



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ, ΝΕΟΤΕΡΕΣ
ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ**

υπό
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΠΑΝΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ, ΝΕΟΤΕΡΕΣ
ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ**

υπό
ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΠΑΝΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2023

© 2023 Γεώργιος Σπανός

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
---------------------------------	---

Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
--------------------	---

Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Ρήτος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
------------------	---

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ, ΝΕΟΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΘΕΣΣΑΛΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΠΑΝΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Περίληψη

Οι Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας είναι συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας που εκμεταλλεύονται την γεωθερμική ενέργεια του υπεδάφους ώστε να παραγάγουν θέρμανση και ψύξη με τρόπο αποδοτικότερο αλλά και φιλικότερο προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Σε αυτήν την εργασία αναφέρονται αρχικά η ιστορία της εξέλιξης τους μέχρι σήμερα αλλά και η ενεργειακή οικονομία της Ευρώπης που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ορυκτά καύσιμα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια θεμελιώδης περιγραφή των συστημάτων αντλιών θερμότητας και της γεωθερμίας. Στην Ελλάδα, η εγκατάσταση και λειτουργία ορισμένων συστημάτων απαιτεί την συμμόρφωση με συγκεκριμένες νομοθεσίες και αδειοδότηση οι οποίες αναλύονται, όπως επίσης και οι Ευρωπαϊκές νομοθεσίες για την ανάδειξη των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό μείγμα. Στη συνέχεια, εξετάζονται αναπτυσσόμενες τεχνολογίες που αφορούν τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας όπως τα υβριδικά συστήματα τα οποία επιτυγχάνουν εξισορρόπηση των γεωθερμικών φορτίων, μείωση του συνολικού κόστους μέσω της σμίκρυνσης του γεωεναλλάκτη, και υψηλότερες αποδόσεις. Ακόμη, τα νεότερα ψυκτικά μέσα πρόκειται να αντικαταστήσουν τα συνθετικά τα οποία αποσύρονται λόγω των καταστροφικών επιπτώσεων τους στο περιβάλλον. Αντίθετα, τα φυσικά ψυκτικά όπως η αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες είναι πολύ φιλικότερα και προσφέρουν υψηλότερες αποδόσεις και χαμηλότερα κόστη. Επιπλέον, αναπτύσσονται οικονομικά και τεχνικά στοιχεία. Τα συστήματα έχουν πολύ μεγάλα αρχικά κόστη τα οποία οφείλονται κυρίως στην μονάδα της αντλίας και στις γεωτρήσεις. Ωστόσο, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης είναι χαμηλά με αποτέλεσμα να επιφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Το κυριότερο τεχνικά προβλήματα συναντώνται στα συστήματα ανοιχτού βρόχου και αφορούν την καθαλάτωση και την διάβρωση. Ο σχηματισμός τους

δυσχεραίνει την μεταφορά θερμότητας και την παροχή, οδηγώντας σε συχνές βλάβες και αστοχίες αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί με προληπτικά μέτρα συντήρησης, έμμεσα συστήματα και επίβλεψη με κάμερα. Τέλος, παρουσιάζονται αξιολογήσεις 8 συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας τα οποία έλαβαν άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας στους Νομούς Βόλου και Λάρισας. Όμως, η αδυναμία επικοινωνίας και συλλογής πληροφοριών κατέστησε αδύνατη την ορθή εξέταση των περισσότερων. Συμπερασματικά, η διεύθυνση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας είναι πολύ μικρή στην Περιφέρεια Θεσσαλίας και ο σημαντικότερος λόγος γι' αυτό κρίνεται το υπέρογκο αρχικό κόστος επένδυσης.

Λέξεις-κλειδιά: Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (Γ.Α.Θ.), αρχικό κόστος, αξιολόγηση, γεωθερμία, υβριδικά συστήματα, καθαλάτωση, ψυκτικά μέσα, εξοικονόμηση

GROUND SOURCE HEAT PUMPS: DESCRIPTION, RECENT DEVELOPMENTS AND EVALUATION OF LICENSED INSTALLATIONS IN THESSALY

GEORGIOS SPANOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2023

Supervisor: Dr Nikolaos Andritsos

Professor

Abstract

Ground Source Heat Pumps are renewable energy systems that take advantage of underground geothermal energy to produce heating and cooling in a more efficient and environmentally friendly way than conventional systems. In this work, the history of their development up to the present day, but also the energy economy of Europe, which is largely based on fossil fuels, are mentioned. Next, a fundamental description of heat pump systems and geothermal energy is presented. In Greece, the installation and operation of certain systems requires compliance with specific legislation licensing which are analyzed, as well as the European legislation for the promotion of RES. in the energy mix. Then, developing technologies related to ground source heat pumps are examined such as hybrid systems which achieve balancing of geothermal loads, reduction of overall costs through the diminution of the geo-exchanger, and higher efficiencies. Also, newer refrigerants are going to replace synthetics which are being phased out due to their destructive effects on the environment. In contrast, natural refrigerants such as ammonia, carbon dioxide and hydrocarbons are much friendlier and offer higher efficiencies and lower costs. In addition, economic and technical subjects are developed. The systems have very high initial costs which are mainly due to the pump unit and drilling. However, operation and maintenance costs are low resulting in energy and cost savings. The main technical problems are encountered in open loop systems and concern fouling and corrosion. Their formation makes heat transfer and fluid flow difficult, leading to frequent breakdowns and failures but can be addressed with preventive maintenance measures, indirect systems, and camera surveillance. Finally, evaluations of 8 ground source heat pump systems that received installation and operation licensing in the

prefectures of Volos and Larissa are presented. However, the inability of communication and information gathering made proper examination impossible in most cases. In conclusion, the penetration of ground source heat pumps is very small in the Precinct of Thessaly and the most important reason for this is the exorbitant initial investment cost.

Key words: Ground source heat pumps (GSHP), initial cost, evaluation, geothermal, hybrid systems, fouling, refrigerants, savings

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ιστορία και εξέλιξη των Γ.Α.Θ.	1
1.2 Πεδία εφαρμογών	7
1.3 Ενεργειακή οικονομία Ε.Ε. και Ελλάδας	7
1.3.1 Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας.....	8
1.3.2 Εισαγωγές και εξάρτηση από τρίτες χώρες.....	9
1.3.3 Τελική κατανάλωση.....	13
Κεφάλαιο 2. Αντλίες Θερμότητας και Γεωθερμική Ενέργεια.....	15
2.1 Ορισμός	15
2.2 Μέρη αντλίας θερμότητας.....	15
2.3 Αρχή λειτουργίας.....	16
2.4 Υπολογισμός απόδοσης.....	17
2.5 Είδη Α.Θ.	23
2.6 Γεωθερμία	26
2.6.1 Αβαθής γεωθερμία	31
2.7 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας.....	33
2.7.1 Εισαγωγή	33
2.7.2 Τύποι συστημάτων	36
Συστήματα κλειστού βρόχου	37
Οριζόντια.....	38
Κατακόρυφα.....	41
Συστήματα ανοιχτού βρόχου	6
Κεφάλαιο 3. Νομοθεσία για τις Γ.Α.Θ.....	51
3.1 Ελληνικές νομοθεσίες γεωθερμίας.....	51
3.1.1 Νόμος υπ’ αριθ. 4602	51
3.1.2 Απόφαση αριθμ. Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488	53
Περιοριστικοί όροι.....	53
Απαιτούμενα δικαιολογητικά.....	54
Διαδικασία έκδοσης άδειας.....	57
Τροποποίηση της άδειας	59
Ποινές και πρόστιμα	59
3.2 Ευρωπαϊκές οδηγίες και πρωτοβουλίες	60
3.2.1 RED I	61
3.2.2 RED II	62
3.2.3 European Green Deal και αναθεώρηση	66
3.2.4 REPowerEU	69

Κεφάλαιο 4. Σύγχρονες Τεχνολογικές Εξελίξεις των Γ.Α.Θ.....	71
4.1 Υβριδικά συστήματα Γ.Α.Θ..	71
4.1.1 Πύργοι ψύξης	73
4.1.2 Ηλιακοί συλλέκτες	80
4.1.3 Ανάκτηση θερμότητας που χάνεται.....	88
4.1.4 Λέβητες.....	89
4.1.5 Αντλίες αέρα.....	89
4.2 Πρόσδος ψυκτικών μέσων.....	90
4.2.1 Εισαγωγή	90
4.2.2 HFOs	92
4.2.3 R-32	95
4.2.4 Φυσικά ψυκτικά μέσα	96
Αμμωνία (R717)	96
Διοξείδιο του άνθρακα (R774)	98
Υδρογονάνθρακες	100
Κεφάλαιο 5. Οικονομικά και Τεχνικά Θέματα των Γ.Α.Θ.	105
5.1 Τιμές φυσικού αερίου και ρεύματος σε Ελλάδα και Ε.Ε.	105
5.2 Η κατάσταση της αγοράς των Γ.Α.Θ.....	107
5.3 Κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των Γ.Α.Θ.	109
5.3.1 Εισαγωγή	109
5.3.2 Κόστη στο Ηνωμένο Βασίλειο	111
Γενικά	111
Κατανομή κοστών.....	112
Παραδείγματα σύγκρισης.....	114
Επιδότησεις	115
5.3.3 Κόστη στις Η.Π.Α.	116
Κόστη εγκατάστασης	116
Πρόσθετα κόστη	117
Φορολογικές εκπτώσεις	118
Εξοικονόμηση	118
5.4 Άλλες μελέτες	120
5.5 Τεχνικά προβλήματα	122
5.5.1 Καθαλάτωση και διάβρωση	122
Εισαγωγή	122
Κατηγοριοποίηση	125
Το φαινόμενο στις Γ.Α.Θ.	128

«Έμμεσα» συστήματα.....	133
Επίβλεψη με κάμερα	134
Καθαρισμός	136
Κεφάλαιο 6. Αξιολόγηση της Λειτουργίας Αδειοδοτημένων Εγκαταστάσεων Γ.Α.Θ.	137
6.1 Εισαγωγή.....	137
6.1.1 Γεωθερμικές εφαρμογές στην Ελλάδα.....	137
6.1.2 Επιχορήγηση.....	140
6.2 Περιορισμοί.....	140
6.3 Νομός Μαγνησίας	141
6.3.1 Αξιολόγηση Μ1.....	141
6.3.2 Αξιολόγηση Μ2.....	142
6.3.3 Αξιολόγηση Μ3.....	142
Είδος και πληροφορίες εγκατάστασης	142
Τεχνικά προβλήματα	143
6.3.4 Αξιολόγηση Μ4.....	144
Είδος εγκατάστασης	144
Πληροφορίες εγκατάστασης	144
Πληροφορίες αντλιών και συστήματος διανομής	146
Προβλήματα-Συντήρηση	147
Αποτίμηση του συστήματος.....	148
6.3.5 Αξιολόγηση Μ5.....	149
6.4 Νομός Λάρισας	152
6.4.1 Αξιολόγηση Λ1.....	152
6.4.2 Αξιολόγηση Λ2.....	153
6.4.3 Αξιολόγηση Λ3.....	153
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα	155
Βιβλιογραφία.....	158
Παράρτημα.....	178

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Θερμοκρασίες προσαγωγής διαφόρων συστημάτων διανομής θερμότητας [5]	34
Πίνακας 2.2: Απόληψη θερμότητας από διαφορετικούς τύπους εδάφους [48]	40
Πίνακας 2.3: Πορώδες γεωλογικών σχηματισμών [61]	48
Πίνακας 2.4: Κατηγορίες υδραυλικής αγωγιμότητας [11]	49
Πίνακας 4.1: Σύγκριση κόστους μεταξύ υβριδικού και γεωθερμικού συστήματος [92]	80
Πίνακας 4.2: GWP & ODP διαφόρων ψυκτικών μέσων [113]	92
Πίνακας 4.3: Κρίσιμες θερμοκρασίες και GWP υδρογονανθράκων	101
Πίνακας 5.1: Ετήσια κόστη θέρμανσης με διάφορα συστήματα [156]	115
Πίνακας 5.2: Κόστη εγκατάστασης Γ.Α.Θ. ανά πόλη των Η.Π.Α. [160]	117
Πίνακας 5.3: Οικονομικά κίνητρα αγοράς Γ.Α.Θ. σε 3 πολιτείες των Η.Π.Α. [163]	118
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά συστημάτων Γ.Α.Θ. (<30 kW) στην Γερμανία [164]	121
Πίνακας 5.5: Κοστολόγηση συστημάτων θέρμανσης/ψύξης στην Αυστραλία [167]	122
Πίνακας 5.6: Σύγκριση των κοστών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης στη Μελβούρνη και το Σίδνεϊ [167]	122
Πίνακας 5.7: Αντιστάσεις επικαθήσεων διαφόρων ρευστών [168]	125
Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M1 [190]	142
Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M3 [192]	143
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M4 [193]	147
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M5 [194]	151
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ1 [196]	153
Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ2 [197]	154
Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ3 [199]	155
Πίνακας Α: Χαρακτηριστικά πετρωμάτων στους 20 °C [26]	178
Πίνακας Β: Απόληψη θερμότητας από διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς [48]	179

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Υπόγεια πόλη «Μαλακοπή» στην Καππαδοκία [2].....	1
Σχήμα 1.2: Υπόγεια πόλη «Ανακού» στην Καππαδοκία [3].....	2
Σχήμα 1.3: Ανάπτυξη των πωλήσεων Α.Θ. στην Γερμανία [4]	4
Σχήμα 1.4: Ανάπτυξη των πωλήσεων Α.Θ. σε Γερμανία, Γαλλία και Αυστρία [4].....	4
Σχήμα 1.5: Εξέλιξη των ετήσιων πωλήσεων Γ.Α.Θ. σε Γερμανία (1978-2018) [4]	5
Σχήμα 1.6: Εξέλιξη των ετήσιων πωλήσεων Α.Θ. σε Γερμανία και Ελβετία (2010-2015) [4]....	6
Σχήμα 1.7: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα (1990-2019) [6].....	7
Σχήμα 1.8: Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην Ε.Ε. ανά καύσιμο [PJ] (1990-2021) [7] ..	7
Σχήμα 1.9: Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας Ε.Ε. ανά καύσιμο (2021) [8].....	9
Σχήμα 1.10: Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας Ελλάδας ανά καύσιμο (2021).....	9
Σχήμα 1.11: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας της Ε.Ε. ανά καύσιμο [PJ] (1990-2021) [7]	10
Σχήμα 1.12: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας ανά καύσιμο - Ε.Ε. (2021) [9]	10
Σχήμα 1.13: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας ανά καύσιμο - Ελλάδα (2021) [9].....	10
Σχήμα 1.14: Λόγοι εξάρτησης [%] 2021 (Συνολικοί) [10]	11
Σχήμα 1.15: Λόγοι Εξάρτησης [%] 2021 (Πετρέλαιο και προϊόντα) [10].....	12
Σχήμα 1.16: Λόγοι εξάρτησης [%] 2021 (Φυσικό αέριο) [10]	12
Σχήμα 1.17: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο - Ε.Ε. (2021) [8].....	13
Σχήμα 1.18: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο - Ελλάδα (2021) [8]	13
Σχήμα 1.19: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα - Ε.Ε. (2021) [7]	14
Σχήμα 2.1: Μέρη αντλίας θερμότητας [12]	16
Σχήμα 2.2: Διαγράμματα T-s και P-h του ιδανικού κύκλου ψύξης συμπίεσης ατμού [14].....	17
Σχήμα 2.3: Συστήματα υπολογισμού του SPF [15]	21
Σχήμα 2.4: Μετρήσεις του SPF των 4 συστημάτων κατά την διάρκεια ενός έτους [16].....	22
Σχήμα 2.5: Ζώνες υπολογισμού του SPF ανά κλίμα [15]	22
Σχήμα 2.6: Αντλία θερμότητας πηγής αέρα [18]	24
Σχήμα 2.7: Διατάξεις συστήματος αέρα/νερού [19]	25
Σχήμα 2.8: Αντλία θερμότητας πηγής νερού [21]	26
Σχήμα 2.9: Αντλία θερμότητας εδάφους/νερού [22]	26

Σχήμα 2.10: Γεωλογικά στρώματα της Γης [24].....	27
Σχήμα 2.11: Ραδιενεργή αποσύνθεση [25]	28
Σχήμα 2.12: Άμεση χρήση της γεωθερμίας [28].....	29
Σχήμα 2.13: Θερμή πηγή στο εθνικό πάρκο Γέλουουστοουν [29]	29
Σχήμα 2.14: Εργοστάσιο ξηρού ατμού στην Τοσκάνη (1904) [32]	30
Σχήμα 2.15: Διακύμανση της θερμοκρασίας στο υπέδαφος κατά την διάρκεια ενός έτους [36]	32
Σχήμα 2.16: Γεωθερμική βαθμίδα [37]	33
Σχήμα 2.17: Διάταξη Γ.Α.Θ. [38]	34
Σχήμα 2.18: Τύποι κλειστών και οριζοντίου συστήματος Γ.Α.Θ. [40]	36
Σχήμα 2.19: Συστήματα Γ.Α.Θ. κλειστού βρόχου [42]	37
Σχήμα 2.20: Σύνδεση σε σειρά (πάνω) και παράλληλα (κάτω) οριζόντιου βρόχου [35]	38
Σχήμα 2.21: Διατάξεις οριζόντιων βρόχων [5,43,44]	39
Σχήμα 2.22: Οριζόντιοι σπειροειδείς βρόχοι τύπου “slinky” [46,47].....	40
Σχήμα 2.23: Τρυπάνι διάνοιξης γεώτρησης [50]	42
Σχήμα 2.24: Κλειστό, κατακόρυφο σύστημα Γ.Α.Θ. [51]	42
Σχήμα 2.25: Γεωεναλλάκτες τύπου μονού U (αριστερά) και διπλού U (δεξιά) [5].....	42
Σχήμα 2.26: Κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες τύπου U και σπειροειδής [52]	43
Σχήμα 2.27: Ομοαξονικός αυλός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη [53].....	43
Σχήμα 2.28: Γεωεναλλάκτης κώνου [5]	44
Σχήμα 2.29: Ενεργειακοί πάσσαλοι [5].....	44
Σχήμα 2.30: Γεωτρήσεις με προσθήκη ενέματος [5,54].....	44
Σχήμα 2.31: Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης [56,57].....	46
Σχήμα 2.32: Σύστημα Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου [58]	46
Σχήμα 2.33: Γεώτρηση όρθιας στήλης [60]	47
Σχήμα 2.34: Σύστημα Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου [62]	50
Σχήμα 3.1: Οι στόχοι του RED I σε διάφορες χώρες της Ευρώπης (2020) [68].....	62
Σχήμα 3.2: Συνολική κατανάλωση Α.Π.Ε. ανά χώρα [%] (2021) [71]	63
Σχήμα 3.3: Συνολική κατανάλωση Α.Π.Ε. [%] (2004-2021) [72]	63

Σχήμα 3.4: Συμμετοχή Α.Π.Ε στην συνολική κατανάλωση των μεταφορών ανά χώρα [%] (2021) [71]	64
Σχήμα 3.5: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα [%] (2021) [71].....	65
Σχήμα 3.6: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. - Ε.Ε. (2021) [71]	65
Σχήμα 3.7: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην θέρμανση/ψύξη ανά χώρα [%] (2021) [71]	65
Σχήμα 3.8: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην θέρμανση/ψύξη [%] (2004-2021) [72]	66
Σχήμα 3.9: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (1990-2021) [76].....	67
Σχήμα 3.10: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα - Ε.Ε. (2021) [77]	63
Σχήμα 3.11: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα - Ελλάδα (2021) [77]	68
Σχήμα 4.1: Πύργοι ψύξης [84]	74
Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας πύργου ψύξης [85]	74
Σχήμα 4.3: Πύργος ψύξης ανοιχτού τύπου [80].....	74
Σχήμα 4.4: Πύργος ψύξης κλειστού τύπου [80]	74
Σχήμα 4.5: Πύργος ψύξης φυσικής κυκλοφορίας [85].....	75
Σχήμα 4.6: Πύργος ψύξης μηχανικής κυκλοφορίας [87].....	75
Σχήμα 4.7: Απόκριση θερμοκρασίας των τοιχωμάτων των τριών συστημάτων [88]	77
Σχήμα 4.8: Εξέλιξη των COP των τριών συστημάτων [88].....	77
Σχήμα 4.9: Υβριδικό σύστημα Α.Θ. με ηλιακό συλλέκτη [94]	80
Σχήμα 4.10: Ηλιακός συλλέκτης επίπεδης πλάκας [96]	82
Σχήμα 4.11: Συλλέκτες κενού [97,98]	82
Σχήμα 4.12: Δομή συλλέκτη PVT [100]	83
Σχήμα 4.13: Υβριδικό σύστημα διπλής πηγής έμμεσης εκτόνωσης PVT/Γ.Α.Θ. σε κοινή ροή [101]	85
Σχήμα 4.14: Διακύμανση των COP, COPS και εξωτερικής θερμοκρασίας ανά μήνα [103].....	86
Σχήμα 4.15: Δείκτης ανάρρωσης της θερμοκρασίας του εδάφους ανά ώρα [105]	87
Σχήμα 4.16: Σύγκριση κρίσιμης θερμοκρασίας ψυκτικών μέσων [119]	94
Σχήμα 4.17: Μονάδα Ecocute [131]	98
Σχήμα 4.18: Ο νέος συμπιεστής VZN της Danfoss με R290 [144]	103
Σχήμα 5.1: Τελικές τιμές ρεύματος [€/KWh] (2ο εξ. 2022) [148]	105

Σχήμα 5.2: Εξέλιξη τελικών τιμών ρεύματος [€/KWh] (2007-2022) [148]	105
Σχήμα 5.3: Τελικές τιμές φυσικού αερίου [€/KWh] (2ο εξ. 2022).....	106
Σχήμα 5.4: Εξέλιξη τελικών τιμών φυσικού αερίου [€/KWh] (2007-2022) [148].....	107
Σχήμα 5.5: Ανάπτυξη αγοράς Γ.Α.Θ. ανά τεχνολογία ως το 2031 [149]	108
Σχήμα 5.6: Ανάπτυξη αγοράς Γ.Α.Θ. ανά τομέα [149]	108
Σχήμα 5.7: Διαμοιρασμός των κοστών σε εξοπλισμό και μη-εξοπλισμό μιας κατακόρυφης Γ.Α.Θ. [154].....	112
Σχήμα 5.8: Κατανομή κοστών μεταξύ εξοπλισμού και μη-εξοπλισμού μιας κατακόρυφης Γ.Α.Θ. [154].....	112
Σχήμα 5.9: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης [163].....	119
Σχήμα 5.10: Επιπτώσεις της ανάπτυξης της καθαλάτωσης σε αγωγούς [168].....	123
Σχήμα 5.11: Επικαθήσεις σε αγωγό νερού [169]	123
Σχήμα 5.12: Καμπύλες σχηματισμού των αντιστάσεων [170]	123
Σχήμα 5.13: Καθαλάτωση σε εναλλάκτες θερμότητας [171].....	126
Σχήμα 5.14: Διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας [172]	127
Σχήμα 5.15: Σχηματισμός φυσαλίδων και στάσιμων θυλάκων αέρα σε ροή σωλήνα [173]	128
Σχήμα 5.16: Φίλτρο γεώτρησης [175]	129
Σχήμα 5.17: Διάταξη γεώτρησης υπόγειου νερού [176].....	129
Σχήμα 5.18: (a) Βούλωμα φίλτρου παραγωγής, (b) χαλασμένη υποβρύχια αντλία, (c) τομή σωλήνα με στρώμα υδροξειδίου του σιδήρου 1 cm, (d) καθαλάτωση σε εναλλάκτη πλακών [174]	130
Σχήμα 5.19: Κατανομή των μηχανισμών βουλώματος Γ.Α.Θ. σε υδροφορέα αμμόλιθου [179]	131
Σχήμα 5.20: Επίδραση της παροχής και της θερμοκρασίας στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διαβρωμένων σωλήνων [172]	132
Σχήμα 5.21: (a) Σχηματισμός ρωγμών, «φάγωμα, (b) αποκόλληση σε αγωγούς λόγω διάβρωσης [181]	132
Σχήμα 5.22: Δημιουργία παθητικού στρώματος οξειδίου σε ανοξείδωτο χάλυβα [182].....	133
Σχήμα 5.23: Ο νέος συμπιεστής VZN της Danfoss με R290 [144]	134
Σχήμα 5.24: Κάμερες εντός φίλτρων σε γεωτρήσεις [184]	135
Σχήμα 5.25: Τοποθέτηση κάμερας στις γεωτρήσεις [184]	135
Σχήμα 5.26: Βούρτσα καθαρισμού γεώτρησης [185].....	136

Σχήμα 5.27: Συσκευές “jetting” καθαρισμού γεωτρήσεων [186].....	136
Σχήμα 6.1: Τα πιο σημαντικά γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα [187]	137
Σχήμα 6.2: Αποπάγωση πεζοδρομίων στο Καρπενήσι [5]	139
Σχήμα 6.3: Μηχανοστάσιο 1,1 MW στις καλλιέργειες σπαραγγιών της Χρυσούπολης [187]	139
Σχήμα 6.4: Γεώτρηση παραγωγής της εγκατάστασης M4.....	145
Σχήμα 6.5: Διάταξη “master-slave” 2 όμοιων Γ.Α.Θ. της εγκατάστασης M4	146
Σχήμα 6.6: Α.Θ. Aermec NXP1250 [195]	150
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ροής γεωθερμικού συστήματος [34].....	151

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορία και εξέλιξη των Γ.Α.Θ.

Η σχέση της ανθρωπότητας με την τιθάσευση της γεωθερμικής ενέργειας ξεκίνησε από την προϊστορική περίοδο, περίπου 10 000 χρόνια πριν. Οι πανάρχαιοι πρόγονοι φαίνεται πως κατείχαν μια έμφυτη, διαισθητική και σίγουρα πρακτική κατανόηση της σταθερής θερμοκρασίας του υπογείου καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου και οδηγήθηκαν σε υπόγεια σπήλαια ώστε να επιβιώνουν κατά την διάρκεια των επίπονων περιβαλλοντικών συνθηκών της επιφάνειας του χειμώνα και του καλοκαιριού. Οι υπόγειοι καταυλισμοί είχαν επίσης σκοπό την διατήρηση τροφίμων εκτός από την ανθρώπινη διαβίωση. Οι σπηλαιώδεις πολιτείες που ανακαλύφθηκαν σε μακρινές μεταξύ τους περιοχές, όπως στο Νέο Μεξικό και την Τουρκία όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.1 και 1.2 επιβεβαιώνουν αυτόν τον οικουμενικό τρόπο ζωής ή έστω την πρωτόγονη διαπίστωση η οποία επιβίωσε στους αιώνες πέρα από την προϊστορική εποχή [1].



Σχήμα 1.1: Υπόγεια πόλη «Μαλακοπή» στην Καππαδοκία [2]



Σχήμα 1.2: Υπόγεια πόλη «Ανακού» στην Καππαδοκία [3]

Η σύγχρονη θεώρηση της γεωθερμικής ενέργειας και των εφαρμογών της με επιστημονικές βάσεις ξεκίνησε πολύ αργότερα. Στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, το 1853, ο Βρετανός επιστήμονας και μηχανικός Λόρδος Κέλβιν έθεσε την θεωρητική βάση για την περιγραφή των αντλιών θερμότητας κάνοντας σημαντικές συνεισφορές στα πεδία της θερμοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας. Αυτές οι συμβολές εξέλιξαν την γνώση γύρω από της αντιστρεψιμότητα των θερμοδυναμικών διεργασιών μέσω της κατανάλωσης μηχανικού έργου, του κύκλου Carnot, του 2^{ου} νόμου της θερμοδυναμικής και αποδείχτηκαν κρίσιμες για τα θεμέλια της μελλοντικής τεχνολογίας [1]. Πράγματι, λίγα χρόνια αργότερα το 1857 ο Αυστριακός εφευρέτης Πίτερ Βον Ρίτινγκερ δημιούργησε την πρώτη λειτουργική αντλία θερμότητας σηματοδοτώντας ένα κομβικό επίτευγμα μηχανικής. Η αντλία είχε ως αρχή λειτουργίας την συμπύκνωση ατμού και χρησιμοποιούταν για εξάτμιση νερού σε εργοστάσιο αλατιού, με φημολογούμενη ισχύ 14 kW [4].

Στην αρχή του 20^{ου} αιώνα [4], στις 13 Φεβρουαρίου του 1912 ο Χάινριχ Ζόελλι, σχεδιαστής στροβίλων νερού και ατμού κατέθεσε αίτηση για πατέντα στην Ελβετία, η οποία περιέγραφε ένα σύστημα Γεωθερμικής Αντλίας Θερμότητας (Γ.Α.Θ.). Σε αυτήν αναγνωρίζεται η γνωστή πλέον λειτουργία ενός ηλεκτρικού συμπιεστή και η κυκλοφορία ενός μέσου-φορέα της θερμότητας όπως στις μηχανές ψύξης. Η καινοτόμος παράμετρος ήταν η απόσπαση της θερμότητας από το έδαφος.

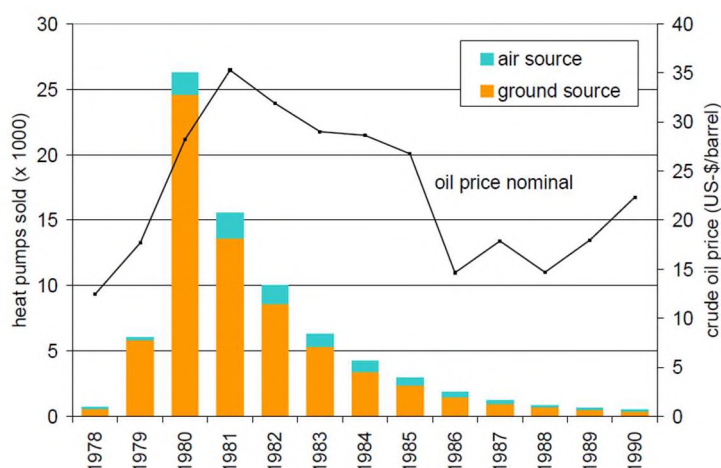
Τη δεκαετία του 1930, οι αντλίες θερμότητας αρχικά χρησιμοποιούνταν για θέρμανση χώρων όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση του 1938 στο δημαρχείο της Ζυρίχης με πηγή το ποταμίσιο νερό χαμηλής θερμοκρασίας έως και 1,2 °C. Το πρωτοποριακό σύστημα κατάφερε να παρέχει ως και 100 kW θερμότητας με ετήσιο COP σχεδόν 2,2. Η αντλία κατάφερε μάλιστα να έχει εντυπωσιακή διάρκεια ζωής 63 χρόνων ως το 2001. Κατά την διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του κάρβουνου οδήγησε και σε άλλες εγκαταστάσεις όπως σε πισίνα και δίκτυο τηλεθέρμανσης [4].

Στην Βόρεια Αμερική, η ανάπτυξη των γεωθερμικών συστημάτων ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '40 και στις αρχές του '50. Η πρώτη Γ.Α.Θ. εγκαταστάθηκε στην Ινδιανάπολη το 1945 χρησιμοποιώντας οριζόντιους αγωγούς στο έδαφος και άμεση εκτόνωση. Τα κατακόρυφα συστήματα κλειστού βρόχου εμφανίζονται για πρώτη φορά το 1947. Σημαντικό μέρος των ερευνών διεξήχθησαν στην Φιλαδέλφεια το 1948 με εγκαταστάσεις οριζόντιων συστημάτων κυκλοφορίας μείγματος νερού/γλυκόλης αντί αυτών της άμεσης εκτόνωσης. Την ίδια χρονιά ένα από τα μεγαλύτερα γεωθερμικά συστήματα ανοικτού βρόχου εγκαταστάθηκε στο Όρεγκον, στο Κτίριο Κοινοπολιτείας 14 ορόφων [4].

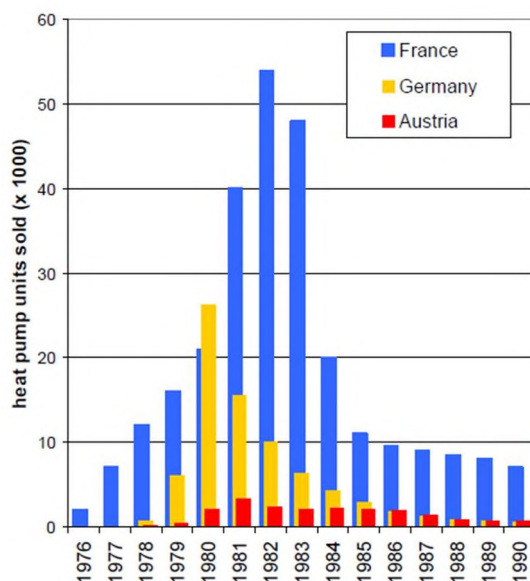
Η Ευρώπη αντίθετα αντιμετώπισε εμπόδια στην μεταπολεμική περίοδο, εξαιρούμενης μιας αντλίας υπόγειου νερού, ανοικτού βρόχου στο Τουν της Ελβετίας με ισχύ 440 kW και ετήσιο COP ίσο με 4,5. Οι χαμηλές τιμές των καυσίμων που παρατηρήθηκαν στις δεκαετίες του '50 και του '60 συνέισφεραν στο φθίνον ενδιαφέρον σε Ευρώπη και Αμερική με αποτέλεσμα πολλά γεωθερμικά συστήματα να αποσυρθούν [4].

Λόγω της 1^{ης} πετρελαϊκής κρίσης του 1973 οι τιμές του πετρελαίου εκτοξεύθηκαν με αποτέλεσμα να αναζητηθούν άλλες λύσεις θέρμανσης με την προσοχή να στρέφεται στις αντλίες θερμότητας, ειδικά σε στάσιμες εφαρμογές. Όμως η ανάπτυξη του εξοπλισμού και της τεχνογνωσίας άργησε και οι αντλίες θερμότητας έγιναν διαθέσιμες κατά την 2^η πετρελαϊκή κρίση του 1980-1981. Στην Ευρώπη, η ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας είχε ξεκινήσει πρωτύτερα. Στην Γερμανία, μια Γ.Α.Θ. οριζόντιου κλειστού βρόχου ξεκίνησε να λειτουργεί το 1969 ενώ τα κατακόρυφα συστήματα και ανοικτού βρόχου ακολούθησαν αργότερα. Κατά την 2^η

κρίση, οι αντλίες θερμότητας ήταν διαθέσιμες από διάφορους κατασκευαστές σε χώρες όπως Αυστρία, Γαλλία, Γερμανία, Σουηδία και Ελβετία κυρίως σε οριζόντιου ή ανοικτού τύπου. Στην Γερμανία πολλές αντλίες συγχωνεύτηκαν σε υβριδικά συστήματα με υπάρχοντες λέβητες με αποτέλεσμα πολλά προβλήματα λειτουργίας. Η περιορισμένη τεχνογνωσία των κατασκευαστών και των εγκαταστατών σε Γερμανία, Γαλλία και Αυστρία είχε ως αποτέλεσμα την απότομη πτώση των πωλήσεων και της μείωσης της αξιοπιστίας των αντλιών μετά το 1981, αλλά σημαντικό ρόλο έπαιξε και η πτώση των τιμών του πετρελαίου εκείνα τα χρόνια όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.3 και 1.4. Ελάχιστες εταιρείες επιβίωσαν και συνέχισαν να επενδύουν στην αναζωπύρωση των συστημάτων μετά το 1990 [4].



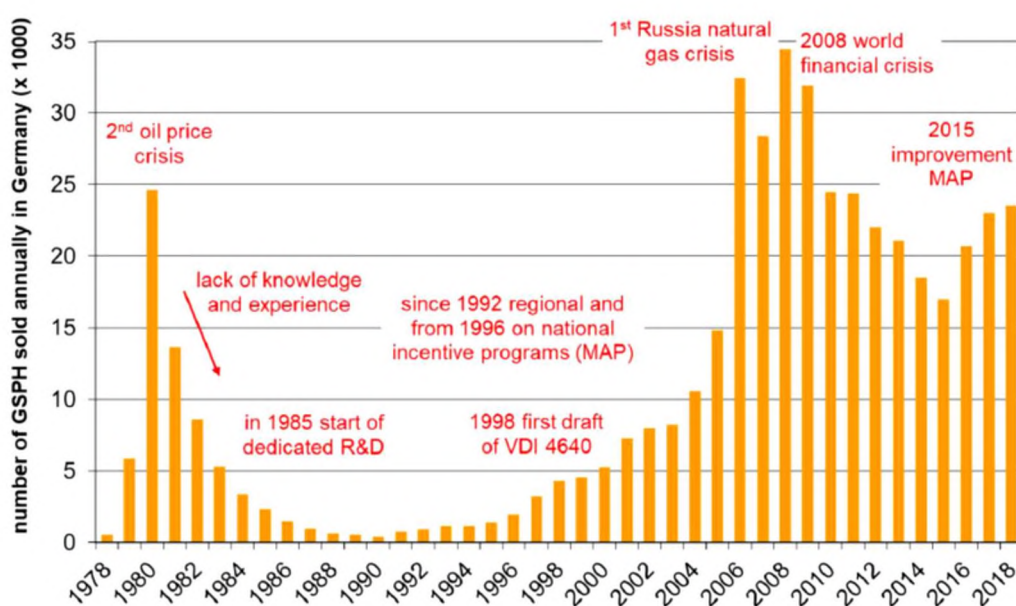
Σχήμα 1.3: Ανάπτυξη των πωλήσεων Α.Θ. στην Γερμανία [4]



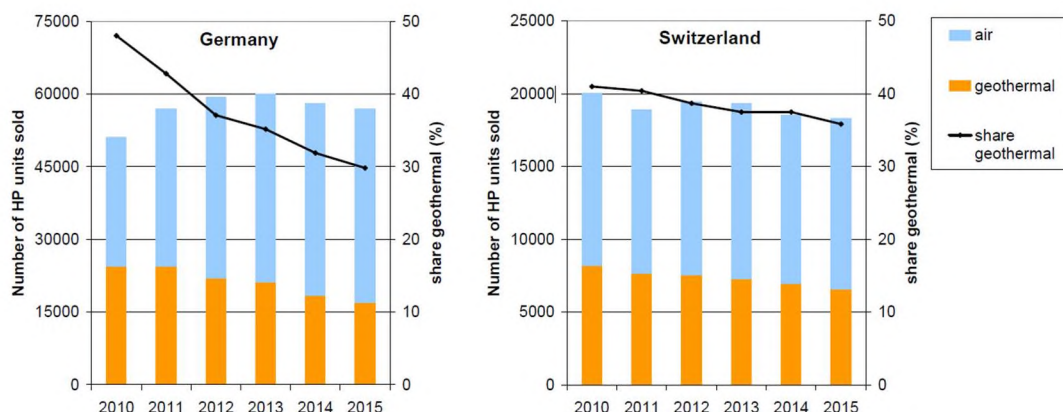
Σχήμα 1.4: Ανάπτυξη των πωλήσεων Α.Θ. σε Γερμανία, Γαλλία και Αυστρία [4]

Οι κλειστοί, κατακόρυφοι βρόχοι μπήκαν στο προσκήνιο κατά την διάρκεια της μεγάλης ανάπτυξης του 1980 και τα πρώτα πειράματα καταγράφηκαν σε Η.Β., Ολλανδία και Σουηδία. Στην Γερμανία, η πρώτη εγκατάσταση έγινε στα τέλη της δεκαετίας του '70 και οι πρώτες σύγχρονες κατασκευές με σωλήνες πολυαιθυλενίου ξεκίνησαν το 1980 στην Ελβετία και κατόπιν στην Αυστρία [4].

Η πτώση της αγοράς δεν επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την Σουηδία, η οποία ενίσχυσε την ανάπτυξη με δράσεις στην Έρευνα και Ανάπτυξη (R&D), ενώ οι υπόλοιπη Ευρώπη ακολουθούσε πιο διστακτικές στρατηγικές. Στην συνέχεια, η ανάπτυξη κατάφερε να ανακάμψει μέσω διεθνών συνέδριων και εργαστηρίων φέρνοντας οικονομική ενίσχυση στο πεδίο των ερευνών και αυξανόμενη ενασχόληση διαφόρων ιδρυμάτων και πανεπιστημίων. Τελικά, τα γεωθερμικά συστήματα και οι αντλίες θερμότητας ξαναμπήκαν στο προσκήνιο στον 21^ο αιώνα μετά από μια περίοδο μεγάλης αφλογιστίας τις δύο προηγούμενες δεκαετίες. Στην Γερμανία, οι περισσότερες πωλήσεις έγιναν την περίοδο 2006-2008 λόγω της κρίσης του ρωσικού φυσικού αερίου και έκτοτε, μετά την οικονομική κρίση του 2008, η αγορά σμικρυνόταν μέχρι την πρόσφατη επανάκαμψη από το 2015 και μετά όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Παράλληλα, το ποσοστό των αντλιών πηγής αέρα στις συνολικές πωλήσεις αυξανόταν συνεχώς εις βάρος των γεωθερμικών σε Γερμανία και Ελβετία όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6 [4].



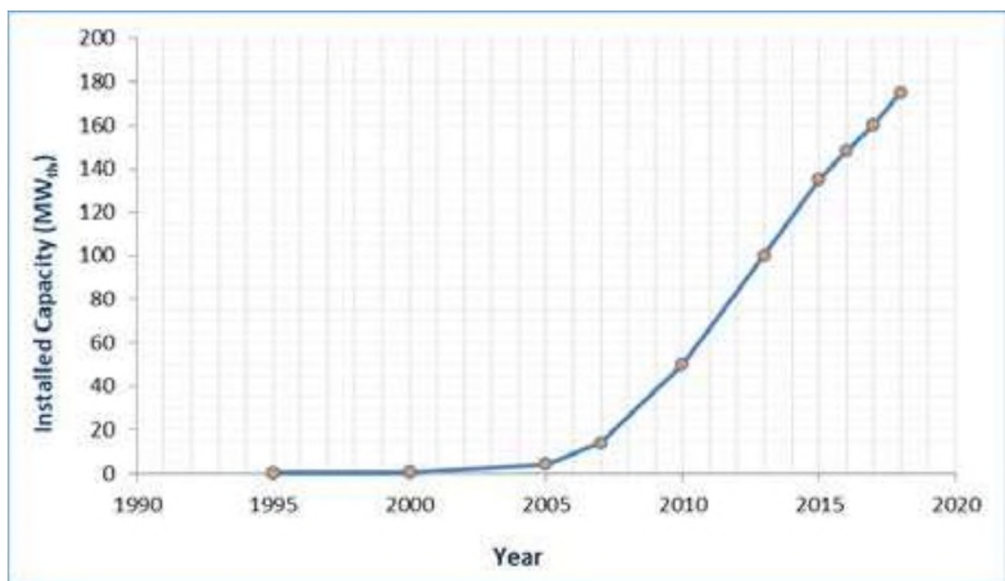
Σχήμα 1.5: Εξέλιξη των ετήσιων πωλήσεων Γ.Α.Θ. σε Γερμανία (1978-2018) [4]



Σχήμα 1.6: Εξέλιξη των ετήσιων πωλήσεων Α.Θ. σε Γερμανία και Ελβετία (2010-2015) [4]

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος αυξήθηκε κατά 50% μεταξύ των ετών 2015-2019, στο τέλος των οποίων ήταν 77,5 GW [5]. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων υπολογίζεται που ξεπέρασε τις 6 400 000 το 2020, πλήθος περίπου 25 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με το 2000 [5]. Κυβερνήσεις και οργανισμοί σε όλο τον κόσμο ξεκίνησαν να προσφέρουν οικονομικά κίνητρα και επιδοτήσεις αλλά και να επικροτούν την συνεχή ερευνητική πορεία που θα επιτρέψει την μεγαλύτερη δυνατή διείσδυση στην αγορά αλλά και την βελτίωση των αποδόσεων και της λειτουργίας των συστημάτων. Η κάλυψη μέρους του αρχικού κόστους και φορολογικές εκπτώσεις ενισχύονται και συνεχίζουν να υφίσταται για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη της αγοράς. Ο συνδυασμός τους με άλλες μορφές Α.Π.Ε. όπως η ηλιακή προσφέρουν νέες δυνατότητες εξοικονόμησης και φιλικότητας προς το περιβάλλον μέσω της μείωσης των άμεσων ή/και έμμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η ελληνική αγορά ξεκίνησε να αναπτύσσεται με χαμηλούς ρυθμούς στο ξεκίνημα του 21^{ου} αιώνα [6]. Η ουσιαστική εξέλιξη της τεχνολογίας ξεκίνησε το 2007 και συνέχισε με ανοδική πορεία που οφείλεται στην έναρξη χρηματοδοτικών προγραμμάτων και το αυξανόμενο ενδιαφέρον μελετών και σεμιναρίων. Ο ρυθμός της ανάπτυξης παρέμεινε σταθερός την τελευταία δεκαετία παρά τις οικονομικές κρίσεις. Ο αριθμός των λειτουργικών μονάδων στο τέλος του 2018 μπορεί να εκτιμηθεί μεγαλύτερος από 3 300 και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ίση με περίπου 175 MW_{th}, σημειώνοντας αύξηση 17% σε σχέση με το 2016 όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα (1990-2019) [6]

1.2 Πεδία εφαρμογών

Ο κυριότερος τομέας εφαρμογής των Γ.Α.Θ. είναι η θέρμανση και η ψύξη χώρων σε κτίρια όπως σπίτια, γραφεία, αποθήκες, εργοστάσια, σχολεία, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πανεπιστήμια, αθλητικά στάδια κτλ. Επίσης είναι κατάλληλα για δίκτυα τηλεθέρμανσης και αποπάγωση πεζοδρομίων. Όμως μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς και σε άλλες εφαρμογές όπως η γεωργία και οι υδατοκαλλιέργειες, όπου παρέχουν θέρμανση και ψύξη σε θερμοκήπια, πτηνοτροφικές φάρμες, αποθήκες ξηρών καλλιεργειών, αμπελώνες για την αποφυγή παγώματος, γαλακτοκομικές φάρμες και ιχθυοκαλλιέργειες. Επίσης, διάφορες βιομηχανικές διεργασίες επωφελούνται από την λειτουργία των Γ.Α.Θ. αντί των συμβατικών μεθόδων όπως η ζύμωση, η αποθήκευση και η παραγωγή των προϊόντων της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών, η αφύγρανση των εργοστασίων ξυλείας, ο έλεγχος της θερμοκρασίας των διεργασιών φαρμακευτικών και χημικών διεργασιών, η χύτευση πλαστικών κτλ.

1.3 Ενεργειακή οικονομία Ε.Ε. και Ελλάδας

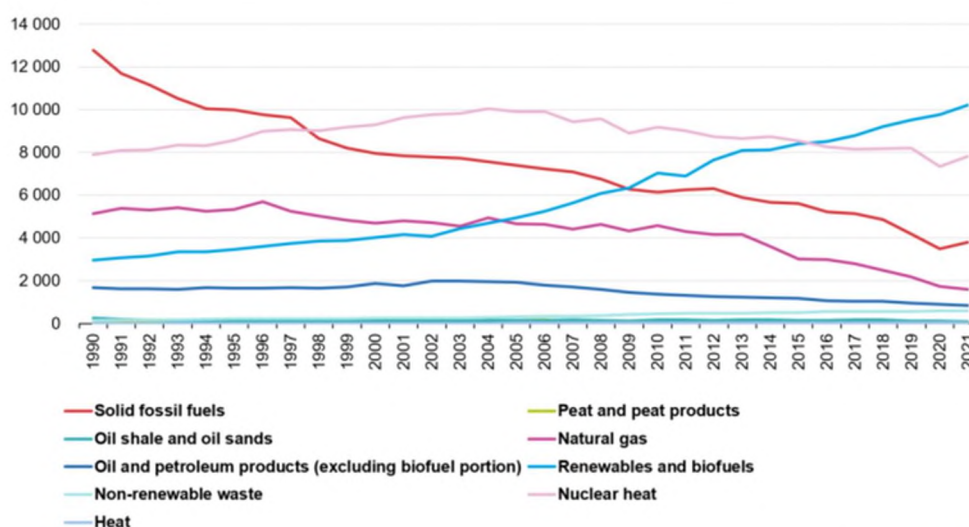
Η Ε.Ε. είναι ένας μείζων παγκόσμιος καταναλωτής ενέργειας που βασίζεται σε ένα συνδυασμό εγχώριας παραγωγής και εισαγωγών για να καλύψει τις ανάγκες της. Η ενεργειακή οικονομία της Ε.Ε. έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές ανά τα χρόνια με τις τελευταίες πρωτοβουλίες να επικεντρώνονται στην ανάπτυξη της ανανεώσιμης ενέργειας. Ένας από τους λόγους για αυτήν την μεταστροφή είναι οι αυστηροί

κανονισμοί που στοχεύουν στην μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου για όλα τα κράτη-μέλη με στόχο την κλιματική ουδετερότητα μέχρι το 2050. Επίσης, οι τελευταίες εξελίξεις του πολέμου στην Ουκρανία και το εμπάργκο των εισαγόμενων ρωσικών καυσίμων δυσχεραίνει την αγορά λόγω της μεγάλης εξάρτησης της Ε.Ε. από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα. Όπως θα γίνει αντιληπτό, ένα μεγάλο μέρος της τελικής κατανάλωσης της Ε.Ε. και της Ελλάδας βασίζεται σε αυτές τις εισαγωγές τρίτων χωρών με την μορφή πετρελαίου και φυσικού αερίου αντί της εγχώριας πρωτογενούς παραγωγής που υποστηρίζεται από την πυρηνική και την ανανεώσιμη ενέργεια. Επομένως, όταν η διάθεση τους σταματήσει, ο αντίκτυπος γίνεται αντιληπτός με την ραγδαία αύξηση των τιμών που δημιουργεί η ενεργειακή και οικονομική κρίση.

1.3.1 Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας

Η πρωτογενής παραγωγή της Ε.Ε. για το 2021 ήταν 25 020 PJ και αυξημένη κατά 4,3% σε σχέση με το 2020 όπου η παραγωγή είχε μειωθεί λόγω της πανδημίας Covid-19. Εξαίρεση παρατηρείται στις Α.Π.Ε. και τα βιοκαύσιμα που ακολουθούν σταθερά ανοδική πορεία. Την περασμένη δεκαετία ακολουθήθηκε εν γένει σημαντική πτωτική τάση της παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο (-63,1%), στερεά ορυκτά καύσιμα (-39,1%) και προϊόντα πετρελαίου (-36%). Αντιθέτως οι Α.Π.Ε. αυξήθηκαν κατά 48,2% όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8 [7].

Primary energy production by fuel, EU, in selected years, 1990-2021
Petajoule (PJ)

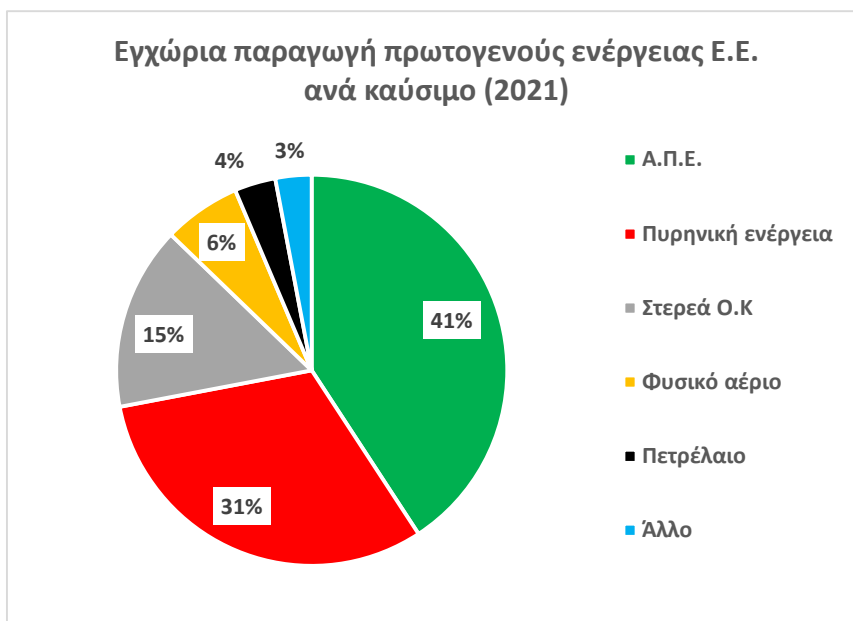


Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

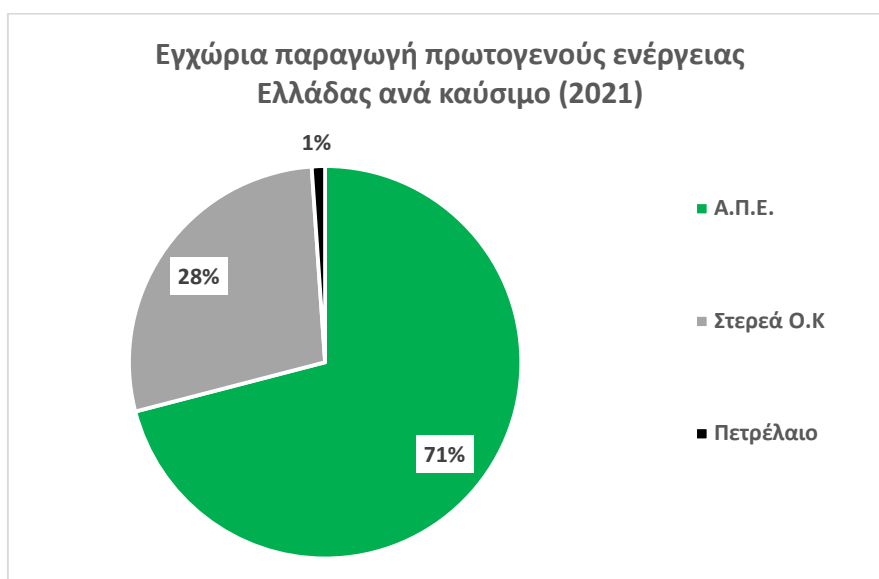
eurostat

Σχήμα 1.8: Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας στην Ε.Ε. ανά καύσιμο [PJ] (1990-2021) [7]

Η ποσοστιαία κατανομή των πηγών της παραγόμενης πρωτογενούς ενέργειας σε Ε.Ε. και Ελλάδα παρουσιάζεται στα Σχήματα 1.9 και 1.10 [8]. Οι Α.Π.Ε. πρωταγωνιστούν με 41% και 71% αντίστοιχα. Η Ελλάδα φυσικά δεν έχει σταθμούς παραγωγής πυρηνικής ενέργειας όπως άλλες χώρες της Ε.Ε.



Σχήμα 1.9: Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας Ε.Ε. ανά καύσιμο (2021) [8]

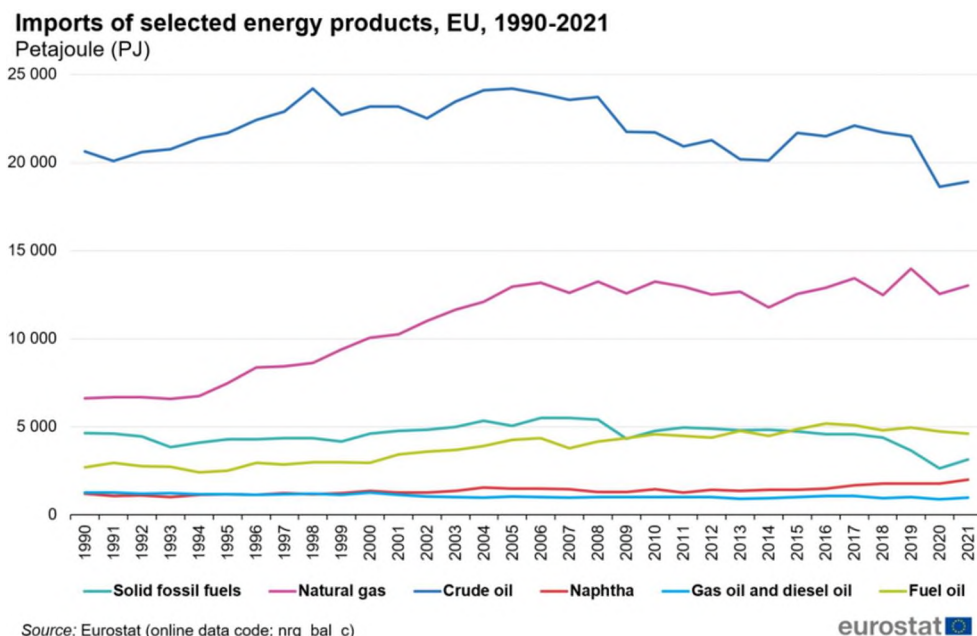


Σχήμα 1.10: Εγχώρια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας Ελλάδας ανά καύσιμο (2021) [8]

1.3.2 Εισαγωγές και εξάρτηση από τρίτες χώρες

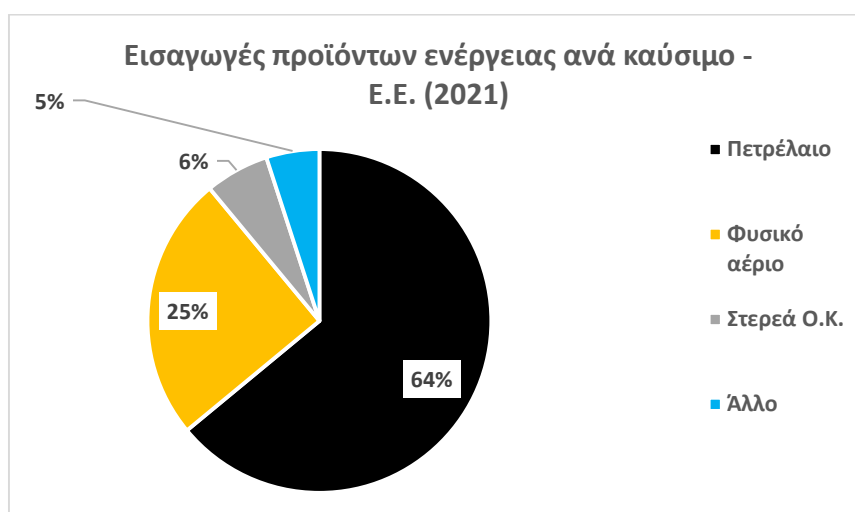
Τα τελευταία χρόνια, λόγω της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας εντός της Ε.Ε. τα επίπεδα εισαγωγής έχουν αυξηθεί με εξαίρεση το 2020 όπου η πανδημία οδήγησε σε χαμηλότερη ζήτηση. Το 2021 σημειώθηκε αυξητική τάση και πάλι. Ο διαμοιρασμός των εισαγόμενων προϊόντων ενέργειας στην κορυφή γίνεται μεταξύ

του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Το αργό πετρέλαιο παραμένει πρώτο στα 18 915 PJ αν και μειωμένο κατά 9,6% σε σχέση με το 2011 και κατά 11,9% σε σχέση με το 2019. Το φυσικό αέριο είναι το δεύτερο σημαντικότερο εισαγόμενο ενεργειακό προϊόν και διπλασιάστηκε κατά την περίοδο 1990-2021 στο τέλος της οποίας εισάχθηκαν 13 012 PJ [7]. Αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας της Ε.Ε. ανά καύσιμο [PJ] (1990-2021) [7]

Το 2021 η μεγαλύτερη εισαγωγή της Ε.Ε. ήταν στο αργό πετρέλαιο και στα προϊόντα του (64%), και στο φυσικό αέριο (25%). Τα στερεά ορυκτά καύσιμα είχαν μερίδιο 6%. Παρόμοιος καταμερισμός ισχύει και για τις εισαγωγές της Ελλάδας [9] όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.12 και 1.13.

