσης, για την επώαση αυγών, επεξεργασία γάλακτος, πλούσιμο και ξήρανση μαλλιών κ.λπ. (Καλδέλλης, 1994, pp. 32-33).

❖ Βιομηχανικές χρήσεις

Η γεωθερμία σιμοποιείται σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, είτε με τη μορφή ατμού, είτε με τη μορφή ζεστού νερού. Δεδομένου βέβαια του περιορισμού που επιβάλλει η δυσκολία της μεταφοράς του γεωθερμικού ρευστού σε μεγάλες αποστάσεις, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη βιομηχανικών δραστηριοτήτων κοντά στη γεωθερμική πηγή.

Η χρήση του ατμού στη βιομηχανία είναι ενδιαφέρουσα σε μικρές γεωθερμικές πηγές που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντιθέτως, η

χρήση του νερού είναι ελκυστική είτε πρωτογενώς είτε κυρίως ως υποπροϊόν μετά την αποτόνωση του ατμού στο στρόβιλο, μέσα από διαδικασία συμπαραγωγής.

Οι γενικές βιομηχανικές δραστηριότητες στις οποίες χρησιμοποιείται η γεωθερμική ενέργεια, περιλαμβάνουν ενδεικτικά: την απόσταξη, τη θέρμανση και ψύξη αγαθών, τη βαφή, την ανόπτηση, τη παραγωγή ατμού, τη ξήρανση, την παραγωγή γλυκού νερού, την παραγωγή φαρμάκων και χημικών προϊόντων. Επιπλέον, υπό ορισμένες συνθήκες η γεωθερμία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη βιομηχανία παραγωγής, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η παραγωγή μαγειρικού αλατιού στην Ιαπωνία και βορικού οξέος στην Ιταλία (Καλδέλλης, 1994, pp. 30-31).

1.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Η γεωθερμία, αν και κατατάσσεται στις ανανεώσιμες και ήπιες μορφές ενέργειας, δεν είναι ούτε ανανεώσιμη ούτε καθαρή μορφή ενέργειας με την κλασική έννοια των όρων. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως στον τομέα ηλεκτροπαραγωγής, η γεωθερμία παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερο ετήσιο συντελεστής λειτουργίας (92%-98%) σε σχέση με άλλες εφαρμογές εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα αιολικά πάρκα (25%-30%) και τα υδροηλεκτρικά με συντελεστή (40-55 %) (Καλδέλλης, 1994, p. 22) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 17).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συνδέονται με την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

1.6.1 Πλεονεκτήματα

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας επιφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Ωστόσο, σημαντική προϋπόθεση για αυτά είναι να ληφθεί η κατάλληλη μέριμνα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερεκμετάλλευση του γεωθερμικού ρευστού, η εκπομπή ανεπιθύμητων αερίων καθώς και η λανθασμένη διαχείριση του αλμολοίπου. Εξάλλου, μόνον τότε η γεωθερμία είναι μια ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

❖ Περιβαλλοντικά οφέλη

Τα συστήματα αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας, τόσο για ηλεκτροπαραγωγή, όσο και για θέρμανση, έχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, αφού επιτυγχάνεται αποφυγή έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων που εκλύονται από την καύση συμβατικών καυσίμων.

Επιπλέον, οι ΓΑΘ, καταναλώνουν τουλάχιστον 30% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με τα αερόψυκτα συστήματα με αντίστοιχη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Τέλος, η αντίστοιχη μείωση εκπομπών από ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης (πετρέλαιο θέρμανσης ή φυσικό αέριο) ανέρχεται σε 30% περίπου.

❖ Οικονομικά οφέλη

Τόσο η θερμότητα όσο και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από γεωθερμική πηγή ανταγωνίζεται επιτυχώς τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ηλεκτροπαραγωγής.

Μάλιστα, η παραγόμενη θερμότητα από γεωθερμικά συστήματα είναι σημαντικά φθηνότερη από τα συμβατικά ακόμη και αν η συμβατική μονάδα χρησιμοποιεί φυσικό αέριο.

Επιπλέον, λόγω της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους σε μερικά μέτρα βάθος, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς εδάφους και εσωτερικών χώρων, τα γεωθερμικά συστήματα εξασφαλίζουν συνεχή και σταθερή παροχή ενέργειας με μικρό λειτουργικό κόστος, σχεδόν 30% μικρότερο από τα αερόψυκτα συστήματα. Τέλος, το κόστος συντήρησης των γεωθερμικών συστημάτων, ανέρχεται στο 1/3 εκείνου των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης-ψύξης, ενώ έχουν και σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (περίπου 30 χρόνια).

❖ Κοινωνικά οφέλη

Στα κοινωνικά οφέλη από τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, περιλαμβάνονται η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και η ανάπτυξη σε τοπικό επίπεδο για την εγκατάσταση των γεωθερμικών μονάδων, δεδομένου ότι δεν είναι εύκολη η μεταφορά του γεωθερμικού ρευστού σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, μειώνεται η εξάρτηση της κοινωνίας από εισαγόμενα καύσιμα και ενέργεια, απελευθερώνοντας έτσι ιδιωτικά κεφάλαια, που μπορούν να διατεθούν για επενδύσεις και βελτίωση της ανταγωνιστικότητας, παράγοντες που έμμεσα μειώνουν τα ποσοστά ανεργίας και επιφέρουν οικονομική ανάπτυξη (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 21).

1.6.2 Προβλήματα

Η ανάπτυξη συστημάτων αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας εγκυμονεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γενικότερα, οι επιπτώσεις είναι λιγότερες όταν πρόκειται για γεωθερμικές πηγές χαμηλής ενθαλπίας, σε σχέση με της πηγές υψηλής ενθαλπίας.

Σχετικά με τα συστήματα εκμετάλλευσης γεωθερμικών πηγών χαμηλής ενθαλπίας, ανάλογα με την ποιότητα του ρευστού, μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα όπως: αποθέσεις αλάτων και ανθρακικού ασβεστίου, διάβρωση, διάθεση των απορριπτόμενων ρευστών (αλμόλοιπος) είτε με επανεισαγωγή σε γεωτρήσεις είτε με διάθεση στη θάλασσα, παρουσία μικρών ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στο γεωθερμικό ρευστό.

Όσον αφορά στα συστήματα εκμετάλλευσης γεωθερμικών πηγών υψηλής ενθαλπίας, μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα που οφείλονται στην παρουσία διαλυμένων στερεών ή πολύ μικρών ποσοτήτων υδρόθειου στον ατμό, το οποίο του προσδίδει χαρακτηριστική οσμή θειαφίου (Καλδέλλης, 1994, p. 24) (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 21-22).

Στον Πίνακα 1.2 φαίνεται η πιθανότητα και η σοβαρότητα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή και λειτουργία μιας εγκατάστασης άμεσης χρήσης γεωθερμίας. Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο το περιβάλλον, όμως με σοβαρότερες και σημαντικότερες επιπτώσεις (Lunis & Breckenridge, 1991, pp. 437-441).

Πίνακας 1.2: Πιθανότητα εμφάνισης και σοβαρότητα περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την άμεση γεωθερμική χρήση

Πηγή: Lunis & Breckenridge, 1991

Επίδραση	Πιθανότητα ύπαρξης	Συνέπειες
Ρύπανση αέρα	L	M
Ρύπανση επιφάνειας νερού	M	M
Υπόγεια ρύπανση	L	M
Κατακάθιση γης	L	L to M
Ηχορύπανση	H	L to M
Ρύπανση από τα αέρια	L	L to M
Διαβρωση αρχαιολογικών χαρακτηριστικών	L to M	M to H
Κοινωνικο-οικονομικά προβλήματα	L	L
Χημική ή Θερμική ρύπανση	L	M to H
Συμπαγή απόβλητα	M	M to H

L = Χαμηλή; M = Μεσαία; H= Υψηλή

Παρόλ'αυτά, ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα εκμετάλλευσης γεωθερμικής ενέργειας δεν δημιουργεί σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ οι τυχόν ελάσσονος σημασίας επιπτώσεις είναι απόλυτα ελεγχόμενες με τη διαθέσιμη τεχνολογία δέσμευσης των βλαβερών ουσιών και σαφώς μικρότερες από τις επιπτώσεις που θα επέβαλλε η λειτουργία ενός αντίστοιχου μεγέθους συμβατικού σταθμού παραγωγής ενέργειας (Καλδέλλης, 1994, p. 11).

❖ Γεωθερμία και σεισμολογία

Στην αξιοποίηση γεωθερμίας υψηλής ενθαλπίας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος έχουν αποδοθεί με αναμφισβήτητα στοιχεία, πολλές προκλήσεις σεισμικής δραστηριότητας. Οι σεισμοί αυτοί προέρχονται από την ανθρώπινη παρέμβαση και ονομάζονται τεχνητοί, χωρίς όμως να έχουν καμία απολύτως διαφορά με τους σεισμούς που προκαλούνται από φυσικά αίτια. Οι τεχνητοί σεισμοί λόγω αξιοποίησης των γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας κατά βάση είναι μικρής έντασης και αναμενόμενοι. Ωστόσο, υπάρχουν και παραδείγματα σεισμών που έχουν γίνει ιδιαίτερα αισθητοί, όπως αυτός στην Ελβετία στη περιοχή της Βασιλείας το 2006, με εστιακό βάθος μόλις 5 km από την επιφάνεια της γης.

Οι ειδικοί έως τώρα δεν έχουν προτείνει λύση για την αξιοποίηση της γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή, χωρίς να προκαλούνται κραδασμοί (ETHzurich, 2016).

2 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι κτηριακές ενεργειακές απαιτήσεις τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε εθνικό επίπεδο, αντιστοιχούν περίπου στο 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Κατά βάση, για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων στα κτίρια χρησιμοποιούνται συμβατικά συστήματα, όπως οι λέβητες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αερόψυκτα συστήματα και αντλίες θερμότητας αέρος-αέρος και αέρος-νερού. Για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων, απαιτείται καύση ορυκτών καυσίμων ή σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω του χαμηλού συντελεστή λειτουργίας τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η λειτουργία των συγκεκριμένων συστημάτων, να επιβαρύνουν το ενεργειακό σύστημα και να συμβάλουν σημαντικά στην παραγωγή αέριων ρύπων.

Δεδομένου ότι το υπέδαφος κάθε τόπου, έχει σχεδόν σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για κάποια μέτρα βάθους χωρίς έντονες διακυμάνσεις, δημιουργείται η δυνατότητα άντλησης ή απορρόφησης μεγάλων ποσών θερμότητας από το υπέδαφος, χωρίς να μεταβάλλονται σημαντικά οι θερμοκρασιακές του συνθήκες.

Τα συστήματα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας για θέρμανση και ψύξη κτηρίων, εκτός των άλλων αποτελούνται από τα εξής κύρια μέρη:

- ❖ γεωθερμική αντλία θερμότητας
- ❖ εναλλάκτες θερμότητας
- ❖ σύστημα διανομής θέρμανσης-ψύξης και ζεστού νερού χρήσης στο εσωτερικό του κτηρίου (εσωτερικό σύστημα).

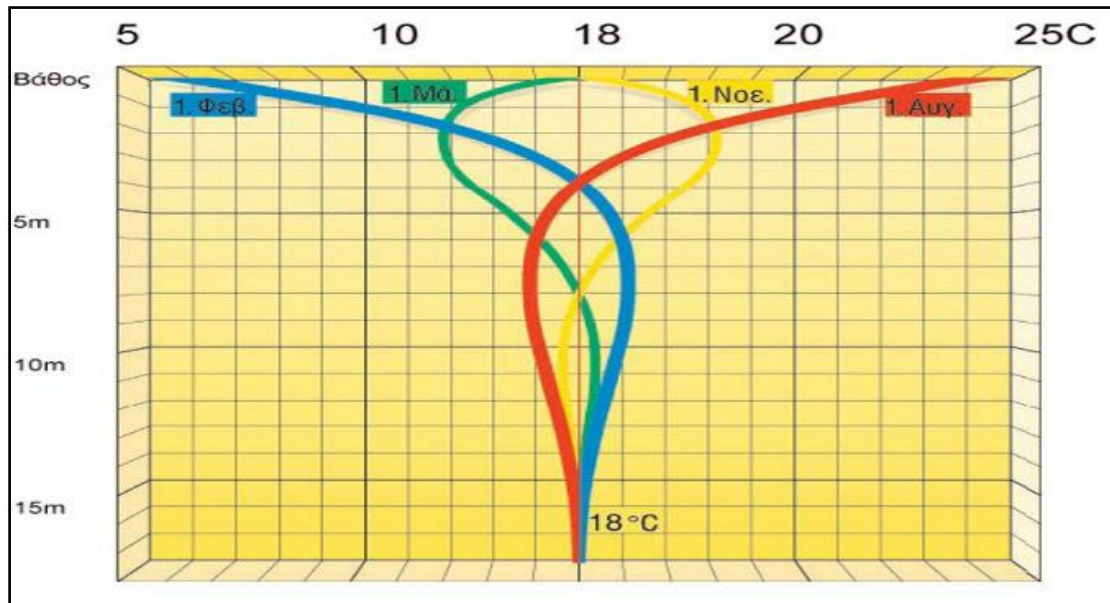
Η αξία των εγκαταστάσεων γεωθερμικών συστημάτων κλιματισμού ορίζεται ακριβώς από το γεγονός, ότι η σταθερότητα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας του εδάφους, συντελεί στη λειτουργία των αντλιών θερμότητας σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 26-27).

2.1 ΑΒΑΘΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Κανονική, ομαλή ή αβαθής γεωθερμική ενέργεια, ορίζεται ως η θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό. Σύμφωνα με το άρθρο 2 της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2009/28ΕΚ η αβαθής γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται κανονικά σε βάθος μέχρι 400 m, πρακτικά όμως τα βάθη σε εγκαταστάσεις αξιοποίησης της κανονικής γεωθερμίας δεν ξεπερνούν συνήθως τα 100 m (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 26).

Με βάση πολυάριθμες μετρήσεις που έχουν γίνει στο υπέδαφος διάφορων σημείων ανά τον κόσμο, έχει διαπιστωθεί ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επηρεάζουν τη θερμοκρασία σε μικρό σχετικά βάθος, περίπου έως και τα 15m όπου το ποσοστό της θερμότητας ηλιακής

προέλευσης είναι μεγάλο. Γενικότερα, οι θερμοκρασίες των πετρωμάτων και των υπόγειων νερών, που αναπτύσσει η γεωθερμική ενέργεια σε βάθη από 0 m έως και 200 m, δεν ξεπερνά τους 25 °C. Μάλιστα, η θερμοκρασία αυτή παραμένει σταθερή σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του έτους. Για την Αθήνα, αυτή η θερμοκρασία είναι περίπου 18 °C όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 (Κατσαπρακάκης, 2015).



Σχήμα 2.1: Μέση θερμοκρασία εδάφους ανάλογα με την εποχή και το βάθος για την περιοχή της Αθήνας

Η αβαθής γεωθερμία, αξιοποιείται με τις αντλίες θερμότητας, οι οποίες αποτελούν σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας και περιορισμού των ρυπογόνων καυσίμων. Τα συστήματα ΓΑΘ κατέχουν αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο ποσοστό στην εγκαταστημένη ισχύ και στη χρήση ενέργειας από όλες τις γεωθερμικές χρήσεις (Κατσαπρακάκης, 2015) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 27).

2.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος αβαθούς γεωθερμίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και γεωλογικοί παράμετροι. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται κυρίως παράμετροι που αφορούν τη διαθέσιμη επιφάνεια της γης, το είδος του εδάφους, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του εδάφους και την ύπαρξη υδροφορέα καθώς και το βάθος κορεσμού του.

Στόχος του σχεδιασμού, σε κάθε περίπτωση, είναι η κατασκευή ενός οικονομικά βιώσιμου συστήματος το οποίο προϋποθέτει το ελάχιστο αρχικό κόστος κατασκευής με την υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης. Σε αυτή την κατεύθυνση, το κόστος δέσμευσης της γης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή του είδους του συστήματος, σε περιοχές όπου η γη εμφανίζει υψηλό κόστος δέσμευσης, είτε η διαθεσιμότητά της είναι περιορισμένη (Μιχόπουλος, et al., 2015, p. 18).

Το είδος και η συνεκτικότητα του εδάφους σε συνδυασμό με τις θερμοφυσικές ιδιότητες αυτού, επιδρούν τόσο στη στατικότητα του γεωεναλλάκτη, όσο και στη δυνατότητα άντλησης ή απόρριψης από και προς αυτό. Στην περίπτωση των ΓΑΘ, είναι επιθυμητό το έδαφος να έχει υψηλή συνεκτικότητα και ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, γιατί έτσι η απαιτούμενη θερμότητα φθάνει ευκολότερα στις γεωτρήσεις και τον εναλλάκτη. Η εκτίμηση της συνεκτικότητας αποτελεί βασικό παράγοντα κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας και πραγματοποιείται είτε μέσω γεωλογικών μελετών είτε από τους γεωλογικούς χάρτες της εξεταζόμενης περιοχής. Ο προσδιορισμός του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους συνιστά επίσης σημαντική παράμετρο της μελέτης. Ο προσδιορισμός της γίνεται βάσει προτύπων (ISO, ASTM) 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 (Μιχόπουλος, et al., 2015, pp. 18-19) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 27).

Επιπλέον, άλλοι γεωλογικοί παράμετροι και θερμικές ιδιότητες εδάφους και πετρωμάτων που λαμβάνονται υπόψιν κατά τη γεωλογική μελέτη του συστήματος, είναι η πραγματική πυκνότητα ή το ειδικό βάρος για κάθε επιμέρους υλικό, η φαινομενική πυκνότητα ή το βάρος ανά μονάδα όγκου, το πορώδες του εδάφους, η υγρασία του εδάφους, η μέση ειδική θερμότητα των επιμέρους υλικών και η μέση ειδική θερμική διαχυτότητα των επιμέρους υλικών (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 27).

Τέλος, η ύπαρξη υδροφορέα με σταθερή και ικανοποιητική παροχή και ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως απαραίτητη και χωρίς διακυμάνσεις θερμοκρασία και κατάλληλη χημική σύνθεση για την αποφυγή διαβρώσεων, σε σχετικά μικρό βάθος στην περιοχή εγκατάστασης του αβαθούς γεωθερμικού συστήματος, αποτελεί βασικό παράγοντα για την τελική επιλογή του συστήματος αξιοποίησης (Μιχόπουλος, et al., 2015, p. 19).

2.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΒΑΘΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Τα συστήματα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας, με σκοπό τον κλιματισμό των κτηρίων, αποτελούνται από 2 βασικά επιμέρους συστήματα, το εξωτερικό το οποίο περιλαμβάνει τους εναλλάκτες θερμότητας και τη ΓΑΘ και το εσωτερικό, το οποίο περιλαμβάνει τους μηχανισμούς διανομής της θέρμανσης και της ψύξης εντός του κτηρίου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του συστήματος γεωθερμικού κλιματισμού αποτελεί ο αυτοματισμός μεταξύ των δύο επιμέρους συστημάτων.

2.3.1 Εναλλάκτες θερμότητας

Ένας εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή, μέσω της οποίας μεταφέρεται θερμότητα μεταξύ, ενός θερμού και ενός ψυχρού ρεύματος ουσίας, συνήθως, ρευστού. Είθισται να κατασκευάζονται από σωλήνες «τρίτης γενιάς» πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας. Έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και μεγάλη διάρκεια ζωής (Νίκας & Παπάζογλου, 2010, p. 307).

Ανάλογα με την πηγή θερμότητας του γεωεναλλάκτη τα γεωθερμικά συστήματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανοιχτού βρόγχου και κλειστού βρόγχου.

1) Γεωθερμικά συστήματα ανοιχτού βρόγχου

Συστήματα ανοιχτού βρόγχου χαρακτηρίζονται τα συστήματα που εκμεταλλεύονται την άντληση υπόγειων ρευστών (κυρίως νερού) και αξιοποιούν τη σταθερή θερμοκρασία των υπεδαφικών ρευστών. Ουσιαστικά, σε αυτά τα συστήματα το νερό χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας προς και από τη ΓΑΘ και στη συνέχεια απορρίπτεται είτε στην πηγή προέλευσης του είτε σε όμορο υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα για περιοχές με μικρό βάθος υδροφόρου ορίζοντα (Μιχόπουλος, et al., 2015, p. 6) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 34).

Ανάλογα με το είδος της κατασκευής, τα συστήματα ανοικτού βρόγχου διακρίνονται σε επιφανειακά, τύπου φρέατος και μικτά συστήματα.

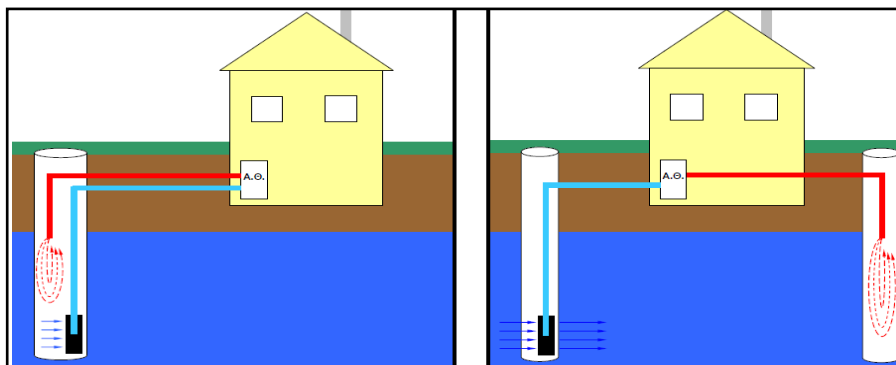
- ❖ Επιφανειακά συστήματα ανοικτού κύκλου ονομάζονται τα συστήματα που ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιούν νερό από μια επιφανειακή πηγή (ποτάμια, λίμνες κ.λπ.) και η απόρριψη του νερού γίνεται πάλι στην ίδια επιφανειακή πηγή (Εικόνα 2.1) (Μιχόπουλος, et al., 2015, p. 6).



Εικόνα 2.1: Επιφανειακό σύστημα ανοιχτού βρόγχου

Πηγή: www.iwae.com

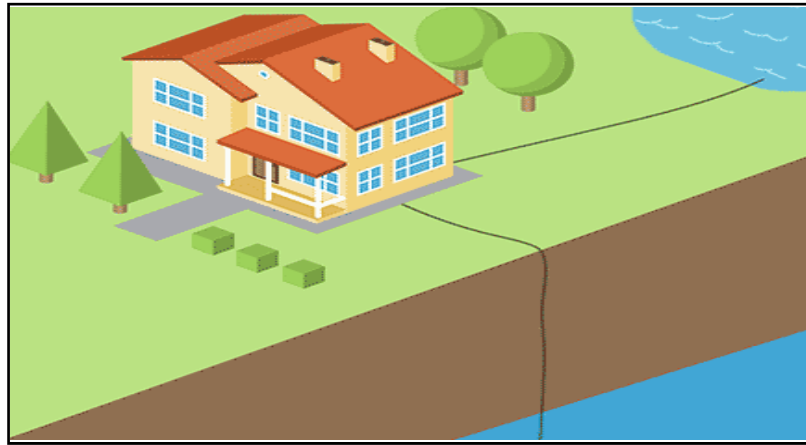
- ❖ Συστήματα φρέατος: αντλούν νερό από υπόγειο υδροφορέα μέσω μιας γεώτρησης και η απόρριψη γίνεται είτε στην ίδια γεώτρηση είτε σε μια δεύτερη γεώτρηση στον ίδιο όμως υδροφορέα Εικόνα 2.2 (Μιχόπουλος, et al., 2015, pp. 6-7).



Εικόνα 2.2: Σύστημα φρέατος ανοιχτού βρόγχου
(αριστερά- μονού φρέατος, δεξιά- διπλού φρέατος)

- ❖ Μικτά συστήματα: αποτελούν συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Ουσιαστικά η άντληση και η απόρριψη του νερού γίνεται από διαφορετικούς υδροφόρους

σηματισμούς που μπορεί να βρίσκονται και σε διαφορετικό επίπεδο Εικόνα 2.3 (Μιχόπουλος, et al., 2015, p. 7).



Εικόνα 2.3: Μικτό σύστημα ανοιχτού βρόγχου

Πηγή: (www.glgeothermal.com)

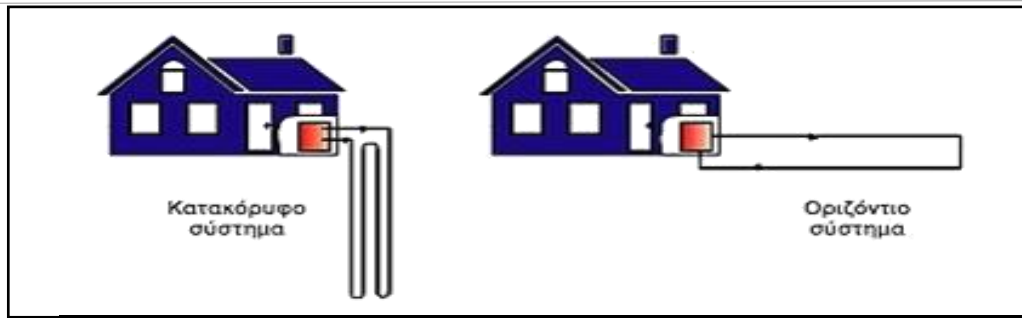
2) Γεωθερμικά συστήματα κλειστού βρόγχου:

Συστήματα κλειστού βρόγχου χαρακτηρίζονται τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων θαμμένο στο έδαφος. Με τη χρήση του εναλλάκτη σε αυτά τα συστήματα επιτυγχάνεται η μεταφορά θερμότητας από το έδαφος προς το νερό ή προς το διάλυμα νερού/αντιπηκτικού που κυκλοφορεί στον γεωεναλλάκτη.

Ανάλογα με την τοποθέτηση του γεωεναλλάκτη τα γεωθερμικά συστήματα κλειστού βρόγχου διακρίνονται σε οριζόντια και κατακόρυφα.

- ❖ Οριζόντια κλειστά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα στα οποία ο γεωεναλλάκτης τοποθετείται παράλληλα με την επιφάνεια του εδάφους και σε βάθη έως και 2,5 m (Εικόνα 2.4). Τα συστήματα αυτά συναντώνται σε διάφορες παραλλαγές στη διαμόρφωσή τους. Το αρχικό κόστος τους είναι μικρότερο, σε σχέση με τα κατακόρυφα συστήματα, η εγκατάστασή τους είναι ιδιαίτερα εύκολη, ενώ η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη. Τέλος, τα συστήματα αυτά απαιτούν μεγάλη έκταση γης για τη χωροθέτησή τους.
- ❖ Κατακόρυφα κλειστά συστήματα: στα συστήματα αυτά διανοίγονται μία ή και περισσότερες γεωτρήσεις βάθους συνήθως έως και 100 m, όπου τοποθετούνται κατακόρυφα ή και υπό γωνία σωλήνες τύπου U, σχηματίζοντας έτσι ένα κλειστό κύκλωμα (Εικόνα 2.4). Το αρχικό τους κόστος είναι σχετικά υψηλό, κυρίως λόγω των γεωτρήσεων, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αυτά απαιτούν μικρή έκταση γης για τη χωροθέτησή τους (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 34) (Μιχόπουλος, et al., 2015, pp. 9-10).

Λεπτομερής αναφορά για συστήματα κλειστού βρόγχου δίνεται στο Κεφάλαιο 3.



Εικόνα 2.4: Κατακόρυφο και οριζόντιο κύκλωμα κλειστού βρόγχου

Πηγή: www.mechanicalsolutions.gr

2.3.2 Γεωθερμική αντλία θερμότητας

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας ορίζεται ως η αντλία θερμότητας η οποία εκμεταλλεύεται ως πηγή τη θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των υπόγειων και επιφανειακών νερών, που δεν χαρακτηρίζονται όμως ως γεωθερμικό δυναμικό, με σκοπό τη θέρμανση ή/και την ψύξη χώρων ή/και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιούν είναι πιστοποιημένα φιλικό προς το περιβάλλον (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 58).

Στη διεθνή αγορά υπάρχουν διαθέσιμες γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-νερού και νερού-αέρος. Η αρχή λειτουργίας και των δύο είναι παρόμοια, διότι και οι δύο τύποι ΓΑΘ χρησιμοποιούν το νερό ως πηγή ενέργειας, το οποίο ανακυκλοφορεί στο έδαφος για την παραλαβή ή απόρριψη ενεργειακών φορτίων. Η ουσιαστική διαφορά τους είναι στον τρόπο με τον οποίο παραδίδουν την ενέργεια προς τον κλιματιζόμενο χώρο. Οι γεωθερμικές αντλίες νερού-νερού διοχετεύουν το ενεργειακό φορτίο στο χώρο μέσω ενός υδάτινου διαλύματος, το νερό, ενώ οι γεωθερμικές αντλίες νερού-αέρος μέσω του αέρα. Στη ελληνική επικράτεια δεν συνηθίζεται η μεταφορά του αέρα για τη θέρμανση ή την ψύξη των κτηρίων, και για αυτό λόγο στην ελληνική αγορά είναι διαθέσιμες μόνο οι γεωθερμικές αντλίες νερού-νερού.

Η σημαντικότερη διαφορά με τις κοινές αντλίες θερμότητας αέρος-νερού και αέρος-αέρος, εντοπίζεται ακριβώς στο γεγονός πως οι τελευταίες χρησιμοποιούν ως πηγή τον αέρα, ο οποίος εξαρτάται από τα κλιματολογικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής. Για το λόγο αυτό οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν σημαντικά μεγαλύτερο συντελεστή λειτουργίας τόσο κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όσο και κατά τη διάρκεια του θέρους.

Στα συστήματα που η αντλία θερμότητας είναι τύπου νερού-αέρος, ο γεωσυλλέκτης συνδέεται απευθείας με τη γεωθερμική μονάδα η οποία παράγει θερμό ή ψυχρό αέρα στον τόπο εγκατάστασής της, η οποία μέσω καναλιών οδηγεί τον αέρα στους επιθυμητούς χώρους. Συνεπώς, τα συστήματα αυτά δεν απαιτούν χώρο γεωστασίου. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του είδους γεωθερμικών αντλιών είναι ότι ταυτόχρονα δύναται να θερμαίνεται ο ένας χώρος και να ψύχεται ένας άλλος, χωρίς δαπανηρές υδραυλικές εγκαταστάσεις και παρέχοντας υψηλή αυτονομία και ετεροχρονισμό.

Στα συστήματα που η αντλία θερμότητας είναι τύπου νερού-νερού, το παραγόμενο θερμό ή ψυχρό νερό το οποίο παράγεται στην κεντρική μονάδα, οδηγείται μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων στο εσωτερικό σύστημα διάδοσης της θέρμανσης-ψύξης στο κτίριο. Αυτό σημαίνει πως ένα σύστημα με τέτοιου είδους αντλία για να λειτουργήσει θα πρέπει να συνδεθεί τόσο με το σύστημα του γεωναλλάκτη όσο και με το εσωτερικό σύστημα, επομένως απαιτείται χώρος γεωστασίου (Ψαρράς, 2019).

❖ Αρχή λειτουργίας αντλίας θερμότητας

Ειδικότερα, η αρχή λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας στηρίζεται στην αξιοποίηση του ψυκτικού κύκλου, ώστε να προσδίδει τα απαραίτητα ενεργειακά φορτία θέρμανσης-ψύξης μέσω του νερού ή του αέρα. Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι πως έχει την ικανότητα να μεταφέρει τη θερμότητα και αντίθετα προς τη φυσική της ροή. Αντλεί δηλαδή θερμότητα από χαμηλότερη στάθμη θερμοκρασίας προς μια υψηλότερη. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλη τόσο για ψύξη όσο και για θέρμανση χώρων (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 43).

❖ Βασικά τμήματα αντλίας θερμότητας

Τα βασικά τμήματα μιας αντλίας θερμότητας είναι τα εξής (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 43) (Κατσιμίχας, 2010):

- **Συμπιεστής-Συμπυκνωτής**, που απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον ή κατά την αντίστροφη λειτουργία απορροφά θερμότητα.
- **Ανεμιστήρας-Ατμοποιητής**, που απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο η κατά την αντίστροφη λειτουργία προσδίδει θερμότητα.
- **Μηχανισμός αντιστροφής**, που αποτελείται από μια τετράοδη βαλβίδα, η οποία μετατρέπει τον ψυκτικό κύκλο, σε θερμοαντικό² και αντίστροφα.
- **Θερμοστατική βαλβίδα εκτόνωσης**, όπου το ψυκτικό μέσο εκτονώνεται, ώστε να επέλθει η επιθυμητή πτώση πίεσης και θερμοκρασίας.
- **Υπερθερμαντής**, εξασφαλίζει ότι δεν θα εισέλθει υγρή φάση στον συμπιεστή.
- **Υποψύκτης**, εξασφαλίζει ότι δεν θα εισέλθει αέρια φάση στη βαλβίδα εκτόνωσης.

Ουσιαστικά, η αντλία θερμότητας δεν αντιστρέφει τον ψυκτικό κύκλο σε θερμικό, όπως συχνά αναφέρεται για λόγους κατανόησης, διότι ο τελευταίος δεν υφίσταται καν. Το μόνο που αντιστρέφεται στην πραγματικότητα είναι ο ρόλος του συμπυκνωτή με το ρόλο του ατμοποιητή ανάλογα με την εποχή. Πιο συγκεκριμένα, το καλοκαίρι το εσωτερικό στοιχείο λειτουργεί ως ατμοποιητής και είναι τοποθετημένος στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου και τον ψύχει, ενώ το χειμώνα ως συμπυκνωτής και τον θερμαίνει (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 44).