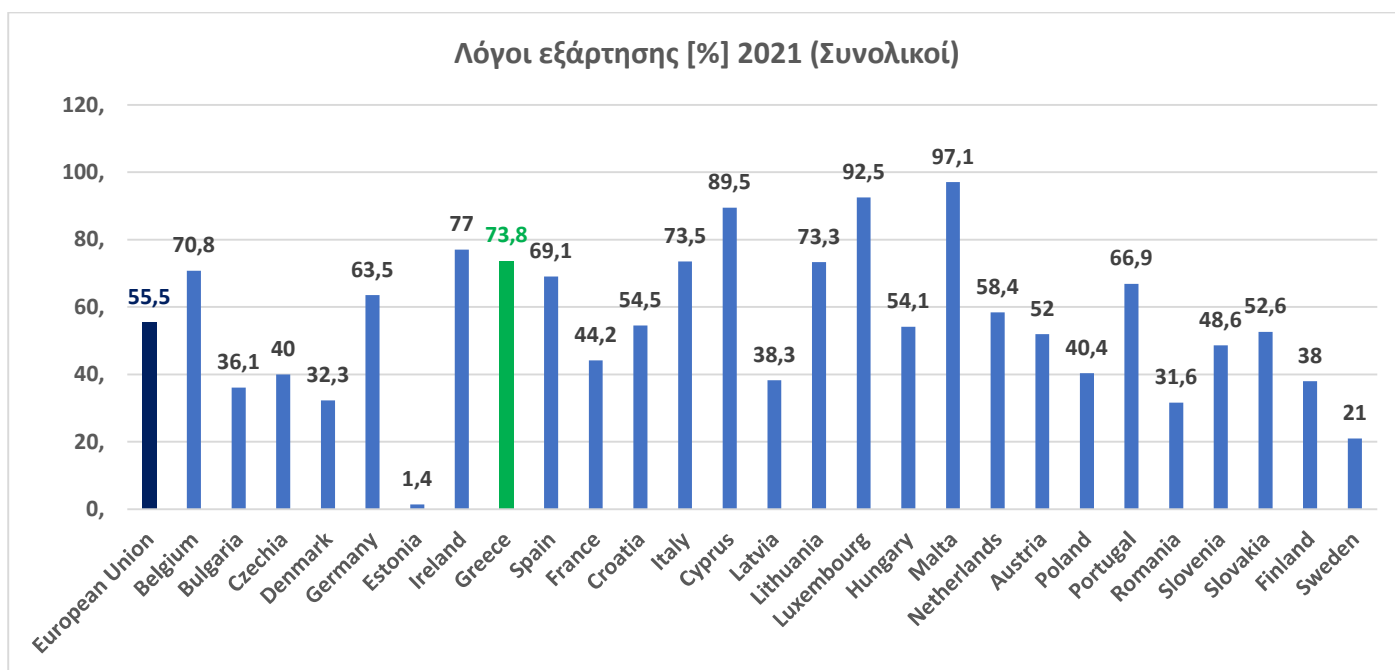


Σχήμα 1.12: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας ανά καύσιμο - Ε.Ε. (2021) [9]



Σχήμα 1.13: Εισαγωγές προϊόντων ενέργειας ανά καύσιμο - Ελλάδα (2021) [9]

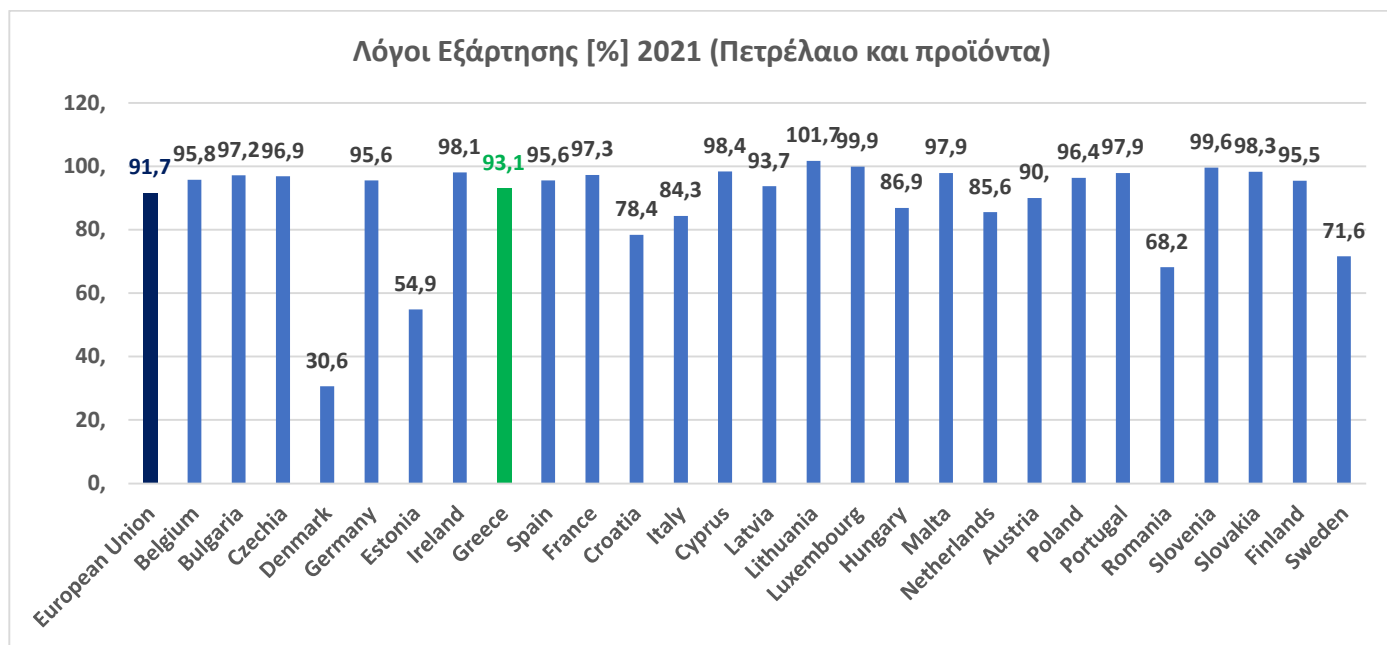
Ο λόγος της καθαρής εισαγόμενης ενέργειας προς τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια ονομάζεται εξάρτηση ενέργειας. Ο συνολικός λόγος εξάρτησης της Ε.Ε. από την εισαγόμενη ενέργεια ήταν 55,5% και της Ελλάδας 73,8% για το 2021. Η ενεργειακή εξάρτηση είναι διαχρονική: από το 1990 και μετά ο λόγος της Ε.Ε. ήταν τουλάχιστον 50% και ο ελάχιστος της Ελλάδας ήταν 58% το 1994 όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.14 [10].



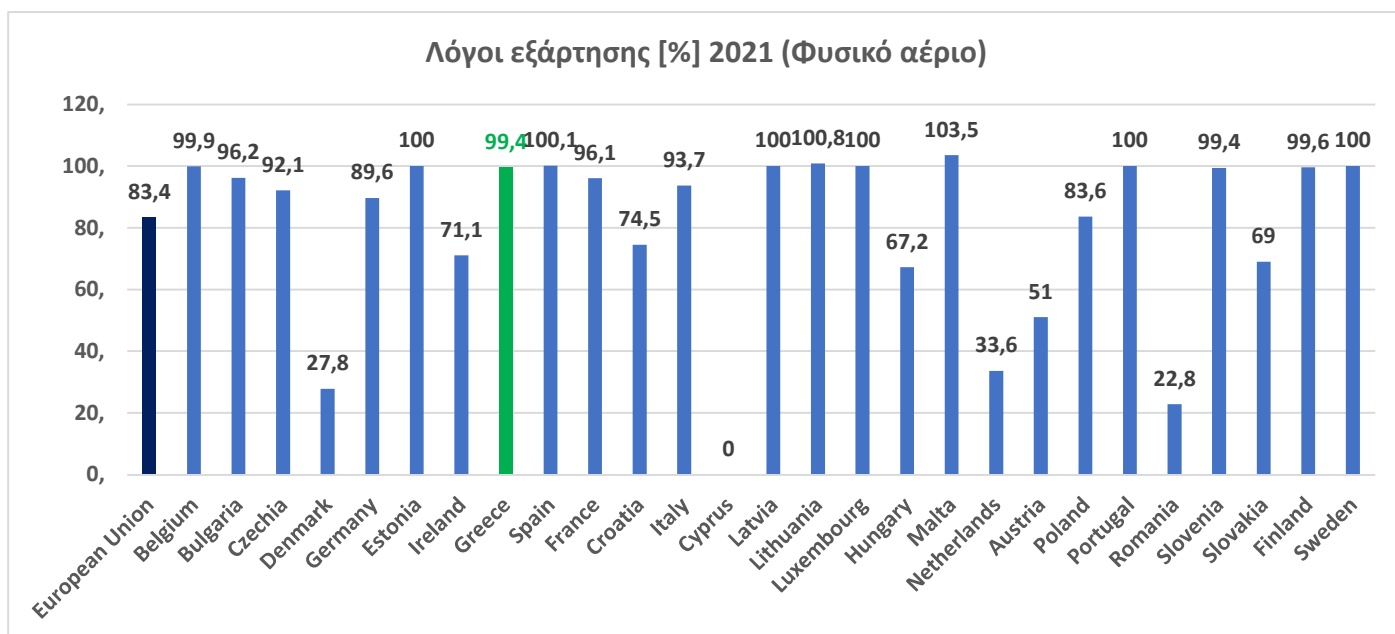
Σχήμα 1.14: Λόγοι εξάρτησης [%] 2021 (Συνολικοί) [10]

Όμως, οι επιμέρους λόγοι για το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι πολύ υψηλότεροι για την Ε.Ε. και την Ελλάδα καθώς δεν υπάρχει ουσιώδης παραγωγή

αυτών των καυσίμων εντός των κρατών-μελών. Ειδικότερα, ο λόγος εξάρτησης της Ε.Ε. για το 2021 από το εισαγόμενο πετρέλαιο ήταν 91,7% και της Ελλάδας 93,1% όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15. Επίσης ο λόγος της πρώτης είναι χαμηλότερος για το φυσικό αέριο και ίσος με 83,4% ενώ για την Ελλάδα είναι σχεδόν απόλυτος, δηλαδή 99,4% [10] όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.16.



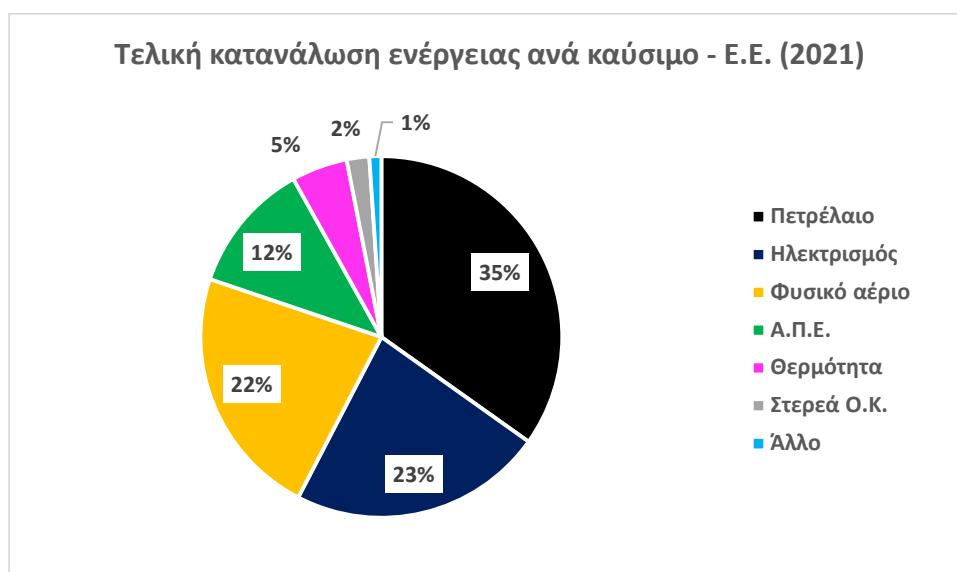
Σχήμα 1.15: Λόγοι Εξάρτησης [%] 2021 (Πετρέλαιο και προϊόντα) [10]



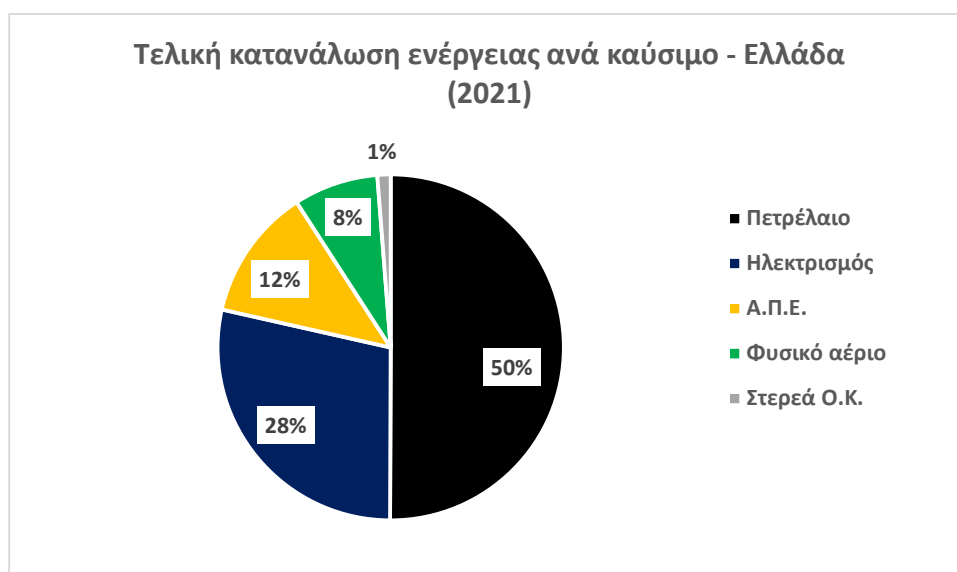
Σχήμα 1.16: Λόγοι εξάρτησης [%] 2021 (Φυσικό αέριο) [10]

1.3.3 Τελική κατανάλωση

Η τελική κατανάλωση ενέργειας (περίπου τα 2/3 της συνολικής) στην Ε.Ε. το 2021 ήταν 39 351 PJ και μειωμένη κατά 5,1% σε σχέση με την μέγιστη τιμή που είχε παρατηρηθεί το 2006 [7]. Στην Ε.Ε. τα προϊόντα πετρελαίου καταναλώθηκαν περισσότερο (35%) ακολουθούμενα από τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο (23% έκαστο), τις Α.Π.Ε. (12%), την θερμότητα (5%) και τα στερεά ορυκτά καύσιμα (2%) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.17 [8]. Στην Ελλάδα το πετρέλαιο καταναλώθηκε σε ποσοστό 50% και ο ηλεκτρισμός σε 28% όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18 [8].

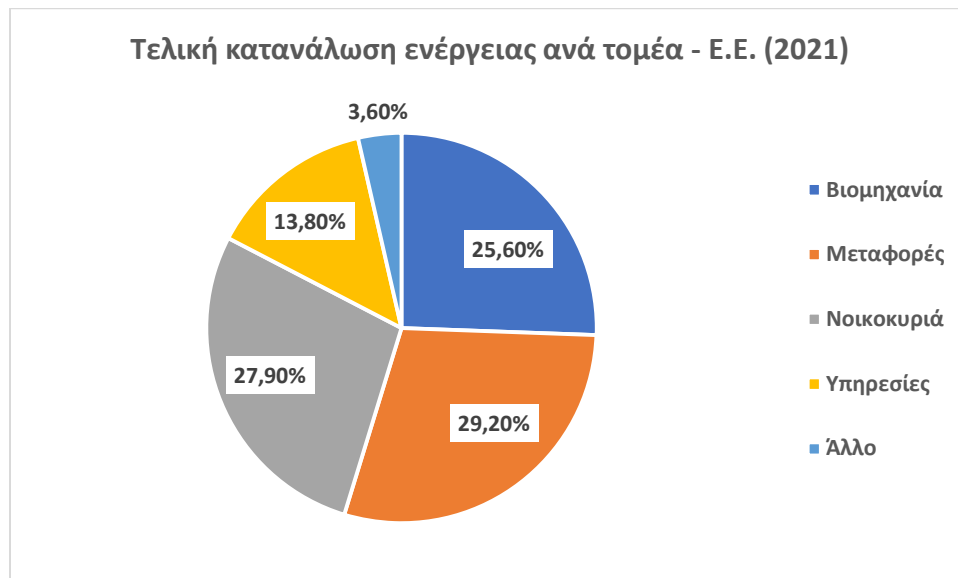


Σχήμα 1.17 [8]



Σχήμα 1.18 [8]

Το μεγαλύτερο μέρος της τελικής κατανάλωσης του 2021 αποδίδεται κυρίως στις μεταφορές (29,2%), στα νοικοκυριά (27,9%), και στην βιομηχανία (25,6%) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.19 [7].



Σχήμα 1.19: Τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα - Ε.Ε. (2021) [7]

2. Αντλίες Θερμότητας και Γεωθερμική Ενέργεια

2.1 Ορισμός

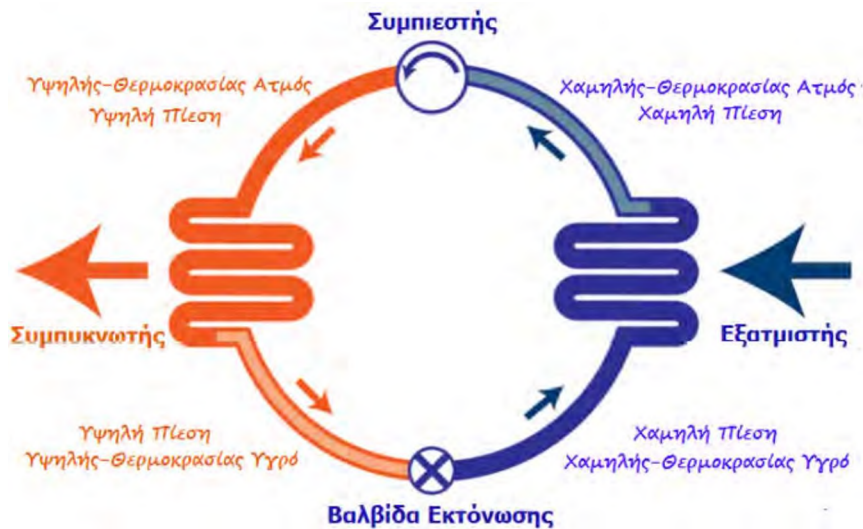
Η αντλία θερμότητας είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει θερμότητα μεταξύ δύο χώρων-από έναν ψυχρό σε έναν θερμό-καταναλώνοντας έργο σύμφωνα με τον κύκλο ψύξης συμπίεσης ατμού ενός ψυκτικού μέσου. Το μέσο αυτό λαμβάνει την θερμότητα από την ψυχρή πηγή και την αποθέτει στον θερμό προορισμό. Αντίθετα από την φυσική ροή της θερμότητας-από υψηλές σε χαμηλές θερμοκρασίες-που χρησιμοποιούν οι θερμικές μηχανές για να παραγάγουν έργο, οι αντλίες θερμότητας φαινομενικά την αντιστρέφουν. Οι συνήθεις πηγές διάθεσης της θερμότητας είναι το νερό, ο αέρας και το έδαφος η οποία τελικά παραδίδεται σε θερμό νερό ή αέρα για χρήση και αντίστροφα: τα συστήματα Α.Θ. είναι ικανά να παρέχουν θέρμανση και ψύξη μεταξύ των δύο χώρων εναλλάσσοντας τον θερμό και ψυχρό ταμιευτήρα.

2.2 Μέρη αντλίας θερμότητας

Τα βασικότερα τμήματα τα οποία απαρτίζουν μια αντλία θερμότητας είναι τα εξής και παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1:

- *Συμπιεστής*: καταναλώνει το μηχανικό έργο, απαραίτητο για την λειτουργία του ψυκτικού κύκλου. Είναι το πιο σημαντικό μέρος της αντλίας καθώς καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια.
- *Συμπυκνωτής*: απορρίπτει θερμότητα στον επιθυμητό προορισμό.
- *Εξατμιστής*: απορροφά θερμότητα από τον ψυχρό ταμιευτήρα.
- *Μηχανισμός στραγγαλισμού*: Βαλβίδες εκτόνωσης για πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου.
- *Μηχανισμός τετράοδης βαλβίδας*: Επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ των λειτουργιών θέρμανσης και ψύξης αντιστρέφοντας την ροή του ψυκτικού μέσου [11]. Η ιδιότητα αυτή δεν πρόκειται για αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου σε έναν «θερμικό». Αντιθέτως, τα στοιχεία που βρίσκονται εσωτερικά και εξωτερικά του χώρου μπορούν να εκτελούν διττό ρόλο. Στην λειτουργία θέρμανσης, το εσωτερικό στοιχείο λειτουργεί ως συμπυκνωτής απορρίπτοντας θερμότητα στον χώρο, ενώ κατά την ψύξη γίνεται εξατμιστής και απάγει θερμότητα από τον χώρο, ψύχοντας τον. Το ίδιο συμβαίνει και με

το εξωτερικό στοιχείο. Έτσι, δεν χρειάζεται η μεταφορά των αυτών των συσκευών μέσα και έξω από τον χώρο.



Σχήμα 2.1: Μέρη αντλίας θερμότητας [12]

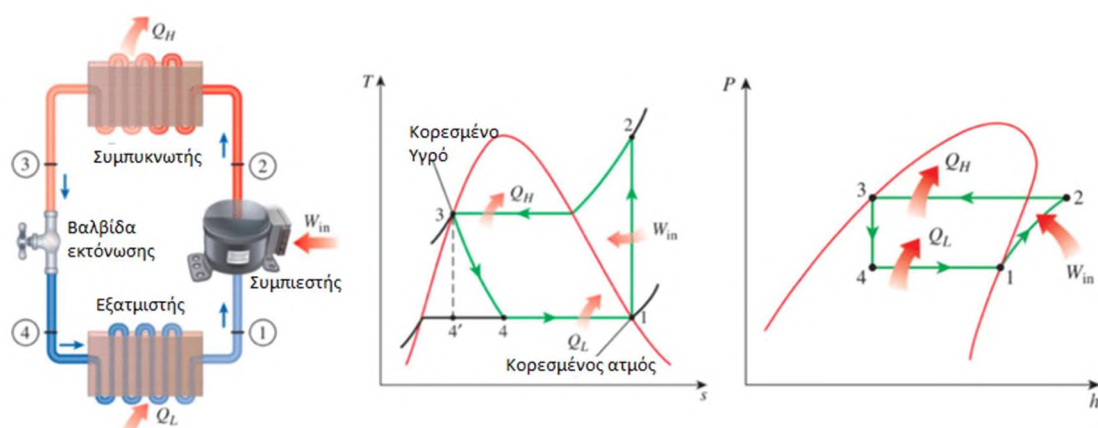
2.3 Αρχή λειτουργίας

Ξεκινώντας από την είσοδο του στον συμπιεστή, μπορούμε να διακρίνουμε τις μεταβολές που δέχεται το ψυκτικό μέσο και τις θερμοδυναμικές διεργασίες σε κάθε επανάληψη του ιδανικού ψυκτικού κύκλου συμπίεσης ατμού (βλέπε Σχήμα 2.2), καθώς διέρχεται από κάθε μέρος της αντλίας [13]:

- I. *Ισεντροπική συμπίεση*: Το ψυκτικό μέσο κατά την είσοδό του στον συμπιεστή βρίσκεται σε αέρια φάση κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Αφού συμπιεστεί χάρη στην είσοδο έργου, εξέρχεται ως αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας δηλαδή ως υπέρθερμος ατμός.
- II. *Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας*: Έπειτα, το ψυκτικό μέσο φτάνει στον συμπυκνωτή, όπου υγροποιείται καθώς αρχικά αποβάλλει τα υπέρθερμα ποσά θερμότητας και στην συνέχεια την θερμότητα συμπύκνωσης σε σταθερή πίεση, η οποία μεταφέρεται σε θερμό νερό ή αέρα που απομακρύνει την θερμότητα για την εκμετάλλευσή της. Η θερμοκρασία και η πίεση του πλέον κορεσμένου υγρού μέσου παραμένουν υψηλές.
- III. *Στραγγαλισμός*: Στην συνέχεια, το υγρό προορίζεται για τις εκτονωτικές βαλβίδες όπου η πίεση του μειώνεται απότομα. Παράλληλα, η θερμοκρασία

του θα μειωθεί κατά την διεργασία, μετατρέποντας το σε ένα κορεσμένο μείγμα υγρής-αέριας φάσης χαμηλής ποιότητας.

- IV. *Ισοβαρής απαγωγή θερμότητας*: Στο τελευταίο στάδιο, αυτό του εξατμιστή, το ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα από τον ψυχρό ταμιευτήρα αυξάνοντας την θερμοκρασία του και έτσι ατμοποιείται πλήρως σε χαμηλή όμως θερμοκρασία και πίεση. Βρίσκεται σε αέρια φάση κορεσμένου ατμού και ο κύκλος μπορεί να επαναληφθεί με την είσοδο του στον συμπιεστή.



Σχήμα 2.2: Διαγράμματα T-s και P-h του ιδανικού κύκλου ψύξης συμπίεσης ατμού [14]

Αν «αντιστρέψουμε» την λειτουργία της αντλίας προκειμένου να επιτύχουμε ψύξη ενός χώρου θα ακολουθείται ο ίδιος κύκλος, όμως η ψυχρή πηγή από την οποία θα απομακρυνθεί θερμότητα θα είναι ο επιθυμητός ψυχόμενος χώρος και ο θερμός ταμιευτήρας το περιβάλλον, το υπέδαφος ή ένας πύργος ψύξης.

2.4 Υπολογισμός απόδοσης

Η αντλία θερμότητας παρομοιάζεται με μία αντίστροφη μηχανή Carnot. Για να οριστεί ο βαθμός απόδοσης πρέπει πρώτα να οριστούν τα ενεργειακά μεγέθη που εμπλέκονται στην λειτουργία της: ο ψυχρός ταμιευτήρας παρέχει ένα ποσό θερμότητας Q_C και ο θερμός παραλαμβάνει ένα τελικό ποσό Q_H . Ταυτόχρονα, ο συμπιεστής απαιτεί κατανάλωση μηχανικού έργου W . Επομένως ένα ισοζύγιο ενέργειας δίνει:

$$Q_C + W_{in} = Q_H \quad (2.1)$$

Η απόδοση της αντλίας θερμότητας υπολογίζεται από τον συντελεστή απόδοσης COP (“Coefficient Of Performance”) σε κάθε λειτουργία ως εξής:

$$COP_{\theta\epsilon\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta} = \frac{\text{Θερμική Ισχύς}}{\text{Ισχύς συμπιεστή}} = \frac{Q_H \text{ [kW]}}{W_{in} \text{ [kW]}} = \frac{Q_H \text{ [kW]}}{Q_H - Q_C \text{ [kW]}} \quad (2.2)$$

$$COP_{\psi\upsilon\chi\eta} = \frac{\text{Ψυκτική Ισχύς}}{\text{Ισχύς συμπιεστή}} = \frac{Q_C \text{ [kW]}}{W_{in} \text{ [kW]}} = \frac{Q_C \text{ [kW]}}{Q_H - Q_C \text{ [kW]}} \quad (2.3)$$

$$COP_{\theta\epsilon\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta} = COP_{\psi\upsilon\chi\eta} + 1 \quad (2.4)$$

Για παράδειγμα, ένας COP ίσος με 5, ερμηνεύεται ως η παράδοση 5 kW θερμικής ενέργειας που επιτυγχάνεται από την κατανάλωση 1 kW ηλεκτρικής ενέργειας στον συμπιεστή.

Θεωρώντας ιδανικό κύκλο Carnot οι θερμότητες αντικαθίστανται από τις θερμοκρασίες:

$$COP_{\theta\epsilon\rho\mu\alpha\nu\sigma\eta} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (2.5)$$

$$COP_{\psi\upsilon\chi\eta} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (2.6)$$

Η απόδοση των αντλιών θερμότητας εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες με κύρια συνιστώσα την θερμοκρασία, επομένως ο COP δεν έχει σταθερή τιμή αλλά αυξομειώνεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας των εναλλακτών. Ο COP συνήθως λαμβάνει τιμές μεταξύ των 1,5 και 7 [5]. Το πρότυπο Eurovent ορίζει σταθερές τιμές θερμοκρασιών σύμφωνα με τις οποίες οι κατασκευαστές υπολογίζουν τους βαθμούς απόδοσης. Στην θέρμανση (A7/W35) ο εξωτερικός αέρας έχει 7 °C, ο εσωτερικός 20 °C και το νερό 35 °C. Στην ψύξη (A35/W7) είναι 35 °C, 27 °C και 7 °C αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, μπορεί να οριστεί ο εποχιακός ή ετήσιος συντελεστής SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance) ως ο μέσος COP κατά την διάρκεια μιας περιόδου θέρμανσης ή ψύξης. Μπορεί επίσης να υπολογιστεί για χρονικά διαστήματα μήνα, έτους ή εποχής δηλαδή:

$$\begin{aligned} & SCOP_{\text{θέρμανσης}} \\ &= \frac{\text{Θερμική Ισχύς σε μία περίοδο θέρμανσης [kWh]}}{\text{Κατανάλωση συμπιεστή σε μία περίοδο θέρμανσης [kWh]}} \quad (2.7) \end{aligned}$$

$$SCOP_{\text{ψύξης}} = \frac{\text{Ψυκτική Ισχύς σε μία περίοδο ψύξης [kWh]}}{\text{Κατανάλωση συμπιεστή σε μία περίοδο ψύξης [kWh]}} \quad (2.8)$$

Στις Η.Π.Α. και σε άλλες περιοχές όπου χρησιμοποιείται το βρετανικό σύστημα, αντί του $COP_{\text{ψύξης}}$ χρησιμοποιείται ο «λόγος ενεργειακής απόδοσης» EER (“Energy Efficiency Ratio”) που ορίζεται ως:

$$EER = \frac{\text{Ψυκτική ισχύς [Btu/h]}}{\text{Ισχύς συμπιεστή [W]}} \quad (2.9)$$

Η μετατροπή του στο S.I. γίνεται ως εξής:

$$COP = \frac{EER}{3,413} \quad (2.10)$$

Παρομοίως, ο μέσος εποχιακός συντελεστής συμπεριφοράς SEER υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} & SEER \\ &= \frac{\text{Ψυκτική ισχύς σε μία περίοδο ψύξης [Btu/h]}}{\text{Κατανάλωση ενέργειας συμπιεστή σε μία περίοδο ψύξης [W]}} \quad (2.11) \end{aligned}$$

Επίσης ορίζεται και ο εκτιμώμενος μέσος παράγοντας εποχιακής απόδοσης SPF (“Seasonal Performance Factor”) ή «καθαρός εποχιακός συντελεστής απόδοσης ενεργού κατάστασης» ($SCOP_{\text{net}}$) για τις ηλεκτροκίνητες αντλίες θερμότητας:

$$SPF = \frac{\text{Συνολική εξερχόμενη ισχύς [kWh]}}{\text{Συνολική κατανάλωση ενέργειας [kWh]}} \quad (2.12)$$

Για τον υπολογισμό της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που παράγεται από αντλίες θερμότητας η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την οδηγία 2013/114/ΕΕ [15] ώστε όλα τα κράτη μέλη να μπορούν να την ενσωματώνουν στις υπόλοιπες ενεργειακές μετρήσεις τους με την ίδια μέθοδο.

Οι 3 βασικότερες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι:

- Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ισχύος (η). Είναι «ο λόγος μεταξύ της συνολικής ακαθάριστης παραγωγής ενέργειας και της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και υπολογίζεται ως μέσος όρος της ΕΕ επί τη βάση στοιχείων της Eurostat» [15]. Μέχρι τώρα λαμβάνεται ίσος με 45,5%.
- Η ωφέλιμη ενέργεια της αντλίας θερμότητας (Q_{usable} [GWh])
- Ο παράγοντας SPF

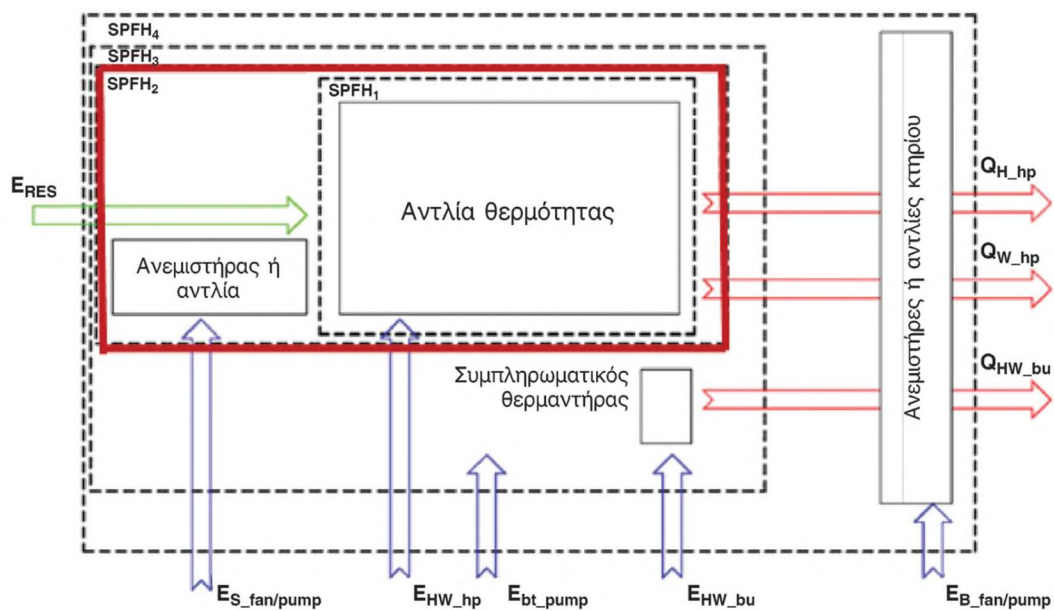
Λαμβάνοντας υπόψιν την ανανεώσιμη ενέργεια μιας πηγής θερμότητας που δεσμεύεται από την αντλία θερμότητας (E_{RES} [GWh]) υπολογίζεται τελικά ως εξής:

$$E_{RES} = Q_{usable} * \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \quad (2.12)$$

Ωστόσο, ο υπολογισμός αυτός αφορά μόνο τις αντλίες θερμότητας για τις οποίες $SPF > 1,15 * 1/\eta$ καθώς μόνο τότε η παραγόμενη ενέργεια θεωρείται προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές.

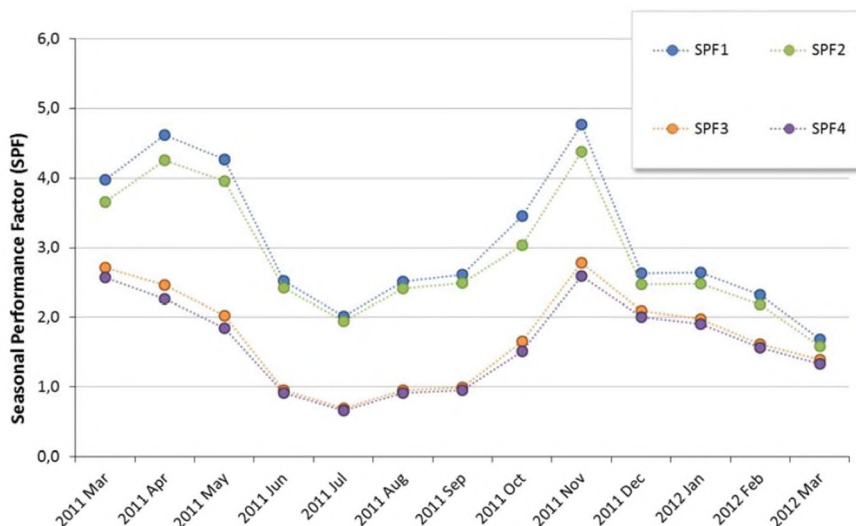
Η ιδιαιτερότητα αυτού του υπολογισμού ενυπάρχει στην οριοθέτηση του συστήματος το οποίο εξετάζεται και αξιολογείται. Συγκεκριμένα, η απόδοση του συστήματος βάσει του SPF εξαρτάται όχι μόνο από την αντλία αλλά και από άλλου παράγοντες τους οποίους θα επιλέξουμε να ενσωματώσουμε στον υπολογισμό εντός των ορίων του συστήματος. Έτσι, σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα ορίζονται 4 τέτοια συστήματα, με 4 διαφορετικούς SPF όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

- SPF_1 : Το σύστημα περιλαμβάνει μόνο την αντλία θερμότητας στην οποία παρέχουμε την απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία της (E_{HW_hp}).
- SPF_2 : Στο προηγούμενο σύστημα προστίθεται ο ανεμιστήρας και/ή η αντλία κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εντός των ορίων και η ενέργεια που παρέχεται για την λειτουργία του/των ($E_{S_fan/pump}$).
- SPF_3 : Στο προηγούμενο σύστημα προστίθεται η αντλία κυκλοφορίας του μέσου που απορροφά την ενέργεια του περιβάλλοντος (απαιτούμενης ενέργειας E_{bt_pump}) και τον συμπληρωματικό θερμαντήρα (απαιτούμενης ενέργειας E_{HW_bu}). Δεν αφορά όλες τις αντλίες θερμότητας.
- SPF_4 : Στο προηγούμενο σύστημα προστίθεται ο ανεμιστήρας ή/και η αντλία κυκλοφορίας του μέσου που παρέχει την τελική χρήσιμη θερμική ενέργεια και η απαιτούμενη ενέργειά τους ($E_{B_fan/pump}$).



Σχήμα 2.3: Συστήματα υπολογισμού του SPF [15]

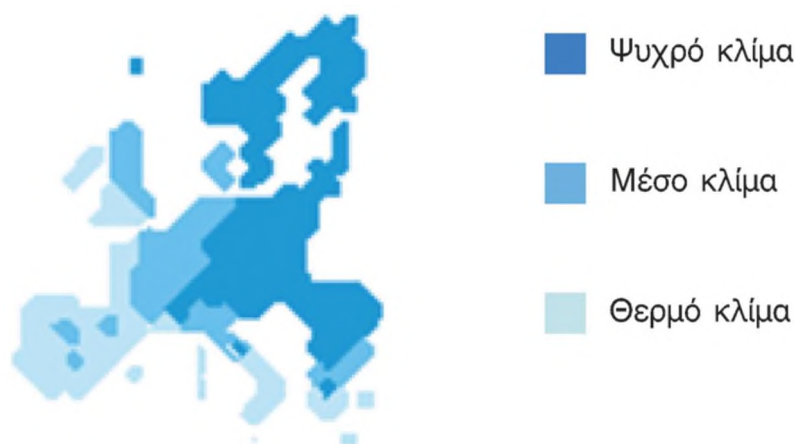
Συγκρίνοντας τους 4 παράγοντες σύμφωνα με μετρήσεις σε διάστημα ενός έτους παρατηρείται μεγάλη πτώση της απόδοσης του συνολικού συστήματος μεταξύ των SPF_2 και SPF_3 όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Αυτό οφείλεται στην συμπερίληψη και βαριά χρήση του συμπληρωματικού θερμαντήρα [16].



Σχήμα 2.4: Μετρήσεις του SPF των 4 συστημάτων κατά την διάρκεια ενός έτους [16]

Τέλος, οι υπολογισμοί των παραμέτρων Q_{usable} και SPF, πρέπει να γίνονται υπόψιν των κλιματικών και περιβαλλοντικών δεδομένων της κάθε χώρας [15]. Για τον διαχωρισμό τους έχουν καθοριστεί 3 κλιματικές ζώνες ανά την Ευρώπη με βάση τις θερμοκρασιακές συνθήκες τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5:

1. «Ψυχρότερες κλιματικές συνθήκες» με αντιπροσωπευτική πόλη το Ελσίνκι.
2. «Μέσες κλιματικές συνθήκες» με αντιπροσωπευτική πόλη το Στρασβούργο.
3. «Θερμότερες κλιματικές συνθήκες» με αντιπροσωπευτική πόλη την Αθήνα.



Σχήμα 2.5: Ζώνες υπολογισμού του SPF ανά κλίμα [15]

Αν σε ένα κράτος μέλος συνυπάρχουν διαφορετικές κλιματικές συνθήκες τότε οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται σε κάθε μια από αυτές.

Όσον αφορά την βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος και του SPF, διάφορα μέτρα μπορούν να εφαρμοστούν [16]. Για παράδειγμα, η χρήση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (capacity control) αντί για συστήματα “on-off”. Αυτή η μέθοδος είναι ικανή να ρυθμίζει την ισχύ εξόδου του συστήματος αλλά και την λειτουργία των εξαρτημάτων όπως ο συμπιεστής ή οι ανεμιστήρες με βάση τα απαιτούμενα φορτία με αποτέλεσμα την αποφυγή της αχρείαστης ενεργειακής κατανάλωσης. Παλιότερα, οι περισσότεροι συμπιεστές λειτουργούσαν σε μία μόνο ταχύτητα, επομένως για την διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας ήταν αναγκαίες αλλεπάλληλες ενάρξεις και τερματισμοί της λειτουργίας τους, πράγμα που μείωνε την απόδοσή τους και αλλοίωνε το θερμοκρασιακό αποτέλεσμα στην έξοδο. Αργότερα η τεχνολογία “inverter” έλυσε αυτό το πρόβλημα αφού η ταχύτητα του συμπιεστή, η παραγόμενη ισχύς και η θερμοκρασία εξόδου μεταβάλλονται με αυτόματο έλεγχο. Επομένως οι inverter ηλεκτροκινητήρες εξοικονομούν ενέργεια έως και 30-45%, και υπόκεινται σε λιγότερες βλάβες [17]. Ακόμη, η κυκλοφορία του ζεστού νερού χρήσης θα μπορούσε να ελέγχεται από τον κυκλοφορητή σε περιόδους όπου η παροχή του δεν χρειάζεται, καθώς η θερμοκρασία που πρέπει να φτάσει είναι υψηλότερη από αυτήν που χρειάζεται το νερό θέρμανσης ενός χώρου. Έτσι, μειώνεται περαιτέρω η κατανάλωση ενέργειας. Οι αντλίες θερμότητας προορίζονται για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών και για κάθε βαθμό μείωσης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (ή αύξησης της θερμοκρασίας εξατμίσης) ο COP μπορεί να αυξηθεί κατά 2-4% [14]. Για αυτόν τον λόγο η θερμοκρασία εξόδου πρέπει να είναι η χαμηλότερη δυνατή. Τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι πολύ δημοφιλή σε αυτές τις εγκαταστάσεις διότι επιτυγχάνουν αυτόν τον σκοπό και ταυτόχρονα καλύπτουν μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, οι θερμικές απώλειες του συστήματος μπορούν εύκολα να μειωθούν με εφαρμογή σωστής μόνωσης των αγωγών [16].

2.5 Είδη Α.Θ.

Ένας τρόπος ταξινόμησης των αντλιών θερμότητας είναι με βάση τα μέσα που παραχωρούν και αποδέχονται την θερμότητα. Αυτά είναι ο αέρας, το νερό και το έδαφος. Επομένως οι αντλίες θερμότητας εμφανίζονται στους κάτωθι τύπους:

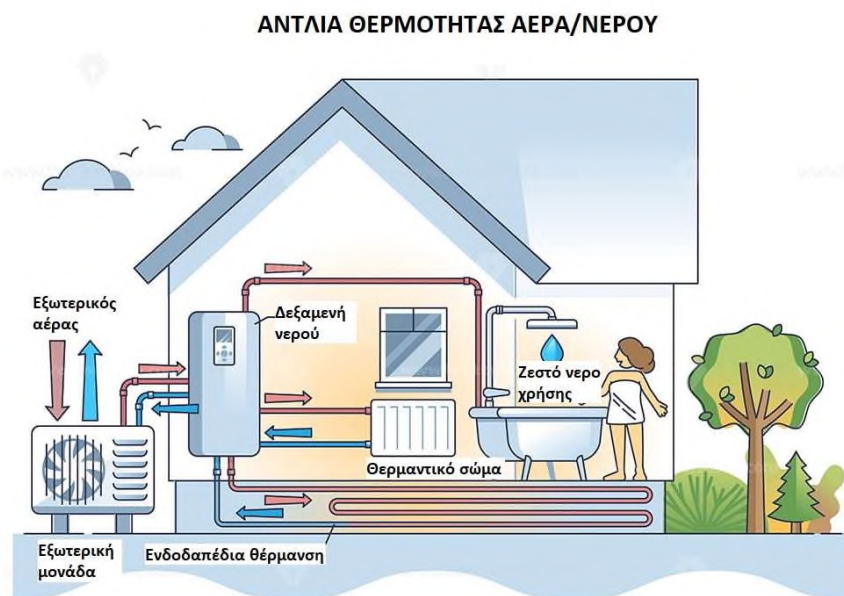
- *Αέρα-αέρα:* Η θερμότητα αντλείται από τον ατμοσφαιρικό αέρα και αποδίδεται σε πάλι σε αέρα. Πρόκειται για τον πιο συνηθισμένο τύπο αντλίας που βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα περιπτώσεων για θέρμανση και ψύξη διότι ο αέρας αποτελεί ατέρμονη ψυχρή πηγή. Η πιο βασική εφαρμογή του είναι σε κατοικίες και μικρές επιχειρήσεις, ειδικότερα ως συστήματα ψύξης. Αν η εξωτερική θερμοκρασία είναι επαρκώς χαμηλή όπως συμβαίνει τον χειμώνα, η απόδοση και η ισχύς τους μειώνεται σημαντικά καθώς η ικανότητα εξαγωγής θερμότητας από τον αέρα δυσχεραίνεται. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο, εγκαθίστανται συμπληρωματικά συστήματα ώστε να αντισταθμιστεί η προσφορά θερμότητας (π.χ. λέβητας). Μία άλλη επιπλοκή που προκύπτει όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα γίνει μικρότερη των 2 βαθμών Κελσίου είναι το πάγωμα του εξωτερικού εξατμιστή, κάτι που παρατηρείται ειδικά στα υγρά κλίματα [11]. Αυτό συμβαίνει επειδή η υγρασία του αέρα στερεοποιείται και έχει ως αποτέλεσμα την συλλογή πάγου στην είσοδο, μειώνοντας σταδιακά την παροχή και την μεταφορά θερμότητας. Πιθανές λύσεις του προβλήματος είναι η εγκατάσταση ηλεκτρικών αντιστάσεων που θα λιώνουν τον πάγο ή η αντιστροφή της ροής του ψυκτικού ώστε ο εξωτερικός εναλλάκτης να λειτουργήσει ως συμπυκνωτής, άρα θα γίνει αποδέκτης του θερμού ψυκτικού μέσου και θα λιώσει τον πάγο. Αυτές οι λύσεις όμως έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης και του κόστους, αλλά και την απώλεια θέρμανσης για μικρό χρονικό διάστημα [17]. Μία τέτοια εξωτερική μονάδα φαίνεται στο Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6: Αντλία θερμότητας πηγής αέρα [18]

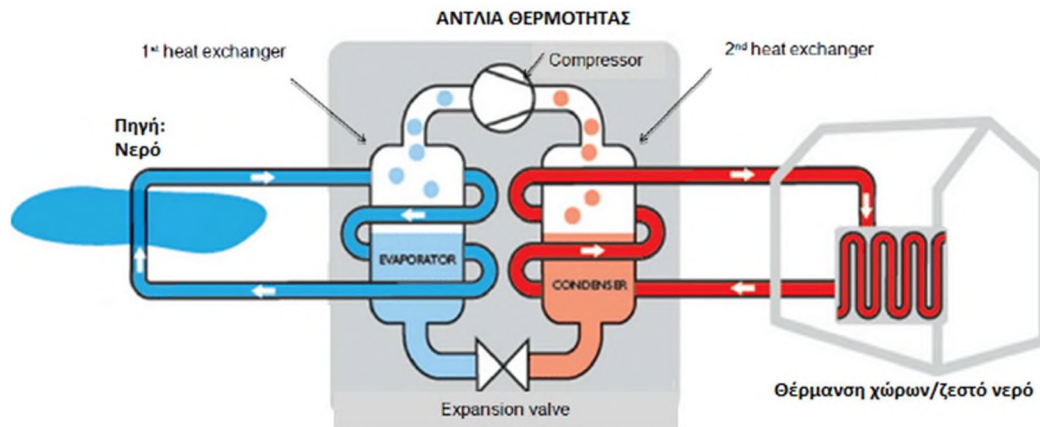
- *Αέρα-Νερού:* Η θερμότητα αντλείται από τον ατμοσφαιρικό αέρα και αποδίδεται σε σωληνώσεις νερού για θέρμανση ή χρήση (π.χ. σε θερμαντικό σώμα ή

fan coil για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Ένα πλεονέκτημά τους είναι ότι δημιουργούν λιγότερο θόρυβο από ένα σύστημα αεραγωγών. Σε περίπτωση αντίστροφης λειτουργίας, το νερό ψύχεται και η απολεσθείσα θερμότητα παραδίδεται στον εξωτερικό αέρα.



Σχήμα 2.7: Διατάξεις συστήματος αέρα/νερού [19]

- **Νερού-Νερού/Αέρα:** Η θερμότητα αντλείται από νερό και αποδίδεται σε νερό ή αέρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Κάποιες από τις πηγές του είναι επιφανειακά σώματα νερού όπως τα πηγάδια, οι λίμνες, τα ποτάμια αλλά και το αποβλημένο νερό διεργασιών. Το νερό που συναντάται στον πάτο κάποιων λιμνών μεγάλων βαθών ίσως είναι αρκετά κρύο ώστε να παρέχει ψύξη μόνο μέσω της κυκλοφορίας του, χωρίς αντλία θερμότητας. Τα επιφανειακά νερά γενικά μπορούν να εκμεταλλευτούν για χαμηλά κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας λόγω της άμεσης διαθεσιμότητάς τους, όμως οι χαμηλές θερμοκρασίες που συναντώνται σε ψυχρές περιόδους μπορεί να επιφέρουν πάγωμα του εναλλάκτη [20].



Σχήμα 2.8: Αντλία θερμότητας πηγής νερού [21]

- *Εδάφους-Αέρα/Νερού:* Εκμεταλλεύονται την γεωθερμική ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο υπέδαφος, την οποία διαθέτουν στο σύστημα ή εναποθέτουν θερμότητα μέσα σε αυτό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Οι τρόποι που μπορεί να ρυθμιστεί ένα τέτοιο σύστημα είναι πολυάριθμοι και βασίζονται σε μικρά ή μεγάλα βάθη, στη γεωμετρία του γεωεναλλάκτη, στην ύπαρξη υπογείων ταμιευτήρων νερού και την διάνοιξη γεωτρήσεων.



Σχήμα 2.9: Αντλία θερμότητας εδάφους/νερού [22]

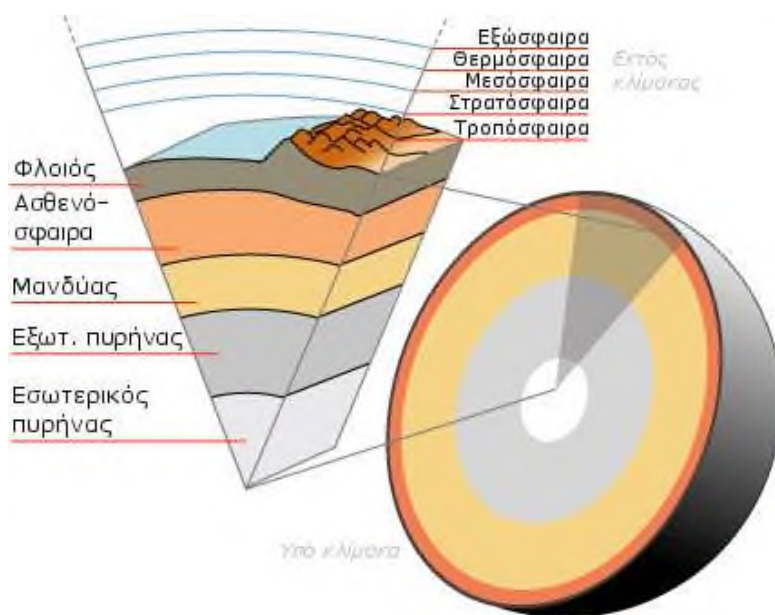
2.6 Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια μορφή ήπιας και ανανεώσιμης ενέργειας που προέρχεται από το εσωτερικό της γης η οποία είναι αποθηκευμένη σε υπόγειες μάζες νερού, ατμού και πετρωμάτων. Βασίζεται στην σταθερή ροή θερμότητας που

προέρχεται από ολόκληρη την επιφάνεια της γης που έχει μέσο όρο 87 mW/m^2 . Συνολικά η θερμότητα που παραλαμβάνεται στην επιφάνεια της Γης ($5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$) είναι περίπου 44 TW [23].

Κατά τον σχεδιασμό της, 4,56 δις χρόνια πριν, η κινητική ενέργεια των συγκρουόμενων ουράνιων σωμάτων μετατρέπονταν σε θερμική, αυξάνοντας την θερμοκρασία του πλανήτη. Επιπλέον, καθώς η Γη επεκτεινόταν, οι αυξανόμενες πιέσεις στο εσωτερικό της συμπύεσαν τα πυριτικά ορυκτά, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την εσωτερική της θερμοκρασία. Αυτές οι διεργασίες οδήγησαν τελικά στον σχηματισμό ενός πολύ θερμού και υγρού μεταλλικού πυρήνα περίπου 30 εκ. χρόνια μετά την έναρξη του σχηματισμού του πλανήτη [23]. Η δομή των γεωλογικών στρωμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.

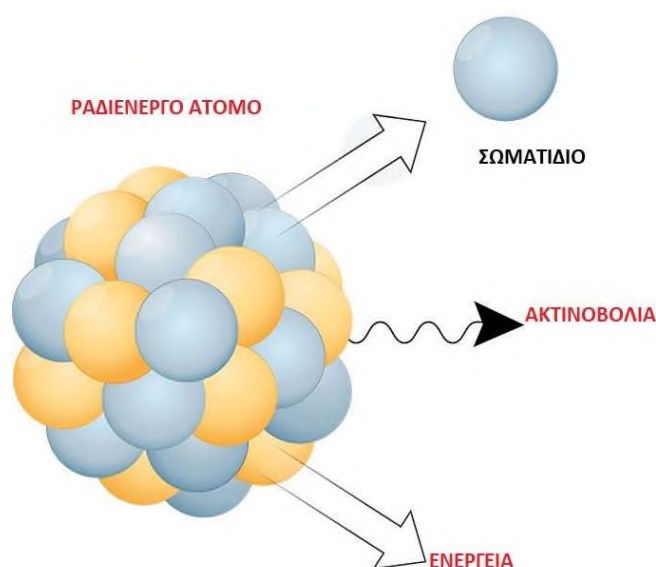
Ο πυρήνας συγκεκριμένα, αποτελείται από ένα συμπαγές εσωτερικό ακτίνας 1 221 km και ένα εξωτερικό υγρό στρώμα πάχους 2 200 km. Στην διεπιφάνεια η θερμοκρασία είναι μεταξύ 5 400-5 700 K και στην υγρή περιφέρεια 4 000 K. Το 40% της γεωθερμίας που χρησιμοποιείται προέρχεται από την φυγόκεντρο ροή θερμότητας του σταδιακά ψυχόμενου πυρήνα [23].



Σχήμα 2.10: Γεωλογικά στρώματα της Γης [24]

Η υπόλοιπη εσωτερική παραγωγή θερμότητας προέρχεται από την αποσύνθεση ραδιενεργών ισοτόπων εντός του ηπειρωτικού φλοιού της Γης πάχους 30-60 km που δεν συναντώνται εν γένει στον ωκεάνιο και πυρηνικό μανδύα. Αυτά τα

ισότοπα ανήκουν σε στοιχεία όπως Κάλιο (K), Ρουβίδιο (Rb), Θόριο (Th) και Ουράνιο (U). Ως αποτέλεσμα της ραδιενεργής αποσύνθεσης, μεγάλα ποσά θερμότητας εκλύονται και ρέουν προς την επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Το 60% της θερμότητας είναι αυτής της προέλευσης. Ωστόσο, η δομή του ηπειρωτικού φλοιού χωρίζεται σε κατώτερο, μεσαίο και ανώτερο φλοιό, καθένας από τους οποίους ποικίλλει ως προς το πάχος και την περιεκτικότητα του σε ραδιενεργά στοιχεία. Αυτή η ετερογένεια συμβάλλει στην άνιση κατανομή των γεωθερμικών πόρων [23].

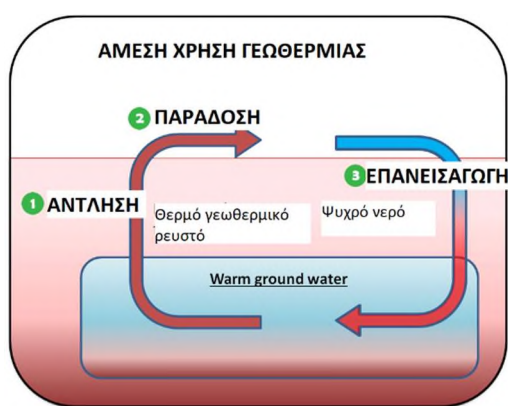


Σχήμα 2.11: Ραδιενεργή αποσύνθεση [25]

Οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και των πετρωμάτων είναι καθοριστικές για την ικανότητά τους να αποδίδουν γεωθερμική ενέργεια σε σταθερά και αξιόπιστα ποσά. Οι μελέτες που αφορούν τον σχεδιασμό των γεωθερμικών συστημάτων πρέπει να γνωρίζουν αυτά τα χαρακτηριστικά είτε με δοκιμαστικές μεθόδους είτε με αναφορά σε προϋπάρχουσες καταγραφές νομογραφημάτων. Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα, αλλά και το πορώδες και η υγρασία [5]. Τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους (βλέπε Παράρτημα) [26].

Δύο βασικοί τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας είναι οι εξής: Η «άμεση χρήση» της γεωθερμικής ενέργειας [27] έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα με εφαρμογές όπως μπάνιο σε θερμές πηγές, μαγείρεμα και ξεπουπούλιασμα. Στην σύγχρονη εποχή, οι εφαρμογές άμεσης χρήσης περιλαμβάνουν θέρμανση πισινών,

θεραπείες σε ιαματικά λουτρά, θέρμανση και ψύξη, τηλεθέρμανση, γεωργικές πρακτικές θερμοκηπίων και ξήρανσης καλλιιεργειών, ιχθυοκαλλιέργειες και βιομηχανικές διεργασίες. Τα γεωθερμικά ρευστά που απαιτούνται είναι συνήθως κάτω από 150 °C. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εξαγωγή του ζεστού νερού από γεώτρηση σε γεωθερμική δεξαμενή ή από θερμή επιφανειακή πηγή και στην συνέχεια την απευθείας διάθεσή του στην εγκατάσταση (Σχήματα 2.12 και 2.13). Επίσης είναι σύνηθες η θερμότητα να μεταφέρεται πρότινος σε δευτερεύον ρευστό μέσω εναλλάκτη όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις που η χημεία του είναι ακατάλληλη. Το ψυχρό νερό τελικά επιστρέφεται στην πηγή του για αναθέρμανση.



Σχήμα 2.12: Άμεση χρήση της γεωθερμίας [28]



Σχήμα 2.13: Θερμή πηγή στο εθνικό πάρκο Γέλοουστοουν [29]

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εργοστάσια [30-32] που αντλούν υδροθερμικά φορτία (δηλαδή θερμό νερό σε υγρή ή αέρια μορφή) σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ των 150 και 370 °C από ταμιευτήρες του υπεδάφους. Αυτές οι υπεδάφειες πηγές μπορεί να φτάσουν τα 3,2 km σε βάθος. Τα θερμά ρευστά προμηθεύουν σύστημα στροβίλου/γεννήτριας που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Με άλλα λόγια, η γεωθερμία αντικαθιστά τον κλασικό λέβητα ή τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Μετά την διεργασία του, το συμπυκνωμένο πλέον νερό (δύναται να παρεμβληθεί συμπυκνωτής) συνήθως επιστρέφει στο υπέδαφος. Υπάρχουν τρεις τύποι τέτοιων σταθμών [30-32]:

Τα εργοστάσια ξηρού ατμού αντλούν ατμό απευθείας από το υπέδαφος, δηλαδή ατμό που έχει δημιουργηθεί και στεγάζεται σε υπόγειες κοιτίδες σε υψηλές θερμοκρασίες με φυσικό τρόπο. Κανένας από τους υπόλοιπους τύπους δεν

χρησιμοποιούν ατμό με τόσο μεγάλες τιμές θερμοκρασίας. Αυτά είναι τα πιο παλιά γεωθερμικά εργοστάσια με το πρώτο να ξεκινά την λειτουργία του στην Τοσκάνη το 1904 όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14: Εργοστάσιο ξηρού ατμού στην Τοσκάνη (1904) [32]

Στα εργοστάσια «ακαριαίου» ατμού τα υπεδάφια ρευστά διατίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 182 °C και σε υψηλές πιέσεις. Για να μεταφερθούν στην επιφάνεια συνδέονται με δοχείο χαμηλής πίεσης με γεώτρηση. Η διαφορά της πίεσης που δημιουργείται μεταξύ του δοχείου και του ρευστού αφενός κινεί το ρευστό προς τα πάνω και αφετέρου το εξατμίζει ακαριαία (flash). Στην συνέχεια ο ατμός χρησιμοποιείται όπως και πριν. Αν παραμείνει υγρό ρευστό, αυτό μπορεί να επιστραφεί στο υπέδαφος μαζί με το συμπύκνωμα ή να δοκιμαστεί μια δεύτερη εξατμηση σε δεύτερο δοχείο.

Τα εργοστάσια «δυαδικού-κύκλου» ατμού θεωρούνται το μέλλον της γεωθερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θυμίζουν την λειτουργία των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας που θα αναπτυχθούν παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση τα υδροθερμικά ρευστά διατίθενται σε θερμοκρασίες κάτω από 182 °C και αντίθετα με τις προηγούμενες περιπτώσεις δεν έρχονται σε επαφή με τον στρόβιλο. Αντί αυτού ο ρόλος τους είναι να θερμάνουν και να εξατμίσουν ένα άλλο ρευστό με χαμηλό σημείο βρασμού (συνήθως προπάνιο ή βουτάνιο) το οποίο θα θέσει σε λειτουργία τον στρόβιλο και την γεννήτρια για την τελική παραγωγή

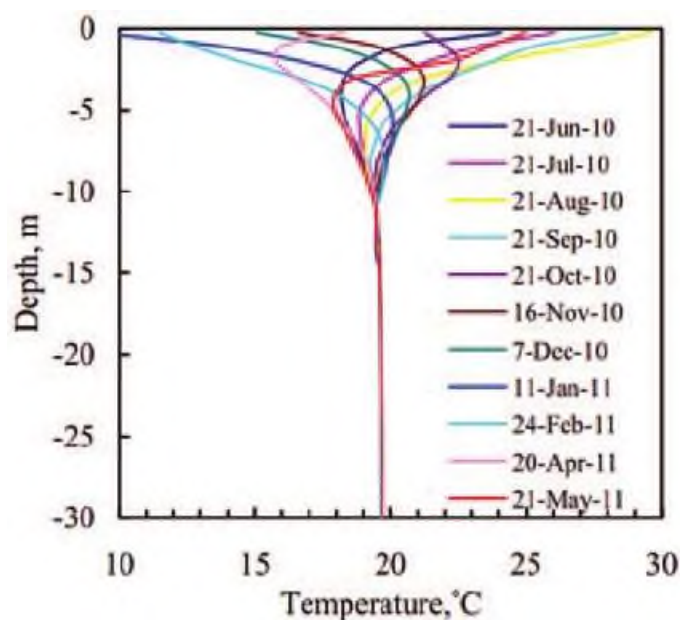
ηλεκτρισμού. Στην συνέχεια, το ρευστό αυτό συμπυκνώνεται και η διεργασία επαναλαμβάνεται.

2.6.1 Αβαθής γεωθερμία

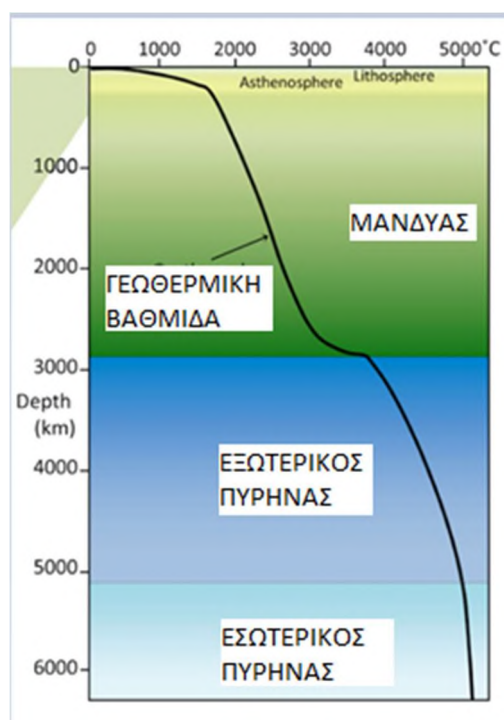
Με τον όρο «αβαθής» ή «κανονική» γεωθερμία εννοείται η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας που βρίσκεται σε μικρά βάθη (περίπου ως και 150 m από την επιφάνεια), όπου οι θερμοκρασίες του υπεδάφους είναι μικρότερες των 30 °C, και αξιοποιείται με άμεση χρήση και Γ.Α.Θ. [5]. Επιπλέον, η θερμική ισχύς που εξάγεται δεν υπερβαίνει τα 5 MW και δεν είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρά μόνο εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης. Αντίθετα, οι περιοχές που εμφανίζουν υψηλό γεωθερμικό δυναμικό βρίσκουν συγκεκριμένες βιομηχανικές εφαρμογές σε μεγαλύτερα βάθη (150 m-5 km) και υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτά τα πεδία κατατάσσονται σε γεωθερμία χαμηλής (30-90 °C), μέσης (90-150 °C) και υψηλής ενθαλπίας (>150 °C). Η ισχύς αυτών των εφαρμογών μπορεί να ξεπεράσει τα 50 MW [33].

Στα πρώτα μέτρα υπό την επιφάνεια του εδάφους, η θερμοκρασία παρουσιάζει αυξομειώσεις ανάλογες των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον (ηλιακή ακτινοβολία, βροχόπτωση, χιόνι, θερμοκρασία) καθώς και η θερμότητα εκεί επηρεάζεται από τους αυτούς τους παράγοντες. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο μέρος της γεωθερμίας των επιφανειακών στρωμάτων του υπεδάφους (έως και 2 m) προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από την ηλιακή ακτινοβολία (97-98%). Από τα 5 m και μετά η θερμοκρασία αρχίζει να σταθεροποιείται και παρατηρείται πως περί τα 12-20 m η υπεδαφική θερμοκρασία σταθεροποιείται τοπικά σε μία τιμή και ανεξαρτητοποιείται από τις επίγειες συνθήκες καθ' όλη την διάρκεια του έτους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Ξεκινώντας από αυτά τα βάθη, η θερμότητα προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από την ροή της ενδότερης γεωθερμικής ενέργειας του πλανήτη [5]. Στην Ελλάδα η τιμή της έχει μετρηθεί ως περίπου 18-20 °C (Αττική), ενώ στην Κεντρική Ευρώπη είναι περίπου 13 °C, και στις Σκανδιναβικές χώρες είναι ακόμη χαμηλότερη [34]. Το γεωθερμικό δυναμικό είναι φυσικά μεταβλητό από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους. Η ιδιότητα αυτή του υπογείου είναι πολύ βολική για την ευρεία χρήση της γεωθερμίας διότι

σημαίνει πως αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σταθερό και βέσιμο τρόπο, σε αντίθεση για παράδειγμα με την θερμότητα που συναντάται στον αέρα ή στα επιφανειακά ύδατα. Από αυτά περίπου τα βάθη και έως περίπου τα 3 000 km η θερμοκρασία αυξάνει σύμφωνα με την γεωθερμική βαθμίδα (geothermal gradient), δηλαδή με ρυθμό περίπου $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ [35] όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.15: Διακύμανση της θερμοκρασίας στο υπέδαφος κατά την διάρκεια ενός έτους [36]



Σχήμα 2.16: Γεωθερμική βαθμίδα [37]

2.7 Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

2.7.1 Εισαγωγή

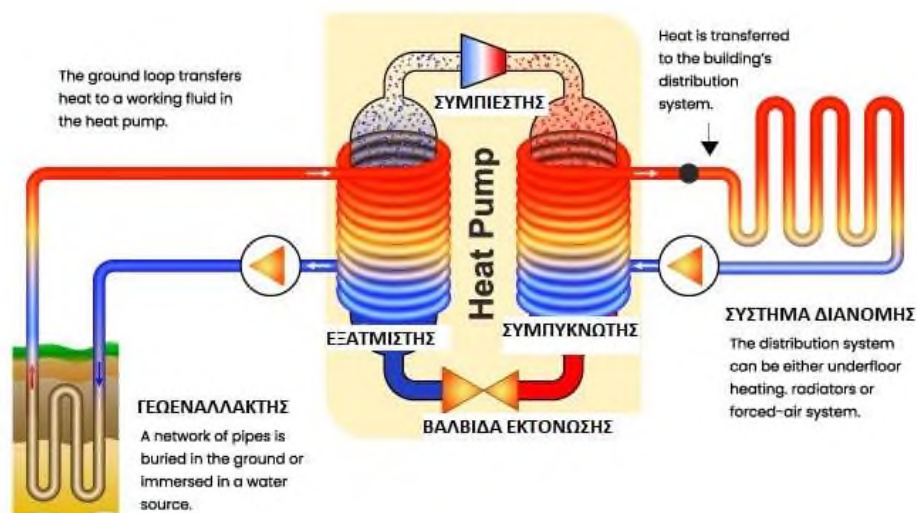
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι Γ.Α.Θ. εκμεταλλεύονται την θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο υπέδαφος με διάφορες μορφές ώστε να επιτύχει θέρμανση ή ψύξη κτιρίων αλλά και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Άλλες εφαρμογές της περιλαμβάνουν θέρμανση θερμοκηπίων, πισίνων, ιχθυοκαλλιέργειες, αφαλάτωση νερού κ.α.

Η χρήση της σε ένα σύστημα θέρμανσης/ψύξης συνοδεύεται από άλλα δύο βασικά υποσυστήματα. Το ένα από αυτά βρίσκεται ενταφιασμένο στο υπέδαφος (γεωεναλλάκτης) για την επίτευξη μεταφοράς θερμότητας από και προς αυτό και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. Το δεύτερο είναι το σύστημα διανομής της θέρμανσης του χώρου όπως θερμαντικά σώματα, fan coil, ενδοδαπέδια θέρμανση κτλ. Τελικά, η θέρμανση που επιτυγχάνουν τα γεωθερμικά συστήματα είναι χαμηλότερης θερμοκρασίας από τα συμβατικά καύσης και συνήθως δεν ξεπερνούν τους 50-60 °C όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 [5].

Πίνακας 2.1: Θερμοκρασίες προσαγωγής διαφόρων συστημάτων διανομής θερμότητας [5]

Σύστημα διανομής	Θερμοκρασία προσαγωγής [°C]
Συμβατικά θερμαντικά σώματα	60-85
Σώματα χαμηλής θερμοκρασίας	50-60
Fan Coil	35-45
Ενδοδαπέδια θέρμανση	30-45

Επομένως υπάρχει προαιρετικά και ένα τρίτο συμπληρωματικό υποσύστημα θέρμανσης για το ζεστό νερό χρήσης του οποίου η θερμοκρασία μπορεί να είναι υψηλότερη από την μέγιστη δυνατή του συστήματος Γ.Α.Θ. Αυτοί οι θερμαντήρες είναι συνήθως ηλεκτρικοί ή τύπου λέβητα φυσικού αερίου/πετρελαίου. Μια ενδεικτική δομή ενός συστήματος Γ.Α.Θ. παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17: Διάταξη Γ.Α.Θ. [38]

Τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν εν γένει τις Γ.Α.Θ. είναι τα ακόλουθα:

1. *Απόδοση:* Τα συστήματα Γ.Α.Θ. είναι εξαιρετικά αποδοτικά στην διαχείριση της ενέργειας καθώς μπορούν να παράγουν πολλαπλάσια θερμική ενέργεια από την ηλεκτρική που καταναλώνουν. Αυτή η απόδοση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με τα συμβατικά.
2. *Περιβαλλοντικά οφέλη:* Είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Παράγουν χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, επειδή βασίζονται στην ανανεώσιμη θερμότητα της Γης αντί της καύσης ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν τις περισσότερες φορές παράγεται με μεθόδους που ρυπαίνουν το περιβάλλον, επομένως οι εκπομπές είναι έμμεσες. Οι εκπομπές ρύπων τους είναι 30% χαμηλότερες σε σχέση με συστήματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου [11]
3. *Σταθερότητα:* Σε αντίθεση με τις αντλίες θερμότητας αέρα (ASHP), οι Γ.Α.Θ. δεν επηρεάζονται στον ίδιο βαθμό από τις διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του υπεδάφους της γης παραμένει σχετικά σταθερή όλο το χρόνο, εξασφαλίζοντας συνθήκες σταθερής απόδοσης και λειτουργίας.
4. *Μακρά διάρκεια ζωής:* Έχουν συνήθως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης/κλιματισμού. Οι γεωεναλλάκτες

μπορούν να διαρκέσουν για πολλές δεκαετίες και τα εξαρτήματα της αντλίας μπορούν να διαρκέσουν 20-25 χρόνια με την κατάλληλη συντήρηση.

5. *Χαμηλό κόστος λειτουργίας:* Λόγω της προαναφερθείσας ενεργειακής τους απόδοσης, τα συστήματα Γ.Α.Θ. μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σύγκριση με άλλες συμβατικές επιλογές. Είναι ιδιαίτερα οικονομικά αποδοτικές σε περιοχές με υψηλές τιμές συμβατικών καυσίμων. Ο Διεθνής Οργανισμός Γ.Α.Θ. (IGSHPA) ισχυρίζεται ότι οι Γ.Α.Θ. επιτυγχάνουν μεταξύ 25%-50% εξοικονόμηση κοστών σε σχέση με τα συστήματα ορυκτών καυσίμων [39]. Επίσης τα κόστη συντήρησης είναι μειωμένα κατά δύο τρίτα [11].

Ωστόσο, υπάρχουν κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που δύναται να εμποδίσουν την επεκτασιμότητα τους στο μέλλον αν δεν αντιμετωπιστούν:

1. *Υψηλό αρχικό κόστος:* Ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των γεωθερμικών συστημάτων είναι το υψηλό αρχικό κόστος τους. Η εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη και της αντλίας θερμότητας μπορεί να είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, γεγονός που μπορεί να αποτρέψει πολλούς ενδιαφερόμενους από την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας, ειδικά χωρίς οικονομική στήριξη από την πολιτεία.

2. *Περιορισμός χώρου:* Τις περισσότερες φορές η εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη απαιτεί αρκετή ελεύθερη έκταση για την εγκατάστασή του και το πρόβλημα παρουσιάζεται στο μέγιστο στα οριζόντια συστήματα. Επίσης, η διατάραξη του περιβάλλοντος εδάφους είναι βέβαια και θα πρέπει να επισκευαστεί (π.χ. λουλούδια, παρτέρια).

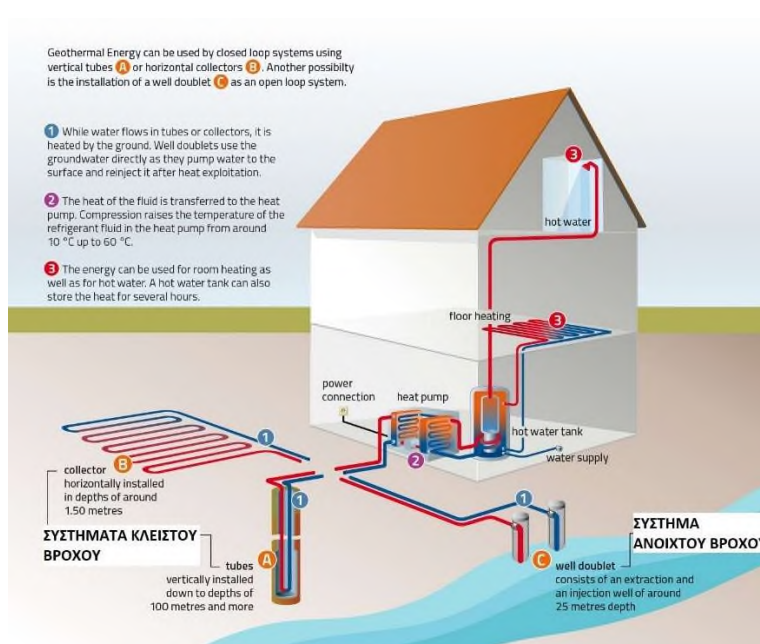
3. *Έλλειψη σχεδιαστών και εγκαταστατών:* «Υπάρχουν πολύ λίγες εξειδικευμένες εταιρίες και έμπειρο προσωπικό για διάνοιξη γεωτρήσεων και κατασκευή κατακόρυφων εναλλακτών εδάφους» [11].

4. *Καθαλάτωση:* Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου κινδυνεύουν από φαινόμενα επικαθήσεων και διάβρωσης λόγω του αντλούμενου νερού με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της λειτουργίας τους ή την αστοχία του συστήματος.

2.7.2 Τύποι συστημάτων

Τα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Αυτές είναι τα συστήματα ανοιχτού και κλειστού βρόχου και η διαφορά

τους έγκειται στην κυκλοφορία του ρευστού φορέα μεταφοράς της θερμότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου ο φορέας κυκλοφορεί μόνο εντός του συστήματος θέρμανσης ενώ σε ανοιχτού βρόχου ανακυκλώνεται στο περιβάλλον συνεχώς. Προκειμένου να επιλεγθεί το κατάλληλο σύστημα, οι πιο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους, ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση και οι ενεργειακές ανάγκες της εφαρμογής.



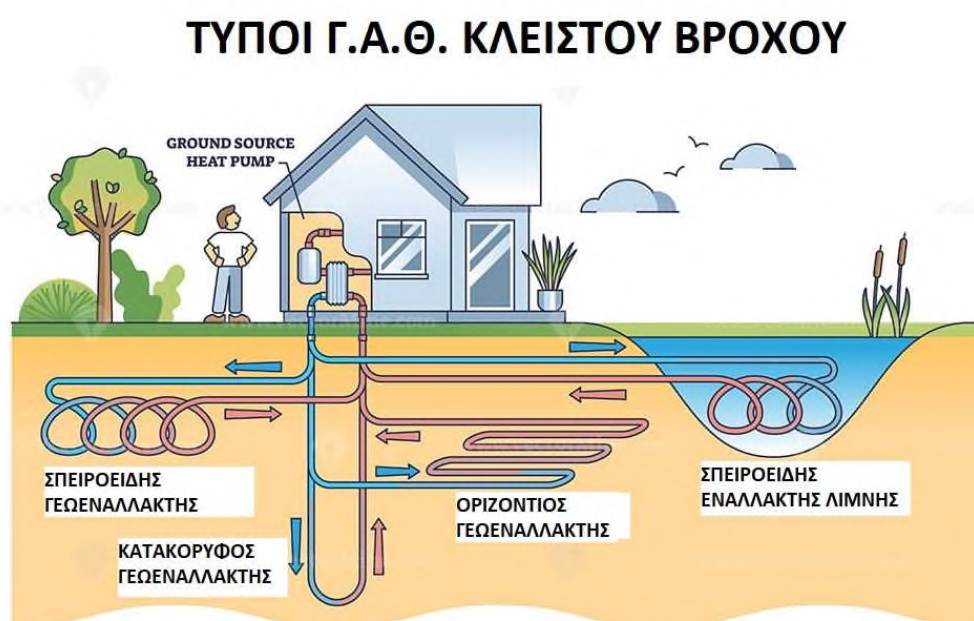
Σχήμα 2.18: Τύποι κλειστών και οριζοντίου συστήματος Γ.Α.Θ. [40]

Συστήματα κλειστού βρόχου

Ένα σύστημα κλειστού βρόχου συνδέεται με το υπέδαφος μέσω ενός γεωεναλλάκτη που αποτελείται από ένα δίκτυο αγωγών οι οποίοι μπορεί να είναι τοποθετημένοι οριζόντια σε μικρότερα βάθη ή κατακόρυφα μέσα σε γεωτρήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Το υλικό τους είναι συνήθως πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (PEX), πολυαιθυλένιο υψηλής θερμοκρασίας (PE-RT) και πολυπροπυλένιο (PP). Γενικά προτιμάται το πλαστικό λόγω της αντοχής του στον χρόνο όσον αφορά την θερμοκρασία και την διάβρωση καθώς και την ελαστικότητα του [41].

Μέσα στους θαμμένους αγωγούς ρέει μείγμα νερού με προσθήκη αντιπηκτικού (αν αναμένονται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες) το οποίο λαμβάνει ή

απορρίπτει την θερμότητα και την μεταφέρει από ή προς την αντλία. Τα αντιπηκτικά πρέπει να είναι μη-τοξικά και μη-διαβρωτικά, όπως οι γλυκόλες, οι αλκοόλες, το χλωριούχο ασβέστιο, το οξικό κάλιο κ.α. Τα μεταλλικά τμήματα του συστήματος πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά (φλάντζες, ταφ, ενωτικά τμήματα, βαλβίδες) ώστε να είναι συμβατά με το ρευστό του γεωθερμικού εναλλάκτη [34]. Όμως τις περισσότερες φορές λόγω της ελεγχόμενης χημείας του ρευστού φορέα θερμότητας δεν υπάρχει κίνδυνος καθαλάτωσης ή διάβρωσης, συνεπώς χρειάζονται αραιότερες και φτηνότερες συντηρήσεις [5].



Σχήμα 2.19: Συστήματα Γ.Α.Θ. κλειστού βρόχου [42]

Ένας ξεπερασμένος τύπος κλειστού βρόχου είναι τα συστήματα «άμεσης εκτόνωσης» (direct expansion, DX) στα οποία το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί σε ολόκληρο το σύστημα, δηλαδή και υπογείως μέσα σε χάλκινους αγωγούς όπου παραλαμβάνει απ' ευθείας την θερμότητα χωρίς να παρεμβάλλεται το προαναφερθέν μείγμα. Ωστόσο, παρά τις κάπως υψηλότερες αποδόσεις αυτά τα συστήματα απαιτούν ως και 10 φορές μεγαλύτερη ποσότητα ψυκτικού μέσου (750 g ανά kW θερμότητας), επομένως ο υψηλός κίνδυνος διαρροής του τείνει να τα θέσει εκτός ανταγωνισμού [18].

Οριζόντια

Στα οριζόντια συστήματα, η εγκατάσταση των σωληνώσεων γίνεται σε μικρά βάθη, συνήθως 1-2 m, με διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 2.20. Επειδή πρόκειται για απλή εκσκαφή και όχι γεώτρηση δεν απαιτείται έκδοση άδειας για την περάτωση του έργου και την λειτουργία του συστήματος. Αυτό αντικατοπτρίζεται και στο κόστος, αφού τα οριζόντια συστήματα είναι οικονομικότερα από τα υπόλοιπα.



Σχήμα 2.20: Σύνδεση σε σειρά (πάνω) και παράλληλα (κάτω) οριζόντιου βρόχου [35]

Κατόπιν επιλογής του κατάλληλου σημείου για την τοποθέτηση των αγωγών, γίνεται εκσκαφή μίας ή περισσότερων τάφρων (πλάτους 20-60 cm) σε μικρή απόσταση από το κτίριο που θα εξυπηρετούν (1,5 m) [5] ή αν δεν υπάρχει διαθέσιμη έκταση μπορούν να τοποθετηθούν και κάτω από αυτό αλλά σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις. Η αναπλήρωση της γεωθερμικής ενέργειας σε αυτά τα μικρά βάθη έγκειται στην ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως, για την διατήρηση της γεωλογικής ισορροπίας το έδαφος πάνω από την εγκατάσταση δεν πρέπει να καλύπτεται (π.χ. από άλλα κτίσματα ή δέντρα) [11]. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας ευνοούν την απόδοση του συστήματος επομένως εξετάζονται και οι συχνότητες των βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων της περιοχής καθώς βροχή ανανεώνει το έδαφος στα χαμηλά βάθη που αφορούν αυτά τα συστήματα. Η επιφάνεια του γεωεναλλάκτη πρέπει συνεπώς να μην είναι αδιαπέραστη στην βροχή. Ακόμη, δύναται να εγκατασταθούν σε ατομικές τάφρους ώστε να μην διαταραχτεί ελάχιστη έκταση

εδάφους. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, απαιτείται η διάθεση μεγάλης επιφάνειας για την εγκατάστασή τους ($400-800 \text{ m}^2$) [18].

Οι αγωγοί του γεωεναλλάκτη μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος με διάφορες γεωμετρίες έχοντας ως αφετηρία και προορισμό την αντλία. Για παράδειγμα, διατεταγμένοι οριζοντίως πάνω στην επιφάνεια της εκσκαφής σε σειρά ή παράλληλα κατά μήκος της τάφρου με πυκνό τρόπο ώστε να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια. Επίσης, μπορούν να τοποθετηθούν κατακόρυφα στα τοιχώματα μιας μικρότερης τάφρου, ο ένας βρόχος κάτω από τον άλλον. Αυτές οι διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21: Διατάξεις οριζόντιων βρόχων [5,43,44]

Μία παραλλαγή αυτών των διατάξεων είναι η σπειροειδής μορφή (“slinky”), όπου οι αγωγοί τυλίγονται σε διαδοχικές σπείρες και απιθώνονται οριζόντια σε μεγάλες τάφρους ή σε ατομικές μέσα στο έδαφος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22. Με αυτήν την μέθοδο εξοικονομείται επιφάνεια και όγκος εκσκαφής, ενώ η εγκατάσταση είναι γρηγορότερη και φτηνότερη [45].



Σχήμα 2.22: Οριζόντιοι σπειροειδείς βρόχοι τύπου “slinky” [46,47]

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος είναι η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους τα οποία καθορίζουν την ενεργειακή άντληση. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η ικανότητα απόληψης θερμότητας από ορισμένους τύπους εδάφους.

Πίνακας 2.2: Απόληψη θερμότητας από διαφορετικούς τύπους εδάφους [48]

Τύπος εδάφους	1800 ώρες λειτουργίας ετησίως	2400 ώρες λειτουργίας ετησίως
Ξηρό, μη συνεκτικό έδαφος	10 W/m ²	8 W/m ²
Υγρό, μη συνεκτικό έδαφος	20-30 W/m ²	16-24 W/m ²
Χαλίκι ή άμμος, κορεσμένο με νερό	40 W/m ²	32 W/m ²

Τα βάθη των τάφρων συχνά δεν ξεπερνούν τα 2 m αλλά εξαρτώνται από τις προαναφερθείσες παραμέτρους, ενώ οι σωλήνες διαστασιολογούνται με διαμέτρους από 5 έως και 40 mm [5]. Σε κάποιες περιπτώσεις, μετά την τοποθέτησή τους καλύπτονται με άμμο για προστασία από την συμπίεση πετρών πριν το χώμα τις καλύψει εντελώς ως την επιφάνεια του εδάφους [11]. Όσο για τους σπειροειδείς αγωγούς, τοποθετούνται στο ίδιο περίπου βάθος με τους οριζόντιους αλλά λόγω της πυκνότερης μορφής τους επιτρέπεται να έχουν μεγαλύτερο μήκος ή να αρκούνται σε μικρότερες τάφρους ειδικά αν τοποθετηθούν κατακόρυφα. Γι' αυτό ο τύπος τους δύναται να είναι πιο οικονομικός από τους άλλους.

Σε περίπτωση υποδιαστασιολόγησης της αντλίας ή/και χαμηλού βάθους, υπάρχει κίνδυνος παγώματος των σωλήνων (ειδικά την χειμερινή περίοδο) και επομένως μείωση της απόδοσης της αντλίας. Στην μεσόγειο οι θερμοκρασίες είναι

αρκετά υψηλές και έτσι αυτός ο κίνδυνος είναι πολύ μειωμένος, συνοδευτικά με την προσθήκη του αντιπηκτικού [49].

Κατακόρυφα

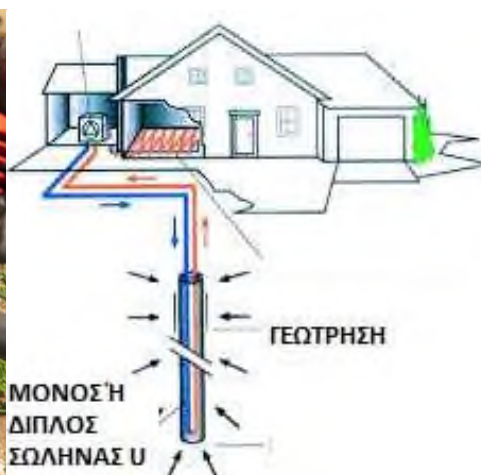
Τα κατακόρυφα συστήματα διαφέρουν από τα οριζόντια κατά το ότι οι εναλλάκτες τοποθετούνται σε κατακόρυφες γεωτρήσεις (βλέπε Σχήματα 2.23 και 2.24) βαθύτερα μέσα στο έδαφος (“borehole heat exchangers”) και στην συνέχεια γεμίζονται από πληρωτικό υλικό. Έτσι, σφραγίζονται και προστατεύονται από το περιβάλλον. Αυτές οι γεωτρήσεις είναι μεμονωμένες για κάθε αγωγό και απέχουν τουλάχιστον 5 m ο ένας από τον άλλον [48], επομένως ο καθένας τοποθετείται σε ξεχωριστές γεωτρήσεις. Το βάθος τους ξεπερνά τα 20 m και φτάνει έως και τα 200 m, ενώ η διάμετρός τους έχει εύρος 100-200 mm [21]. Οι ίδιοι οι σωλήνες συνήθως είναι φτιαγμένοι από διάφορους τύπους πλαστικού (πολυαιθυλενίων PE, HDPE, πολυπροπυλενίων PP) [35].

Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι παρουσιάζουν ένα άμεσο πλεονέκτημα σε σχέση με τα οριζόντια καθώς οι επίγειες περιβαλλοντικές διακυμάνσεις της δεν τα επηρεάζουν. Εκεί, η ενέργεια προέρχεται κυρίως από την αποθηκευμένη στο υπέδαφος θερμότητα ενώ οι εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία) δεν επηρεάζουν τόσο τα μεγαλύτερα βάθη. Μπορούν να αποφέρουν αποδόσεις μεταξύ 35-65 W/m εξαρτώμενοι από την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε εδάφους [22].

Πρόκειται για οικονομικά ακριβότερα συστήματα λόγω της ανάγκης διάνοιξης των γεωτρήσεων και του εξοπλισμού, όμως απαιτείται σαφώς μικρότερη έκταση για την εκμετάλλευσή τους σε σχέση με τα υπόλοιπα. Για την διάνοιξη των γεωτρήσεων και την λειτουργία του συστήματος απαιτείται έκδοση άδειας σε πολλές χώρες. Όμως, είναι πιο αποδοτικά από τα οριζόντια συστήματα.



Σχήμα 2.23 : Τρυπάνι διάνοιξης γεώτρησης [50]

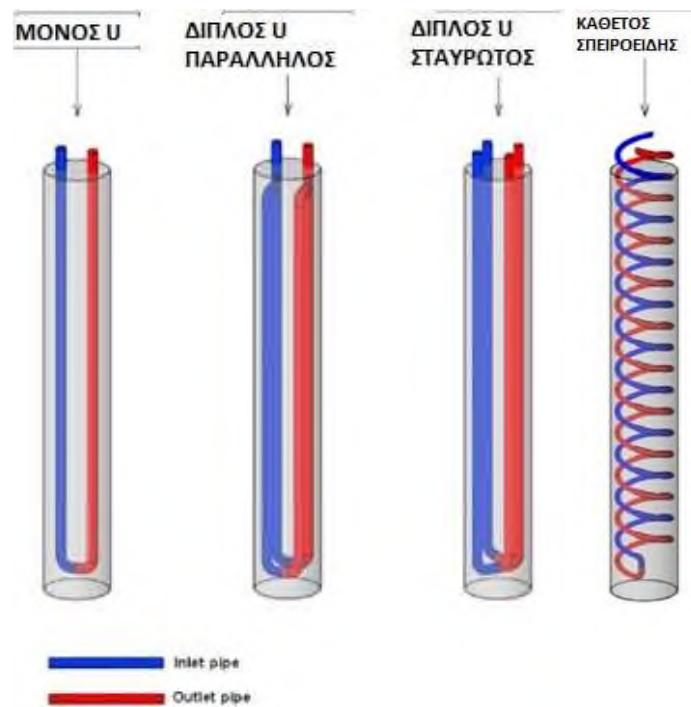


Σχήμα 2.24: Κλειστό, κατακόρυφο σύστημα Γ.Α.Θ. [51]

Η διάταξή τους μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες γεωμετρίες. Η πιο συχνή μορφή ενός τέτοιου εναλλάκτη είναι ο αγωγός U, δηλαδή δύο σωλήνες που ενώνονται στο κάτω μέρος τους με θερμοκόλληση σε στροφή 180°, επιτρέποντας την κυκλοφορία του νερού από και προς την αντλία. Εντούτοις, ο μονός αγωγός δύναται να μην ικανοποιεί τις θερμικές απαιτήσεις του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλοί αυλοί U (συνήθως δύο αλλά και περισσότεροι) στην ίδια γεώτρηση ώστε να αυξηθεί το θερμικό φορτίο που αποσπάται και επομένως η απόδοση του συστήματος. Οι σπειροειδείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αυτοί στο κατακόρυφο μοντέλο σχηματίζοντας έναν ελικοειδή εναλλάκτη (βλέπε Σχήμα 2.25 και Σχήμα 2.26). Οι διπλοί αγωγοί τύπου U είναι ο πιο συνηθισμένη εγκατάσταση στην Ευρώπη και απαιτούν μικρότερο βάθος κατά 12-25% [36,5]. Ωστόσο, εάν η συγκόλληση στο κάτω μέρος είναι ατελής υπάρχει αυξημένος κίνδυνος διαρροής του μείγματος και μόλυνση των υπόγειων νερών.

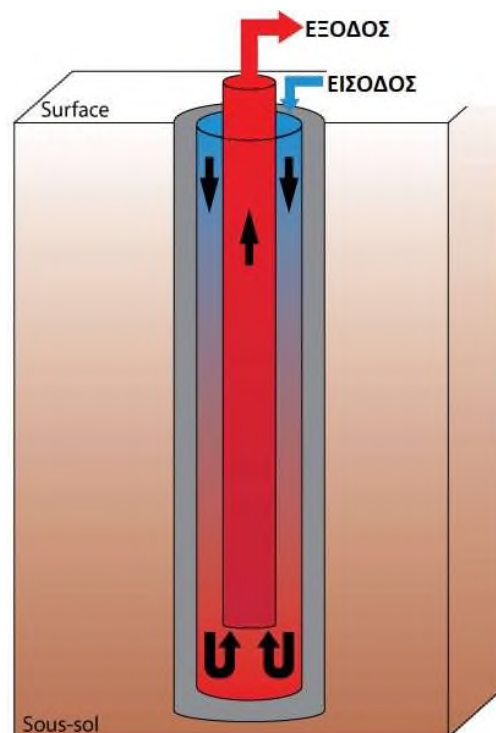


Σχήμα 2.25: Γεωεναλλάκτες τύπου μονού U (αριστερά) και διπλού U (δεξιά) [5]



Σχήμα 2.26: Κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες τύπου U και σπειροειδής [52]

Μία άλλη γεωμετρία εγκατάστασης των γεωεναλλακτών είναι αυτή των ομοαξονικών αυλών. Δύο αυλοί με διαφορετικές διαμέτρους βυθίζονται στο έδαφος όπου η μεγαλύτερη διάμετρος εισαγάγει το ρεύμα από την αντλία και η μικρότερη το απομακρύνει κατά την επιστροφή του όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.27.



Σχήμα 2.27: Ομοαξονικός αυλός κατακόρυφου γεωεναλλάκτη [53]

Εξετάζονται και άλλες δυνατές γεωμετρίες όπως ο ενεργειακός πάσσαλος και ο κώνος σε βάθη 5-45 m και 1-5 m αντίστοιχα όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.28 και 2.29 [5].



Σχήμα 2.28: Γεωεναλλάκτης κώνου [5]



Σχήμα 2.29: Ενεργειακοί πάσσαλοι [5]

Όσον αφορά τα πληρωτικά υλικά, από την μία πλευρά γεμίζουν τον κενό χώρο μεταξύ εναλλάκτη και γεώτρησης προστατεύοντας τον πρώτο και από την άλλη ελαχιστοποιούν τις απώλειες θερμότητας που συμβαίνουν σε αυτόν τον χώρο και στα τοιχώματα των αγωγών όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30. Τα πιο συμβατικά από αυτά τα υλικά είναι ενέματα με βάση το τσιμέντο ή τον μπετονίτη στα οποία προστίθενται άλλα υλικά ώστε να αυξηθεί η θερμική αγωγιμότητά τους και η αντοχή τους. Κάποια αποτελεσματικά προσθετικά είναι ο γραφίτης, το νερό και η χαλαζιακή άμμος [11].



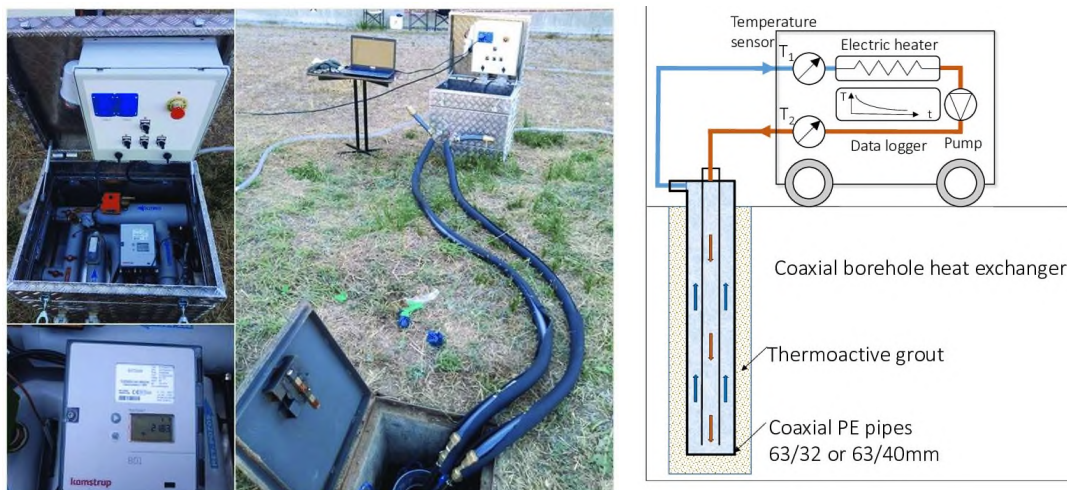
Σχήμα 2.30: Γεωτρήσεις με προσθήκη ενέματος [5,54]

Η πλήρωση με μπετονίτη παρουσιάζει το πλεονέκτημα της χαμηλής του διαπερατότητας που εμποδίζει ρευστά να φτάσουν στον εναλλάκτη [55] αλλά είναι δύσκολο να αναμιχθεί. Από την άλλη, η δημιουργία πάγου σε μείγματα μπετονίτη

με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό υπό χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αυξήσει την πίεση στους αγωγούς δημιουργώντας ρήγματα [11]. Τα ενέματα με βάση το τσιμέντο αναμειγνύονται ευκολότερα και είναι πιο ευέλικτα όσον αφορά την μεταβολή των ιδιοτήτων τους με προσθετικά, όμως χρειάζονται μεγάλο χρονικό διάστημα για να σκληρύνουν [11]. Προκειμένου να ενισχυθούν η μεταφορά θερμότητας και η αντοχή προστίθενται τα υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω μαζί με το τσιμέντο σε διάφορες αναλογίες και δόσεις. Για παράδειγμα, ισομερής κατανομή του μείγματος σε τσιμέντο, χαλαζιακή άμμο, μπεντονίτη και νερό [11].

Για συστήματα με μικρή θερμική ισχύ μικρότερη των 30 kW, ο σχεδιασμός τους μπορεί να γίνει κάνοντας εκτιμήσεις των απαραίτητων δεδομένων και άλλες παραδοχές. Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους μπορούν να εκτιμηθούν από γεωλογικούς χάρτες αντί μετρήσεων. Ακόμη, ο οδηγός VDI παρέχει χρήσιμες ειδικές τιμές άντλησης θερμότητας για διάφορους τύπους εδάφους και ώρες λειτουργίας στις οποίες μπορεί να βασιστεί ο σχεδιασμός (βλέπε Παράρτημα). Η προσέγγιση VDI ισχύει μόνο για μήκος εναλλάκτη 40-100 m με ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων 5 m για μήκος 40-50 m και 6 m για μήκος 50–100 m, άντληση θερμότητας, διπλούς σωλήνες τύπου U ή ομοαξονικό σύστημα με διάμετρο άνω των 60 mm [48].

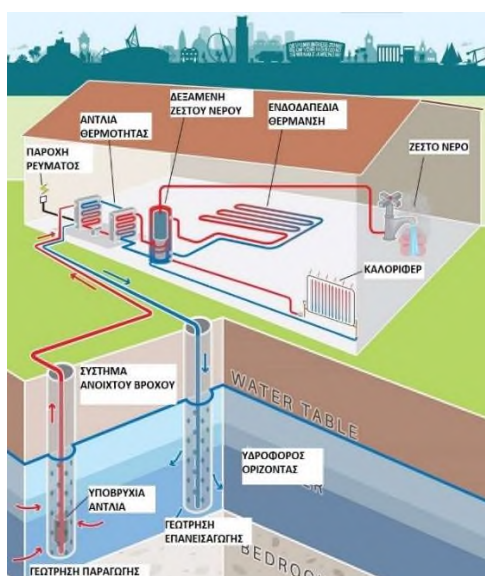
Για μεγαλύτερα συστήματα με υψηλότερη ισχύ και ώρες λειτουργίας απαιτούνται πιο ακριβείς μέθοδοι για τον σχεδιασμό του συστήματος. Μία τέτοια μέθοδος είναι η Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης (Thermal Response Test). Με αυτήν την δοκιμή, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους όπως η θερμική αγωγιμότητα, αλλά και για τα στοιχεία σχεδιασμού όπως των αριθμό και το μήκος των βρόχων και την θερμική αντίσταση της γεώτρησης. Μέσα σε αυτήν κυκλοφορεί το υγρό μείγμα μέσω μίας αντλίας κυκλοφορίας η οποία το θερμαίνει μέσω ηλεκτρικού θερμαντήρα και παράλληλα λαμβάνονται μετρήσεις των θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.31. Κατά την διάρκεια της δοκιμής η παροχή του μείγματος και η παροχή θερμότητας διατηρούνται σταθερές. Η ελάχιστη διάρκεια της δοκιμής είναι 50 ώρες [35,21].



Σχήμα 2.31: Δοκιμή Θερμικής Απόκρισης [56,57]

Συστήματα ανοιχτού βρόχου

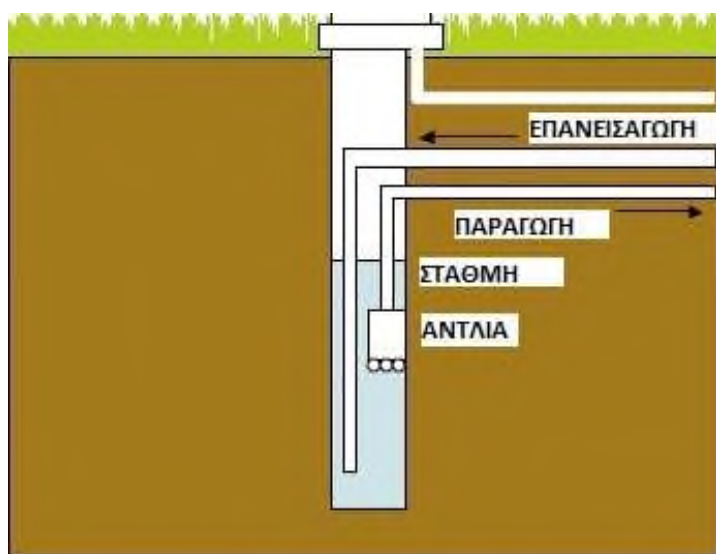
Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου συλλέγουν ή/και απορρίπτουν θερμότητα από/σε επιφανειακούς ή υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες όπως λίμνες, ποτάμια, θάλασσες, γεωτρήσεις και υπόγειοι υδροφορείς όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.32. Στον ταμιευτήρα άντλησης του νερού τοποθετείται μία υποβρύχια αντλία η οποία μεταφέρει το νερό από την πηγή του στον εναλλάκτη (συνήθως πλακών [5]) μέσω αγωγών και στην συνέχεια θα κατευθυνθεί προς στον αρχικό ταμιευτήρα ή σε κάποιον άλλον ορίζοντα με τον ίδιο τρόπο. Για την διαφύλαξη της ισορροπίας του περιβάλλοντος είναι προτιμότερη η εναπόθεση του στην ίδια πηγή με αυτήν της άντλησης αλλά σε συστήματα μικρής ισχύος μπορεί να γίνει και σε άλλους υδροφορείς [11].



Σχήμα 2.32: Σύστημα Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου [58]

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να διαταχθεί το σύστημα της άντλησης. Ο πιο συνηθισμένος είναι αυτός των δύο γεωτρήσεων - μία για την άντληση (γεώτρηση παραγωγής) και μία για την επιστροφή (γεώτρηση επανεισαγωγής, επανέγχυσης ή επαναφόρτισης) η οποία θα πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 10-15 m κατάντη της ροής [48]. Συνήθως οι οικιακές γεωτρήσεις έχουν διάμετρο 10-13 cm [59]. Η διαθεσιμότητα του ορίζοντα πρέπει να διατίθεται σε χαμηλό βάθος (έως 150 m) για διευκόλυνση της άντλησης. Σε αυτά τα βάθη τα υπόγεια ύδατα βρίσκονται σε θερμοκρασίες περίπου 5-20 °C [5]. Αν χρησιμοποιηθεί επιφανειακό νερό όπως θαλάσσης ή λίμνης, τότε δεν χρειάζεται γεώτρηση και το κόστος της εγκατάστασης μειώνεται. Κατά την διεργασία μεταφοράς θερμότητας η μεταβολή της θερμοκρασίας του δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τους 6 K [48] και η ελάχιστη θερμοκρασία στον εξατμιστή να είναι 8 °C [49].

Το σύστημα της «όρθιας στήλης» (Σχήμα 2.33) χρησιμοποιεί μοναδική γεώτρηση στην οποία συνυπάρχουν η αντλία του νερού και ο σωλήνας επανεισαγωγής, σε περιοχές που στεγάζουν σκληρά πετρώματα στο υπέδαφός τους και η διάθεση του ρευστού δεν επαρκεί [11]. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται μεγάλο βάθος εκατοντάδων μέτρων (300-450 m) ώστε να παραχθεί αρκετή ισχύς χωρίς να παγώσει το νερό. Επομένως το κόστος του είναι υψηλό και δεν προορίζεται για μικρές εγκαταστάσεις.



Σχήμα 2.33: Γεώτρηση όρθιας στήλης [60]

Η αξιολόγηση του υδροφόρου ορίζοντα για την ικανότητα κάλυψης των αναγκών του κτιρίου αλλά και η ανάλυση της ποιότητάς του είναι πολύ σημαντική. Δύο από τα πιο σημαντικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά ενός σχηματισμού είναι το πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα. Το πορώδες εκφράζεται σε ποσοστό ως ο λόγος των κενού χώρου προς τον συνολικό όγκο και το ενεργό πορώδες είναι το ποσοστό των κενών που συνδέονται και επιτρέπουν την κίνηση του νερού μέσα στον υδροφορέα. Κάθε γεωλογικός σχηματισμός παρουσιάζει διαφορετικό πορώδες όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3 [12].

Πίνακας 2.3: Πορώδες γεωλογικών σχηματισμών [61]

Έδαφος	Πορώδες [%]
<i>Πετρώματα</i>	
Αμμόλιθος	5-30
Ασβεστόλιθος	0-20
Καρστικός Ασβεστόλιθος	5-50
Σχιστόλιθος	0-10
Βασάλτης	5-50
Κρυσταλλικό πέτρωμα	0-5
<i>Μη συνεκτικά πετρώματα</i>	
Χαλίκια	25-40
Άμμος	25-50
Πηλός	40-70
Ιλύς	35-50

«Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει την ευκολία ή δυσκολία με την οποία κινείται το νερό μέσα στους διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς» [11]. Αυτοί οι σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται με τους τρόπους που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

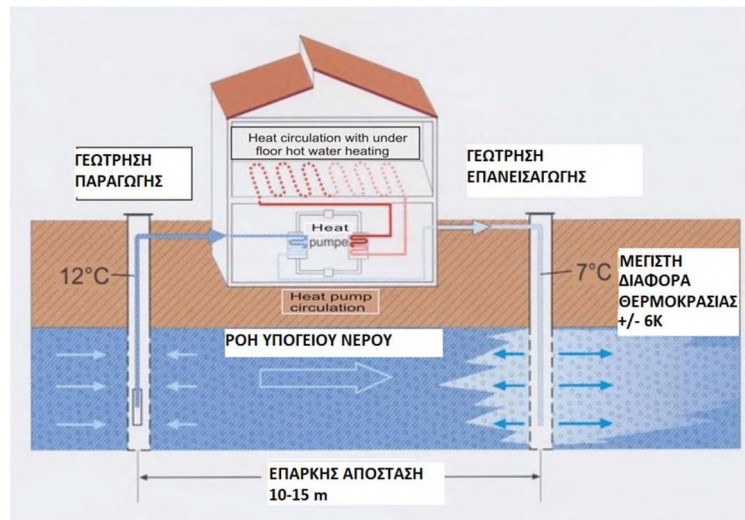
Πίνακας 2.4: Κατηγορίες υδραυλικής αγωγιμότητας [11]

Κατηγορία	Συντελεστής Αναλογίας K [m/s]
Πολύ υδροπερατοί	$> 10^{-1}$
Υδροπερατοί	$10^{-6} < K < 10^{-1}$
Λίγο υδροπερατοί	$10^{-9} < K < 10^{-6}$
Πρακτικά στεγανοί	$< 10^{-9}$

Φυσικά προτιμώνται υδροφορείς με υψηλό πορώδες και αγωγιμότητα υπεδάφους (τουλάχιστον της τάξης των 10^{-3} m/s [5]) ώστε να ευνοηθεί η συγκέντρωση και η παραγωγή του σώματος του νερού, το οποίο θα μπορέσει να αποθηκευτεί στο υπέδαφος. Συνεπώς η άντληση του νερού θα είναι αξιόπιστη και δεν θα διαταράξει τον σχηματισμό διαφορετικά αν το νερό δεν μπορεί να αναπληρωθεί με φυσική υπεδαφική ροή θα υπάρξει κίνδυνος στέρεψης και αχρήστευσης του υδροφορέα. Γενικά απαιτούνται παροχές $0,25 \text{ m}^3/(\text{hr} \cdot \text{kW})$ οι οποίες θα πρέπει να παραμένουν σταθερές [48].

Προκειμένου να γνωστοποιηθεί η απόδοση υποψήφιων γεωτρήσεων πρέπει να γίνουν δοκιμές, οι οποίες επίσης θα υποδείξουν το μέγεθος και των αριθμό τους σύμφωνα και με την μελέτη για τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου. Αυτές περιλαμβάνουν διαδοχικές αντλήσεις νερού για διάστημα που μπορεί να διαρκέσει από ώρες ως και εβδομάδες. Αν υπάρχει και άλλη κοντινή γεώτρηση σε λειτουργία μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση της νέας.

Ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου που πληροί τις απαραίτητες προϋποθέσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.34.



Σχήμα 2.34: Σύστημα Γ.Α.Θ. ανοικτού βρόχου [62]

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ανοικτού βρόχου δικαιολογούν την επιλογή του σε περιοχές που διαθέτουν τις κατάλληλες προδιαγραφές. Για παράδειγμα, η τεχνολογία της γεώτρησης για άντληση του νερού είναι ήδη καθιερωμένη. Επίσης, το νερό κάθε γεώτρησης ανοικτού βρόχου αποδίδει μεγαλύτερη θερμική χωρητικότητα από μία κλειστού βρόχου. Η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων διακυμαίνεται πολύ λιγότερο από αυτή του αέρα περιβάλλοντος, άρα τα συστήματα ανοικτού κυκλώματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα στην απόδοσή της κατά την διάρκεια του έτους από μία αντλία αέρα/αέρα ή αέρα/νερού [5]. Από την άλλη πλευρά, το νερό μιας περιοχής μπορεί να δημιουργήσει λειτουργικά προβλήματα στην πορεία λόγω της χαμηλής ποιότητάς του. Ακόμη, η χημική σύσταση του νερού προκαλεί συχνά προβλήματα σε πολλές εγκαταστάσεις λόγω των φαινομένων καθαλάτωσης και διάβρωσης τα οποία εξετάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Λόγω του βουλώματος και των επικαθήσεων, η συντήρηση των γεωτρήσεων είναι πολυπλοκότερη και ακριβότερη από τα άλλα συστήματα. Η χρόνια χρήση του νερού θα μπορούσε επίσης να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά του αλλά και την παραγωγή της γεώτρησης, κάτι που δεν συναντάται στα κλειστά συστήματα [11]. Επιπροσθέτως, σε πολλές χώρες απαιτείται έκδοση άδειας για την διάνοιξη των γεωτρήσεων και την χρήση του νερού, το κόστος των οποίων μπορεί να αυξηθεί στις περιπτώσεις που το νερό βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη.

3. Νομοθεσία για τις Γ.Α.Θ.

3.1 Ελληνικές νομοθεσίες γεωθερμίας

3.1.1 Νόμος υπ' αριθ. 4602

Στις 9/3/2019 [63] δημοσιεύεται στην εφημερίδα της κυβερνήσεως ο νόμος υπ' αριθ. 4602 με τίτλο: *«Έρευνα, εκμετάλλευση και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού της Χώρας, σύσταση Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, ιδιοκτησιακός διαχωρισμός δικτύων διανομής φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις»*. Βασικό κίνητρο του είναι η έναρξη της ορθής «έρευνας, εκμετάλλευσης και διαχείρισης» του γεωθερμικού δυναμικού της Ελλάδας καθώς και η σύσταση της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (πρώην Ι.Γ.Μ.Ε.). Με την δημοσίευση αυτή, καταργούνται τα άρθρα 1-13 του μέχρι πρότινος ισχύοντος νόμου 3175/2003 (Α' 207). Η νομοθέτηση αυτή σηματοδοτεί μία προσπάθεια εγκαθίδρυσης των απαραίτητων προϋποθέσεων με στόχο την «βιώσιμη ανάπτυξη και εξυπηρέτηση του γενικού συμφέροντος» μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο άρθρο 3 της δημοσίευσης, παρατίθενται οι απαραίτητοι ορισμοί για την οριοθέτηση και κατανόηση του νομικού πλαισίου. Συγκεκριμένα ορίζονται τα παρακάτω:

- I. *«Γεωθερμικό δυναμικό (ΓΘΔ): είναι το σύνολο των γηγενών φυσικών θερμών ρευστών, των θερμών νερών επιφανειακών ή υπογείων, και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που η θερμοκρασία τους υπερβαίνει τους 30°C»*. Το δυναμικό αυτό θεωρείται μεταλλευτικό ορυκτό.
- II. *«Γεωθερμικό πεδίο: είναι ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος μέσα στον οποίο έχει εντοπιστεί γεωθερμικό δυναμικό»*.
- III. *«Περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος (ΠΓΘΕ): είναι ο ευρύτερος χώρος μέσα στον οποίο υπάρχουν ενδείξεις παρουσίας γεωθερμικού δυναμικού θερμοκρασίας έως 90°C»*.
- IV. *«Προϊόν του γεωθερμικού δυναμικού: θεωρείται το αξιοποιήσιμο θερμοενεργειακό του περιεχόμενο»*.

- V. «Παραπροϊόντα του γεωθερμικού δυναμικού: θεωρούνται άλλα προϊόντα που συμπαράγονται κατά την εκμετάλλευση εκτός από το θερμοενεργειακό περιεχόμενο του γεωθερμικού δυναμικού».
- VI. «Υποπροϊόν του γεωθερμικού δυναμικού: θεωρείται το γεωθερμικό ρευστό που απομένει, ύστερα από την απόληψη των κατά τα ανωτέρω προϊόντων και παραπροϊόντων».
- VII. «Εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού: αποτελεί το σύνολο των δραστηριοτήτων που αποσκοπούν στην παραγωγική (άντληση) απόληψη του προϊόντος και παραπροϊόντων και την ασφαλή διάθεση του υποπροϊόντος».
- VIII. «Διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού: αποτελεί το σύνολο των δραστηριοτήτων που ρυθμίζουν την εκμετάλλευση του γεωθερμικού ρευστού από τα υπόγεια γεωθερμικά συστήματα, με σκοπό τη βιώσιμη – ορθολογική και ολοκληρωμένη αξιοποίησή του. Η διαχείριση αναφέρεται στο σύνολο του γεωθερμικού πεδίου».
- IX. «Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται ως τοπικού και εθνικού ενδιαφέροντος. Στα τοπικού ενδιαφέροντος η θερμοκρασία του προϊόντος κυμαίνεται από 30°C έως και 90°C. Στα εθνικού ενδιαφέροντος η θερμοκρασία του προϊόντος υπερβαίνει τους 90°C».
- X. «Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας, που δημοσιεύεται στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά προκειμένου μια περιοχή να χαρακτηριστεί ως γεωθερμικό πεδίο ή ως περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος».
- XI. «Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ύστερα από γνώμη της Ε.Α.Γ.Μ.Ε., γίνεται ο χαρακτηρισμός κάθε γεωθερμικού πεδίου και η υπαγωγή του σε κατηγορία τοπικού ή εθνικού ενδιαφέροντος, σύμφωνα με τα εκάστοτε διαθέσιμα στοιχεία».

Σε περίπτωση αξιοποίησης γεωθερμικού δυναμικού μέσω γεωτρήσεων χωρίς δικαίωμα, το άρθρο 12 ορίζει τις ακόλουθες ποινές: φυλάκιση έως 3 μήνες και πρόστιμο από 1 000 έως 10 000 €.

Το άρθρο 13 αφιερώνει δύο σύντομες παραγράφους στα ενεργειακά συστήματα θέρμανσης και ψύξης που δεν εκμεταλλεύονται γεωθερμικό δυναμικό,

αναφέροντας πως η εγκατάσταση τους «επιτρέπεται ύστερα από άδεια που χορηγείται στον κύριο του ακινήτου από τις Διευθύνσεις Ανάπτυξης της οικείας Περιφέρειας», ενώ το υπουργείο περιβάλλοντος αποφασίζει τις ειδικότερες υποχρεώσεις για την έκδοση της απαραίτητης άδειας και την υποβολή των δικαιολογητικών.

Στη συνέχεια, στο άρθρο 14 θεσπίζεται η δυνατότητα κινήτρων (όπως επιδοτήσεις ή εντάξεις σε αναπτυξιακά προγράμματα) που αφορούν και τα προαναφερθέντα συστήματα θέρμανσης/ψύξης.

Τέλος, στο άρθρο 15, αναφέρεται η υποχρέωση καταβολής παράβολου για την έκδοση αδειών, μέρος του οποίου μπορεί να καταναλωθεί προς κάλυψη αναγκών για την εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού.

3.1.2 Απόφαση αριθμ. Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488

Για την εγκατάσταση αντλιών θερμότητας που αποτελούν το ενδιαφέρον αυτής της εργασίας, ακολουθείται η υπουργική απόφαση αριθμ. Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488 [64] με τίτλο: «Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης – ψύξης χώρων μέσω εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό». Στόχος της απόφασης είναι η συγκεκριμενοποίηση των απαραίτητων διαδικασιών, δικαιολογητικών και περιορισμών που απαιτούνται για την διαχείριση και εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας που δύναται να προσφέρει ένα ακίνητο από τον ιδιοκτήτη του. Το δικαίωμα του ιδιώτη στα άνωθεν πιστοποιεί η έκδοση άδειας.

Περιοριστικοί όροι

Για την διάνοιξη γεωτρήσεων που θα εξυπηρετούν τις εγκαταστάσεις τίθενται οι παρακάτω περιορισμοί για την οριοθέτηση τους εντός του ακινήτου, την ορθή επιστημονική διαδικασία και την προστασία του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, υποχρεούνται να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον:

- «Δύο μέτρων από τα όρια της ιδιοκτησίας».
- «Πέντε μέτρα από υφιστάμενο γειτονικό κτίσμα διαφορετικής ιδιοκτησίας».

Ενδεχόμενη μείωση της απόστασης σε εγκατάσταση εντός σχεδίου πόλης.

- «Πέντε μέτρων από το όριο της απαλλοτριωμένης ζώνης σιδηροδρομικής γραμμής».
- «Δέκα μέτρων από κεντρικό αγωγό μεταφοράς φυσικού αερίου».
- «Πέντε μέτρων από κεντρικούς υπόγειους αγωγούς (ύδρευσης, άρδευσης, αποχέτευσης)». Ενδεχόμενη μείωση της απόστασης σε εγκατάσταση εντός σχεδίου πόλης.
- «Δέκα μέτρων από γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσεως, εκτός αν ανάμεσα στη γραμμή και τη γεώτρηση μεσολαβεί κτίσμα».
- «Πέντε μέτρων από γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης, εκτός αν ανάμεσα στη γραμμή και τη γεώτρηση μεσολαβεί κτίσμα». Ενδεχόμενη μείωση της απόστασης σε εγκατάσταση εντός σχεδίου πόλης.

Συμπληρωματικοί περιοριστικοί όροι είναι οι εξής:

- Σε κάθε σημείο της διαδικασίας «οφείλουν να λαμβάνονται από τον μελετητή και επιβλέποντα των έργων όλα τα απαραίτητα μέτρα σύμφωνα με τους κανόνες της επιστήμης και της τέχνης για την αποφυγή ατυχημάτων και την προστασία των περίοικων και του περιβάλλοντος».
- «Σε κάθε γεώτρηση να γίνεται τσιμέντωση τουλάχιστον για τα 5 ανώτερα μέτρα και τοποθέτηση στο ίδιο μήκος περιφραγματικής χαλύβδινης σωλήνωσης».
- «Σε περίπτωση όπου στην περιοχή του ακινήτου απαγορεύεται η διάνοιξη υδρογεωτρήσεων, επιτρέπεται η εγκατάσταση και λειτουργία εναλλακτών κλειστού κυκλώματος.
- «Σε περίπτωση εκμετάλλευσης θερμότητας με τη χρήση επιφανειακών ή υπόγειων νερών, ο χρήστης υποχρεούται στην επαναφορά του συνόλου των χρησιμοποιηθέντων νερών και στην ίδια ποιότητα, στον αρχικό αποδέκτη».
- «Οι αντλίες και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι πιστοποιημένα από αναγνωρισμένο φορέα».

Απαιτούμενα δικαιολογητικά

Για την έκδοση της προαναφερθείσας άδειας απαιτείται η προσκόμιση των παρακάτω δικαιολογητικών:

- Αίτηση-Μελέτη που κατατίθεται στην αρμόδια Περιφέρεια υπογεγραμμένη από τον ενδιαφερόμενο και τους εκπονητές της μελέτης. Η μελέτη πρέπει να περιλαμβάνει υποχρεωτικά τα παρακάτω στοιχεία:
1. «Στοιχεία ενδιαφερόμενου: Ονομασία, έδρα, ΑΦΜ, ταχυδρομική διεύθυνση, αρ. τηλεφώνου, αριθμός ταυτότητας ή διαβατηρίου και εκδούσα αρχή».
 2. «Στοιχεία ακινήτου: Νομός, Δήμος ή Κοινότητα, Ταχυδρομική διεύθυνση, Αστυνομικό Τμήμα».
 3. «Περιγραφή του χώρου και της ευρύτερης περιοχής, σε ακτίνα 100 μέτρων, αν στην περιοχή του ακινήτου υπάρχουν ιδίως κεντρικοί αγωγοί φυσικού αερίου, ύδρευσης, άρδευσης γραμμές μέσης και υψηλής τάσης, απαλλοτριωμένη ζώνη σιδηροδρομικής γραμμής».
 4. «Δρόμοι προσπέλασης και αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας εισκόμισης και αποκόμισης του διατρητικού και άλλου εξοπλισμού. Διαδικασίες και μέτρα αντιμετώπισης όλων των ενδεχόμενων επιπλοκών από τη λειτουργία τους στο χώρο της οικοδομής».
 5. «Περιγραφή των προς κλιματισμό χώρων. Μέγιστες και ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις».
 6. «Καθορισμός και περιγραφή των τυχόν απαιτούμενων γεωτρήσεων (θέση, αριθμός, βάθη, σχεδιαγράμματα κλίμακας ανάλογης, με κατόψεις και τομές)».
 7. «Ποσότητες αντλούμενων ρευστών και προκειμένου για ανοιχτό κύκλωμα θερμοκρασία άντλησης και επανεισαγωγής».
 8. «Αναλυτικό διάγραμμα ροής, που συνοδεύεται από ειδική μελέτη υπολογισμού των ποσοτήτων και ποιοτήτων των διακινούμενων ρευστών σε κάθε φάση, καθώς και των αντίστοιχων ενεργειακών καταναλώσεων».
 9. «Αναλυτική περιγραφή του ηλεκτρικού και μηχανικού εξοπλισμού του συστήματος (τύπος, ισχύς και προορισμός κάθε μηχανήματος), που συνοδεύεται από κάτοψη και τομές ανάλογης με το μέγεθος του συστήματος, κλίμακας».
 10. «Στατική μελέτη για τις βάσεις έδρασης των μηχανημάτων εφόσον απαιτείται και εφόσον η εγκατάσταση των μηχανημάτων δεν περιλαμβάνεται στην στατική μελέτη της οικοδομής γεγονός που θα πιστοποιείται με υπεύθυνη δήλωση του Μηχανικού».