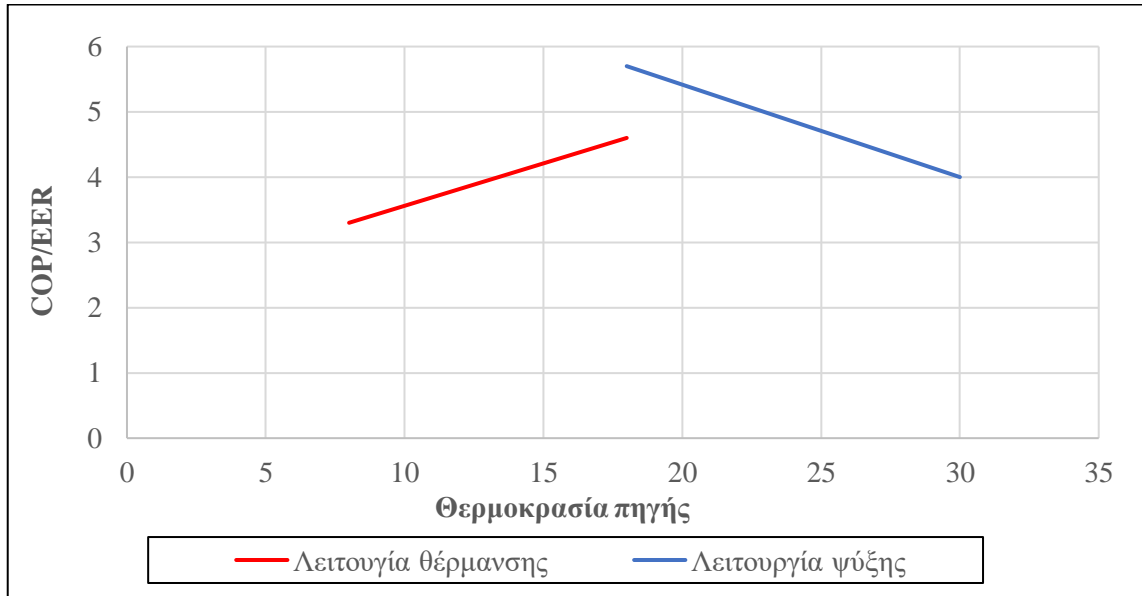
❖ Αποδόσεις λειτουργίας αντλίας θερμότητας

Όπως ήδη έχει αναφερθεί οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-νερού και νερού-αέρος, παρουσιάζουν πολύ υψηλότερους συντελεστές από τις άλλες αντλίες θερμότητας

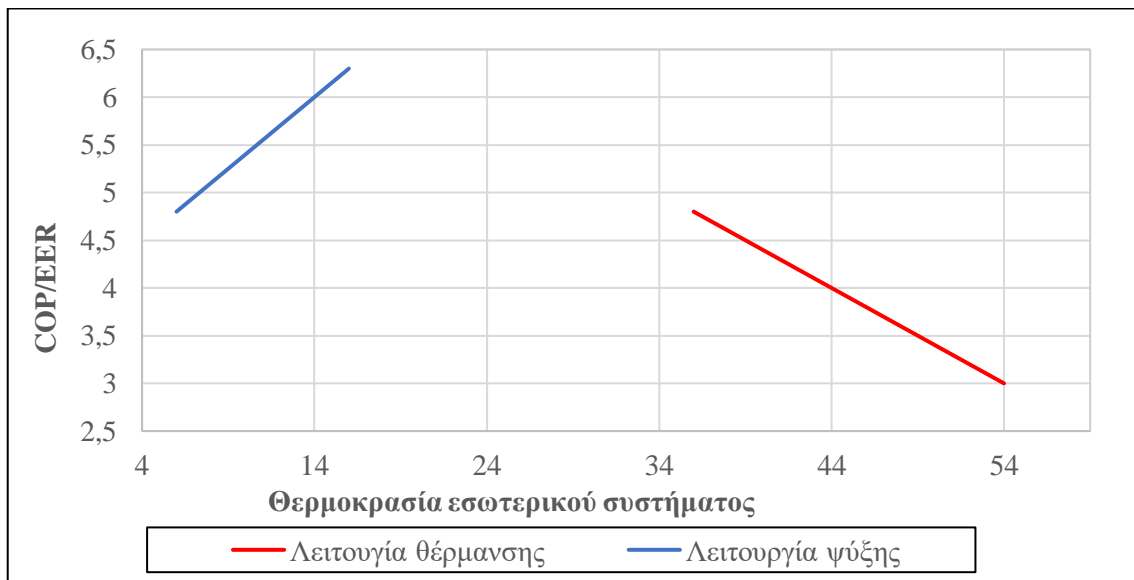
² Ο θερμοαντικός κύκλος δεν υφίσταται και αναφέρεται για λόγους κατανόησης.

που χρησιμοποιούν ως πηγή τον αέρα, ο οποίος και επηρεάζεται από τις κλιματολογικές συνθήκες.

Ο συντελεστής απόδοσης, τόσο σε ψύξη (EER) όσο και σε θέρμανση (COP) επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του γεωσυλλέκτη και τη θερμοκρασία χρήσης (δηλαδή τον τύπο του εσωτερικού δικτύου). Ουσιαστικά, 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/ERR, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 2.2 και 2.3 (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 52-54) (Ψαρράς, 2019).



Σχήμα 2.2: Διακύμανση COP/ERR σε σχέση με τη θερμοκρασία της πηγής



Σχήμα 2.3: Διακύμανση COP/ERR σε σχέση με τη θερμοκρασία του εσωτερικού συστήματος

2.3.3 Εσωτερικό σύστημα

Το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για τη διανομή των απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων θέρμανσης και ψύξης εντός των χώρων του κτηρίου. Αποτελείται από το δίκτυο σωληνώσεων, τα εξάρτημα και τους αυτοματισμούς. Όπως προαναφέρθηκε, οι ΓΑΘ μπορούν και αποδίδουν τα ενεργειακά φορτία απευθείας σε συστήματα αέρος ή νερού.

Σε περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί με ΓΑΘ νερού-νερού, το εσωτερικό σύστημα μπορεί να είναι είτε ενδοδαπέδια θέρμανση, είτε μονάδες ακτινοβολίας (σώματα καλοριφέρ), είτε μονάδες εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (Fan-Coils) ή και κεντρικές κλιματιστικές μονάδες.

Στην περίπτωση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης, θα επιτευχθεί και ο μερικός δροσισμός του κτηρίου, ενώ στην περίπτωση των μονάδων ακτινοβολίας μόνο η θέρμανση του χώρου. Για την ψύξη, είναι απαραίτητη η παροχή αέρα στον κλιματιζόμενο χώρο, για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται μονάδες fan coil ή κεντρικές κλιματιστικές μονάδες.

Στα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας, της ταχύτητας προσαγωγής του αέρα και της ρύθμισης on/off λειτουργίας ανά χώρο. Η λειτουργία και η εγκατάστασή τους είναι πολύ απλή και με σωστή διαστασιολόγηση του συστήματος καλύπτουν πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες κάθε κτηρίου. Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη ενώ η ηλεκτρική τους κατανάλωση δεν ξεπερνά τα 40 Watt. Τέλος, οι μονάδες αυτές διατίθενται σε διάφορους τύπους όπως δαπέδου, οροφής, κρυφού ή εμφανούς τύπου.

Όσον αφορά στα συστήματα που χρησιμοποιούν τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας νερού-αέρος, αυτές δύναται να τοποθετηθούν αυτόνομες σε κάθε χώρο ξεχωριστά και μπορεί να είναι εμφανούς ή κρυφού τύπου. Είναι αθόρυβες και δεν απαιτούν χρήση καναλιών, καθότι διαθέτουν στόμια προσαρμοσμένα πάνω τους (Ψαρράς, 2019).

2.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας βασίζεται στην υψηλή θερμοχωρητικότητα του εδάφους και τις θερμομονωτικές του ικανότητες. Η αποθήκευση θερμότητας, αν και είναι 100% φιλική προς το περιβάλλον, δεν θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, διότι δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας αλλά για την εξοικονόμηση αυτής και συχνά χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ανάλογα με τον τύπο του εξωτερικού κυκλώματος, διαχωρίζονται σε ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) και BTES (Borehole Thermal Energy Storage). (Ψαρράς, 2019) (Sass, et al., 2012, p. 70).

2.4.1 Συστήματα ATES

Το σύστημα ATES είναι ένα καινοτόμο γεωθερμικό σύστημα ανοικτού βρόγχου. Στηρίζεται στην εποχιακή αποθήκευση κρύων ή/και ζεστών υπόγειων υδάτων σε ένα υδροφορέα. Το βασικό χαρακτηριστικό στοιχείο των συστημάτων αυτών είναι οι υδρογεωτρήσεις. Για το σχεδιασμό τους απαιτούν άριστη γνώση του υδραυλικών συνθηκών του υδροφορέα (παροχή κ.λπ.) καθώς και τις εποχιακές διακυμάνσεις του τόπου.

Συνήθως ένα τέτοιο σύστημα παρέχει τόσο θέρμανση όσο και ψύξη στην εγκατάσταση (Ψαρράς, 2019) (Sass, et al., 2012, pp. 70-71).

2.4.2 Συστήματα BTES

Τα συστήματα BTES ουσιαστικά αποτελούν μια πρόσθετη, βελτιωτική τεχνολογία των συστημάτων αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας κλειστού βρόγχου. Μέσω κάθετων οπών εντός των οποίων κυκλοφορεί διάλυμα νερού-αντιψυκτικού, αποθηκεύουν ενέργεια. Τέτοια συστήματα συνήθως χρησιμοποιούνται για θέρμανση κτηρίων σε περιοχές όπου η υδροφορεία είναι περιορισμένη και δεν μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Η πιο σύνηθες εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η αποθήκευση της θερμικής-ηλιακής ενέργειας στο υπέδαφος από ηλιακούς συλλέκτες και η απορρόφηση της αποθηκευμένης ενέργειας κατά τη χειμερινή περίοδο (Ψαρράς, 2019).

2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αν και η τελική επιλογή του τύπου γεωθερμικού συστήματος γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε κτηρίου, τη μορφολογία και την ποιότητα του εδάφους αλλά και την διαθέσιμη επιφάνεια γης, υπάρχουν βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε συστήματος, Πίνακες 2.1 έως 2.3 (Κατσιμίχας, 2010).

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οριζοντίου γεωθερμικού κλειστού βρόγχου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εύκολο τοποθέτηση	Απαιτείται μεγάλη επιφάνεια γης για την χωροθέτηση του
Μικρότερο κόστος εγκατάστασης	Σχετικά μειωμένη απόδοση στην ψύξη
Συντελεστής απόδοσης 4-4,5	
Ευκολότερη αδειοδότηση	

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθετου γεωθερμικού κλειστού βρόγχου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σταθερή και υψηλή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους	Υψηλό κόστος επένδυσης
Απαιτείται μικρή επιφάνεια για την χωροθέτηση του	Εξειδικευμένη εγκατάσταση
Συντελεστής απόδοσης 4,5-5	Δυσκολότερη αδειοδότηση
Ενδείκνυται για ενεργή και παθητική ψύξη	

Πίνακας 2.3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθετου γεωθερμικού συστήματος ανοικτού βρόγχου

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σταθερή και υψηλή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους	Πολύ υψηλό κόστος επένδυσης
Απαιτείται μικρή επιφάνεια γης για την χωροθέτηση του	Εξειδικευμένη εγκατάσταση
Πολύ υψηλός συντελεστής απόδοσης >5	Δυσκολότερη αδειοδότηση
Ενδείκνυται για ενεργή και παθητική ψύξη	Απαίτηση ύπαρξης υδροφορέα, συγκεκριμένων χαρακτηριστικών
	Υψηλότερο κόστος συντήρησης

2.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας, μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για τον κλιματισμό κτηρίων, παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς μηχανισμούς θέρμανσης-ψύξης και των άλλων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό. Ωστόσο, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία δεν είναι πολλά, όμως είναι εξίσου σημαντικά και τελείως περιοριστικά σε ορισμένες περιπτώσεις.

2.6.1 Πλεονεκτήματα

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του γεωθερμικού κλιματισμού κτηρίων (Κατσιμίχας, 2010) :

- i.* Διαθεσιμότητα ενέργειας όλο το 24ώρο, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες.
- ii.* Υψηλός συντελεστής απόδοσης.
- iii.* Χαμηλό κόστος κλιματισμού.
- iv.* Είναι συνεχώς ανανεώσιμη, καθώς προέρχεται από το εσωτερικό της γης και την ηλιακή ακτινοβολία. Το 80% της ενέργειας ενός γεωθερμικού συστήματος προέρχεται από το περιβάλλον.
- v.* Μπορεί να αξιοποιηθεί με δοκιμασμένες τεχνολογίες ψύξης-θέρμανσης (ενδοδαπέδια θέρμανση, fan coils , υβριδικά συστήματα ηλιογεωθερμίας κλπ).
- vi.* Ένα γεωθερμικό σύστημα εξασφαλίζει θέρμανση-ψύξη των χώρων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στην ίδια εγκατάσταση.
- vii.* Δεν απαιτεί καύση ορυκτών καυσίμων, αποδεσμεύει πλήρως δηλαδή από τις διακυμάνσεις κόστους αυτών και από το κόστος μεταφοράς τους.
- viii.* Εξοικονομεί χώρους, αφού δεν απαιτεί δεξαμενή πετρελαίου, καμινάδα και υπό προϋποθέσεις ούτε καν γεωοστάσιο.
- ix.* Είναι σύστημα φιλικό προς το περιβάλλον.
- x.* Αθόρυβη λειτουργία.
- xi.* Βοηθά στην αισθητική αναβάθμιση των κτηρίων.

2.6.2 Μειονεκτήματα

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του γεωθερμικού κλιματισμού είναι (Κατσιμίχας, 2010)

:

- i.* Υψηλό κόστος επένδυσης.
- ii.* Εξειδικευμένη μελέτη και σχεδιασμός εγκατάστασης.
- iii.* Περιορισμοί ως προς τον περιβάλλοντα χώρο για τη δυνατότητα εγκατάστασης.
- iv.* Σχεδόν αδύνατη επιδιόρθωση κάποιας διαρροής στα κλειστού βρόγχου συστήματα.
- v.* Απαίτηση από συνεχή και υψηλής παροχής νερού στα ανοικτού βρόγχου συστήματα.

3 ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Τα κατακόρυφα γεωθερμικά συστήματα προτιμώνται σε περιπτώσεις που γίνεται εκσυγχρονισμός των εγκαταστάσεων κλιματισμού ενός κτηρίου ή όταν η διαθέσιμη επιφάνεια γης για τη χωροθέτηση του συστήματος είναι μικρή. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους των γεωεναλλακτών χρησιμοποιούνται διεθνή πρότυπα. Κατά τη φάση του σχεδιασμού τους, η κατανομή των φορτίων, τόσο του χειμερινού όσο και του θερινού κλιματισμού που πρέπει να καλύψει η γεωθερμική εγκατάσταση και η επιλογή του μεγέθους των διατάξεων του συστήματος θα πρέπει να καλύπτουν τα φορτία αιχμής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Συνήθως σε αυτά τα συστήματα ο γεωθερμικός εναλλάκτης βυθίζεται κατακόρυφα από 5 m έως και 100 m στις περισσότερες εγκαταστάσεις, μέσα σε κατάλληλες γεωτρήσεις και λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας από και προς τη γη. Σε ειδικές περιπτώσεις και με υλικά κατάλληλης αντοχής ο γεωθερμικός εναλλάκτης μπορεί να φθάσει και σε μεγαλύτερα βάθη (200 m).

Η συμμετοχή της γεωθερμικής ροής θερμότητας στο συνολικό ισοζύγιο του υπεδάφους μεταβάλλεται με το βάθος. Στην περίπτωση εγκατάστασης κοντά στην επιφάνεια της γης (0 m-30 m) η επίδραση της γεωθερμικής ροής μπορεί να αμεληθεί, δεδομένου ότι η ζώνη επίδρασης των συνθηκών περιβάλλοντος είναι έως τα 30 m. Σε μεγαλύτερα βάθη όμως η επίδραση της γεωθερμικής ροής είναι πιο σημαντική (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 68).

Τα οριζόντια γεωθερμικά συστήματα κλειστού βρόγχου, λόγω της απαίτησης μεγάλης επιφάνειας γης για την χωροθέτησή τους, εφαρμόζονται μόνο σε εγκαταστάσεις με ικανό περιβάλλοντα χώρο. Γενικότερα, αυτά τα συστήματα έχουν μικρότερο αρχικό κόστος επένδυσης σε σχέση με τα κάθετα γεωθερμικά συστήματα κλειστού βρόγχου. Κατά τη φάση του σχεδιασμού και αυτών των συστημάτων οι ενεργειακές απαιτήσεις καθώς και η χρήση του εξεταζόμενου κτηρίου είναι το βασικότερο στοιχείο.

Οι γεωεναλλάκτες σε αυτά τα συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες διατάξεις και σε βάθος συνήθως από 1 m έως και 3 m, ενώ σπανιότερα και σε ειδικές περιπτώσεις (τοποθέτηση κάτω από το κτίριο) μπορεί να τοποθετηθούν και σε μεγαλύτερο βάθος.

Λόγω της επιφανειακής τοποθέτησης, τα οριζόντια συστήματα επηρεάζονται σημαντικά από τις επιφανειακές εκδηλώσεις και ιδιαίτερα από την ηλιακή ακτινοβολία και τις βροχοπτώσεις. Το σημαντικό είναι ότι οι συνθήκες αυτές επιδρούν θετικά, διότι η ηλιακή ακτινοβολία αποθηκεύεται κατά τη θερινή περίοδο και αξιοποιείται κατά την χειμερινή, ενώ οι βροχοπτώσεις βελτιώνουν τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών (θερμική αγωγιμότητα, θερμική διαχυτότητα) τα οποία επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος γεωθερμικού κλιματισμού. Στην περίπτωση που οι

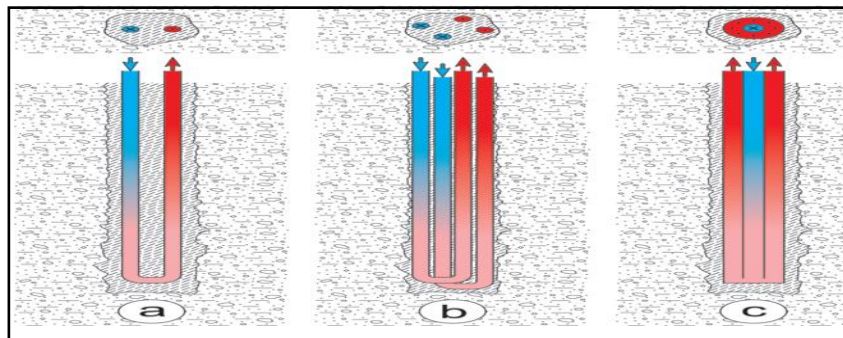
γεωεναλλάκτες τοποθετούνται κάτω από το κτήριο, η επίδραση του περιβάλλοντος σχεδόν μηδενίζεται (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 96).

3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

Τα υλικά που τοποθετούνται στο υπέδαφος θα πρέπει να είναι μη δηλητηριώδη και ανθεκτικά στη διάβρωση. Κατάλληλα για τέτοιες χρήσεις είναι τα υλικά από πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο και πολυβουτυλένιο υψηλής πυκνότητας. Το πιο σύνηθες είναι να χρησιμοποιούνται αγωγοί από πολυαιθυλένιο, διότι παρουσιάζουν ιδιαίτερα καλές μηχανικές ιδιότητες.

Οι σωλήνες χωρίς χημική δικτύωση μορίων πολυαιθυλενίου, πρέπει να τοποθετούνται με κατάλληλη επικάλυψη, συνήθως άμμο, έτσι ώστε να μην προκληθεί θραύση από τυχόν πέτρες που πιέζουν τους σωλήνες. Αντιθέτως οι σωλήνες από πολυαιθυλένιο χημικής δικτύωσης είναι ανθεκτικοί σε τέτοια φορτία και μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος χωρίς να απαιτείται η επικάλυψη τους (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 83).

Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα την διάταξη των αγωγών. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται οι τρεις βασικοί σχεδιασμοί κατακόρυφου γεωεναλλάκτη (*a*-μονός σωλήνας τύπου U, *b*-διπλός σωλήνας τύπου U, *c*-ομοαξονικός γεωεναλλάκτης) (Sass, et al., 2012, p. 42).



Εικόνα 3.1: Τύποι κατακόρυφων γεωεναλλακτών ανάλογα τη διάταξη των αγωγών

❖ Γεωεναλλάκτης τύπου U σωλήνα

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για να επιτευχθεί η εναλλαγή θερμότητας σε μια γεώτρηση είναι η εισαγωγή ενός ή και περισσότερων σωλήνων τύπου U πολυαιθυλενίου μέσα στην οπή της γεώτρησης. Συχνά, απαιτείται να γεμίσουν οι γεωτρήσεις με κάποιο υλικό σφράγισης (μπετονίτης, τσιμέντο κ.λπ.) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής βαθμός πλήρωσης γύρω από τον γεωεναλλάκτη.

Η μονή τύπου U σωλήνωση ήταν αυτή που αρχικά χρησιμοποιούταν σε τέτοιου είδους συστήματα. Στο γεωεναλλάκτη τύπου U σωλήνα, τόσο τα προς τα κάτω, όσο και τα προς τα άνω κανάλια ροής συμμετέχουν στην ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον έδαφος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των σωλήνων είναι: η απλότητα του σχεδιασμού, η ευκολία κατά την μεταφορά και την εγκατάσταση σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του μόνου τύπου U σωλήνα είναι η σχετικά φτωχή

ικανότητα μεταφοράς θερμότητας, ειδικά σε συνθήκες μη τυρβώδους ροής. Η θερμική απόδοση του τύπου U σωλήνα αυξάνεται εάν οι σωλήνες τοποθετούνται πλησίον του τοιχώματος της γεώτρησης, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση αποστατών.

Πολλαπλοί (συνήθως διπλοί) τύπου U σωλήνες, ουσιαστικά είναι απλές επεκτάσεις του μονού τύπου U σωλήνα. Τα κύρια πλεονεκτήματα των πολλαπλών σωλήνων, σε σύγκριση με τη μονή τύπου U σωλήνα, είναι ότι αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ενώ παράλληλα μειώνεται η επίδραση της σχετικά μεγάλης θερμικής αντίστασης των πλαστικών σωλήνων. Επιπλέον, η επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μειώνεται επίσης και συνεπώς δεν έχει μεγάλη σημασία το είδος της ροής (στρωτή η τυρβώδης).

❖ Ομοαξονικός γεωεναλλάκτης

Τα χαρακτηριστικά του ομοαξονικού τύπου γεωεναλλάκτη είναι ότι η ανταλλαγή θερμότητας λαμβάνει χώρα, είτε από το εισερχόμενο ή το εξερχόμενο κανάλι ροής. Ο εσωτερικός σωλήνας επιστροφής μπορεί να είναι μονωμένος χωρίς αυτό όμως να είναι απαραίτητο σε όλες τις περιπτώσεις.

Η απλούστερη διάταξη των καναλιών ροής σε έναν κατακόρυφο γεωεναλλάκτη θερμότητας είναι να εισαχθεί ένας πλαστικός σωλήνας στον πυθμένα της γεώτρησης. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτού του είδους γεωεναλλάκτη είναι ότι επιτυγχάνεται καλή μεταφορά θερμότητας, διότι το θερμοπαραγωγό ρευστό είναι σε άμεση επαφή με το τοίχωμα της γεώτρησης, για το λόγο αυτό οι γεωεναλλάκτες αυτοί ονομάζονται ανοιχτού τύπου.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρήσης μια εύκαμπτης μαλακής επένδυσης, η οποία μετά την εισαγωγή θα ωθείται έναντι του τοιχώματος της γεώτρησης όταν το εσωτερικό είναι γεμάτο με ρευστό. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι δεν υπάρχει υλικό πλήρωσης μεταξύ της επένδυσης και του τοιχώματος της γεώτρησης, ωστόσο μετά από δοκιμές παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα διαρροής.

Τέλος, υπάρχει και ο πολλαπλός ομοαξονικός γεωεναλλάκτης, ουσιαστικά το εξωτερικό κανάλι ροής μπορεί να συναρμολογηθεί με πολλούς μικρότερους αγωγούς και επιτυγχάνεται έτσι υψηλότερος βαθμός απόδοσης. Τα κανάλια ροής είναι τυποποιημένοι σωλήνες πολυαιθυλενίου, ωστόσο η εγκατάσταση τέτοιου είδους γεωεναλλάκτη έχει υψηλό αρχικό κόστος, ενώ χρήζει ιδιαίτερης μηχανολογικής μελέτης.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ομοαξονικών έναντι των κλασικών τύπου U είναι ότι αυτού του είδους γεωεναλλάκτες παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση ανά μέτρο του εναλλάκτη, χρησιμοποιούνται και για μεγάλα βάθη, απαιτείται μικρότερη επιφάνεια και η πτώση πίεσης είναι μικρότερη (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 79-82).

3.1.1 Σχεδιασμός

Το σημείο εκκίνησης για το σχεδιασμό ενός κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος είναι οι απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης, καθώς και όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που σχετίζονται με το κτήριο και τη χρήση του, οι οποίοι εξαρτώνται από το χρονικό διάστημα που εξετάζεται. Σε κάθε περίπτωση όμως ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει

να γίνεται σύμφωνα με τις επικείμενες οδηγίες και νομοθεσίες (π.χ. περί προστασίας των υπόγειων υδάτων).

Ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων στην ουσία περιλαμβάνει την επίλυση ενός κλασικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί ο λόγος ενεργειακής απόδοσης της γεωθερμικής αντλίας (EER, COP) και να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την ανακυκλοφορία του ρευστού. Με τη μείωση της παροχής της αντλίας, μειώνεται και η ροή μάζας του υγρού μεταφοράς στο γεωεναλλάκτη. Μόλις ο ρυθμός μάζας μειωθεί αρκετά, η ροή από τυρβώδης γίνεται στρωτή και δεν υπάρχει εσωτερική ανάμειξη στο θερμοπαραγωγό ρευστό και έτσι μειώνεται η θερμαντική ικανότητα του γεωεναλλάκτη. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα το ρευστό να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία όταν εισέρχεται στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και επομένως χαμηλότερη απόδοση το όλο σύστημα, επειδή ο συμπιεστής πρέπει να καταναλώσει μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, όταν ο ρυθμός της ροής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας είναι τέτοιος, ώστε η ροή να χαρακτηρίζεται τυρβώδης, έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία του ρευστού να είναι μεγαλύτερη όταν εισέρχεται στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και επομένως υψηλότερο συντελεστή απόδοσης. Αν και αυτό απαιτεί μεγαλύτερη ηλεκτρική κατανάλωση, η συνολική απόδοση του συστήματος είναι γενικά υψηλότερη σε αυτή την περίπτωση λόγω του υψηλότερου συντελεστή απόδοσης (COP, EER) (Sass, et al., 2012, pp. 178-180).

Για τη διαστασιολόγηση αυτών των συστημάτων ακολουθούνται πρότυπα και τεχνικές οδηγίες. Η πιο διαδεδομένη λόγω της ακρίβειας που παρουσιάζει είναι αυτή των Kavanaugh και Rafferty (Kavanaugh & Rafferty, 2014), όπου προτείνουν μια ακριβή μέθοδο υπολογισμού του μήκους του εναλλάκτη, όπου λαμβάνει υπόψιν το μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης θερμότητας ενός γεωεναλλάκτη, χρησιμοποιώντας μια σειρά σταθερών παλμών. Ειδικότερα, η θερμική αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκους υπολογίζεται ως συνάρτηση του χρόνου. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στο 5^ο Κεφάλαιο.

3.1.2 Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων

Αυτή τη στιγμή σχεδόν σε όλα τα κατακόρυφα γεωθερμικά συστήματα χρησιμοποιείται διπλός γεωεναλλάκτης τύπου U. Η διάμετρος της γεώτρησης θα πρέπει κάθε φορά να επιλέγεται ανάλογα με τη διάμετρο των σωληνώσεων του εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε να διασφαλίζεται επαρκής βαθμός πλήρωσης γύρω από τον εναλλάκτη θερμότητας. Συνίσταται η τοποθέτηση των σωληνώσεων με τουλάχιστον 30 mm υλικό απορροής μεταξύ των σωληνώσεων και του τοιχώματος της γεώτρησης. Γενικότερα, οι γεωτρήσεις έχουν διάμετρο περίπου 152 mm.

Πάντως, η διάμετρος της γεώτρησης, οι διαστάσεις των σωληνώσεων, ο δακτυλιοειδής χώρος κ.ο.κ. όπως και η απόφαση για το αν θα χρησιμοποιηθούν πολλές γεωτρήσεις μικρού βάθους ή λιγότερες γεωτρήσεις μεγαλύτερου βάθους εξαρτώνται από πολλούς μη γεωθερμικούς παράγοντες όπως η διαθέσιμη επιφάνεια, η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού, το ύψος του αρχικού κεφαλαίου, που προφανώς για κάθε έργο είναι διαφορετικά.

Βέβαια όσον αφορά το βάθος της γεώτρησης, πρέπει να σημειωθεί ότι οι απώλειες πίεσης στους σωλήνες του συστήματος αυξάνονται γραμμικά με το βάθος. Επιπλέον, είναι

γνωστό ότι η πίεση της γης αυξάνεται επίσης με το βάθος και έτσι η σταθερότητα της γεώτρησης γίνεται ολοένα και πιο σημαντική κατά τις εργασίες διάνοιξης, τοποθέτησης και εναπόθεσης. Αυτό σημαίνει πως ο τύπος και οι διαστάσεις του υλικού των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να επιλέγονται ανάλογα με τις πιέσεις, δηλαδή το βάθος της γεώτρησης (Sass, et al., 2012, pp. 149-150).

Τέλος, σε περίπτωση που το σύστημα διαθέτει και γεώτρηση επανεισαγωγής του γεωθερμικού ρευστού μετά τη χρήση στον ταμειυτήρα, πρέπει να σημειωθεί ότι έχει περίπου τα ίδια χαρακτηριστικά με τη γεώτρηση παραγωγής. Οι γεωτρήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές διότι βοηθούν στην αποφυγή φαινομένων καθίζησης, στη διατήρηση της πίεσης στον ταμειυτήρα, στην επανατροφοδοσία του γεωθερμικού ταμειυτήρα με ρευστά και στη διατήρηση της αειφορίας του γεωθερμικού πόρου. Είναι απαραίτητο αυτές οι γεωτρήσεις να τοποθετούνται σε σημαντική απόσταση από τις γεωτρήσεις παραγωγής, για να μην τις επηρεάσουν αρνητικά από άποψη θερμοκρασίας (Βρέλλης, et al., 2009, p. 5).

3.1.3 Πλήρωση γεωτρήσεων

Η πλήρωση ή αλλιώς τσιμέντωση των γεωτρήσεων αποτελεί ένα από τα βασικά σημεία του σχεδιασμού και κατασκευής της γεώτρησης, ώστε κατά τη λειτουργία της να είναι ασφαλής και τα γεωθερμικά ρευστά να διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους. Η τσιμέντωση θεωρείται υποχρεωτική για όλες τις γεωθερμικές γεωτρήσεις για τους εξής λόγους (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 84) (Βρέλλης, et al., 2009, p. 16):

α) Διασφάλιση της μεταφοράς θερμότητας από το πέτρωμα στο θερμοπαραγωγό ρευστό κατά την άντληση θερμότητας και αντίθετα στην περίπτωση εισαγωγής θερμότητας.

β) Σφράγιση της γεώτρησης με την επιφάνεια έτσι ώστε να παρεμποδισθεί η είσοδος ρύπων και να σφραγισθεί ο υδροφόρος που μπορεί να έχει διαπερασθεί με τη γεώτρηση.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την πλήρωση των γεωτρήσεων είναι απαραίτητο να παρέχουν τις παρακάτω λειτουργίες (Sass, et al., 2012, p. 158):

- Εγγύηση της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στο περιβάλλον έδαφος και το θερμοπαραγωγό ρευστό
- Σφράγιση της γεώτρησης για την αποφυγή εισόδου ρύπων
- Δημιουργία υδραυλικής στεγανοποίησης μεταξύ των υδροφορέων που έχουν διατρυπηθεί
- Προστασία των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη
- Σταθερή διάμετρος γεώτρησης.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εγκαταστάσεις είναι έτοιμα, με την έννοια ότι απλά αναμειγνύονται με το νερό στο εργοτάξιο και μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν αμέσως. Για το λόγο αυτό πρακτικά χρησιμοποιούνται μόνο τσιμεντοειδή ενέματα ή ενέματα μπετονίτη, όπου ικανοποιούν τις απαραίτητες ρεολογικές, θερμικές, μηχανικές και υδραυλικές απαιτήσεις.

Για την πλήρωση των γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ανάλογα με το βάθος, τις γεωλογικές συνθήκες και τα γεωθερμικά χαρακτηριστικά του πεδίου. Για να θεωρηθεί μια τσιμέντωση επιτυχής απαιτείται να έχει πληρωθεί όλος ο χώρος του διάκενου

με το τσιμέντο, το δε τσιμέντο να έχει καλή πρόσφυση στα τοιχώματα τόσο της γεώτρησης όσο και της σωλήνωσης. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει, οπωσδήποτε, τρίμματα η τεμάχια της λάσπης διάτρησης να απομακρυνθούν, δηλαδή, να επιτευχθεί καθαρισμός και περιορισμός της ρύπανσης από τον πολφό³. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια κατά τη διάτρηση ώστε να αποφεύγονται μεγάλες κοιλότητες, αποκλίσεις από τη διάμετρο της γεώτρησης, απόθεση ακατάλληλου φίλτρου-πλακούντα και η άντληση του πολφού τσιμέντου να έχει τέτοιο ρυθμό ώστε να διατηρείται η τυρβώδης ροή. Τέλος, ένα βασικό στοιχείο μιας καλής τσιμέντωσης είναι το να τοποθετηθεί η σωλήνωσης στο κέντρο της γεώτρησης ώστε το τσιμέντο να αποτεθεί γύρω από τη σωλήνωση, σε όλο το χώρο του διάκενου (Bρέλλης, et al., 2009, p. 16).

Η πιο σύνηθες τεχνική που ακολουθείται κατά την πλήρωση γεωτρήσεων αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας, δηλαδή, γεωτρήσεων μικρού βάθους, είναι η ακόλουθη: κατά την εισαγωγή του γεωεναλλάκτη, εγκαθίσταται ένας σωλήνας μέχρι το τελικό βάθος, μέσω του οποίου μπορεί να πιεσθεί το αιώρημα και αφαιρείται κατά τη διάρκεια εισαγωγής του ενέματος ανάλογα με την πρόοδο. Σε γεωτρήσεις με βάθος μεγαλύτερο των 60 m μπορεί να παρατηρηθούν προβλήματα κατά την απομάκρυνση του σωλήνα ενέματος και σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν δύο σωλήνες, μια μέχρι το τελικό βάθος της γεώτρησης και μια μέχρι το μισό βάθος που μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί. Από το τελικό βάθος της γεώτρησης μέχρι το τέλος του δεύτερου σωλήνα, η γέμιση με ένεμα επιτυγχάνεται μέσω της χαμηλότερης σωλήνωσης και μετά μέσω της επάνω σωλήνωσης. Όταν αφαιρείται η επάνω σωλήνωση του ενέματος η έξοδος πρέπει να είναι πάντοτε κάτω από το τρέχον επίπεδο συμπλήρωσης, ώστε να μην παγιδευτεί αέρας ενώ ο σωλήνας ενέματος που παραμένει στη γεώτρηση θα πρέπει να παραμείνει συμπληρωμένος με αιώρημα (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 84).

3.1.4 Δοκιμές ελέγχου

Οι γεωεναλλάκτες και οι σωληνώσεις μέχρι τη σύνδεση με την αντλία θερμότητας πρέπει να ελέγχονται για να διασφαλιστεί ότι ολόκληρο το σύστημα λειτουργεί σωστά. Η διαδικασία αποτελείται από ενδιάμεσους ελέγχους σε κάθε τμήμα που εγκαθίσταται ξεχωριστά και από τον τελικό έλεγχο αφού έχουν εγκατασταθεί όλα τα τμήματα του συστήματος. Οι δοκιμές ελέγχου περιλαμβάνουν έλεγχο τη ροής και της στεγανότητας (πίεσης) του συστήματος (Sass, et al., 2012, p. 180).