11. «Στην περίπτωση συστημάτων κλειστού κυκλώματος ιδιαίτερη αναφορά στη ακριβή σύσταση των ρευστών που κυκλοφορούν στο υπεδάφιο σύστημα, από την οποία τεκμαίρεται η ασφαλής χρήση τους, καθώς και αναφορά στους τρόπους διάγνωσης διαρροών και στην πρόνοια αντιμετώπισης και αποκατάστασής τους, χωρίς την ανάγκη ολικής αχρήστευσης του συστήματος».
12. «Μέτρα για το μεγαλύτερο δυνατό περιορισμό των οχλήσεων των περίοικων, μέτρα για την υγιεινή των εργαζόμενων και την ασφάλεια εργασιών-εργαζόμενων και του περιβάλλοντος».
- «Επικυρωμένο φωτοαντίγραφο τίτλου κυριότητας ή επικαρπίας επί του ακινήτου ή φωτοαντίγραφο της οριστικής βεβαίωσης εγγραφής στο κτηματολόγιο καθώς και σύμβαση εργολαβικής ανάθεσης, σε περίπτωση που η αίτηση υποβάλλεται από τον εργολάβο ή σύμβασης Χρηματοδότησης από Τρίτους σε περίπτωση που η αίτηση υποβάλλεται από τρίτο χρηματοδότη».
 - «Επικυρωμένο φωτοαντίγραφο οικοδομικής άδειας ή άδειας νομιμοποίησης προκειμένου περί κοινού κτίσματος και των παρελκόμενων αυτού εγκαταστάσεων ή άδειας εγκατάστασης προκειμένου περί λυόμενης ή προκατασκευασμένης οικίας, ή γεωργικής, ή βιομηχανικής ή μεταλλευτικής – λατομικής εγκατάστασης, ή άδειας ανέγερσης ξενοδοχείου ή τουριστικής εγκατάστασης προκειμένου περί ξενοδοχείου ή τουριστικής εγκατάστασης, εφ' όσον απαιτείται σχετική άδεια από την κείμενη νομοθεσία».
 - «Φωτοαντίγραφο του επικυρωμένου τοπογραφικού της αδείας της προηγούμενης παραγράφου επί του οποίου ο μηχανικός του έργου σημειώνει ενυπόγραφα την θέση των γεωτρήσεων που πρόκειται να ανορυχθούν καθώς και όλων των υπόγειων και επιφανειακών έργων που θα κατασκευαστούν στο πλαίσιο της εγκατάστασης του συστήματος Θ/Ψ. Επίσης βεβαιώνει ότι πληρούνται οι περιοριστικοί όροι και επισυνάπτει αναλυτικό πίνακα όπου αναγράφονται όλες οι γεωγραφικές συντεταγμένες των ανωτέρω διατάξεων (αναφερόμενες σε σύστημα ΕΓΣΑ '87 ή WGS84), καθώς και τα υψόμετρα. Σε περίπτωση μη ύπαρξης ελεγμένου και επικυρωμένου τοπογραφικού σχεδιαγράμματος, υποβάλλεται νέο τοπογραφικό διάγραμμα αρμοδίως υπογεγραμμένο, κλίμακας 1:500 ή μεγαλύτερης».

- «Μελέτη πυροπροστασίας εγκεκριμένη από την κατά τόπο αρμόδια Πυροσβεστική Υπηρεσία, εφόσον απαιτείται από την κείμενη νομοθεσία.»
- «Παράβολο που προβλέπεται για την περίπτωση από την κοινή απόφαση των Υφυπουργών Οικονομίας και Οικονομικών και Ανάπτυξης αριθμ. Δ7/Β/οικ.13803/ ΓΔΦΠ/ 4213/4.8.2004 (ΦΕΚ 1228 Β) όπως αυτή κάθε φορά ισχύει».
- «Αποδείξεις κατάθεσης των δικαιωμάτων Ταμείων και των αμοιβών μελετητών, σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία».
- «Αναγραφή των στοιχείων πιστοποίησης των αντλιών και συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην αίτηση – μελέτη ή υποβολή φωτοαντιγράφων των πιστοποιητικών».
- «Εφόσον το ακίνητο βρίσκεται σε παραλία ή τα δίκτυα του συστήματος εκτείνονται επί της παραλίας ή του αιγιαλού άδεια ή έγκριση που απαιτείται από τις διατάξεις του ν. 2971/2001 (ΦΕΚ285 Α'), όπως κάθε φορά ισχύει».
- «Σε περίπτωση ανάλωσης ποσότητας νερού (δηλ. μη επαναφοράς του συνόλου των χρησιμοποιηθέντων νερών στον αρχικό αποδέκτη) οι απαιτούμενες από τις διατάξεις του άρθρου 11 σε συνδυασμό με το άρθρο 16 του ν. 3199/2003 (ΦΕΚ Α' 280), άδειες».
- «Υπεύθυνη δήλωση του ν. 1599/1986, όπου θα βεβαιώνεται η ανάθεση και ανάληψη της επίβλεψης κατασκευής της εγκατάστασης, από τους έχοντες κατά νόμο σχετικές άδειες (Διπλωματούχους ή Πτυχιούχους ή Τεχνικούς επιστήμονες). Ειδικότερα για τους χειριστές των διατρητικών μηχανημάτων η υπεύθυνη δήλωση του επιβλέποντος μηχανικού θα βεβαιώνει ότι έχουν παρακολουθήσει εκπαιδευτικά προγράμματα σχετικά με τεχνικές διάτρησης, σωλήνωσης κ.λπ. ή/και έχουν σχετική εμπειρία τουλάχιστον ενός έτους στο αντικείμενο. Επίσης θα βεβαιώνεται σε αυτή η ακρίβεια των υποβαλλομένων στοιχείων της αίτησης – μελέτης».

Διαδικασία έκδοσης άδειας

Κατόπιν της υποβολής των παραπάνω δικαιολογητικών στην αρμόδια υπηρεσία της νομαρχιακής αυτοδιοίκησης γίνεται έλεγχος διαπίστωσης της εγκυρότητας τους. Ακόμη, βεβαιώνεται η παρουσία της ιδιοκτησίας εντός του γεωθερμικού πεδίου που

σύμφωνα με τους ορισμούς που δόθηκαν από τον νόμο υπ' αριθ. 4602, δεν προβλέπεται να περιέχει γεωθερμικό δυναμικό. Σε αυτήν την διαδικασία, ο Ε.Α.Γ.Μ.Ε. συμπράττει με τον Υπουργό Ανάπτυξης ή τον Γενικό Γραμματέα Περιφέρειας γνωμοδοτώντας περί του «μέγιστου βάθους μέχρι το οποίο είναι επιτρεπτή η άντληση ρευστών ή γενικότερα η εκμετάλλευση της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, καθώς και άλλοι ενδεχόμενοι περιορισμοί ή απαγορευτικοί όροι εγκατάστασης για την προστασία του γεωθερμικού δυναμικού και του περιβάλλοντος».

Εφόσον τηρούνται όλες οι προϋποθέσεις η αιτούμενη άδεια εκδίδεται. Διαφορετικά, η αρμόδια αρχή απορρίπτει την αίτηση.

Στην εκδιδόμενη απόφαση για την χορήγηση της άδειας οφείλονται να αναγράφονται τα εξής:

- «Τα στοιχεία του ιδιοκτήτη ή επικαρπωτή και τη θέση του ακινήτου».
- «Την ισχύ του συστήματος, το μέγιστο βάθος διατρήσεων και τις θέσεις των γεωτρήσεων»
- «Το χρόνο αποπεράτωσης των εργασιών εγκατάστασης του συστήματος».
- «Όρο ότι μετά την αποπεράτωση του συστήματος θα υποβληθεί γεωλογική τομή κλίμακας μέχρι 1:500 ή μεγαλύτερης, των γεωτρήσεων που ανορύχθηκαν καθώς και πλήρη στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους.».
- «Όρο ότι θα τοποθετηθούν υδρομετρητές και καταγραφικά θερμόμετρα στα στόμια των γεωτρήσεων».
- «Όρο ότι θα χρησιμοποιείται το προβλεπόμενο από την κείμενη νομοθεσία εργατοτεχνικό προσωπικό και το προσωπικό επίβλεψης και θα λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα για τον περιορισμό των οχλήσεων των περιοίκων καθώς και για την προστασία της υγείας και ασφάλειας των εργαζόμενων και του περιβάλλοντος».
- «Όρο ότι θα εφαρμοσθεί η εγκεκριμένη μελέτη και οι όροι της άδειας και της παρούσης αποφάσεως».
- «Όρο ότι η αρμόδια υπηρεσία της νομαρχίας έχει το δικαίωμα να ελέγχει σε τακτά χρονικά διαστήματα την όλη εγκατάσταση».

Τροποποίηση της άδειας

Σε κάποιες περιπτώσεις που οι συνθήκες της εγκατάστασης ή της λειτουργίας του συστήματος υποστούν αλλαγές οι οποίες επιφέρουν διαφοροποιήσεις από τα στοιχεία τα οποία δηλώνονται και πιστοποιούνται στην άδεια, τότε η αρμόδια αρχή (Περιφέρεια) μπορεί να τροποποιήσει το περιεχόμενό της ώστε να ανταποκρίνεται στις νέες παραμέτρους. Αυτές οι περιπτώσεις είναι οι εξής:

- «Σε περίπτωση που κατά την εγκατάσταση του συστήματος θέρμανσης/ψύξης διαπιστωθούν ανυπέρβλητα τεχνικά εμπόδια με τροποποίηση της αίτησης – μελέτης και υποβολή νέας μόνο ως προς τα σημεία που τροποποιείται η προηγούμενη».
- «Σε περίπτωση μεταβολής των θερμικών φορτίων προς το υπέδαφος λόγω μεταβολής των κλιματιζόμενων χώρων ή και του δυναμικού του εξοπλισμού, με υποβολή νέας αίτησης – μελέτης».
- «Σε περίπτωση μεταβολής της κυριότητας ή του επικαρπωτή του ακινήτου στο οποίο εγκαθίσταται το σύστημα θέρμανσης/ψύξης με υπεύθυνη δήλωση του νέου ιδιοκτήτη και φωτοαντίγραφο του τίτλου κυριότητας ή της πράξης μεταβίβασης της άσκησης της επικαρπίας ή της βεβαίωσης οριστικής εγγραφής στο κτηματολόγιο».

Ποινές και πρόστιμα

Σε περίπτωση μη τήρησης οποιωνδήποτε εκ των παραπάνω διατάξεων αποφασίζονται οι παρακάτω ποινές:

- «Σε περίπτωση κατά την οποία διαπιστωθεί κατόπιν ελέγχου ότι δεν εφαρμόζεται η εγκεκριμένη μελέτη, ή ότι έχουν παραβιαστεί όροι της άδειας ή ότι δεν έχει γίνει η προβλεπόμενη στο άρθρο 7 διαδικασία τροποποίησης, ο αρμόδιος νομάρχης επιβάλλει πρόστιμο ίσο με το τριπλάσιο του ύψους του παραβόλου της παραγράφου 6 του άρθρου 5 της παρούσης και ο ιδιοκτήτης ή επικαρπωτής καλείται να προβεί σε συμμόρφωση με την μελέτη ή την άδεια ή τη διαδικασία τροποποίησής της εντός τριμήνου».
- «Σε περίπτωση κατά την οποία διαπιστωθεί παράνομη εγκατάσταση συστήματος θέρμανσης/ψύξης χώρων επιβάλλεται από τον αρμόδιο νομάρχη

πρόστιμο στον κύριο ή τον επικαρπωτή ίσο με το τριπλάσιο του ύψους του παράβολου της παραγράφου 6 του άρθρου 5 της παρούσας και ο ιδιοκτήτης ή ο επικαρπωτής καλείται να προβεί σε έκδοση άδειας εντός τριμήνου».

- «Σε περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρξει συμμόρφωση με τις προαναφερόμενες σχετικές αποφάσεις του νομάρχη ή διαπιστωθεί ότι γίνεται παράνομη εκμετάλλευση γεωθερμικού δυναμικού ή υπάρξει υποτροπή επιβάλλεται από τον αρμόδιο νομάρχη πρόστιμο ίσο με το δεκαπλάσιο του ύψους του παράβολου της παραγράφου 6 του άρθρου 5, ενδεχόμενη εκδοθείσα άδεια ανακαλείται και η εγκατάσταση σφραγίζεται».

Ο νομάρχης, πριν επιβάλλει την ποινή, προσκαλεί τον αιτούντα/αδειούχο σε ακρόαση σχετικά με την εκάστοτε παράβαση εντός πέντε εργάσιμων ημερών.

3.2 Ευρωπαϊκές οδηγίες και πρωτοβουλίες

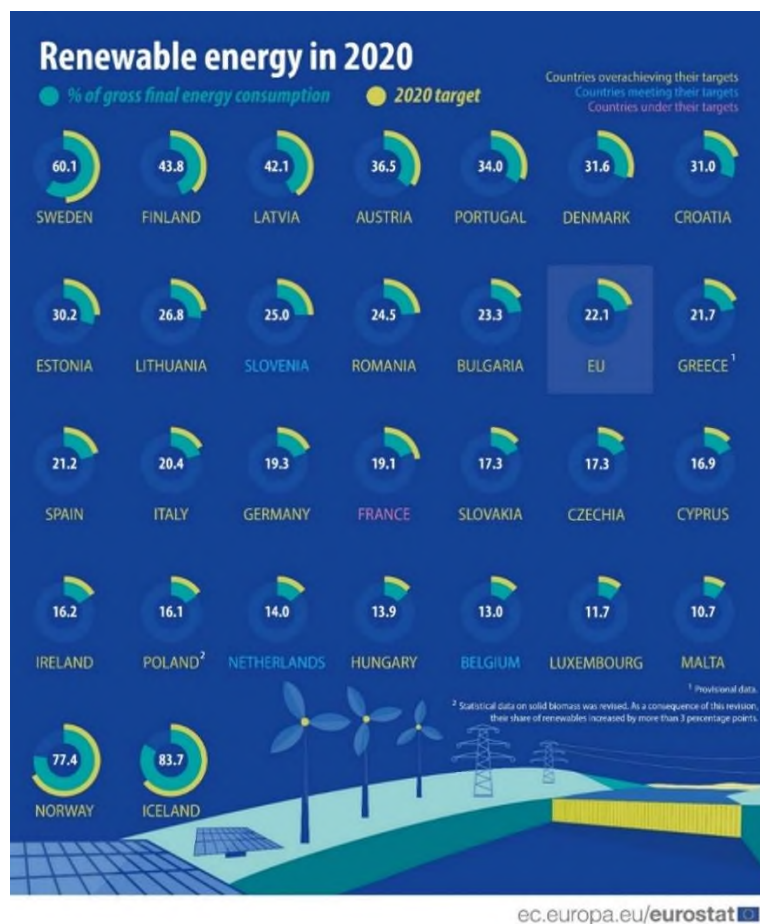
Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στον 21^ο αιώνα. Η στρατηγική που ακολουθεί έχει στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ανθρωπογενείς παράγοντες (πάνω από το 75% αυτών αφορούν το τομέα της ενέργειας) και την αυξανόμενη εκμετάλλευση αειφόρων πηγών ενέργειας [65].

Η οδηγία 2001/77/ΕΚ «για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας» ήταν μία από τις πρώτες προσπάθειες της Ε.Ε. να προωθήσει τις Α.Π.Ε. στο συνολικό ενεργειακό μείγμα [66]. Η συγκεκριμένη οδηγία ενθάρρυνε τα κράτη-μέλη να θέσουν κατάλληλους εθνικούς στόχους ώστε να επιτευχθεί ένας ευρύτερος σκοπός στην Ε.Ε.: η αύξηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενη από Α.Π.Ε. στο 22% της συνολικής ως το 2010. Τελικά, παρόλο που κάποιες χώρες είχαν καταφέρει να πραγματοποιήσουν τους δικούς τους στόχους, ο συνολικός στόχος δεν επιτεύχθηκε καθώς το 2010 το ποσοστό των Α.Π.Ε. ήταν 20,3%. Τουλάχιστον κάποιες χώρες όπως η Ισπανία και η Δανία ανέπτυξαν σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη της ολικής ενέργειας.

3.2.1 RED I

Η οδηγία 2009/28/EK [67] «σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές» αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα στην προοδευτική δέσμευση της Ε.Ε. στις Α.Π.Ε. που διατηρείται μέχρι σήμερα, με κινητήριο άξονα τις Οδηγίες Ανανεώσιμης Ενέργειας (Renewable Energy Directives-REDs) που ξεκίνησαν το 2009 με αυτήν (RED I). Τέθηκαν 3 βασικοί και δεσμευτικοί στόχοι ώστε η Ε.Ε. να αποκτήσει «ανταγωνιστική, βιώσιμη και ασφαλή ενέργεια» [65]. Ο βασικός στόχος ήταν να επιτευχθεί ποσοστό συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από Α.Π.Ε. τουλάχιστον 20% ως το 2020 ενώ το 2009 ήταν μόλις 9,7%. Επίσης, μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% και τελικά ενεργειακή εξοικονόμηση τουλάχιστον 20% στον ίδιο χρονικό ορίζοντα. Σε κάθε κράτος-μέλος ανατέθηκε ξεχωριστός στόχος βάσει των δυνατοτήτων του καθενός, όπως ο ΑΕΠ, οι υποδομές και η υπάρχουσα θέση των Α.Π.Ε. Συμπληρωματικά, τέθηκε στόχος για τον τομέα των μεταφορών όπου η κάθε χώρα δεσμεύτηκε να αυξήσει την συμμετοχή των Α.Π.Ε. σε τουλάχιστον 10% (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρικών οχημάτων).

Τελικά, η Ε.Ε. κατάφερε ποσοστό συνολικής κατανάλωσης 22,1% ανανεώσιμης ενέργειας συνολικά και 10,25% στις μεταφορές. Οι χώρες που ξεπέρασαν σημαντικά τους στόχους τους ήταν η Σουηδία, η Κροατία (+11%) και η Βουλγαρία (+7%). Για την Ελλάδα, ο συνολικός στόχος ήταν 18% ο οποίος ξεπεράστηκε και έφτασε το 21,7% (+1,2%) αλλά στις μεταφορές μόλις 5,34% [68]. Η Γαλλία ήταν η μόνη χώρα που δεν τα κατάφερε (ποσοστό 19.1% αντί του 23%) με αποτέλεσμα να επιβληθεί πρόστιμο έως 500 εκατομμύρια ευρώ [69]. Οι στόχοι και τα αποτελέσματα ανά χώρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1



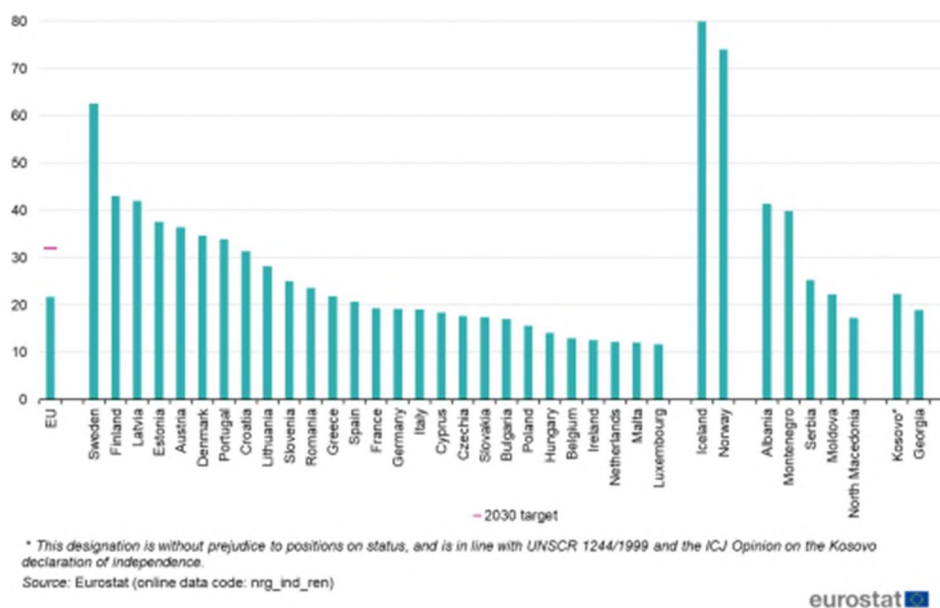
Σχήμα 3.1: Οι στόχοι του RED I σε διάφορες χώρες της Ευρώπης (2020) [68]

3.2.2 RED II

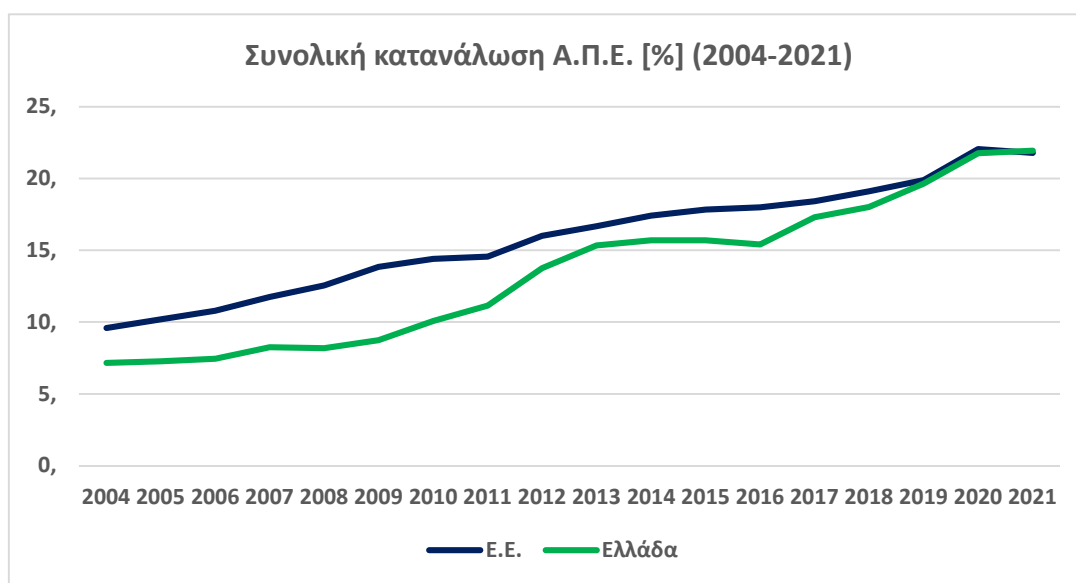
Η επόμενη RED, 2018/2001/ΕΕ (RED II) «για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές» είχε ήδη παρουσιαστεί το 2018 πριν την λήξη της πρώτης και εισήγαγε πιο φιλόδοξους στόχους για το 2030 [70]. Αυτή τη φορά ο δεσμευτικός στόχος που αφορούσε την κατανάλωση της ανανεώσιμης ενέργειας ανέβηκε στην ελάχιστη τιμή του 32% (βλέπε Σχήμα 3.2) και συγκεκριμένα για τις μεταφορές στο 14% όπου η ανάπτυξη ήταν πιο αργή. Για τον ίδιο λόγο στον τομέα της θέρμανσης/ψύξης και στην τηλεθέρμανση προτάθηκε ενδεικτική ετήσια αύξηση κατά 1,1% και 1% αντίστοιχα για κάθε χώρα.

Τελικά, το ποσοστό της τελικής κατανάλωσης των Α.Π.Ε. το 2021 στην Ε.Ε. ήταν 21,8% και στην Ελλάδα 21,9% [72]. Στην πραγματικότητα, παρατηρήθηκε η πρώτη καταγεγραμμένη πτώση κατά 0,3%, σε σχέση με το 2020 [71] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

Share of energy from renewable sources, 2021
(% of gross final energy consumption)



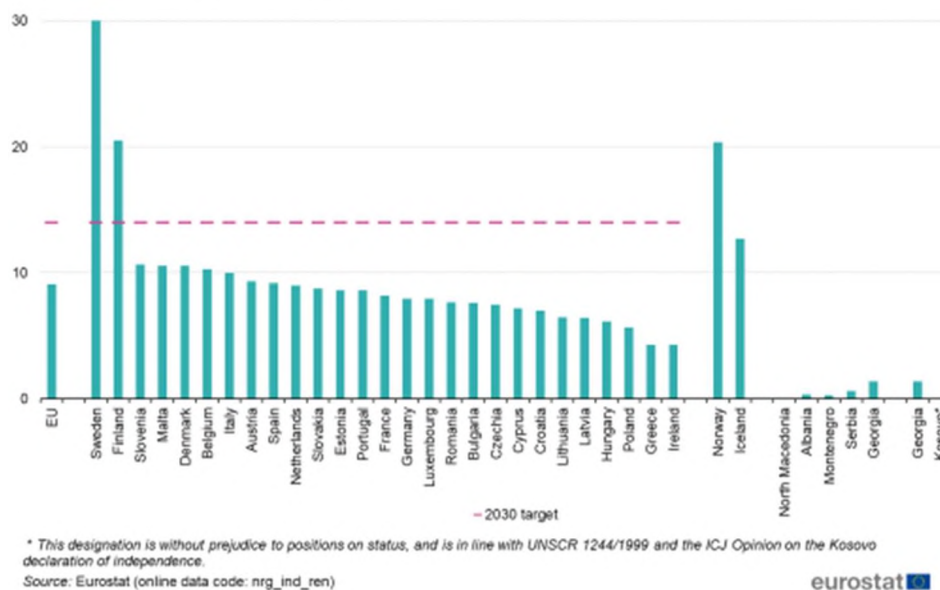
Σχήμα 3.2: Συνολική κατανάλωση Α.Π.Ε. ανά χώρα [%] (2021) [71]



Σχήμα 3.3: Συνολική κατανάλωση Α.Π.Ε. [%] (2004-2021) [72]

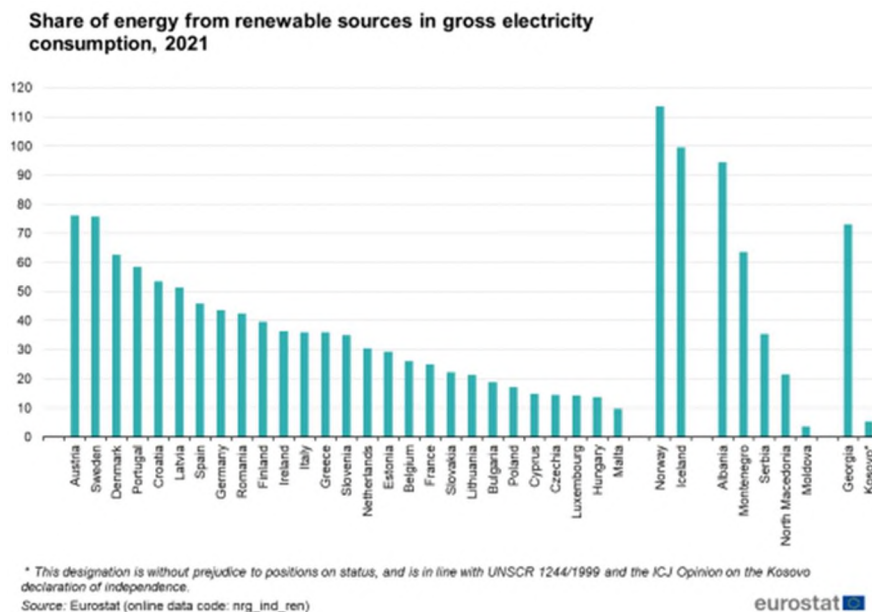
Το ίδιο συνέβη και στις μεταφορές: 9,1% στην Ε.Ε. και 4,3% στην Ελλάδα [72] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

Share of energy from renewable sources in transport, 2021
(% of gross final energy consumption)

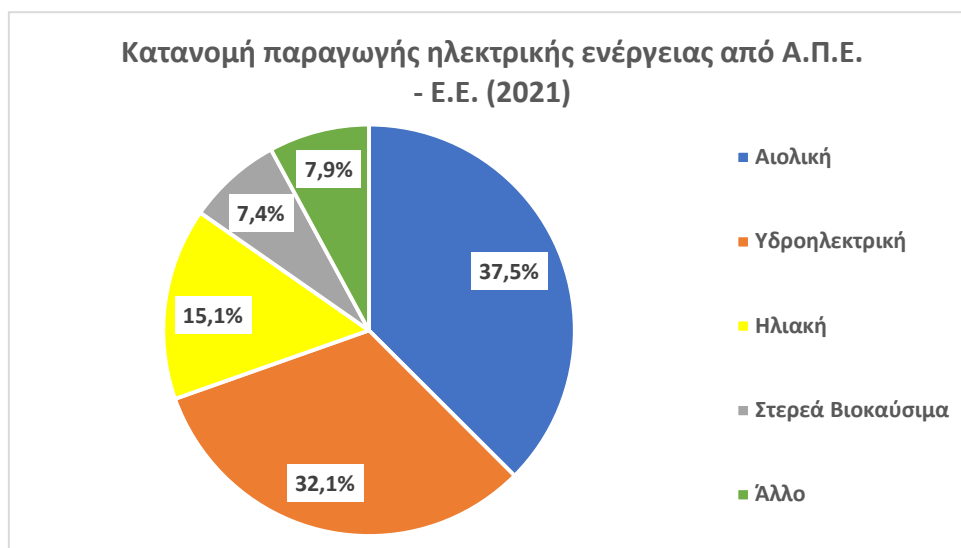


Σχήμα 3.4: Συμμετοχή Α.Π.Ε στην συνολική κατανάλωση των μεταφορών ανά χώρα [%] (2021) [71]

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. το 2021 αποτέλεσε το 37,5% της συνολικής στην Ε.Ε. και στην Ελλάδα ήταν 36% [72] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Ειδικότερα για το 2021, η αιολική (37,5%) και η υδροηλεκτρική (32,1%) κατέλαβαν περισσότερο από τα δύο τρίτα της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και ήταν οι πρωταγωνιστικές Α.Π.Ε. σε όλη αυτήν την αναπτυξιακή πορεία. Η επόμενη πηγή ήταν η ηλιακή, η οποία παρουσιάζει την ταχύτερη ανάπτυξη από τις υπόλοιπες. Το 2008 ήταν μόλις στο 1% με 7,4 TWh ενώ το 2021 έφτασε το 15,1% της συνολικής παραγωγής με 163,8 TWh. Τα στερεά βιοκαύσιμα συμμετείχαν κατά 7,4% [71] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



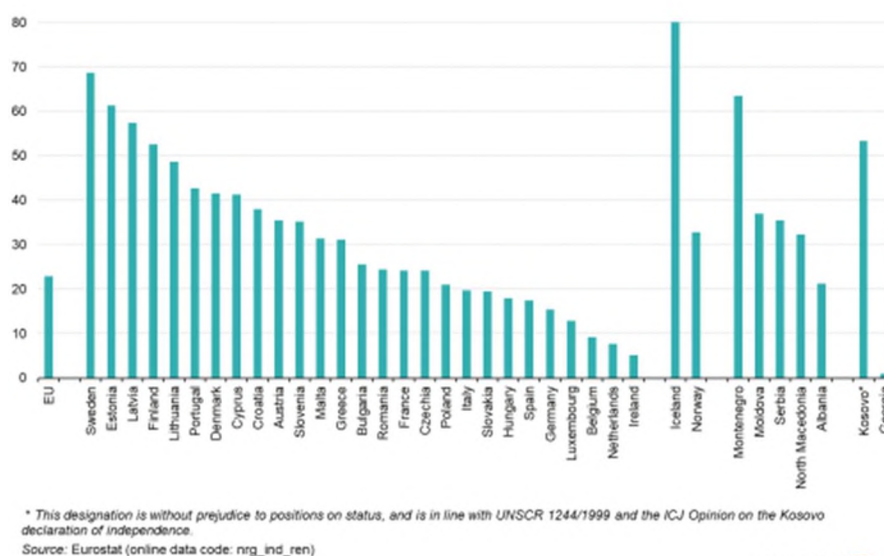
Σχήμα 3.5: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα [%] (2021) [71]



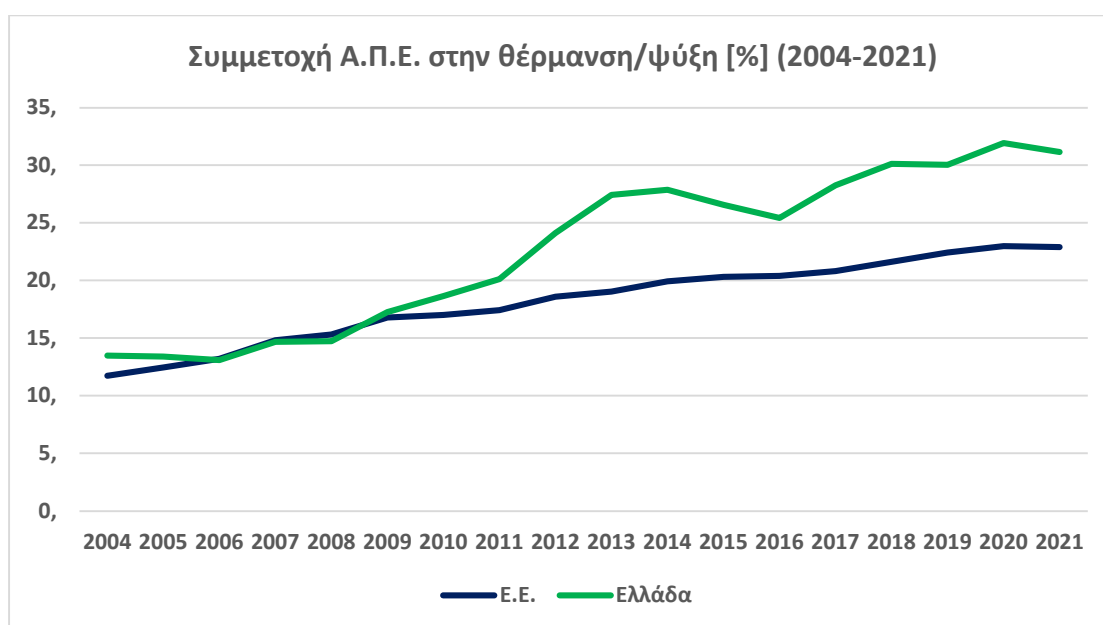
Σχήμα 3.6: Κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. - Ε.Ε. (2021) [71]

Στον τομέα της θέρμανσης/ψύξης, το ποσοστό της ενέργειας που διαθέτουν οι Α.Π.Ε. αυξάνεται συνεχώς. Τα κράτη-μέλη με την μεγαλύτερη εκμετάλλευση σε αυτόν τον τομέα το 2021 ήταν η Σουηδία (68,6%), η Εσθονία (61,3%) και η Λετονία (57,4%) [71]. Στην Ελλάδα ήταν 31,1% αρκετά πάνω από τον μέσο όρο (+8,2%) [72] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Η αυξανόμενη υιοθέτηση των αντλιών θερμότητας σε οικιακό και εμπορικό επίπεδο θα συνεχίσει να ωθεί σε μεγάλο βαθμό αυτήν την ανάπτυξη μαζί με τους ηλιακούς συλλέκτες. . Για παράδειγμα, το 2004 ήταν 11,7% και το 2021 ήταν 22,9% στην Ε.Ε. [71] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

Share of energy from renewable sources for heating and cooling, 2021



Σχήμα 3.7: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην θέρμανση/ψύξη ανά χώρα [%] (2021) [71]



Σχήμα 3.8: Συμμετοχή Α.Π.Ε. στην θέρμανση/ψύξη [%] (2004-2021) [72]

3.2.3 European Green Deal και αναθεώρηση

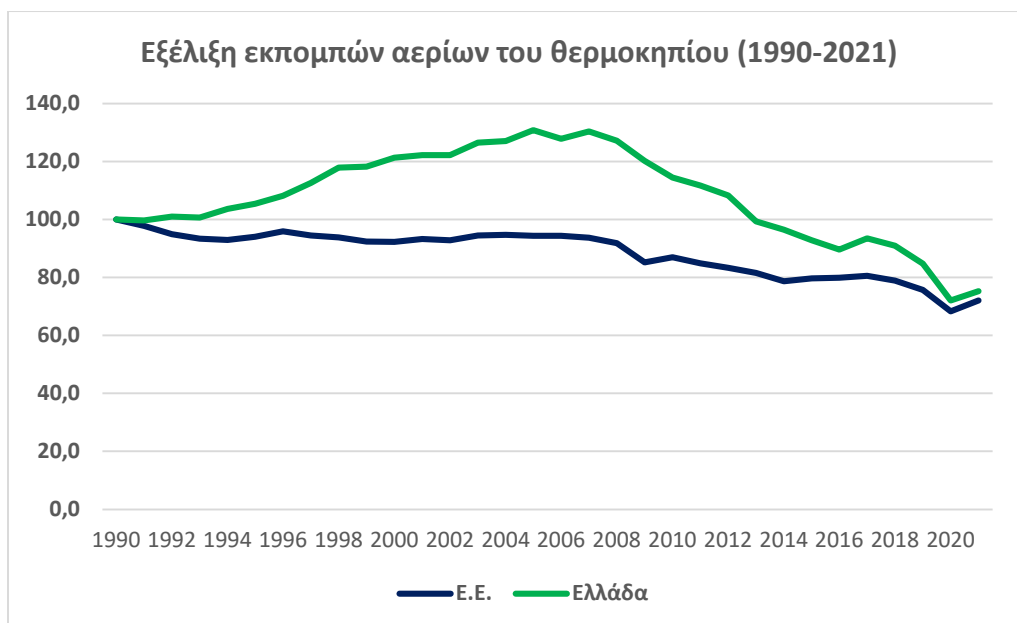
Στα τέλη του 2019 η Ε.Ε. εισήγαγε μία ακόμη φιλόδοξη πολιτική, το “European Green Deal” επενδυτικού ύψους 600 δις €. Ο κυριότερος σκοπός του είναι να κάνει την Ευρώπη την πρώτη κλιματικά-ουδέτερη ήπειρο του κόσμου ως το 2050, εξασφαλίζοντας σταθερή οικονομική ανάπτυξη, την υγεία των πολιτών και την προστασία του περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι οι καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα είναι μηδενικές. Στην πορεία αυτού του επιτεύγματος τίθεται

ενδιάμεσος στόχος μείωσης των εκπομπών κατά τουλάχιστον 55% ως το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 ο οποίος αναθεώρησε το σύμφωνο του Παρισιού που υποσχόταν μείωση 40%. Επίσης προβλέπεται να φυτευτούν 3 δισ. δέντρα στην Ε.Ε. ως το 2030 [73].

Οι συστάσεις της Επιτροπής [74] για τη επίτευξη αυτού του στόχου αφορούν και την μείωση των εκπομπών CO₂ των νέων αυτοκινήτων και φορτηγών μέσω της προαγωγής της ανάπτυξης της αγοράς. Κάποιοι επιμέρους στόχοι είναι η εν λόγω μείωση κατά 55% και 50% αντίστοιχα ως το 2030. Για τα νέα αυτοκίνητα, προβλέπονται τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών ως το 2035. Επίσης, η Επιτροπή προτάσσει την ανακαίνιση κατοικιών και δημοσίων κτιρίων με γνώμονα την ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. στην λειτουργία τους. Πιο συγκεκριμένα, την ανακαίνιση τουλάχιστον του 3% του συνολικού εμβαδού των πατωμάτων των δημοσίων κτιρίων ετησίως και την ανάπτυξη των ανανεώσιμων ενεργειών στο 49% του ενεργειακού μείγματος των κτιρίων. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 θα μπορούσαν να ανακαινισθούν 35 εκ. κτίρια και να δημιουργηθούν 160 000 «πράσινες» θέσεις εργασίας στον οικοδομικό τομέα.

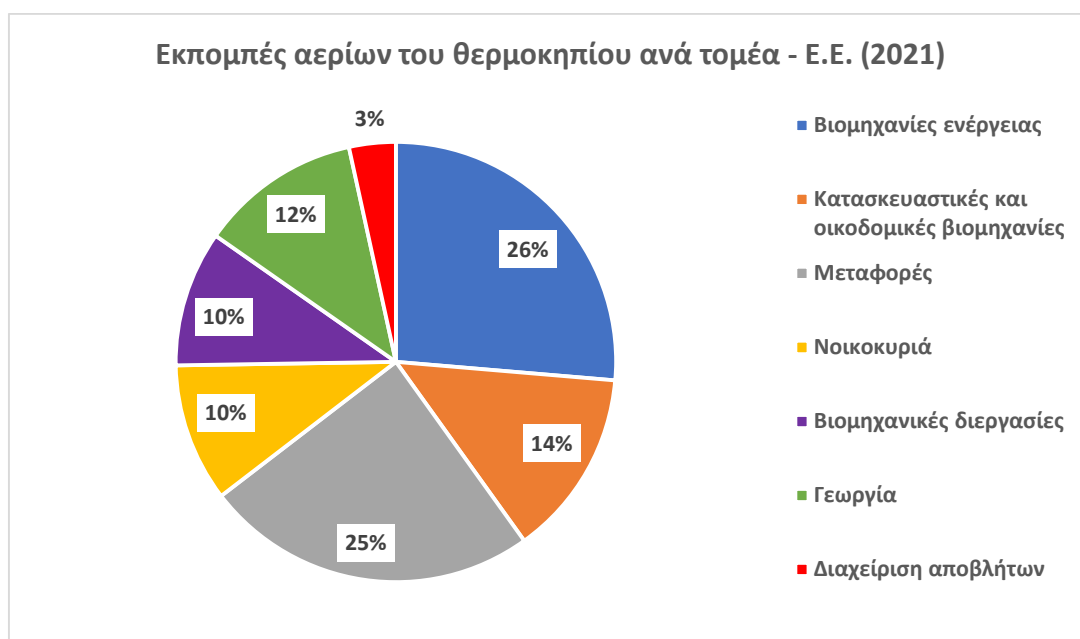
Οι εκπομπές σε όλα τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. ακολουθούν πτωτική πορεία λόγω των κανονισμών και των οδηγιών που έχουν τεθεί σε εφαρμογή. Από το 2010 ως το 2014, υπήρξε σταθερή μείωση στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου στην Ε.Ε. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μία αύξηση κατά την διετία 2015-2017 και μετά μία ακόμη πτώση από το 2018 ως το 2020. Το 2020 καταγράφηκε πτώση των εκπομπών 10% σε σχέση με το 2019, που ήταν η μεγαλύτερη ετήσια μείωση από το 1990. Αναμφίβολα οφείλεται στην επέλαση της πανδημίας του κορονοϊού. Συγκεκριμένα, αυτήν την εικοσαετία οι εκπομπές είχαν μειωθεί κατά 1,5 δισ. τόνους ισοδύναμου CO₂, δηλαδή 32%, που ξεπέρασε σημαντικά τον αρχικό στόχο που είχε τεθεί για το 2020 (-20%). Για το 2021 όπως ήταν αναμενόμενο οι εκπομπές αυξήθηκαν κατά 4% (-28%) [75].

Η Ελλάδα ακολούθησε ανοδική τάση μετά το 1990 σε αντίθεση με τον μέσο όρο της Ε.Ε. φτάνοντας σε μέγιστη αύξηση περίπου 30% τα έτη 2004 και 2008. Στην συνέχεια με την εντολή των ευρωπαϊκών οδηγιών, η πορεία των εκπομπών ταυτίστηκε με αυτή της Ε.Ε. Οι εκπομπές της Ελλάδας το 2020 είχαν μειωθεί κατά 27,9% και το 2021 οι εκπομπές αυξήθηκαν (24,8%) [76] όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.

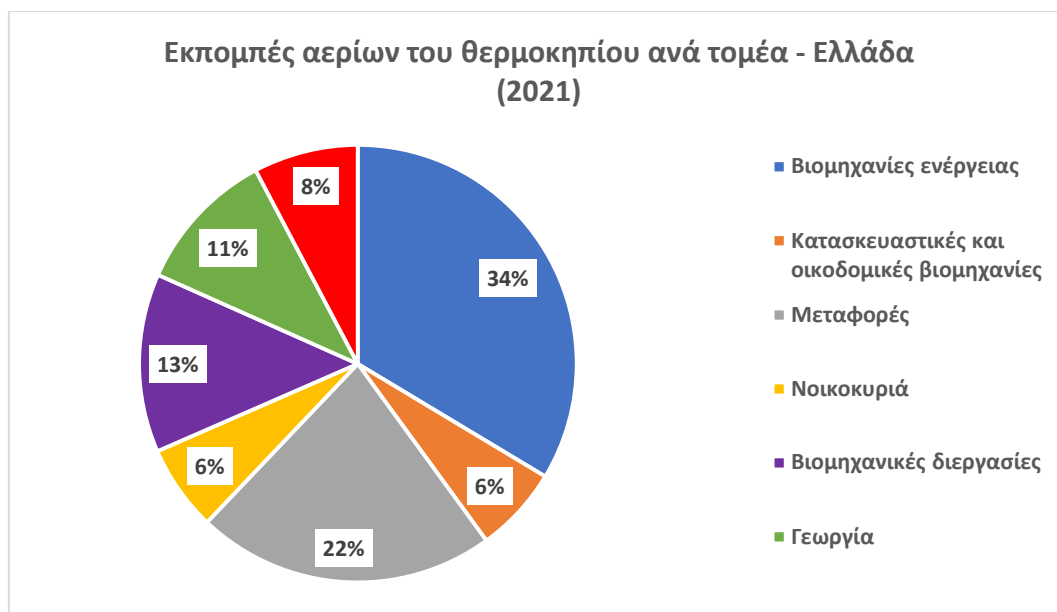


Σχήμα 3.9: Εξέλιξη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (1990-2021) [76]

Το ποσό των εκπομπών ήταν 3,5 δις τόνοι ισοδύναμου CO₂ στην Ε.Ε. και στην Ελλάδα 80 000 τόνοι ισοδύναμου CO₂ [77]. Η κατανομή των εκπομπών σε κάποιους βασικούς τομείς παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.10 και 3.11 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.10: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα - Ε.Ε. (2021) [77]



Σχήμα 3.11: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα - Ελλάδα (2021) [77]

Στα πλαίσια της στρατηγικής για την επίτευξη των σκοπών του “European Green Deal”, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την τροπολογία της δεύτερης οδηγίας RED II στις 14 Ιουλίου 2021. Προκειμένου να επιτευχθούν οι βασικοί στόχοι περί εκπομπών και κλιματικής επιβάρυνσης, η αναθεώρηση αυξάνει τον στόχο της παρουσίας των Α.Π.Ε. στο ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα του 2030 από τουλάχιστον 32% σε τουλάχιστον 40% [78]. Επίσης, προτείνει την νομοθέτηση της αύξησης των Α.Π.Ε σε θέρμανση/ψύξη κατά 1.1% ετησίως για κάθε χώρα ως το 2030, που μέχρι τότε ήταν ενδεικτική. Επίσης, σε εθνικά επίπεδα, αυξάνει την ενδεικτική ετήσια αύξηση της χρήσης των Α.Π.Ε. στην τηλεθέρμανση σε 2,1% από το τωρινό 1%. Παρομοίως, στην βιομηχανία τίθεται νέος στόχος της αύξησης της χρήσης των Α.Π.Ε. κατά 1,1% ετησίως.

3.2.4 REPowerEU

Ωθούμενη από τον πόλεμο στην Ουκρανία και την ανεξαρτητοποίηση από τις ρωσικές εισαγωγές, η Ε.Ε. έθεσε σε κίνηση το πλάνο “REPowerEU” συνολικής χρηματοδότησης ύψους €300 δις τον Μάιο του 2022. Τα νέα δεδομένα εντείνουν περισσότερο την ανάγκη επιτάχυνσης της ενεργειακής αυτονομίας και της εξοικονόμησης [79].

Τον Σεπτέμβριο του 2022, τα ποσοστά των εισαγωγών του φυσικού αερίου μέσω των ρωσικών αγωγών είχαν ήδη μειωθεί σε 8% από το 41% του 2021.

Παράλληλα σημειώθηκε αύξηση των εισαγωγών μέσω τρίτων προμηθευτών κατά 10% λόγω συνάψεων συνεργασίας με την Αίγυπτο και το Καζακστάν. Οι υπόλοιπες εισαγωγές γίνονται πλέον σε υδροποιημένο φυσικό αέριο. Ακόμη, οι συμφωνίες με την Ναμίμπια, και τις προαναφερθείσες χώρες θα διασφαλίσουν βιώσιμη παροχή ανανεώσιμου υδρογόνου [79].

Προκειμένου να αποφευχθούν οι ελλείψεις ενέργειας λόγω εξάλειψης του φυσικού αερίου, συμφωνήθηκε να πραγματοποιούνται υπόγειες αποθηκεύσεις ως τον Νοέμβριο πριν την έλευση του χειμώνα. Για τον Νοέμβριο του 2022 ο πρώτος στόχος ήταν η κάλυψη του 80% της αποθηκευτικής χωρητικότητας ο οποίος ξεπεράστηκε στο 95%. Ο ετήσιος στόχος για τα επόμενα χρόνια ορίστηκε στην κάλυψη κατά 90% ως την 1^η Νοεμβρίου κάθε έτους. Φέτος, ο στόχος έχει ήδη επιτευχθεί από τα μέσα του Αυγούστου. Επίσης, συμφωνήθηκε η εθελοντική μείωση της κατανάλωσης του φυσικού αερίου από τα μέλη-κράτη κατά τουλάχιστον 15%, η οποία θα συνεχιστεί και μέχρι τον Μάρτιο του 2024, αφού μέχρι και τον φετινό η ζήτηση μειώθηκε επιτυχώς κατά 18% [79].

Οι Α.Π.Ε. θα συνεχίσουν να βρίσκονται στο προσκήνιο της ενεργειακής οικονομίας. Το 2022 καταγράφηκαν μείζονα άλματα προόδου προς την μετάβαση στην ανανεώσιμη ενέργεια σε σχέση με το 2021. Οι πιο ιδιαίτερες εξελίξεις σημειώθηκαν στην παραγωγή της. Για πρώτη φορά παράχθηκε περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αιολικές και ηλιακές πηγές παρά από φυσικό αέριο. Για τις πρώτες, η συνολική ισχύς αυξήθηκε κατά 16 GW και για τις δεύτερες επιτεύχθηκαν νέες εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος 41 GW. Τον Μάρτιο του 2023, οι νομοθεσίες RED ενισχύθηκαν με νέα αναθεώρηση στρέφοντας τον τρέχοντα στόχο του 2030 να αποσκοπεί στην ανάδειξη των Α.Π.Ε. σε ποσοστό τουλάχιστον 42,5% της συνολικής κατανάλωσης. Ωστόσο είχε προηγηθεί κι άλλη πρόταση της Επιτροπής το 2022 για στοχοθέτηση στο 45% που παραμένει ο επιθυμητός στόχος [79].

Η ενεργειακή πορεία που χαράσσει η Ε.Ε. θα έχει αντίκτυπο στην ανάπτυξη των Γ.Α.Θ. και δίχως αμφιβολία ευνοεί την υιοθέτηση της γεωθερμίας στον οικιακό και εμπορικό τομέα. Η διάθεση αυτών των συστημάτων στο ευρύ κοινό θα πρέπει επίσης να ενθαρρυνθεί με ισχυρά οικονομικά κίνητρα για να αποκτήσει εκτεταμένη διασπορά.

4. Σύγχρονες Τεχνολογικές Εξελίξεις των Γ.Α.Θ.

Μεταξύ πολλών εξελίξεων στην αέναη ανάπτυξη των μηχανολογικών συσκευών και τεχνολογιών, δύο εκ των πολλών αναπτυσσόμενων πεδίων που αφορούν τις Γ.Α.Θ. είναι τα υβριδικά συστήματα και τα φυσικά και νεότερα ψυκτικά μέσα.

4.1 Υβριδικά συστήματα Γ.Α.Θ.

Τα υβριδικά συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (HGSHPs) έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον στον χώρο της γεωθερμίας λόγω της ικανότητάς τους να συνδυάζουν τα οφέλη των συμβατικών συστημάτων Γ.Α.Θ. με αυτά των παραδοσιακών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης. Αυτά τα συστήματα αντιμετωπίζουν τα διάφορα μειονεκτήματα των πρώτων όπως τα υψηλά κόστη αγοράς και εγκατάστασης, προσφέροντας λύσεις ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου η δυσαναλογία των θερμικών και ψυκτικών φορτίων επιβαρύνει το έδαφος και το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουν αυξημένες αποδόσεις, μειωμένο κόστος καταπόνησης και φιλικότερη προς το περιβάλλον λειτουργία.

Ένα μεγάλο κίνητρο για την υιοθεσία των υβριδικών συστημάτων είναι η ικανότητά τους να παρέχουν έναν οικονομικό και ταυτόχρονα αποδοτικό τρόπο θέρμανσης/ψύξης. Ενώ τα συστήματα Γ.Α.Θ. είναι γνωστά για την μεγάλη τους εξοικονόμηση ενέργειας, τα αρχικά κόστη που απαιτούνται, στέκονται εμπόδιο στην ευρύτερη διάδοσή τους [20,80]. Συνδυάζοντας τις Γ.Α.Θ. με συμπληρωματικό εξοπλισμό απορρόφησης ή απόρριψης της θερμότητας, διευκολύνουν την μείωση του μεγέθους και επομένως του κόστους ενός συμβατικού γεωεναλλάκτη κλειστού βρόχου που είναι το πιο ακριβό στοιχείο της εγκατάστασης. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτό μπορεί να φτάσει τουλάχιστον το 50% του συνολικού κόστους του συστήματος [80].

Η συμπερίληψη των συμπληρωματικών μηχανισμών όχι μόνο καθιστά το συνολικό σύστημα πιο οικονομικά αποδοτικό σε βάθος χρόνου, αλλά επίσης ενισχύει και την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, ειδικά σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από μονόπλευρα υψηλά φορτία θέρμανσης ή ψύξης [81]. Στην

ουσία, τα απλά συστήματα Γ.Α.Θ. είναι πιο αποτελεσματικά σε τοποθεσίες με ισορροπημένα φορτία κατά την διάρκεια του χρόνου, ενώ τα υβριδικά μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες χρησιμοποιώντας τις επιπλέον πηγές ή προορισμούς θερμότητας. Για παράδειγμα, σε περιοχές με πολύ ζεστό κλίμα, όπου η ανάγκη θέρμανσης είναι πολύ μεγαλύτερη, η ενσωμάτωση ενός πύργου ψύξης στο σύστημα ως βοηθητικό μέσο απόρριψης θερμότητας, ενισχύει την θερμική ισορροπία του εδάφους και την συνολική απόδοση του συστήματος [80]. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα υβριδικά συστήματα αποδεικνύονται ως μια ευνοϊκότερη πρόταση, όταν πρόκειται για την βελτιστοποίηση της κατανομής των ασύμμετρων φορτίων και της διανομής τους σε διαφορετικούς προορισμούς, προσφέροντας μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα και χαμηλότερες απαιτήσεις σε φορτία από τις υποδομές. [80,82].

Πιο συγκεκριμένα, ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζει την απόδοση των γεωθερμικών συστημάτων είναι η διαφορά μεταξύ των αναγκών σε φορτία θέρμανσης τον χειμώνα και φορτία ψύξης το καλοκαίρι. Σε μία ιδανική συνθήκη, αυτά τα φορτία θα ήταν ισοδύναμα και ο γεωεναλλάκτης θα απέρριπτε τόση θερμότητα στο έδαφος όση θα απορροφούσε. Όμως στην πραγματικότητα αυτό δεν συμβαίνει, όπως παρατηρείται στις εμπορικές εγκαταστάσεις. Εκεί, το μέγεθος του γεωεναλλάκτη καθορίζεται κυρίως από την ανάγκη που παρουσιάζεται για ψύξη των κτιρίων, με αποτέλεσμα το μέγεθος του να είναι κατά 50-300% μεγαλύτερο από αυτό που θα είχε αν σχεδιαζόταν με βάση την θέρμανση [81]. Γενικότερα, η θερμότητα που απορρίπτεται στο έδαφος είναι πάντα μεγαλύτερη από το ψυκτικό φορτίο λόγω της επιπρόσθετης θερμότητας που παράγεται από τον συμπυκνωτή και αντιστρόφως, η θερμότητα που απάγεται από το έδαφος ίσως να είναι λιγότερη από το θερμικό φορτίο για τον ίδιο λόγο [81]. Αν οι απαιτήσεις για ψύξη ξεπεράσουν αυτές της θέρμανσης κατά 50-70%, τότε υπάρχει κίνδυνος το γεωθερμικό σύστημα να μην μπορέσει να αντιμετωπίσει αυτή τη διαφορά, με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί υπερθέρμανση του εδάφους και του γεωεναλλάκτη. Στην αντίθετη περίπτωση, η υπερβολική εξαγωγή θερμότητας από το έδαφος θα χαμηλώσει την θερμοκρασία του [81]. Αυτές οι εκβάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του συστήματος, αλλά και την διατάραξη της ισορροπίας της γεωλογίας του υπεδάφους,

αφού το πλεόνασμα και η έλλειψη θερμότητας δεν μπορούν να αφομοιωθούν με φυσικό τρόπο αν η λειτουργία συνεχιστεί αδιάκοπα.

4.1.1 Πύργοι ψύξης

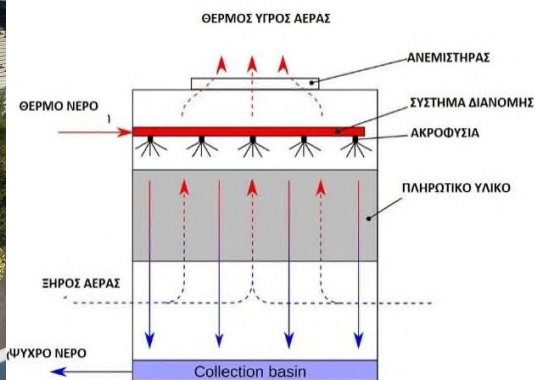
Σε περιπτώσεις που απαιτείται συμπληρωματική απόρριψη θερμότητας, ο πύργος ψύξης αποδεικνύεται μία ελκυστική επιλογή (Σχήμα 4.1). Σε ένα υβριδικό σύστημα, ο γεωεναλλάκτης μπορεί να ρυθμίζεται και να σχεδιάζεται με βάση τα θερμικά φορτία ενώ η συνεργασία των δύο συστημάτων να ικανοποιεί τα ψυκτικά φορτία. Έτσι, η θερμότητα που μεταφέρεται από και προς το έδαφος κατά την διάρκεια των περιόδων ενός έτους πλησιάζει περισσότερο την ισορροπία, ενώ το αρχικό κόστος μειώνεται [83]. Συγκεκριμένα, οι συμβατικοί πύργοι ψύξης συχνά κοστολογούνται στο ένα δέκατο ενός γεωθερμικού βρόχου (\$120-180 ανά ψυκτικό τόνο στις Η.Π.Α.) [81].

Σε ένα υβριδικό σύστημα, ο πύργος ψύξης δρα ως συμπληρωματικό σύστημα απόρριψης θερμότητας. Όταν το γεωθερμικό σύστημα γίνεται λιγότερο αποδοτικό σε αυτόν τον τομέα, ειδικά σε περιόδους έντονης ψύξης όπως το καλοκαίρι, ο πύργος ψύξης βοηθά παρέχοντας μία επιπλέον πορεία απόρριψης της θερμότητας. Αυτή η διεργασία βασίζεται στην εξατμιστική ψύξη. Αφού το υγρό που έχει απορροφήσει την θερμότητα από τον χώρο ψύξης, στην συνέχεια την μεταβιβάζει -αμέσως ή εμμέσως- στην κυκλοφορία του πύργου ψύξης [80].

Η βασική αρχή λειτουργίας του πύργου έγκειται στην επαφή δύο ρευστών: του θερμού νερού και του ατμοσφαιρικού αέρα. Το νερό ψεκάζεται μέσω ακροφυσίων πάνω σε πληρωτικό υλικό το οποίο αυξάνει την επιφάνεια επαφής και τον χρόνο επαφής, ενισχύοντας τον ρυθμό εξάτμισης. Παράλληλα ο ατμοσφαιρικός αέρας εισάγεται στην βάση του πύργου και ρέει προς την κορυφή του. Το νερό μεταφέρει ένα μέρος της θερμότητάς του στον αέρα και ένα ποσοστό του εξατμίζεται, ενώ το υπόλοιπο ψύχεται και συλλέγεται στον πάτο του πύργου. Ο θερμός και υγρός αέρας εξέρχεται από την ανοιχτή κορυφή στο περιβάλλον όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

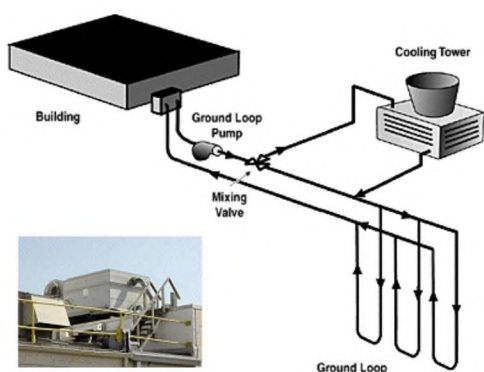


Σχήμα 4.1: Πύργοι ψύξης [84]

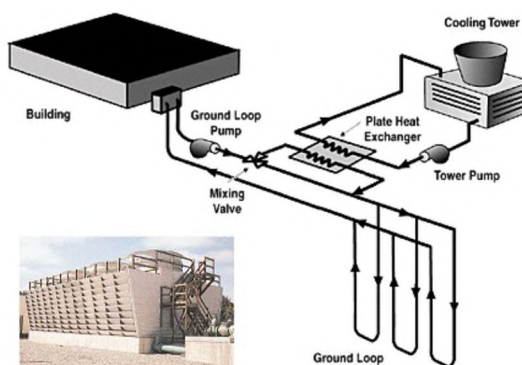


Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας πύργου ψύξης [85]

Όταν το υγρό εντός των αγωγών είναι νερό, ένας πύργος ψύξης μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο σύστημα και να το μεταχειρίζεται απευθείας. Αυτή η διάταξη ονομάζεται «ανοιχτού τύπου» και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Ωστόσο, αν το υγρό δεν είναι νερό, η ενσωμάτωση πραγματοποιείται μέσω ενδιάμεσου εναλλάκτη πλακών-πλασιού (plate heat exchanger ή PHE). Η απευθείας σύνδεση επιτρέπει καλύτερη ψύξη, κατάλληλη για περιπτώσεις όπου οι γεωθερμικοί βρόχοι διατηρούν θερμοκρασία ανώτερη των 7 °C καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Στην αντίθετη περίπτωση, η προσθήκη αντιψυκτικού είναι απαραίτητη και η διεπαφή με τον ενδιάμεσο εναλλάκτη μετατρέπει τον πύργο ψύξης σε «κλειστού τύπου» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4, ο οποίος δεν μεταχειρίζεται άμεσα το υγρό μείγμα του γεωθερμικού συστήματος αλλά παραλαμβάνει ένα ποσό της θερμότητάς του. Ο ανοιχτός τύπος δεν απαιτεί την παρουσία του [81].