❖ Έλεγχος ροής

Ελέγχεται η πτώση πίεσης στο κύκλωμα του γεωεναλλάκτη, διότι αυξημένη υδραυλική αντίσταση επιφέρει παραμόρφωση των σωληνώσεων σε σχήμα μικρότερης διαμέτρου με αποτέλεσμα την αύξηση της προβλεπόμενης παροχής.

Οι σωλήνες του γεωεναλλάκτη πριν από αυτόν τον έλεγχο πρέπει πρώτα να ξεπλυθούν με πόσιμο νερό για να απομακρυνθούν τυχόν σωματίδια σκόνης. Κάθε τμήμα ενός διπλού σωλήνα τύπου U πρέπει να ξεπλένεται ξεχωριστά, ενώ η διάρκεια της έκπλυσης πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε το κύκλωμα να πλένεται εντελώς τουλάχιστον δύο φορές. Η πίεση

³ Πολφός ονομάζονται τα γεωτρητικά ρευστά που παρέχουν πίεση και μεταφορά τριμμάτων από τον πυθμένα του φρέατος, ψύξη και λίπανση του κοπτικού καθώς επίσης διατηρούν τα θραύσματα εν αιωρήσει όταν υπάρχει διακοπή της κυκλοφορίας.

του νερού και ο ρυθμός ροής πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε τα σωματίδια σκόνης στο κάτω μέρος του γεωεναλλάκτη να μπορούν να μεταφερθούν μέχρι το επίπεδο του εδάφους. Αφού καταγραφεί η διάρκεια έκπλυσης και ο ρυθμός ροής, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ροής με νερό και όχι με το θερμοπαραγωγό ρευστό. Το σύστημα δεν γεμίζει καθόλου με το θερμοπαραγωγό ρευστό έως ότου όλα τα μέρη του συστήματος είναι στη θέση τους και έχουν πραγματοποιηθεί και οι έλεγχοι πίεσης (Sass, et al., 2012, pp. 180-181) (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 86).

❖ Έλεγχος πίεσης

Η δοκιμή πίεσης πρέπει να πραγματοποιείται με καθαρό νερό και να ακολουθεί τις οδηγίες του προτύπου EN 805 ή του SIA 384/6. Για τους σωλήνες πολυαιθυλενίου, ο έλεγχος της πίεσης θα πρέπει να διεξάγεται ως δοκιμή συμπίεσης εφαρμόζοντας υπερπίεση στο σωλήνα σε όλο το μήκος του για τη διόγκωση της σωλήνωσης ενώ μετά την πραγματοποίηση του ελέγχου η σωλήνωση επανέρχεται στο αρχικό μέγεθος της. Για το λόγο αυτό, η δοκιμή πίεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον το εναιώρημα συμπλήρωσης εξακολουθεί να έχει ρευστή συνοχή και δεν μπορεί να σχηματιστεί διάκενο σε κανένα σημείο. Κατά τη δοκιμή πίεσης οι σωληνώσεις δεν πρέπει να έρχονται σε άμεση επαφή με το ηλιακό φως και να αποφεύγονται γενικώς οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στα τοιχώματα των σωληνώσεων. Η πίεση δοκιμής πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε η υπερπίεση καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής να μην πέφτει κάτω από 0,5 bar στο κάτω μέρος του γεωεναλλάκτη και 7,5 bar στην κορυφή του. Οι πιέσεις αυτές ισχύουν για γεωεναλλάκτες με μονές ή διπλές τύπου U σωληνώσεις κατασκευασμένες από PE-100 SDR 11. Για όλους τους άλλους τύπους και για γεωεναλλάκτες που ο δακτυλιοειδής χώρος δεν απαιτείται να συμπληρωθεί πλήρως, η δοκιμή πρέπει να προσαρμόζεται στις περιστάσεις ώστε να αποφεύγεται η καταστροφή του γεωεναλλάκτη χρησιμοποιώντας υπερβολικά υψηλές πιέσεις δοκιμής.

Η διαφορά πίεσης μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών πιέσεων που δρουν στους σωλήνες του εναλλάκτη θερμότητας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 21 bar σε κανένα σημείο των σωληνώσεων.

Στα συστήματα αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας έχει καθιερωθεί η δοκιμή πίεσης SIA 384/6 η οποία αποτελείται ουσιαστικά από 6 βήματα:

1. Κατάσταση ηρεμίας στις σωληνώσεις του γεωεναλλάκτη, απαλλάσσονται δηλαδή από κάθε φορτίο πίεσης – διάρκεια : 1 ώρα.
2. Δημιουργία και διατήρηση της πίεσης δοκιμής- διάρκεια: 10 λεπτά
3. Επέκταση των σωληνώσεων του γεωεναλλάκτη λόγω της πίεσης δοκιμής- Διάρκεια: 1 ώρα.
4. Καθορισμός της πτώσης πίεσης: εκτός από διαρροές, ο εγκλωβισμένος αέρας μπορεί επίσης να οδηγήσει σε υψηλή πτώση πίεσης. Σε αυτή την περίπτωση, οι σωλήνες πρέπει να ξεπλυθούν ξανά και στη συνέχεια η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή.
5. Απότομη πτώση της πίεσης δοκιμής τουλάχιστον κατά 1 bar, με αποστράγγιση νερού. Η ποσότητα του νερού που αποστραγγίζεται πρέπει επίσης να μετρηθεί. Εάν η ποσότητα του νερού που αποστραγγίζεται υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή που δίνεται

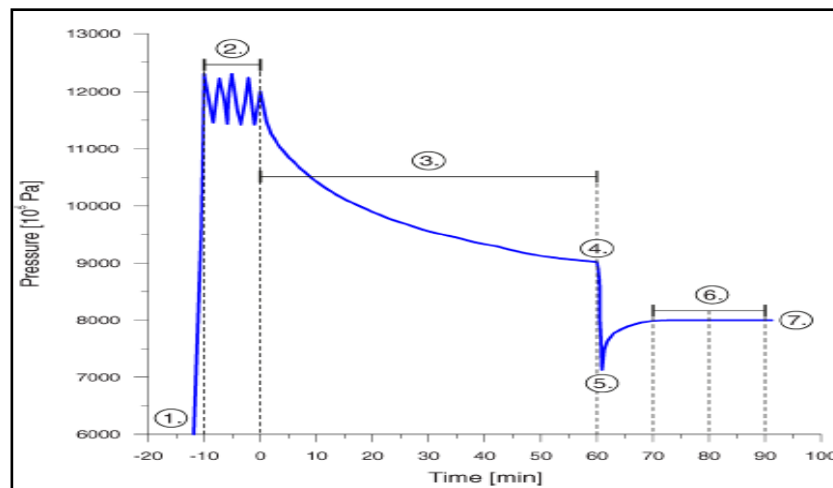
στον Πίνακα 3.1, θα πρέπει να υπολογίζεται ο εγκλωβισμένος αέρας και η μέτρηση να πραγματοποιείται ξανά από την αρχή, μετά από το εκ νέου ξέπλυμα των σωλήνων.

Πίνακας 3.1: Μέγιστος όγκος αποστράγγισης νερού κατά τη δοκιμή πίεσης ανάλογα τις διαστάσεις της σωλήνωσης

Pipe dimensions (mm)	Volume (l/100 m)
25×2.3	32.7
32×2.9	53.9
40×2.3	98.4
50×2.9	153.4
63×3.6	244.5
75×4.3	346.3
90×5.1	500.1
110×6.3	745.1

6. Ο κύριος χρόνος δοκιμής ξεκινάει σε αυτό το στάδιο όπου καταγράφονται τουλάχιστον τρεις μετρήσεις της πίεσης χειροκίνητα (μετά από 10, 20 και 30 λεπτά η καθεμία).
7. Τέλος της δοκιμής.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η πίεση που ασκείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος είναι τουλάχιστον 90 λεπτά και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι η δοκιμή πάντα διαρκεί τόσο, διότι μπορεί να διαρκέσει και για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (Sass, et al., 2012, pp. 183-191).



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα δοκιμής SIA 384/6

3.1.5 Ρευστά μεταφοράς θερμότητας

Στα κλειστά κυκλώματα γεωεναλλάκτη, το θερμοπαραγωγό ρευστό μεταφέρει τη θερμότητα από το έδαφος στον εναλλάκτη θερμότητας για εφαρμογές θέρμανσης των κτηρίων και από τα κτήρια στο έδαφος για εφαρμογές ψύξης. Κυρίως χρησιμοποιείται νερό

με πρόσθετα για τη μείωση του σημείου πήξης και αυτό εγγυάται θέρμανση ακόμη και με θερμοκρασία ρευστού $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Οι πιο κοινές αντιψυκτικές ουσίες είναι η αιθυλενογλυκόλη, η μονοαιθυλενογλυκόλη και η προπυλενογλυκόλη, ενώ περιστασιακά χρησιμοποιούνται αιθανόλη, ανθρακικό κάλιο, μονοπροουλενογλυκόλη και χλωριούχο ασβέστιο. Παλαιότερα χρησιμοποιούταν στο σύνολο των συστημάτων αυτών ως αντιψυκτική ουσία, διαλύματα αλατιού.

Η αιθυλενογλυκόλη έχει καλύτερες φυσικές ιδιότητες αλλά χαρακτηρίζεται ως επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία σε σχέση με την μονοαιθυλενογλυκόλη η οποία δεν χαρακτηρίζεται όμως ως τοξική. Επιπλέον, για να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο προστασίας από τον παγετό, πρέπει να χρησιμοποιηθεί περισσότερο MPG από MEG, κάτι που είναι μειονέκτημα όσον αφορά το ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα της πρώτης. Οι περισσότερες από τις αντιψυκτικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες γεωθερμικές εφαρμογές είναι ελαφρώς διαβρωτικές. Προκειμένου να αποφευχθούν οι διαρροές που προκαλούνται από τη διάβρωση, προστίθενται μικρές ποσότητες αναστολέων διάβρωσης.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι είναι δυνατή η λειτουργία του γεωεναλλάκτη μόνο με νερό. Ωστόσο, πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές του κατασκευαστή της αντλίας θερμότητας και η ποιότητα του νερού να είναι κατάλληλη για όλο τον εξοπλισμό του συστήματος. Πλεονέκτημα της χρήσης καθαρού νερού ως θερμοπαραγωγό ρευστό είναι ότι αποτρέπει ζημιές κατά τη λειτουργία όταν χρησιμοποιούνται υλικά πλήρωσης χωρίς υψηλή θερμική αντίσταση. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή η μη προγραμματισμένη αύξηση της ικανότητας εξαγωγής του γεωεναλλάκτη με καθαρό νερό, επειδή η πτώση της θερμοκρασίας της πηγής είναι περιορισμένη, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να συμπεριληφθούν κατάλληλα αποθέματα χωρητικότητας, γεγονός που με τη σειρά του αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης (Sass, et al., 2012, pp. 191-193).

3.1.6 Εκκίνηση λειτουργίας και συντήρηση

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών ροής και πίεσης, το σύστημα μπορεί να γεμίσει με το υγρό μεταφοράς θερμότητας μέχρι το σημείο σύνδεσης με το κτήριο. Το θερμικό ρευστό εισέρχεται στο σύστημα και εξέρχεται μέσω ανοικτής δεξαμενής έως ότου δεν υπάρχουν άλλες φυσαλίδες αέρα, το σύστημα είναι πλήρως απαερωμένο και έχει επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση αντιψυκτικού, εκτός και αν χρησιμοποιείται καθαρό νερό. Κατά την κυκλοφορία του ρευστού είναι σημαντικό να διασφαλιστεί πως αυτό περνάει από όλα τα όργανα ελέγχου του συστήματος και πως αυτά λειτουργούν σωστά. Η ταχύτητα ροής πρέπει να είναι ίδια σε όλους τους σωλήνες του γεωεναλλάκτη και η τυχόν διαφορά δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 15\%$.

Τα συστήματα γεωεναλλακτών πρακτικά δεν χρειάζονται συντήρηση ωστόσο είναι απαραίτητο να είναι εφοδιασμένα με αυτόματες συσκευές ανίχνευσης διαρροών έτσι ώστε να διακόπτεται η λειτουργία σε περίπτωση διαρροής (Sass, et al., 2012, p. 196).

Επιπλέον, κατά τους περιοδικούς ελέγχους για τη σωστή λειτουργία θα πρέπει να ελέγχονται (Βραχόπουλος, et al., 2015, p. 88):

- Η πίεση του συστήματος

- Έλεγχος της αντιψυκτικής προστασίας του φορέα θερμότητας (κάθε 10 χρόνια)
- Πιθανή προσθήκη νερού η αντιψυκτικού. Στην περίπτωση του αντιψυκτικού δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν δύο ρευστά διαφορετικού κατασκευαστή ή διαφορετικών ιδιοτήτων.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ

Τα συστήματα οριζοντίων γεωεναλλακτών αποτελούν εναλλακτική λύση έναντι των κατακόρυφων όταν είναι διαθέσιμη μεγάλη, επίπεδη επιφάνεια γης για τη χωροθέτηση του συστήματος καθώς και οι ιδιότητες του εδάφους είναι οι πλέον κατάλληλες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τις διαφορές που οφείλονται στον τύπο του συστήματος οι νομοθεσίες, οι εργασίες και η διάρκεια σχεδιασμού είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που ισχύουν και περιεγράφηκαν στην Ενότητα 3.1 για τα κατακόρυφα συστήματα. Ωστόσο, όσον αφορά στον προγραμματισμό και στην έγκριση ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται σημαντικά μικρότερος χρόνος, διότι δεν πραγματοποιούνται εντατικές προκαταρκτικές έρευνες και δεν χρειάζεται έγκριση για τη διάνοιξη γεώτρησης (Sass, et al., 2012, p. 201).

3.2.1 Είδη οριζοντίων γεωεναλλακτών

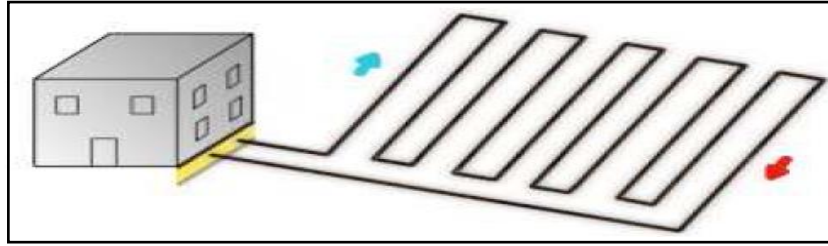
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται και σε αυτού του είδους τα συστήματα είναι σωλήνες πολυαιθυλενίου, πολυπρουπυλενίου και πολυβουτυλενίου διότι έχουν υψηλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση καθώς και στην υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ δεν χαρακτηρίζονται τοξικά.

Στις Εικόνες (3.2) έως και (3.7) παρουσιάζονται οι εναλλακτικοί τύποι εγκατάστασης οριζοντίων γεωθερμικών εναλλακτών, οι οποίοι περιλαμβάνουν από διατάξεις απλών σωλήνων μέχρι διατάξεις πολλαπλών σωλήνων, διευθετημένους είτε κατακόρυφα σε μια στενή τάφρο είτε απλωμένους σε μια μεγαλύτερη τάφρο. Διακρίνονται σε απλής μορφής και σπειροειδούς μορφής που τοποθετούνται είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα. Σε περιπτώσεις που υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη διαθέσιμη έκταση, οι σωλήνες μπορούν να τοποθετηθούν σε διατάξεις με σχετικά υψηλή πυκνότητα και να συνδεθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 102-105).

❖ Απλά συστήματα

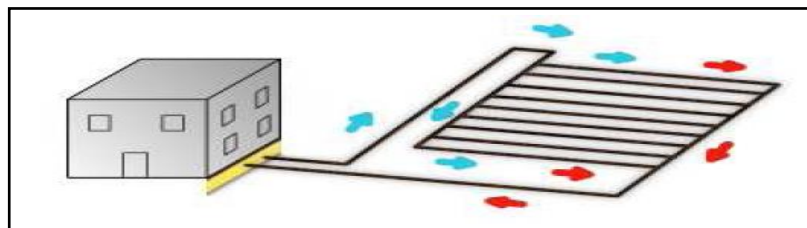
Τα απλά συστήματα διαχωρίζονται σε συστήματα διατεταγμένα σε σειρά ή παράλληλα ή σε τάφρο Εικόνα 3.2 έως 3.4

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων εν σειρά Εικόνα 3.2 είναι ότι συνίσταται από απλά κανάλια ροής και έχουν υψηλή θερμική απόδοση ανά μέτρο σωλήνα, αφού απαιτείται σωλήνας μεγαλύτερης διαμέτρου σε σχέση με άλλες διατάξεις. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται ο μεγαλύτερος όγκος νερού και η υψηλότερη τιμή του σωλήνα, λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου, αλλά και το αυξημένο κόστος κατά την εγκατάσταση. Η θερμική ροή είναι μονοδιάστατη και η απόδοση του συστήματος μειώνεται ανά μετρό σωλήνωσης και συνεπώς ανά επιφάνεια πεδίου εναλλάκτη.



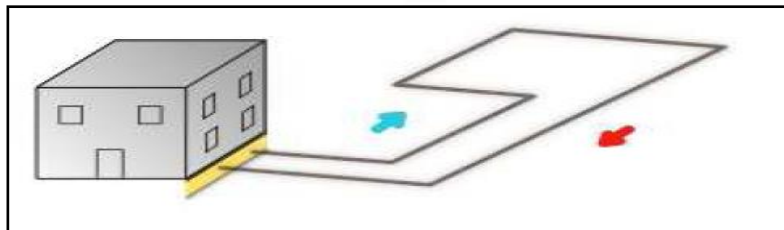
Εικόνα 3.2: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής σε σειρά

Η παράλληλη διάταξη Εικόνα 3.3 έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους σωλήνα λόγω της μικρότερης διαμέτρου και της μικρότερης απαίτησης σε αντιψυκτικό. Παρουσιάζει μειονεκτήματα όπως ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην εξαγωγή όλου του αέρα από τους σωλήνες και ότι απαιτείται επίτευξη συνθηκών ροής σε ισορροπία $\pm 5\%$.



Εικόνα 3.3: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής σε παράλληλη σύνδεση

Στην περίπτωση της Εικόνας 3.4 αναπτύσσεται απλός βρόγχος σε τάφρο. Η απόδοση του συστήματος αυξάνεται σημαντικά συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες διατάξεις, λόγω της αύξησης του διαθέσιμου όγκου επίδρασης από το γήινο περιβάλλον, παράλληλα όμως αυξάνεται και η απαίτηση σε διαθέσιμη επιφάνεια για τη χωροθέτηση του συστήματος.



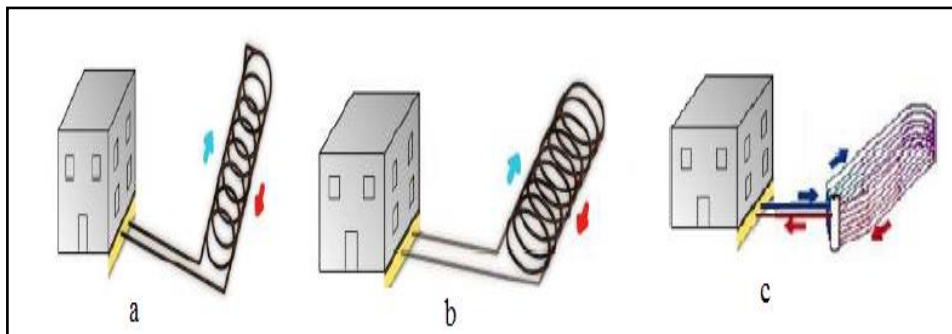
Εικόνα 3.4: Σύστημα οριζοντίου γεωεναλλάκτη απλής μορφής ενός βρόγχου

❖ Συστήματα σπειροειδούς διάταξης

Η συγκεκριμένη διάταξη συγκεντρώνει την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας σε μικρότερο όγκο και έτσι απαιτείται έως και τρεις φορές μικρότερη επιφάνεια γης για τη χωροθέτηση αυτών των συστημάτων σε σχέση με τα συστήματα απλής μορφής. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των συστημάτων απλού τύπου και σπειροειδούς διάταξης είναι ότι στα τελευταία οι σωλήνες είναι κουλουριασμένοι και όχι ευθύγραμμο διατεταγμένοι. Η καλή πλήρωση της τάφρου είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι δεν θα πρέπει να υπάρχουν κενά γύρω από τους σωλήνες. Τα σχέδια και το μήκος του γεωεναλλάκτη θα

πρέπει να επιλέγονται κάθε φορά ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, τις ιδιότητες του εξεταζόμενου εδάφους καθώς και τις ώρες λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Το βάθος επηρεάζεται από το χρόνο των περιόδων θέρμανσης και ψύξης και το χρόνο έκθεσης του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία. Γενικά το βάθος ταφής σε αυτά τα συστήματα είναι από 1,2 m έως και 2,5 m.

Τα συστήματα αυτά μπορούν να εγκατασταθούν οριζόντια Εικόνα 3.5a ή κατακόρυφα Εικόνα 3.5b. Στην κατακόρυφη διάταξη ο εναλλάκτης τοποθετείται σε τάφρο πλάτους περίπου 0,3 m και βάθους περίπου 2 m από το επίπεδο της επιφάνειας. Η σπειροειδής διάταξη είναι μια παραλλαγή του βρόγχου οριζοντίου τύπου και χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Πρακτικά ο σωλήνας διευθετείται σε μεγάλες σπείρες που επικαλύπτουν η μια την άλλη επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερο μήκος σωλήνα να χωρέσει σε μικρότερους τάφρους. Οι βρόγχοι μπορεί να είναι λίγο πιο οικονομικοί επειδή μπορεί να απαιτηθεί μικρότερη τάφρος, αλλά απαιτείται μεγαλύτερο μήκος σωλήνα για την ίδια ικανότητα θέρμανσης. Στην περίπτωση της διάταξης σπειροειδούς κατακόρυφου γεωεναλλάκτη Εικόνα 3.5c η τοποθέτηση διαφέρει των δύο προηγούμενων και συνίσταται στην περίπτωση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών για μικρό βάθος. Το μειονέκτημα των συστημάτων σπειροειδούς διάταξης είναι πως δημιουργείται σημαντική αδράνεια στο σύστημα λόγω της μεγάλης αποθήκευσης νερού, το οποίο σε φάση ηρεμίας αποκτά τη θερμοκρασία του εδάφους (Βραχόπουλος, et al., 2015, pp. 103-105).



Εικόνα 3.5: Συστήματα οριζοντίου γεωεναλλάκτη σπειροειδούς διάταξης

3.2.2 Σχεδιασμός

Οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό οριζοντίων συλλεκτών είναι:

- Βάθος συλλέκτη
- Απόσταση σωλήνων συλλογής
- Διάμετρος σωλήνων συλλέκτη
- Κλιματολογικές συνθήκες περιοχής.

❖ Βάθος συλλέκτη

Το συνηθισμένο βάθος για την τοποθέτηση οριζοντίων γεωεναλλακτών είναι 1-3 m, δηλαδή στη ζώνη ηλιακής ενέργειας και συνεπώς επηρεάζονται σημαντικά από την ηλιακή ακτινοβολία αλλά και τις τυχόν βροχοπτώσεις. Ωστόσο, οι συνθήκες αυτές επιδρούν θετικά

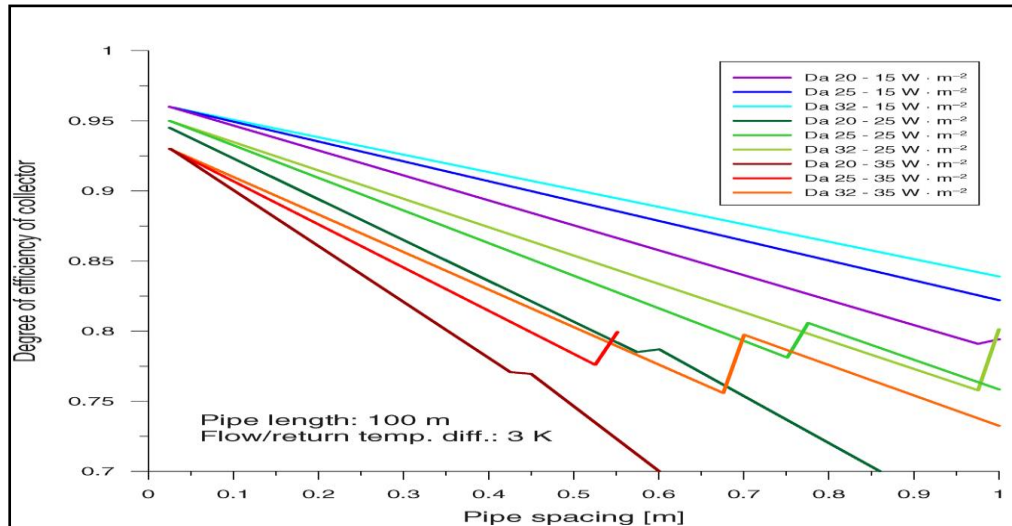
στον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Τέλος, επειδή η ροή γεωθερμικής ενέργειας από βαθύτερα στρώματα είναι περίπου $0,07 \text{ W/m}^2$, η λειτουργία ενός τέτοιου συλλέκτη κατά τη χειμερινή περίοδο προκαλεί σταθερή ψύξη του εδάφους, ωστόσο κατά την περίοδο του θέρους αποθηκεύονται μεγάλα ποσά θερμότητας στο υπέδαφος που αξιοποιούνται το χειμώνα (Sass, et al., 2012, p. 202).

❖ Απόσταση σωλήνων

Η απόσταση των σωλήνων του συλλέκτη επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση ενός οριζοντίου συστήματος και αυτό γιατί, καθώς αυξάνεται η απόσταση μειώνεται η περιοχή μεταφοράς θερμότητας όλων των σωληνώσεων ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη. Δηλαδή, για μια καθορισμένη ροή θερμότητας η αύξηση της απόστασης των σωλήνων συνεπάγεται πολύ υψηλότερη κλίση θερμοκρασίας και υψηλότερο ρυθμό ροής μάζας του θερμικού ρευστού μεταφοράς οδηγώντας έτσι αναπόφευκτα σε μεγαλύτερη ηλεκτρική κατανάλωση. Σε ακραίες περιπτώσεις, όταν οι απώλειες πίεσης είναι μεγάλες και η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς χαμηλή μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια ολοκλήρου του συστήματος, για αυτό το λόγο θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στις αποστάσεις των σωληνώσεων κατά το σχεδιασμό του συστήματος.

Στο Σχήμα (3.2) φαίνεται η σχέση της απόδοσης του συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας και της απόστασης των σωλήνων. Καθώς αυξάνεται η απόδοση του συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας και απόσταση μεταξύ των σωλήνων, μειώνεται η απόδοση του οριζοντίου συλλέκτη. Η ποιότητα του οριζοντίου συλλέκτη ενός συστήματος γεωθερμικής αντλίας ορίζεται ως η μέση αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ αυτού του συλλέκτη και ενός ιδανικού συλλέκτη που εκμεταλλεύεται την ίδια πηγή θερμότητας. Η απότομη αύξηση της ποιότητας του συλλέκτη στο Σχήμα (3.2) οφείλεται στη μετάβαση από στρωτή ροή σε τυρβώδη ροή για το θερμικό ρευστό μεταφοράς στους σωλήνες του συλλέκτη.

Ο καθορισμός της βέλτιστης διαμέτρου του σωλήνα συλλέκτη έχει καθοριστική επίδραση στην υδραυλική συμπεριφορά του υγρού μεταφοράς θερμότητας. Πρέπει επομένως να προσδιοριστεί εξ' αρχής το σημείο στο οποίο η στρωτή αλλάζει σε τυρβώδη ροή. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι πολύ μικρότερος για τη στρωτή ροή από ότι την τυρβώδη ροή, συνέπεια του οποίου είναι χαμηλότερη θερμοκρασία του θερμικού ρευστού. Επιπλέον, οι απώλειες πίεσης κατά τη διάρκεια της τυρβώδους ροής είναι υψηλότερες από αυτές της στρωτής ροής, οδηγώντας αναπόφευκτα σε υψηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την αντλία ανακυκλοφορίας (Sass, et al., 2012, p. 203).



Σχήμα 3.2: Απόδοση οριζοντίου συλλέκτη συναρτήσει της απόστασης των σωληνώσεων

❖ Κλιματολογικές συνθήκες

Οι κλιματολογικές συνθήκες της τοποθεσίας εγκατάστασης του συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια στον οριζόντιο συλλέκτη. Όσο πιο ζεστή και πιο υγρή είναι η περιοχή, τόσο περισσότερη θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί προς τα κάτω από την επιφάνεια του οριζοντίου συλλέκτη. Αυτό μειώνει το σχηματισμό πάγου στο επίπεδο του συλλέκτη κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης (Sass, et al., 2012, pp. 202-205).

3.2.3 Εγκατάσταση συστήματος

Η εγκατάσταση ενός οριζοντίου συστήματος αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας περιλαμβάνει την εγκατάσταση των συλλεκτών, των πηγαδιών γεωθερμικής ενέργειας από τα οποία αντλείται και απορρίπτεται η θερμότητα και την τοποθέτηση των σωλήνων που συνδέουν τους οριζόντιους συλλέκτες με την αντλία.

❖ Εγκατάσταση οριζοντίων συλλεκτών

Οι οριζόντιοι συλλέκτες μπορούν να τοποθετηθούν σε μια μεγάλη περιοχή ή σε ξεχωριστές τάφρους. Καθώς το έδαφος μεταξύ των τάφρων παραμένει “ανενόηλο” από άποψη συναλλαγής θερμότητας, η τοποθέτηση συλλεκτών σε χωριστές τάφρους έχει μικρότερη επίδραση στις φυσικές εδαφικές δομές.

Γενικότερα, κατά την τοποθέτηση συλλεκτών σε μεγάλες περιοχές ή τάφρους θα πρέπει να τηρούνται οι ακόλουθοι κανόνες:

- Όλοι οι σωλήνες του συλλέκτη πρέπει να είναι επενδεδυμένοι με στρώμα άμμου για την αποφυγή ζημιών (π.χ. λόγω αιχμηρών πετρών) κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία του συστήματος.

- Όλα τα μέρη της εγκαταστάσεις θα πρέπει να είναι τεχνολογικά σύγχρονα και όσο το δυνατόν πιο αυτοματοποιημένα με εγκαταστημένους ηλεκτρικούς μετρητές πίεσης, θερμοκρασίας κ.λπ.
- Οι μεμονωμένες διαδρομές σωλήνων πρέπει να εγκατασταθούν σύμφωνα με διεθνής πρότυπα (π.χ. VDI4650-2 παράγραφοι 4.2.2-4.2.6.) και πάντα πρέπει να τοποθετείται προειδοποιητική ταινία στο έδαφος περίπου 30 cm πάνω από κάθε σωλήνα.
- Κατά την επιλογή υλικών για συλλέκτες και σωλήνες, πρέπει να τηρούνται οι διατάξεις των διεθνών πρότυπων (π.χ. VDI4640-1, ενότητα 8.1). Πριν από την τοποθέτηση, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ελεγχθεί ότι οι σωλήνες του συλλέκτη που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και είναι κατάλληλοι για το εύρος θερμοκρασίας σχεδιασμού.
- Σε συστήματα απευθείας εξάτμισης πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σωλήνες από χαλκό ή ανοξείδωτο χάλυβα με επικάλυψη πολυαιθυλενίου.

❖ Εγκατάσταση πηγαδιών

Για την άντληση ή απόρριψη θερμότητας στα γεωθερμικά συστήματα οριζόντιων συλλεκτών χρησιμοποιούνται πηγάδια γεωθερμικής ενέργειας (geothermal energy baskets) σε σειρά και σε βάθος το πολύ 4 m. Η εκσκαφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικό εκσκαφέα. Το μέγεθος της εκσκαφής πρέπει να είναι κατάλληλο για το συγκεκριμένο καλάθι γεωθερμικής ενέργειας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Οι σωλήνες που συνδέουν τα καλάθια πρέπει να τοποθετούνται σε τάφρους και να προστατεύονται από το πάγωμα. Η άμμος αναμεμιγμένη με νερό και συνδετικό υλικό, αλλά απαλλαγμένη από αιχμηρές πέτρες, χρησιμοποιείται για την πλήρωση γύρω από τα πηγάδια γεωθερμικής ενέργειας.

❖ Τοποθέτηση σωλήνων

Οι οριζόντιοι σωλήνες που συνδέουν τους οριζόντιους συλλέκτες με την αντλία θερμότητας πρέπει να τοποθετούνται κάτω από τη γραμμή παγετού, δηλαδή, περίπου 1,5 m κάτω από την επιφάνεια της γης. Οι γραμμές ροής και επιστροφής θα πρέπει να τοποθετούνται χωριστά στην τάφρο. Οι ακτίνες κάμψης που ορίζονται από τους κατασκευαστές των σωληνώσεων, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να τηρούνται αυστηρά κατά την τοποθέτηση για να αποφευχθούν οι συστροφές, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ζημία στους σωλήνες ή/και να εμποδίσουν τη ροή.

Προκειμένου να επιτευχθούν ομοιόμορφες συνθήκες ροής στις επιμέρους διαδρομές σωλήνων, τα μήκη των σωλήνων θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά της ροής να είναι σχεδόν ίδια σε όλες τις επιμέρους διαδρομές για κάθε οριζόντιο συλλέκτη ξεχωριστά. Τέλος, στο δίκτυο αυτό απαιτείται η εγκατάσταση διακόπτη πίεσης και ροής που τερματίζει αυτόματα τη λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση διαρροής (Sass, et al., 2012, pp. 205-206).

3.2.4 Δοκιμές ελέγχου και ρευστά μεταφοράς θερμότητας

Οι δοκιμές ελέγχου που πρέπει να γίνονται σε οριζόντια συστήματα αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας είναι ίδιες με αυτές που ακολουθούνται στα αντίστοιχα κατακόρυφα συστήματα και περιεγράφηκαν στην Ενότητα 3.1.4. Αντίστοιχα, τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που περιεγράφηκαν στην Ενότητα 3.1.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως θερμικά υγρά μεταφοράς θερμότητας σε οριζόντιους συλλέκτες.

3.2.5 Εκκίνηση λειτουργίας και συντήρηση

Πριν από την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης, πρέπει να ελεγχθούν όλα τα εξαρτήματα για να διασφαλιστεί ότι λειτουργούν σωστά. Επιπλέον, πρέπει να ελεγχθεί η ομοιόμορφη ροή μέσω των οριζοντίων συλλεκτών και των σωληνώσεων και να ρυθμιστεί εκ νέου εάν δεν είναι η προβλεπόμενη. Ο οριζόντιος συλλέκτης λειτουργεί με μη ομοιόμορφη ροή και αυτό αναπόφευκτα οδηγεί σε μη ομοιόμορφη εξαγωγή θερμότητας και ως εκ τούτου σε μεμονωμένα μέρη του συλλέκτη παρατηρείται υπερφόρτωση. Οι οριζόντιες εγκαταστάσεις συλλεκτών πρέπει σε κάθε περίπτωση να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το υγρό μεταφοράς να μην μπορεί να διαφύγει από το σύστημα.

Όσον αφορά στην παρακολούθηση λειτουργίας, πρέπει να σημειωθεί πως υπεύθυνος σε κάθε περίπτωση είναι ο χειριστής και για οποιαδήποτε αλλαγή που κάνει, θα πρέπει να ενημερώνει την αρχή που είναι υπεύθυνη για την άδεια λειτουργίας του συστήματος. Οι οριζόντιες εγκαταστάσεις συλλεκτών πρέπει να φέρουν αυτόματες συσκευές ανίχνευσης διαρροών και ο έλεγχος για διαρροές τόσο στο συλλέκτη όσο και στη γεωθερμική αντλία θερμότητας θα πρέπει να γίνονται τακτικά (τουλάχιστον κάθε τρεις μήνες).

Οι απαιτήσεις σε συντήρηση των συστημάτων οριζοντίων συλλεκτών είναι ίδιες με αυτές των κατακόρυφων συστημάτων και περιεγράφηκαν στην Ενότητα 3.1.6 (Sass, et al., 2012, pp. 207-209).

3.2.6 Επιδράσεις λειτουργίας

Η λειτουργία οριζοντίων συλλεκτών έχει ως αποτέλεσμα επιπτώσεις στο έδαφος, τα υπόγεια ύδατα και τη βλάστηση. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω.

❖ Μηχανική εδάφους

Ένα οριζόντιο σύστημα συλλογής με μικρό μέγεθος μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό σώματος καταψυγμένου εδάφους. Σε εδάφη ευαίσθητα στον παγετό, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση του εδάφους, η συνέπεια του οποίου είναι η ζημία που προκαλείται από την ανύψωση. Επιπλέον, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, η αύξηση του όγκου που προκαλείται από την κατάψυξη δεν εξαφανίζεται αμέσως μετά την απόψυξη του εδάφους. Ο σχηματισμός πάγου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία στρώματος εδάφους με συνοχή πολλού πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη, το οποίο μπορεί να προκαλέσει κατολισθήσεις.

❖ Υπόγεια ύδατα

Εάν η στάθμη του νερού αυξάνεται μέχρι το επίπεδο του συλλέκτη, επηρεάζει τη θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων. Τόσο η άνοδος όσο και η πτώση της θερμοκρασίας μπορούν με τη σειρά τους να έχουν επιπτώσεις στις φυσικές βιολογικές διεργασίες στα

υπόγεια ύδατα. Εάν αποδειχθούν επιπτώσεις στα υπόγεια ύδατα, η κατασκευή και η λειτουργία ενός οριζοντίου συστήματος αντιπροσωπεύει τη χρήση ενός υδατικού συστήματος και επομένως απαιτείται άδεια σύμφωνα με τη νομοθεσία περί υδάτων, συνεπώς η αδειόδοτηση γίνεται πιο δύσκολη.

❖ Βλάστηση

Κατά τη λειτουργία ενός οριζόντιου συστήματος αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας η βλάστηση πάνω από το επίπεδο του συλλέκτη μπορεί να επηρεαστεί. Η ψύξη της ζώνης βλάστησης μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην ανάπτυξη των φυτών. Προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή των σωλήνων του συλλέκτη, δεν επιτρέπεται η φύτευση δέντρων και θάμνων με βαθιές ρίζες στην επιφάνεια πάνω από έναν οριζόντιο συλλέκτη (Sass, et al., 2012, pp. 209-210).

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

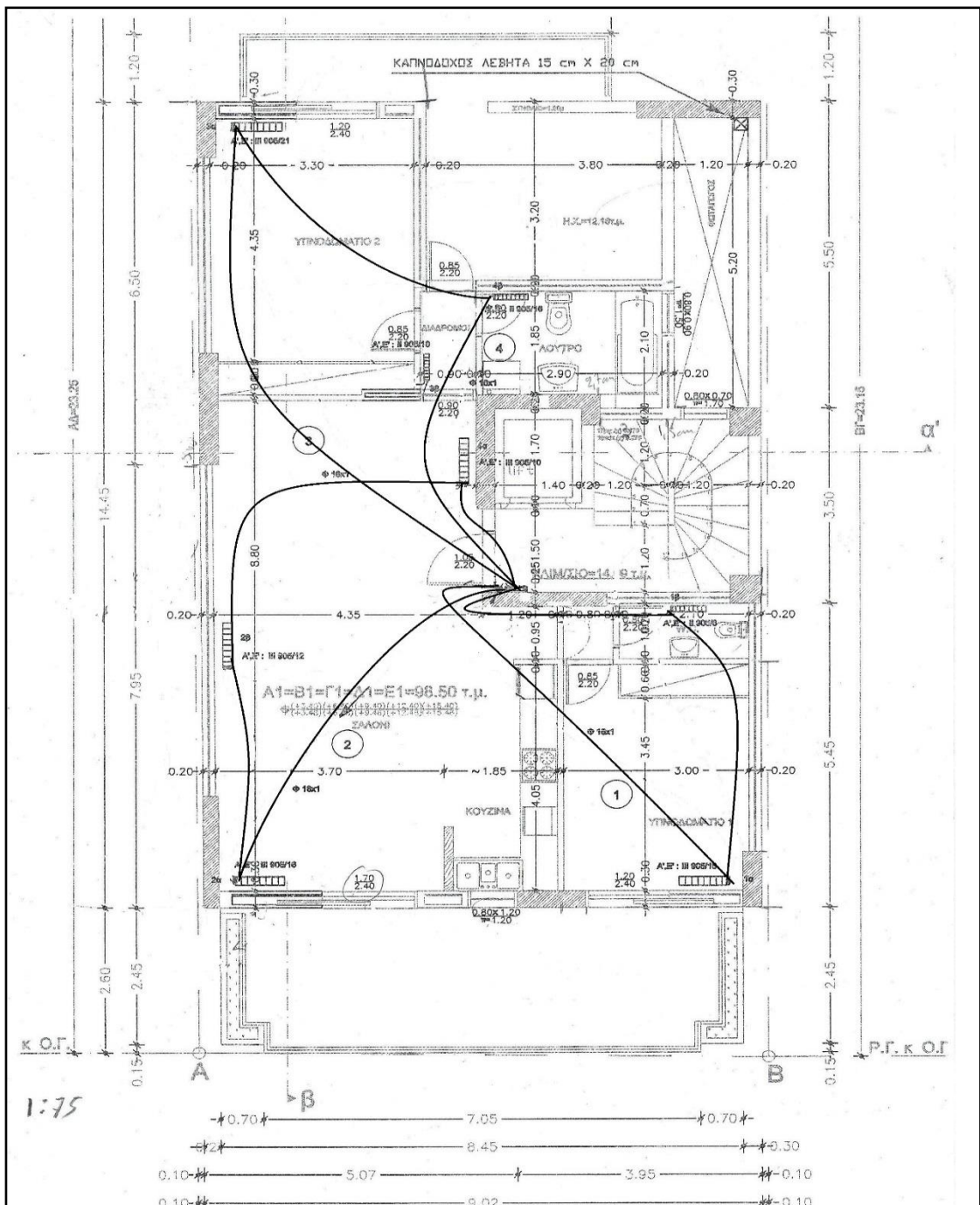
Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί ενεργειακή μελέτη ως προς την κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση-ψύξη και ζεστού νερού χρήσης (ZNX) της υπό μελέτη κατοικίας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της ενεργειακής ζήτησης έγινε με τη χρήση του ανοιχτού λογισμικού easyKENAK. Στο λογισμικό πραγματοποιούνται υπολογισμοί για τον καθορισμό της ζήτησης του κτηριακού κελύφους σύμφωνα με τη μέθοδο ημι-σταθερής κατάστασης μηνιαίου βήματος, όπως αυτή ορίζεται σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN ISO 13790. Επιπλέον, όλες οι παράμετροι υπολογισμού βασίζονται στις Τεχνικές Οδηγίες του Τεχνικού Επιμελητηρίου (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 2071-1, 2, 3/ 2010).

Ως ενεργειακή ζήτηση νοείται η ανάγκη σε θέρμανση ή ψύξη του κτηρίου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μηχανικό μέσο που την παράγει και τη διανέμει. Ουσιαστικά, υπολογίζεται η ενέργεια που απαιτείται να αποδοθεί στο κτίριο από τα θερμαντικά και κλιματιστικά μέσα, εξασφαλίζοντας επίπεδα θερμικής άνεσης. Η τελική/πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται με τη χρήση συντελεστών/ βαθμών απόδοσης των κλιματιστικών μέσων (Ανδρουτσόπουλος, et al., 2007) (Στρωτός, 2018).

Το ανοιχτό λογισμικό easyKENAK που χρησιμοποιείται για την ενεργειακή επιθεώρηση κτηρίων, στα αποτελέσματά του, εκτιμά την ενεργειακή ζήτηση σε kWh/m².

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

Η κατοικία που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι μια κατοικία με πυλωτή στην περιοχή του Ν. Ηρακλείου Αττικής χτισμένη σε οικόπεδο συνολικής έκτασης 250m². Ο εσωτερικός χώρος της οικίας αποτελείται από 5 διαφορετικά δωμάτια συνολικού εμβαδού 98,5m² και μπαλκόνι όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 4.1.



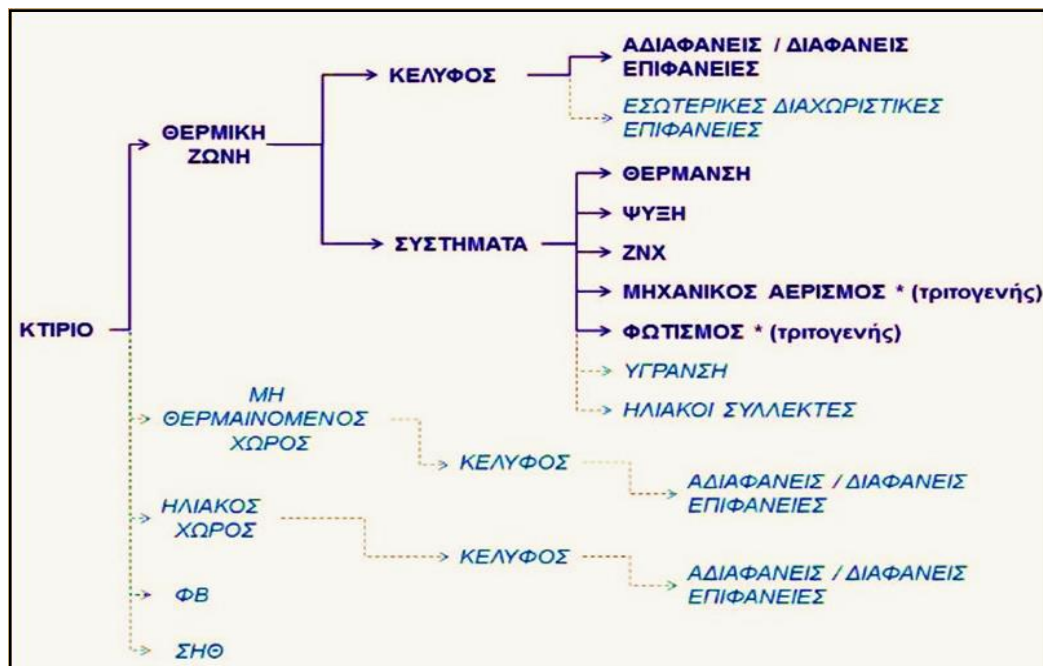
Εικόνα 4.1: Κάτοψη κατοικίας

4.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ EASY-KENAK

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα στοιχεία τα οποία εισήχθησαν στο easyKENAK.

Η διαδικασία χωρίζεται σε 5 τμήματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.2 ως εξής:

- 1) Αρχικοποίηση
- 2) Σχεδίαση
- 3) Κέλυφος
- 4) Συστήματα
- 5) Αποτελέσματα



Εικόνα 4.2: Δομή εισαγωγής δεδομένων στο easy-KENAK

Πηγή: TEE-KENAK, 2020

4.2.1 Αρχικοποίηση

Στο πρώτο στάδιο θα πρέπει να καθοριστούν βασικά στοιχεία του κτηρίου όπως τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής, η κατηγορία (τύπος) κτηρίου, ο τύπος των αδιαφανών και διαφανών στοιχείων, ο συντελεστής απορροφητικότητας (α) και ο συντελεστής εκπομπής (ϵ).

❖ Κλιματολογικά δεδομένα:

Σύμφωνα με το Άρθρο 6 του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης των Κτηρίων η ελληνική επικράτεια χωρίζεται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες. Η εν λόγω κατοικία κατατάσσεται στην Β' Κλιματική Ζώνη (Ν. Φιλαδέλφεια Αττικής).

❖ Κατηγορία (τύπος) Κτηρίου:

Δεδομένου πως η οικοδομική άδεια της κατοικίας εκδόθηκε το 1989 το κτίριο θεωρείται «Παλιό κτίριο».

❖ Τύπος αδιαφανών στοιχείων:

Βάσει της περιόδου έκδοσης της οικοδομικής άδειας (1989), η κατοικία ανήκει στην κατηγορία «με ΚΘΚ-1979 με προσαύξηση για θερμογέφυρες».

❖ Τύπος διαφανών στοιχείων:

Ο τύπος των αδιαφανών στοιχείων της κατοικίας είναι «Ανοιγόμενα, μεταλλικό πλαίσιο με Θ/Δ 12mm, δίδυμος υαλοπίνακας» .

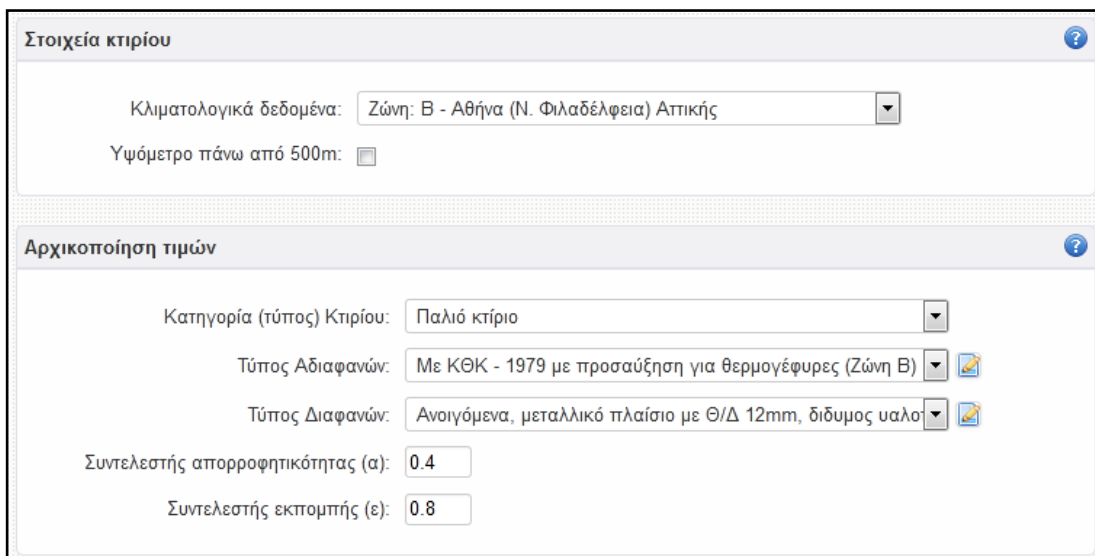
❖ Συντελεστής απορροφητικότητας (α):

Αφορά την απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία από την εξωτερική πλευρά της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Εξαρτάται κυρίως από τη διαμόρφωση της τελικής επιφάνειας, δηλαδή από το χρώμα και την υφή της. Για το υπό μελέτη κτίριο, η τιμή απορροφητικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία τέθηκε ίση με 0,4 διότι η εξωτερική επιφάνεια του κτηρίου έχει ανοιχτόχρωμο επίχρισμα (ανοιχτό μπεζ) σύμφωνα με τον Πίνακα 3.14 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

❖ Συντελεστής εκπομπής (ε):

Αφορά το ποσοστό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας που εκπέμπεται προς το περιβάλλον με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας από μια εξωτερική επιφάνεια. Για το υπό μελέτη κτίριο ο συντελεστής εκπομπής τέθηκε ίσος με 0,8 (σύνθετες δομικό υλικό) σύμφωνα με τον Πίνακα 3.15 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

Στην Εικόνα 4.3 φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό easyKENAK.



Στοιχεία κτηρίου

Κλιματολογικά δεδομένα: Ζώνη: Β - Αθήνα (Ν. Φιλαδέλφεια) Αττικής

Υψόμετρο πάνω από 500m:

Αρχικοποίηση τιμών

Κατηγορία (τύπος) Κτηρίου: Παλιό κτίριο

Τύπος Αδιαφανών: Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θερμογέφυρες (Ζώνη Β)

Τύπος Διαφανών: Ανοιγόμενα, μεταλλικό πλαίσιο με Θ/Δ 12mm, δίδυμος υαλο

Συντελεστής απορροφητικότητας (α): 0.4

Συντελεστής εκπομπής (ε): 0.8

Εικόνα 4.3: Αρχικά στοιχεία κτηρίου easy-KENAK

4.2.2 Σχεδίαση

Το δεύτερο στάδιο χωρίζεται σε τρία σημεία (Ιδιότητες, Δάπεδα και Οροφές, Περίγραμμα). Αρχικά, θα πρέπει να καθοριστούν οι θερμικές ζώνες (Θ.Ζ) του υπό μελέτη κτηρίου και έπειτα να καταγραφούν βασικές ιδιότητες αυτών. Εν συνεχεία καθορίζονται τα δάπεδα και οι οροφές. Τέλος, σχεδιάζεται το περίγραμμα του κτηρίου.

Λαμβάνοντας υπόψιν τους κανόνες διαχωρισμού του κτηρίου σε θερμικές ζώνες, το εξεταζόμενο κτίριο χωρίζεται σε μια θερμική ζώνη.

A) Ιδιότητες

❖ Χρήση:

Συμπληρώνεται η χρήση της εξεταζόμενης Θ.Ζ. Για το υπό μελέτη κτίριο η χρήση είναι «Κατοικίας (Μονοκατοικία, πολυκατοικία)».

❖ Αριθμός Υ/Δ:

Αφορά τον αριθμό των υπνοδωματίων και χρησιμοποιείται μόνο για τη χρήση κατοικίας, για τον υπολογισμό της μέσης κατανάλωσης ZNX ανά έτος. Για την εν λόγω κατοικία ο αριθμός Υ/Δ είναι 2.

❖ Επιφάνεια Θ.Ζ.:

Αφορά την επιφάνεια της Θ.Ζ και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης κατανάλωσης ZNX για όλες τις χρήσεις καθώς και για τον υπολογισμό νωπού αέρα και γενικού φωτισμού για όλες τις χρήσεις. Στο εξεταζόμενο κτίριο η επιφάνεια Θ.Ζ. ισούται με την εσωτερική επιφάνεια του κτηρίου, δηλαδή 98,5 m².

❖ Μέση κατανάλωση Z.N.X.:

Το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα βάσει των 2 παραπάνω στοιχείων την μέση κατανάλωση Z.N.X. ωστόσο μπορεί να οριστεί και κατευθείαν από το χρήστη. Στο υπό μελέτη κτίριο υπολογίστηκε αυτόματα από το easyKENAK και ισούται με 54,76 m³/έτος σε θερμοκρασία νερού 45 °C.

❖ Κατηγορία διατάξεων ελέγχου και αυτοματισμών:

Καθορίζεται η κατηγορία διατάξεων αυτομάτου ελέγχου που αφορούν τις μονάδες παραγωγής θέρμανσης/κλιματισμού, μονάδες αερισμού, το δίκτυο διανομής και τις τερματικές μονάδες της εκάστοτε Θ.Ζ. σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5. της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Στο εν λόγω κτίριο δεν υπάρχουν αντίστοιχες διατάξεις αυτοματισμού, συνεπώς επιλέγεται η κατηγορία «Δ».

❖ Ανηγμένη θερμοχωρητικότητα:

Εισάγεται η μέση ανηγμένη θερμοχωρητικότητα της κατασκευής σύμφωνα με τις τυπικές τιμές του Πίνακα 3.13 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Το εξεταζόμενο κτίριο συγκαταλέγεται στη κατηγορία «Φέρων οργανισμός από σκυρόδεμα και στοιχεία πλήρωσης από διάτρητες οπτόπλινθους» και η αντίστοιχη τιμή ισούται με 280 kJ/m²K».

❖ Συντελεστής μετάδοσης θερμότητας λόγω θερμογεφυρών:

Αφορά το γινόμενο $\psi \cdot l$ (W/K)

όπου :

Ψ : Ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας (W/mK)

l : Το μήκος της θερμογέφυρας (m)

βάσει της περιόδου έκδοσης της οικοδομικής άδειας (1989) οι θερμογέφυρες δεν υπολογίζονται αναλυτικά στις ενεργειακές μελέτες σύμφωνα με το άρθρο 3.3 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

❖ Αρ. καμινάδων:

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αερισμού λόγω αεροστεγανότητας. Η διείσδυση αέρα από καμινάδες (τζακιού, σόμπας, κλπ) λαμβάνεται 20 m³/h. Για το κτίριο μελέτης ο αριθμός καμινάδων είναι 0.

❖ Αρ. θυρίδων εξαερισμού:

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό αερισμού λόγω αεροστεγανότητας. Η διείσδυση αέρα από θυρίδες εξαερισμού (πχ για συσκευές φυσικού αερίου) λαμβάνεται 10 m³/h. Για το κτίριο μελέτης ο αριθμός θυρίδων εξαερισμού είναι 0.

❖ Αρ. εξώθυρων:

Δηλώνεται ο αριθμός εξώθυρων για τον υπολογισμό αερισμού λόγω ύπαρξης αυτών. Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τον πίνακα 3.23 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-1/2010. Για το κτίριο μελέτης ο αριθμός εξώθυρων είναι 0.

❖ Αρ. ανεμιστήρων οροφής:

Οι ανεμιστήρες οροφής βελτιώνουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης σε κλιματιζόμενους και μη κλιματιζόμενους χώρους. Οι ανεμιστήρες οροφής λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς του ψυκτικού φορτίου, όταν καλύπτουν τουλάχιστον το 50% της επιφάνειας του κτηρίου ή της θερμικής ζώνης. Για το κτίριο μελέτης ο αριθμός ανεμιστήρων οροφής είναι 0.

❖ Μεικτό ύψους ορόφου (m):

Καταγράφεται το ύψος από το πάνω μέρος της κάτω πλάκας μέχρι το κάτω μέρος της άνω πλάκας του προς επιθεώρηση κτηρίου. Στο εν λόγω κτίριο ισούται με 3,2 m.

❖ Καθαρό ύψος (m):

Είναι το ύψος από το πάνω μέρος της κάτω πλάκας μέχρι το κάτω μέρος της άνω πλάκας του προς επιθεώρηση κτηρίου. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό γωνίας σκίασης από προβόλους. Στο εν λόγω κτίριο το καθαρό ύψος ισούται με 3 m.

❖ Άνω στάθμη διαφανών (m):

Αφορά την επικρατούσα άνω στάθμη των διαφανών επιφανειών. Η τιμή αυτή αρχικοποιεί την άνω στάθμη όλων των διαφανών επιφανειών της ΘΖ και μπορεί να αλλάχθει στο παράθυρο επεξεργασίας διαφανούς. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό γωνίας σκίασης διαφανούς από προβόλους. Για τη μελέτη αυτή τέθηκε ίση με 2,2 m.

❖ Εσοχή διαφανών (m):

Πρόκειται για την εσοχή των διαφανών από την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους. Η τιμή αυτή αρχικοποιεί την εσοχή όλων των διαφανών επιφανειών της ΘΖ και μπορεί να αλλάχθει στο παράθυρο επεξεργασίας διαφανούς. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό γωνίας σκίασης διαφανούς από προβόλους και πλευρικές προεξοχές. Για τη μελέτη αυτή τέθηκε ίση με 0,1 m. (TEE-KENAK, 2020)

❖ Ποσοστό φέροντος οργανισμού κτηρίου (%):

Σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η αποτύπωση του φέροντος οργανισμού, το εμβαδόν του μπορεί να ληφθεί από αντίστοιχο πίνακα της τεχνικής οδηγίας, ως ποσοστό επί της όψης του κτηρίου. Για κτίρια με περίοδο έκδοσης οικοδομικής άδειας (1980-1999) και έως 2 ορόφους το ποσοστό αυτό ισούται με 18%. (TEE-KENAK, 2020)

❖ Ύψος κτηρίου πάνω από την οροφή (m):

Αφορά το ύψος του κτηρίου επάνω από την οροφή της εξεταζόμενης όψης. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της γωνίας σκίασης από εμπόδια ορίζοντα και πλευρικές προεξοχές. Στο εν λόγω κτίριο ισούται με 0 m.

Στην Εικόνα 4.4 φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό easyKENAK.

Εικόνα 4.4: Ιδιότητες Θ.Ζ. κτηρίου easy-KENAK

B) Δάπεδα και οροφές

Στο σημείο αυτό δηλώνονται οι οροφές και τα δάπεδα της υπό μελέτη κατοικίας.

❖ Συντελεστής θερμοπερατότητας λ (W/m^2K):

Καταγράφεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου. Επειδή δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την κατασκευή, χρησιμοποιήθηκε ο τρόπος θεώρησης του συντελεστή U όπως ορίζεται στον πίνακα 3.6 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Βάσει της περιόδου έκδοσης της οικοδομικής άδειας (1989) το εν μελέτη κτίριο ανήκει στη κατηγορία «Περίοδος 1979-2010 ισχύς Κ.Θ.Κ. Πλημμελής εφαρμογή Κ.Θ.Κ.». Δεδομένων αυτών ο συντελεστής θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων καθορίστηκε σύμφωνα με τον πίνακα 3.5 για τη ζώνη Β Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/210. Από τον προαναφερθέντα πίνακα προκύπτει ο συντελεστής θερμοπερατότητας για οροφή και δάπεδο (πυλωτή) σε επαφή με τον αέρα ίσος με $0,5 W/m^2K$.

❖ Βάθος:

Δηλώνεται το βάθος που βρίσκονται οι επιφάνειες που είναι σε επαφή με το έδαφος.

❖ Περίμετρος:

Δηλώνεται η περίπτερος της εκτεθειμένης επιφάνειας στο έδαφος.

❖ Προσανατολισμός γ (deg):

Ο προσανατολισμός μιας επιφάνειας ορίζεται ως η απόκλιση της καθέτου στην επιφάνεια προς την κατεύθυνση του βορρά σύμφωνα με τον πίνακα 3.2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

❖ Κλίση β (deg):

Αφορά την κλίση του δομικού στοιχείου, μετρούμενη μεταξύ της καθέτου στην επιφάνεια της κατακόρυφου (τοπικό ζενίθ). Στο εν λόγω κτίριο η οροφή είναι επίπεδη οπότε ο συντελεστής ισούται με 0.

❖ Συντελεστές σκιασμού:

Οι συντελεστές σκιασμού για οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες εξαρτάται από την μορφολογία του περιβάλλοντος χώρου (κοντινά κτίρια, δέντρα, ηλιακοί, κλιματιστικά, στηθαία κλπ). Για λόγους απλοποίησης (TOTEE-1, παρ 3.3) ο συντελεστής σκίασης αρχικοποιείται 0,9. Όλοι οι άλλοι συντελεστές σκιασμού (από πρόβολο και πλευρικό εμπόδιο) θεωρούνται 1. (TEE-KENAK, 2020)

Στην Εικόνα 4.5 φαίνονται τα παραπάνω στοιχεία όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό easyKENAK.

Δάπεδα					
Επιφάνεια(m ²)	Επαφή με	U(W/m ² K)	Βάθος(m)	Περίμετρος(m)	
98.5	Αέρας	0.5			✘

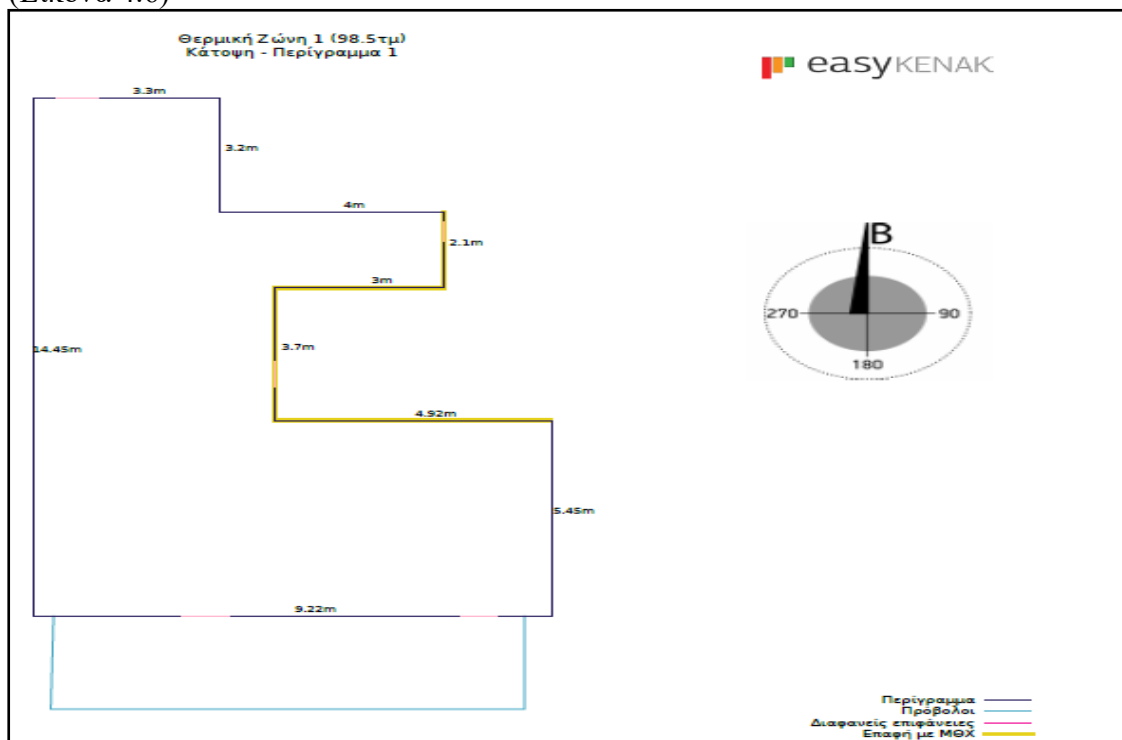
Οροφές									
Επιφάνεια...	Επαφή με	U(W/m ² K)	γ(deg)	β(deg)	α	ε	Σκιασμ... Χειμώνα	Σκιασμός Καλοκαίρι	
98.5	Αέρας	0.7	0°	0°	0.65	0.8	0.9	0.9	✘

Εικόνα 4.5 : Οροφές και δάπεδα κτηρίου easy-KENAK

Γ) Περίγραμμα

Στο στάδιο αυτό σχεδιάζεται το κέλυφος του υπό μελέτη κτηρίου. Σχεδιάζονται τμήματα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ΜΘΧ ή έδαφος. Τα τμήματα τα οποία εφάπτονται με όμορρα δεν σχεδιάζονται. Το λογισμικό πέραν των παραπάνω παρέχει τη δυνατότητα να σχεδιαστούν πρόβολοι, τέντες, διαφανείς επιφάνειες, πλευρικά εμπόδια τοιχία, δοκάρια και μεταβολές ύψους. Απαιτείται η δήλωση του προσανατολισμού ενός τμήματος μόνο (σχεδιάζοντας αντίθετα με τη φορά του ρολογιού) και τα άλλα τμήματα συμπληρώνονται αυτόματα. Τέλος, δηλώντας το σχετικό ύψος εμποδίων από το δάπεδο της εξεταζόμενης όψης και την οριζόντια απόσταση του εμποδίου υπολογίζεται η γωνία θέασης του εμποδίου από το μέσο της εξεταζόμενης όψης.

Έχοντας την κάτοψη της εξεταζόμενης κατοικίας και δεδομένου πως βρίσκεται σε έκταση 250 m², δεν υπάρχουν σημαντικά εμπόδια που να επηρεάζουν την κατοικία, δημιουργήθηκε το περίγραμμα του κελύφους σε κάτοψη με τις εσωτερικές διαστάσεις. (Εικόνα 4.6)



Εικόνα 4.6: Περίγραμμα οικίας easy-KENAK

4.2.3 Κέλυφος

Στο τρίτο στάδιο καταγράφονται όλα τα αδιαφανή και διαφανή στοιχεία του εξεταζόμενου κτηρίου.

❖ (Ε συν) Εμβαδόν (m²):

Αφορά το συνολικό εμβαδόν του κάθε τμήματος που προκύπτει από το μήκος του τμήματος επί το μεικτό ύψος έχοντας αφαιρεθεί διαφανείς επιφάνειες και αδιαφανείς πόρτες.

❖ Συντελεστής θερμοπερατότητας λ (W/m²K):

Καταγράφεται ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου. Για τα αδιαφανή στοιχεία καταγράφεται σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν δηλωθεί στην αρχικοποίηση του κτηρίου ενώ συνυπολογίζεται και η προσαύξηση για τον υπολογισμό των θερμογεφυρών. Για τα διαφανή στοιχεία καταγράφηκε ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του κουφώματος μαζί με τον υαλοπίνακα σύμφωνα με τον πίνακα 3.12 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701/1-2010.

❖ Εμπόδια ορίζοντα-Πρόβολουσ- Τέντες - Εμπόδια από πλευρικές προεξοχές:

Αφορούν τη σκίαση του κτηρίου από τυχόν εμπόδια ορίζοντα, πλευρικά εμπόδια από πρόβολουσ και τέντες. Αφορά τόσο τα αδιαφανείς όσο και τα διαφανείς στοιχεία του κτηρίου. Υπολογίζονται σύμφωνα με τους πίνακες 3.18-3.19 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

❖ Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (g_w):

Δηλώνεται ο συντελεστής διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία των αδιαφανών επιφανειών, σύμφωνα με τον πίνακα 3.17 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

❖ Διείσδυση αέρα από χαραμάδες (V):

Συμπληρώνονται οι τιμές αερισμού λόγω ύπαρξης χαραμάδων ανά μονάδα επιφάνειας σύμφωνα με τον Πίνακα 3.26 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701/1-2010.

Στην Εικόνα 4.7 φαίνονται τα διαφανές στοιχεία του εξεταζόμενου κτηρίου ενώ στην Εικόνα 4.8 τα αδιαφανές στοιχεία όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό easyKENAK.