Σχήμα 4.3: Πύργος ψύξης ανοιχτού τύπου [80]



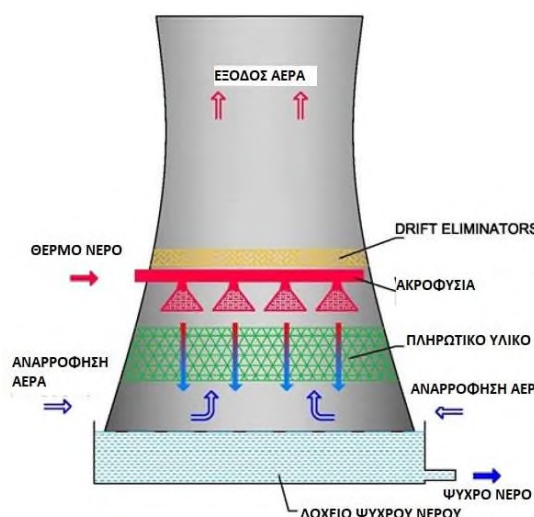
Σχήμα 4.4: Πύργος ψύξης κλειστού τύπου [80]

Μια ακόμη κατηγοριοποίηση των πύργων ψύξης αφορά τον τρόπο με τον οποίο κυκλοφορείται ο αέρας στον πύργο. Στους πύργους φυσικής κυκλοφορίας

(Σχήμα 4.5) δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και η κυκλοφορία του αέρα έγκειται στην διαφορά πυκνότητας του αέρα περιβάλλοντος με αυτήν του θερμού, υγρού αέρα. Ο δεύτερος είναι λιγότερο πυκνός από τον πρώτο με αποτέλεσμα να ανυψώνεται και να δραπετεύει από την κορυφή του πύργου. Έτσι δημιουργείται μία συνεχής ροή αέρα καθώς ο πυκνότερος ατμοσφαιρικός αέρας έλκεται στο εσωτερικό του πύργου ως αντικαταστάτης μέσω των ανοιγμάτων στην βάση του πύργου. Είναι επομένως μία εγκατάσταση με μικρότερες ανάγκες συντήρησης [86]. Οι πύργοι μηχανικής κυκλοφορίας (Σχήμα 4.6) ενισχύουν την ροή του αέρα με ανεμιστήρες στην βάση ή στην κορυφή του πύργου. Αυτή η διάταξη δύναται να επιτύχει αποδοτικότερη ψύξη λόγω καλύτερης κυκλοφορίας του αέρα αλλά ταυτόχρονα η λειτουργία των ανεμιστήρων αυξάνει την ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος.

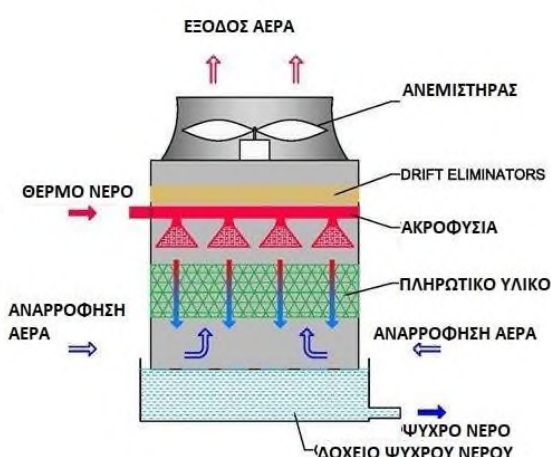
Όσον αφορά τα υβριδικά συστήματα, ο πιο συνήθης τύπος είναι ανοιχτού τύπου με μηχανική κυκλοφορία [80]. Πρόκειται για πιο ευέλικτη λειτουργία και που συναντάται συχνότερα σε εφαρμογές κτιρίων. Οι φυσικής κυκλοφορίας θα απαιτούσαν πολύ περισσότερο χώρο λόγω του μεγέθους τους και περιορίζονται σε βιομηχανίες μεγάλης κλίμακας όπως τα ατμοηλεκτρικά εργοστάσια.

ΠΥΡΓΟΣ ΨΥΞΗΣ
ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ



Σχήμα 4.5: Πύργος ψύξης φυσικής κυκλοφορίας [85]

ΠΥΡΓΟΣ ΨΥΞΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ



Σχήμα 4.6: Πύργος ψύξης μηχανικής κυκλοφορίας [87]

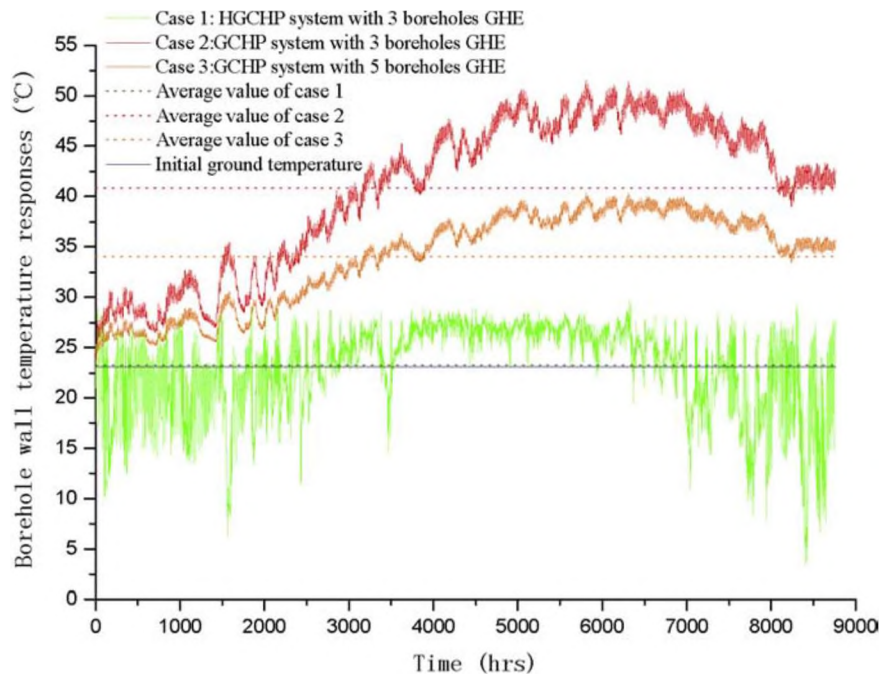
Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πληθώρα μελετών, προσομοιώσεων και αξιολογήσεων των υβριδικών συστημάτων με πύργους ψύξης ώστε να εξεταστεί η

επίδοσή τους και τα αποτελέσματα της ενσωμάτωσης τους στα κλασικά συστήματα γεωθερμίας.

Οι Man et al. [88] κατασκεύασαν ένα μοντέλο ωριαίων προσομοιώσεων για να εξετάσουν τις δυνατότητες των υβριδικών συστημάτων με πύργους ψύξης στο ζεστό κλίμα του Χονγκ Κονγκ και την επίδρασή του στην υπερθέρμανση του εδάφους σε ένα υποθετικό κτίριο. Παράλληλα σύγκριναν τις οικονομικές παραμέτρους με αυτές των αμιγώς γεωθερμικών συστημάτων.

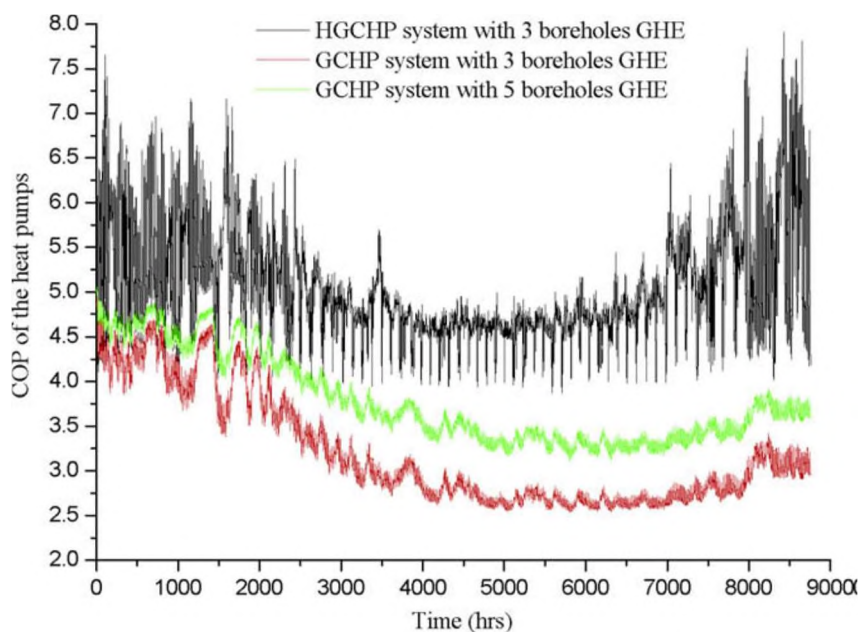
Το μονό σύστημα που θα αντιμετωπίσει το σύνολο των ψυκτικών φορτίων αποτελείται από 5 κατακόρυφες γεωτρήσεις κλειστών βρόχων βάθους 80 m και γεωεναλλάκτες συνολικού μήκους 356 m. Το υβριδικό λόγω της βοήθειας του πύργου ψύξης στον οποίο συνδέεται με εναλλάκτη πλακών έχει 3 γεωτρήσεις ίδιων διαστάσεων. Επομένως το συνολικό μήκος των γεωεναλλακτών μειώνεται σε 190 m, δηλαδή κατά 46.63%. Η μείωση στην διαστασιολόγηση θα έχει άμεσο αντίκτυπο στην μείωση του αρχικού κόστους. Επίσης συγκρίνεται γεωθερμικό σύστημα με υποδιαστασιολόγηση, 3 γεωτρήσεων, το οποίο παρουσιάζει την χειρότερη συμπεριφορά λόγω της έντονης συγκέντρωσης θερμότητας σε λιγότερες γεωτρήσεις [88].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε έναν χρόνο λειτουργίας η μέση ετήσια θερμοκρασία των τειχών των γεωτρήσεων αυξήθηκε από 23,1 °C σε 33,99 °C για το γεωθερμικό σύστημα των 5 γεωτρήσεων. Η θερμική απόκριση του υβριδικού συστήματος ήταν πολύ καλύτερη και η αντίστοιχη θερμοκρασία ήταν 23,26 °C, σχεδόν απαράλλακτη. Το σύστημα υποδιαστασιολόγησης έφτασε τους 40,85 °C όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7 [88].



Σχήμα 4.7: Απόκριση θερμοκρασίας των τοιχωμάτων των τριών συστημάτων [88]

Παρόμοια αποτελέσματα ελήφθησαν και στην εξέλιξη των αποδόσεων των συστημάτων. Η αυξημένη συγκέντρωση θερμότητας στους γεωεναλλάκτες του γεωθερμικού συστήματος μειώνει σταδιακά και συνεχόμενα την απόδοσή του και το σύστημα σε υποδιαστασιολόγηση παρουσιάζει την μεγαλύτερη πτώση. Στο υβριδικό σύστημα, ο πύργος ψύξης ελαφραίνει την θερμική φόρτιση του εδάφους με αποτέλεσμα ο COP του να παρουσιάζει σταθερότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η ελάχιστη τιμή του δεν φαίνεται να είναι μικρότερη του 4 [88].



Σχήμα 4.8: Εξέλιξη των COP των τριών συστημάτων [88]

Στο οικονομικό μέρος, η αρχική επένδυση των \$18 500 του γεωθερμικού συστήματος μειώνεται κατά 34,32% στα \$12 150 για το υβριδικό. Η υψηλότερη απόδοση του δεύτερου οδηγεί σε μικρότερα ετήσια κόστη λειτουργίας τα οποία μειώνονται κατά 22,85% από \$2 249,05 σε \$1 735,06. Μακροπρόθεσμα για υποθετική λειτουργία 10 χρόνων, η εξοικονόμηση είναι πιο εμφανής καθώς στα κόστη λειτουργίας θα είναι 53,59% και στα συνολικά 47,21% [88].

Η υψηλή απόδοση επιβεβαιώνεται από τους Lubis et al. καθώς η θερμοδυναμική τους ανάλυση έδειξε COP ίσο με 5,34 για ένα αντίστοιχο υβριδικό σύστημα. Όπως αναμένεται, είναι αποδοτικότερο από τις αντλίες θερμότητας πηγής αέρα για τις οποίες ο COP έχει εύρος περίπου 1-3. Επίσης, η απόδοση εξέργειας (λόγος πραγματικού COP προς ιδανικού COP) ήταν 63,4% [89].

Η αρχική έρευνα που είχε γίνει σε εγκατάσταση γραφείων 7 432 m² και 4 ορόφων στην Πενσιλβάνια θεώρησε ότι ένα κλειστό σύστημα 55 γεωτρήσεων βάθους 152 m θα ήταν εφικτό για τις ανάγκες των εγκαταστάσεων. Η θερμική και ψυκτική ισχύς υπολογίστηκε στα 703 kW και το συνολικό κόστος στα \$878 000. Όμως, περεταίρω αποτιμήσεις περιόρισαν το δυνατό βάθος στα 38 m, αυξάνοντας τον αριθμό των γεωτρήσεων σε 240 και αυξάνοντας το κόστος (\$1 117 400). Για την αντιμετώπιση των νέων συνθηκών που κινδύνευαν να αχρηστεύσουν την εγκατάσταση, προτάθηκε υβριδικό σύστημα με πύργο ψύξης κλειστού κυκλώματος (422 kW) σε συνδυασμό με 88 γεωτρήσεις βάθους 38 m (281 kW). Το κόστος αυτής της προσαρμογής προσέγγιζε αυτό του αρχικού σχεδιασμού (\$933 800). Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του, ο πύργος ψύξης ενεργοποιείται μόνο το καλοκαίρι όταν η θερμοκρασία των γεωεναλλακτών ξεπεράσει τους 24 °C και είναι υπεύθυνος μόνο για το 3% της ενέργειας που καταναλώνεται ετησίως για θέρμανση/ψύξη/κλιματισμό. Οι λειτουργίες θέρμανσης και ψύξης απέβησαν αποδοτικές, με την θερμοκρασία του γεωεναλλάκτη τελικά να βρίσκεται μεταξύ των 5-32 °C. [81,90].

Ένα ξενοδοχείο στην Πενσακόλα της Φλόριντα, βασίζεται σε αντλίες θερμότητας συνολικής ισχύος 1 055 kW για να εξυπηρετήσει χώρους συνολικού εμβαδού 7 446 m². Στο σύστημα που διατρέχει ένας κοινός βρόχος νερού συμπεριλαμβάνονται αντλίες παραγωγής ζεστού νερού χρήσης, μηχανισμοί

θέρμανσης πισίνων και μηχανές πάγου. Το κλίμα είναι γενικά θερμό και υπάρχει μεγάλη ανάγκη κλιματισμού. Οι μηχανές πάγου αποθέτουν συνεχώς θερμότητα στο κύκλωμα, ενώ οι αντλίες των πισίνων και του νερού χρήσης την αφαιρούν από αυτό. Το γεωθερμικό δίκτυο κλειστού βρόχου αποτελείται από 98 γεωτρήσεις, τον μέγιστο αριθμό που επιτρέπει η ιδιοκτησία, ισχύος 351,7 kW. Η ενίσχυση του συστήματος παρέχεται από έναν πύργο ψύξης κλειστού τύπου ισχύος 527,5 kW. Η τελική διαμόρφωση εξυπηρετεί πλήρως τις ανάγκες του ξενοδοχείου για θέρμανση χωρίς συμπληρωματικό θερμαντήρα και κατά την διάρκεια του καλοκαιριού ο πύργος ψύξης εξασφαλίζει την κάλυψη αυτών για ψύξη [81,91].

Ένα άλλο υβριδικό σύστημα με πύργο ψύξης εξετάστηκε σε έναν οίκο ευγηρίας στη Μασαχουσέτη έκτασης σχεδόν 85 563,7 m² [81,92]. Το κλίμα της περιοχής είναι γενικώς κρύο, αλλά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η απαιτήσεις για ψύξη είναι αυξημένες σε πολλά εμπορικά κτίρια. Συγκεκριμένα, τα ψυκτικά φορτία είναι 5 995,06 kW, ενώ τα θερμικά 3 288,55 kW. Εξετάστηκαν δύο υποψήφια συστήματα, ένα εξολοκλήρου γεωθερμικό και ένα υβριδικό με πύργο ψύξης. Στη γεωθερμική συνιστώσα, το σύστημα αποτελείται από 715 κατακόρυφες γεωτρήσεις βάθους 152,4 m σε απόσταση 4,57 m η μία από την άλλη. Η θερμοκρασία των υπόγειων υδάτων είναι 11,11 °C. Η ενσωμάτωση του πύργου ψύξης μείωσε τον αριθμό τους (και επομένως το αρχικό κόστος) σε 400. Τα έξοδα του εγκατάστασης του γεωεναλλάκτη του υβριδικού συστήματος υπολογίστηκαν σχεδόν στο ήμισυ αυτών του αμιγώς γεωθερμικού, όμως τα ετήσια κόστη λειτουργίας αυξήθηκαν σημαντικά. Το ίδιο συνέβη και στα ετήσια έξοδα συντήρησης σε μικρότερο βαθμό όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Η αρχική εξοικονόμηση του γεωεναλλάκτη επιτρέπει 45 χρόνια λειτουργίας πριν την ζημίωση.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση κόστους μεταξύ υβριδικού και γεωθερμικού συστήματος [92]

	Υβριδικό	Γεωθερμικό	Εξοικονόμηση
Αριθμός γεωτρήσεων	400	715	-
Βάθος γεωτρήσεων [m]	152,4	152,4	-
Απόσταση μεταξύ γεωτρήσεων [m]	4,57	4,57	-
Κόστος γεωεναλλάκτη [\$]	5 600 000	10 000 000	+4 400 000
Κόστος ενεργειακής κατανάλωσης [\$ /έτος]	2 394 600	2 302 500	-92 100
Κόστη συντήρησης [\$ /έτος]	80 000	73 700	-6 300

4.1.2 Ηλιακοί συλλέκτες

Στο πεδίο της ηλιακής ενέργειας ένα από τα αξιοσημείωτα σημεία προόδου είναι ο συνδυασμός ενός ηλιακού συλλέκτη με μία αντλία θερμότητας (Solar Assisted Heat Pump, SAHP) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Αυτό το υβριδικό σύστημα, προάγει μία «πράσινη λύση» κάλυψης ενός μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της θέρμανσης/ψύξης αλλά και την παραγωγή και αποθήκευση ζεστού νερού χρήσης. Επιπλέον, αμφότερες οι αποδόσεις των δύο συστημάτων αυξάνονται [93].

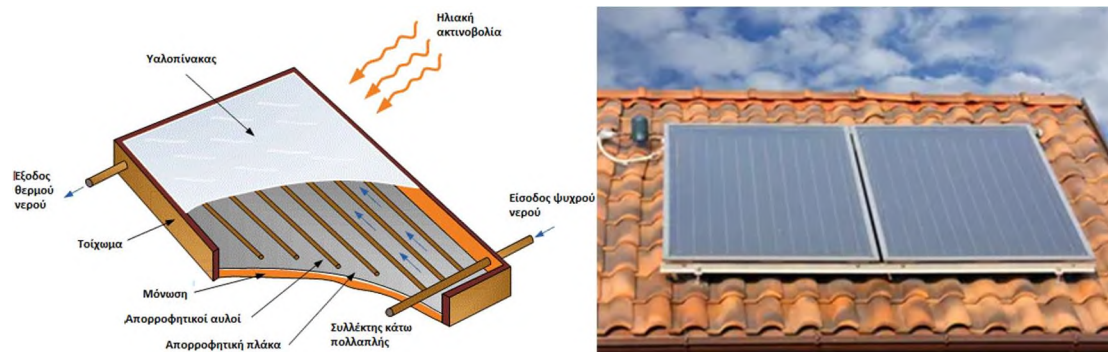


Σχήμα 4.9: Υβριδικό σύστημα Α.Θ. με ηλιακό συλλέκτη [94]

Σε θερμότερες κλιματικές συνθήκες όπου η θέρμανση απασχολεί ιδιαίτερως τα εν λόγω συστήματα, το αυτόνομο γεωθερμικό σύστημα μπορεί να οδηγήσει στην μείωση της διαθέσιμης γεωθερμικής ενέργειας του εδάφους. Αυτό συμβαίνει διότι τα πολύ υψηλά φορτία που απάγονται από το υπέδαφος δεν προλαβαίνουν να αναπληρωθούν. Επομένως προξενείται μείωση της θερμοκρασίας εισόδου της

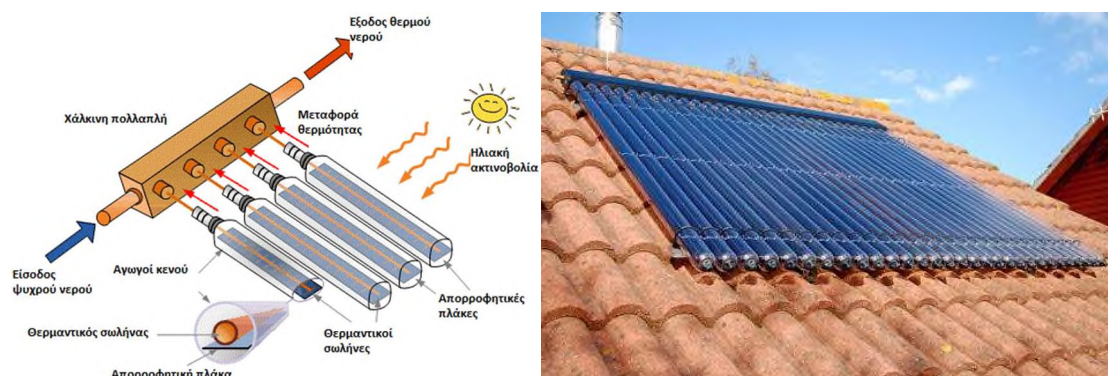
αντλίας σε σχέση με αυτή του σχεδιασμού, οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση του συστήματος. Όπως συμβαίνει και με τις δομές που χρειάζονται κυρίως ψύξη, η ενσωμάτωση μίας συμπληρωματικής πηγής θερμότητας όπως ένας γυάλινος ή πλαστικός ηλιακός συλλέκτης [17] μπορεί να μειώσει σημαντικά το μέγεθος του γεωεναλλάκτη και επομένως των σχετικών κοστών της αγοράς και της εγκατάστασης. Η λειτουργία του συστήματος ρυθμίζεται έτσι ώστε το γεωθερμικό μέρος να αφορά περισσότερο τις ψυκτικές απαιτήσεις, ενώ τα φωτοβολταϊκά να διευθύνουν αυτές της θέρμανσης που δεν ικανοποιούνται από την γεωθερμία [20].

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι ένας τύπος εναλλακτών θερμότητας που θερμαίνουν ένα ρευστό μέσο μεταφοράς της θερμότητας η οποία αποσπάται από την ηλιακή ενέργεια. Οι πιο διαδεδομένος τύπος τους είναι οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από μία επίπεδη πλάκα από χαλκό ή αλουμίνιο λόγω της υψηλής τους θερμικής αγωγιμότητας. Το ρευστό μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι συνήθως νερό (με προσθήκη αντιψυκτικού στα ψυχρά κλίματα) και βρίσκεται μέσα σε παράλληλους χάλκινους αγωγούς που είναι διατεταγμένοι κατά μήκος της πλάκας και συγκολλημένοι πάνω της. Ο συλλέκτης διατρέχεται κατά πλάτος του από μία πολλαπλή σε κάθε πλευρά οι οποίες εισάγουν και εξάγουν τα ψυχρά και θερμά ρεύματα του νερού αντίστοιχα. Όταν η θερμότητα περάσει στο εσωτερικό των αγωγών μεταφέρεται από την μία άκρη στην άλλη μέσω συναγωγής και απομακρύνεται με το θερμό ρεύμα. Η διάταξη περιβάλλεται από μονωτικό αφρό στα πλάγια και στο κάτω μέρος και περιβάλλεται από ξύλινα ή μεταλλικά τοιχώματα. Στο πάνω μέρος τοποθετείται ένα φύλλο γυαλιού ή πλαστικού που επιτρέπει την είσοδο του φωτός στο εσωτερικό. Αυτοί οι συλλέκτες είναι ικανοί να παραγάγουν ζεστό νερό έως 100 °C και χρησιμοποιούνται ευρέως σε κτίρια για θέρμανση και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης [95]. Ο απλός τους σχεδιασμός και η εύκολη εγκατάσταση είναι πλεονεκτήματα που τα καθιστούν ευρεία και οικονομική λύση [96].



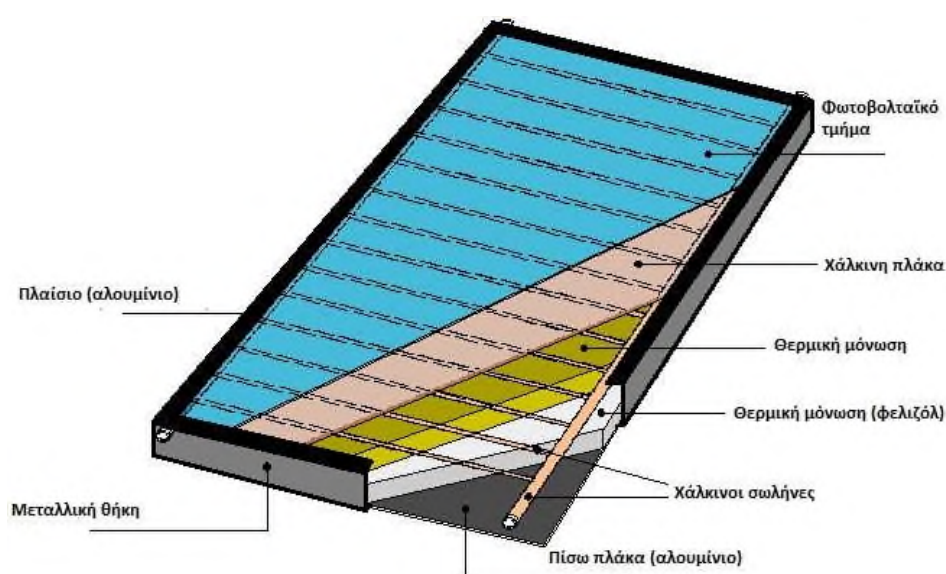
Σχήμα 4.10: Ηλιακός συλλέκτης επίπεδης πλάκας [96]

Στους συλλέκτες κενού, η απορρόφηση της θερμότητας γίνεται μέσα σε γυάλινους αγωγούς, διατεταγμένους παράλληλα και συνδεδεμένους σε μία χάλκινη πολλαπλή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Μέσα σε κάθε αγωγό τοποθετείται μία ξεχωριστή απορροφητική πλάκα σε επαφή με χάλκινο σωλήνα όπως και πριν. Ο αέρας που βρίσκεται στο εσωτερικό των αγωγών αφαιρείται ώστε να δημιουργηθεί αποτελεσματική μόνωση λόγω του κενού, όπου είναι αδύνατη η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Το ρευστό που απορροφά την θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας εξατμίζεται και ανεβαίνει στο πάνω μέρος του αγωγού, σε έναν θερμό βολβό μέσα στην πολλαπλή όπου παραδίδει την θερμότητα, συμπυκνώνεται και επιστρέφει στον πάτο του αγωγού. Εν γένει, αυτός ο τύπος είναι πιο αποδοτικός από τον επίπεδο και λειτουργεί αποτελεσματικά υπό περισσότερες γωνίες πρόσπτωσης του φωτός. Οι θερμοκρασίες εξόδου που επιτυγχάνονται είναι υψηλότερες (πάνω από 80 °C έως και 150 °C), επομένως προτιμώνται σε ψυχρότερα κλίματα με μεγαλύτερες ανάγκες, ακόμη και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, οι βελτιωμένες δεξιότητές τους αντικατοπτρίζονται και στο αυξημένο τους κόστος [97].



Σχήμα 4.11: Συλλέκτες κενού [97,98]

Ένας τύπος που συνδυάζει την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού σε μία μονάδα είναι οι συλλέκτες PVT. Κατά αυτήν την αρχιτεκτονική, η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας συγκεντρώνεται σε μία μόνο συσκευή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Αποτελείται από ένα κλασικό φωτοβολταϊκό πάνελ (κρυσταλλικού) πυριτίου στο πίσω μέρος του οποίου τοποθετείται ένας θερμικός συλλέκτης-συνήθως επίπεδος αλλά δύναται να είναι και κενού. Τα φωτοβολταϊκά κελιά συνήθως φτάνουν ηλεκτρικές αποδόσεις μεταξύ 15-20% και το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα που χάνεται ανεκμετάλλευτη ή ακόμη και υπερθερμαίνει το πάνελ μειώνοντας την απόδοσή του. Οι συλλέκτες PVT συλλαμβάνουν αυτές τις απώλειες και τις διαθέτουν στο ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας. Παράλληλα αν ο συλλέκτης συνδέεται με αντλία θερμότητας, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει μπορεί να οδηγήσει τον συμπιεστή της, ελαττώνοντας το κόστος διάθεσης της ενέργειας μέσω της ανανεώσιμης πηγής του ήλιου αλλά και τις εκπομπές CO₂ για την παραγωγή της. Παρόλο που η θερμότητα που αποσπάται είναι λιγότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους συλλέκτες, παρουσιάζουν αυξημένες ενεργειακές αποδόσεις, SPF και η συμπερίληψη της ανανεώσιμης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα τα καθιστά ως πολύ ανταγωνιστικά για το μέλλον των ηλιακών συλλεκτών. Μπορούν να εφαρμοστούν σε κατοικίες και σε βιομηχανίες αλλά η περιπλοκότητα του σχεδιασμού τους αυξάνει το ήδη μεγάλο κόστος των φωτοβολταϊκών [99].



Σχήμα 4.12: Δομή συλλέκτη PVT [100]

Η διάταξη του συστήματος μπορεί να είναι μονής ή διπλής πηγής. Στα συστήματα μονής πηγής, τα πάνελ είναι η μοναδική πηγή θερμότητας της αντλίας και μπορούν να αποδειχθούν αποτελεσματικά σε περιπτώσεις όπου η διατάραξη του εδάφους είναι προβληματική [17]. Ωστόσο, οι δυνατότητές τους είναι περιορισμένες αφού δεν προβλέπουν την λειτουργία ψύξης και εξαρτώνται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες για την παραγωγή των συλλεκτών [101]. Η ρύθμιση διπλής πηγής, που είναι και η πιο διαδεδομένη, λειτουργεί με προσφορά θερμότητας και από τις δύο πηγές (ηλιακή ενέργεια και γεωθερμία) που προσφέρουν περισσότερη θέρμανση, ψύξη και ZNX σε πληθώρα κλιματικών συνθηκών [101]. Η παροχή επομένως διαμοιράζεται μεταξύ των δύο κλάδων ανάλογα με τις συνθήκες για βέλτιστη λειτουργία. Σε περιόδους αυξημένης ηλιοφάνειας ο συλλέκτης αναλαμβάνει την πλειονότητα του ρευστού, διαφορετικά το βάρος πέφτει στην αντλία θερμότητας [101].

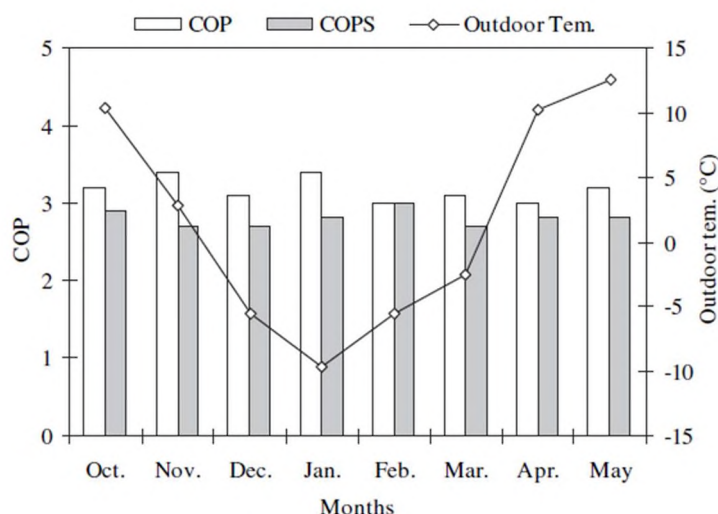
Μία άλλη κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου. Αν το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί μέσα στον συλλέκτη ή/και την μονάδα δευτέρας πηγής που ταυτόχρονα παίζουν και το ρόλο του εξατμιστή, τότε το σύστημα λέγεται «άμεσης εκτόνωσης». Αυτός ο τύπος είναι η πιο απλή ρύθμιση, ειδικά σε μονή πηγή που προορίζεται κυρίως για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Η ενσωμάτωση του εξατμιστή στους συλλέκτες απλουστεύει την κατασκευή και μειώνει το κόστος. Επίσης η απουσία αντιψυκτικού μείγματος προσφέρει καλύτερη μεταφορά θερμότητας και χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας οι οποίες δεν πρέπει να πέσουν πολύ λόγω κινδύνου παγώματος και αστοχίας. Ωστόσο, οι συνθήκες εξάτμισης δεν είναι σταθερές λόγω της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την διακύμανση της απόδοσης [101].

Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το μέσο απορρόφησης της θερμότητας είναι μείγμα νερού και αντιψυκτικού και η μεταφορά της γίνεται παρουσία ενδιάμεσου εναλλάκτη/εξατμιστή, το σύστημα ονομάζεται «έμμεσης εκτόνωσης» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Ο διαχωρισμός των συστημάτων επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα, η δυνατότητα υιοθέτησης μίας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού, σε περιπτώσεις που η ηλιακή ενέργεια δεν είναι άμεσα διαθέσιμη ή επαρκής. Επίσης, η μεταφορά θερμότητας μέσω της εξάτμισης ευνοείται από σταθερές συνθήκες, οι οποίες δεν είναι εξασφαλισμένες

[illegible]

Οι Bi et al. διεξήγαγαν μία πειραματική μελέτη συγκρίνοντας έναν ηλιακό συλλέκτη, μία γεωθερμική αντλία θερμότητας με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη διπλού σπιδάλ και έναν υβριδικό συνδυασμό τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέσο φορτίο θέρμανσης του ηλιακού συλλέκτη ήταν 2 333 W και ο μέσος COP 2,73. Για την γεωθερμική αντλία θερμότητας τα αντίστοιχα αποτελέσματα ήταν 2 298 W και 2,83. Τέλος για το υβριδικό σύστημα ήταν 2 316 W και 2,78 [102].

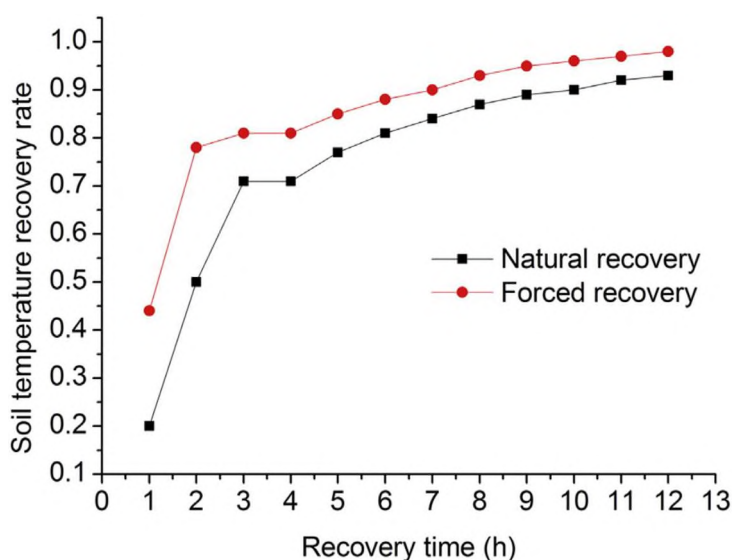
Μία άλλη πειραματική μελέτη έλαβε χώρα στο Ερζερούμ από τον Οκτώβριο του 2008 ως τον Μάιο του 2009 από τους Bakirci et al. [103] Περιλάμβανε την εξέταση ενός υβριδικού συστήματος με κατακόρυφο κλειστό γεωθερμικό σύστημα και ηλιακούς συλλέκτες στο ψυχρό κλίμα της περιοχής. Οι τιμές του COP της αντλίας θερμότητας έλαβαν τιμές 3-3,4 και του συνολικού συστήματος (COPS) 2,7-3 (μαζί με αντλίες κυκλοφορίας και άλλα εξαρτήματα), δηλαδή μειωμένες κατά περίπου 10%. Συγκεκριμένα, οι χαμηλότερες τιμές καταγράφηκαν στις 19 Φεβρουαρίου εν μέσω της πιο απαιτητικής περιόδου θέρμανσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Το επενδυτικό κόστος υπολογίστηκε περίπου 9 810 €.



Σχήμα 4.14: Διακύμανση των COP, COPS και εξωτερικής θερμοκρασίας ανά μήνα [103]

Στην Σουηδία, οι Akander et al. [104] εξέτασαν ένα υβριδικό σύστημα στο Σκανδιναβικό κλίμα που βρίσκονταν σε λειτουργία για 2 χρόνια και οι μετρήσεις διήρκεσαν 1 χρόνο: από τον Φεβρουάριο του 2007 ως τον Φεβρουάριο του 2008. Η Γ.Α.Θ. ήταν κλειστού τύπου, οριζόντια και ο SPF της ήταν 2,85. Για το συνολικό σύστημα ο SPF έπεσε στο 2,09. Η εγκατάσταση ωστόσο ήταν πρόχειρη.

Όσον αφορά την αναζωογόνηση του εδάφους, οι Dai et al. [105] έδειξαν ότι η ανάρρωση της θερμοκρασίας του εδάφους επιταχύνεται με την βοήθεια του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την φυσική αναζωογόνηση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επαναφόρτισης των γεωτρήσεων με ζεστό νερό από την δεξαμενή αποθήκευσης του ηλιακού συλλέκτη όταν η αντλία θερμότητας δεν χρησιμοποιείται. Μέσω της επαναφόρτισης του εδάφους η θερμοκρασία ανακτήθηκε κατά περίπου 80% σε 2 ώρες, ταχύτερα από την φυσική διαδικασία η οποία ήταν περίπου 50% στον ίδιο χρόνο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Κατά την εξαναγκασμένη ανάρρωση ο μέσος COP της αντλίας ήταν ίσος με 4,09 ενώ κατά την φυσική ήταν 4,07. Η μελέτη έλαβε χώρα τον μήνα Ιανουάριο που είναι ο πιο κρύος στο Νταλιάν της Κίνας, όταν μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν $-7,3^{\circ}\text{C}$ και η μέση αρχική θερμοκρασία του υπεδάφους ήταν $13,8^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 4.15: Δείκτης ανάρρωσης της θερμοκρασίας του εδάφους ανά ώρα [105]

Στο πανεπιστήμιο της Σανγκάης, προτάθηκε ένα σύστημα θέρμανσης του εργαστηρίου “Green Energy” που απαρτιζόταν από ένα κατακόρυφο κλειστό σύστημα γεωθερμίας με ηλιακούς συλλέκτες κενού. Επίσης προβλέπεται αποθήκευση θερμότητας στο υπέδαφος όταν οι ηλιακοί συλλέκτες δεν λειτουργούν για θέρμανση. Η προσομοίωσή των Andresen et al. έδειξε ότι η κατανάλωση ηλεκτρισμού μπορεί να μειωθεί κατά 26,1% λόγω της μείωσης του χρόνου λειτουργίας της Γ.Α.Θ. και της αναθέρμανσης του εδάφους. Ο COP για το συνολικό

σύστημα ήταν 4,5 ενώ χωρίς τον ηλιακό συλλέκτη ήταν 4,2 για την περίοδο θέρμανσης εντός 1 έτους [106].

Σε μελέτη του πανεπιστημίου του Μιλάνο σχετικά με τα υβριδικά συστήματα των επεκτεινόμενων ηλιακών συλλεκτών PVT με Α.Θ., συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα διαφόρων προσφάτων μελετών. Βρέθηκε πως τα συστήματα άμεσης εκτόνωσης απέφεραν COP εύρους 2,7-7 υπό ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα συστήματα έμμεσης εκτόνωσης αποδείχθηκαν λιγότερο αποδοτικά με COP εύρους 2,3-4,5 όμως η διπλή πηγή επιτρέπει την κάλυψη όλων των αναγκών ενός κτιρίου σε θέρμανση/ψύξη σε όλες τις περιόδους του χρόνου [101].

4.1.3 Ανάκτηση θερμότητας που χάνεται

Τα κτίρια χρησιμοποιούν ζεστό νερό με πολλούς τρόπους όπως ντους, μπάνια, νεροχύτες και πλυντήρια. Ένα μεγάλο μέρος της αρχικής θερμότητας παραμένει στα απόνερα και χάνεται ενώ μπορεί να ανακτηθεί. Το υπουργείο ενέργειας των Η.Π.Α. εκτιμά ότι περίπου 350 δις kWh ενέργειας του ζεστού νερού χάνεται ετησίως μέσω των αποχετεύσεων. Η μέθοδος για την αξιοποίηση αυτής της θερμότητας είναι ο εναλλάκτης θερμότητας “gravity-film” (GFX) όπου η θερμότητα των νερών μπορεί να επιστραφεί στην εγκατάσταση για παρόμοιες χρήσεις από τις οποίες προήλθε. Πρόκειται για έναν απλό κατακόρυφο εναλλάκτη από χαλκό. Τα απόβλητα πέφτουν στον κεντρικό σωλήνα από την κορυφή, ενώ η είσοδος του κρύου νερού που πρόκειται να προθερμανθεί γίνεται στο κάτω μέρος μέσα σε έναν λεπτό αγωγό που τυλίγεται γύρω από τον κεντρικό κατά το μήκος του [107]. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

Η χαμένη θερμότητα ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας μια αντλίας θερμότητας και δη γεωθερμικής δεν έχει εξεταστεί ευρέως. Οι Li et al. [108] εξέτασαν ένα σύστημα συμπαραγωγής ισχύος και θερμότητας (CHP) με υποσυστήματα φυσικού αερίου και γεωθερμίας αντίστοιχα με παραγωγή θερμού νερού. Τα καυσαέρια του θαλάμου καύσης είναι αρκετά για να παραγάγουν θερμό νερό 55 °C μέσω εναλλάκτη θερμότητας όπως και η Γ.Α.Θ. Όταν αυτό συμβαίνει ξεχωριστά το σύστημα θεωρείται παράλληλο. Αντίθετα, όταν η παραγωγή της Γ.Α.Θ. γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (<45 °C) ένα μέρος των καυσαερίων παρέχει την

υπολειπόμενη θερμότητα και το σύστημα είναι σε σειρά. Ως αποτέλεσμα, η τελική πίεση του συμπιεστή είναι μικρότερη σε σχέση με το παράλληλο και η καταναλισκόμενη ισχύς μικρότερη έως και 34,7%. Η μείωση του λόγου πίεσης στον συμπιεστή αυξάνει επίσης τον COP της Γ.Α.Θ. από 3,5 σε 3,6-6.

4.1.4 Λέβητες

Οι συμβατικοί λέβητες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υποβοηθητικές πηγές θερμότητας στα υβριδικά συστήματα, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνολογιών. Το γεωθερμικό σύστημα αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, ενώ ο λέβητας χρησιμοποιείται ως συμπληρωματική ή εφεδρική πηγή ενέργειας κατά την διάρκεια περιόδων με υψηλή ζήτηση θέρμανσης ή όταν το γεωθερμικό υποσύστημα δεν μπορεί να καλύψει μόνο του την ανάγκη, έχει πάθει βλάβη κ.α. Ο λέβητας μπορεί να είναι οποιουδήποτε είδους, χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ηλεκτρισμό για να παράγει θερμότητα για την αντλία ή ζεστό νερό και ατμό που εκμεταλλεύεται η εγκατάσταση. Η αναβάθμιση ενός κτιρίου με αυτό το σύστημα είναι πιο εύκολη απ' ό,τι με τους ηλιακούς συλλέκτες [109]. Επίσης στα πολύ ψυχρά κλίματα, ο λέβητας μπορεί αποτρέψει το πάγωμα των ευαίσθητων μερών του συστήματος και να βελτιώσει την απόδοση [83], όμως το αποτύπωμα άνθρακα παραμένει υψηλότερο καθώς τα δύο υποσυστήματα του εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια που παράγουν τα ορυκτά καύσιμα. Επομένως, οι στόχοι που θέτονται για το μέλλον της ενεργειακής οικονομίας και την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου δεν θα πραγματοποιηθούν με βάση αυτά τα συστήματα.

4.1.5 Αντλίες αέρα

Η αντλίες θερμότητας αέρα είναι κατάλληλες ώστε να χρησιμοποιηθούν σε ένα υβριδικό σύστημα ως βοηθητικές πηγές και προορισμοί θερμότητας, επιτρέποντας θέρμανση και ψύξη όπως και οι γεωθερμικές. Η βέλτιστη λειτουργία τους βασίζεται στην σωστή κατανομή των φορτίων μεταξύ των δύο αντλιών. Όταν οι απαιτήσεις δεν είναι μεγάλες, η αντλία αέρα μπορεί να είναι πιο αποδοτική από την γεωθερμική αλλά προτιμάται σε ηπιότερα κλίματα για να αποφευχθεί ο συχνός κίνδυνος παγώματος του εξατμιστή [83].

Οι Nam et al. σύγκριναν την λειτουργία τριών συστημάτων: ένα γεωθερμικό ανοιχτού βρόχου, ένα αντλίας αέρα και ένα υβριδικό όπου θα επιλεγόταν η καταλληλότερη πηγή. Στη συνέχεια, διεξήχθη ετήσια αξιολόγηση των συστημάτων σε διάφορες πόλεις της Ιαπωνίας με μεταβολή παραμέτρων όπως το ψυκτικό μέσο, η ισχύς της αντλίας και η διαφορά θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ετήσιος παράγοντας απόδοσης (APF) του υβριδικού συστήματος ήταν αυξημένος κατά 2-7% σε σχέση με το γεωθερμικό σύστημα και κατά 4-18% σε σχέση με την αντλία αέρα [110].

Στην Μεσογειακή ακτή της Ισπανίας, οι Pedro et al. σε μελέτη προσομοίωσης παρουσίασαν συστήματα ψύξης για ένα κτίριο γραφείων με μεγάλες ανάγκες σε ψύξη. Για να μειωθεί η κατανάλωση ρεύματος, προτάθηκε ο συνδυασμός κλειστού γεωθερμικού κυκλώματος υποβοηθούμενο από αντλία αέρα και αποθήκευση ζεστού νερού σε δεξαμενή. Ο παραπάνω υβριδικός συνδυασμός κατείχε τον υψηλότερο συντελεστή απόδοσης ψύξης (περίπου 3,8) και την μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας: 40% συγκριτικά με την αντλία αέρα και 18% συγκριτικά με την γεωθερμική. Επίσης, υπολογίζεται πως το υβριδικό σύστημα θα είχε το χαμηλότερο τελικό κόστος μεταξύ των υπόλοιπων συνδυασμών σε βάθος 35 ετών, το μοναδικό που θα ήταν κάτω από 200 000 € [111].

4.2 Πρόοδος των ψυκτικών μέσων

4.2.1 Εισαγωγή

Πριν την εισαγωγή των συνθετικών ψυκτικών μέσων που γνωρίζουμε σήμερα, οι ουσίες που χρησιμοποιούνταν ήταν φυσικές, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και ειδικά η αμμωνία. Εκείνη την περίοδο, λόγω της τοξικότητάς της και των θανάσιμων κινδύνων οι βιομηχανικές εφαρμογές άνθιζαν περισσότερο από τις οικιακές. Τα περισσότερα σπίτια που είχαν τέτοιους ψύκτες ανήκαν σε εύπορους αγοραστές και οι περισσότεροι βασίζονταν σε πρωτόγονες τεχνικές ψύξης όπως οι μη-μηχανικοί καταψύκτες πάγου [112].

Τη δεκαετία του '30 αναπτύχθηκαν μια σειρά από συνθετικές ουσίες γνωστές ως χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs). Η ασφάλεια, το χαμηλό κόστος και η αποδοτικότητά τους έφερε επανάσταση στον κλάδο και η

μαζική παραγωγή των συστημάτων κλιματισμού και ψύξης τα έκανε προσιτά σε περισσότερους καταναλωτές. Από τα πρώτα, το περίφημο ήταν το R-12 γνωστό και ως φρέον. Χρήσιμα επίσης ήταν και τα R-11 και R-13. Από τα δεύτερα, το κυριότερο ήταν το R-22 και άλλα συνήθη ήταν τα R-123 και R-124. Τις επόμενες δεκαετίες, κατά την εξακρίβωση του κινδύνου της καταστροφής της στιβάδας του όζοντος, ανακαλύφθηκε πως αυτές οι ουσίες συνείσφεραν στην αποδυνάμωση του. Αυτό συνέβαινε λόγω της περιεκτικότητάς τους σε χλώριο. Όταν τα μόρια τους έρχονταν σε επαφή με υπεριώδη ακτινοβολία, τα άτομα του χλωρίου αποσπώνταν και όταν έφταναν στην στρατόσφαιρα αποδυνάμωναν το όζον. Ο δείκτης μέτρησης του κινδύνου ενός ψυκτικού μέσου είναι το Δυναμικό Καταστροφής του Όζοντος (Ozon Depletion Potential ή ODP). Οι CFCs θεωρήθηκαν η βάση αυτής της κλίμακας, δηλαδή το R-11 έχει τιμή 1-περίπου όσο και οι υπόλοιποι. Οι HCFCs είναι λιγότερο βλαβεροί και οι τιμές τους έχουν εύρος 0,01-0,1. Συγκεκριμένα το R-22 έχει τιμή 0,05. Ως απάντηση σε αυτή την κρίση, το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1987 στόχευσε την σταδιακή κατάργηση των CFCs και HCFCs. Οι ανεπτυγμένες χώρες απαγορεύτηκε να χρησιμοποιούν ή να παράγουν CFCs μετά το 1996. Για τους HCFCs, ο χρονικός ορίζοντας ήταν πιο ελαστικός λόγω του μικρότερου κινδύνου. Με μία τροπολογία του 1990, η καταληκτική ημερομηνία κατάργησης για τις ανεπτυγμένες χώρες ορίστηκε ως το 2020 [112].

Το επόμενο βήμα έγινε με τα ψυκτικά υδροφθορανθράκων (HFCs) από τα οποία απουσίαζε το χλώριο. Όπως και τα προηγούμενα, ήταν φτηνά, ασφαλή και δεν κατέστρεφαν την στιβάδα του όζοντος. Τα πιο γνωστά μεταξύ αυτών είναι τα R-134a, R-143a, R-125 αλλά και μείγματα όπως τα R-404A και R-410A. Αυτός ο τύπος είναι ο πιο διαδεδομένος σήμερα και τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν HFCs. Το πρόβλημα που ενυπάρχει σε αυτά είναι το πολύ Υψηλό Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential, GWP). Αποδείχτηκε πως αυτές οι ουσίες είναι ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου και συνέβαλαν στην νέα κλιματική κρίση. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ίσως το πιο γνωστό αέριο του θερμοκηπίου και αποτελεί την βάση της κλίμακας του GWP με τιμή ίση με 1. Οι HFCs είναι πολύ πιο βλαβεροί, έως και χιλιάδες φορές, και το εύρος των GWP τους είναι από τιμές μικρότερες του 1 έως περίπου 12 500 [111]. Οι σχετικές τιμές ορισμένων ουσιών δίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: GWP & ODP διαφόρων ψυκτικών μέσων [113]

Ψυκτικό Μέσο	Είδος	GWP	ODP
R-11	CFC	4 000	1
R-12	CFC	8 500	1
R-22	HCFC	1 500	0,05
R-134a	HFC	1 300	0
R-410A	HFC	1 720	0

Με παρόμοιο τρόπο, το Πρωτόκολλο του Κιότο του 1997 στόχευσε στην μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένων και των HFCs. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αρχικά το 2006 και τελευταία το 2014, έχει θεσπίσει εξελισσόμενους κανονισμούς για την μείωση των φθοριούχων ομάδων αυτών (“F-gases”). Σύμφωνα με τον τρέχοντα κανονισμό 517/2014, οι εκπομπές των F-gases θα πρέπει να μειωθούν κατά τα δύο τρίτα των επιπέδων του 2014 έως το 2030 [114]. Αργότερα, το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ με την τροπολογία του Κιγκάλι το 2016 έθεσε συγκεκριμένους στόχους για την μείωση κατανάλωσης και παραγωγής των HFCs, χωρίς όμως ημερομηνία ολικής εξάλειψης. Για τις ανεπτυγμένες χώρες προβλέπεται σταδιακή μείωσή τους κατά 85% έως το 2036 [112].

Η βιομηχανία και η επιστήμη οδηγούνται σε αναζήτηση νέων εναλλακτικών που θα διατηρήσουν ή θα ενισχύσουν τις αποδόσεις ενώ ταυτόχρονα θα είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον. Οι αντλίες θερμότητας θα ακολουθήσουν αυτήν την τάση όπως και ο υπόλοιπος τομέας της θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού.

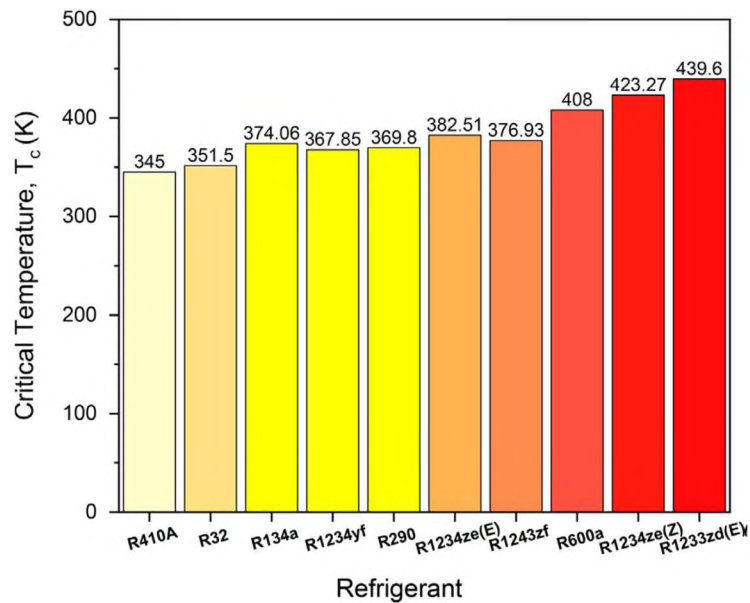
4.2.2 HFOs

Οι hydrofluoro-olefins ή HFOs είναι η 4^η γενιά των συνθετικών ψυκτικών. Χαρακτηρίζονται από μηδενικό ODP και πολύ χαμηλά GWP και αναπτύσσονται ως πολλά υποσχόμενοι απόγονοι των αποσυρόμενων HFCs ελπίζοντας να μετριάσουν τις επιβλαβείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις που παρατηρούνται μέχρι σήμερα διατηρώντας τα ίδια επίπεδα αποδόσεων. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της δομής τους είναι ο διπλός δεσμός μεταξύ δύο ατόμων άνθρακα. Αυτός ο δεσμός τα καθιστά λιγότερο σταθερά και η αποσύνθεσή τους στην ατμόσφαιρα συμβαίνει μέσα σε λίγες μέρες αντί για χρόνια όπως στα HFCs, επομένως ο αντίκτυπός τους στο

περιβάλλον μειώνεται όπως φαίνεται από τις χαμηλές τιμές GWP [115]. Θεωρούνται ασφαλείς ουσίες, αν και εν γένει είναι πιο εύφλεκτες από τους HFCs. Αυτό έχει δημιουργήσει ορισμένες ενστάσεις καθώς προτείνονται ιδιαιτέρως για τα φορητά συστήματα κλιματισμού όπως αυτά των αυτοκινήτων, αλλά οι ουσίες έχουν εγκριθεί από την Ευρωπαϊκή ένωση για αυτήν την χρήση [116]. Ωστόσο, ως φθοριούχα αέρια αναμένεται να αποσυρθούν και αυτά στο προσεχές μέλλον.

Τα HFOs είναι επίσης συμβατά με τον σχεδιασμό των τωρινών συστημάτων που σημαίνει ότι μία πιθανή αναβάθμιση ίσως να μην χρειαστεί σημαντικές τροποποιήσεις, ωστόσο η πλήρης παράλειψή τους θα μειώσει την ισχύ και την απόδοσή τους, λόγω της χαμηλότερης λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης [116]. Οι κατασκευαστές έχουν την δυνατότητα να αναπτύξουν καινοτόμα μοντέλα αντλιών θερμότητας προσαρμοσμένα σε αυτά ώστε να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις δυνατότητές τους.

Το πρώτο και σημαντικότερο HFO, R-1234yf, τείνει να χρησιμοποιηθεί στα φορητά συστήματα κλιματισμού όπως αυτά των αυτοκινήτων αντικαθιστώντας το R-134a, ένα πολύ δημοφιλές HFC για αυτήν την χρήση [118]. Στην κλίμακα του GWP, βρίσκεται σε θέση εκατοντάδες φορές χαμηλότερη. Έχει τιμή ίση μόνο με 4, ενώ το R-134a έχει 1 430. Ακόμη, οι θερμοδυναμικές τους ιδιότητες είναι σε μεγάλο βαθμό παρόμοιες όπως η κρίσιμη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Αυτή είναι η θερμοκρασία που όταν η τιμή της ξεπεραστεί, η ουσία δεν μπορεί να συμπυκνωθεί με αύξηση της πίεσης. Στην πραγματικότητα το ρευστό δεν είναι ούτε υγρό ούτε αέριο αλλά βρίσκεται σε μία ενδιάμεση φάση όπου έχει τις ιδιότητες και των δύο φάσεων των οποίων οι πυκνότητες εξισώνονται. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της σε ένα ψυκτικό, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των εφαρμογών στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί διότι μπορεί να καταλάβει πολλές και υψηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης που συναντώνται στην βιομηχανία. Το R-1234yf αλλά και άλλα HFOs έχουν παρόμοιες τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας με τα HFCs που σημαίνει ότι κατά αυτό το κριτήριο τουλάχιστον δύναται να τα αντικαταστήσουν σε διάφορες διεργασίες. Για αυτούς τους λόγους το R-1234yf έχει κερδίσει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνών ως το μείζον υποψήφιο εναλλακτικό αυτών των εφαρμογών [119].



Σχήμα 4.16: Σύγκριση κρίσιμης θερμοκρασίας ψυκτικών μέσων [119]

Άλλα HFOs που εξετάζονται με παρόμοια πλεονεκτήματα είναι τα εξής [120]:

- R1234ze: Πληθώρα εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων και των αντλιών θερμότητας. Πολύ χαμηλότερο GWP σε σχέση με τα παλαιότερα ψυκτικά, ίσο με 7.
- R1234ze(E): Ισομερές του προηγούμενου με ίδιες εφαρμογές αλλά μη-εύφλεκτο.
- R1233zd/ R1233zd(E): Κατάλληλα για βιομηχανικά συστήματα ψύξης λόγω των βελτιωμένων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών και αποδόσεών τους. Πολύ φιλικά προς το περιβάλλον με $GWP < 1$

Μία υποσχόμενη εφαρμογή τους που έχει εξετάζεται, είναι στις (ίσως γεωθερμικές) αντλίες θερμότητας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Οι Nawaz et al. πραγματοποίησαν μία προσομοίωση για να αξιολογήσουν την ικανότητα των R-1234yf και R-1234ze(E) να αντικαταστήσουν το R-134a. Είναι ικανά να το πραγματοποιήσουν, ειδικά το R-1234yf που δεν χρειάζεται αλλαγές στο αρχικό σύστημα. Για το δεύτερο, λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής θερμοχωρητικότητάς του που μειώνει ελαφρώς την απόδοση, προτείνεται ένας μεγαλύτερος συμπιεστής από αυτόν του αρχικού συστήματος για την επίτευξη της ίδιας ισχύος [121].