#	ΘΖ	Περ.	Τύπος	Περιγραφή	Προσαν. γ	Κλίση β	Μήκος	Ύψος	Εμβαδό	U _w	g _w	V	Ε.Οριζ	Πρόβολοι	Τέντες	Πλ.Εμπ.
1	1	1	Ανοιγόμενο κούφωμα	Ανοιγόμενα, μεταλλικ...	0	90	1.2	1.4	1.68	3.20	0.54	11.42		8°		
2	1	1	Ανοιγόμενο κούφωμα	Ανοιγόμενα, μεταλλικ...	180	90	1.7	2.4	4.08	3.20	0.54	21.62		55°		
3	1	1	Ανοιγόμενο κούφωμα	Ανοιγόμενα, μεταλλικ...	180	90	1.2	2.2	2.64	3.20	0.54	13.99		54°		
4	1	1	Ανοιγόμενο κούφωμα	(Σε ΜΘΧ) Ανοιγόμενα...	90	90	0.8	0.9	0.72	3.20	0.54	0.00				

Εικόνα 4.7: Αδιαφανή στοιχεία κτηρίου easy-KENAK

#	ΘΖ	Περιγραφή	Τύπος	Περιγραφή	Επιφάνη	Προσαν. γ	Κλίση β	α	ε	Ε συν	U σταθ	Εμπ. Οριζ	Πρόβολοι	Τέντες	Πλ.Εμπ.
1	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	0°	90°	0.4	0.8	8.88	0.90				-
2	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	270°	90°	0.4	0.8	46.24	0.90				-
3	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	180°	90°	0.4	0.8	1.12	0.90				-
4	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	180°	90°	0.4	0.8	20.16	0.90		60°		-
5	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	180°	90°	0.4	0.8	1.50	0.90				-
6	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	90°	90°	0.4	0.8	17.44	0.90				-
7	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	0°	90°	0.4	0.8	12.80	0.90				-
8	1	1	Τοίχος	Με ΚΘΚ - 1979 με προσαύξηση για θ...	Αέρας	90°	90°	0.4	0.8	10.24	0.90				-
9	1	1	Τοίχος	Επιφάνη με ΜΘΧ (b=0.5)	Μ.Θ.Χ.	0°	90°	0	0	40.83	1.90				-
10	1	1	Πόρτα	Επιφάνη με ΜΘΧ (b=0.5)	Μ.Θ.Χ.	90°	90°	0	0	2.31	2.70				-
11	-	1	-	Πυλωτή	Αέρας	0°	180°	0	0	98.50	0.50				-
12	-	1	-	Οροφή	Αέρας	0°	0°	0.65	0.8	98.50	0.50				-

Εικόνα 4.8: Αδιαφανή στοιχεία κτηρίου Easy-KENAK

4.2.4 Συστήματα

Στο τέταρτο στάδιο θα πρέπει να δηλωθούν τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, ΖΝΧ. Αυτά όπως ήδη έχει προαναφερθεί δεν έχουν σημασία κατά τον υπολογισμό των αναγκών θέρμανσης-ψύξης του κτηρίου και δηλώνονται μόνο για την ενεργειακή πιστοποίηση. Δεδομένου αυτού, θα δηλωθούν τα θεωρητικά συστήματα όπως αυτά αναγράφονται στις παραγράφους 4.1, 4.2 και 4,8 αντίστοιχα της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701/1-2010.

4.2.5 Αποτελέσματα

Οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της κατοικίας, με βάση τα χαρακτηριστικά του κελύφους, φαίνονται στην Εικόνα 4.9. Οι ανάγκες για θέρμανση είναι σχεδόν διπλάσιες από ότι οι ανάγκες για ψύξη.

Ενεργειακές απαιτήσεις (kWh/m ²)	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μάι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ετήσιο
Θέρμανση	20.8	16.9	13.2	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	17.0	77.3
Ψύξη	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	8.3	15.0	13.2	1.5	0.0	0.0	0.0	38.6
Υγρανση	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ZNX	1.9	1.7	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.4	1.6	1.8	17.6

Εικόνα 4.9: Ενεργειακές απαιτήσεις κτηρίου

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ-ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΣ

Γνωρίζοντας την θερμαινόμενη και ψυχόμενη επιφάνεια του κτηρίου και θεωρώντας πως τα αντίστοιχα συστήματα θέρμανσης-ψύξης θα λειτουργούν 8 ώρες/ημέρα, υπολογίζονται οι ετήσιες ανάγκες για θέρμανση και ψύξη καθώς και η μέγιστη θερμική και ψυκτική ισχύς.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως από εδώ και πέρα σε όλα τα μεγέθη ο δείκτης «h» υποδηλώνει πως το μέγεθος αφορά τη θέρμανση ενώ ο δείκτης «c» την ψύξη.

$$\text{Ετήσια ενέργεια για θέρμανση: } E_h = 77,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 98,50\text{m}^2 = 7614,10 \text{ kWh} \quad (4.1)$$

$$\text{Ετήσια ενέργεια για ψύξη: } E_c = 38,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 98,50\text{m}^2 = 3802,10 \text{ kWh} \quad (4.2)$$

$$\text{Ετήσια ενέργεια για ZNX: } E_{\text{ZNX}} = 17,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * 98,50 \text{m}^2 = 1733,6 \text{ kWh} \quad (4.3)$$

Για την εύρεση μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες για τους δυσμενέστερους μήνες. Δηλαδή, για θέρμανση ο Ιανουάριος ενώ για ψύξη ο Ιούλιος. Τέλος, να σημειωθεί πως στη μέγιστη θερμική ισχύς συνυπολογίζεται και η μέγιστη απαίτηση για ZNX που εμφανίζεται τον Ιανουάριο.

$$\text{Μέγιστη θερμική ισχύς: } \mathbf{q_h} = \frac{\left(20,8 + 1,9 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right) \cdot 98,5 \text{ m}^2}{8 \text{ h} \cdot 30 \text{ days}} = \frac{9347,7 \text{ kWh}}{240 \text{ h}} = \mathbf{9,4 \text{ kW}} \quad (4.4)$$

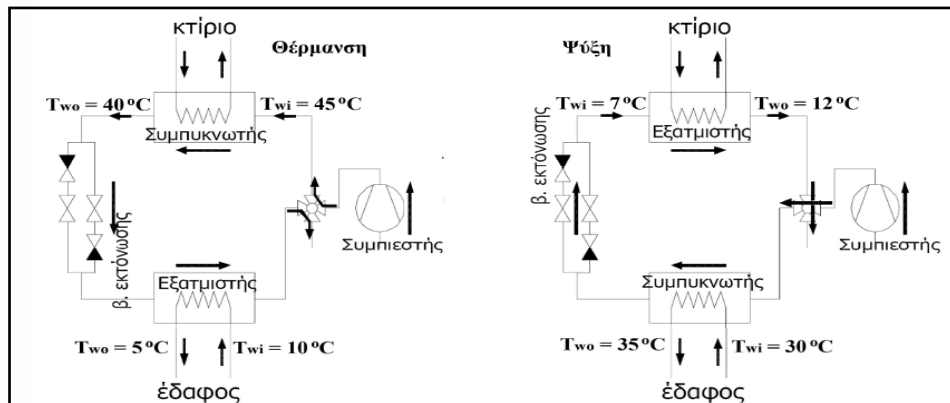
$$\text{Μέγιστη ψυκτική ισχύς: } \mathbf{q_c} = \frac{15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 98,5 \text{ m}^2}{8 \text{ h} \cdot 30 \text{ days}} = \frac{1477,5 \text{ kWh}}{240 \text{ h}} = \mathbf{6,2 \text{ kW}} \quad (4.5)$$

Άρα, από τις Εξισώσεις 4.4 και 4.5 προκύπτει πως η μέγιστη θερμική ισχύς ισούται με 9,4 kw ενώ η μέγιστη ψυκτική ισχύς ισούται με 6,2 kw Αυτό σημαίνει πως η γεωθερμική αντλία που θα επιλεγεί θα πρέπει να ικανοποιεί τουλάχιστον αυτές τις απαιτήσεις.

5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Στο 5^ο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση των προτεινόμενων γεωθερμικών συστημάτων. Αρχικά σχεδιάζεται το οριζόντιο σύστημα και έπειτα το κατακόρυφο. Ακολουθεί σύγκριση αυτών ως προς το κόστος εγκατάστασης και την απαιτούμενη χρήση γης και επιλέγεται το καταλληλότερο για την εξεταζόμενη περίπτωση.

Για τις ανάγκες των υπολογισμών επιλέγεται γεωθερμική αντλία νερού-νερού η οποία καλύπτει πλήρως τόσο τα θερμικά όσο και τα ψυκτικά φορτία αιχμής, ενώ οι εποχιακοί συντελεστές απόδοσης (COP=3,5 και EER=4,4) και οι θερμοκρασίες λειτουργίας της ΓΑΘ ανά εποχή (Εικόνα 5.1) επιλέγονται βάσει της βιβλιογραφίας.



Εικόνα 5.1: Θερμοκρασίες λειτουργίας ΓΑΘ

Πηγή: Κατσαπρακάκης, 2015

5.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Κατά το σχεδιασμό οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος απαιτείται ο υπολογισμός του μήκους του εναλλάκτη που χρειάζεται, η επιλογή κυκλοφορητή νερού και δοχείου διαστολής. Σε περιπτώσεις που το σύστημα θα λειτουργήσει και για ΖΝΧ απαιτείται η επιλογή κατάλληλου μπόιλερ.

5.1.1 Υπολογισμός μήκους οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη

Το απαιτούμενο μήκος του οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη υπολογίζεται από τις σχέσεις 5.1 και 5.2.

$$\text{Απαιτούμενο μήκος γεωεναλλάκτη } L_c(\text{m}) = \dot{m}_{w-c} \cdot C_p \cdot R_{\text{tot-c}} \cdot \ln \left(\frac{t_{w0,c}}{t_{wi,c}} \right) \quad (5.1)$$

$$\text{Απαιτούμενο μήκος γεωεναλλάκτη } L_h(\text{m}) = \dot{m}_{w-h} \cdot C_p \cdot R_{\text{tot-h}} \cdot \ln\left(\frac{t_{w_o,h}}{t_{w_i,h}}\right) \quad (5.2)$$

όπου:

\dot{m}_w : Παροχή μάζας νερού [kg/s] (σχέσεις 5.4 και 5.5)

C_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού [4,184 kJ/(kg·K)]

t_{w_i} : Θερμοκρασία εισόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη [K] (Πίνακες 5.1 και 5.2)

t_{w_o} : Θερμοκρασία εξόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη [K] (Πίνακες 5.1 και 5.2)

R_{tot} : Συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος. [m·K/W] (σχέσεις 5.7 και 5.8)

Ενώ, η σχέση που συνδέει το τελικό μήκος του γεωεναλλάκτη με τις σχέσεις (5.1) και (5.2) είναι :

$$L_{hor} = \text{MAX}\{L_c; L_h\} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Παροχή μάζας νερού } \dot{m}_{w-c} &= \frac{q_c}{C_p \cdot (t_{w_i,c} - t_{w_o,c})} = \frac{6,2 \text{ kJ/sec}}{4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (12 - 7)\text{K}} \\ &= 0,2964 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Παροχή μάζας νερού } \dot{m}_{w-h} &= \frac{q_h}{C_p \cdot (t_{w_i,h} - t_{w_o,h})} = \frac{9,4 \text{ kJ/sec}}{4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (10 - 5)\text{K}} \\ &= 0,4493 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) επιλέγεται η μεγαλύτερη παροχή μάζας για τη διαστασιολόγηση του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση η παροχή μάζας είναι μεγαλύτερη κατά τη λειτουργία θέρμανσης. Από την παροχή μάζας υπολογίζεται η παροχή όγκου σύμφωνα με τη σχέση (5.6).

$$\text{Παροχή όγκου } \dot{V}_w = \frac{\dot{m}_{w-h}}{\rho_w} = \frac{0,4493 \text{ kg/s}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (5.6)$$

όπου:

ρ_w : Πυκνότητα νερού [1000 kg/m³]

Γνωρίζοντας την παροχή όγκου και υποθέτοντας πως η μέγιστη ταχύτητα ροής (u) θα είναι 0,85 m/s, ώστε να επιτυγχάνεται στρωτή ροή, υπολογίζεται η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης από τη σχέση (5.7).

$$\text{Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης } D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot u}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0004 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 0,85 \text{ m/s}}} = 0,026 \text{ m} \quad (5.7)$$

όπου:

u: Ταχύτητα ροής [0,85 m/s], δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 1,5 m/s.

Από τη σχέση (5.7) επιλέγεται τυποποιημένη σωλήνωση πολυαιθυλενίου PE DN32 PN12 με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά τυποποιημένης σωλήνωσης PE DN32 PN12

Εξωτερική διάμετρος D_o (mm)	32
Πάχος τοιχώματος (mm)	3
Θερμική αγωγιμότητα λ_{pipe} (W/(m·K))	0,43

Εφόσον υπολογίστηκε η διάμετρος της σωλήνωσης και είναι γνωστός ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αυτής, υπολογίζονται οι θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος σύμφωνα με τις σχέσεις (5.7)-(5.8).

$$R_{\text{tot-c}} \left(\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \right) = R_{\text{con-c}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} \quad (5.7)$$

$$R_{\text{tot-h}} \left(\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \right) = R_{\text{con-h}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} \quad (5.8)$$

όπου:

R_{con} : Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση (m·K/W)

R_{pipe} : Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω της σωλήνωσης (m·K/W)

R_{soil} : Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος (m·K/W)

❖ Υπολογισμός θερμικής αντίστασης μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση (R_{con})

$$R_{\text{con-c}} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{w-c}} \quad (5.9)$$

$$R_{\text{con-h}} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{w-h}} \quad (5.10)$$

όπου:

h_w : Συντελεστής συναγωγής του νερού ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

$$h_w = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_w}{D_i} \quad (5.11)$$

όπου:

λ_w : Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας νερού [$0,68 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$] μέση τιμή για θερμοκρασίες νερού $5 - 45^\circ\text{C}$.

Nu : Συντελεστής Nusselt

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^n \quad (5.12)$$

όπου:

n : Παράμετρος υπολογισμού όπου ισούται με $0,4$ για θέρμανση και $0,3$ για ψύξη

Re : Αριθμός Reynolds

$$\text{Re} = \frac{u \cdot D_i}{\nu_w} = \frac{0,85 \cdot 26 \cdot 10^{-3}}{1,14 \cdot 10^{-6}} = 19386 \quad (5.13)$$

Pr : Αριθμός Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu_w}{\lambda_w} = \frac{4184 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}}{0,68} = 7,01 \quad (5.14)$$

όπου:

ν_w : Κινηματικό ιξώδες νερού για μέση θερμοκρασία 15°C ($1,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

μ_w : Δυναμικό ιξώδες νερού για μέση θερμοκρασία 15°C ($1,14 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$)

Ο υπολογισμός του συντελεστή Nu προσεγγίζεται από τη σχέση Dittus-Boelter, η οποία ισχύει για $\text{Re} > 10000$ και $0,6 < \text{Pr} < 160$.

Υπολογίζεται ο αριθμός Nu σύμφωνα με τη σχέση (5.12) και εν συνεχεία ο συντελεστής συναγωγής του νερού (h_w) σύμφωνα με τη σχέση (5.11).

$$Nu_c = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n = 0,023 \cdot 19386^{0,8} \cdot 7,01^{0,3} = 111,05 \quad (5.12a)$$

$$Nu_h = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n = 0,023 \cdot 19386^{0,8} \cdot 7,01^{0,4} = 134,93 \quad (5.12b)$$

$$h_{w-c} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{D_i} = \frac{111,05 \cdot 0,68 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)}{26 \cdot 10^{-3} m} = 2904,35 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (5.11a)$$

$$h_{w-c} = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{D_i} = \frac{134,93 \cdot 0,68 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)}{26 \cdot 10^{-3} m} = 3528,97 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (5.11b)$$

Τέλος, υπολογίζεται η θερμική αντίσταση μετάδοσης θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση όπως ορίστηκε από τους τύπους (5.9) και (5.10).

$$R_{con-c} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{w-c}} = \frac{1}{\pi \cdot 26 \cdot 10^{-3} m \cdot 2904,35 \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 0,0042 \frac{m \cdot K}{W} \quad (5.9)$$

$$R_{con-h} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{w-h}} = \frac{1}{\pi \cdot 26 \cdot 10^{-3} m \cdot 3528,97 \frac{W}{m^2 \cdot K}} = 0,0035 \frac{m \cdot K}{W} \quad (5.10)$$

❖ Υπολογισμός μεταφοράς θερμότητας μέσω της σωλήνωσης (R_{pipe})

$$R_{pipe} = \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{pipe}} = \frac{\ln \left(\frac{0,032m}{0,026m} \right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,43 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,0769 \frac{m \cdot K}{W} \quad (5.15)$$

❖ Υπολογισμός θερμικής αντίστασης μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος (R_{soil})

$$R_{soil} = \frac{1}{S \cdot \lambda_{soil}} = \frac{1}{1,09 \cdot 2 \frac{W}{m \cdot K}} = 0,4569 \frac{m \cdot K}{W} \quad (5.16)$$

όπου:

λ_{soil} : Θερμική αγωγιμότητα του εδάφους

Σε περιπτώσεις που δεν είναι γνωστός ο τύπος του εδάφους χρησιμοποιείται η τιμή $\lambda_{soil}=2 \text{ W/m}\cdot\text{k}$. (ISO, 2006)

S: Συντελεστής διαμόρφωσης αγωγιμότητας

$$S = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \left[\frac{2 \cdot d}{d_o} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot d}{d_o} \right)^2 - 1} \right]} = \frac{2 \cdot \pi}{\ln \left[\frac{2 \cdot 2,5}{32 \cdot 10^{-3}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2,5}{32 \cdot 10^{-3}} \right)^2 - 1} \right]} = 1,09 \quad (5.17)$$

όπου:

d: Βάθος τοποθέτησης οριζοντίου γεωεναλλάκτη

Αφού υπολογίστηκαν όλες οι αντιστάσεις μεταφοράς θερμότητας του συστήματος υπολογίζεται η συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος, σύμφωνα με τις σχέσεις (5.7) και (5.8).

$$R_{\text{tot-c}} = R_{\text{con-c}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} = 0,0042 + 0,0769 + 0,4569 = 0,5380 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (5.7)$$

$$R_{\text{tot-h}} = R_{\text{con-h}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{soil}} = 0,0035 + 0,0769 + 0,4569 = 0,5372 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (5.8)$$

Τέλος, υπολογίζεται το απαιτούμενο μήκος οριζοντίου γεωεναλλάκτη όπως αυτό ορίστηκε στις σχέσεις (5.1), (5.2).

$$\begin{aligned} L_c &= \dot{m}_{w-c} \cdot C_p \cdot R_{\text{tot-c}} \cdot \ln \left(\frac{t_{wo,c}}{t_{wi,c}} \right) = \\ &= 0,2964 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,5380 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot \ln \left(\frac{35^\circ\text{C}}{30^\circ\text{C}} \right) = 102 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} L_h &= \dot{m}_{w-h} \cdot C_p \cdot R_{\text{tot-h}} \cdot \ln \left(\frac{t_{wo,h}}{t_{wi,h}} \right) = \\ &= 0,4493 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,5372 \frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot \ln \left(\frac{10^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}} \right) = 694 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Για την εξασφάλιση της κάλυψης όλων των αναγκών του υπό μελέτη κτηρίου το τελικό μήκος οριζοντίου γεωθερμικού εναλλάκτη προκύπτει από τη σχέση (5.3).

$$L_{\text{hor}} = \text{MAX}\{L_c; L_h\} = \text{MAX}\{102; 694\} = \mathbf{694 \text{ m}} \quad (5.3)$$

Γενικότερα, η απόδοση του εναλλάκτη σε αυτά τα συστήματα για βάθος (2-2,5 m) και απόσταση μεταξύ τους (0,40 -0,65 m) είναι **30 W/m²** (Κατσαπρακάκης, 2015).

Χρησιμοποιώντας το μέγιστο φορτίο, υπολογίζεται κατά προσέγγιση η ελάχιστη διαθέσιμη επιφάνεια γης που απαιτείται για την τοποθέτηση οριζοντίου γεωεναλλάκτη

κλειστού βρόγχου σχέση (5.18). Το μέγιστο φορτίο σε αυτή την περίπτωση, είναι το θερμικό και ισούται με 9300 W, οπότε:

$$A_{\text{hor}} = \frac{9300 \text{ Watt}}{30 \text{ Watt/m}^2} = 311 \text{ m}^2 \quad (5.18)$$

5.1.2 Επιλογή κυκλοφορητή

Στην ενότητα αυτή θα υπολογιστούν οι συνολικές απώλειες πίεσης του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας και του συνολικού δικτύου σωληνώσεων, έτσι ώστε να γίνει η επιλογή του κατάλληλου κυκλοφορητή.

Οι συνολικές γραμμικές και τοπικές απώλειες του δικτύου ($p_{\tau,\gamma}$) υπολογίζονται από τη σχέση 5.19.

$$p_{\tau,\gamma} \text{ (m)} = p_{\tau-\gamma\alpha\theta} + p_{\tau-\epsilon\xi\alpha\rho} + p_{\gamma} \quad (5.19)$$

όπου:

$p_{\tau-\gamma\alpha\theta}$: Τοπικές απώλειες πίεσης γεωθερμικής αντλίας θερμότητάς [τυπική τιμή: 0,3 bar=3,06 m] (Κατσαπρακάκης, 2015)

$p_{\tau-\epsilon\xi\alpha\rho}$: Τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων [τυπική τιμή: 0,2 bar=2,04 m] (Κατσαπρακάκης, 2015)

p_{γ} : Γραμμικές απώλειες δικτύου (m)

❖ Υπολογισμός γραμμικών απωλειών δικτύου

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών του δικτύου, χρησιμοποιείται η αριθμητική σχέση Hazen-Williams Σχέση 5.20.

$$p_{\gamma} \text{ (m)} = k_1 \cdot L \cdot \left(\frac{\dot{V}}{C} \right)^{1,852} \cdot D_i^{-4,87} \quad (5.20)$$

όπου:

\dot{V}_w : παροχή όγκου νερού (l/s)

D_{in} : εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)

L : συνολικό μήκος αγωγού (m)

k_1 : σταθερά Hazen-Williams [$1,22 \cdot 10^{10}$] ανάλογα τις χρησιμοποιούμενες μονάδες
Πίνακας 5.2

C: συντελεστής τριβής Hazen-Williams [140] ανάλογα τον τύπο της σωλήνωσης
Πίνακας 5.3

Πίνακας 5.2: Σταθερά μετατροπής εξίσωσης Hazen-Williams για διάφορους συνδυασμούς μονάδων μέτρησης

Πηγή: Μ. Βαλαβανίδης, 2019

h_f	L	Q	D	k_1
m	m	l/s	mm	$1,22 \times 10^{10}$
m	m	l/h	mm	3163
m	m	m^3/d	mm	$3,162 \times 10^6$
ft	ft	ft^3/s	ft	4,73
ft	ft	gpm	in	10,46

Για τις μονάδες που περιεγράφηκαν παραπάνω η σταθερά Hazen-Williams k_1 προκύπτει σύμφωνα με τον πίνακα 5.3 ίση με $1,22 \cdot 10^{10}$.

Πίνακας 5.3: Τιμές του συντελεστή τριβής Hazen -Williams για διάφορους τύπους σωληνώσεων

Πηγή: Cuenca, 1989

Pipe Material	Values of C		
	Design	New Pipe	Corroded Pipe
Polyethylene (PE) and polyvinyl chloride (PVC)	140	150	130
Cement-Asbestos	140	150	140
Fiber	140	150	—
Bitumastic-enamel-lined iron or steel centrifugally applied	140	148	130
Cement-lined iron or steel centrifugally applied	140	150	—
Copper, brass, lead, tin, or glass pipe and tubing	130	140	120
Wood-stave	110	120	110
Welded and seamless steel	100	130	80
Interior riveted steel (no projecting rivets)	100	139	—
Wrought-iron, cast-iron	100	130	80
Tar-coated cast iron	100	130	50
Girth-riveted steel (projecting rivets in girth seams only)	100	130	—
Concrete	100	120	85
Full-riveted steel (projecting rivets in girth and horizontal seams)	100	115	—
Vitrified, spiral-riveted steel (flow with lap)	100	110	—
Spiral-riveted steel (flow against lap)	90	100	—
Corrugated steel	60	60	—

Οι σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα ως εναλλάκτες είναι πολυαιθυλενίου, συνεπώς η τιμή του συντελεστή τριβής Hazen-Williams C από τον Πίνακα 5.4 προκύπτει ίση με **140**.

Υπολογίζονται οι γραμμικές απώλειες του δικτύου από την σχέση ορισμού (5.20):

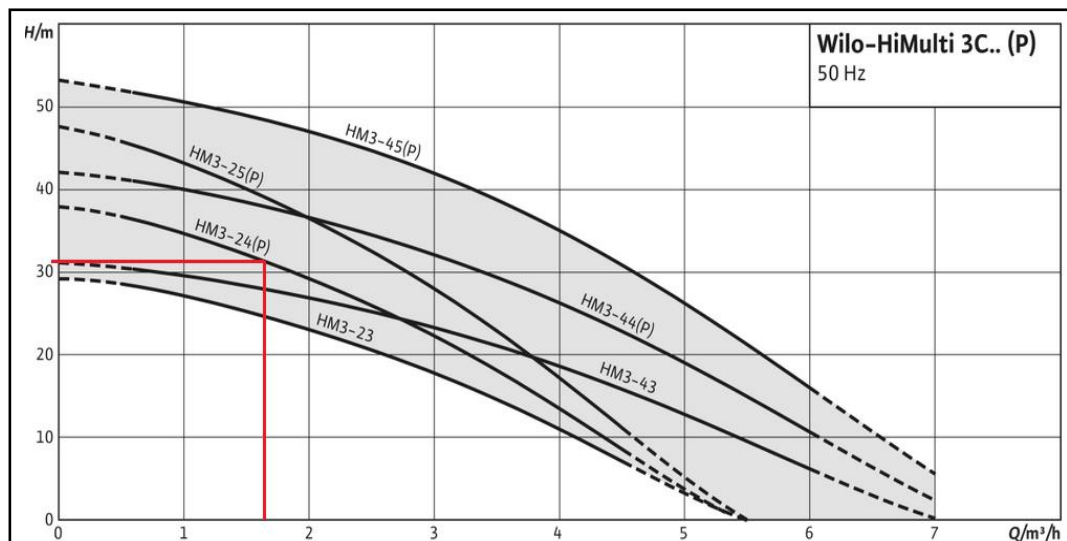
$$p_{\gamma} = k_1 \cdot L \cdot \left(\frac{\dot{V}}{C}\right)^{1,852} \cdot D_i^{-4,87} = 1,22 \cdot 10^{10} \cdot 694\text{m} \cdot \left(\frac{0,44 \frac{\text{lt}}{\text{s}}}{140}\right)^{1,852} \cdot 26\text{mm}^{-4,87}$$

$$= 25,8 \text{ m} \quad (5.20)$$

Συνεπώς, οι συνολικές τοπικές και γραμμικές απώλειες πίεσης του δικτύου υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση 5.19:

$$p_{\tau,\gamma} = p_{\tau-\gamma\alpha\theta} + p_{\tau-\epsilon\xi\alpha\rho} + p_{\gamma} = 3,06 + 2,04 + 25,8 = 30,9 \text{ m} \quad (5.19)$$

Για συνολικές απώλειες πίεσης όπως αυτές υπολογίστηκαν από την σχέση (5.19) και για παροχή $\dot{V}_w = 0,45 \frac{\text{lt}}{\text{sec}} \cdot 3,6 = 1,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, επιλέγεται εμπορικός κυκλοφορητής από τον κατάλογο της Wilo, του οποίου η χαρακτηριστική καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα (5.1).



Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας κυκλοφορητή οριζοντίου γεωθερμικού συστήματος

Πηγή: Wilo, 2020

5.1.3 Υπολογισμός δοχείου διαστολής

Για την διατήρηση της πίεσης του δικτύου σε επιθυμητά όρια είναι απαραίτητη η ύπαρξη δοχείου διαστολής. Ο όγκος του δοχείου διαστολής υπολογίζεται από τη Σχέση (5.21):

$$\text{Όγκος δοχείου διαστολής } V_{\Delta\Delta} (\text{m}^3) = V_s \cdot \frac{\frac{v_2 - 1}{v_1}}{1 - \frac{p_1}{p_2}} \quad (5.21)$$

όπου:

v_1 : Ο ειδικός όγκος του νερού στη χαμηλότερη θερμοκρασία 5 °C [$v_1=0,001011 \text{ m}^3/\text{kg}$]

v_2 : Ο ειδικός όγκος του νερού στην υψηλότερη θερμοκρασία 55 °C [$v_2=0,001021 \text{ m}^3/\text{kg}$]

p_1 : Ελάχιστη πίεση δικτύου (kPa). Η ελάχιστη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης είναι περίπου 100 kPa (Στρωτός, 2016).

p_2 : Μέγιστη πίεση δικτύου (kPa). Η υψηλότερη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης είναι περίπου 250 kPa (Στρωτός, 2016).

V_s : Συνολικός όγκος νερού εγκατάστασης (m^3). Θεωρώντας τη σωλήνωση του δικτύου απλό κύλινδρο ο όγκος νερού υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.22)

$$V_s = 4 \cdot L_{hor} \cdot \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} = 694m \cdot \pi \cdot 0,026^2 m^2 = 1,45 m^3 \quad (5.22)$$

Τέλος, από την σχέση ορισμού 5.24 υπολογίζεται ο ελάχιστα απαιτούμενος όγκος του δοχείου διαστολής

$$V_{\Delta\Delta} = V_s \cdot \frac{\frac{v_2}{v_1} - 1}{1 - \frac{p_1}{p_2}} = 1,48 \cdot \frac{\frac{0,00101}{0,00102} - 1}{1 - \frac{90}{220}} = 0,0255 m^3 = 25,05 lt \quad (5.21)$$

5.1.4 Κόστος εγκατάστασης

Στον Πίνακα (5.4) παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη εγκατάστασης οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος. Τα κόστη των διάφορων τεχνολογιών αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές της αγοράς.

Πίνακας 5.4: Αναλυτικά κόστη εγκατάστασης οριζοντίου γεωθερμικού συστήματος

Περιγραφή	Πληροφορίες	Μονάδα	Κόστος μονάδος	Τελικό ποσό
Αδειοδότηση	Παράβολο Οριζοντίου συστήματος	1	150,00 €	150,00 €
Γεωθερμική αντλία θερμότητας	850/kW (Συμπεριλαμβανομένου υπερθερμαντήρα ZNX 200 lt)	9	850,00 €	7.918,99 €
Χωματοργικές εργασίες	6€/m ³	311	6,00 €	1.863,29 €
Εναλλάκτης θερμότητας	1,39€/m	694	1,39 €	964,46 €
Δοχείο διαστολής	3,7€/lt	1	25,05 €	25,05 €
Μπόιλερ Z.N.X	20€/lt	100	20,00 €	2.000,00 €
Κυκλοφορητής fan coil	Έρευνα αγοράς (αναλόγως την παροχή και τις απώλειες) 120€/kW	1,00 9	300,00 € 120,00 €	300,00 € 1.117,98 €
Μηχανολογική μελέτη	Μελέτη σκοπιμότητας	1	600,00 €	600,00 €
Ηλεκτρο-υδραυλικά	Βάνες, εξαρτήματα μηχανοστασίου, σωληνώσεις δικτύου και αντιψυκτικό	1	2.500,00 €	2.500,00 €
			Συνολικό κόστος εγκατάστασης	17.439,76 €

5.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Κατά τον σχεδιασμό κάθετου γεωθερμικού συστήματος απαιτείται ο υπολογισμός των γεωτρήσεων που θα χρειαστούν, η επιλογή κυκλοφορητή νερού και δοχείου διαστολής. Σε περιπτώσεις που το σύστημα θα λειτουργήσει και για ZNX απαιτείται η επιλογή κατάλληλου μπόιλερ.

5.2.1 Υπολογισμός βάθους γεωτρήσεων

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενο βάθους γεωτρήσεων εφαρμόζεται η μέθοδος που προτείνει η ASHARE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) (Kavanaugh & Rafferty, 2014). Το απαιτούμενο βάθος κάθετου εναλλάκτη υπολογίζεται μέσω των σχέσεων (5.23) και (5.24). Αρχικά, υπολογίζεται η μέση ετήσια ροή θερμότητας στο έδαφος, εν συνεχεία η διάμετρος της σωλήνωσης του εναλλάκτη και τέλος, οι θερμικές αντιστάσεις εδάφους και σωλήνωσης.

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} - (C_{f-c} \cdot q_c) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi-c} + t_{wo-c}}{2} - t_p} \quad (5.23)$$

$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (C_{f-h} \cdot q_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi-h} + t_{wo-h}}{2} - t_p} \quad (5.24)$$

όπου:

q_a: Υπολογισμός μέσης ετήσιας ροής θερμότητας στο έδαφος ($\frac{\text{Btu}}{\text{h}}$) (σχέση 5.25)

R_{ga}: Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για ετήσιο παλμό⁴ (h·ft·°F/Btu)

R_{gm}: Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για μηνιαίο παλμό (h·ft·°F/Btu)

R_{gd}: Ισοδύναμη θερμική αντίσταση εδάφους για ημερήσιο παλμό (h·ft·°F/Btu)

R_b: Θερμική αντίσταση σωλήνωσης-γεώτρησης (h·ft·°F/Btu)

PLF_m: Μηνιαίος συντελεστής μερικού φορτίου

F_{sc}: Συντελεστής θερμικών απωλειών του κυκλώματος σωληνώσεων

t_g: Θερμοκρασία εδάφους (°F)

t_{wi}: Θερμοκρασία εισόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη [°F] (Σχήμα 5.1)

t_{wo}: Θερμοκρασία εξόδου του νερού στο γεωεναλλάκτη [°F] (Σχήμα 5.1)

⁴ Η μεθοδολογία μετασχηματίζει την εξίσωση μόνιμης κατάστασης έτσι ώστε να δώσει το μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης του γεωεναλλάκτη, χρησιμοποιώντας μια σειρά σταθερών παλμών μετάδοσης θερμότητας. Η θερμική αντίσταση του εδάφους ανά μονάδα μήκους υπολογίζεται ως συνάρτηση του χρόνου, που αντιστοιχεί στο χρόνο για ένα ιδιαίτερο παλμό θερμότητας.

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

❖ Υπολογισμός μέσης ετήσιας ροής θερμότητας στο έδαφος (q_a)

$$q_a \left(\frac{\text{Btu}}{\text{h}} \right) = \frac{C_{f-c} \cdot (-q_c) \cdot \text{EFL}_{h-c} + C_{f-h} \cdot q_h \cdot \text{EFL}_{h-h}}{T_y} \quad (5.25)$$

όπου:

C_{f-c}: Διορθωτικός συντελεστής που σχετίζεται με το ERR της Γ.Α.Θ. (Πίνακας 5.6)

C_{f-h}: Διορθωτικός συντελεστής που σχετίζεται με το COP της Γ.Α.Θ. (Πίνακας 5.6)

EFL_{h-c}: Ισοδύναμες ώρες σε ολικό φορτίο ψύξης ετησίως (σχέση 5.26)

EFL_{h-h}: Ισοδύναμες ώρες σε ολικό φορτίο θέρμανσης ετησίως (σχέση 5.27)

T_y: Ετήσιο χρονικό διάστημα σε ώρες [8.760 hours]

q_c: Ονομαστικό ψυκτικό φορτίο (Btu/h)

$$q_c = 6200 \text{ W} = 6200 \cdot 3,412142 \text{ Btu/h} = 211552,804 \text{ Btu/h}$$

q_h: Ονομαστικό θερμικό φορτίο (Btu/h)

$$q_h = 9400 \text{ W} = 9400 \cdot 3,412142 \text{ Btu/h} = 320741,348 \text{ Btu/h}$$

$$\text{EFL}_{h-c} = \frac{E_c}{q_c} = \frac{3802100 \text{ Wh}}{6200 \text{ W}} = 613 \text{ h} \quad (5.26)$$

$$\text{EFL}_{h-c} = \frac{E_{h-tot}}{q_c} = \frac{9347700 \text{ Wh}}{6200 \text{ W}} = 994 \text{ h} \quad (5.27)$$

όπου:

E_c: Ετήσια ψυκτική ενέργεια

E_{h-tot}: Ετήσια θερμική ενέργεια (συμπεριλαμβάνεται και η ενέργεια για ZNX)

Από τον Πίνακα 5.5 για EER= 4,4 και COP=3,6 προκύπτει:

$$C_{f-c} = 1,31 \text{ και } C_{f-h} = 0,80$$

Πίνακας 5.5: Διορθωτικοί συντελεστές αντλιών θερμότητας κατά ASHARE

EER	C _{f-c}	COP	C _{f-h}
<4,98	1,20	<3	0,75
<4,4	1,23	<3,5	0,77
<3,81	1,26	<4	0,80
>4,98	1,31	>4,5	0,82

Υπολογίζεται η μέση ετήσια ροή θερμότητας αντικαθιστώντας στη σχέση (5.25).

$$\begin{aligned}
 q_a &= \frac{C_{f-c} \cdot (-q_c) \cdot EFL_{h-c} + C_{f-h} \cdot q_h \cdot EFL_{h-h}}{T_y} = \\
 &= \frac{0,8 \cdot \left(-211552,804 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}\right) \cdot 613 + 1,31 \cdot 320741,348 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \cdot 994}{8760 \text{ h}} = \\
 &= 972,7756 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \quad (5.25)
 \end{aligned}$$

❖ Υπολογισμός διαμέτρου σωλήνωσης

Από τις σχέσεις (5.4 , 5.5 και 5.6) έχουν ήδη υπολογιστεί η παροχή μάζας νερού στη σωλήνωση και η παροχή όγκου νερού :

$$\dot{m}_w = 0,4493 \text{ kg/sec}$$

$$\dot{V}_w = 0,0004 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Η συνολική παροχή όγκου νερού θα διαμοιραστεί στις γεωτρήσεις που θα πραγματοποιηθούν καθώς και στους βρόγχους κάθε γεώτρησης. Ο αριθμός των γεωτρήσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία ASHARE προκύπτει ίσος με το φορτίο σε RT (3,517 kW=1RT).

Για το εξεταζόμενο κτίριο το θερμικό φορτίο είναι μεγαλύτερο από το ψυκτικό συνεπώς ο αριθμός των γεωτρήσεων προκύπτει από τη σχέση (5.28).

$$\text{Αριθμός γεωτρήσεων} = \frac{q_h}{3,517} = \frac{9,4\text{kW}}{3,517} = 2,67 \text{ RT} = 3 \text{ RT} \quad (5.28)$$

Επιπλέον, αν σε κάθε γεώτρηση εγκατασταθεί διπλός βρόγχος τότε η συνολική παροχή όγκου νερού θα διαμοιραστεί σε **(3 γεωτρήσεις · 2 βρόγχους = 6)** κάθετους εναλλάκτες και η παροχή όγκου νερού σε κάθε βρόγχο υπολογίζεται από τη Σχέση (5.29).

$$\dot{V}_{\beta\rho} = \frac{0,0004 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}}}{6} = 8,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (5.29)$$

Επιλέγεται τυποποιημένη σωλήνωση πολυαιθυλενίου PE DN32 PN12 με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 5.6 και εν συνεχεία υπολογίζεται μέσω της σχέσης (5.30) η ταχύτητα ροής ανά βρόγχο.

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά τυποποιημένης σωλήνωσης PE DN32 PN12

Εξωτερική διάμετρος D_o (mm)	32
Πάχος τοιχώματος (mm)	3
Θερμική αγωγιμότητα λ_{pipe} (W/(m·K))	0,43

$$u = \frac{4 \cdot \dot{V}_w}{\pi \cdot d_{\text{in}}^2} = \frac{4 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,026^2} = 0,1583 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (5.30)$$

❖ Υπολογισμός ισοδύναμων θερμικών αντιστάσεων εδάφους (R_{ga} , R_{gm} , R_{gd})

Οι ισοδύναμες θερμικές αντιστάσεις του εδάφους δίνονται από τις σχέσεις (5.31), (5.32) και (5.33).

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{\lambda_g} \quad (5.31)$$

$$R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{\lambda_g} \quad (5.32)$$

$$R_{gd} = \frac{G_2}{\lambda_g} \quad (5.33)$$

όπου:

λ_g : Θερμική αγωγιμότητα εδάφους [1,5 Btu/h·ft·°F]

G_1 , G_2 , G_f : Συντελεστές που υπολογίζονται από τη σχέση (5.34)

$$G_i = 0,0769 \cdot \ln(F_{oi}) + 0,0901, \quad i = 1,2,f \quad (5.34)$$

όπου:

F_{oi}: Αδιάστατος αριθμός fourier που σχετίζεται με τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους και υπολογίζεται από τη σχέση (5.35)

$$f_{oi} = \frac{4 \cdot a_g \cdot \tau_i}{d_i^2}, \quad i = 1, 2, f \quad (5.35)$$

όπου:

a_g: Θερμική διαχυτότητα του εδάφους [1,5 ft²/day]

τ_i: Χρονικός παλμός επίδρασης της θερμοκρασίας του εδάφους από το γεωεναλλάκτη (days)

Επειδή, η λειτουργία του γεωεναλλάκτη επηρεάζει τη θερμοκρασία του εδάφους μακροπρόθεσμα, ετήσια και βραχυπρόθεσμα, η μεθοδολογία κατά ASHARE λαμβάνει υπόψιν αυτές τις επιδράσεις μέσω των αντιστάσεων R_{ga} (ετήσια), R_{gm} (μηνιαία), R_{gd} (καθημερινή) που είναι υπολογισμένες με βάση τους παρακάτω παλμούς:

1) Δεκαετή παλμό των 3650 ημερών

2) Μηνιαίο παλμό των 30 ημερών

3) Εξάωρο παλμό του 25% της ημέρας,

βάσει αυτού ορίζονται και οι χρόνοι τ_i ως εξής:

$$\tau_1 = 3650 \text{ days}$$

$$\tau_2 = 3680 \text{ days}$$

$$\tau_f = 3680,25 \text{ days}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.2.14) υπολογίζονται οι αδιάστατοι αριθμοί fourier όπως παρακάτω. (d_i=26 mm=0,085 ft)

$$f_{o1} = \frac{4 \cdot a_g \cdot (\tau_f - \tau_1)}{d_i^2} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{day}} \cdot (3680,25 - 3650) \text{ days}}{0,085^2} = 24976,387 \quad (5.35a)$$

$$f_{o2} = \frac{4 \cdot a_g \cdot (\tau_f - \tau_2)}{d_i^2} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{day}} \cdot (3680,25 - 3680) \text{ days}}{0,085^2} = 206,416 \quad (5.35b)$$

$$f_{of} = \frac{4 \cdot a_g \cdot \tau_f}{d_i^2} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot \frac{\text{ft}^2}{\text{day}} \cdot 3680,25 \text{ days}}{0,085^2} = 3038656,121 \quad (5.35c)$$

Οι συντελεστές G υπολογίζονται σύμφωνα με τη Σχέση (5.34) όπως παρακάτω:

$$G_1 = 0,0769 \cdot \ln(F_{o1}) + 0,0901 = 0,0769 \cdot \ln(24976,387) + 0,0901 = 0,8688 \quad (5.34a)$$

$$G_2 = 0,0769 \cdot \ln(F_{o1}) + 0,0901 = 0,0769 \cdot \ln(206,416) + 0,0901 = 0,4999 \quad (5.34b)$$

$$G_f = 0,0769 \cdot \ln(F_{o1}) + 0,0901 = 0,0769 \cdot \ln(3038656,121) + 0,0901 = 1,2380 \quad (5.34c)$$

Τελικά, οι θερμικές αντιστάσεις εδάφους υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (5.31), (5.32) και (5.33) όπως παρακάτω:

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{\lambda_g} = \frac{1,2380 - 0,8688}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}}} = 0,2461 \quad (5.31)$$

$$R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{\lambda_g} = \frac{1,2380 - 0,4999}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}}} = 0,2459 \quad (5.32)$$

$$R_{ga} = \frac{G_2}{\lambda_g} = \frac{0,4999}{1,5 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}}} = 0,3333 \quad (5.33)$$

❖ Υπολογισμός μηνιαίου συντελεστή μερικού φορτίου (PLF_m)

Εκφράζει το ποσοστό λειτουργίας της εγκατάστασης ως προς την ισχύ και τον χρόνο, σε σχέση με τη διαρκή λειτουργία της σε ονομαστικό φορτίο.

Έστω πως η εγκατάσταση λειτουργεί 14 ώρες την ημέρα στο 70% της ονομαστικής ισχύς συνεπώς ο μηνιαίος συντελεστής προκύπτει από τη Σχέση (5.36)

$$\text{PLF}_m = \frac{14}{24} \cdot 0,7 = 41\% = 0,41 \quad (5.36)$$

❖ Υπολογισμός θερμικής αντίστασης σωλήνωσης

Η θερμική αντίσταση της σωλήνωσης και της γεώτρησης εξαρτάται από το υλικό της σωλήνωσης, τη διάμετρο της καθώς και από το υλικό πλήρωσης της γεώτρησης.

Η επιλεγόμενη σωλήνωση έχει εσωτερική διάμετρο $d_i=26 \text{ mm}=0,98 \text{ in}$, εξωτερική διάμετρο $d_o=32 \text{ mm}$ άρα:

$$\text{SDR} = \frac{d_o}{\frac{d_o - d_i}{2}} = \frac{32}{\frac{32 - 6}{2}} = 11$$

ενώ η παροχή όγκου νερού ανά βρόγχο είναι:

$$\dot{V}_{\beta\rho} = 8,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \frac{8,4 \cdot 10^{-5}}{0,0631 \cdot 10^{-3}} \text{ gpm} = \mathbf{1,33 \text{ gpm}}$$

Για σωλήνωση με SDR 11 και παροχή όγκου νερού ανά βρόγχο έως και 2 gpm αρχική τιμή θερμικής αντίστασης της σωλήνωσης είναι (Κατσαπρακάκης, 2015):

$$R_b = 0,09 \text{ h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$$

Έστω πως η πλήρωση των γεωτρήσεων θα πραγματοποιηθεί με το πιο σύνηθες υλικό που χρησιμοποιείται δηλαδή, σκυρόδεμα 50% χαλαζιακή άμμος με αγωγιμότητα $\lambda_{\text{υλ.πλ.}} \approx \mathbf{1 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F})}$. Η αγωγιμότητα του εδάφους είναι ήδη γνωστή $\lambda_g = \mathbf{1,5 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F})}$ όπως και η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης $d_i = \mathbf{1 \text{ in}}$. Τέλος, επιλέγεται πως η διάμετρος κάθε γεώτρησης θα είναι $d_{ge} = \mathbf{6 \text{ in}}$. Βάσει αυτών ο **συντελεστής διόρθωσης** της θερμικής αντίστασης της σωλήνωσης προκύπτει από τον Πίνακα (5.7) ίσος με **0,03**.

Πίνακας 5.7: Συντελεστής διόρθωσης θερμικής αντίστασης σωλήνωσης

Πηγή: Κατσαπρακάκης, 2015

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

Υπολογίζεται εκ νέου ο διορθωμένος πλέον συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δικτύου σωληνώσεων:

$$R_b = 0,09 + 0,04 = \mathbf{0,13 \text{ h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}}$$

❖ Υπολογισμός συντελεστή θερμικών απωλειών κυκλώματος σωληνώσεων (F_{sc})

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών κυκλώματος σωληνώσεων, ουσιαστικά εκφράζει τις απώλειες θερμότητας μεταξύ των βρόγχων ανά γεώτρηση. Κατά ASHARE υπολογίζεται σύμφωνα με τον Πίνακα (5.8).

Πίνακας 5.8: Συντελεστής θερμικών απωλειών κυκλώματος

Πηγή: Κατσαπρακάκης, 2015

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

Για παροχή ανά σωλήνωση $\dot{V}_{\beta\rho}=1,33$ gpm και 2 βρόγχους ανά σωλήνωση από τον πίνακα 5.8 ο συντελεστής θερμικών απωλειών κυκλώματος σωληνώσεων προκύπτει:

$$F_{sc}=1,03$$

❖ Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους (t_p)

Ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους αντιπροσωπεύει τη μακροπρόθεσμη αλλαγή θερμοκρασίας του εδάφους λόγω της λειτουργίας των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για πολλά χρόνια. Ο υπολογισμός του συντελεστή κατά ASHARE γίνεται μέσω του Πίνακα 5.9.

Η μέση θερμοκρασία εδάφους για τη περιοχή μελέτης Ν. Ηράκλειο είναι:

$$t_g = 18,5^{\circ}C = \left(18,5 * \frac{9}{5}\right) + 32^{\circ}F = 65,4^{\circ}F \quad \text{Πηγή: E. M. Y.}$$

Ενώ η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου αντίστοιχα του υγρού στον εναλλάκτη κατά τη διαδικασία της θέρμανσης ρυθμίζεται να είναι:

$$t_{wi-h} = 10^{\circ}C = 50^{\circ}F$$

$$t_{wo-h} = 5^{\circ}C = 41^{\circ}F$$

Οι ισοδύναμες ώρες για θέρμανση και ψύξη είναι ≈ 1.000 και 1000, η απόσταση των γεωτρήσεων θα είναι $L_{geo}=20$ ft και η θερμική του αγωγιμότητα του εδάφους είναι $\lambda_g=1,5$ Btu(h·ft·°F).

Βάσει των παραπάνω ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους προκύπτει από τον Πίνακα 5.9 ίσος με $2,4$ °F ενώ το βάθος των γεωτρήσεων αναμένεται ≈ 206 ft/RT.

Πίνακας 5.9: Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας εδάφους κατά ASHARE

Πηγή: Κατσαπρακάκης, 2015

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

Τελικά, υπολογίζεται το βάθος κάθε γεώτρησης από τη σχέση ορισμού (5.2.2):

$$L_{ver} = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (C_{f-h} \cdot q_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi-h} + t_{wo-h}}{2} - t_p} = \frac{972,776 \cdot 0,2461 + (0,8 \cdot 32074,1348) \cdot (0,13 + 0,4083 \cdot 0,2458 + 0,3333 \cdot 1,03)}{65,3 - \frac{50 + 41}{2} - 2,4} = 860f = \mathbf{262 \text{ m}} \quad (5.24)$$

Το βάθος κάθε γεώτρησης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.37) όπως παρακάτω:

$$H_{γεω} = \frac{L_{ver}}{3 \text{ γεωτρήσεις} \cdot 2 \text{ βργχους}} = \frac{262 \text{ m}}{6} = 44 \text{ m} \quad (5.37)$$

Τέλος, υπολογίζεται η απαιτούμενη έκταση για την εγκατάσταση καθέτου γεωθερμικού πεδίου. Οι γεωτρήσεις που θα πραγματοποιηθούν θα είναι $n_{γεω}=3$ και η κάθε μια θα έχει διάμετρο $d_{γεω} \approx 16 \text{ cm}$ οι γεωτρήσεις θα έχουν $L_{γεω} \approx 6,1 \text{ m}$ απόσταση μεταξύ τους υπολογίζεται η κατά προσέγγιση απαιτούμενη επιφάνεια γης από τη σχέση (5.38).

$$A_{\text{ver}} = d_{\text{γεω}} \cdot [(n_{\text{geo}} - 1) \cdot L_{\text{γεω}}] + d_{\text{γεω}} = 0,16\text{m} \cdot [(2 \cdot 6,1\text{m}) + 0,16\text{m}] = 1,89 \text{ m}^2 \quad (5.38)$$

5.2.2 Επιλογή κυκλοφορητή

Υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες πίεσης του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας και του συνολικού δικτύου σωληνώσεων, έτσι ώστε να γίνει η επιλογή του κατάλληλου κυκλοφορητή.

Οι συνολικές γραμμικές και τοπικές απώλειες του δικτύου ($p_{\tau,\gamma}$) υπολογίζονται από τη σχέση (5.39).

$$p_{\tau,\gamma} (m) = p_{\tau-\gamma\alpha\theta} + p_{\tau-\epsilon\zeta\alpha\rho} + p_{\gamma-\gamma} + p_{\gamma-\epsilon} \quad (5.39)$$

όπου:

$p_{\tau-\gamma\alpha\theta}$: Τοπικές απώλειες πίεσης γεωθερμικής αντλίας θερμότητάς [τυπική τιμή: 0,3 bar=3,06 m] (Κατσαπρακάκης, 2015)

$p_{\tau-\epsilon\zeta\alpha\rho}$: Τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων [τυπική τιμή: 0,2 bar=2,04 m] (Κατσαπρακάκης, 2015)

$p_{\gamma-\gamma}$: Γραμμικές απώλειες γεωθερμικού δικτύου (m)

$p_{\gamma-\epsilon}$: Γραμμικές απώλειες ενδιάμεσου δικτύου (m)

❖ Υπολογισμός γραμμικών απωλειών γεωθερμικού δικτύου ($p_{\gamma-\gamma}$)

Επειδή οι σωληνώσεις στις 3 γεωτρήσεις είναι παράλληλες, η πτώση πίεσης είναι ίδια και έτσι υπολογίζεται για τον έναν γεωθερμικό εναλλάκτη. Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών γεωθερμικού δικτύου θα χρησιμοποιηθεί η αριθμητική σχέση Hazen-Williams Σχέση (5.40).

$$p_{\gamma}(m) = k_1 \cdot L \cdot \left(\frac{\dot{V}}{C}\right)^{1,852} \cdot D_i^{-4,87} = 1,22 \cdot 10^{10} \cdot 74\text{m} \cdot \left(\frac{0,0841 \frac{\text{lt}}{\text{s}}}{140}\right)^{1,852} \cdot 26\text{mm}^{-4,87} \\ = 0,1 \text{ m} \quad (5.40)$$

όπου:

\dot{V} : παροχή όγκου νερού (l/s)

D_{in} : εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)

L : συνολικό μήκος αγωγού (m)

k_1 : σταθερά Hazen-Williams [$1,22 \cdot 10^{10}$] ανάλογα τις χρησιμοποιούμενες μονάδες (Πίνακας 5.2)

C: συντελεστής τριβής Hazen-Williams [140] ανάλογα τον τύπο της σωλήνωσης (Πίνακας 5.3)

❖ Υπολογισμός γραμμικών απωλειών ενδιάμεσου δικτύου ($p_{\gamma-\varepsilon}$)

Το ενδιάμεσο δίκτυο είναι οι σωληνώσεις από την έξοδο της γεώτρησης ως την είσοδο της αντλίας θερμότητας. Η παροχή σε αυτό το σημείο ισούται με τη συνολική παροχή $\dot{V}_w = 0,45 \text{ lt/sec}$, η διάμετρος της σωλήνωσης του ενδιάμεσου δικτύου θα είναι $d_{i-\varepsilon\delta i} = 50 \text{ mm}$, έστω πως το μήκος του ενδιάμεσου δικτύου από την πιο απομακρυσμένη γεώτρηση είναι $L_{\text{ver-}\varepsilon\delta i} = 35 \text{ m}$, τέλος το υλικό κατασκευής των σωληνώσεων του ενδιάμεσου δικτύου είναι PVC. Βάσει αυτών εφαρμόζεται η σχέση Hazen-Williams (5.2.19) για το ενδιάμεσο δίκτυο. Οι συντελεστές Hazzen-Williams για PVC σωλήνες είναι κοινή με αυτούς για σωλήνες PE (Πίνακες 5.2 και 5.3).

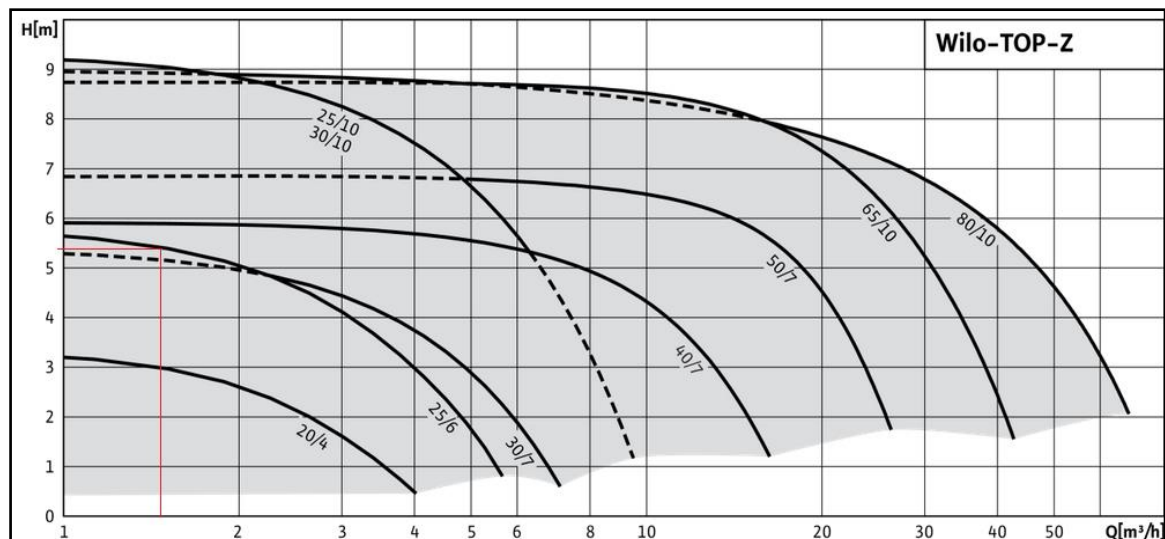
$$p_{\gamma}(m) = k_1 \cdot L \cdot \left(\frac{\dot{V}}{C}\right)^{1,852} \cdot D_i^{-4,87} = 1,22 \cdot 10^{10} \cdot 35m \cdot \left(\frac{0,045 \frac{\text{lt}}{\text{s}}}{140}\right)^{1,852} \cdot 50\text{mm}^{-4,87}$$

$$= 0,054 \text{ m} \quad (5.40)$$

Συνεπώς, οι συνολικές τοπικές και γραμμικές απώλειες πίεσης του δικτύου υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση 5.39.

$$P_{\tau,\gamma} = P_{\tau-\gamma\alpha\theta} + P_{\tau-\varepsilon\alpha\rho} + P_{\gamma-\gamma} + P_{\gamma-\varepsilon} = 3,06 + 2,04 + 0,1 + 0,054 = 5,3 \text{ m} \quad (5.39)$$

Για συνολικές απώλειες πίεσης όπως αυτές υπολογίστηκαν από την σχέση (5.1.19) και για παροχή $\dot{V}_w = 0,45 \frac{\text{lt}}{\text{sec}} \cdot 3,6 = 1,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, επιλέγεται εμπορικός κυκλοφορητής από τον κατάλογο της Wilo, του οποίου η χαρακτηριστική καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα (5.3).



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας κυκλοφορητή κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος

Πηγή: Wilo, 2020

5.2.3 Υπολογισμός δοχείου διαστολής

Για την διατήρηση της πίεσης του δικτύου σε επιθυμητά όρια είναι απαραίτητη η ύπαρξη δοχείου διαστολής. Ο όγκος του δοχείου διαστολής υπολογίζεται από τη σχέση (5.41):

$$\text{Όγκος δοχείου διαστολής } V_{\Delta\Delta}(\text{m}^3) = V_s \cdot \frac{\frac{v_2}{v_1} - 1}{1 - \frac{p_1}{p_2}} \quad (5.41)$$

όπου:

v_1 : Ο ειδικός όγκος του νερού στη χαμηλότερη θερμοκρασία 5 °C [$v_1=0,001011 \text{ m}^3/\text{kg}$]

v_2 : Ο ειδικός όγκος του νερού στην υψηλότερη θερμοκρασία 65 °C [$v_2=0,001021 \text{ m}^3/\text{kg}$]

p_1 : Ελάχιστη πίεση δικτύου (kPa). Η ελάχιστη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης είναι περίπου 100kPa. (Στρωτός, 2016)

p_2 : Μέγιστη πίεση δικτύου (kPa). Η υψηλότερη στατική πίεση για υδραυλικά δίκτυα θέρμανσης είναι περίπου 250kPa (Στρωτός, 2016)

V_s : Συνολικός όγκος νερού εγκατάστασης [m^3] (σχέση 5.42)

$$V_s(\text{m}^3) = V_\gamma + V_{\text{εν.δλ.}} \quad (5.42)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \text{Όγκος νερού γεωθερμικού δικτύου } V_\gamma &= 4 \cdot L_{\text{ver}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{in}}^2}{4} = 74\text{m} \cdot \pi \cdot 0,026^2\text{m}^2 = \\ &= 0,1565\text{m}^3 \end{aligned} \quad (5.43)$$

$$\begin{aligned} \text{Όγκος νερού ενδιάμεσου δικτύου } V_{\text{εν.δλ.}} &= 4\omega L_{\text{εν.δλ.}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{in}}^2}{4} = 35\text{m} \cdot \pi \cdot 0,050^2\text{m}^2 = \\ &= 0,2749 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (5.44)$$

Βάσει των σχέσεων (5.43) και (5.44) υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού (5.42) ο συνολικός όγκος νερού της εγκατάστασης.

$$V_s = V_\gamma + V_{\text{εν.δλ.}} = 0,1565\text{m}^3 + 0,2749\text{m}^3 = 0,4314 \text{ m}^3 \quad (5.42)$$

Τέλος, από την σχέση ορισμού (5.41) υπολογίζεται ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος του δοχείου διαστολής:

$$V_{\Delta\Delta} = V_s \cdot \frac{\frac{v_2 - 1}{v_1} - 1}{1 - \frac{p_1}{p_2}} = 0,4314 \cdot \frac{\frac{0,00101}{0,00102} - 1}{1 - \frac{90}{250}} = 0,0074 \text{ m}^3 = 7,43\text{lt} \quad (5.41)$$

5.2.4 Κόστος εγκατάστασης

Στον πίνακα (5.12) παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη εγκατάστασης οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος. Τα κόστη των διάφορων τεχνολογιών αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές της αγοράς.

Πίνακας 5.10: Αναλυτικά κόστη εγκατάστασης κατακόρυφου γεωθερμικού συστήματος

Περιγραφή	Πληροφορίες	Μονάδα	Κόστος μονάδος	Τελικό ποσό
Αδειοδότηση	Παράβολο κατακόρυφου συστήματος	1	300,00 €	300,00 €
Γεωθερμική αντλία θερμότητας	850/kW (Συμπεριλαμβανομένου υπερθερμαντήρα ZNX 200 lt)	9,32	850,00 €	7.918,99 €
Χωματουργικές εργασίες και επικάλυψη γεωτρήσεων	50€/m ³	111	50	5.527,26 €
Εναλλάκτης θερμότητας	1,39€/m	221	1,39	307,32 €
Δοχείο διαστολής	3,7€/lt	7	3,70 €	27,49 €
Μπουίερ Z.N.X	20€/lt	100	20,00 €	2.000,00 €
Κυκλοφορητής fan coil	έρευνα αγοράς 120€/kW	9	120,00 €	1.117,98 €
Μηχανολογική μελέτη	Μελέτη σκοπιμότητας	1	600,00 €	600,00 €
Ηλεκτρο-υδραυλικά	Βάνες, εξαρτήματα μηχανοστασίου, σωληνώσεις δικτύου και αντιψυκτικό	1	2.500,00 €	2.500,00 €
			Συνολικό κόστος εγκατάστασης	20.599,03 €

Επαναλαμβάνεται, πως τα κόστη χωματουργικών εργασιών, για τα παρελκόμενα του συστήματος, της μηχανολογικής μελέτης και των εγκαταστάσεων ηλεκτρικό-υδραυλικών συστημάτων είναι ενδεικτικά

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή θα επιλεγεί το καταλληλότερο γεωθερμικό σύστημα μεταξύ οριζοντίου και κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη για την εξεταζόμενη περίπτωση. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων ως προς το αρχικό κόστος εγκατάστασης και τις απαιτήσεις χρήσης γης κάθε συστήματος. (Πίνακας 3.16)

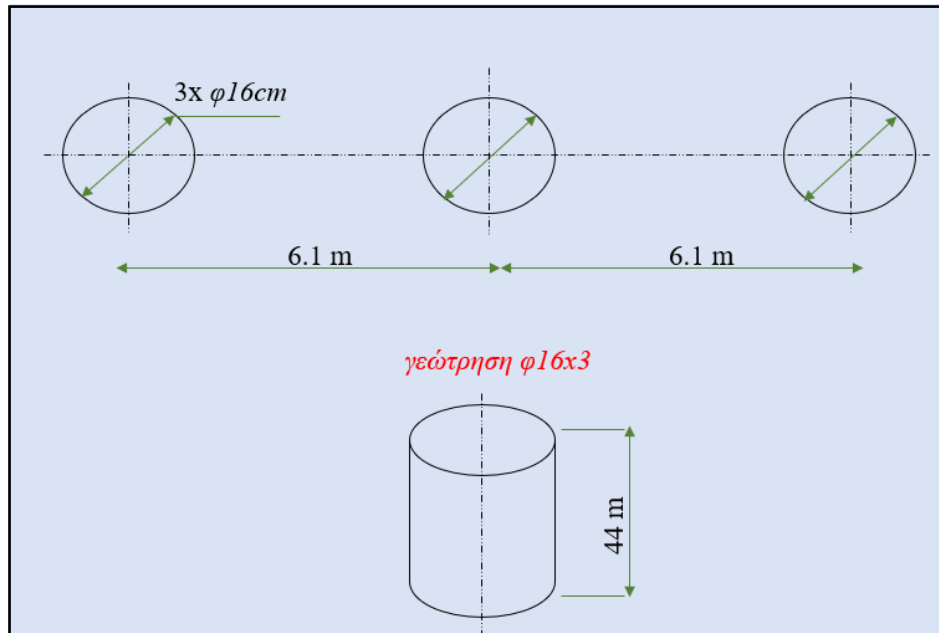
Πίνακας 5.11: Σύγκριση γεωθερμικών συστημάτων

	Οριζόντιο γεωθερμικό σύστημα	Κάθετο γεωθερμικό σύστημα
Αρχικός κόστος	16.439,76 €	20.599,03 €
Χρήση γης (m ²)	311	1,88

Το οριζόντιο γεωθερμικό σύστημα σε σύγκριση με το κάθετο είναι φθηνότερο κατά 3.160€ ωστόσο η επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση του είναι 311 m². Δεδομένου ότι το οικοπέδο στο οποίο είναι χτισμένη η υπό εξέταση κατοικία είναι

συνολικά 250 m² το επιλεγόμενο γεωθερμικό σύστημα για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης-ψύξης της κατοικίας είναι το **κάθετο γεωθερμικό σύστημα** με αρχικό κόστος εγκατάστασης 20.599,03€.

Το σκαρίφημα των απαραίτητων γεωτρήσεων της προτεινόμενης εγκατάστασης φαίνεται στο Σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3: Σκαρίφημα γεωτρήσεων προτεινομένου συστήματος

5.4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για την διαστασιολόγηση των δύο εξεταζόμενων γεωθερμικών συστημάτων κλειστού βρόγχου, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα “excel” στο οποίο δημιουργήθηκαν δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους λογισμικά (ένα για το οριζόντιο και ένα για το κατακόρυφο σύστημα), έχοντας παρόμοια δομή, μέσω των οποίων πραγματοποιείται αυτόματα ο υπολογισμός όλων των απαραίτητων μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στις Ενότητες 5.1 και 5.2.

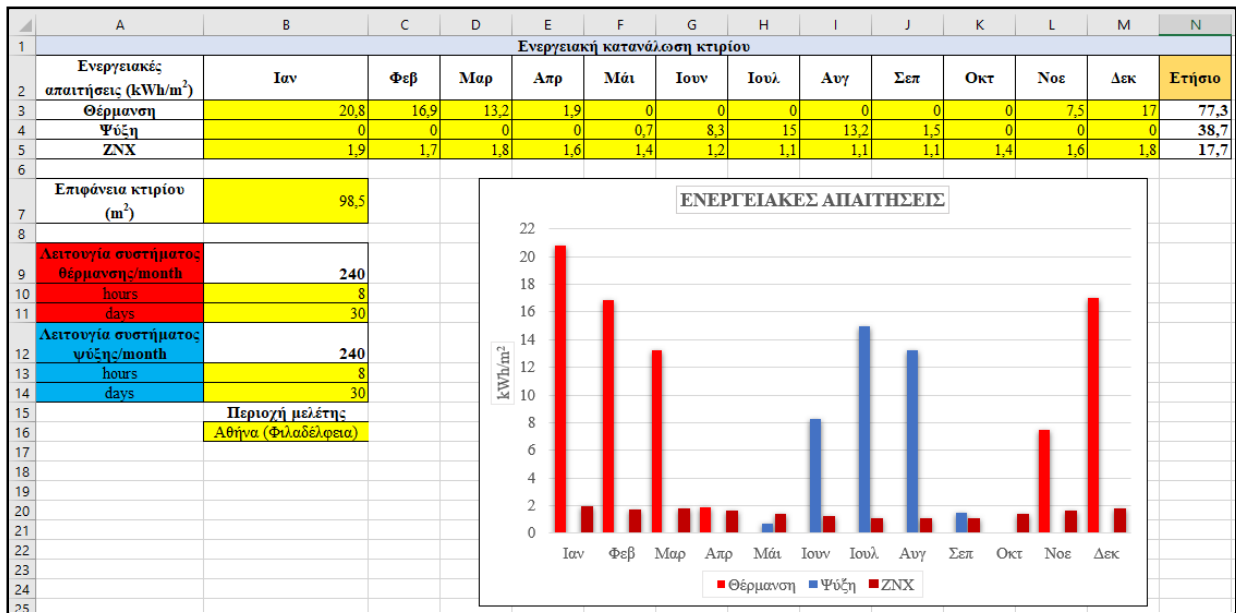
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά το υπολογιστικό μοντέλο διαστασιολόγησης οριζόντιου γεωθερμικού συστήματος κλειστού βρόγχου, ενώ και το αντίστοιχο για το κατακόρυφο σύστημα έχει την ίδια δομή.

Το λογισμικό αποτελείται από πέντε διαφορετικά φύλλα :

1) Δεδομένα εισόδου

Ο χρήστης σε αυτό το φύλλο πρέπει να εισάγει τις ενεργειακές απαιτήσεις (κελί B2;N5), την εσωτερική επιφάνεια (κελί B7), την περιοχή του εξεταζόμενου κτηρίου (κελί

B16) καθώς και τις ώρες λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης (κελία B9;B14) (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Δεδομένα εισόδου υπολογιστικού μοντέλου

Τα παραπάνω είναι και τα μοναδικά δεδομένα που απαιτούνται από το λογισμικό μοντέλο, έτσι ώστε να υπολογιστούν όλα όσα χρειάζονται για την διαστασιολόγηση και κοστολόγηση (σύμφωνα με τις μέσες τιμές της αγοράς) του συστήματος.