Σε κάποιες περιπτώσεις, τα μείγματα μεταξύ των HFCs και HFOs συνδυάζουν διάφορα επιθυμητά χαρακτηριστικά και των δύο ομάδων. Για παράδειγμα, την

μικρότερη ευφλεκτότητα των πρώτων σε αντάλλαγμα για μία μικρή αύξηση του GWP του μείγματος [119]. Για παράδειγμα σύμφωνα με τους Arrea et al., το μείγμα R-1234yf/R-134a με σύνθεση 90/10% κ.β. δεν είναι εύφλεκτο και έχει GWP κάτω από 150. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 16 και 14% σε σχέση με αυτήν των αγνών R-143a και R-1234yf αντίστοιχα. Αυτές οι μετρήσεις έγιναν σε διάρκεια μίας ημέρας σε οικιακό καταψύκτη. Ωστόσο η βέλτιστη φόρτιση του συστήματος ήταν 16% μεγαλύτερη από αυτήν του αγνού R-143a [122].

Κάποια αξιοσημείωτα μείγματα είναι τα:

- R-447A (μείγμα R-32, R-125, και R-1234yf)
- R-513A (μείγμα R-134a και R-1234yf)
- R-452A (μείγμα R-32, R-1234yf, και R-125)
- R-450A (μείγμα R-134a και R-1234ze(E))

4.2.3 R-32

Μία περίπτωση των HFCs που παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω του χαμηλού GWP είναι το ψυκτικό R-32 και τα μείγματα HFCs και HFOs με βάση το ίδιο. Το R-32 έχει χαμηλότερο GWP από το R-410A και τους περισσότερους HFCs, δηλαδή 675. Αυτή η τιμή είναι ακόμα υψηλή και μπορεί να μειωθεί στο 500 αναμειγνύοντάς το με HFOs όπως R-1234yf και R-1234ze χωρίς σημαντικές διαφορές [113]. Μία ακόμη εναλλακτική είναι το μείγμα R-1234yf, R-32 και R-152a (σύνθεσης 55%, 30% και 15% αντίστοιχα) το οποίο θα μπορούσε να αντικαταστήσει το R-407C (HFC) σε υπάρχουσες αντλίες θερμότητας. Η απόδοση είναι κοντά σε αυτήν του R-407C και είναι μεγαλύτερη σε υψηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Γενικά ο COP είναι χαμηλότερος κατά 1-6% και η κατανάλωση ρεύματος υψηλότερη κατά 2% κατά μέσο όρο. Οι συνολικές εκπομπές CO₂ μειώνονται κατά 8-20% σε οικιακές αντλίες [124]. Από την άλλη, στην βιομηχανία όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, οι αντλίες θερμότητας με HFOs όπως R-1234ze και R-1233zd είναι πιθανές εφαρμογές, λόγω της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας τους [123]. Σε αντλίες θερμότητας μεσαίου μεγέθους, το R-32 μπορεί να αποδειχθεί πιο αποδοτικό από το R-410A, το πλέον δημοφιλέστερο ψυκτικό των οικιακών συστημάτων, καθώς έχει πολύ υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και μικρή διαφορά αύξησης των απωλειών

πίεσης λόγω τριβών για την ίδια μαζική ροή, συμπεραίνουν οι Longo et al. Επίσης, σε θερμοκρασία 40 °C παρουσιάζει 49% υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης που θα μπορούσε να μειώσει την μαζική ροή στο μισό [125]. Τέλος, είναι λιγότερο εύφλεκτο και τοξικό από το R-410A και επομένως ασφαλέστερο. Το R-32 θα μπορούσε να είναι μία ενδιάμεση και παροδική λύση στο πρόβλημα της μείωσης της χρήσης των πιο βλαβερών HFCs. Όμως δεν θα μπορούσε να αποτελέσει μόνιμη εναλλακτική καθώς παραμένει ουσία επικίνδυνη για το περιβάλλον και υπόκειται στις σχετικές νομοθεσίες, επομένως στο μέλλον θα πρέπει να αντικατασταθεί πλήρως.

4.2.4. Φυσικά ψυκτικά μέσα

Η επόμενη εναλλακτική που δύναται να προσφέρει αυτές τις δυνατότητες σε συνδυασμό με περιβαλλοντικά οφέλη είναι τα φυσικά ψυκτικά μέσα. Λόγω των ιδιοτήτων τους μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας με μικρότερη φόρτιση, ενώ η συνεισφορά τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την καταστροφή της στιβάδας του όζοντος είναι αμελητέα έως μηδενική. Δυστυχώς, ελάχιστα τέτοια συστήματα διατίθενται στο εμπόριο και σχεδόν κανένα που να συμπεριλαμβάνει τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, παρά το ερευνητικό ενδιαφέρον [123]. Η μείωσή της ποσότητας με την οποία φορτίζεται το σύστημα συνεισφέρει στην προστασία του περιβάλλοντος μέσω των βλαβερών εκπομπών των ψυκτικών κατά την διάρκεια ζωής του συστήματος αλλά και κατά την διαδικασία παραγωγής και μεταφοράς τους. Ακόμη, η χρήση λιγότερου ψυκτικού οδηγεί σε χαμηλότερα κόστη και μεγαλύτερη ασφάλεια, ειδικά όταν πρόκειται για εύφλεκτες ουσίες. Παράλληλα πρέπει να διαφυλαχθεί η σταθερότητα της απόδοσης του συστήματος, διότι η μείωσή της κατά αυτόν τον τρόπο θα οδηγούσε σε κατανάλωση περισσότερης ενέργειας και αυξημένων έμμεσων εκπομπών CO₂ για την παραγωγή της. Επομένως, απαιτείται εξέταση της βελτιστοποίησης αυτών των παραμέτρων για την έμπρακτη πρόοδο του μέλλοντος των ψυκτικών μέσων.

Αμμωνία (R717)

Η αμμωνία ως ψυκτικό μέσο με την εμπορική ονομασία R717 συναντάται κυρίως στα βιομηχανικά συστήματα κλιματισμού και στα συστήματα τηλεθέρμανσης.

Στην πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά σε σύστημα κλιματισμού το 1903. Ως φυσικό μέσο, είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον με μηδενικά ODP και GWP. Συγκριτικά με τα συμβατικά ψυκτικά, αποφέρει υψηλότερες αποδόσεις κατά 3-10% από τα R22 και R-134a και το κόστος κατασκευής χαμηλότερο κατά 10-20% σε σχέση με τα CFCs, με αγωγούς μικρότερης διαμέτρου. Επίσης, κοστίζει μόνο 1\$/λίβρα ενώ το R410A 4\$/λίβρα [126,127].

Τα κυριότερα μειονεκτήματά της είναι η τοξικότητα, η διαβρωτικότητα και η ευφλεκτότητα. Πρώτον, σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να αποδειχθεί πολύ επικίνδυνη για τον άνθρωπο, όμως η διακριτή της οσμή την καθιστά εύκολα ανιχνεύσιμη σε περίπτωση διαρροής. Επιπροσθέτως, είναι ελαφρύτερη από τον αέρα και μπορεί να διαχυθεί στην ατμόσφαιρα σε εξωτερικούς χώρους. Δεύτερον, τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν χάλκινους αγωγούς λόγω της υψηλής τους αγωγιμότητας. Η αμμωνία είναι διαβρωτική ουσία και οδηγεί σε διαρροές και αστοχίες των συμβατικών αγωγών, επομένως οι σωληνώσεις από αλουμίνιο ή χάλυβα είναι απαραίτητοι με αυξημένο όμως κόστος. Παρόλα αυτά, λόγω των καλών της ιδιοτήτων για μεταφορά θερμότητας ο εξοπλισμός του συστήματος μπορεί να είναι μικρότερου μεγέθους. Τρίτον, έχουν συμβεί αρκετά ατυχήματα λόγω εκρήξεων αμμωνίας σε υψηλής συγκέντρωσης, αλλά με την κατάλληλη πρόληψη και λειτουργία τα περιστατικά αυτά μπορούν να αποφευχθούν [126,127]. Η ASHRAE σημειώνει ότι η αμμωνία «είναι δύσκολο να αναφλεγεί και δεν υποστηρίζει την καύση μετά την απόσυρση της πηγής ανάφλεξης» [128].

Η εφαρμογή του ψυκτικού μέσου αμμωνίας δεν έχει βρει αντίκρισμα στις εμπορικές-οικιακές αντλίες θερμότητας μικρού μεγέθους. Ένα πρωτότυπο μοντέλο σχεδιάστηκε στο Βασιλικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Σουηδίας μιας αντλίας νερού/νερού ισχύος 9 kW. Επιβεβαιώθηκε ότι μικρές ποσότητες ψυκτικού είναι αρκετές για την λειτουργία του συστήματος. Σε εναλλάκτη μικρο-καναλιών η απαιτούμενη ποσότητα ήταν 100 g και σε πλακοειδή 120 g. Ο COP της αντλίας ήταν 3,8-4,8 και η θερμοκρασία συμπύκνωσης άνω των 48 °C. Ο Palm καταλήγει στο ότι το μεγαλύτερο εμπόδιο για την εμπορευματοποίηση τέτοιων αντλιών είναι η απουσία κατάλληλων εξαρτημάτων αυτού του μεγέθους που μπορούν να υποστηρίξουν την αμμωνία [129].

Διοξείδιο του άνθρακα (R774)

Το διοξείδιο του άνθρακα, γνωστό ως ψυκτικό μέσο με την εμπορική ονομασία R774, χρησιμοποιείται στα συστήματα ψύξης από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η ανάπτυξη και η ευκολία της διαθεσιμότητας των CFC και HCFC το έθεσε εκτός ανταγωνισμού στα μέσα του αιώνα, όμως λόγω των περιορισμών των υπόλοιπων ψυκτικών μέσων η αξία του επανεξετάζεται ως μια εναλλακτική φιλικότερη προς το περιβάλλον.

Οι εφαρμογές του CO₂ στα παρόντα συστήματα εστιάζονται στα μεγάλα καταστήματα όπως τα σουπερμάρκετ, στην βιομηχανία και στις αντλίες θερμότητας για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Οι τελευταίες έχουν αντιμετωπίσει μεγάλη άνοδο στην Ιαπωνία γνωστές και ως μονάδες “EcoCute” [130] όπως στο Σχήμα 4.17. Στην Ευρώπη παρατηρείται μια κλίση προς την ένταξή του στα συστήματα κλιματισμού των αυτοκινήτων [123].



Σχήμα 4.17: Μονάδα Ecocute [131]

Το περιβαλλοντικό του αντίκτυπο είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό των τωρινών μέσων. Όπως και η αμμωνία, δεν αποτελεί κίνδυνο για την καταστροφή της στιβάδας του όζοντος επομένως το ODP του είναι μηδενικό. Φυσικά μπορεί να συνεισφέρει στην υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά πολύ λιγότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα. Για παράδειγμα το CO₂ έχει GWP ίσο με 1. Τα δημοφιλέστερα ψυκτικά

μέσα των HFC αυτή τη στιγμή όπως το R410A και το προαναφερθέν R32 έχουν GWP ίσα με 2 100 και 771 αντίστοιχα. Φυσικά οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου εξακολουθούν να είναι επιζήμιες όμως οι εναλλακτικές σε αυτόν τον τομέα είναι κατά πολύ χειρότερες [132].

Οι τιμές του ψυκτικού R-774 είναι επίσης χαμηλές-περίπου 2 \$/λίβρα-δηλαδή πολύ χαμηλότερες από αυτές των συμβατικών που κοστολογούνται στα 5-14 \$/λίβρα [133]. Προφανώς δεν υπάρχει ανησυχία έκλειψής του από την ατμόσφαιρα και πρόκειται να βρίσκεται διαθέσιμο παντού ως παραπροϊόν διαφόρων διεργασιών.

Επίσης η πυκνότητά του είναι πολύ μεγάλη, επομένως τα μεγέθη των σωλήνων και του συμπιεστή είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα των HFC. Σε αυτό συμβάλλει και ο υψηλότερος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας. Επίσης η πτώση πίεσης στους αγωγούς είναι συγκριτικά μικρότερη. Σε αντίθεση με την αμμωνία, δεν είναι διαβρωτικό για τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται όπως ο χαλκός και ο ορείχαλκος [134].

Παράλληλα, πρόκειται για σχετικά ασφαλές μέσο καθώς δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης, και η τοξικότητά του θεωρείται χαμηλή υπό τυπικές συνθήκες και χαμηλές συγκεντρώσεις. Ωστόσο, σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ασφυξία και γρήγορο θάνατο και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε κλειστούς χώρους χωρίς εξαερισμό, αφού δεσμεύει το οξυγόνο, είναι πυκνότερο από τον αέρα και δεν ανιχνεύεται με την οσμή. Επομένως ο έγκαιρος εντοπισμός των διαρροών είναι κρίσιμης σημασίας για την αποφυγή ατυχημάτων [135].

Η λειτουργία του R-774 συμβαίνει σε υψηλότερες πιέσεις από αυτές των HFO και HFC, έως και 5-10 φορές. Ο εξοπλισμός που θα πρέπει να τις αντέξει πρέπει να είναι πιο ανθεκτικός και επομένως πιο ακριβός, καθώς οι υψηλές πιέσεις συντελούν στην επιτάχυνση της φθοράς των εξαρτημάτων που μπορεί να οδηγήσει σε διαρροές [134].

Η εφαρμογή του σε θερμά κλίματα φαίνεται να είναι περιορισμένη, λόγω της χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας (31 °C) [136]. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπερνά αυτήν την τιμή σε πολλά μέρη του κόσμου. Όταν αυτή η θερμοκρασία ξεπεραστεί, ο ψυκτικός κύκλος δεν μπορεί να επιτευχθεί επαρκώς διότι σε αυτήν την

κατάσταση το μέσο δεν μπορεί να αλλάξει φάση και να υγροποιηθεί με μεταβολή της πίεσης. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά λόγω αυτών των συνθηκών των διεργασιών και ειδικοί μηχανισμοί πρέπει να επιστρατευθούν ώστε να μην ξεπεραστεί η κρίσιμη θερμοκρασία ή αλλιώς να λειτουργεί πέρα από αυτήν. Επομένως αυτό το ψυκτικό μέσο είναι γενικώς ακατάλληλο για τα θερμά κλίματα.

Τέλος, για τους παραπάνω λόγους, δεν είναι δυνατό να γίνει αναμόρφωση των παλιών ή τρεχόντων συστημάτων με το CO₂ ως ψυκτικό μέσο. Οι ιδιαιτερότητές του απαιτούν ειδικά προσαρμοσμένο εξοπλισμό και εξαρτήματα λόγω των υψηλών πιέσεων λειτουργίας και χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας [135].

Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες είναι εξαιρετικά ψυκτικά μέσα και χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε οικιακές συσκευές, όπως οι καταψύκτες, τα ψυγεία και οι αφυγραντήρες. Η ενσωμάτωση τους ήταν ήδη ευρεία από την προηγούμενη δεκαετία και συνεχίζει να αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς [123]. Στην πραγματικότητα πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές του προηγούμενου αιώνα αλλά εγκαταλείφθηκαν από τα CFCs και τους απογόνους τους για λόγους ασφαλείας [137]. Η διαθεσιμότητά τους προβλέπεται να είναι άεναη, καθώς παράγονται ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών όπως η διύλιση πετρελαίου, η παραγωγή φυσικού αερίου και η πετροχημεία. Οι πιο συνήθεις τύποι ψυκτικών υδρογονανθράκων είναι το προπάνιο, το ισοβουτάνιο και το προπυλένιο. Συναντώνται επίσης το αιθάνιο και το αιθυλένιο. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται και μείγματα των παραπάνω ουσιών. Σε γενικές γραμμές όμως το ενδιαφέρον έχει κερδίσει το προπάνιο [139].

Ως φυσικά ψυκτικά μέσα, είναι πολύ φιλικά προς το περιβάλλον, ειδικά αν συγκριθούν με τα υπόλοιπα συμβατικά ψυκτικά. Κανένα τους δεν παρουσιάζει κίνδυνο για την στιβάδα του όζοντος με μηδενικό ODP, ενώ τα GWP τους είναι χαμηλά όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Κρίσιμες θερμοκρασίες και GWP υδρογονανθράκων

Ένωση	Κωδικός	Κρίσιμη θερμοκρασία [°C]	GWP
Ισοβουτάνιο	R-600a	135	3
Προπάνιο	R-290	96,6	3
Προπυλένιο	R-1270	91	2
Αιθάνιο	R-170	91	6
Αιθυλένιο	R-1150	9,5	<1

Επίσης οι θερμοδυναμικές τους ιδιότητες είναι πολύ καλές και χαρακτηρίζονται από υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Επομένως παρέχουν αποδοτικές λειτουργίες, τόσο αν όχι περισσότερο από τα συμβατικά συστήματα, με υψηλούς COP [139]. Η υψηλή τους απόδοση συνεχίζεται και στα κόστη που αφορούν τα συστήματά τους. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή κάποιας ψυκτικής ισχύος ή/ και μικρότερη ποσότητα ψυκτικού. Ακόμη, οι συμπιεστές τους μπορεί να είναι μικρότερου μεγέθους από τους συμβατικούς. Επομένως, το κόστος λειτουργίας είναι χαμηλότερο, ειδικά με το προπάνιο [139]. Αυτές οι παράμετροι είναι σημαντικές διότι χαμηλότερα ποσοστά CO₂ είναι απαραίτητα για την παραγωγή της ενέργειας που απαιτεί η λειτουργία του συστήματος. Η οικονομική τους ανταγωνιστικότητα φαίνεται και στις αρχικές τιμές φόρτισης του συστήματος, επαναφόρτισης μετά από διαρροή, και απόρριψης [137]. Τέλος, σε μεγάλες εγκαταστάσεις, το κόστος τους αυξάνεται πολύ λόγω του επιπλέον προστατευτικού εξοπλισμού που δεν χρειάζεται στα μικρά συστήματα.

Μία έρευνα έδειξε ότι η εξοικονόμηση ενέργειας λόγω των ψυκτικών από υδρογονάνθρακες είχε εύρος 4,4-18,7% σε σχέση με το ψυκτικό R134a και 2.65-13,5% σε σχέση με το R22. Επίσης, η ποσότητες φόρτισης μειώθηκαν κατά 40-56% και 12,9-58% αντίστοιχα [140]. Παρομοίως, νέοι ψύκτες μπουκαλιών με προπάνιο παρουσίασαν μείωση κατανάλωσης ενέργειας κατά 28% σε σχέση με παλαιότερους που χρησιμοποιούσαν R134a [141].

Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ο υψηλός κίνδυνος ευφλεκτότητας που εισάγει προβλήματα ασφαλείας. Γι' αυτό το λόγο, υπάρχουν αυστηροί κανόνες για την χρήση τους ώστε με κατάλληλη πρόληψη να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος

ανάφλεξης, ειδικά σε περιπτώσεις διαρροών. Υπάρχουν πολλοί κανονισμοί σχετικά με αυτό όπως ο ευρωπαϊκός κανονισμός EN 378 που αφορά την ασφάλεια κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή, την εγκατάσταση και την λειτουργία των συστημάτων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Είναι πολύ σημαντικό να γίνονται αυστηροί έλεγχοι για ελαχιστοποίηση των κινδύνων διαρροής και ανάφλεξης λόγω σπιθών. Αυξημένος κίνδυνος υπάρχει επίσης στην περίπτωση αναμόρφωση ενός παλαιότερου συστήματος, πράγμα που δεν επιτρέπεται παντού. Για παράδειγμα, η αναμόρφωση των συστημάτων HFCs σε υδρογονανθράκων απαγορεύεται στις Η.Π.Α. Σε μία τραγική περίπτωση δυστυχήματος στην Αυστραλία το 2014, δύο τεχνικοί προσπαθούσαν να αφαιρέσουν τα καλώδια του συμπιεστή από μία μονάδα κλιματισμού, κόβοντας παράλληλα τους χάλκινους αγωγούς της και ελευθερώνοντας το ψυκτικό μείγμα ισοβουτανίου και προπανίου. Στο νέο σύστημα δεν είχε τοποθετηθεί κατάλληλη ετικέτα μετά την αναμόρφωση και οι δύο άντρες φάνηκε πως κάπνιζαν στον χώρο. Το δυστυχές αποτέλεσμα ήταν μια θανατηφόρα έκρηξη που σκότωσε τους τεχνικούς [142,143]. Η τοξικότητα τους είναι χαμηλή και δεν αποτελεί παράγοντα κινδύνου στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά σε υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ασφυξία. Δεν παρουσιάζουν διαβρωτική συμπεριφορά και είναι συμβατά με τα χάλκινα και χαλύβδινα μέρη των συστημάτων.

Τα ψυκτικά υδρογονανθράκων και ειδικά το προπάνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ αποδοτικά στις αντλίες θερμότητας, με υψηλές αποδόσεις και χαμηλές θερμοκρασίες απόρριψης. Ωστόσο, οι υδρογονάνθρακες δεν έχουν διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στην αγορά διότι και στην δική τους περίπτωση δεν έχει αναπτυχθεί εξοπλισμός μικρομεσαίου μεγέθους (κυρίως συμπιεστές) που να μπορεί να ανταπεξέλθει στις ανάγκες του κτιριακού τομέα [123]. Τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί κάποια μοντέλα για την εφαρμογή τους στις αντλίες θερμότητας. Για παράδειγμα, φέτος η κατασκευάστρια εταιρεία Danfoss ανακοίνωσε την ανάπτυξη νέων συμπιεστών προπανίου για Α.Θ. ισχύος 20-200 kW σταθερής και μεταβαλλόμενης ταχύτητας που θα κυκλοφορήσουν στα τέλη του 2023 και τις αρχές του 2024 [144]. Ένας από αυτούς φαίνεται στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Ο νέος συμπιεστής VZN της Danfoss με R290 [144]

Η συγκεντρωτική μελέτη των Wu et al. διάφορων ερευνών για αντλίες θερμότητας με ψυκτικά χαμηλών GWP, ήταν ενθαρρυντική για τις αποδόσεις των υδρογονανθράκων. Σε περιπτώσεις εύρους θερμοκρασιών εισόδου και εξόδου 20-80 °C και 80-135 °C αντίστοιχα, το Ν-βουτάνιο, το ισοβουτάνιο και το Ν-Πεντάνιο (R601) ήταν κατάλληλες επιλογές με COP εύρους 1,9-7. Σε χαμηλές θερμοκρασίες εξόδου κάτω των 70 °C, το προπάνιο είναι η πιο αρεστή επιλογή με COP εύρους 1.3-6 [145].

Κάποια παραδείγματα εφαρμογών σε αντλίες θερμότητας εντοπίζονται επίσης στην Ελβετία και την Αυστρία. Στην πρώτη περίπτωση, μια ζυθοποιία χρησιμοποιεί σύστημα τηλεθέρμανσης με παροχή θερμοκρασίας 85 °C. Για να επιτευχθεί η τιμή των 120 °C που απαιτούνται για τις παραγωγικές διεργασίες, χρησιμοποιούσαν θερμαντήρα αντιστάσεων των 50 kW. Η αντικατάσταση του από μία αντλία θερμότητας των 15 kW με φόρτιση ισοβουτανίου 6 kg, επιλέχθηκε ως μια αειφόρος και οικονομικότερη επιλογή. Στην δεύτερη περίπτωση ενός καταστήματος διακόσμησης σπιτιού μεγάλων αναγκών για θέρμανση/ψύξη, εγκαταστάθηκε αντλία θερμότητας 700 kW με προπάνιο. Η αντλία αποτελείται από δύο κυκλώματα τεσσάρων συμπιεστών έκαστο με 25 kg ψυκτικού στο κάθε κύκλωμα. Η πηγή της θερμότητας είναι οι πυλώνες των θεμελίων του κτιρίου (“foundation piles”). Υπολογίζεται πως το σύστημα έχει εξοικονομήσει 30% ενέργειας συγκριτικά με άλλα καταστήματα της ίδιας αλυσίδας [137].

Ο Palm [146] εξέτασε τις ανταγωνιστικές δυνατότητες των υδρογονανθράκων σε μικρά συστήματα ψύξης και Α.Θ. κάτω των 20 kW. Συγκεκριμένα, επικεντρώθηκε

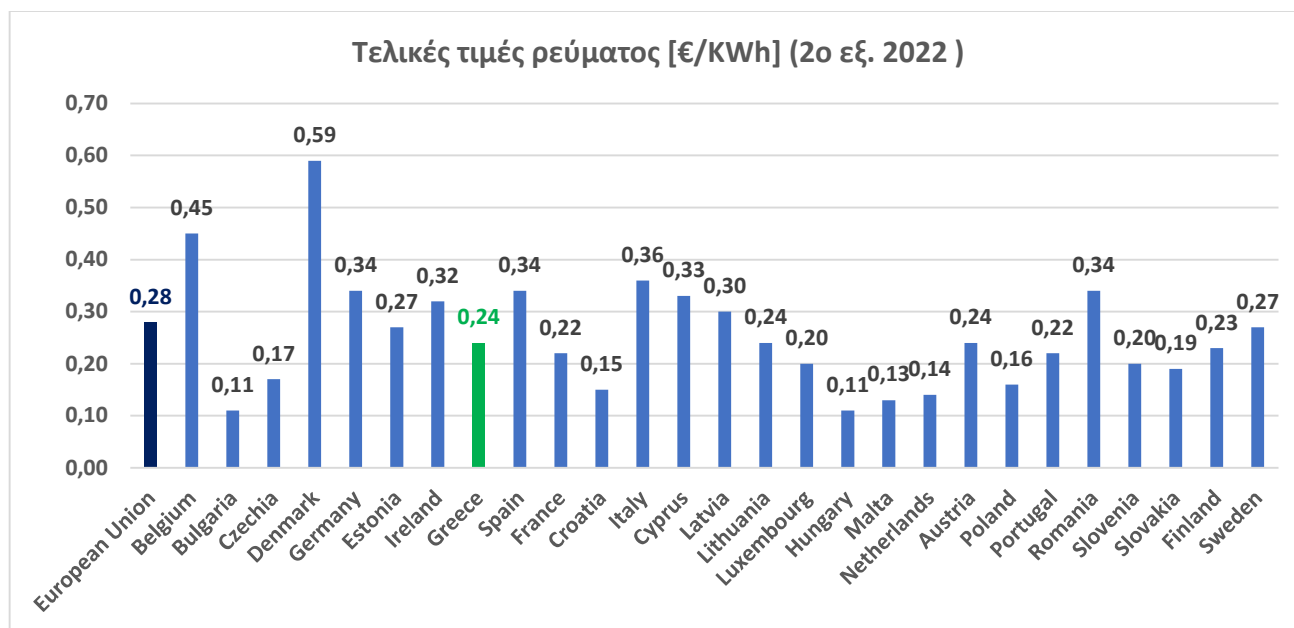
στην σύγκριση του προπάνιου, του προπένιου και του ισοβουτάνιου με το R22, το R134a και την αμμωνία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ιδιότητες των πρώτων είναι αρκετά καλές ώστε οι αποδόσεις των συστημάτων να είναι ίσες ή υψηλότερες από των δεύτερων, επομένως είναι παραπάνω από κατάλληλα για χρήση στα συστήματα ψύξη από αυτήν την σκοπιά. Ωστόσο, ο κίνδυνος της ευφλεκτότητας πρέπει να αντιμετωπιστεί με την ελάχιστη δυνατή φόρτιση και τα μεγέθη και η έλλειψη κατάλληλων συμπιεστών μεγαλύτερης ισχύος τα καθιστά δυσεύρετα.

5. Οικονομικά και Τεχνικά Θέματα των Γ.Α.Θ.

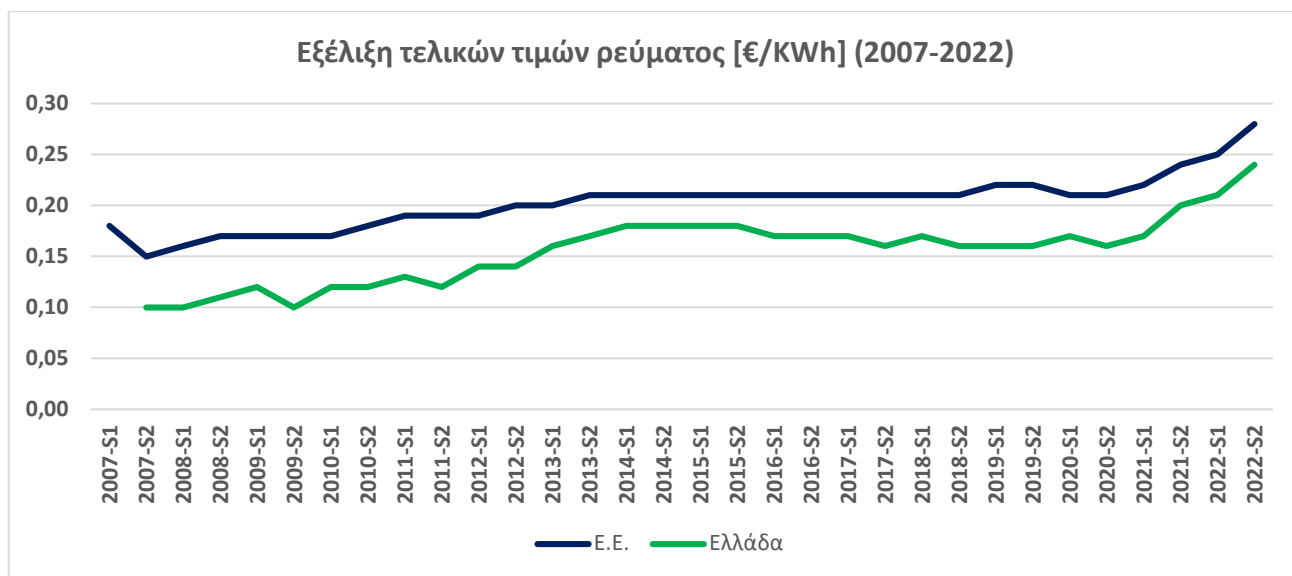
5.1 Τιμές φυσικού αερίου και ρεύματος σε Ελλάδα και Ε.Ε.

Ως αποτέλεσμα των σύγχρονων εξελίξεων και της κατάστασης της ενεργειακής οικονομίας οι τιμές των εισαγόμενων καυσίμων όπως το φυσικό αέριο αλλά και του ρεύματος έχουν ανοδική τάση τα τελευταία χρόνια. Ειδικότερα, η παραγωγή του ηλεκτρισμού βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα: 36,2% στην Ε.Ε. και 59,4% στην Ελλάδα η οποία πλήττεται ακόμη περισσότερο από την ανυπαρξία πυρηνικών σταθμών που απαρτίζουν το 25,2% της παραγωγής της Ε.Ε. [75]. Η σχέση μεταξύ των δύο (φ.α. και ρεύματος) είναι άμεση και η αλληλεπίδρασή τους επηρεάζει την αγορά των Γ.Α.Θ. καθώς θεωρούνται βιώσιμες όταν η τιμή του ρεύματος είναι ανταγωνιστική με αυτές των υπόλοιπων καυσίμων.

Προκειμένου να διεξαχθεί μία σύγκριση μεταξύ των τιμών του ρεύματος εντός της Ε.Ε. αλλά και της εξέλιξής τους, επιλέγεται το εύρος κατανάλωσης 2 500-4 999 kWh που χαρακτηρίζεται ως “household consumers” (νοικοκυριά) και οι τιμές που παρουσιάζονται συμπεριλαμβάνουν όλους τους φόρους [147]. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1. Η τελική τιμή της Ελλάδας ήταν 0,24 €/KWh και της Ε.Ε. 0,28 €/KWh για το 2^ο εξάμηνο του 2022. Η ανοδική πορεία που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια ξεκίνησε από το 2^ο εξάμηνο του 2020 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.

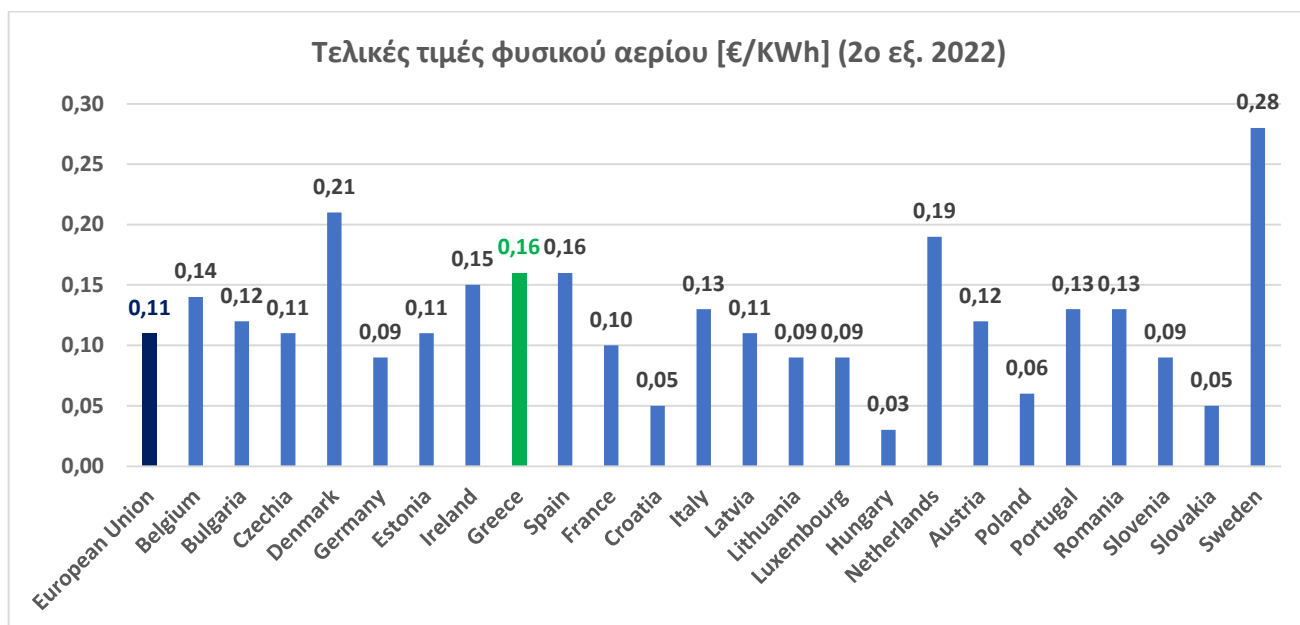


Σχήμα 5.1: Τελικές τιμές ρεύματος [€/KWh] (2ο εξ. 2022) [147]

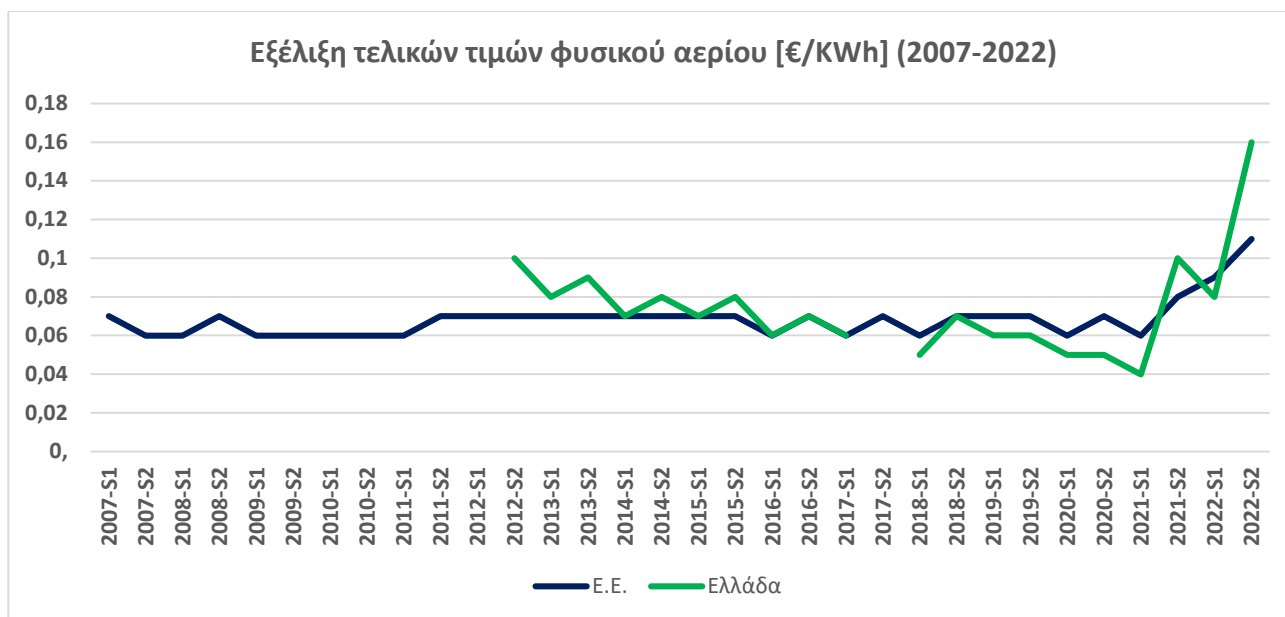


Σχήμα 5.2 [147]

Για το φυσικό αέριο ακολουθείται η ίδια προσέγγιση με το καταναλωτικό εύρος των νοικοκυριών να θεωρείται 20-199 GJ. [149]. Συγκεκριμένα οι τιμές είναι 0,16 €/KWh και 0,11 €/KWh αντίστοιχα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Παρατηρείται ραγδαία αύξηση των τιμών του φυσικού αερίου τα τελευταία χρόνια η οποία ξεκίνησε το 1^ο εξ. το 2021, είναι ειδικά απότομη στην Ελλάδα και η τελική τιμή για το 2^ο εξ. του 2022 είναι υψηλότερη από τον μέσο όρο της E.E. όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.3 [148]



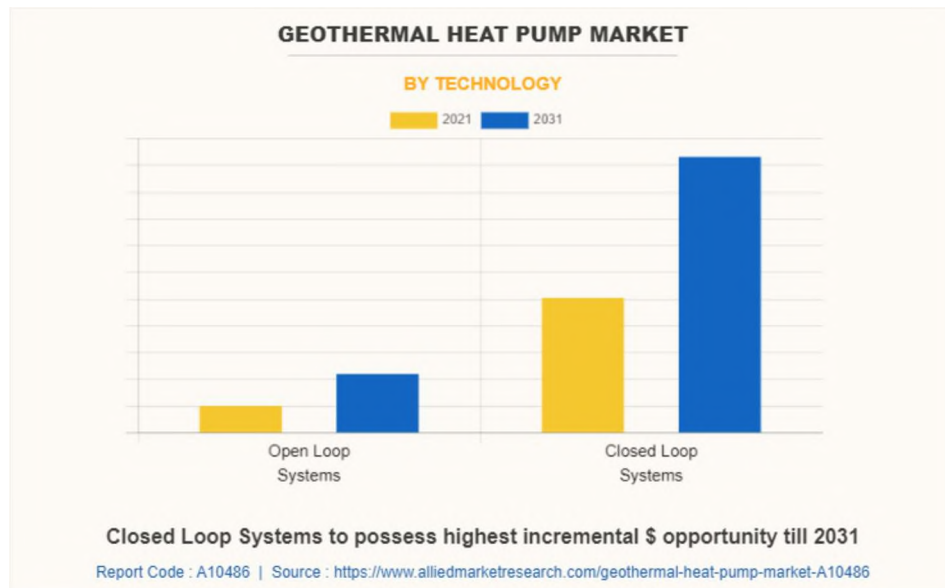
Σχήμα 5.4 [148]

5.2 Η κατάσταση της αγοράς των Γ.Α.Θ.

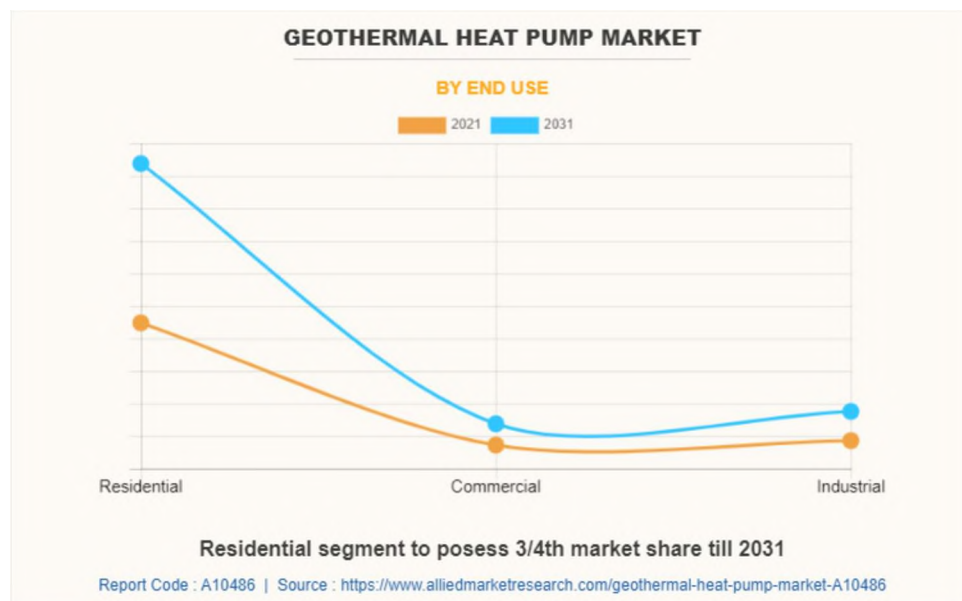
Η αξία της παγκόσμιας αγοράς των Γ.Α.Θ. ήταν \$6 δις το 2021 και ο εκτιμώμενος σύνθετος ρυθμός ετήσιας ανάπτυξης ως το 2031 εκτιμάται ίσος με 7,6% όπου η αξία της θα φτάσει τα \$12,5 δις σύμφωνα με την “Allied Market Research” [149]. Η Ευρώπη φαίνεται επίσης πως θα είναι στο επίκεντρο της ανάπτυξης. Η εξάπλωση της πανδημίας Covid-19 είχε σαφώς αρνητική επίδραση σε όλες τις βιομηχανικές δραστηριότητες και συνεπώς στην κατασκευή των Γ.Α.Θ. Επίσης το κλείσιμο των συνόρων και οι περιορισμοί του εμπορίου έκαναν πιο δύσκολη την εύρεση πρώτων υλών όπως σίδηρος, αλουμίνιο και χάλυβας. Οι κυριότεροι οδηγοί της επερχόμενης ανάπτυξης και της επανεκκίνησης των δραστηριοτήτων είναι η επιθυμία μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και κατ’ επέκταση ο περιορισμός της κλιματικής κρίσης μέσω των ανανεώσιμων ενεργειακών συστημάτων και η ανάγκη για ασφάλεια, σταθερότητα και εξοικονόμηση στην διάθεση της ενέργειας που δεν προσφέρουν τα συμβατικά καύσιμα. Η προβλεπόμενη στήριξη των κρατών μέσω πρωτοκόλλων, πολιτικών και οικονομικών κινήτρων που θα επέλθει τα επόμενα χρόνια, θα ενισχύσει την εξάπλωση αυτής της τεχνολογίας [149].

Συγκεκριμένα, τα συστήματα κλειστού τύπου αναμένεται να παραμείνουν τα πιο δημοφιλή και να παρουσιάσουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εγκαταστάσεων το 2021 ήταν στον οικιακό

τομέα (74,3%) και πρόκειται να παρουσιάσει την μεγαλύτερη ανάπτυξη λόγω των κρατικών δράσεων οικονομικής στήριξης μέσω φορολογικών και άλλων εκπτώσεων που θα στραφούν προς τους ενδιαφερόμενους αυτού του κλάδου για να τους ενισχύσουν [149] όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.5: Ανάπτυξη αγοράς Γ.Α.Θ. ανά τεχνολογία ως το 2031 [149]



Σχήμα 5.6: Ανάπτυξη αγοράς Γ.Α.Θ. ανά τομέα [149]

5.3 Κόστος Εγκατάστασης και Λειτουργίας Γ.Α.Θ.

5.3.1. Εισαγωγή

Είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί το ακριβές κόστος των γεωθερμικών συστημάτων διότι ποικίλλει ευρέως βάσει διάφορων παραγόντων. Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι τα αρχικά κόστη της επένδυσης είναι πολύ υψηλά και υψηλότερα από τα συμβατικά συστήματα ορυκτών καυσίμων αλλά και άλλων ειδών αντλιών θερμότητας κυρίως λόγω της ανάγκης διάνοιξης γεωτρήσεων. Κατά κύριο λόγο αποτελούνται από τον εξοπλισμό και τον γεωεναλλάκτη. Ο πρώτος εξαρτάται από το μέγεθος, την ισχύ και τον κατασκευαστή της αντλίας, ενώ ο δεύτερος από τον τύπο του συστήματος. Προφανώς τα συστήματα αυξημένης ισχύος που αποδίδουν μεγαλύτερα φορτία σε κτίρια αυξημένων αναγκών ή χρησιμοποιούν αντλίες τελευταίας τεχνολογίας επιβαρύνουν το τελικό κόστος. Τα κατακόρυφα συστήματα είναι ακριβότερα από τα οριζόντια λόγω των γεωτρήσεων που διανοίγονται δυσκολότερα και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό. Η γεωλογία του υπεδάφους είναι ακόμη σημαντική διότι οι ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και ο βαθμός δυσκολίας της επεξεργασίας του επηρεάζουν την διαστασιολόγηση και τις συνθήκες των γεωτρήσεων αντίστοιχα. Επίσης τα κόστη εργασίας αυξάνονται αναλογικά με την πολυπλοκότητα του συστήματος καθώς και με την τοποθεσία εγκατάστασης αν αυτή βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή.

Κάποιες σημαντικές λεπτομέρειες που μπορούν να μειώσουν το κόστος λειτουργίας και να αυξήσουν την αποδοτικότητα του συστήματος είναι η καλή μόνωση και ο σωστός σχεδιασμός. Αφενός, όσο μικρότερες είναι η απώλειες εντός του χώρου τόσο μικρότερος θα είναι ο γεωεναλλάκτης, η αντλία και το κόστος λειτουργίας και αφετέρου η υπερδιαστασιολόγηση που είναι συνήθης στους λέβητες πρέπει να αποφεύγεται στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας διότι το κόστος αυξάνεται απότομα χωρίς το αντίστοιχο αντίκρισμα στην απόδοση. Για παράδειγμα, μια διαφορά 15-30 kW σε λέβητα μπορεί να αξίζει £1000 ενώ σε Γ.Α.Θ. για 10-20 kW να είναι £10 000 [150]. Ωστόσο, ορισμένα κτίρια δεν είναι σε θέση να στεγάσουν το γεωθερμικό σύστημα με αποτέλεσμα να χρειάζονται αναβαθμίσεις. Τα επιπλέον κόστη μιας αναβάθμισης μπορεί να περιλαμβάνουν την ενίσχυση της μόνωσης του

κτιρίου για τους παραπάνω λόγους. Επίσης μπορεί να χρειαστούν τροποποιήσεις στις σωληνώσεις διανομής του νερού ή του αέρα αν βρίσκονταν κοντά στον λέβητα και επίσης σώματα μεγαλύτερου μεγέθους λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που παραδίδει η έξοδος της αντλίας. Επίσης, ο υπάρχων λέβητας και οι δεξαμενές του καυσίμου θα πρέπει να αφαιρεθούν. Επίσης, η εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος σχεδόν εγγυάται την διατήραση του εδάφους της ιδιοκτησίας και όχι λόγω κακού σχεδιασμού. Αυτό παρατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό στα οριζόντια συστήματα. Οι επισκευές χλοοτάπητα, παρτεριών κ.α. πρέπει να συνυπολογιστούν στο σύνολο των εξόδων. Η προσπάθεια ελάφρυνσης του αρχικού κόστους αντιμετωπίζεται από κυβερνητικά κίνητρα οικονομικού χαρακτήρα όπως φορολογικές εκπτώσεις ή κάλυψη ενός ποσοστού του κόστους εγκατάστασης.

Αν ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, τότε οι Γ.Α.Θ. προσφέρουν μακροχρόνια οφέλη καθώς συνήθως επιτυγχάνουν εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας αλλά και του κόστους λειτουργίας. Η επίτευξη της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας μέσω των γεωθερμικών συστημάτων αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στις βασικές αρχές της τεχνολογίας τους. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα φυσικού αερίου τα οποία απαιτούν την «δημιουργία» της θερμότητας επιτόπου και ύστερα την μεταφορά της, ενώ οι Γ.Α.Θ. απορροφούν την ήδη αποθηκευμένη στο έδαφος και την μεταβιβάζουν. Η αρχή λειτουργίας τους είναι πολύ αποδοτικότερη και έτσι μεταξύ άλλων προσφέρουν εξοικονόμηση σε πολλές περιπτώσεις. Κατά συνέπεια προβλέπεται απόσβεση κόστους σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα αλλά θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι τιμές των καυσίμων και του ρεύματος. Οι Γ.Α.Θ. μπορούν να αποβούν ωφέλιμες όταν το ρεύμα είναι φτηνότερο ή ανταγωνιστικό του φυσικού αερίου, διαφορετικά η επένδυση δύναται να καταλήξει ζημιώσα. Ακόμη, τα έξοδα συντήρησης του συστήματος είναι χαμηλά και περιλαμβάνουν κυρίως ετήσιους ελέγχους των κυρίων εξαρτημάτων και των επιπέδων του ψυκτικού ώστε να διαπιστωθούν τυχόν διαρροές.

5.3.2 Κόστη στο Ηνωμένο Βασίλειο

Γενικά

Στο Ηνωμένο Βασίλειο οι τιμές τυπικά βρίσκονται μεταξύ £14 500 και £45 000. Συγκριτικά με άλλες επιλογές, είναι 3-4 φορές ακριβότερη από έναν λέβητα φυσικού αερίου και 2 φορές ακριβότερη από μία αντλία αέρα. Η αγορά μιας Γ.Α.Θ. θεωρείται φυσικά μία επένδυση που αποδίδει σε βάθος χρόνου και χρήσης και μπορεί να χρειαστούν 4 με 5 χρόνια για να επιτευχθεί απόσβεση [151].

Τα οριζόντια συστήματα έχουν μικρότερα κόστη εγκατάστασης διότι οι τάφροι που πρέπει να εκσκαφθούν έχουν βάθος μόνο 1-2 m και οι εργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μικρότερο χρονικό διάστημα με τυπικό εξοπλισμό, ακόμη και χειρωνακτικά σε κάποιες περιπτώσεις. Συναντώνται συχνότερα στην ύπαιθρο λόγω της ανάγκης μεγαλύτερης έκτασης για τον γεωεναλλάκτη. Οι εκσκαφές αυτού του τύπου κοστίζουν μεταξύ £2 500 και £4 500. Το συνολικό κόστος τους υπολογίζεται μεταξύ £14 500 και £34 000 [151]. Για παράδειγμα, μία αντλία ισχύος 12 kW με γεωεναλλάκτη μήκους 750 m και κύλινδρο ζεστού νερού θα κόστιζε περίπου £24 000 [152].

Από την άλλη, τα κατακόρυφα συστήματα είναι ακριβότερα λόγω της ανάγκης διάνοιξης γεωτρήσεων σε μεγαλύτερα βάθη (50-100 m) που απαιτούν περισσότερες ώρες εργασίας και εξειδικευμένο εξοπλισμό. Οι γεωτρήσεις συνήθως κοστίζουν μεταξύ £4 000 και £6 000 εκάστη αναλόγως του βάθους, της διαμέτρου και του αριθμού τους [150]. Μπορεί επίσης να υποτεθεί κόστος βάσει του συνολικού μήκους-έστω £100/m και της ισχύος 10 m/kW [150]. Το συνολικό κόστος τους είναι εύρους £17 000-£45 000.

Η ίδια η αντλία είναι από τα πιο ακριβά μέρη του συστήματος και μαζί με την εγκατάστασή της δύναται να κοστίζει £12 000-£30 000 αναλόγως το μέγεθος, την ισχύ και την απόδοση [151].

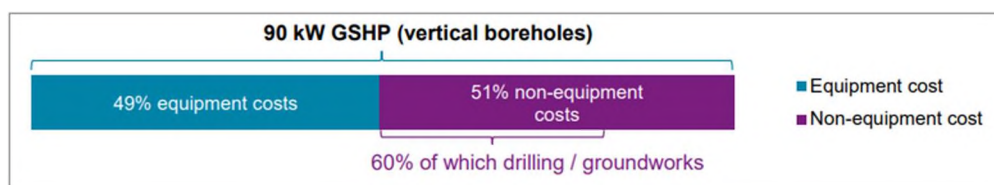
Το κόστος συντήρησης μπορεί να είναι £100-£200 ετησίως [150].

Σε ένα προσεγγιστικό παράδειγμα, υποθέτοντας ένα σπίτι 3 υπνοδωματίων με αντλία συνολικής ονομαστικής ισχύος 11 kW μπορεί να διακριθεί η διαφορά μεταξύ

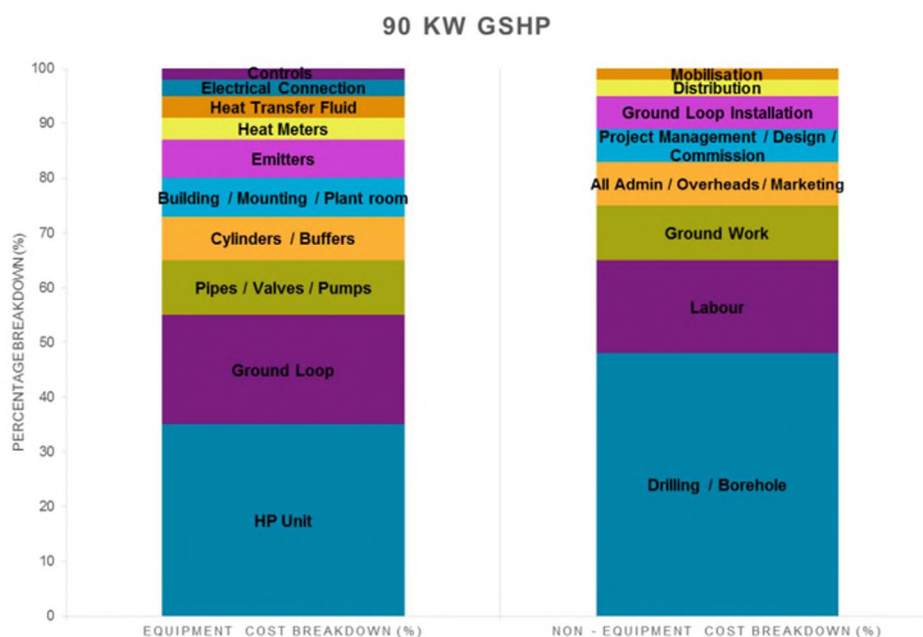
των κοστών των δύο συστημάτων. Το κόστος την αντλίας και της εγκατάστασης θα ήταν περίπου £21 000. Στην συνέχεια, το προστιθέμενο κόστος του γεωεναλλάκτη επηρεάζεται σημαντικά από τον τύπο του συστήματος. Για οριζόντιο σύστημα θα ήταν £3 750 (σύνολο £24 750) και για κατακόρυφο τριών γεωτρήσεων £15 000 (σύνολο £36 000) [153].

Κατανομή Κοστών

Το Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής ανέλυσε τα κόστη και την δομή τους [154]. Ως βάση χρησιμοποιήθηκε μία Γ.Α.Θ. ισχύος 90 kW για αναβάθμιση και αναλύθηκε η κατανομή των εξόδων σε εξοπλισμού και μη-εξοπλισμού σε ένα κατακόρυφο σύστημα. Το 51% του συνολικού κόστους αποδίδεται σε έξοδα μη-εξοπλισμού, κυρίως των γεωτρήσεων και των προετοιμασιών (περίπου το 60% αυτών) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Στα κόστη του εξοπλισμού τα ακριβότερα μέρη είναι η αντλία και ο βρόχος του γεωεναλλάκτη που μαζί ξεπερνούν το 50% αυτής της συνιστώσας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.7: Διαμοιρασμός των κοστών σε εξοπλισμό και μη-εξοπλισμό μιας κατακόρυφης Γ.Α.Θ. [154]



Σχήμα 5.8: Κατανομή κοστών μεταξύ εξοπλισμού και μη-εξοπλισμού μιας κατακόρυφης Γ.Α.Θ. [154]

Οι οριζόντιες εκσκαφές είναι πολύ οικονομικότερες από τις γεωτρήσεις κατά περίπου 30-40%. Τα κόστη των γεωτρήσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος, την διαθεσιμότητα χώρου για τις εργασίες διάνοιξης, την γεωλογία του εδάφους κ.α. Για παράδειγμα, αν το υπέδαφος είναι μαλακό, οι γεωτρήσεις πρέπει να ενδυναμωθούν εσωτερικά ώστε να μην καταρρεύσουν, αυξάνοντας το κόστος των εργασιών και του εξοπλισμού. Σε ευνοϊκότερες γεωλογίες το κόστος των γεωτρήσεων μειώνεται κατά 10-15%. Η άλλη σχετική παράμετρος που καθορίζει τις τιμές του υπόγειου μέρους είναι η διαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη [154].

Το κόστος σχεδιασμού είναι επίσης ευαίσθητο στην πολυπλοκότητα του συστήματος και στην διαθεσιμότητα των δεδομένων για την μελέτη, όπως απώλειες, φορτία, συστήματα διανομής κ.α. Τα στοιχεία αυτά ίσως να μην είναι διαθέσιμα και να πρέπει να συλλεχτούν από τον μελετητή. Ο αριθμός των γεωτρήσεων και οι διαστάσεις τους, η δυσκολία περάτωσης του έργου και του σχεδιασμού συνεισφέρουν στην διαμόρφωση του κόστους των εργασιών. Ακόμη, τα συστήματα τελευταίας τεχνολογίας που επιτυγχάνουν μέγιστες αποδόσεις είναι προφανώς πιο ακριβά από τα συμβατικά. Ένα πιο «περίπλοκο» σύστημα θα αύξανε το κόστος κατά 10-20% [154].

Τέλος, σε απομακρυσμένες περιοχές, τα κόστη των μεταφορών θα είναι μεγαλύτερα. Σε οικιακές εγκαταστάσεις αυτό θα σήμαινε επιπλέον έξοδα που θα αντιστοιχούσαν σε διπλασιασμό των εξόδων του χρόνου εγκατάστασης [154].

Για μικρότερα συστήματα όπως για παράδειγμα 12 kW, το συνολικό κόστος είναι 10-20% υψηλότερο ανά kW. Ο διαχωρισμός των κοστών θα ήταν 50/50. Για μεγαλύτερα συστήματα, των 600 kW, υπολογίζονται ως 15% και 45/55 [154].

Σε μία νέα εγκατάσταση, ο διαμοιρασμός μεταξύ των κοστών εξοπλισμού και μη-εξοπλισμού δεν έχει σημαντικές διαφορές αλλά τα συνολικά κόστη είναι μειωμένα κατά περίπου 10%. Τα κόστη μη-εξοπλισμού είναι επίσης 10% χαμηλότερα σε μια νέα κατασκευή και 20% χαμηλότερα αν πολλές εγκαταστάσεις συμβαίνουν ταυτοχρόνως, κυρίως επειδή δεν χρειάζεται να αφαιρεθεί το προηγούμενο σύστημα και τα εξαρτήματά του. Η βέλτιστη περίπτωση είναι η επεξεργασία του εδάφους να γίνεται κατά την διάρκεια της κατασκευής ενός κτιρίου ώστε να μην δημιουργηθούν

επιπλοκές αργότερα που δεν θα είχαν προβλεφθεί κατά την αρχική ανέγερση. Η εγκατάσταση πολλών μονάδων στην ίδια κατασκευή μπορεί επίσης να μειώσει τα κόστη εκκίνησης των γεωτρήσεων επειδή αυτά διαμοιράζονται. Τα κόστη εξοπλισμού είναι συνήθως υψηλότερα κατά 10% διότι πρέπει το σύστημα διανομής να αγοραστεί εξ ολοκλήρου ενώ σε περίπτωση αναβάθμισης μόνο το ένα τρίτο των θερμαντικών σωμάτων αντικαθίσταται τυπικά. Τα συστήματα πετρελαίου και φυσικού αερίου λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και τα σώματά τους δεν είναι απαραίτητα συμβατά με τον ίδιο τρόπο. Η ενδοδαπέδια θέρμανση που είναι δημοφιλής σε συνδυασμό με τις Γ.Α.Θ. λόγω της αρκούσας χαμηλής θερμοκρασίας είναι ακριβότερο σύστημα από τα fan coil και οι διαταραχές που θα προκαλούσε μια τέτοια εγκατάσταση εν μέσω αναβάθμισης την καθιστούν ακατάλληλη σε αντίθεση με μία νέα προμελετημένη κατασκευή που βασίζεται πάνω σε Γ.Α.Θ. [154].

Παραδείγματα σύγκρισης

Στο Ηνωμένο Βασίλειο οι Γ.Α.Θ. μπορούν να συντελέσουν στο μέλλον της εξανθράκωσης της ενέργειας καθώς το 85% των συστημάτων πρόκειται για λέβητες φυσικού αερίου [155]. Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας της Βρετανίας υπολογίζει πως η κατανάλωση φυσικού αερίου για θέρμανση χώρων και νερών ενός συνηθισμένου νοικοκυριού είναι 11 700 kWh ετησίως. Το μέσο ανώτατο όριο της τιμής του φυσικού αερίου του Ιουλίου του 2023 ήταν £0.08/kWh επομένως αν αυτό θεωρηθεί σταθερό για ένα έτος τότε το κόστος λειτουργίας της θέρμανσης θα ήταν £936. Επίσης για τον ίδιο μήνα το μέσο στάσιμο κόστος (“standing charge”) ήταν £0,29/ημέρα επομένως το ετήσιο στάσιμο κόστος είναι £105,85. Συνεπώς, το συνολικό κόστος θέρμανσης φυσικού αερίου ενός νοικοκυριού μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ως £1 041,85. Ωστόσο λόγω των βαθμών απόδοσης των λεβήτων, η πραγματική ζήτηση θερμότητας είναι μικρότερη. Αν υποθεθεί ένας τυπικός λέβητας βαθμού απόδοσης 85% τότε αυτή θα είναι 9 945 kWh. Περνώντας στην περίπτωση της Γ.Α.Θ., ο COP μπορεί να υποθεθεί ίσος με 4, επομένως για την κάλυψη των 9 945 kWh απαιτούνται 2 486 kWh. Παρομοίως, το ανώτατο όριο της τιμής του ρεύματος για τον Ιούλιο του 2023 ήταν £0,30/kWh, άρα το ετήσιο κόστος θέρμανσης νερού και χώρων θα ήταν £745,9 [156]. Για το πετρέλαιο, η αντίστοιχη τιμή του ήταν *προσεγγιστικά* £0,06/kWh.

Η σύγκριση του ετησίου κόστους θέρμανσης για διάφορα συστήματα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Ετήσια κόστη θέρμανσης με διάφορα συστήματα [156]

Τύπος συστήματος	Ετήσια ζήτηση θέρμανσης [kWh]	Βαθμός απόδοσης	Ετήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	Τιμή ενέργειας (Ιούλιος 2023) [€/kWh]	Ημερήσια χρέωση [€/μέρα]	Τελικός λογαριασμός θέρμανσης [€]	Εξοικονόμηση [€/έτος]
Γ.Α.Θ.	9 945	400%	2 486,25	0,3	0	745,875	-
Φυσικό αέριο	9 945	85%	11 700	0,08	0,29	1041,85	295,975
Πετρέλαιο	9 945	85%	11 700	0,06	0	702	-43,875
Ηλεκτρικό	9 945	99%	10 045,45	0,3	0	3013,635	2267,76

Σε αυτόν τον υπολογισμό, η λειτουργία της Γ.Α.Θ. για θέρμανση είναι πιο οικονομική από έναν τυπικό λέβητα φυσικού αερίου κατά £296/έτος στην περίπτωση της αντλίας με COP ίσο με 4, ενώ για την δεύτερη με COP ίσο με 3 τα κόστη λειτουργίας είναι σχεδόν ίσα και η εξοικονόμηση είναι μικρή θεωρώντας σταθερές τις τιμές του φυσικού αερίου και του ρεύματος. Το ποσό αυτό μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί βάσει της αποδοτικότητας του κάθε συστήματος και την διαφορά των τιμών της ενέργειας, όμως το γενικό συμπέρασμα παραμένει. Οι αντλίες εν γένει είναι αποδοτικότερες για την επίτευξη ενός φορτίου καθώς δεν απαιτείται «παραγωγή» της ενέργειας παρά μόνο η μεταφορά της. Ωστόσο η αντλία δεν αρκεί πάντα για την ικανοποιητική παροχή ζεστού νερού χρήσης καθώς η θερμότητα παραδίδεται σε θερμοκρασία έως και 50 °C. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνίσταται η συμπληρωματική χρήση ηλεκτρικού θερμαντήρα ο οποίος προσθέτει στο κόστος κατανάλωσης [156].

Επιδότησεις

Οι βασική επιχορήγηση που είναι διαθέσιμη στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2023 είναι η εξής: το “Boiler Upgrade Scheme” διατίθεται από την κυβέρνηση σε κατοικίες της Αγγλίας και της Ουαλίας για να ενισχύσει την ενσωμάτωση συστημάτων χαμηλών εκπομπών άνθρακα όπως οι αντλίες θερμότητας. Το ύψος της χρηματοδότησης είναι £3.9 δις και ενεργοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2022 με διάρκεια ως και τον Απρίλιο του

2025. Η κατεύθυνση που ορίζεται αποσκοπεί στην μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των κατοικιών λόγω των συστημάτων θέρμανσης όπως οι λέβητες φυσικού αερίου. Οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να παραλάβουν κουπόνι συνολικής αξίας £5 000 για αγορές αντλιών θερμότητας πηγής αέρα και £6 000 για αγορές Γ.Α.Θ. Οι απαιτήσεις καταλληλότητας περιλαμβάνουν την προϋπόθεση αντικατάστασης συστήματος μόνο ορυκτών καυσίμων [157].

5.3.3 Κόστη στις Η.Π.Α.

Η ζήτηση αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των γεωθερμικών συστημάτων στην αγορά των Η.Π.Α. Υπολογίζεται ότι η ετήσια ανάπτυξη είναι 12% ετησίως [158].

Κόστη εγκατάστασης

Το μέσο κόστος ενός συστήματος Γ.Α.Θ. στις Η.Π.Α. είναι μεταξύ των \$10 000 και \$50 000 και ο κυριότερος παράγοντας για την εξακρίβωση του είναι ο τύπος του συστήματος [159]: Τα οριζόντια συστήματα είναι τα φτηνότερα και κοστίζουν μεταξύ των \$15 000 και \$34 000. Από την άλλη τα κατακόρυφα συστήματα είναι τα ακριβότερα με εύρος κόστους \$20 000-\$38 000. Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους αποδίδεται στις γεωτρήσεις που κοστίζουν μεταξύ των \$16 και \$133 ανά m. Συνήθως οι διαστάσεις τους είναι 10-20 cm σε διάμετρο και 30-150 m σε βάθος. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις απαιτούν 3-5 γεωτρήσεις και 90-150 m αγωγών ανά ψυκτικό τόνο (3,52 kW). Τα συστήματα ανοιχτού τύπου \$10 000-\$28 000 αντιστοιχούν [160]. Η αντλία κοστίζει \$2 500-\$5 000 και οι γεωτρήσεις και η εγκατάσταση απαρτίζουν έως και το 65% του συνολικού κόστους [159]. Τα κόστη εργασίας είναι \$75-\$125 την ώρα [161].

Το μέγεθος των χώρων που θα εξυπηρετεί το γεωθερμικό σύστημα είναι σημαντικός παράγοντας στην διαμόρφωση κάθε πτυχής των συνολικών κοστών καθώς εξαρτά τα απαιτούμενα φορτία, την κλίμακα των εργασιών, την ποσότητα των υλικών κ.α. Συγκεκριμένα, η καθοριστική παράμετρος είναι το συνολικό εμβαδόν. Για παράδειγμα, ένα σπίτι μεσαίου μεγέθους 223 m² που χρειάζεται ένα σύστημα 4 ψυκτικών τόνων. Σε γενικές γραμμές τα κόστη συστήματος αναλογούν σε \$4 000-\$8 000 ανά τόνο, δηλαδή ένα σύστημα 4 τόνων (14,08 kW) προβλέπεται να κοστίζει

περίπου \$24 000. Τα μικρότερα σπίτια μεταξύ \$12 000-\$24 000 και τα μεγαλύτερα έως και \$48 000 [160].

Η γεωγραφική τοποθέτηση του συστήματος είναι επίσης σημαντική διότι τα κόστη εγκατάστασης διαφέρουν πολύ από πόλη σε πόλη όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Κόστη εγκατάστασης Γ.Α.Θ. ανά πόλη των Η.Π.Α. [160]

Πόλη	Κόστος εγκατάστασης
Ντάλας	\$4 900-\$10 000
Μιννεάπολις	\$2 700-\$11 000
Σικάγο	\$2 100-\$25 000
Σαν Αντόνιο	\$14 300-\$18 100
Ατλάντα	\$5 100-\$27 700
Πίτσμπουργκ	\$55 600-\$61 000

Πρόσθετα κόστη

Η αναβάθμιση ενός υπάρχοντος συστήματος είναι ακριβότερη από την απευθείας εγκατάσταση ενός γεωθερμικού συστήματος. Μία νέα κατασκευή μπορεί να εξοικονομήσει το 40% των κοστών μιας περίπτωσης αναμόρφωσης. Στην περίπτωση των συστημάτων διανομής με αέρα είναι πολύ πιθανό το δίκτυο των αεραγωγών να χρειαστεί τροποποίηση ή επισκευή. Στην πρώτη περίπτωση το κόστος της αναβάθμισης μπορεί να προσθέσει \$5 000-\$20 000 και στην δεύτερη \$1 400-\$5 600. Άλλες βελτιώσεις ή αλλαγές που δύναται να προστεθούν στο σύνολο των εργασιών της εγκατάστασης είναι η ανακαλωδίωση και άλλες τροποποιήσεις του ηλεκτρολογικού δικτύου του κτιρίου με κόστος \$50-\$100 την ώρα για έναν ηλεκτρολόγο με πιθανότητα επιπλέον χρέωσης κλήσης. Επίσης, η αναβάθμιση της μόνωσης είναι σημαντική βελτίωση και κοστίζει \$900-\$3 000 [160].

Επιπλέον εξοικονόμηση επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση δεξαμενής απουπερθερμαντήρα όπου με εναλλάκτη θερμότητας το υπέρθερμο ψυκτικό μέσο προθερμαίνει το νερό χρήσης πριν το βασικό σύστημα μέσω της περίσσειας θερμότητας που έχει λόγω της φάσης του. Πρόκειται για ακριβή επένδυση των

\$1 400-\$3 000 που όπως και τα γεωθερμικά συστήματα αποσβένεται σε σύντομο χρονικό διάστημα [160].

Οι απαραίτητες άδειες της εγκατάστασης διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τις τοπικές συνθήκες. Συνήθως συμπεριλαμβάνονται στην συνολική εκτίμηση κόστους και καταλαμβάνουν \$100-\$650. Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου συμπεριλαμβάνονται και ειδικά κόστη άδειας απέκκρισης νερού με βάση την ισχύ του συστήματος. Για παράδειγμα, οι εκκενώσεις σε μικρές λίμνες μπορεί να κοστίσουν \$2 500-\$10 000 ετησίως [160].

Φορολογικές Εκπτώσεις

Τα γεωθερμικά συστήματα είναι μέρος μιας πρωτοβουλίας γνωστής ως “Residential Clean Energy Tax Credit” που αφορά την φορολογική έκπτωση μέσω οικιακών εγκαταστάσεων ως κίνητρο για αυτές. Τα συστήματα που θα εγκατασταθούν σε πρώτες ή δεύτερες κατοικίες που υπάρχουν ή είναι υπό κατασκευή υπάγονται στην περίπτωση της έκπτωσης 30% του κόστους που συνδέεται άμεσα με το γεωθερμικό σύστημα για την περίοδο 2022-2032. Στην συνέχεια το ποσοστό προβλέπεται να μειωθεί σε 26% κατά το έτος 2033 και σε 22% το 2034. Προκειμένου να είναι επιλέξιμα, τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι φέρουν την πιστοποίηση Energy Star [162]. Επιπλέον επιχορηγήσεις διατίθενται επιπλέον σε διάφορες πολιτείες και διαφέρουν κατά αυτόν τον τρόπο όπως στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Οικονομικά κίνητρα αγοράς Γ.Α.Θ. σε 3 πολιτείες των Η.Π.Α. [163]

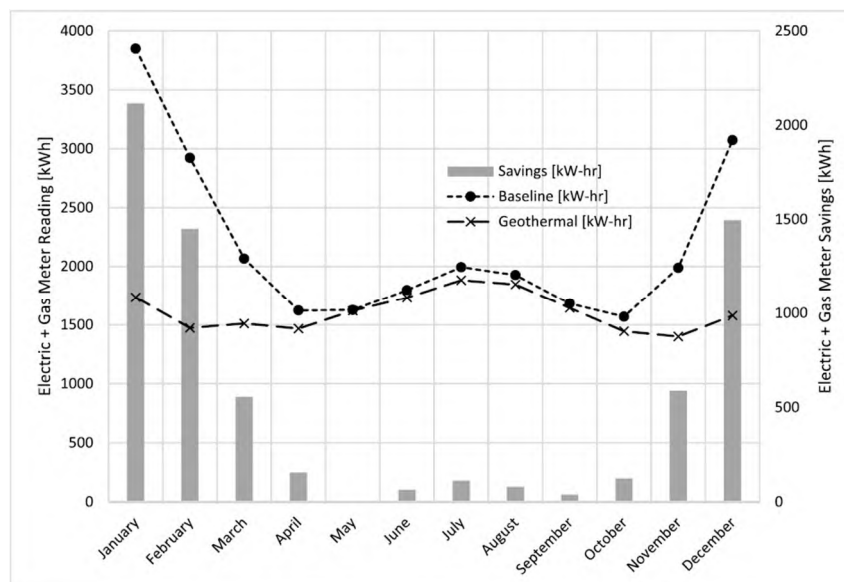
Πολιτεία	Κίνητρο
Τενεσί	\$250/Γ.Α.Θ.
Μέιν	Ένα τρίτο του αρχικού κόστους έως και \$3000
Μιννεσότα	\$100-\$200/τόνο συν \$200 μοτέρ ανεμιστήρα ECM

Εξοικονόμηση

Σύμφωνα με τον Οργανισμό Περιβαλλοντικής Προστασίας, οι Γ.Α.Θ. μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας έως και 44% σε σχέση με τις αντλίες θερμότητας αέρα και έως 72% σε σχέση με τα συστήματα ηλεκτρικών αντιστάσεων

με συμβατικό κλιματισμό. Ο χρόνος απόσβεσης είναι 5-10 χρόνια σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας [164].

Μία μελέτη προσομοίωσης στο Μέμφις [163] έδειξε ότι η αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος μιας κατοικίας με γεωθερμικό επιτυγχάνει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό το όφελος είναι πολύ σημαντικό διότι σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας, τα κόστη θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού απαρτίζουν το 48% της κατανάλωσης ενέργειας ενός νοικοκυριού των Η.Π.Α. Η σύγκριση της προσομοίωσης αφορά ένα υπάρχον σύστημα φυσικού αερίου των 6,5 kW για θέρμανση και τυπικό σύστημα κλιματισμού για ψύξη, και ένα κατακόρυφο γεωθερμικό. Υπολογίζεται ότι για το σπίτι έκτασης 223 m² θα απαιτηθεί αντλία ισχύος 4 ψυκτικών τόνων (14,07 kW). Υποθέτοντας αρχικό κόστος \$4 000/τόνο (\$1 136/kW) τότε το συνολικό κόστος εγκατάστασης θα είναι \$16 000. Τελικά η εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας είναι 26% με τη βοήθεια του γεωθερμικού συστήματος και της εξοικονόμησης των εξόδων αερίου και ρεύματος, καθώς η συνολική κατανάλωση των συστημάτων είναι 26 131 kWh για το αρχικό και 19 345 kWh για το γεωθερμικό. Η σύγκρισή τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση ενεργειακής κατανάλωσης [163]

Εφόσον συνυπολογιστεί η έκπτωση κατά 30% όπως προαναφέρθηκε και η επιστροφή \$250 που προσφέρει η πολιτεία του Τενεσί, το τελικό κόστος θα είναι \$10 950. Στην συνέχεια, για τιμή ρεύματος \$0,107/kWh υπολογίζεται η ετήσια

εξοικονόμηση \$725. Επομένως η απλή περίοδος απόσβεσης υπολογίζεται στα 15,1 χρόνια. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν έρευνες διερωτώμενων ιδιοκτητών σχετικά με τις αποδεκτές χρονικές περιόδους συμπεραίνεται ότι αυτό το διάστημα είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που διατίθενται να υπομείνουν οι ενδιαφερόμενοι. Υποθέτοντας διάρκεια ζωής 20 χρόνων, οι συνολική εξοικονόμηση κόστους είναι \$14 500 σε σχέση με το συμβατικό σύστημα [163].

5.4 Άλλες μελέτες

Στην Αλάσκα οι αρχικές τιμές έχουν εύρος \$2 000-\$12 000/kW_{th} αλλά ο σταθμισμένος μέσος όρος είναι \$7 613/kW_{th} για τα κατακόρυφα συστήματα και \$3 036/kW_{th} για τα οριζόντια. Το σύστημα του αεροδρομίου Juneau βασίζεται σε γεωθερμικό σύστημα που αντικατέστησε το παλαιότερο και αποτελείται από 108 κατακόρυφες γεωτρήσεις κόστους \$1 εκ. και 28 αντλίες θερμότητας κόστους \$460 000. Το τελικό κόστος του εγχειρήματος υπολογίστηκε περίπου στα \$6 εκ. Μία ακόμη αντικατάσταση ενός λέβητα συμπύκνωσης πετρελαίου πραγματοποιήθηκε σε ένα κέντρο ερευνών και τα κόστη του γεωθερμικού συστήματος είναι ως εξής: \$1 026 για τον σχεδιασμό του γεωεναλλάκτη, \$26 491 για τα εξαρτήματα του και την εγκατάστασή του και \$19 686 για τα εξαρτήματά της αντλίας και της εγκατάστασής της. Το τελικό κόστος ανήλθε στα \$47 203. Στην νοτιοανατολική Αλάσκα είναι σύνηθες οι τιμές του ρεύματος να είναι χαμηλότερες από αυτές των ορυκτών καυσίμων και ενισχύουν την οικονομική δυνατότητα των Γ.Α.Θ. Η αντικατάσταση της θέρμανσης αντιστάσεων είναι επίσης συμφέρουσα [165].

Οι Blum et al. [166] συγκέντρωσαν στοιχεία περισσότερων από 1 100 κατακόρυφων συστημάτων Γ.Α.Θ. μικρής ισχύος (<30 kW) στη νότια Γερμανία. Σε σύγκριση με άλλες χώρες τα υψηλότερα κόστη επένδυσης παρατηρούνταν στην Γερμανία και την Ελβετία στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας. Ο Πίνακας 5.4 συνοψίζει κάποια από τα εξεταζόμενα στοιχεία.

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά συστημάτων Γ.Α.Θ. (<30 kW) στην Γερμανία [166]

Παράμετρος	Αριθμητικός μέσος	Τυπική απόκλιση
Εμβαδόν [m ²]	190	57
Αριθμός γεωτρήσεων	2	0,8
Συνολικό μήκος γεωεναλλάκτη [m]	180	90
Βάθος γεώτρησης [m]	95	34
Ρυθμός εξαγωγής θερμότητας [W/m]	48	10
Ζήτηση θέρμανσης [kW]	11	3
Κόστη διάνοιξης και γεωτρήσεων [€]	11 997	3 881
Κόστη αντλίας θερμότητας [€]	11 649	3 886
Συνολικά κόστη επένδυσης [€]	23 460	6 754

Ακόμη, το μέγιστο και ελάχιστο αρχικό κόστος που βρέθηκαν είναι 55 564€ και 8 359€. Το κόστος των γεωτρήσεων ανά μονάδα μήκους της Γερμανίας ήταν 67 €/m και υψηλότερο από άλλες χώρες όπως η Κορέα (30 €/m) και η Σαουδική Αραβία (54 €/m). Επίσης το κόστος ανά kW θέρμανσης είναι 30% υψηλότερο από αυτό του Ηνωμένου Βασιλείου. Ο τύπος του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη είναι συνήθως διπλός σωλήνας U. Τα συνολικά κόστη διαμοιράζονται σχεδόν εξίσου μεταξύ των γεωτρήσεων (51%) και της αντλίας θερμότητας (49%) [166].

Στην Αυστραλία οι Aditya et al. [167] σύγκριναν τα κόστη διάφορων συστημάτων θέρμανσης/ψύξης εντός και εκτός της χώρας. Το μοντέλο της μελέτης αφορά κατοικία 150 m² και 4 ατόμων. Σύμφωνα με την Αυστραλιανή Στατιστική Υπηρεσία, για την οικιακή θέρμανση χρησιμοποιείται 30% φυσικό αέριο και 38% ηλεκτρισμός ενώ για την ψύξη το 49% χρησιμοποιεί κλιματιστικό. Μεταξύ άλλων τα προς σύγκριση συστήματα είναι: θέρμανση/ψύξη με κλιματιστικό, θέρμανση με καυστήρα φυσικού αερίου και ψύξη με κλιματιστικό και θέρμανση/ψύξη με κλιματισμό, με ισχύ 10 kW έκαστο. Δύο από τις εγχώριες πόλεις που εξετάζονται είναι η Μελβούρνη και το Σίδνεϋ. Οι τιμές ρεύματος/αερίου ήταν 0,17/0,06 € ανά kWh και 14,28/0,08 € ανά kWh αντίστοιχα. Η κοστολόγηση των συστημάτων είναι παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Κοστολόγηση συστημάτων θέρμανσης/ψύξης στην Αυστραλία [167]

Σύστημα	Τιμή
Γεωτρήσεις [€/m]	48
Γ.Α.Θ. [€/kW]	1 200
Καυστήρας φυσικού αερίου [€/kW]	300
Κλιματιστική μονάδα [€/kW]	600

Επίσης, η διάρκεια ζωής του γεωθερμικού συστήματος θεωρείται ίση με 20 χρόνια ενώ για τα άλλα 2 ίση με 10 χρόνια και αντικατάσταση με ισότιμο σύστημα. Ακόμα κι έτσι, το αρχικό κόστος του γεωθερμικού συστήματος ξεπερνά τα άλλα 2 λόγω του ακριβού γεωεναλλάκτη. Η *προσεγγιστική* σύγκριση των κοστών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Σύγκριση των κοστών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης στη Μελβούρνη και το Σίδνεϋ [167]

Σύστημα	Μελβούρνη			Σίδνεϋ		
	Κλιματιστικό	Κλιμ. και Φ.Α.	Γ.Α.Θ.	Κλιματιστικό	Κλιμ. και Φ.Α.	Γ.Α.Θ.
Αρχικό κόστος [€]	10 800	12 000	24 000	10 200	12 000	18 000
Ετήσιο κόστος λειτουργίας [€]	1 296	1 224	720	540	690	300

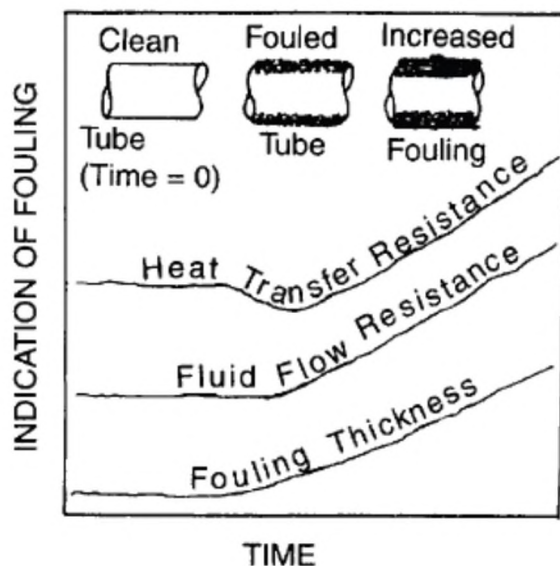
5.5 Τεχνικά Προβλήματα

5.5.1 Καθαλάτωση και διάβρωση

Εισαγωγή

Η καθαλάτωση αναφέρεται στην ανεπιθύμητη συσσώρευση σωματινών και μαζών σε επιφάνειες, εξοπλισμό και συστήματα κυκλοφορίας ρευστών και μεταφοράς θερμότητας. Η ικανότητα των συστημάτων να λειτουργούν αποτελεσματικά δυσχεραίνεται σημαντικά λόγω αυτού του φαινομένου. Πρόκειται για μια περίπλοκη διαδικασία που συμπλέκει πολλές μεταβλητές. Πέρα από τις Γ.Α.Θ. το πρόβλημα εμφανίζεται και σε βιομηχανίες όπως διυλιστήρια, παραγωγή χαρτιού, αφαλάτωση, επεξεργασία τροφίμων κ.α. Οι κυριότερες επιπτώσεις της καθαλάτωσης είναι η εμπόδιση της μεταφοράς θερμότητας λόγω της χαμηλής θερμικής

αγωγιμότητας των επικαθήσεων που δημιουργούν μονωτικά στρώματα πάνω στις επιφάνειες (“scaling”) και η μείωση του εμβαδού ροής η οποία προκαλεί πτώση πίεσης και παροχής εντός της συσκευής όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10.

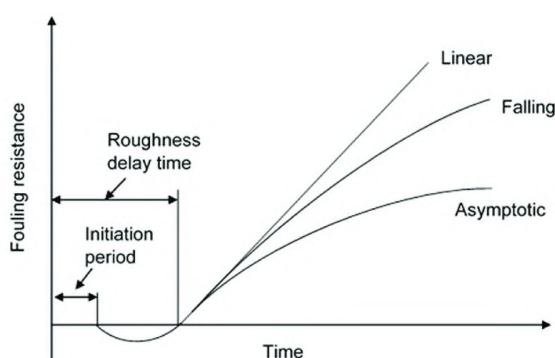


Σχήμα 5.10: Επιπτώσεις της ανάπτυξης της καθαλάτωσης σε αγωγούς [168]

Η δημιουργία των επικαθήσεων (Σχήμα 5.11) οφείλεται σε διαλυμένα ιόντα τα οποία αντιδρούν και στερεοποιούνται όταν το ρευστό υπερκορεστεί λόγω αλλαγών των συνθηκών (π.χ. θερμοκρασία, pH, πίεση, συγκέντρωση). Επίσης, τα στερεά σώματα που περιέχονται στο νερό φράζουν σωλήνες, φίλτρα και βαλβίδες οδηγώντας σε βούλωμα (“clogging”) και άλλες αστοχίες. Τελικά, απαιτείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για να καλυφθούν οι απώλειες και να διατηρηθεί η παροχή. Οι καμπύλες σχηματισμού των επικαθήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.11: Επικαθήσεις σε αγωγό νερού [169]



Σχήμα 5.12: Καμπύλες σχηματισμού των αντιστάσεων [170]

Οι επιπτώσεις των σχηματισμών αντανακλώνται και στην οικονομία των συστημάτων μέσω της υπερδιαστασιολόγησης, του κόστους συντήρησης ή αντικατάστασης σε περίπτωση αστοχίας και του αυξημένου κόστους λειτουργίας λόγω των απωλειών. Οι σωληνοειδείς εναλλάκτες θερμότητας συνήθως σχεδιάζονται με 20-50% περίσσεια επιφάνειας που σε συνδυασμό με τις προβλεπόμενες εφεδρικές μονάδες και τις περιπτώσεις ενσωμάτωσης “online” συστημάτων καθαρισμού μπορεί να πολλαπλασιάσει το αρχικό κόστος. Παρόλα αυτά αν η επιπλέον επιφάνεια μειώσει αρκετά την ταχύτητα ροής, τότε οι ρυθμοί της καθαλάτωσης δύναται να επιταχυνθούν. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η υπερδιαστασιολόγηση αποφεύγεται στην περίπτωση των Γ.Α.Θ. διότι ο οι μεταβλητές κόστους του σχεδιασμού είναι ευαίσθητες και δεν επιτρέπουν μεγάλη ευλυγισία, όπως για παράδειγμα στην διαστασιολόγηση των γεωτρήσεων ή στην απόκτηση ισχυρότερης υποβρύχιας αντλίας. Συνεπώς η διαχείριση του φαινομένου είναι ακόμη σημαντικότερη μέσω αποδοτικότερων μορφών πρόληψης, επίβλεψης και συντήρησης. Στις “offline” συντηρήσεις, το σύστημα αναγκαστικά απενεργοποιείται και ειδικά όταν πρόκειται για επείγουσα περίπτωση. Η λειτουργία πολλών εξαρτώμενων συστημάτων μπορεί να σταματήσει, και επομένως χάνεται χρόνος παραγωγής, ειδικά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Σε ακραίες περιπτώσεις όπου το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί με χημικά πρόσθετα, η τροποποίηση σε “online” σύστημα συντήρησης μπορεί να είναι η μόνη λύση με σημαντικό όμως κόστος. Ο περιορισμός του φαινομένου πρέπει να προλαμβάνεται με αυτούς τους τρόπους, δηλαδή με σχεδιασμό που να μετριάξει όσο το δυνατόν περισσότερο την εμφάνιση της καθαλάτωσης. Για παράδειγμα, αποφυγή εναρκτήριων θερμοκρασιών και ταχυτήτων υψηλότερων και χαμηλότερων από τις τιμές σχεδιασμού αντίστοιχα, online συστήματα συντήρησης ώστε να μην υπάρχουν νεκροί χρόνοι, χρήση χημικών και φίλτρων [168].

Η φύση των χειριζόμενων ρευστών, η χημεία τους, τα συστατικά τους και οι παράμετροι σχεδιασμού όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα ροής επηρεάζουν την δημιουργία της καθαλάτωσης. Οι πηγές τους μπορεί να είναι φυσικές αλλά και βιομηχανικές. Τα σωματίδια και οι ουσίες που συναντώνται συνήθως είναι και ανόργανης και οργανικής φύσεως όπως σκόνη, λάσπη, χαλίκια, άλατα μαγνησίου,

θείου και ασβεστίου (MgCO_3 , CaSO_4 , CaCO_3), υδροξείδια και οξείδια σιδήρου, διοξείδιο μαγγανίου (MnO_2), ιζήματα, θραύσματα, βακτήρια, μύκητες, φύκια, πολυμερή και άλλες ουσίες που μπορεί να βρίσκονται σε ρευστά. Οι αντιστάσεις των επικαθήσεων διάφορων ουσιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7

Πίνακας 5.7: Αντιστάσεις επικαθήσεων διαφόρων ρευστών [168]

Ρευστό	Αντίσταση [$10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$]
Υφάλμυρο νερό	3,5-5,3
Αποσταγμένο νερό	0,9-1,75
Ποταμίσιο νερό	3,5-5,3
Θαλασσινό νερό	1,75-3,5
Αιθανόλη	3,5
Μεθανόλη	3,5
Φυσικό αέριο	1,75-3,5

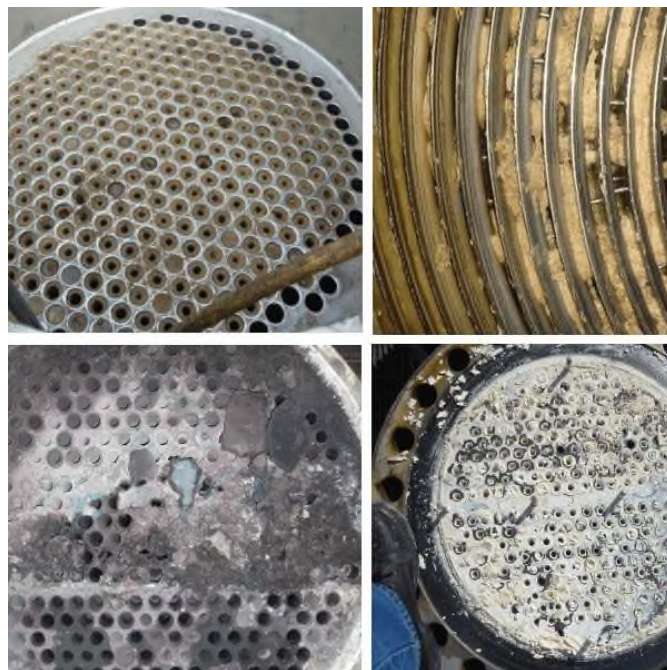
Κατηγοριοποίηση

Μερικές από τις μορφές της καθαλάτωσης είναι οι εξής [168] και οι αποθέσεις τους φαίνονται στο Σχήμα 5.13:

1. *Σωματιδιακή καθαλάτωση:* Είναι η συσσώρευση σωματιδίων που βρίσκονται μέσα σε ρευστά πάνω σε επιφάνειες. Για παράδειγμα σωματίδια αργίλου και μεταλλικών στοιχείων του νερού, αιθάλη ατελούς καύσης, άλατα αφαλάτωσης, σκόνη. Σημαντικοί παράγοντες είναι η σωματιδιακή συγκέντρωση, η ταχύτητα του ρευστού και η θερμοκρασία.
2. *Κρυσταλλική καθαλάτωση:* Προκύπτει από στην κρυστάλλωση διαλυμένων αλάτων σε κορεσμένα μείγματα λόγω των μεταβολών της διαλυτότητας με την θερμοκρασία. Επίσης, σχηματισμό επικαθήσεων λόγω διαλυμένων ιόντων. Παρατηρείται κυρίως σε υδατικά διαλύματα που περιέχουν διαλυτά άλατα όπως θαλασσινό νερό, υπόγειο νερό και άλμη αλλά και μεταλλικά ιόντα.
3. *Καθαλάτωση χημικών αντιδράσεων:* Αυτές οι επικαθήσεις προκύπτουν από τα προϊόντα ανεπιθύμητων χημικών αντιδράσεων μέσα στο ρευστό πάνω στις επιφάνειες όπου αυτές δρουν ως καταλύτες. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η πυρόλυση (cracking), η οπτανθρακοποίηση (coking), ο πολυμερισμός και η

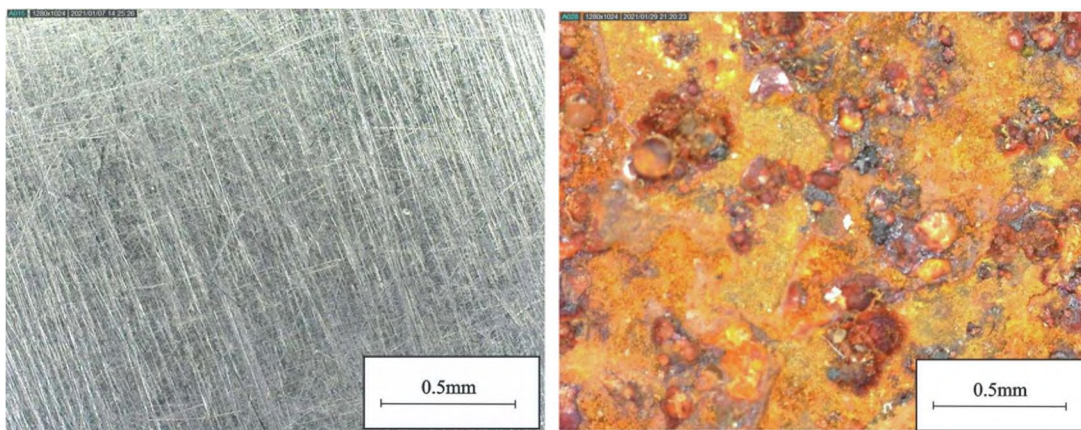
αυτοοξειδωση. Συναντάται σε βιομηχανίες πετροχημικών και διύλισης και ευνοείται από υψηλές θερμοκρασίες.

4. *Βιολογική καθαλάτωση*: Περιλαμβάνει την επικόλληση και ανάπτυξη μικροοργανισμών και των παραπροϊόντων τους και παρατηρείται στα συστήματα νερού. Η μικροβιακή καθαλάτωση συσσωρεύει φύκια, μύκητες, βακτήρια και μούχλα και εμφανίζεται ως λεπτό γλοιώδες στρώμα (γνωστό και ως βιοφίλμ) το οποίο αφαιρείται δύσκολα. Επίσης ενισχύει την εμφάνιση διάβρωσης κάτω από αυτό.



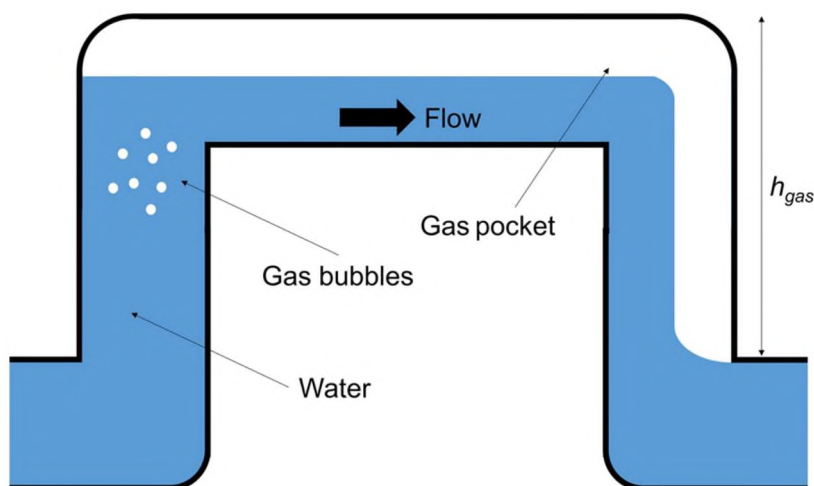
Σχήμα 5.13: Καθαλάτωση σε εναλλάκτες θερμότητας [171]

5. *Διάβρωση*: Είναι μια διαδικασία όπου οι μεταλλικές επιφάνειες του συστήματος υφίστανται ηλεκτροχημική αντίδραση οξειδοαναγωγής με την ροή του νερού στην οποία υπάρχει οξυγόνο. Αυτή η αλληλεπίδραση έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεταλλικών οξειδίων που οδηγούν σε επικαθήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Οι δύο τρόποι με τους οποίους μολύνεται το σύστημα είναι αρχικά η δημιουργία θερμικών αντιστάσεων και η αποκόλληση τους από τις επιφάνειες ως σωματίδια τα οποία μεταφέρονται με την ροή και αποτίθενται σε άλλα σημεία του συστήματος.



Σχήμα 5.14: Διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας [172]

Βούλωμα μπορεί επίσης να προκληθεί και από αέρια [173] όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15. Το νερό που εξάγεται από γεωτρήσεις σχετικά κοντά στην πίεση κορεσμού των διαλυμένων αερίων εντός του, υπόκειται σε κίνδυνο απαέρωσης (degassing) λόγω της πτώσης πίεσης κατά την ροή του μέσα στο σύστημα. Οι παράγοντες που οδηγούν σε πτώση της πίεσης είναι η αύξηση του υψομέτρου της ροής, της ταχύτητας και των τριβών. Η υποβάθμιση της πίεσης υπό την ατμοσφαιρική (vacuum pressure) επιτρέπει εντέλει αυτό το φαινόμενο. Το σημείο που είναι κρίσιμότερο είναι η γεώτρηση επαναφόρτισης στο τέλος του δικτύου. Οι φυσαλίδες ανεβαίνουν στα ανώτατα σημεία των αγωγών όταν η ταχύτητα είναι αρκούντως χαμηλή και δημιουργούν στάσιμους θύλακες αερίων που βουλώνουν τους αγωγούς είτε λόγω της παρεμπόδισης της ροής είτε λόγω της ευνόησης των χημικών επικαθήσεων. Οι φυσαλίδες μπορούν επίσης να μπλοκάρουν το φίλτρο και τον σχηματισμό του υδροφορέα. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι κάποια από τα αέρια που δημιουργούν προβλήματα καθώς το πρώτο επιτρέπει την οξείδωση του σιδήρου ενώ το δεύτερο μειώνει το pH και κατά συνέπεια την διαλυτότητα των οξειδίων και ανθρακικών ενώσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σύστημα θα πρέπει να διατηρείται υπό πίεση άνω της 1 atm ώστε οι σωλήνες να είναι συνεχώς πλήρεις και ο σχεδιασμός των συστημάτων να περιλαμβάνει βαλβίδες εξαέρωσης στα κρίσιμα σημεία και πιεσόμετρα στα πηγάδια επαναφόρτισης.



Σχήμα 5.15: Σχηματισμός φυσαλίδων και στάσιμων θυλάκων αέρα σε ροή σωλήνα [173]

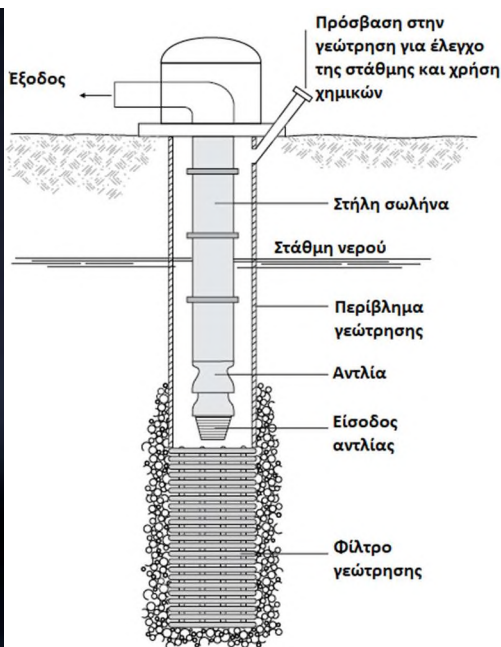
Το φαινόμενο στις Γ.Α.Θ.

Αυτό το φαινόμενο συναντάται συνήθως στις Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου οι οποίες αντλούν υπόγεια νερά με ποικίλλες χημικές συνθέσεις. Η απευθείας είσοδος του νερού στο σύστημα φέρνει τα σωματίδια σε επαφή με τα εξαρτήματά του (υποβρύχια αντλία, εξατμιστής, σωλήνες, περίβλημα, φίλτρο) και δημιουργεί περιβάλλον όπου η σωματιδιακή καθαλάτωση μπορεί να ευδοκιμήσει. Η κύρια επίδραση της απόθεσης είναι η δημιουργία μονωτικών στρωμάτων μέσα στους εναλλάκτες που αυξάνουν την θερμική αντίσταση. Καθώς το πάχος του στρώματος αυξάνεται η ροή της θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ψυκτικού μέσου της αντλίας μειώνεται, όπως επίσης και η απόδοση. Η καθαλάτωση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική πτώση του βαθμού απόδοσης και της ισχύος του συστήματος, υψηλότερα κόστη λειτουργίας και ταχύτερη φθορά των εξαρτημάτων της αντλίας όπως ο συμπιεστής. Στην χειρότερη περίπτωση, η αστοχία του συστήματος μπορεί να είναι ολική. Αυτός ο κίνδυνος παραμονεύει πάντα διότι οι επιφάνειες του σχηματισμού δεν είναι ορατές και όταν εντοπιστούν λόγω βλάβης οι ζημιές και τα κόστη επιδιόρθωσης μπορεί να είναι μεγάλα. Ο γρήγορος εντοπισμός του φαινομένου είναι λοιπόν σημαντικός [174]. Ωστόσο, η επικαθήσεις δύναται να εμφανιστούν και εντός των γεωτρήσεων και να βουλώσουν τον σχηματισμό του υδροφορέα, στην είσοδο και την έξοδο. Επομένως, τα μέτρα πρόληψης και η χημική ανάλυση του νερού δεν πρέπει να παραλείπονται από τον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων.

Οι Gjengedal et al. [174] παρουσιάζουν διάφορους τρόπους με τους οποίους η καθαλάτωση επηρεάζει τα μέρη του συστήματος: Το προστατευτικό φίλτρο (well screen) το οποίο βρίσκεται μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα εμποδίζει τα σωματίδια να αντληθούν μαζί με το νερό (χρησιμοποιούνται επίσης και υδροκυκλώνες) όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.16 και 5.17. Το βούλωμά του από την συσσώρευση σωματιδίων οδηγεί σε μείωση της παραγωγής της γεώτρησης και του ρυθμού παροχής. Συνεπώς το επίπεδο του νερού πέφτει, σε σημείο που να φτάσει την υποβρύχια αντλία. Αν συμβεί αυτό, τότε αέρας μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα με αποτέλεσμα τον κίνδυνο σπηλαιώσης του εσωτερικού της. Το ίδιο μπορεί να συμβεί στο φίλτρο της γεώτρησης επανεισόδου το οποίο διανέμει το νερό ομοιόμορφα και εμποδίζει την είσοδο ξένων σωμάτων από το περιβάλλον στον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτό το σημείο πλήττεται ιδιαίτερα από αυτό το φαινόμενο και συχνά σχεδιάζεται με μεγαλύτερη επιφάνεια, έως και διπλάσια [5]. Τα σωματίδια που συναντώνται συνήθως στο Μέλχους της Νορβηγίας είναι άμμος, λάσπη, άργιλος με υδροξείδια μαγγανίου ή/και σιδήρου. Το αντίθετο αποτέλεσμα είναι το πλημμύρισμα της γεώτρησης.



Σχήμα 5.16: Φίλτρο γεώτρησης [175]



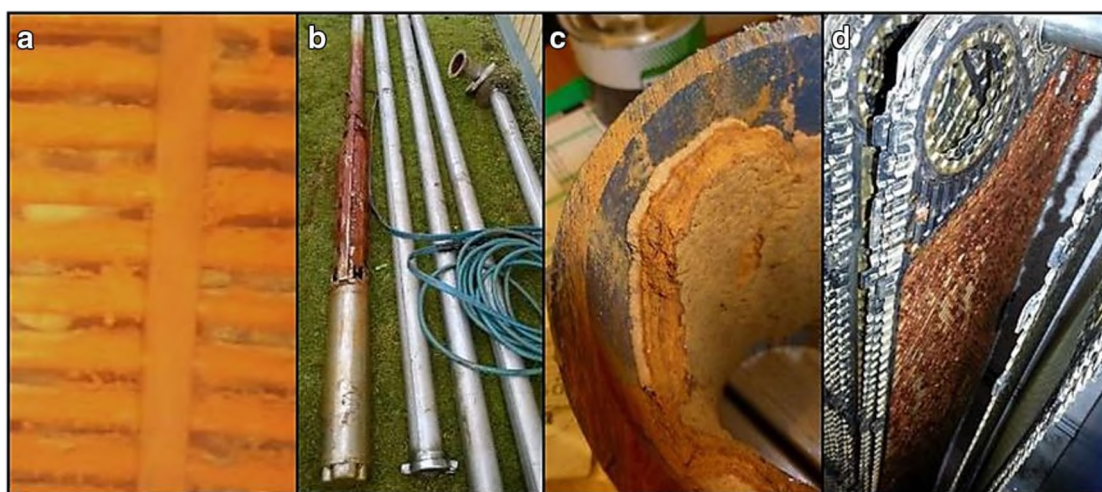
Σχήμα 5.17: Διάταξη γεώτρησης υπόγειου νερού [176]

Ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί επίσης να επηρεαστεί. Πρώτον, τα σωματίδια που διαφεύγουν από το φίλτρο επανεισάγονται στον ορίζοντα και εναποτίθενται

στους πόρους του υδροφορέα βουλώνοντάς τους. Δεύτερον, αν οι χημική σύνθεση των νερών που κυκλοφορούν στις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής είναι διαφορετικές τότε πιθανές αντιδράσεις μεταξύ τους μπορεί να δημιουργήσουν το βούλωμα. Η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας του τοπικού ορίζοντα επηρεάζει αρνητικά την λειτουργία των γεωτρήσεων [174].

Στο εσωτερικό των αγωγών το στρώμα των επικαθήσεων αυξάνει την τριβή της ροής η οποία αποδυναμώνει την παροχή της υποβρύχιας αντλίας και αυξάνει την πτώση πίεσης. Αν οι απώλειες τριβών αποκτήσουν μεγάλες τιμές τότε η βλάβη της αντλίας είναι πιθανή. Επίσης δημιουργείται το προαναφερθέν μονωτικό στρώμα στο εσωτερικό του εναλλάκτη που μειώνει τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.18 [174].

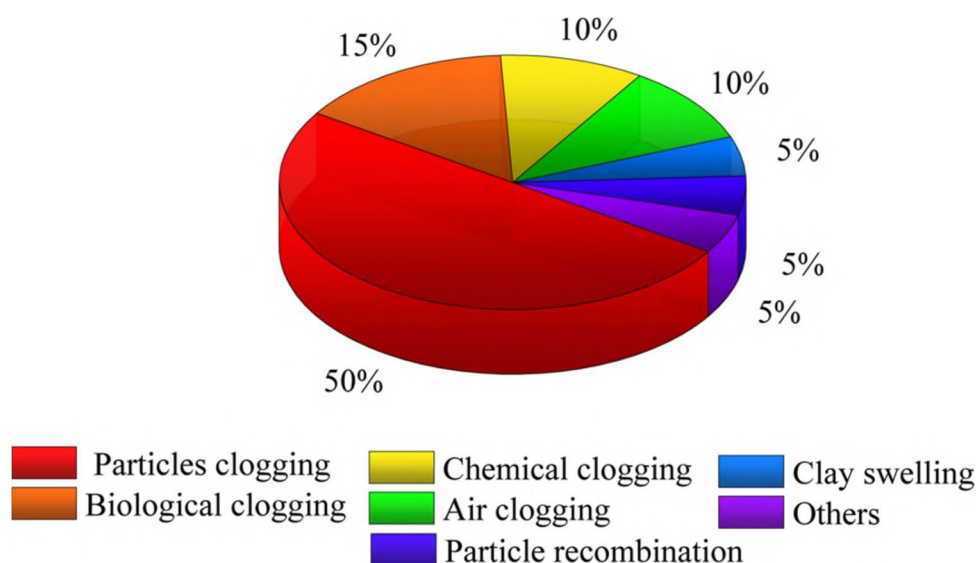
Οι επικαθήσεις στους εναλλάκτες θερμότητας της αντλίας είναι επίσης συχνό φαινόμενο με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως [174].



Σχήμα 5.18 (α) Βούλωμα φίλτρου παραγωγής, (β) χαλασμένη υποβρύχια αντλία, (γ) τομή σωλήνα με στρώμα υδροξειδίου του σιδήρου 1 cm, (δ) καθαλάτωση σε εναλλάκτη πλακών [174]

Εκτός από την ισχυρή παρουσία μεταλλικών στοιχείων στην χημεία του νερού, η υψηλή σκληρότητα συνεισφέρει στην έμφραξη των συστημάτων. Η απευθείας σύνδεση του νερού με τον εξατμιστή θεωρείται ασφαλής μόνο για νερά χαμηλής μεταλλικότητας και σκληρότητας υπό τους 12 °F. Δεδομένου ότι τα περισσότερα υπόγεια νερά είναι υψηλής σκληρότητας, η παρουσία ενδιάμεσου εναλλάκτη θερμότητας κρίνεται ως κατάλληλη λύση προφύλαξης της βασικής αντλίας [177]. Διαφορετικά, αν η συγκέντρωση του -κατά τα άλλα- διαλυμένου ανθρακικού

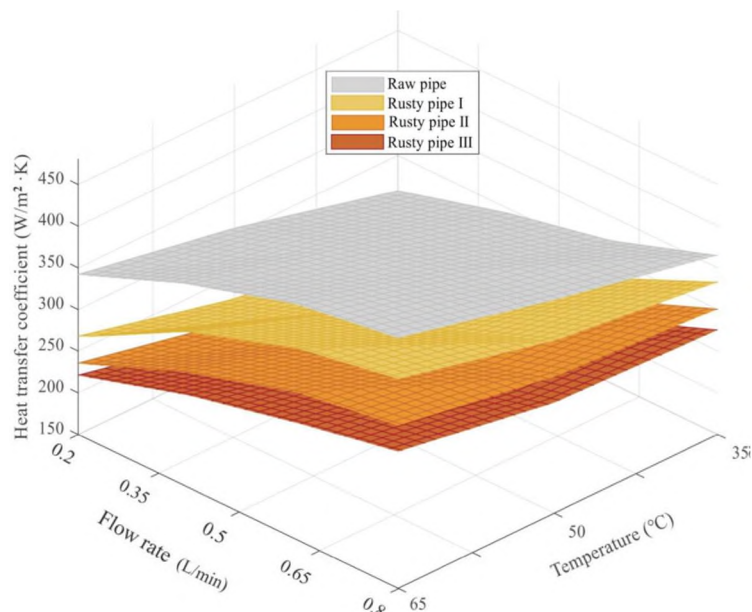
ασβεστίου ξεπερνά τα 100 ppm και το pH την τιμή 7,5 τότε αναμένεται δημιουργία εναποθέσεων αλάτων στον εναλλάκτη. Επιπροσθέτως, ο σίδηρος δημιουργεί επίσης προϊόντα καθαλάτωσης αν αντιδράσει με τον αέρα μέσα στο σύστημα. Το ίδιο ισχύει και για το υδρόθειο (>0,25 ppm) οποίο είναι διαβρωτικό για τα χάλκινα εξαρτήματα [178]. Οι μηχανισμοί βουλώματος της γεώτρησης επανεισαγωγής που καταγράφηκαν από τους Song et al. [178] σε συστήματα Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου σε υδροφόρο ορίζοντα από αμμόλιθο παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.19.



Σχήμα 5.19: Κατανομή των μηχανισμών βουλώματος Γ.Α.Θ. σε υδροφορέα αμμόλιθου [179]

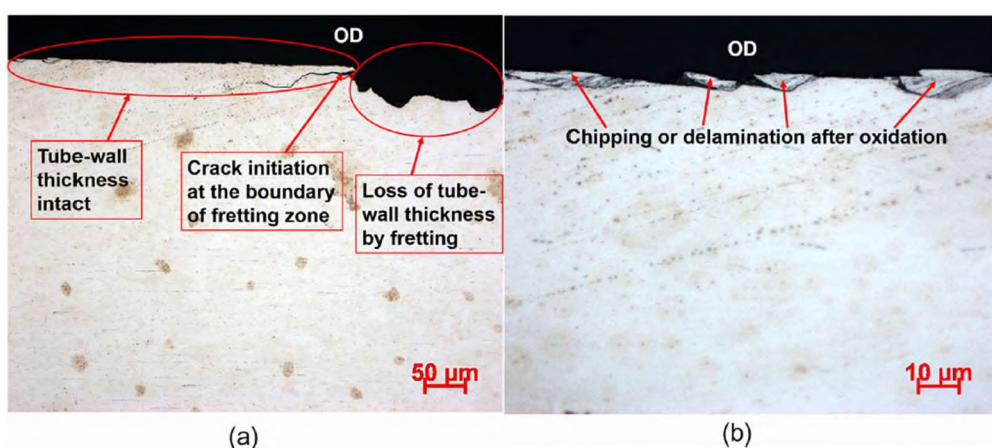
Η άντληση των επιφανειακών νερών όπως ποταμών παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα που συναντώνται και στα υπόγεια. Σε ένα πείραμα στην Κίνα, η μάζα της καθαλάτωσης αποτελούνταν από πυρίτιο και οξυγόνο κατά 75,8%, δηλαδή ο κύριος παράγοντας ήταν το διοξείδιο του πυριτίου. Επίσης μεταλλικά στοιχεία όπως αλουμίνιο, ασβέστιο, μαγνήσιο, σίδηρος και χαλκός είναι παρόντα. Η επικόλληση των σωματιδίων στα τοιχώματα των αγωγών αποτελείται από μικρούς, πυκνούς και σκληρούς κόκκους που σχηματίζουν το μονωτικό στρώμα [180].

Η επίδραση της διάβρωσης στην αποτελεσματικότητα μεταφοράς θερμότητας των σωλήνων μπορεί να είναι πολύ σοβαρή. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας των μεταλλικών αγωγών μπορεί να μειωθεί από 8,3-41,5% σύμφωνα με τους Luo et al. με αποτέλεσμα την συνολική μείωση της απόδοσης του συστήματος [172]. Η θερμοκρασία εισόδου δεν παίζει σημαντικό ρόλο αλλά η αύξηση της παροχής βελτιώνει τον συντελεστή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.20: Επίδραση της παροχής και της θερμοκρασίας στον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας διαβρωμένων σωλήνων [172]

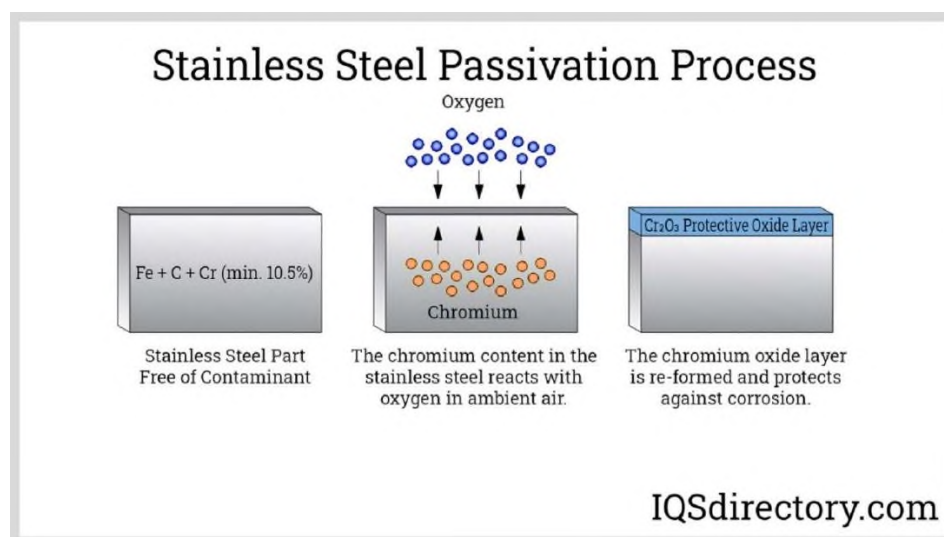
Η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων επηρεάζεται επίσης από την διάβρωση. Για παράδειγμα σε εναλλάκτη αυλών κελύφους είχε παρατηρηθεί λέπτυνση των τοιχωμάτων, δημιουργία ρωγμών και αποκολλήσεις στο εξωτερικό των αγωγών (χαλκονικελίου 70/30) που σταδιακά οδήγησε σε διαρροές και τελικά σε αστοχία μετά από λίγα χρόνια λειτουργίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21 [181]. Οι μεταλλικοί εναλλάκτες των Γ.Α.Θ. ενδέχεται να υπόκεινται σε παρόμοιους κινδύνους λόγω της κυκλοφορίας του νερού.



Σχήμα 5.21: (α) Σχηματισμός ρωγμών, «φάγωμα», (β) αποκόλληση σε αγωγούς λόγω διάβρωσης [181]

Το υλικό του σωλήνα είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας και η επιλογή του στον σχεδιασμό είναι κρίσιμη. Κάποια μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και

ο ανοξείδωτος χάλυβας ευνοούνται από την δημιουργία λεπτού στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια που τα προστατεύει από την επέλαση της περαιτέρω διάβρωσης και έχουν πεπερασμένο πάχος όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22.



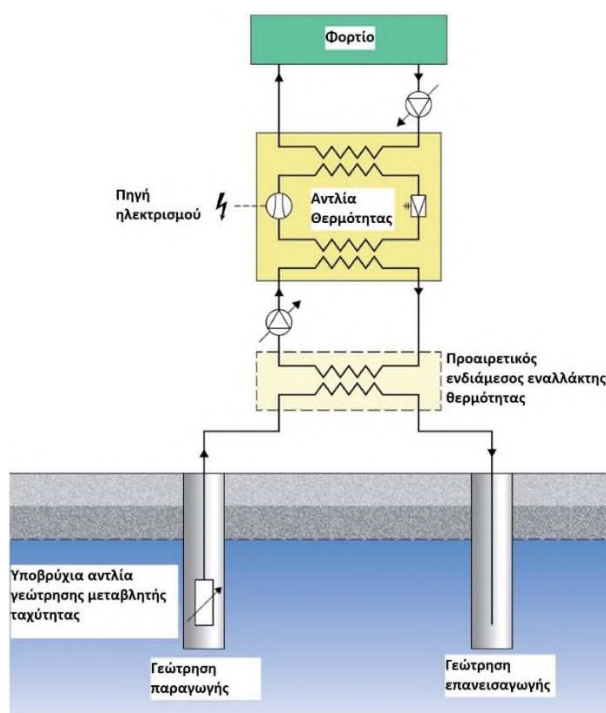
Σχήμα 5.22: Δημιουργία παθητικού στρώματος οξειδίου σε ανοξείδωτο χάλυβα [182]

Τα στρώματα των οξειδίων είναι «παθητικά» και δρουν προστατευτικά διαχωρίζοντας την μεταλλική επιφάνεια από το υπόλοιπο περιβάλλον και την έκθεσή του στις διαβρωτικές ουσίες. Ακόμη, έχει την ικανότητα της αυτοϊάσης και κατ' επέκταση η αντοχή των σωλήνων αυξάνεται. Ο ανθρακοχάλυβας θα πρέπει να αποφεύγεται σε αυτές τις εφαρμογές διότι είναι πολύ ευαίσθητος [172]. Τα τελευταία χρόνια προτιμώνται τα πλαστικά υλικά όπως το PVC για την κατασκευή των εξαρτημάτων των γεωτρήσεων όπως τα περιβλήματα, οι σωλήνες και τα φίλτρα λόγω της υψηλής του αντίστασης στην διάβρωση, το χαμηλό του κόστος και βάρος και την μεγάλη διάρκεια ζωής του. Ωστόσο, δεν είναι το ίδιο ανθεκτικά με τον χάλυβα σε υψηλές πιέσεις και είναι ευαίσθητα σε χημικά όπως το χλώριο (το κάνει ψαθυρό) και την αμμωνία (το παραμορφώνει) [183].

«Έμμεσα» συστήματα

Η προστασία του συστήματος από τα βλαβερά στοιχεία των γεωθερμικών νερών μπορεί να πραγματοποιηθεί προληπτικά κατά τον σχεδιασμό. Ένας τρόπος προφύλαξης και αποφυγής των παραπάνω φαινομένων είναι η διαμόρφωση ενός «έμμεσου» συστήματος. Το σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί έτσι με τη βοήθεια ενός συμπληρωματικού εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ των

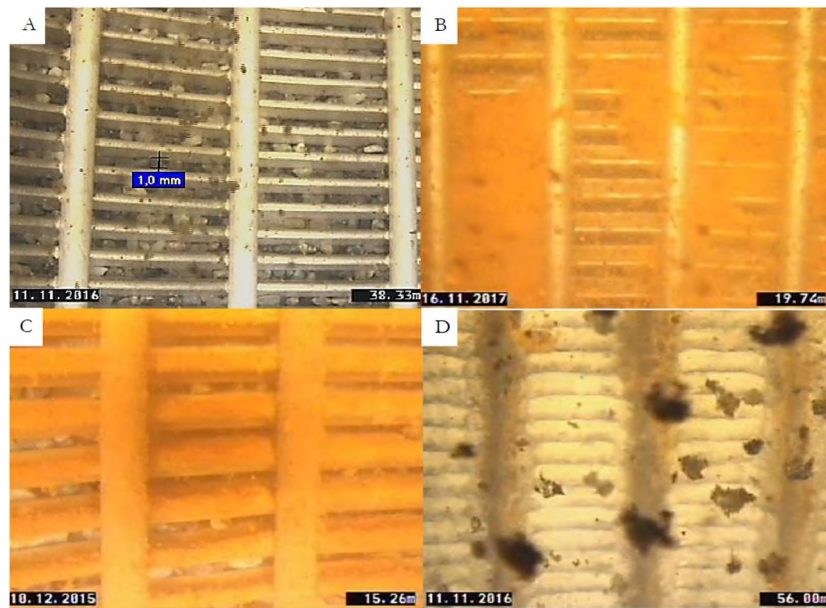
γεωτρήσεων και της βασικής αντλίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.23. Με αυτόν τον τρόπο το ρευστό που περιέχει τα βλαβερά στοιχεία καθαλάτωσης δεν έρχεται ποτέ σε επαφή με το κυρίως σύστημα. Αντιθέτως, μεταφέρει την θερμότητά του στην ροή ενός άλλου ρευστού που δεν θέτει σε κίνδυνο την αντλία θερμότητας και συγκεκριμένα το εξωτερικό στοιχείο του ατμοποιητή/συμπυκνωτή. Επίσης, οι παροχές κάθε υποσυστήματος μπορούν να λειτουργούν άνισα με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία του συνολικού συστήματος [11].