2) Επιφάνεια εγκατάστασης

Αρχικά, στο φύλλο αυτό (Εικόνα 5.3) υπολογίζεται μέσω των ενεργειακών απαιτήσεων ή εισάγεται κατευθείαν από τον χρήστη το φορτίο θέρμανσης και ψύξης που καλείται να καλύψει το σύστημα μέσω γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (κελία B3, B4).

	A	B	C	D
1				
2	Ενεργειακές απαιτήσεις			
3	Φορτίο θέρμανσης q_h (kW)	9,3		
4	Φορτίο ψύξης q_c (kW)	6,2		
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12	1. ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΩΛΗΝΩΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ			
13				
14	Υπολογισμός παροχής αντλίας			
15			kg/s	
16	Ειδ. Θερμο. νερού $C_{p,w}$ (kJ/(kg*K))	4,184	Παροχή μάζας m_{w-c}	0,2943
17	$\Delta\theta$ (K) Γ.Α.Θ [IN-OYT]	5	Παροχή μάζας m_{w-h}	0,4453
18	Πυκνότητα νερού ρ_w (kg/s)	1000		
19			Παροχή όγκου V (m ³ /s)	0,0004
20			Ταχ. ροής (m/s)	0,85
21	εσωτερικ		Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης D (m)	0,026
22			Τελική επιλογή σωλήνωσης D_m (m)	0,026
23			Πάχος σωλήνωσης (mm)	3,000
24				
25			Εξωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	32
26				
27				

Εικόνα 5.3: Επιλογή γεωεναλλάκτη

Εν συνεχεία για θερμοκρασιακή διαφορά λειτουργίας 5 °C (που συστήνεται από όλους τους κατασκευαστές) στην γεωθερμική αντλία θερμότητας (κελί B17) και γνωστές τις θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού (κελία B16, B18) υπολογίζεται η παροχή μάζας νερού (κελία D16, D17) μέσω της οποίας προκύπτει η απαιτούμενη εσωτερική διάμετρος του αγωγού (κελί D21) και επιλέγεται από τον Πίνακα 5.12 (Κατσαπρακάκης, 2015) τυποποιημένη σωλήνωση πολυαιθυλενίου πέμπτης γενιάς υψηλής πυκνότητας PE DNxx PN12 (κελία D22;D25).

Πίνακας 5.12: Τυποποιημένες σωληνώσεις πολυαιθυλενίου

Τύπος	Υλικό	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος τοιχώματος (mm)	Θερμική αγωγιμότητα (W/(m.K))	Θερμική αντίσταση ((K.m)/W)
PE DN25 PN8	Πολυαιθυλένιο	25,0	2,0	0,42	0,066
PE DN32 PN8	Πολυαιθυλένιο	32,0	2,0	0,42	0,051
PE DN40 PN8	Πολυαιθυλένιο	40,0	2,3	0,42	0,046
PE DN50 PN8	Πολυαιθυλένιο	50,0	2,9	0,42	0,047
PE DN20 PN12	Πολυαιθυλένιο	20,0	2,0	0,42	0,085
PE DN25 PN12	Πολυαιθυλένιο	25,0	2,3	0,42	0,077
PE DN32 PN12	Πολυαιθυλένιο	32,0	3,0	0,42	0,079
PE DN40 PN12	Πολυαιθυλένιο	40,0	3,7	0,42	0,078
PE DN50 PN12	Πολυαιθυλένιο	50,0	4,6	0,42	0,077

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι θερμικές αντιστάσεις μεταφοράς θερμότητας του συστήματος (Εικόνα 5.4). Αρχικά, με γνωστές τις θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού (κελία B34:B36) υπολογίζεται η θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από το νερό προς τη σωλήνωση (κελία D32:D33), ενώ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της επιλεχθείσας σωλήνωσης υπολογίζεται η θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω της ίδιας της σωλήνωσης (κελί D44). Τέλος, ανάλογα το τύπο του εδάφους (Πίνακας 5.13) (Kavanaugh & Rafferty, 2014), συμπληρώνεται η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους (κελί B47) και επιλέγεται το βάθος τοποθέτησης του οριζόντιου γεωναλλάκτη (κελί B48) με σκοπό τον υπολογισμό των θερμικών αντιστάσεων μεταφοράς θερμότητας του συστήματος με το έδαφος (κελί D48). Από το άθροισμα των τριών παραπάνω μεγεθών προκύπτει η συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από την σωλήνωση προς το έδαφος (κελία D53:53).

	A	B	C	D	E
28					
29					
30			2. Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος		
31			Θερμική αντίσταση μετ. θερμ από το νερό προς τη σωλήνωση (m ² K/W)		
32			R _{conv-c}	0,0042	
33			R _{conv-h}	0,0035	
34	Κινηματικό ιξώδες νερού ν _w (T=15°) (m ² /s)	1,1E-06			έλεγχος για υπολογισμό αριθμού Ντι
35	Δυναμικό ιξώδες νερού μ _w (T=15°) (N*s/m ²)	0,00114	Αριθμός Re	19386	ok
36	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ _w (T=7-45°) (W/(m ² K))	0,68	Αριθμός Pr	7,014352941	ok
37			Αριθμός Νti	111,05	
38			Αριθμός Νtih	134,93	
39			Συντελεστής συναγωγής h _{nc} (W/m ² *K)	2904,35	
40			Συντελεστής συναγωγής h _{nh} (W/m ² *K)	3528,97	
41					
42			Θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας μέσω της σωλήνωσης		
43					
44	Μέση θερμική αγωγιμότητα σωληνώσεων πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (W/(m ² K))	0,43	R _{pipe} (m ² K/W)	0,0769	
45					
46			Θερμικές αντιστάσεις συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος		
47	Θερμική αγωγιμότητα εδάφους K _{soil} (W/(m ² K))	2			
48	Βάθος τοποθέτησης οριζόντιου γεωθερμικού εναλλάκτη H (m)	2,5	R _{soil} (m ² K/W)	0,4569	
49					
50			Συντελεστής διαμόρφωσης αγωγιμότητας S	1,09	
51					
52			Συνολική θερμική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας από τη σωλήνωση προς το έδαφος	Βάσει ψύξης R _{total-c} (m ² K/W)	Βάσει θέρμανσης R _{total-h} (m ² K/W)
53				0,5380	0,5372

Εικόνα 5.4: Υπολογισμός θερμικών αντιστάσεων συναλλαγής θερμότητας με το έδαφος

Πίνακας 5.13: Θερμική αγωγιμότητα εδαφών

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

Τέλος, στο φύλλο αυτό (Εικόνα 5.5) υπολογίζεται το απαιτούμενο μήκος του γεωθερμικού εναλλάκτη θερμότητας (κελί D60), ενώ μέσω εμπειρικής σχέσης (κελί D61) προσεγγίζεται η απαιτούμενη έκταση για την τοποθέτηση του εναλλάκτη θερμότητας (κελί D63).

	A	B	C	D
55			3. Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη	
56				
57			Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη για ψύξη L _c (m)	102
58			Απαιτούμενο μήκος γεωθερμικού εναλλάκτη για θέρμανση L _h (m)	694
59				
60	Ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην A.Θ t _{wi,c-max} (°C)	35	Απαιτούμενος μήκος οριζοντίου γεωθερμικού εναλλάκτη L _{HORIZONTAL} (m)	694
61	Μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην A.Θ t _{wi,c-max} (°C)	30	Απόδοση εναλλάκτη για βάθος (2-2,5m και απόσταση μεταξύ σωληνώσεων 0,40-0,65m) W/m ²	30
62	Ελάχιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην A.Θ t _{wi,h-max} (°C)	10		
63	Μέγιστη θερμοκρασία εισόδου του νερού στην A.Θ t _{wi,h-max} (°C)	5	Συνολική απαιτούμενη έκταση για την τοποθέτηση του εναλλάκτη A _{HORIZONTAL} (m ²)	311
64				
65				

Εικόνα 5.5: Υπολογισμός απαιτούμενου μήκους γεωεναλλακτη

3) Κυκλοφορητής

Στο τρίτο φύλλο του λογισμικού (Εικόνα 5.6) υπολογίζονται οι γραμμικές απώλειες του δικτύου (κελί B9) μέσω της αριθμητικής σχέσης Hazzen-Williams και των σταθερών συντελεστών που αυτή χρησιμοποιεί για αγωγούς πολυαιθυλενίου (κελία H4:H5).

Χρησιμοποιώντας τυπικές-εμπειρικές τιμές για τις τοπικές απώλειες του δικτύου για παρόμοια συστήματα και γνωρίζοντας την παροχή όγκου νερού, είναι δυνατή η επιλογή του μεγέθους του κυκλοφορητή που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Τοπικές απώλειες πίεσης ΓΑΘ (τυπική τιμή) $p_{r-ΓΑΘ}$ (bar)	3,06								
3	Τοπικές απώλειες πίεσης λοιπών εξαρτημάτων (τυπική τιμή) $p_{r-ΒΕΑΡ}$ (bar)	2,04					Hazen-Williams factors for PE cond			
4						k1	12200000000			
5	Παροχή (lt/s)	0,4453				C	140			
6	Διάμετρος σωληνώσεων (mm)	26								
7	Μήκος εναλλάκτη	694								
8										
9	p_T (mH ₂ O)	25,8								
10	Συνολικές απώλειες: $p_{r,T}$ (Mh ₂ O)	30,9								
11	Παροχή (m ³ /h)	1,6								

Εικόνα 5.6: Υπολογισμός κυκλοφορητή

4) Δοχείο διαστολής

Στο επόμενο φύλλο (Εικόνα 5.7) γνωρίζοντας την παροχή όγκου νερού του δικτύου (κελί B1) και τις θερμοφυσικές ιδιότητες του νερού για τις θερμοκρασίες αναφοράς (κελία B4:B5) και τέλος χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές τιμές για τη μέγιστη και ελάχιστη πίεση παρόμοιων δικτύων (κελία B4:B5), υπολογίζεται ο απαιτούμενος όγκος του δοχείου διαστολής για την ομαλή λειτουργία του συστήματος (κελί G3).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Όγκος νερού V_s (m ³)	1,45					
2	Η χαμηλότερη πίεση του δικτύου p_1 (kPa)	90				m ³	lt
3	Η υψηλότερη πίεση του δικτύου p_2 (kPa)	220			Όγκος δοχείου διαστολής $V_{Δ,Δ}$	0,0250	25,05
4	Ειδικός όγκος νερού v_1 (T=t ₁ =5) (m ³ /kg)	0,001011					
5	Ειδικός όγκος νερού v_2 (T=t ₂ =55) (m ³ /kg)	0,001021					

Εικόνα 5.7: Υπολογισμός δοχείου διαστολής

5) Κόστος

Στο τελευταίο φύλλο του λογισμικού (Εικόνα 5.8) πραγματοποιείται η κοστολόγηση του γεωθερμικού συστήματος ανά μονάδα κόστους, σύμφωνα με τις μέσες τιμές της αγοράς, έχοντας όμως την δυνατότητα να μεταβληθούν οι τιμές ανά μονάδα (στήλη D) σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη. Στο κελί E12 εμφανίζεται το τελικό κόστος της εγκατάστασης.

	A	B	C	D	E
1	Περιγραφή	Πληροφορίες	Μονάδα	Κόστος μονάδος	Τελικό ποσό
2	Αδειοδότηση	Παράβολο Οριζοντίου συστήματος	1	150,00 €	150,00 €
3	Γεωθερμική αντλία θερμότητας	850/kW (Συμπεριλαμβανομένου υπερθερμαντήρα ZNX 200 lt)	9	850,00 €	7.918,99 €
4	Χωματουργικές εργασίες	6€/m ³	311	6,00 €	1.863,29 €
5	Εναλλάκτης θερμότητας	1,39€/m	694	1,39 €	964,46 €
6	Δοχείο διαστολής	3,7€/lt	1	25,05 €	25,05 €
7	Μπόλερ Z.N.X	20€/lt	100	20,00 €	2.000,00 €
8	Κυκλοφορητής fan coil	Έρευνα αγοράς (αναλόγως την παροχή και τις απώλειες) 120€/kw	1,00 9	300,00 € 120,00 €	300,00 € 1.117,98 €
9	Μηχανολογική μελέτη	Μελέτη σκοπιμότητας	1	600,00 €	600,00 €
10		Βάνες, εξαρτήματα μηχανοστασίου, σωληνώσεις δικτύου και αντινυκτικό	1	2.500,00 €	2.500,00 €
11	Ηλεκτρο-υδραυλικά				
12				Συνολικό κόστος εγκατάστασης	17.439,76 €

Εικόνα 5.8: Κοστολόγηση γεωθερμικού συστήματος

Ανακεφαλαιώνοντας, στο λογισμικό ο χρήστης το μόνο που πρέπει να εισάγει είναι τα χαρακτηριστικά του κτηρίου και αυτομάτως υπολογίζεται το μέγεθος της αντλίας θερμότητας, το μήκος του γεωεναλλάκτη, το βάθος τοποθέτησης (στα κατακόρυφου τύπου συστήματα), τα χαρακτηριστικά του γεωεναλλάκτη, το μέγεθος του κυκλοφορητή και του δοχείου διαστολής καθώς και το τελικό κόστος εγκατάστασης της επένδυσης.

Οι παράμετροι που μπορούν να μεταβληθούν ανά περίπτωση είναι η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού στην αντλία θερμότητας σύμφωνα πάντα με τις υποδείξεις του κατασκευαστή, συνεπώς και οι θερμοφυσικές ιδιότητες αυτού, ωστόσο αυτό που έχει μεγάλη σημασία είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ τους να είναι 5 °C. Επιπλέον, στο λογισμικό πρέπει να καθοριστεί και η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους ανά περίπτωση. Τέλος, όπου χρησιμοποιούνται εμπειρικές τιμές σύμφωνα με την βιβλιογραφία, για τον ακριβή προσδιορισμό αυτών απαιτείται σχεδιασμός ολόκληρου του δικτύου σε κάποιο διαθέσιμο λογισμικό (π.χ. PSIM).

5.4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στην ενότητα αυτή αξιολογούνται ως προς την ορθότητα τους τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των γεωθερμικών συστημάτων που προέκυψαν από τα αναπτυχθέντα λογισμικά, με παρόμοιες μελέτες της βιβλιογραφίας.

Σύμφωνα με αντίστοιχο παράδειγμα (Κατσιφάρακης, 2015) για κτήριο με μέγιστα φορτία κλιματισμού (θέρμανση: 10,9 kW και ψύξη: 9,6 kW) χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεθοδολογίες για την διαστασιολόγηση των γεωθερμικών συστημάτων οριζοντίου και κατακόρυφου τύπου προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της παρούσας εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον (Κατσιφάρακης, 2015) για το οριζόντιο σύστημα απαιτούνται 787 m εναλλάκτη θερμότητας σε βάθος 2,5 m ενώ στη παρούσα εργασία για το ίδιο βάθος τοποθέτησης απαιτούνται 694 m γεωεναλλάκτη. Αντίστοιχα, για το κατακόρυφο σύστημα απαιτούνται δυο γεωτρήσεις βάθους 61m με γεωεναλλάκτη πολυαιθυλενίου τύπου U, δηλαδή, συνολικά απαιτούνται 242 m εναλλάκτη θερμότητας, ενώ στην παρούσα εργασία απαιτούνται 221 m εναλλάκτη θερμότητας πολυαιθυλενίου τύπου U που τοποθετείται σε τρεις γεωτρήσεις βάθους 37 m.

Όσον αφορά την κοστολόγηση των γεωθερμικών συστημάτων χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές της αγοράς έπειτα από έρευνα αγοράς, ωστόσο τα αποτελέσματα είναι ορθά και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ισχύς: 9,6 kW, οριζόντιο:17,500€, κατακόρυφο: 20,600€).

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την έμπιστη εταιρά έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (www.greenmatch.co.uk) τα κόστη για παρόμοια εγκατάσταση δίνονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Κοστολόγηση γεωθερμικών συστημάτων σύμφωνα με την greenmatch

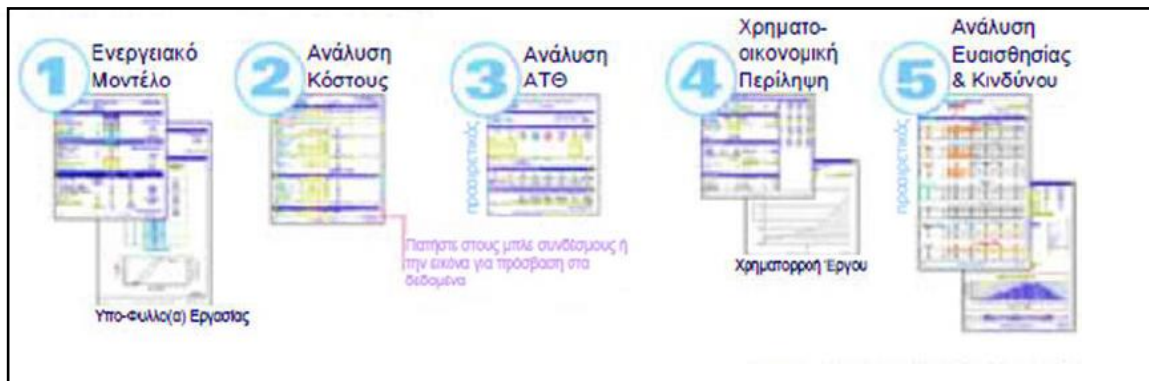
Number of bedrooms	Capacity of GSHP (kW)	Price of heat pump and installation	Price of Horizontal Groundwork	Price of Vertical Ground
3	11 kW	£15,750	£3,750	£9,750

6 ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ

Στο 6^ο Κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί οικονομοτεχνική μελέτη του προτεινόμενου γεωθερμικού συστήματος και περιβαλλοντική αποτίμηση του έργου με το λογισμικό RETScreen. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να συγκριθεί το προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο γεωθερμικής θέρμανσης-ψύξης, με ένα αντίστοιχο συμβατικό ως προς το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, αλλά και ως προς την παραγωγή ρύπων κατά τη λειτουργία τους με στόχο να προσδιοριστεί αν το προτεινόμενο ενεργειακό σύστημα είναι οικονομικά σκόπιμο και βιώσιμο.

6.1 RETS-CREEN ΓΕΝΙΚΑ

Το λογισμικό ανάλυσης έργων καθαρής ενέργειας (RETScreen) χρησιμοποιείται με σκοπό την λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε). Μέσω του λογισμικού προσδιορίζεται εάν ένα προτεινόμενο έργο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οικονομικά σκόπιμο και βιώσιμο. Το RETScreen επιτρέπει σε φορείς λήψης αποφάσεων τη μοντελοποίηση και ανάλυση όλων των έργων καθαρής ενέργειας διεξάγοντας μια πρότυπη ανάλυση βημάτων (Εικόνα 6.1). (RetsCreen.net, 2018)



Εικόνα 6.1: Βήματα πρότυπης ανάλυσης RETS-creen

Πηγή: RetsCreen.net, 2018

6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα δεδομένα όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό RETScreen. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τη ταυτότητα του έργου, τα στοιχεία του συμβατικού συστήματος θέρμανσης-ψύξης, τα στοιχεία του προτεινόμενου ενεργειακού συστήματος, οικονομικά στοιχεία για την ανάλυση κόστους και στοιχεία για την ανάλυση εκπομπών.

6.2.1 Φύλλο εισαγωγής

Δηλώνονται βασικά στοιχεία για την ταυτότητα του έργου όπως: ονομασία, περιοχή μελέτης, τοποθεσία, ο τύπος του έργου και η εξεταζόμενη τεχνολογία. Ο τύπος ανάλυσης που χωρίζεται σε «μέθοδο 1» και «μέθοδο 2» σχετίζεται με το εάν είναι επιθυμητή η σύγκριση του ενεργειακού συστήματος με συμβατικό (μέθοδος 2) ή χωρίς σύγκριση (μέθοδος 1). Η θερμογόνος ικανότητα αναφοράς, σχετίζεται με την αποτίμηση του καυσίμου και χωρίζεται σε Ανώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (ΑΘΙ) και Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (ΚΘΙ). Επιλέγεται η κατώτερα όπως συνηθίζεται στην Ευρώπη για συστήματα συμπαραγωγής θέρμανσης-ψύξης (Εικόνα 6.2).

Πληροφορία έργου	
Όνομασία έργου	ΚΑΤΟΙΚΙΑ 98,5 m ²
Τοποθεσία έργου	ΝΕΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΑΤΤΙΚΗΣ/ΕΛΛΑΔΑ
Συντάχθηκε για	ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Συντάχθηκε από	ΚΑΡΑΜΟΛΕΓΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
Τύπος έργου	Συμπαραγωγή θερμότητας & ψύξης
Τύπος ανάλυσης	Μέθοδος 2
Θερμογόνος ικανότητα αναφοράς	Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα (ΚΘΙ)
Δείξε ρυθμίσεις	<input checked="" type="checkbox"/>
Γλώσσα	Greek - Ελληνικά
Εγχειρίδιο Χρήστη	English - Anglais
Νόμισμα	Σύμβολο Ευρώ
Μονάδες	Μονάδες μετρικού συστήματος

Εικόνα 6.2: Φύλλο εργασίας εισαγωγής

6.2.2 Συμβατικό σύστημα θέρμανσης

Ορίζονται τα χαρακτηριστικά του συμβατικού συστήματος θέρμανσης (Εικόνα 6.4).

❖ Σύστημα θέρμανσης βασικής περίπτωσης:

Επιλέγεται «Μεμονωμένο κτίριο- διεργασίες θέρμανσης» έτσι ώστε να οριστεί από τον χρήστη το φορτίο θέρμανσης και να μην υπολογιστεί μέσω του RETScreen. Το λογισμικό εφόσον διαθέτει βάση κλιματολογικών δεδομένων συμπεριλαμβανομένων και των βαθμομημερών θέρμανσης και ψύξης, προσεγγίζει αυτόματα τις ετήσιες ανάγκες .

❖ Θερμαινόμενη επιφάνεια δαπέδου:

Δηλώνεται η συνολική θερμαινόμενη επιφάνεια (98,5 m²) για το υπό εξέταση κτίριο.

❖ Τύπος καυσίμου:

Δηλώνεται ο τύπος καυσίμου του συστήματος θέρμανσης. Το βασικό συμβατικό σενάριο είναι κεντρική μονάδα θέρμανσης με λέβητα πετρελαίου.

❖ Εποχιακή απόδοση:

Ο βαθμός απόδοσης του λέβητα πετρελαίου θεωρείται ίσος με 85%.

❖ Αιχμή φορτίου θέρμανσης:

Δηλώνεται η αιχμή του φορτίου θέρμανσης (9,4 kW) όπως αυτή υπολογίστηκε στην ενότητα 4.3.

❖ Ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου-διεργασία θέρμανσης:

Δηλώνονται οι ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου θέρμανσης (994) όπως υπολογίστηκαν στην Ενότητα 5.2.1.

❖ Συνολική απαίτηση θερμότητας:

Υπολογίζει το RETScreen την συνολική απαίτηση θέρμανσης (9 MWh).

❖ Κατανάλωση καυσίμου- ετήσια:

Υπολογίζει το RETScreen την ετήσια κατανάλωση καυσίμου (1.023 lt).

❖ Τιμή καυσίμου:

Δηλώνεται η μέση τιμή πετρελαίου θέρμανσης για τον νομό Αττικής κατά τη περίοδο Δεκέμβριος 2019 (1,14€).

❖ Κόστος καυσίμου:

Το RETScreen υπολογίζει το κόστος καυσίμου του βασικού σεναρίου θέρμανσης (1166€).

Εργο παραγωγής θερμότητας	Μονάδα	
Σύστημα θέρμανσης βασικής περίπτωσης	Μεμονωμένο κτίριο - διεργασίες θέρμανσης	
Θερμαινόμενη επιφάνεια δαπέδου του κτιρίου	m ²	99
Τύπος Καυσίμου		Πετρέλαιο (#6) - L
Εμπορική απόδοση	%	85%
Υπολογισμός φορτίου θέρμανσης		
Αιχμή φορτίου θέρμανσης	kW	9,4
Χαρακτηριστικά διεργασίας θερμικού φορτίου		Τυποποιημένο
Ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου - διεργασία θέρμανσης	ώρα	994
Συνολική απαίτηση θέρμανσης	MWh	9
Συνολική αιχμή φορτίου θέρμανσης	kW	9,4
Κατανάλωση καυσίμου - ετήσια	L	1.023
Τιμή Καυσίμου	€/L	1,140
Κόστος καυσίμου	€	1.166
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης προτεινόμενης περίπτωσης		
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης τελικής χρήσης	%	0%
Καθαρή αιχμή φορτίου θέρμανσης	kW	9,4
Καθαρή ζήτηση θέρμανσης	MWh	9

Εικόνα 6.3: Συμβατικό σύστημα θέρμανσης

6.2.3 Συμβατικό σύστημα ψύξης

Ορίζονται τα στοιχεία του συμβατικού συστήματος ψύξης (Εικόνα 6.5).

❖ Σύστημα ψύξης βασικής περίπτωσης:

Όπως το σύστημα θέρμανσης βασικής περίπτωσης.

❖ Ψυχόμενη επιφάνεια δαπέδου για το κτίριο:

Δηλώνεται η συνολική ψυχόμενη επιφάνεια (98,5 m²) για το υπό εξέταση κτίριο.

❖ Τύπος καυσίμου:

Δηλώνεται ο τύπος καυσίμου του συστήματος ψύξης. Το βασικό συμβατικό σενάριο ψύξης αποτελείται από κλιματιστικά τύπου split.

❖ Εποχιακή απόδοση:

Ο εποχιακός συντελεστής επίδοσης για τις μονάδες split θεωρείται 2,8.

❖ Αιχμή φορτίου ψύξης:

Δηλώνεται η αιχμή του φορτίου θέρμανσης (6,2 kW) όπως αυτή υπολογίστηκε στην ενότητα 4.4.

❖ Ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου-διεργασία ψύξης:

Δηλώνονται οι ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου ψύξης (613) όπως υπολογίστηκαν στην ενότητα 5.2.1.

❖ Συνολική απαίτηση ψύξης:

Υπολογίζει το RETScreen την συνολική απαίτηση ψύξης (4 MWh).

❖ Κατανάλωση καυσίμου- ετήσια:

Υπολογίζει το RETScreen την ετήσια κατανάλωση καυσίμου (1 MW).

❖ Τιμή καυσίμου:

Δηλώνεται η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh σύμφωνα με το οικιακό τιμολόγιο της Δ.Ε.Η. γ1 και γ1 νυχτερινό (0,094€/kWh). (ΔΕΗ, 2013)

❖ Κόστος καυσίμου:

Το RETScreen υπολογίζει το κόστος καυσίμου του βασικού σεναρίου ψύξης (128€).

Έργο ψύξης	Μονάδα	
Σύστημα ψύξης βασικής περίπτωσης	Μεμονωμένο κτήριο - ψύξη διεργασιών	
Ψυχόμενη επιφάνεια δαπέδου για το κτήριο	m ²	99
Τύπος Καυσίμου		Ηλεκτρική ενέργεια
Συντελεστής επίδοσης - εποχιακός		2,80
Υπολογισμός φορτίου ψύξης		
Αιχμή φορτίου διεργασίας ψύξης	kW	6
Χαρακτηριστικά φορτίου διεργασίας ψύξης		Τυποποιημένο
Ισοδύναμες ώρες πλήρους φορτίου - διεργασίας ψύξης	ώρα	613
Συνολική ζήτηση ψύξης	MWh	4
Συνολικό φορτίο αιχμής ψύξης	kW	6,2
Κατανάλωση καυσίμου - ετήσια	MWh	1
Τιμή Καυσίμου	€/kWh	0,094
Κόστος καυσίμου	€	128
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης προτεινόμενης περίπτωσης		
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης τελικής χρήσης	%	0%
Καθαρή αιχμή φορτίου ψύξης	kW	6,2
Καθαρή ζήτηση ψύξης	MWh	4

Εικόνα 6.4: Συμβατικό σύστημα ψύξης

6.2.4 Ενεργειακό σύστημα θέρμανσης-ψύξης

Ορίζονται τα χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος κλιματισμού όπως αυτά αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5 (Εικόνα 6.6).

Προτεινόμενη περίπτωση συστήματος ψύξης			
Σύστημα ψύξης βασικού φορτίου			
Τεχνολογία	Αντλία θερμότητας		
Τύπος Καυσίμου	Ηλεκτρική ενέργεια		
Τιμή Καυσίμου	€/MWh	94,000	
Ισχύς	kW	6,2	100,0%
Συντελεστής επίδοσης - εποχιακός		4,40	
Κατασκευαστής			
Μοντέλο			
Αποδιδόμενη ψύξη	MWh	4	100,0%
Σύστημα ψύξης φορτίου αιχμής			
Τεχνολογία	Δεν απαιτείται		
Σύστημα θέρμανσης προτεινόμενης περίπτωσης			
Επιλογή Συστήματος			
Σύστημα θέρμανσης φορτίου βάσης			
Τεχνολογία			
Αντλία θερμότητας			
Μέθοδος επιλογής καυσίμου			
Μόνο ένα καύσιμο			
Τύπος Καυσίμου	Ηλεκτρική ενέργεια		
Τιμή Καυσίμου	€/MWh	94,000	
Αντλία θερμότητας			
Ισχύς	kW	9,4	100,0%
Αποδιδόμενη θερμότητα	MWh	9	100,0%
Κατασκευαστής			
Μοντέλο			
Εποχιακή απόδοση	%	360%	
Απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου	GJ/ώρα	0,0	

Εικόνα 6.5: Προτεινόμενο ενεργειακό σύστημα θέρμανσης κλιματισμού

6.2.5 Ανάλυση κόστους

Εισάγονται τα οικονομικά δεδομένα αρχικού κόστους επένδυσης για την εγκατάσταση κάθετου γεωθερμικού συστήματος κλειστού τύπου όπως αυτά περιεγράφηκαν στην ενότητα 5.2.4. Τα απρόβλεπτα του έργου λογίζονται ως το 10% του αρχικού κόστους δηλαδή 867€. Το συνολικό αρχικό κόστος της εγκατάστασης των συμβατικών συστημάτων θέρμανσης- ψύξης εκτιμάται 12.000€. (Εικόνα 6.7)

Αρχικό κόστος (πιστώσεις)	Μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα κόστους	Ποσό	Σχετικό κόστος
Μελέτη σκοπιμότητας					
Μηχανολογική μελέτη και αδειοδότηση	κόστος	1	€ 900	€ 900	
Υπο-σύνολο:				€ 900	9,4%
Ανάπτυξη					
Ανάπτυξη έργου (Χωματουργικές, Ηλεκτρο-υδραυλικά)	κόστος	1	€ 8.027	€ 8.027	
Υπο-σύνολο:				€ 8.027	84,2%
Μηχανολογικά					
Λοιπά μηχανολογικά εξαρτήματα	κόστος	1	€ 3.753	€ 3.753	
Υπο-σύνολο:				€ 3.753	39,4%
Σύστημα θέρμανσης					
Φορτίο βάσης - Αντλία θερμότητας	kW	9,4	€ 850	€ 7.985	
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης	έργο	0	€ -	€ -	
	κόστος	0	€ -	€ -	
Υπο-σύνολο:				€ 7.985	83,8%
Σύστημα ψύξης					
Φορτίο βάσης - Αντλία θερμότητας	kW	6,2	€ -	€ -	
Μέτρα ενεργειακής απόδοσης	έργο	0	€ -	€ -	
Συμβατικό σύστημα θέρμανσης	πίστωση	1	€ 9.000	€ (9.000)	
Συμβατικό σύστημα ψύξης	πίστωση	1	€ 3.000	€ (3.000)	
Υπο-σύνολο:				€ (12.000)	-125,9%
Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα					
Ανταλλακτικά	%	0,0%	€ -	€ -	
Μεταφορά	έργο	0	€ -	€ -	
Εκπαίδευση & θέση σε λειτουργία	ανά ημέρα	0	€ -	€ -	
Balance of system & misc. - credit	πίστωση	0	€ -	€ -	
Απρόβλεπτα	%	10,0%	€ 8.665	€ 867	
Τόκος κατά την κατασκευή		0 μήνες(ες)	€ 9.532	€ -	
Υπο-σύνολο:				€ 867	9,1%
Συνολικά αρχικά κόστη				€ 9.532	100,0%

Εικόνα 6.6: Αρχικό κόστος επένδυσης

Η συντήρηση των γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης- ψύξης είναι μηδενική. Η συντήρηση των συμβατικών συστημάτων κοστίζει 100€/χρόνο κι τα απρόβλεπτα 20€/χρόνο, ώστε να λαμβάνονται υπόψιν 100€/5χρόνια για τυχόν ζημιές των συστημάτων. Στο κόστος συντήρησης περιλαμβάνεται ετήσια συντήρηση του λέβητα πετρελαίου και κλιματιστικών.

Η ετήσια κατανάλωση του προτεινόμενου γεωθερμικού συστήματος είναι 3,4 MW με συνολικό κόστος 325€. Ενώ το ετήσιο κόστος λειτουργίας του συμβατικού συστήματος θέρμανσης είναι 1166€ και του συμβατικού συστήματος ψύξης 128€.

Τελικά, το RETScreen υπολογίζει την ετήσια εξοικονόμηση (1294€) με τη χρήση της γεωθερμικής αντλίας (Εικόνα 6.8).

Ετήσια κόστη (πιστώσεις)	Μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα κόστους	Ποσό
Λειτουργία & Συντήρηση				
Τμήματα & Εργασία	έργο	1		-
ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	πίστωση	1	€ 100	(100)
Απρόβλεπτα	%	20,0%	€ (100)	(20)
Υπο-σύνολο:			€	(120)
Κόστος καυσίμου - προτεινόμενη περίπτωση				
Ηλεκτρική ενέργεια	MWh	3	€ 94,500	327
Υπο-σύνολο:			€	327
Ετήσια εξοικονόμηση				
Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση				
Πετρέλαιο (#6)	L	1.023	€ 1,140	1.166
Ηλεκτρική ενέργεια	MWh	1	€ 94,000	128
Υπο-σύνολο:			€	1.294

Εικόνα 6.7: Ετήσια κόστη και ετήσια εξοικονόμηση

6.2.6 Ανάλυση εκπομπών

Το λογισμικό πραγματοποιεί εκτίμηση των αερίων του θερμοκηπίου, μετρούμενα σε τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) τόσο για το βασικό συμβατικό σενάριο όσο και για το προτεινόμενο (Εικόνα 6.9).

Καταχωρείται η χώρα αναφοράς του έργου ώστε να καθοριστεί από το λογισμικό ο αντίστοιχος συντελεστής εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (0,718 tn CO₂/MWh) για την Ελλάδα. Τέλος καταχωρούνται και οι απώλειες μεταφοράς και διανομής από τα δίκτυα (έστω 5%).

Κράτος - περιφέρεια	Τύπος Καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ (εξαιρούνται Μ&Δ) tn CO ₂ /MWh	Απώλειες Μ&Δ %	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ tn CO ₂ /MWh
Greece	Όλοι οι τύποι	0,718	5,0%	0,756

Αλλαγές στο Σενάριο Αναφοράς κατά τη διάρκεια ζωής του έργου

Περίληψη εκπομπών ΑΤΘ βασικού σεναρίου (σενάριο αναφοράς)				
Τύπος Καυσίμου	Μίγμα καυσίμου %	Κατανάλωση καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ	Εκπομπές ΑΤΘ
		MWh	tn CO ₂ /MWh	tn CO ₂
Πετρέλαιο (#6)	89,0%	11	0,283	3,1
Ηλεκτρική ενέργεια	11,0%	1	0,756	1,0
Σύνολο	100,0%	12	0,335	4,1

Περίληψη εκπομπών ΑΤΘ προτεινόμενης περίπτωσης (Έργο συμπαραγωγής θερμότητας & ψύξης)				
Τύπος Καυσίμου	Μίγμα καυσίμου %	Κατανάλωση καυσίμου	Συντελεστής εκπομπής ΑΤΘ	Εκπομπές ΑΤΘ
		MWh	tn CO ₂ /MWh	tn CO ₂
Ηλεκτρική ενέργεια	100,0%	3	0,756	2,6
Σύνολο	100,0%	3	0,756	2,6

εικόνα 6.8: Ανάλυση εκπομπών συμβατικού και προτεινόμενου συστήματος

6.2.7 Οικονομική ανάλυση

Το RETScreen την βιωσιμότητα των έργων την αξιολογεί με κριτήρια την καθαρά παρούσα αξία (NPV) και το εσωτερικό συντελεστή αποδοτικότητας (IRR). Για τον σκοπό αυτό απαιτείται ο καθορισμός των παρακάτω οικονομικών παραμέτρων (Εικόνα 6.10):

❖ Κυλιόμενος φόρος καυσίμου:

Συντελεστής που προσδιορίζει τυχόν αύξηση του κόστους καυσίμου για τον χρονικό ορίζοντα του έργου. Οι συνηθισμένες τιμές κυμαίνονται από 2% έως και 3% (RetsCreen.net, 2018).

❖ Τιμή πληθωρισμού:

Σχετίζεται με την ετήσια μεταβολή του δείκτη τιμών καταναλωτή και για τον Δεκέμβριο 2019 η τιμή του είναι 0,8 (ΕΛΛΣΤΑΤ, 2019).

❖ Επιτόκιο αναγωγής

Σχετίζεται με την μετατροπή μελλοντικών χρηματοροών σε σημερινές. Οι συνηθισμένες τιμές κυμαίνονται από 6% έως και 11% (RetsCreen.net, 2018).

❖ Διάρκεια ζωής έργου:

Ως χρονική περίοδος ζωής του έργου τέθηκαν τα 30 χρόνια.

Οικονομικοί Παράμετροι			
Γενικά			
Κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου	%		2,0%
Τιμή πληθωρισμού	%		0,8%
Επιτόκιο αναγωγής	%		6,0%
Διάρκεια ζωής έργου	έτος		30

Εικόνα 6.9: Οικονομικοί παράμετροι έργου

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

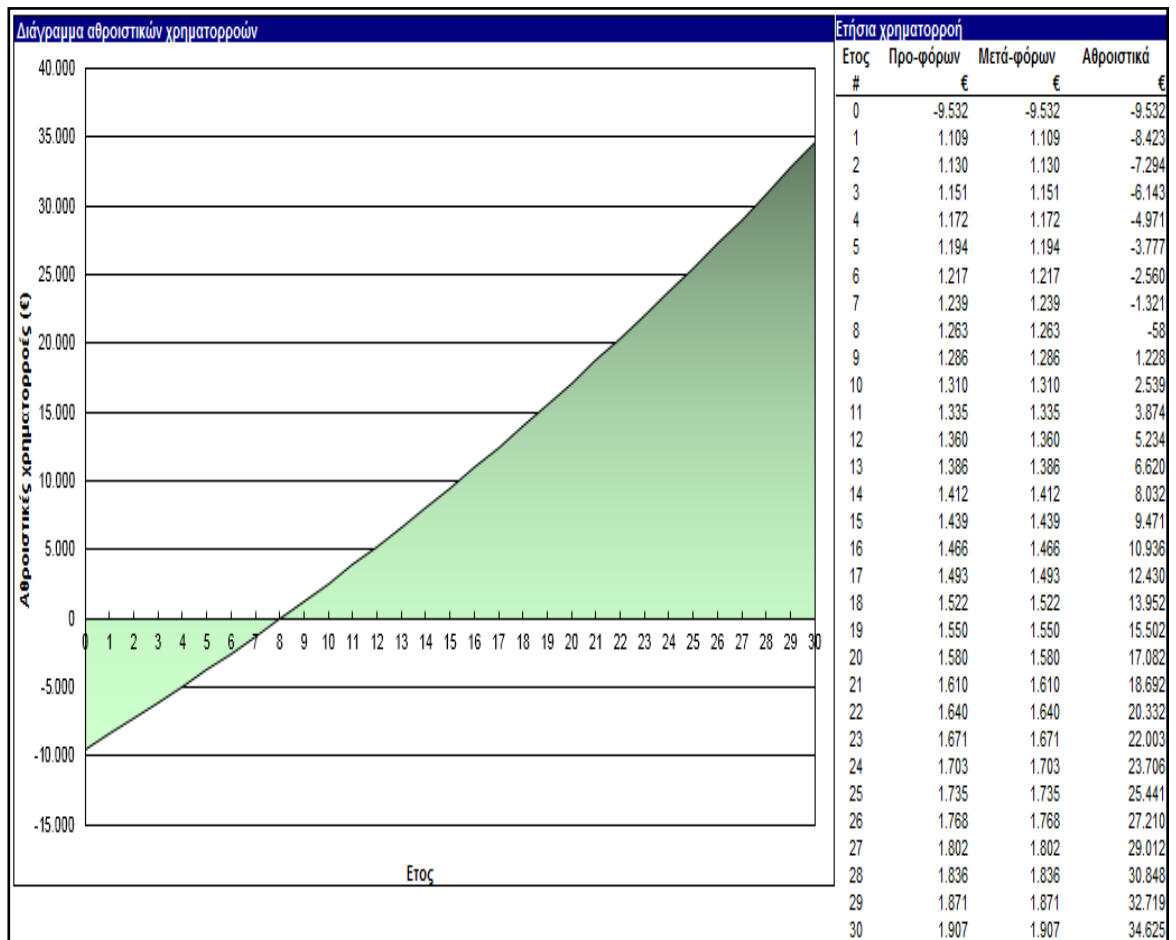
Στην ενότητα αυτή παραθέτονται τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης και της περιβαλλοντικής αποτίμησης της εξεταζόμενης επένδυσης εγκατάστασης κάθετου γεωθερμικού συστήματος κλειστού τύπου για τη πλήρη κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων της εξεταζόμενης κατοικίας, όπως αυτά προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού RETScreen.

6.3.1 Οικονομική αξιολόγηση

Στην Εικόνα 6.11 παρουσιάζονται οι δείκτες που αφορούν την οικονομική βιωσιμότητα του έργου (NPV, IRR) ενώ στο σχήμα 6.2 το διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών για την διάρκεια ζωή του έργου (30 έτη).

Οικονομική Βιωσιμότητα		
Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης προ φόρων - μετοχή (IRR) προ φόρου - πτεριουσιακά στοιχεία	%	13,0%
(IRR) μετά-φόρου - μετοχές (IRR) μετά φόρου - πτεριουσιακά στοιχεία	%	13,0%
Απλή αποπληρωμή	έτος	8,8
Αποπληρωμή Μετοχών	έτος	8,0
Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	€	9.187
Ετήσιες αποταμιεύσεις κύκλου ζωής	€/έτος	667
Αναλογία Οφέλους-Κόστους (Ο-Κ)		1,96
Κόστος μείωσης εκπομπών ΑΤΘ	€/tCO2	(440)

Εικόνα 6.10: συντελεστές οικονομικής βιωσιμότητας έργου



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροων έργου

Από την Εικόνα (6.11) και το Σχήμα (6.1) η επένδυση αντικατάστασης του συμβατικού συστήματος θέρμανσης-ψύξης με γεωθερμική αντλία θερμότητας φαίνεται να είναι ιδιαίτερα βιώσιμη και ελκυστική βάση των κριτηρίων καθαράς παρούσας αξίας ($NPV=9.187\text{€}>0$) και εσωτερικού συντελεστής απόδοσης ($IRR=13,0\%>i=6\%$).

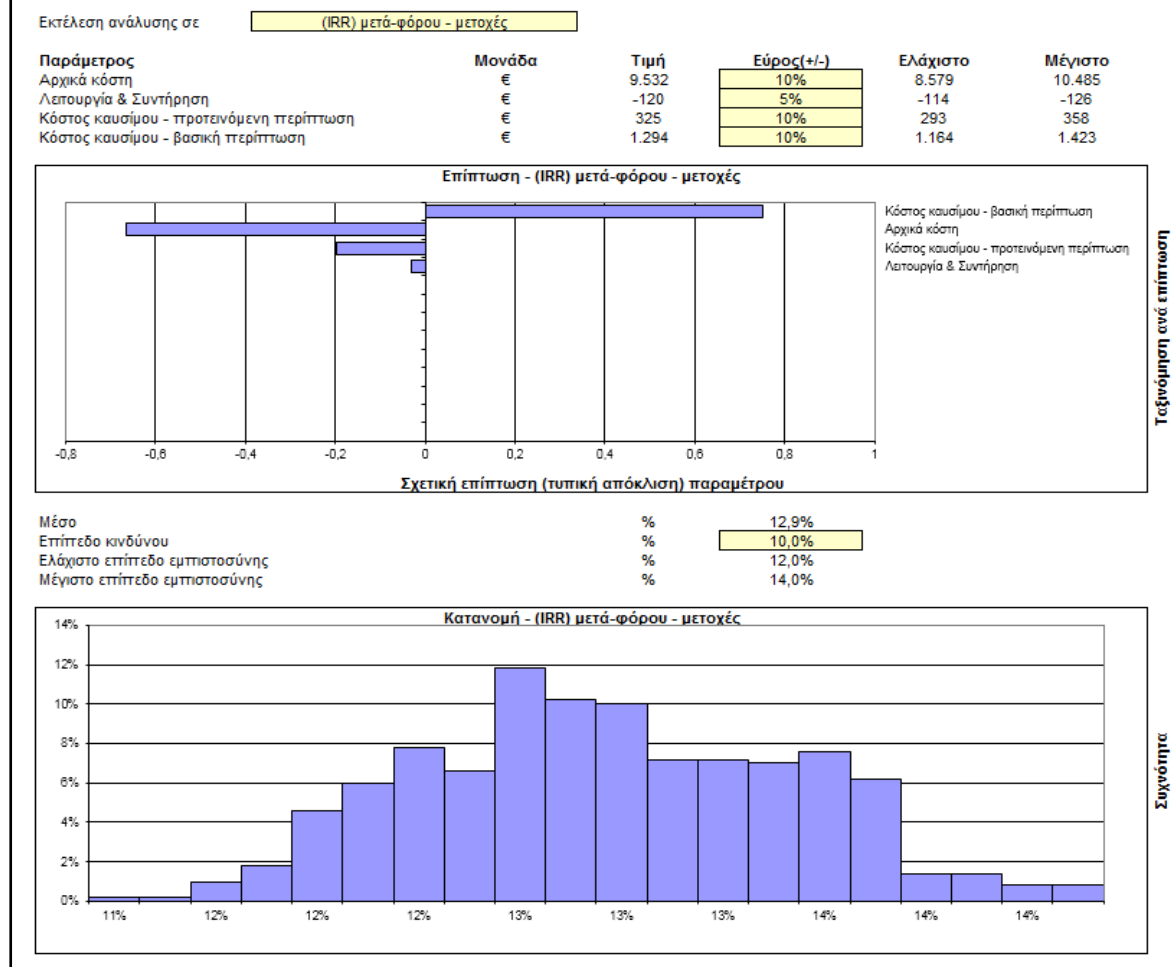
Επιπλέον, η απόσβεση του κεφαλαίου επένδυσης επιτυγχάνεται ταχύτητα σε περίπου 8 χρόνια. Αξίζει να σημειωθεί πως η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται έως το τέλος της διάρκειας ζωής του έργου ξεπερνά τα 34.500€.

6.3.2 Ανάλυση ευαισθησίας και επικινδυνότητας επένδυσης

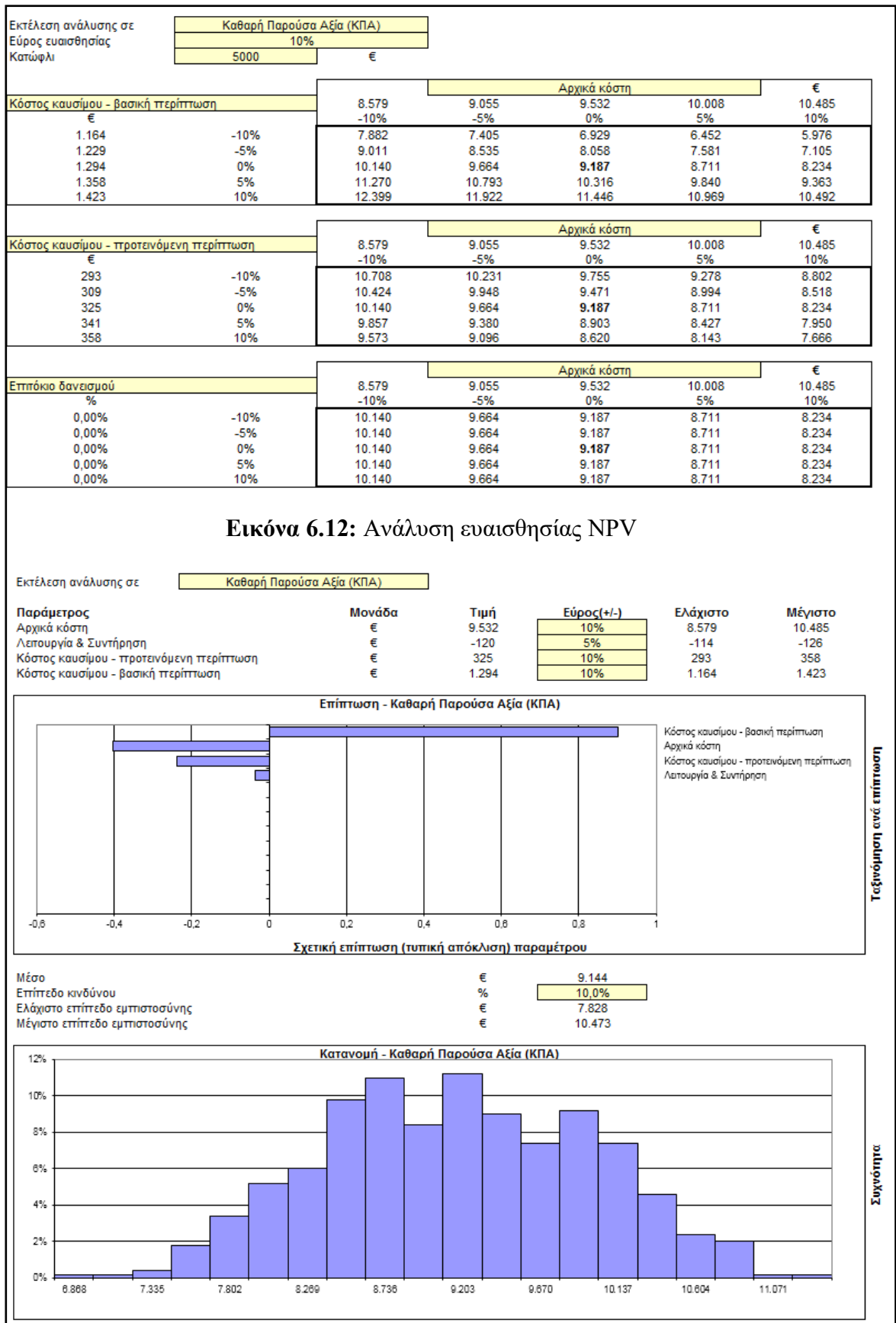
Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με εύρος 10% για τους δείκτες IRR, NPV και για το χρόνο αποπληρωμής και ακολουθεί η ανάλυση επικινδυνότητας κάθε περίπτωσης.

Εκτέλεση ανάλυσης σε		(IRR) μετά-φόρου - μετοχές				
Εύρος ευαισθησίας		10%				
Κατώφλι		6	%			
Κόστος καυσίμου - βασική περίπτωση		Αρχικά κόστη				€
€		8.578	9.055	9.532	10.008	10.485
		-10%	-5%	0%	5%	10%
1.164	-10%	12,7%	12,0%	11,4%	10,8%	10,3%
1.229	-5%	13,6%	12,9%	12,2%	11,6%	11,1%
1.294	0%	14,4%	13,7%	13,0%	12,4%	11,8%
1.358	5%	15,2%	14,5%	13,8%	13,1%	12,5%
1.423	10%	16,1%	15,3%	14,5%	13,8%	13,2%
Κόστος καυσίμου - προτεινόμενη περίπτωση		Αρχικά κόστη				€
€		8.578	9.055	9.532	10.008	10.485
		-10%	-5%	0%	5%	10%
293	-10%	14,8%	14,1%	13,4%	12,7%	12,2%
309	-5%	14,6%	13,9%	13,2%	12,6%	12,0%
325	0%	14,4%	13,7%	13,0%	12,4%	11,8%
341	5%	14,2%	13,5%	12,8%	12,2%	11,6%
358	10%	14,0%	13,3%	12,6%	12,0%	11,4%

Εικόνα 6.11: Ανάλυση ευαισθησίας IRR

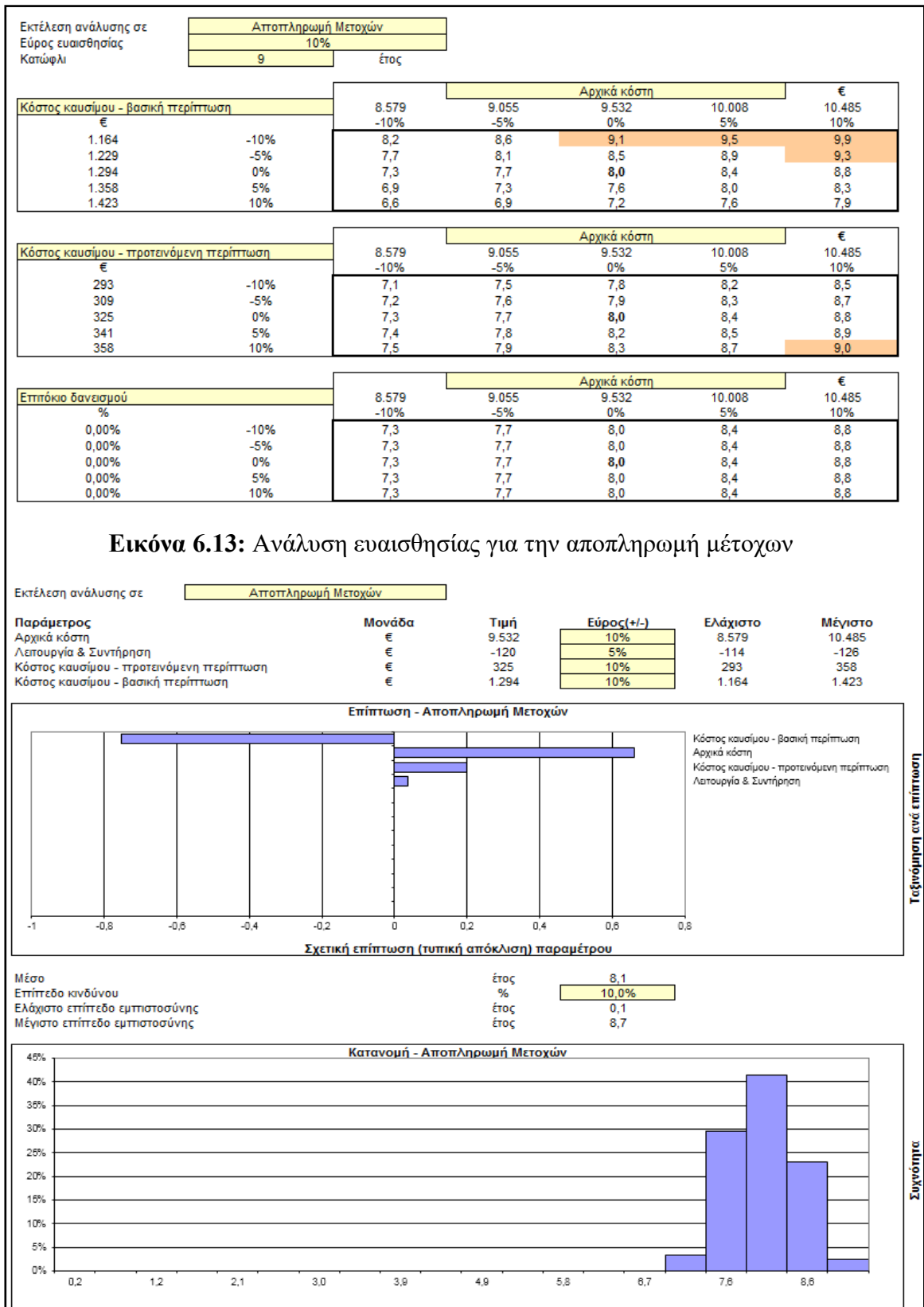


Σχήμα 6.2: Ανάλυση επικινδυνότητας IRR



Σχήμα 6.3: Ανάλυση επικινδυνότητας NPV

Καραμολέγκος Ι. Νικόλαος, Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου διαστασιολόγησης γεωθερμικών συστημάτων σε κτήρια, 2020.



Σχήμα 6.4: Ανάλυση επικινδυνότητας για την αποπληρωμή μέτοχων

Από την ανάλυση ευαισθησίας παρατηρείται ότι η επένδυση είναι βιώσιμη για όλους τους συνδυασμούς καθώς πάντα ο NPV>0 και αντίστοιχα ο IRR>6.

Από την ανάλυση επικινδυνότητας προκύπτει ότι ο NPV, ο IRR αλλά και ο χρόνος αποπληρωμής επηρεάζονται περισσότερο από το κόστος του καυσίμου του βασικού συμβατικού σεναρίου και έπειτα από το αρχικό κόστος της επένδυσης.

Τέλος, με βεβαιότητα 90% ο IRR βρίσκεται μεταξύ των τιμών 12%-14% , ο NPV μεταξύ των τιμών 7.828€-10.473€ και ο χρόνος αποπληρωμής κυμαίνεται από 0,1-8,7 έτη.

6.3.3 Ανάλυση εκπομπών

Η εφαρμογή του προτεινόμενου γεωθερμικού συστήματος για τη κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση και ψύξη για την υπό μελέτη κατοικία επιφέρει ετήσια εξοικονόμηση 1,5 tn CO₂ αερίων του θερμοκηπίου η οποία ισοδυναμεί με 1,5 άτομα που μειώνουν την χρήση ενέργειας κατά 20% (Εικόνα 6.15).

	Εκπομπές ΑΤΘ βασικής περίπτωσης tn CO ₂	Εκπομπές ΑΤΘ προτεινόμενης περίπτωσης tn CO ₂	Μικτή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ tn CO ₂	Τέλη συναλλαγών πιστώσεων εκπομπών ΑΤΘ %	Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ tn CO ₂
Εργο συμπαραγωγής θερμότητας & ψύξης	4,1	2,6	1,5	0%	1,5
Καθαρή ετήσια μείωση εκπομπών ΑΤΘ	1,5	tn CO ₂	ισοδυναμεί με	1,5	Άτομα που μειώνουν την χρήση ενέργειας κατά 20%

Εικόνα 6.14: Ετήσια μείωση εκπομπών

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη παρούσα εργασία, διαπιστώνεται πως η χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (ΓΑΘ) παρά το μεγάλο αρχικό κόστος, είναι η πλέον συμφέρουσα επιλογή για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης μιας κατοικίας.

Η επιλογή της ΓΑΘ για τον κλιματισμό του εν λόγω κτηρίου επιφέρει ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας κατά 2MWh δηλαδή περίπου 70% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης κτηρίων, παράλληλα αυτό σημαίνει πως επιτυγχάνεται ετήσια εξοικονόμηση 1.362 €, αντισταθμίζοντας έτσι το μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης. Η απόσβεση της επένδυσης επιτυγχάνεται σε μόλις 8 χρόνια, όταν η διάρκεια ζωής του έργου υπολογίζεται στα 30 έτη, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών συστημάτων (λέβητας πετρελαίου και μονάδες τύπου split) για τους παραπάνω λόγους η επένδυση κρίνεται απόλυτα βιώσιμη και ιδιαίτερα ελκυστική.

Επιπλέον, είναι γνωστό ότι η τιμή των ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση και την ψύξη των κτηρίων είναι συνεχώς αυξανόμενη σε διεθνές επίπεδο και ειδικότερα στην Ελλάδα είναι και ιδιαίτερα υψηλή. Αυτό, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματά που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας (κεφάλαιο 6), ότι η βιωσιμότητα της προτεινόμενης επένδυσης εξαρτάται κυρίως από το κόστος καυσίμου του συμβατικού συστήματος θέρμανσης, αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα της ΓΑΘ, που πιθανόν να επιφέρει ακόμη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση και συνεπώς ταχύτερη απόσβεση της επένδυσης.

Η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας για τον κλιματισμό κτηρίων είναι ίσως η βέλτιστη λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. Παρ' όλα αυτά η διεύθυνση των συστημάτων ΓΑΘ στην Ελλάδα είναι απελπιστικά χαμηλή και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η ενημέρωση γύρω από το θέμα είναι σχεδόν ανύπαρκτη, επιπλέον μέχρι και πέρσι δεν υπήρχαν καν κίνητρα για την εγκατάσταση μιας καινούργιας σχετικά τεχνολογίας. Το τελευταίο διάστημα πραγματοποιείται μια προσπάθεια προώθησης της τεχνολογίας και μάλιστα από φέτος συμπεριλαμβάνεται στο πρόγραμμα «εξοικονομώ κατ' οίκων». Ωστόσο, θα πρέπει να υπάρξουν και άλλα κίνητρα όπως μείωση του ΦΠΑ της εγκατάστασης και εφαρμογή ευνοϊκών τιμολογίων ηλεκτρισμού από την ΔΕΗ μιας και ευνοείται άμεσα από την ανάπτυξη της αβαθούς γεωθερμίας με την βελτίωση των συνθηκών ζήτησης ηλεκτρισμού κατά τις ώρες αιχμής, έτσι ώστε να γίνει ανταγωνιστική και ελκυστική σε επίπεδο κόστους εγκατάστασης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην Ελλάδα ο κτηριακό τομέας οφείλεται για το μεγαλύτερο ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας, είναι αντιληπτό πως η προώθηση και η επιχορήγηση συστημάτων αξιοποίησης αβαθούς γεωθερμίας για τον κλιματισμό των κτηρίων έχει μια σειρά από περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

8 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

❖ ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dickson, M. H. & Fanelli, M., 2003. *Geothermy energy: utilization and techonology*, Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
2. ETHzurich, 2016. *Swiss Seismological Service|Geothermal Energy and Induced Earthquakes*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.seismo.ethz.ch/en/knowledge/things-to-know/geothermal-energy-earthquakes/geothermal-energy-and-induced-earthquakes/>
[Πρόσβαση 4 9 2020].
3. Gehringer, M. & Loksha, V., 2012. *GEOTHERMAL HANDBOOK: PLANNING AND FINANCING POWER GENERATION*. Washington DC| USA: Energy Sector Management Assistance Program | The World Bank.
4. ISO, 2006. *ISO 13790 "Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling"*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set3/WI_14_TC-draft-ISO13790_2006-07-10.pdf
[Πρόσβαση 2020].
5. Kavanaugh, S. & Rafferty, K., 2014. *Geothermal Heating and Cooling (Design of Ground-Source Heat Pump Systems)*. Atlanta: ASHARE.
6. Kolditz, O. et al., 2013. *Geoenergy. new concepts for utilization of geo-reservoirs as potential energy sources*, December, 70(8), pp. 3427-3431.
7. Lunis, B. & Breckenridge, R., 1991. *Environmental considerations In: Lienau, P.J. and Lunis B.C., eds, Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*,. Oregon: Geo-Heat Center, Klamath Falls.
8. RetsCreen.net, 2018. *Natural Resources Canada*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>
[Πρόσβαση 4 2 2020].
9. Rummel, F. & Kappelmeyer, O., 1993. *Geothermal energy—future energy source*, Karlsruhe: Verlag C.F.Muller Karlsruhe.
10. Sass, I. και συν., 2012. *Shallow Geothermal Systems –Recommendations on Design, Construction, Operation and Monitoring*. Hannover, Germany: German Geological Society.

❖ **ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

11. TEE-KENAK, 2020. *EASYkenak*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.easykenak.gr/>
[Πρόσβαση 4 2020].
12. Wilo, 2020. *Wilo pump*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: www.wilo.gr
[Πρόσβαση 1 4 2020].
13. Zarroyk, S. J. & Mclean, K., 2019. *Geothermal Well Test Analysis*, New Zeland: ELSEVIER- ACADEMIC PRESS.
14. Ανδρίτσος, Ν., 2012. *Γεωθερμική Ενέργεια και Εφαρμογές-Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας-Γμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/EKDHLVSEI/S/EKDHLWSEIS_2004-2006/ANANEOSIMES_PIGES_ENERGEIAS/Tab/9.Andritsos.pdf
[Πρόσβαση 5 4 2020].
15. Ανδρίτσος, Ν. Β. & Φυτικάς, Μ. Ν., 2004. *ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ*, Θεσσαλονική: ΤΖΙΟΛΑΣ.
16. Ανδρουτσόπουλος, Α., Κορωνάκη, Ε. & Πολυμενόπουλος, Γ., 2007. *Παράμετροι επίδρασης της ενεργειακής απόδοσης δομικών προϊόντων στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια», πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μηχανολόγων - Ηλεκτρολόγων Μηχανικών(ΠΣΔΜΗ)*. Αθήνα, s.n.
17. Βραχόπουλος, Μ. Γ., Κούκου, Μ. Κ. & Καρύτσας, Κ., 2015. *ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ- Αρχές Σχεδιασμού Γεωθερμικών Συστημάτων και Εφαρμογές*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα.
18. Βρέλλης, Γ., Αρβανίτης, Α. & Μπίμπου-Μπακούλα, Α., 2009. *Γεωθερμικές γεωτρήσεις: Σχεδιασμός, εκτέλεση και αντιμετώπιση προβλημάτων*, Αχαρναίς: Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων.
19. ΔΕΗ, 2013. *ΔΕΚ-ΟΙΚΙΑΚΑ ΤΙΜΟΛΟΓΙΑ*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.dei.gr/el/oikiakoi-pelates/timologia-mar262020>
[Πρόσβαση 2020 4 2].
20. E.M.Y., 2012. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
http://www.hnms.gr/emys/el/climatology/climatology_city?perifereia=Attiki&poli=Nea_Filadelfia
[Πρόσβαση 1 4 2020].

21. ΕΛΛΣΤΑΤ, Ε. Σ. Α., 2019. www.statistics.gr. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.statistics.gr/documents/20181/dea7044d-f26f-23a0-8ad5-d3dff5ed86de>
[Πρόσβαση 4 3 2020].
22. Καλδέλλης, Ι., 1994. *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ- Εκπαιδευτικές σημειώσεις*. ΠΕΙΡΑΙΑΣ: ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
23. Καλδέλλης, Ι. Κ. & Καββαδίας, Κ. Α., 2001. *Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων μορφών ενέργειας*. Αθήνα: ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ.
24. Κατσαπρακάκης, Δ., 2015. *Καινότομες Τεχνολογίες Εφαρμογών Α.Π.Ε. και Εξοικονόμησης Ενέργειας-Γεωθερμία-Διαστασιολόγηση κάθετου και οριζοντίου γεωθερμικού εναλλάκτη*. Κρήτη: Πρόγραμμα Διά Βίου Μάθησης (Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Τ.Ε.Ι. Αθήνας).
25. Κατσιμίχας, Σ., 2010. *Συστήματα Γεωθερμίας ΕΝ.Ε.ΕΠΙ.Θ.Ε (Ένωση Ελληνικών ΕΠΙχειρήσεων Θέρμανσης και Ενέργειας*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.uhhe.gr/>
[Πρόσβαση 8 4 2020].
26. Κατσιφάρακης, Κ., 1986. *ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ "Βέλτιστη εκμετάλλευση γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας με σύστημα πηγαδιών"*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης- Πολυτεχνική Σχολή -Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
27. Κατσιφάρακης, Κ., 2015. *Εκπαιδευτικές σημειώσεις: "Γεωθερμική ενέργεια" , "Γεωθερμική ενέργεια ψηλής ενθαλπίας", Γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας"*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://opencourses.auth.gr/modules/document/index.php?course=OCRS159&openDir=/542a78175IsX>
[Πρόσβαση 5 4 2020].
28. Μαμάσης, Ν., 2018. *Εκπαιδευτικές σημειώσεις "Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία"*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CIVIL114/ene_geoth.pdf
[Πρόσβαση 5 4 2020].
29. Μιχόπουλος, Α., Βούλγαρη, Β. & Ζαχαριάδης, Θ., 2015. *Οδηγός Σχεδιασμού και Εγκατάστασης Συστημάτων Αβαθούς Γεωθερμίας*. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
https://3ep.weebly.com/uploads/5/7/4/3/57439107/gshp_guide_cy_%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C.pdf
[Πρόσβαση 7 4 2020].

30. Μπαλάρας, Κ., Δασκαλάκη, Ε., Δρούτσα, Π. & Κοντογιαννίδης, Σ., 2015. *Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια*, Αθήνα: Mediterranean college.
31. Νίκας, Κ.-Σ. & Παπάζογλου, Ε., 2010. *ΑΡΧΕΣ της ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ -Συνοπτική θεωρία & Ασκήσεις*. 1η επιμ. Αθήνα: s.n.
32. Παπαχρήστου, Μ., Ανδρίτσος, Ν., Αρβανίτης, Α. & Δαλαμπάκης, Π. επιμ., 2018. *11ο Εθνικό Συνέδριο του I.H.T. για της Ήπιες Μορφές Ενέργειας*. Θεσσαλονική, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής-Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονικής, pp. 457-468.
33. Σταμπόλης, Κ. Ν., Μεζαρτσόγλου, Δ. & Χατζηβασιλειάδης, Ι., 2019. *Ο Ελληνικός ενεργειακός τομέας*, Αθήνα: Ινστιτούτο ενέργειας Ν.Α Ευρώπης.
34. Στρωτός, Γ., 2016. *Εκπαιδευτικές σημειώσεις "Θέρμανση-Κλιματισμός"*. Πειραιάς: Τ.Ε.Ι. Πειραιά- Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
35. Στρωτός, Γ., 2018. *Εκπαιδευτικές σημειώσεις "Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων"*. Πειραιάς: Τ.Ε.Ι. Πειραιά-Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
36. Ψαρράς, Ν., 2019. *nikolaos psarras | Geothermal Engineering*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://nikolaospsarras.com/antlies-thermotitas/> [Πρόσβαση 8 4 2020].