Σχήμα 5.23: Έμμεσο σύστημα Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου [11]

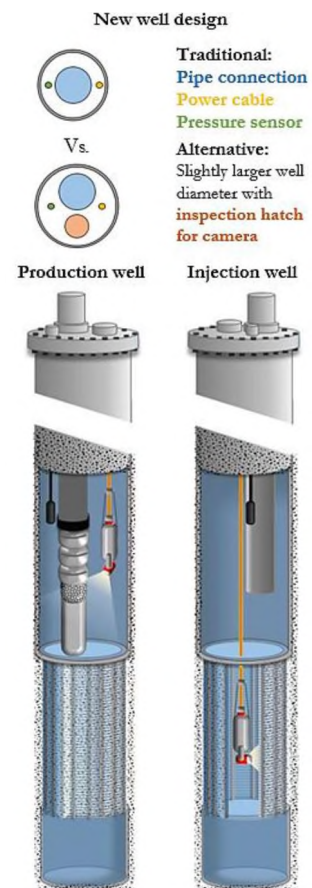
Επίβλεψη με κάμερα

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι βλάβες λόγω του βουλώματος των υπόγειων φίλτρων παρατηρούνται αφού υπάρξει βλάβη του συστήματος διότι η παρακολούθηση τους είναι δύσκολη. Ένας καινοτόμος τρόπος επίβλεψης των πηγαδιών σε πραγματικό χρόνο είναι η βύθιση καμερών μέσα στην γεώτρηση την ώρα του ελέγχου. Αυτή η μέθοδος είναι αξιόπιστη και πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στις διαδικασίες συντήρησης. Οι σύγχρονες κάμερες μπορούν να προσφέρουν έγχρωμες εικόνες με πλήρη περιστροφή και μέτρηση των εσοχών του φίλτρου με λέιζερ, δεδομένης της διαύγειας του νερού όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.24 [184].



Σχήμα 5.24: Κάμερες εντός φίλτρων σε γεωτρήσεις [184]

Σύμφωνα με νορβηγική μελέτη των Gjengedal et al. [183] η χρονική διάρκεια του ελέγχου είναι 15-30 λεπτά και το κόστος 520-590 € ανά γεώτρηση. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η έλλειψη χώρου για την τοποθέτηση της κάμερας καθώς η διαστασιολόγηση των γεωτρήσεων γίνεται με βάση την αντλία. Επομένως για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος, η λειτουργία του συστήματος πρέπει να σταματήσει και ο εξοπλισμός της γεώτρησης να αφαιρεθεί. Αν η μέθοδος της βιντεοσκόπησης πρόκειται να γίνει νόρμα τότε ο σχεδιασμός θα πρέπει να προβλέπει την ανάγκη μεγαλύτερης διαμέτρου η οποία θα λύνει το πρόβλημα. Επίσης, η τοποθέτηση της αντλίας και του σωλήνα άντλησης εκτός του κέντρου αφήνει χώρο για την κάμερα (στην συγκεκριμένη περίπτωση διαμέτρου 90 mm) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.25. Στην γεώτρηση επανεισαγωγής η κάμερα μπορεί να τοποθετείται μέσα στο φίλτρο. Η προοπτική παράτασης της ζωής του συστήματος και της ομαλότερης λειτουργίας του αντισταθμίζουν το πρόσθετο κόστος της εγκατάστασης.



Σχήμα 5.25: Τοποθέτηση κάμερας στις γεωτρήσεις [184]

Καθαρισμός

Ο καθαρισμός και η συντήρηση των συστημάτων συνήθως απαιτεί την διακοπή της λειτουργίας του συστήματος (“offline cleaning”) και η μέθοδος εξαρτάται από τον τύπο της καθαλάτωσης. Για την σωματιδιακή καθαλάτωση, ο καθαρισμός γίνεται συνήθως με μηχανικό τρόπο και αφορά το ξεβούλωμα των φίλτρων. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικό βούρτσισμα (Σχήμα 5.26) που αφαιρεί τα αγκιστρωμένα σώματα ώστε να επαναφερθεί η ομαλή ροή του νερού και η υδραυλική αγωγιμότητα ή με εξώθηση αέρα ή νερού υψηλής ταχύτητας και πίεσης (Σχήμα 5.27). Η χημική καθαλάτωση μπορεί επίσης να αντιμετωπιστεί με αυτούς τους τρόπους αλλά και συμπληρωματικά με χημικές καθαριστικές ουσίες που διαλύουν τις επικαθήσεις των αλάτων και εμποδίζουν τον εκ νέου σχηματισμό τους. Για παράδειγμα, υδροχλωρικό οξύ, EDTA, φωσφορικό οξύ, υποχλωριώδες νάτριο. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων προσφέρει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Η ίδια προσέγγιση ακολουθείται και στην βιολογική καθαλάτωση όπου τα χημικά μέσα είναι βιοκτόνα και απολυμαντικά όπως το χλώριο και το διοξείδιο του χλωρίου. Ωστόσο, πρέπει να δοθεί προσοχή στην επιλογή του χημικού και στον έλεγχο του καθαρισμού διότι τα καθαριστικά δημιουργούν κινδύνους διάβρωσης του εξοπλισμού ανάλογα με την συμβατότητα των υλικών, την συγκέντρωση, την θερμοκρασία κ.α. Επακόλουθοι έλεγχοι μετά τον καθαρισμό πρέπει να γίνονται για να διαπιστωθούν τυχόν ίχνη διάβρωσης και η αποτελεσματικότητα του [168].



Σχήμα 5.26: Βούρτσα καθαρισμού γεώτρησης [185]



Σχήμα 5.27: Συσκευές “jetting” καθαρισμού γεωτρήσεων [186]

6. Αξιολόγηση της Λειτουργίας Αδειοδοτημένων Εγκαταστάσεων

Γ.Α.Θ.

6.1 Εισαγωγή

6.1.1 Γεωθερμικές εφαρμογές στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η γεωθερμία δεν χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρά την ύπαρξη πεδίων υψηλής ενθαλπίας σε Μήλο, Κίμωλο, Νίσυρο, Λέσβο και Μέθανα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, κάτι το οποίο πρόκειται να αλλάξει ως το 2030. Αντίθετα, βρίσκει εφαρμογή σε άμεσες χρήσεις όπως οι αλλιά παρόλο που τα πεδία χαμηλής ενθαλπίας σε βάθη μικρότερα των 500 m έχουν προσεγγιστική ισχύ 1 000 MW_{th} μόνο το 9% χρησιμοποιούνταν το 2015. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν 271,73 MW_{th} το 2019 και ενισχύεται μέσω της ανάπτυξης των Γ.Α.Θ. και των γεωργικών εφαρμογών στην Βόρεια Ελλάδα [6]. Ακολουθούν κάποια από τα παραδείγματα εφαρμογών της άμεσης γεωθερμίας στην Ελλάδα που συγκεντρώθηκαν από τους Παπαχρήστου et al. [187].



Σχήμα 6.1: Τα πιο σημαντικά γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα [187]

Η λουτροθεραπεία είναι αρκετά διαδεδομένη στην Ελλάδα λόγω των 348 πηγών θερμών ρευστών που βρίσκονται σε διάφορα μέρη της χώρας (π.χ. Λέσβος, Εύβοια) και εξυπηρετούν σπα και πισίνες όπου το νερό έχει εύρος θερμοκρασίας 25-92 °C. Στον γεωργικό τομέα, επιτυγχάνεται θέρμανση θερμοκηπίων με ισχυρή

παρουσία στην Βόρεια Ελλάδα (Απολλωνία, Λαγκαδάς, Νιγρίτα) αλλά και στην Λέσβο και στην Μήλο με χρήση γεωθερμικών ρευστών από γεωτρήσεις των οποίων οι θερμοκρασίες είναι περίπου 60 °C. Ο συνολικός αριθμός τους ήταν 19 τον Μάρτιο του 2016. Οι καλλιέργειες σπαραγγιών και άλλων κηπευτικών σε Ξάνθη και Καβάλα επίσης θερμαίνονται από γεωθερμικά ρευστά 30-60 °C. Με τον ίδιο τρόπο λειτουργεί και μια μονάδα αφύγρυνσης λαχανικών και φρούτων στην Ξάνθη όπου τα ρευστά έχουν θερμοκρασία 59 °C. Οι ιχθυοκαλλιέργειες της Ξάνθης σε Πόρτο Λάγος και Νέο Εράσμιο χρησιμοποιούσαν γεωθερμικά ρευστά ως αντιψυκτική προστασία αλλά βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Στη Νιγρίτα, λειτουργούν 3 μονάδες καλλιέργειας σπιρουλίνας που θερμαίνονται από γεωθερμικά ύδατα 50 °C. Σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία των υπόγειων νερών είναι διαθέσιμη σε υψηλές θερμοκρασίες η θέρμανση χώρων και τηλεθέρμανση είναι εφικτές χωρίς τον κύκλο συμπίεσης/εκτόνωσης των αντλιών, όπως για παράδειγμα το δίκτυο 5 κτιρίων του Πολιχνίτου που είχε διαθέσιμα ύδατα θερμοκρασίας 88 °C. Ωστόσο, βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Οι λειτουργικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ένα σχολείο στην Θράκη και δύο σπα στην Νέα Απολλωνία και την Τραϊανούπολη [187].

Παρόλα αυτά, οι εφαρμογές άμεσης χρήσης αποτέλεσαν μόλις το 35% της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος της Ελλάδας το 2019 [6]. Το υπόλοιπο μέρος απασχολείται από τις Γ.Α.Θ. οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκατάστασης θέρμανσης/ψύξης και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης σε σπίτια, εμπορικά κτίρια ξενοδοχεία, πισίνες αλλά και σε περίπτωση καλλιέργειας σπαραγγιών και αποπάγωσης πεζοδρομίων. Στην Ήλιδα, υπάρχει σύστημα 2 Γ.Α.Θ. ανοιχτού βρόχου ισχύος 400 kW εκάστη για θέρμανση πισίνων και ζεστού νερού χρήσης. Το αρχικό κόστος ήταν 500 000 € και ο χρόνος απόσβεσης εκτιμήθηκε ως 1 χρόνος. Παρομοίως, σε ξενοδοχείο του Ναυπλίου λειτουργούν 4 Γ.Α.Θ. ανοιχτού τύπου αλμυρού νερού, ισχύος 740 kW και 566 kW σε θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα. Οι SPF είναι 4,77 και 3,65. Η τεχνολογία της αποπάγωσης πεζοδρομίων με γεωθερμία στην Ελλάδα έχει εγκατασταθεί στο Καρπενήσι σε διάταξη κλειστού, κατακόρυφου βρόχου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Το σύστημα ενεργοποιείται όταν η εξωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από 2 °C [187].



Σχήμα 6.2: Αποπάγωση πεζοδρομίων στο Καρπενήσι [5]

Στην Χρυσούπολη Καβάλας όπου καλλιεργούνται σπαράγγια έχουν εγκατασταθεί ανοιχτά συστήματα σε 5 φυτείες 190 στρεμμάτων στα οποία η θέρμανση παρέχεται με κλειστό σύστημα Γ.Α.Θ. της οποίας το μηχανοστάσιο φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Η συνολική ισχύς είναι 2,2 MW και ο COP παίρνει τιμές μεταξύ των 4-5 [187].



Σχήμα 6.3: Μηχανοστάσιο 1,1 MW στις καλλιέργειες σπαραγγιών της Χρυσούπολης [187]

Το πρώτο ελληνικό οиноποιείο με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα χρησιμοποιεί υβριδικό σύστημα 2 Γ.Α.Θ. κλειστού κατακόρυφου βρόχου με φωτοβολταϊκά. Στην θέρμανση η ισχύς είναι 57 kW και ο SPF είναι 4,75 ενώ στην ψύξη είναι 53 kW και 5,3

αντίστοιχα. Η ετήσια παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι 150 MWh. Το αρχικό κόστος είναι 60 000 € και ο χρόνος απόσβεσης είναι 4-5 χρόνια. Τέλος, το μεγαλύτερο σύστημα της χώρας βρίσκεται στο κτίριο της διοίκησης της περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας στην Θεσσαλονίκη. Αποτελείται από 2 αντλίες ισχύος 425 kW εκάστη, με 3 διαφορετικούς τύπους γεωεναλλακτών: κλειστό οριζόντιο και σπειροειδή εναλλάκτη μήκους 42 000 m, κλειστό κατακόρυφο εναλλάκτη 4 ομοαξονικών γεωτρήσεων βάθους 150 m η κάθε μια και ανοιχτό βρόχο 2 γεωτρήσεων. Με αυτούς καλύπτονται οι ανάγκες 22 000 m². Η αρχική επένδυση ήταν ύψους 1 εκ. €, αλλά η εξοικονόμηση του πρώτου χρόνου λειτουργίας ήταν 70% και ο COP ήταν 4,2 [6].

6.1.2 Επιχορήγηση

Το τρέχον κυβερνητικό πρόγραμμα επιδοτήσεων για ενεργειακές αναβαθμίσεις είναι το «Εξοικονομώ 2023» και προσβλέπει στην εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τουλάχιστον 30% για κάθε κατοικία. Τα έργα που καλύπτει είναι αντικατάσταση κουφωμάτων, τοποθέτηση/αναβάθμιση θερμομόνωσης, αναβάθμιση συστήματος θέρμανσης/ψύξης, σύστημα ζεστού νερού χρήσης με χρήση Α.Π.Ε. και έξυπνα συστήματα διαχείρισης (smart home). Το ποσοστό της επιχορήγησης εξαρτάται από το ατομικό ή οικογενειακό εισόδημα και έχει εύρος 40%-75% σε 5 κατηγορίες. Η ημερομηνία έναρξης των αιτήσεων ήταν 12/6/2023 και η τελική προθεσμία 15/11/2023 [188]. Επίσης, η ΔΕΗ μέσω του προγράμματος “myEnergyHeatPump” προσφέρει πρόσθετη επιβράβευση 500 € για αγορά Α.Θ. LG ή Daikin και 300 € αν έχει τοποθετηθεί Α.Θ. άλλης εταιρίας από 1/1/2023, με την ενεργοποίηση κάποιου προϊόντος ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρει [189].

6.2 Περιορισμοί

Κατά την σύλληψη της παρούσας εργασίας αναμενόταν εύρεση μεγάλου πλήθους εφαρμογών κατακόρυφων συστημάτων Γ.Α.Θ. στην περιφέρεια Θεσσαλίας. Όμως μετά από επικοινωνία με τις αρμόδιες περιφέρειες, η εικόνα ήταν διαφορετική: βρέθηκαν μόλις 5 άδειες στην Μαγνησία και 3 στην Λάρισα, ενώ στην Καρδίτσα καμία. Οι περισσότερες από αυτές εκδόθηκαν πριν αρκετά χρόνια. Επιπλέον, η επακόλουθη επικοινωνία με τους περισσότερους ιδιοκτήτες αποδείχτηκε άκαρπη. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα στοιχεία επικοινωνίας τους δεν ήταν

καταγεγραμμένα και σε άλλες η εγκατάσταση των συστημάτων δεν είχε προχωρήσει ή οι ίδιοι δεν μπόρεσαν να παρέχουν πληροφορίες. Στην περίπτωση του ξενοδοχείου της Σκοπέλου, δεν έγινε η επιθυμητή συνέντευξη αλλά προσφέρθηκε η τεχνική μελέτη του έργου. Η μόνη περίπτωση ολοκληρωμένης αξιολόγησης έγινε σε επιχείρηση του Βόλου. Στην Λάρισα δεν υπήρξε καμία επικοινωνία με τους ιδιοκτήτες και οι μόνες διαθέσιμες πληροφορίες ήταν αυτές των αδειών. Σε ορισμένες άδειες επίσης παρατηρήθηκαν ελλιπή στοιχεία στις άδειες. Επομένως, είναι αδύνατον να εξεταστεί η τελική αξιοποίηση των συστημάτων πέραν της αδειοδότησης.

6.3 Νομός Μαγνησίας

6.3.1 Αξιολόγηση M1

Εγκατάσταση και λειτουργία για ιδία χρήση ενεργειακού συστήματος κλιματισμού χώρων, ανοιχτού κυκλώματος, μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, που πρόκειται να εγκατασταθεί σε διώροφη οικία στη θέση «Αγία Μαρίνα» του Δήμου Σκοπέλου στη Σκόπελο [190].

Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι ανοιχτού βρόχου (κάθετο) για το οποίο εκδόθηκε η απαραίτητη άδεια εγκατάστασης στις 31/10/2013 μετά από την κατάθεση της αίτησης-μελέτης του ενδιαφερόμενου στις 14/06/2013. Το χρονικό όριο για την αποπεράτωση των εργασιών ορίστηκε ως 8 μήνες, δηλαδή ως τις 30/06/2014.

Το κόστος των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων εκτιμήθηκε ως 8 856 €.

Για τον σκοπό αυτό διανοίχθηκαν δύο γεωτρήσεις για την επικοινωνία με τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα: η μία σε βάθος 160 m και η άλλη σε βάθος 100 m. Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη θα είναι 6 m³/h.

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Μ1 [190]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Μέγιστη Ισχύς [kW]	33,6	30,3
Θερμοκρασία Εισόδου Εναλλάκτη [°C]	10	12
Θερμοκρασία Εξόδου Εναλλάκτη [°C]	7	40

Κάνοντας βασικές υποθέσεις για την θερμοχωρητικότητα του νερού και θέτοντάς την ίση με 4,18 kJ/kgK υπολογίζεται πραγματικό φορτίο βάσει των παραμέτρων λειτουργίας που αναγράφονται (παροχή, θερμοκρασίες). Στην θέρμανση είναι 20,9 kW και την ψύξη 195 kW επομένως για την δεύτερη παρουσιάζεται μεγάλη ασυμφωνία με τα δεδομένα που ίσως οφείλεται στην υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο.

6.3.2 Αξιολόγηση Μ2

Εγκατάσταση για ίδια χρήση ενεργειακού συστήματος ψύξης – θέρμανσης μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, σε τριώροφη οικοδομή επί πυλωτής με υπόγειο, που βρίσκεται στον Δήμο Αλμυρού του Νομού Μαγνησίας. Το συνολικό εμβαδόν των κλιματιζόμενων χώρων είναι 1370,62 m² [191].

Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι ανοιχτού βρόχου (κάθετο) για το οποίο εκδόθηκε η απαραίτητη άδεια εγκατάστασης στις 20/05/2008 μετά από την κατάθεση της αίτησης-μελέτης του ενδιαφερόμενου στις 01/04/2008. Το χρονικό όριο για την αποπεράτωση των εργασιών ορίστηκε ως 1 έτος από την ημερομηνία έκδοσης της άδειας δηλαδή 20/05/2018.

Για το έργο εκτιμήθηκε προϋπολογισμός ύψους 116 450 €.

Η άντληση και η επανεισαγωγή του νερού επρόκειτο να γίνει μέσω δύο όμοιων γεωτρήσεων βάθους 100 m και διαμέτρου 12 ½" (31,75 cm).

Τα θερμικά φορτία υπολογίστηκαν ίσα με 220 kW, ενώ η ισχύς του μηχανολογικού εξοπλισμού ίση με 15 kW.

6.3.3 Αξιολόγηση M3

Είδος και πληροφορίες εγκατάστασης

Εγκατάσταση και λειτουργία για ίδια χρήση ενεργειακού συστήματος κλιματισμού χώρων , ανοιχτού κυκλώματος, μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων ,που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, σε κτίριο του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ, Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βόλο επί της οδού Σέκερη & Αθηνών στο Πεδίον Άρεως. Η θέρμανση συμπληρώνεται με υποβοήθηση συστήματος φυσικού αερίου [192].

Η αίτηση-μελέτη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατατέθηκε στις 28/06/2013 και η άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας εκδόθηκε στις 26/08/2013. Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι ανοιχτού βρόχου (κάθετο). Η προθεσμία αποπεράτωσης των εργασιών ορίστηκε στα 2 έτη, δηλαδή ως τις 26/08/2015.

Ο ενδεικτικός προϋπολογισμός των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων υπολογίστηκε στα 79 000 €.

Για την άντληση και επανεισαγωγή του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα έγινε διάνοιξη τεσσάρων γεωτρήσεων βάθους 60 m εκάστη. Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη θα είναι 25 m³/h.

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και τα χαρακτηριστικά του συστήματος που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M3 [192]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Μέγιστη Ισχύς [kW]	258,5	222,8
Θερμοκρασία Εισόδου Εναλλάκτη [°C]	15	21,1
Θερμοκρασία Εξόδου Εναλλάκτη [°C]	11	27,8

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται τα πραγματικά φορτία θέρμανσης και ψύξης ως 116,11 kW και 194,49 kW αντίστοιχα. Επομένως οι ανάγκες είναι μεγαλύτερες στην ψύξη παρόλο που η μέγιστη ισχύς της αντλίας είναι στην θέρμανση.

Τεχνικά προβλήματα

Σε γενικές γραμμές το σύστημα ανταποκρίθηκε καλύτερα κατά τα δύο έτη λειτουργίας του στην ψύξη σε σχέση με τη θέρμανση. Το πρόβλημα με τη θέρμανση εντοπιζόταν στη μειωμένη ικανότητα θέρμανσης απομακρυσμένων χώρων, όπου απαιτούνταν εργαζόμενο νερό με υψηλότερη θερμοκρασία.

Ένα δεύτερο τεχνικό πρόβλημα που ανέκυψε κατά τη λειτουργία του συστήματος ήταν η απόθεση φερτών υλικών στους εναλλάκτες θερμότητας (τύπου πλακών από τιτάνιο). Το πρόβλημα οφείλεται στην απουσία συστήματος διήθησης των υπόγειων νερών. Το πρόβλημα αυτό αναμένεται να λυθεί με την εγκατάσταση συστήματος καθαριζόμενων επιφανειακών φίλτρων.

6.3.4 Αξιολόγηση M4

Είδος εγκατάστασης

Εγκατάσταση και λειτουργία για ιδία χρήση ενεργειακού συστήματος κλιματισμού χώρων, ανοιχτού κυκλώματος, μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, που πρόκειται να εγκατασταθεί σε κτίριο επιχείρησης στο Βόλο [193].

Η αίτηση-μελέτη της εταιρίας κατατέθηκε στις 17/10/2018 και η άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας εκδόθηκε στις 12/11/2018. Η προθεσμία αποπεράτωσης των εργασιών ορίστηκε στα 2 έτη, δηλαδή ως τις 12/11/2020 όμως ολοκληρώθηκαν το 2019 και διήρκησαν περίπου 10 μέρες.

Το σύστημα που εγκαταστάθηκε είναι ανοιχτού βρόχου (κάθετο) και είναι τρις υβριδικό με φωτοβολταϊκά (μόνο για παραγωγή ρεύματος και όχι συμπαραγωγή θερμότητας) και λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου.

Ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σύστημα Γ.Α.Θ. ήταν η ύπαρξη των πηγαδιών που επικοινωνούσαν με τους συγκοινωνούντες υδροφόρους ορίζοντες στο υπόγειο του κτιρίου, έτσι που το σύστημα ανοιχτού βρόχου να είναι η προφανής επιλογή μεταξύ άλλων. Επομένως δεν υπήρξε ανάγκη διάνοιξης επιπλέον γεωτρήσεων για την τροφοδοσία της αντλίας, με ό,τι επιφέρουν αυτές στην αύξηση

του κόστους και της πολυπλοκότητας της διαδικασίας. Μάλιστα είχε ήδη εγκατασταθεί από πρότινος αντλία απομάκρυνσης του νερού λόγω σποραδικής πλημμύρας του υπογείου.

Πληροφορίες εγκατάστασης

Το κτίριο διέθετε ήδη σύστημα θέρμανσης-ψύξης φυσικού αερίου. Αργότερα αναβαθμίστηκε σε λέβητα συμπύκνωσης και παραμένει ακόμη λειτουργικό σε συνεργασία με τις αντλίες θερμότητας σε περίπτωση που αυτές αδυνατούν να καλύψουν το απαιτούμενο φορτίο ή ως το μοναδικό εφεδρικό σύστημα σε περίπτωση βλάβης των αντλιών. Επομένως πρόκειται για υβριδικό σύστημα.

Η συνολική επιφάνεια των χώρων θέρμανσης-ψύξης είναι 287 m^2 και ο όγκος 1793 m^3 . Οι χώροι αυτοί είναι του ισόγειου εξαιρώντας την αποθήκη και τον χώρο έκθεσης οι οποίοι δεν θερμαίνονται καθόλου, όμως οι αντλίες θα ήταν ικανές να τους καλύψουν και αυτούς καθώς η ισχύς τους είναι επαρκής.

Ο μέσος όρος των ατόμων που εξυπηρετούνται από το σύστημα σε συνεχή χρόνο είναι 17, ως υπάλληλοι της επιχείρησης.

Δεν γίνεται παραγωγή ζεστού νερού χρήσης από το σύστημα παρά μόνο θέρμανση-ψύξη των προαναφερθέντων χώρων .

Το συγκεκριμένο κτίριο δεν έχει σημαντική μόνωση και μάλλον θα χαρακτηριζόταν μέτρια. Το μεγαλύτερο μέρος της πρόσοψης του απαρτίζεται από διπλό τζάμι.

Για την άντληση και επανεισαγωγή του νερού στους υδροφόρους ορίζοντες χρησιμοποιούνται 2 πηγάδια. Αυτά τα πηγάδια βρίσκονται στο υπόγειο του κτιρίου και το νερό βρίσκεται σε συνολικό βάθος 5 m από την επιφάνεια του εδάφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Έχουν τετράγωνη διατομή και απέχουν μεταξύ τους περίπου 18,5 m.



Σχήμα 6.4: Γεώτρηση παραγωγής της εγκατάστασης M4

Οι υδροφόροι ορίζοντες στους οποίους καταλήγει το καθένα επικοινωνούν μεταξύ τους. Το νερό αντλείται και μεταφέρεται μέσω ενός λάστιχου που κατεβαίνει στο πηγάδι και φτάνει στην αντλία μέσα σε έναν χαλυβδοσωλήνα γαλβανιζέ 1½ ίντσας.

Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη είναι 5,5 m³/h και δεν έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση του νερού.

Πληροφορίες αντλιών και συστήματος διανομής

Ο ενδεικτικός προϋπολογισμός των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων υπολογίστηκε στα 40.000 €.

Το κυριότερο μέρος του συστήματος είναι οι δύο αντλίες που κατασκευάστηκαν από την Carrier και πρόκειται για τα μοντέλα “30WG-025-A0011-PE-” που είναι τύπου νερού-νερού. Το ψυκτικό τους μέσο είναι το R410A. Ο τρόπος λειτουργίας τους είναι τύπου “master-slave” δηλαδή αρχικά λειτουργεί η πρώτη ως βασική (master) και η δεύτερη ενεργοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητη η συμβολή της στην κάλυψη των αναγκών σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί η πρώτη (slave). Στη ουσία η κύρια αντλία «επιτρέπει» στην δευτερεύουσα να συμμετάσχει στην παραγωγή. Η διάταξή τους φαίνεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Διάταξη “master-slave” 2 όμοιων Γ.Α.Θ. της εγκατάστασης M4

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και είναι κατάλληλο για διπλή χρήση θέρμανσης-ψύξης. Το σύστημα διανομής της θέρμανσης/ψύξης που χρησιμοποιείται είναι τα σώματα fan coil και για τις δύο λειτουργίες. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.3:

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M4 [193]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Μέγιστη Ισχύς [kW]	69,8	57,4
Θερμοκρασία Εισόδου Εναλλάκτη [°C]	16	22
Θερμοκρασία Εξόδου Εναλλάκτη [°C]	10	28

Εδώ τα θερμικά φορτία που απασχολούν την γεωθερμία είναι ισότιμα και είναι ίσα με 38,32 kW σε κάθε περίπτωση. Στην ψύξη είναι και τα συνολικά ενώ για την θέρμανση χρησιμοποιείται βοηθητικά και το σύστημα φυσικού αερίου.

Προβλήματα-Συντήρηση

Λόγω του μικρού βάθους, το νερό υπόκειται σε αυξομειώσεις της θερμοκρασίας του κατά την διάρκεια του έτους καθώς οι συνθήκες περιβάλλοντος μεταβάλλονται από εποχή σε εποχή. Ειδικότερα, τον χειμώνα το νερό είναι

ψυχρότερο από το επιθυμητό για την βέλτιστη λειτουργία και έτσι η λειτουργία θέρμανσης είναι λιγότερο αποδοτική. Σε αυτήν την περίπτωση οι αντλίες ενδέχεται να είναι ανεπαρκείς για την επίτευξη της επιθυμητής θέρμανσης του κτιρίου με αποτέλεσμα να λειτουργεί και ο λέβητας. Πιο συγκεκριμένα, όταν το νερό στην είσοδο του εναλλάκτη πέσει στους 10 °C, τότε υπάρχει κίνδυνος παγώματος στην έξοδο και μείωση της απόδοσης του συστήματος ή βλάβη. Γι' αυτό τίθεται όριο ασφαλείας στην θερμοκρασία εξόδου στους 3-4 °C. Παρ' όλα αυτά στο συγκεκριμένο σύστημα δεν έχει παρατηρηθεί κάποια βλάβη οποιασδήποτε μορφής και δεν έχει υπάρξει η ανάγκη επισκευής ως και την στιγμή της αξιολόγησης.

Όσο για την συντήρηση, δεν πρόκειται για δύσκολες διαδικασίες. Πρώτον, γίνεται αποσυναρμολόγηση του εναλλάκτη και καθαρισμός του από τα άλατα που περιέχονται στο νερό και δημιουργούν επικαθήσεις μέσα του. Η συχνότητα αυτής της διαδικασίας είναι 9-12 μήνες. Δεύτερον, ανά μικρότερα διαστήματα των 6 μηνών γίνεται καθαρισμός των φίλτρων του νερού τα οποία έχουν τοποθετηθεί στις αντλίες για να διαχωρίζουν το νερό από τα ξένα σώματά του (άμμος, χώμα, χαλίκια) ώστε να μην βουλώσει ο εναλλάκτης.

Αποτίμηση του συστήματος

Ο βαθμός ικανοποίησης από το σύστημα είναι αρκετά υψηλός δεδομένου της μειονεκτικής θέσης των πηγαδιών και του χαμηλού βάθους των οριζόντων. Επρόκειτο άλλωστε για «πειραματικό» εγχείρημα ώστε η ύπαρξή τους να μην μείνει ανεκμετάλλευτη αφού έστω και με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας. Εφόσον πραγματοποιήθηκε η μελέτη γνώριζαν ότι γι' αυτούς τους λόγους τον χειμώνα οι αντλίες δεν θα μπορούσαν να καλύψουν το φορτίο και ότι οι γενικότερες συνθήκες ήταν δυσμενείς σε σχέση με τις πρότυπες. Η ψύξη όμως λειτουργεί χωρίς προβλήματα. Οι ίδιοι δεν έχουν εντοπίσει άλλα μειονεκτήματα του συστήματος.

Υπήρξε ένταξη στο πρόγραμμα του ΕΣΠΑ 2014-2020: «Αναπτυξιακό πρόγραμμα αναβάθμισης πολύ μικρών και μικρών επιχειρήσεων» βάσει του οποίου επιδοτήθηκε το 50 % του κόστους του έργου. Ο χρόνος της απόσβεσης λόγω

εξοικονόμησης του κόστους της ενέργειας για θέρμανση-ψύξη εκτιμήθηκε στα 8 χρόνια.

Τα αρμόδια πρόσωπα της επιχείρησης πιστεύουν πως τέτοια έργα εκμετάλλευσης της γεωθερμίας θα πρέπει να ενισχύονται από την πολιτεία και να παρέχονται κίνητρα υλοποίησής τους κυρίως οικονομικής φύσης. Το αρχικό κόστος αυτών των επενδύσεων μπορεί να είναι απαγορευτικό για πολλούς και ίσως σε αυτό να οφείλεται η έλλειψη ευρέος ενδιαφέροντος για τα συστήματα γεωθερμίας από επιχειρήσεις και ιδιώτες. Το κεφάλαιο που απαιτείται για αυτά τα συστήματα το 2023 είναι 15% μεγαλύτερο σε σχέση με το 2018 όταν εγκαταστάθηκε το δικό τους. Αν συνδυαστούν με άλλα συστήματα Α.Π.Ε. όπως τα φωτοβολταϊκά, τότε συμφέρουν ακόμη περισσότερο.

Όσον αφορά την προτίμησή τους στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας ως πιθανή επιλογή εγκατάστασης σε ένα νέο κτίριο, αυτό θα εξαρτιόταν από τις συνθήκες του κόστους και τις ανάγκες της εγκατάστασης, όπως η διάνοιξη γεωτρήσεων που αυξάνει το κόστος και στην περίπτωση τους δεν χρειάστηκε να γίνουν. Θα πρέπει να γίνει ακριβής μελέτη ώστε να είναι γνωστές οι ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου και ο ενεργειακός ισολογισμός. Αυτό θα παίζει σημαντικό ρόλο στην διαθεσιμότητα του κεφαλαίου που θα χρειαστεί να επενδυθεί για την κάλυψη τους από ένα σύστημα γεωθερμίας, το κόστος του οποίου μπορεί να επιφέρει μεγάλο κόστος αν οι ανάγκες είναι μεγάλες.

6.3.5 Αξιολόγηση M5

Εγκατάσταση και λειτουργία για ίδια χρήση ενεργειακού συστήματος κλιματισμού χώρων, κλειστού κυκλώματος, μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, που πρόκειται να εγκατασταθεί σε ξενοδοχειακή μονάδα του Δήμου Σκιάθου [194]. Συγκεκριμένα στο νοτιοανατολικό άκρο του κεντρικού ξενοδοχείου.

Η αίτηση της εταιρίας κατατέθηκε στις 31/08/2022 και η άδεια εκτέλεσης των εργασιών χορηγήθηκε στις 10/10/2022 με προθεσμία αποπεράτωσης των εργασιών 2 χρόνια δηλαδή ως τις 10/10/24.

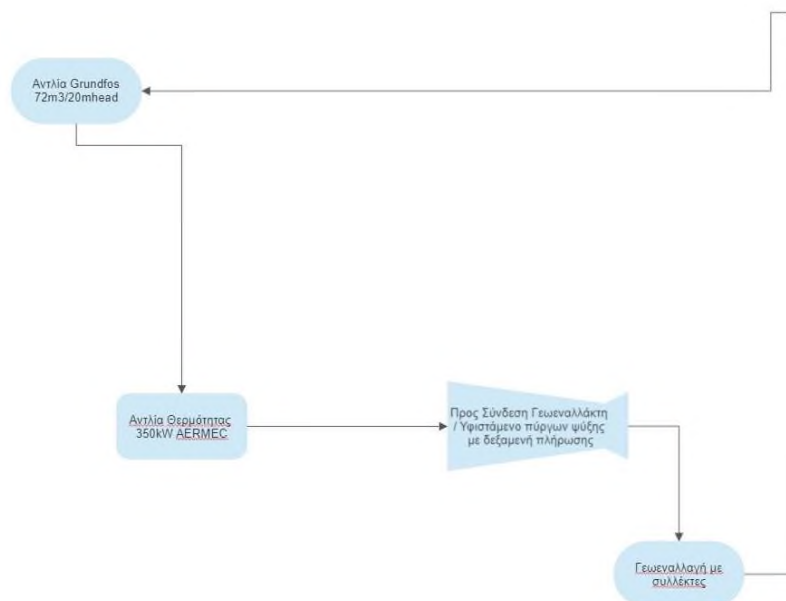
Ο τύπος του γεωθερμικού συστήματος είναι κλειστού βρόχου και οριζόντιας διάταξης σε σύστημα τάφρων. Η παροχή θερμότητας του γεωθερμικού συστήματος υπολογίζεται στα 45 W/m, στη μέση τιμή του εύρους των αντίστοιχων θερμικών φορτίων στην Ελλάδα που είναι δηλαδή 30-60 W/m [34].

Το ξενοδοχείο μέχρι την νέα εγκατάσταση χρησιμοποιούσε σύστημα που συνδύαζε πύργων ψύξης ισχύος 500 kW και αντλία θερμότητας για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του. Με την ένταξη του γεωθερμικού συστήματος το κύκλωμα αυτό μετατρέπεται σε κλειστό. Η Α.Θ. και η αντλία κυκλοφορίας παραμένουν οι ίδιες και δεν χρειάστηκε καμία τροποποίηση σε αυτές. Η πρώτη είναι η Aermec NXP1250 νερού/νερού η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.6 και δεύτερη η Grundfos CRN 64-1 A-F-A-E-HQQE [34].



Σχήμα 6.6: Α.Θ. Aermec NXP1250 [195]

Το προηγούμενο σύστημα εξακολουθεί να είναι ικανό να λειτουργήσει και υπάρχει ως εφεδρικό. Τα δύο συστήματα συνδέονται παράλληλα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7 και η επιλογή του συστήματος γίνεται ανάλογα με την περίπτωση αν και προτείνεται αυτό της γεωθερμίας.



Σχήμα 6.7: Διάγραμμα ροής γεωθερμικού συστήματος [34]

Τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού συστήματος σε θέρμανση και ψύξη παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. M5 [194]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Μέγιστη Ισχύς [kW]	384	345
Θερμοκρασία Εισόδου Εναλλάκτη [°C]	15	25
Θερμοκρασία Εξόδου Εναλλάκτη [°C]	10	30

Η τάφροι έχουν βάθος 2 m και δεν προσχεδιάστηκε περιορισμός των μηκών τους. Για την εκσκαφή της τάφρου προτάθηκε η χρήση μόνο χειρωνακτικών μεθόδων λόγω του ακανόνιστου εδάφους αλλά και του μικρού βάθους που δεν καθιστούσε αναγκαία τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού. Το έδαφος έχει θερμική αγωγιμότητα 2,493 W/mK και θερμοχωρητικότητα 2 347 kJ/m³K. Μέσα τους θα τοποθετηθούν οι πλαστικοί σωλήνες πολυπροπυλενίου (PP), συνολικού μήκους 6 km, διαμέτρου Φ40 και θερμικής αγωγιμότητας 0,391 W/mK. Η διάταξή τους είναι παράλληλη με απόσταση 50 cm μεταξύ τους. Λόγω των φυσικών εμποδίων που υπάρχουν στο έδαφος δεν θα είναι ισομήκεις. Τα άκρα τους θα συνδέονται με 3 συλλέκτες

εισαγωγής και 3 συλλέκτες επιστροφής Φ75 και στη συνέχεια θα συνδέονται με το ευρύτερο σύστημα ενέργειας του ξενοδοχείου μέσω αγωγού Φ90 [34].

Στον γεωεναλλάκτη, η μέγιστη ροή του θα είναι $10,5 \text{ m}^3$. Το ρευστό που θα κυκλοφορεί εντός του θα είναι απιονισμένο νερό γλυκόλης. Επιλέχθηκε για το χαμηλό του κόστος. Έχει θερμική αγωγιμότητα $0,603 \text{ W/mK}$ και το γεωθερμικό κύκλωμα θα βρίσκεται υπό πίεση 2 bar [34].

Κατά την λειτουργία των πύργων ψύξης, ο βαθμός απόδοσης COP είναι 4,56 και το ωφέλιμο φορτίο της Α.Θ. αυξάνεται από τα 314 kW. Με χρήση του γεωθερμικού συστήματος ο COP βελτιώνεται από την προηγούμενη τιμή στα 5,21 και η ωφέλιμη ισχύς στα 339 kW. Ο μέγιστος COP που δύναται να επιτευχθεί από την συγκεκριμένη αντλία είναι 5,82 [34].

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα η συνολική παροχή θερμότητας για αυτό το μήκος γεωεναλλάκτη είναι 270 kW που σημαίνει ότι τα υπόλοιπα 69 kW θα πρέπει να προσδίδονται στον συμπιεστή. Ωστόσο αυτός ο υπολογισμός αποφέρει COP ίσο με 4,91.

6.4 Νομός Λάρισας

6.4.1 Αξιολόγηση Λ1

Εγκατάσταση και λειτουργία ενεργειακού συστήματος ψύξης-θέρμανσης κλειστού κυκλώματος μέσω της εκμετάλλευσης θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό σε νέα διώροφη οικοδομή με δύο διαμερίσματα, υπόγειο και στέγη στην περιοχή του Πυργετού που ανήκει στον Δήμο Κάτω Ολύμπου του νομού Λάρισας [196]. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις που θα εξαρτώνται από το σύστημα για θέρμανση-ψύξη έχουν όγκο $348,13 \text{ m}^3$.

Η αίτηση-μελέτη του ενδιαφερόμενου κατατέθηκε στις 22/06/2010 και η άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας εκδόθηκε στις 14/09/2010. Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι κλειστού βρόχου (κάθετο).

Η αξία του μηχανολογικού εξοπλισμού του συστήματος είναι 28 600 € και η κινητήρια ισχύς των παραγωγικών μηχανημάτων είναι 4,9 kW.

Ο αριθμός των κατακόρυφων γεωτρήσεων μέσα στις οποίες θα τοποθετηθεί ο γεωεναλλάκτης είναι 3 με βάθος 97 m εκάστη. Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη είναι 4,4 m³/h.

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και τα χαρακτηριστικά του εναλλάκτη που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.5. Για τις θερμοκρασίες αναφέρεται μόνο ένα ζεύγος το οποίο υποτίθεται ότι αφορά την μεταβολή της θερμοκρασίας στην θέρμανση ως 3 βαθμούς Κελσίου.

Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ1 [196]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Φορτία [kW]	25	28
Θερμοκρασία Εισόδου Εναλλάκτη [°C]	0	
Θερμοκρασία Εξόδου Εναλλάκτη [°C]	-3	

Σε αυτήν την περίπτωση τα γεωθερμικά φορτία υπολογίζονται ίσα με 15,33 kW που είναι σαφώς μικρότερα από τα αναγραφόμενα. Δεν είναι γνωστό αν αυτά είναι τα μέγιστα. Αν υποτεθεί ότι η διαφορά θερμοκρασίας είναι ισότιμη αλλά αυξητική για την ψύξη τότε τα φορτία της θα είναι ίσα με αυτά της θέρμανσης. Για την τιμή της θερμοχωρητικότητας υποτίθεται αυτή του νερού.

6.4.2. Αξιολόγηση Λ2

Εγκατάσταση και λειτουργία ενεργειακού συστήματος ψύξης-θέρμανσης κλειστού κυκλώματος μέσω της εκμετάλλευσης θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό σε νέα διώροφη οικοδομή με υπόγειο στην περιοχή της Νίκαιας Λάρισας [197]. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις που θα εξαρτώνται από το σύστημα για θέρμανση-ψύξη έχουν όγκο 1262,78 m³.

Η αίτηση-μελέτη του ενδιαφερόμενου κατατέθηκε στις 14/3/2011 και η άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας εκδόθηκε στις 17/04/2012. Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι κλειστού βρόχου (κάθετο).

Η αξία του μηχανολογικού εξοπλισμού του συστήματος είναι 29 000 € και η κινητήρια ισχύς των παραγωγικών μηχανημάτων είναι 6,9 kW.

Ο αριθμός των κατακόρυφων γεωτρήσεων μέσα στις οποίες θα τοποθετηθεί ο γεωεναλλάκτης είναι 4 με βάθος 80 m εκάστη. Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη είναι 2,5 m³/h.

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και τα χαρακτηριστικά του συστήματος που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ2 [197]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Φορτία [kW]	23	25,8
Θερμοκρασία Εισόδου [°C]	0	
Θερμοκρασία Εξόδου [°C]	-4	

Κάνοντας της ίδιες υποθέσεις με την αξιολόγηση Λ1 τα θερμικά και ψυκτικά φορτία θα ήταν 11,61 kW, και πάλι μικρότερα από τα αναγραφόμενα.

6.4.3 Αξιολόγηση Λ3

Εγκατάσταση και λειτουργία ενεργειακού συστήματος ψύξης-θέρμανσης κλειστού κυκλώματος μέσω της εκμετάλλευσης θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό σε κατοικία στην περιοχή του Αμπελώνα Λάρισας [198]. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις που θα εξαρτώνται από το σύστημα για θέρμανση-ψύξη έχουν εμβαδό 153 m².

Η αίτηση-μελέτη του ενδιαφερόμενου κατατέθηκε στις 06/7/2010 και η άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας εκδόθηκε στις 13/09/2010. Το σύστημα που εγκαθίσταται είναι ανοιχτού βρόχου (κάθετο). Η προθεσμία αποπεράτωσης των εργασιών είναι 3 έτη.

Η αξία του μηχανολογικού εξοπλισμού του συστήματος είναι 24 000 € και η κινητήρια ισχύς των παραγωγικών μηχανημάτων είναι 21,3 kW.

Ο αριθμός των κατακόρυφων γεωτρήσεων για την άντληση και την επανεισαγωγή του νερού στους υδροφόρους ορίζοντες είναι 2 με βάθος 120 m εκάστη. Η παροχή του γεωθερμικού εναλλάκτη διαφέρει ανάλογα με το αν το σύστημα εκτελεί θέρμανση ή ψύξη της κατοικίας όπως φαίνεται στον πίνακα.

Η λειτουργία του συστήματος θα είναι «αντιστρέψιμη» και τα χαρακτηριστικά του συστήματος που αφορούν την θέρμανση και την ψύξη δίνονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά της Γ.Α.Θ. Λ3 [198]

Χαρακτηριστικά	Λειτουργία	
	Θέρμανση	Ψύξη
Φορτία [kW]	14,51	17,52
Θερμοκρασία Εισόδου [°C]	16	
Θερμοκρασία Εξόδου [°C]	11,55	
Παροχή Γεωθερμικού Εναλλάκτη [L/s]	0,38	0,63

Σε αυτήν την περίπτωση τα θερμικά φορτία για την θέρμανση υπολογίζονται ίσα με 7,1 kW που είναι και πάλι μικρότερα από τα αναγραφόμενα, ενώ για την ψύξη δεν υπάρχει καμία αναφορά στις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

7. Συμπεράσματα

Οι Γ.Α.Θ. είναι μια μορφή ανανεώσιμης και αειφόρου τεχνολογίας που εκμεταλλεύονται την αποθηκευμένη γεωθερμική ενέργεια του υπεδάφους για να προσφέρουν θέρμανση και ψύξη με διάφορους τρόπους διάταξης και λειτουργίας. Χαρακτηρίζονται κυρίως από την αυξημένη τους απόδοση, ειδικά σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα αλλά και από το χαμηλό κόστος λειτουργίας τους, επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση σε σχέση με τα δεύτερα.

Έκαναν την εμφάνισή τους τον 19^ο αιώνα και παρουσίασαν μεγάλη ανάπτυξη κατά την 2^η πετρελαϊκή κρίση του 1980-1981 και την περίοδο 2006-2008, ειδικά στην Γερμανία. Η Ελλάδα ακολούθησε μέσα στον 21^ο αιώνα και στο τέλος του 2018 μετρούσε εγκατεστημένη ισχύ 175 MW_{th}. Παρά τις ενδιάμεσες κρίσεις της προόδου αυτής της τεχνολογίας, η σύγχρονη ενασχόληση με τα γεωθερμικά συστήματα ενισχύεται από οικονομικά κίνητρα και αυξημένη ερευνητική δραστηριότητα. Μέσα στην επόμενη δεκαετία, η αξία της αγοράς υπολογίζεται πως θα αυξηθεί κατά 7,6% ως το 2031, κυρίως μέσω των συστημάτων κλειστού βρόχου και του οικιακού τομέα

Αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην μελλοντική ενεργειακή πολιτική της Ευρώπης, η οποία μέχρι προσφάτως βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό στην τελική κατανάλωση εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Για τον σκοπό αυτό, πολλές πρωτοβουλίες της Ε.Ε. με τις κυριότερες να είναι οι RED, το European Green Deal και το REPowerEU με τους κυριότερους στόχους να είναι η αύξηση της παρουσίας των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό μείγμα στο 42,5% ως το 2030 και η κλιματική ουδετερότητα ως το 2050. Παράλληλα, η ενεργειακή κρίση των τελευταίων χρόνων οδηγεί σε μεγάλες αυξήσεις των τιμών του ρεύματος και του φυσικού αερίου.

Ανάμεσα στις τεχνολογικές εξελίξεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια βρίσκονται τα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν συμπληρωματικό μηχανισμό ψύξης ή θέρμανσης για υποβοήθηση του γεωθερμικού συστήματος. Αυτά τα συστήματα είναι οι πύργοι ψύξης, οι ηλιακοί συλλέκτες, οι λέβητες αλλά και οι αντλίες θερμότητας με πηγή αέρα. Η συμπερίληψή τους αποσκοπεί στην μείωση αφενός της θερμικής καταπόνησης του εδάφους σε μέρη

όπου τα φορτία είναι ανισομερή και αφετέρου του αρχικού κόστους λόγω του μικρότερου μεγέθους του γεωεναλλάκτη. Σε κάποιες περιπτώσεις αναμένεται και αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Επιπλέον, λόγω της σταδιακής απόσυρσης των παλαιότερων ψυκτικών μέσων όπως οι CFCs, HCFCs και HFCs τα οποία κατέστρεφαν το όζον και συνέβαλαν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, η αναζήτηση για τους αντικαταστάτες τους στρέφεται στα ψυκτικά νέας γενιάς όπως τα HFOs τα οποία έχουν μηδενικό ODP και πολύ χαμηλό GWP καθώς και τα μείγματά τους. Επίσης, τα φυσικά ψυκτικά όπως η αμμωνία, το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες επαναφέρονται στο προσκήνιο ως ικανότατα εναλλακτικά βέλτιστης φιλικότητας καθώς απαιτούν μικρότερη φόρτιση, όμως αντιμετωπίζονται προβλήματα τοξικότητας και ευφλεκτότητας κάποιων από αυτά.

Το αρχικό κόστος των Γ.Α.Θ. είναι το μεγαλύτερό τους μειονέκτημα και γι' αυτόν τον λόγο διατίθενται οικονομικά κίνητρα σε πολλές χώρες για νέες εγκαταστάσεις συστημάτων Α.Π.Ε. ή αντικαταστάσεις παλαιότερων συστημάτων. Στο Η.Β. η επένδυση μπορεί να φτάσει έως και £45 000 και τα ακριβότερα συστήματα είναι τα κατακόρυφα, ενώ το κόστος μοιράζεται σχεδόν ισόποσα μεταξύ του εξοπλισμού και του μη-εξοπλισμού. Γενικά, η μονάδα της αντλίας και οι γεωτρήσεις είναι τα ακριβότερα μέρη της εγκατάστασης αλλά πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και άλλα πρόσθετα κόστη όπως ενεργειακές αναβαθμίσεις του προηγούμενου συστήματος, της μόνωσης και της άδειας απέκκρισης νερού στα ανοικτά συστήματα. Γενικά, οι Γ.Α.Θ. προτιμώνται σε περιπτώσεις όπου οι τιμές του ρεύματος είναι χαμηλότερες των ορυκτών καυσίμων θέρμανσης, ειδάλλως δεν αποκλείεται να μην επιτευχθεί η επιθυμητή εξοικονόμηση.

Καθώς οι Γ.Α.Θ. δεν κινδυνεύουν από συστηματικά περιστατικά βλαβών εν γένει, το σημαντικότερο τεχνικό πρόβλημα που συναντάται είναι η καθαλάτωση στα ανοικτά συστήματα όπου τα φαινόμενα επικαθήσεων και διάβρωσης δυσχεραίνουν σημαντικά την λειτουργία της λόγω της μειωμένης μεταφοράς θερμότητας και ροής του νερού αλλά και του βουλώματος των διόδων της τελευταίας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος σημαντικές λύσεις είναι η ανάλυση της ποιότητας του νερού και ο έγκαιρος καθαρισμός των εξαρτημάτων του συστήματος. Μία

καινοτόμος μέθοδος προστασίας των υποβρύχιων φίλτρων είναι η επίβλεψη των γεωτρήσεων με κάμερα.

Στην Ελλάδα η γεωθερμία δεν χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρά μόνο για άμεσες χρήσεις θέρμανσης/ψύξης, λουτροθεραπείας, γεωργίας, τηλεθέρμανσης, Γ.Α.Θ. κ.α. Το τρέχον πρόγραμμα επιδοτήσεων «Εξοικονομώ 2023» προσφέρει κάλυψη 40%-75% του κόστους των ενεργειακών αναβαθμίσεων μιας κατοικίας. Στην Περιφέρεια Θεσσαλίας εντοπίστηκαν μόνο 8 αδειοδοτημένα συστήματα Γ.Α.Θ.: 5 στον Νομό Μαγνησίας και 3 στον Νομό Λάρισας, ενώ στον Νομό Καρδίτσας κανένας. Οι εφαρμογές τους αφορούν κυρίως οικιακές εγκαταστάσεις, μια επιχείρηση και μια ξενοδοχειακή μονάδα. Στην Μαγνησία σχεδόν όλα τα συστήματα ήταν ανοιχτού βρόχου και γενικά οι εφαρμογές περιορίζονται στον οικιακό τομέα εκτός από 2 εξαιρέσεις. Στα περισσότερα από αυτά η επικοινωνία με τους ιδιοκτήτες ήταν αδύνατη και τα μοναδικά δεδομένα πάρθηκαν μόνο από τις άδειες λειτουργίας και εγκατάστασης που είχαν εκδώσει οι αντίστοιχες Περιφέρειες. Καταληκτικά, το αυξανόμενο και υψηλό αρχικό κόστος κρίνεται ως το μεγαλύτερο εμπόδιο στην ευρύτερη υιοθέτηση των Γ.Α.Θ. στην Ελλάδα από ιδιώτες και επιχειρήσεις, ακόμη και με την βοήθεια των οικονομικών κινήτρων.

Η συνέχεια αυτής της εργασίας θα μπορούσε να αφορά την κατάσταση των συστημάτων Γ.Α.Θ. σε γειτονικές Περιφέρειες και την διερεύνηση των διαφορετικών εφαρμογών τους, οι οποίες μπορεί να ποικίλλουν σε τοποθεσίες εκτός της Θεσσαλίας. Οι τοπικοί οικονομικοί και βιομηχανικοί παράγοντες που καθορίζουν τις χρήσεις τους σε κάθε τοποθεσία μπορούν να εξεταστούν και να συγκριθούν μεταξύ τους.

Βιβλιογραφία

- [1] The History of Geothermal Heating & Cooling, (2021)
[<https://dandelionenergy.com/the-history-of-geothermal-heating-cooling>,
ανακτήθηκε 10/9/2023]
- [2] Underground Cities, 2014
[<https://www.cappadociaturkey.net/undergroundcities.htm> , ανακτήθηκε 20/9/2023]
- [3] Kaymakli Underground City,
[https://archigoo.com/locations/kaymakli_underground_city.php, ανακτήθηκε
20/9/2023]
- [4] Sanner, B.B. (2017). Ground Source Heat Pumps – history, development,
current status, and future prospects.
- [5] Ανδρίτσος Ν., Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας: Γενικές αρχές λειτουργίας -
Οφέλη – Νομοθεσία – Εφαρμογές
- [6] Papachristou, Maria & Arvanitis, Apostolos & Mendrinou, Dimitrios &
Dalampakis, Paschalis & Karytsas, Constantine & Andritsos, N.. (2019). Geothermal
Energy Use, Country Update for Greece (2016-2019).
- [7] Energy statistics - an overview, Eurostat, 2023
[[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-
explained/index.php?title=Energy statistics - an overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview), ανακτήθηκε 5/8/2023]
- [8] Complete energy balances, Eurostat, 2023
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_c/default/table?lang=en,
ανακτήθηκε 5/8/2023]
- [9] Simplified energy balances, Eurostat, 2023
[[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_S_custom_7446184/d
efault/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_S_custom_7446184/default/table?lang=en), ανακτήθηκε 9/8/2023]
- [10] Energy imports dependency, 2023
[[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_ID_custom_7450522/
default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_ID_custom_7450522/default/table?lang=en) , ανακτήθηκε 23/8/2023]
- [11] Βραχόπουλος Γ., Κούκου Μ., Καρύτσας Κ, *Κανονική Γεωθερμία - Αρχές
Σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές*, Αθήνα, 2015

- [12] Γιανναράκης Μ., Παππάς-Βαφιάς Π., (2017), *Ενεργειακή ανάλυση θέρμανσης-ψύξης του κτιρίου Η.Μ.Μ.Υ. του Π.Θ. με Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και αντλίες θερμότητας αέρα-νερού*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [13] Cengel Y.A., Boles M.A., *Θερμοδυναμική για Μηχανικούς*, 8^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2018
- [14] Xu, Edward. (2018). Green Energy Island Integration and Operation Optimization Research 绿色能源岛集成与优化运行研究.
- [15] 2013/114/ΕΕ, (2013), ΑΠΟΦΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 1ης Μαρτίου 2013 περί καθορισμού κατευθυντηρίων γραμμών προς τα κράτη μέλη σχετικά με τον υπολογισμό της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές την οποία παρέχουν διαφορετικές τεχνολογίες αντλιών θερμότητας σύμφωνα με το άρθρο 5 της οδηγίας 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, Επίσημη εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- [16] Nordman R., Rivere P., (2012), Important parameters influencing heat pump systems efficiency and reliability.
- [17] Staffell, I., Brett, D.J., Brandon, N.P., & Hawkes, A.D. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy and Environmental Science*, 5, 9291-9306.
- [18] Christian W, Creating a central collaboration platform, [<https://resources.sw.siemens.com/fr-FR/case-study-vaillant-group>, ανακτήθηκε 19/8/2023]
- [19] [<https://vectormine.com/item/air-source-heat-pump-system-with-floor-heating-and-radiators-outline-diagram/>, ανακτήθηκε 14/9/2023]
- [20] Sarbu, Ioan & Sebarchievici, Calin. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*. 70. 441–454. 10.1016/j.enbuild.2013.11.068.
- [21] Ninikas, Konstantinos & Hytiris, N. & Emmanuel, R. & Aaen, Bjorn & McMillan, S.. (2014). A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system. 161-171. 10.2495/ESUS140141.
- [22] [https://stock.adobe.com/gr_en/search?k=ground+source+heat+pump&asset_id=550336142, ανακτήθηκε 18/9/2023]

- [23] Glassley W.E., *Geothermal Energy-Renewable Energy and the Environment*, 2nd edition, CRC Press, 2015
- [24] [<https://thegemmuseum.gallery/gemstones-earths-mantle/>], ανακτήθηκε 20/9/2023]
- [25] Raloff J., Muro T., (2023), Explainer: Radiation and radioactive decay, [<https://www.snexplores.org/article/explainer-radiation-radioactive-decay-chemistry-isotopes>], ανακτήθηκε 3/3/2023]
- [26] VDI 4640 Part 1: Thermal use of the underground Fundamentals, approvals, environmental aspects, 2000.
- [27] Geothermal Energy – Direct-Use by U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program (FEMP), 2016 [<https://www.wbdg.org/resources/geothermal-energy-direct-use>], ανακτήθηκε 8/10/2022]
- [28] Geothermal Heating and Cooling Technologies, 2023 [<https://www.epa.gov/rhc/geothermal-heating-and-cooling-technologies>], ανακτήθηκε 16/11/2022]
- [29] Hahnel R., (2020), ULTIMATE YELLOWSTONE NATIONAL PARK GUIDE AND ITINERARY, [<https://www.reneeroaming.com/yellowstone-national-park-guide/>], ανακτήθηκε 21/9/2023]
- [30] Geothermal explained-Geothermal power plants, U.S. Energy Information Administration, 2022 [<https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-power-plants.php>], ανακτήθηκε 5/2/2023]
- [31] Geothermal power plants, [[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal power plants#cite_note-wolf-2](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_power_plants#cite_note-wolf-2)], ανακτήθηκε 5/2/2023]
- [32] Electricity Generation, Office Of Energy Efficiency & Renewable Energy, [<https://www.energy.gov/eere/geothermal/electricity-generation>], ανακτήθηκε 5/2/2023]
- [33] Goetzl G, (2020), MUSE – Differences between deep and shallow geothermal energy [<https://geoera.eu/blog/muse-differences-between-deep-and-shallow-geothermal-energy/>], ανακτήθηκε 18/9/2023]

- [34] Βλάχος Ι., Αίτηση - Τεχνική Μελέτη προς έκδοσης Άδειας Εγκατάστασης Ενεργειακού συστήματος κλιματισμού χώρων μέσω εκμετάλλευσης θερμότητας γεωλογικών σχηματισμών και υπόγειων ή επιφανειακών νερών που δεν χαρακτηρίζονται Γεωθερμικό δυναμικό σύμφωνα με την παρ. 1 του άρθρου 4 της απόφασης Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488/11-6-09.
- [35] Sanner B., (2001), SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY, Justus-Liebig University, Giessen, Germany
- [36] Alam, M. & Zain, M. & Kaish, A. B. M & Jamil, Md. (2015). Underground Soil and Thermal Conductivity Materials Based Heat Reduction for Energy Efficient Building in Tropical Environment. Indoor and Built Environment. 24. 185-200. 10.1177/1420326X13507591.
- [37] Panchuk K., Physical Geology-HP5 Edition, 3.3-Earth's Interior Heat [<https://pressbooks.bccampus.ca/geoclone/chapter/3-3-earths-interior-heat/>], ανακτήθηκε 24/3/2023]
- [38] Astley M., (2022), How Ground Source Heat Pumps Work: A Comprehensive Guide [<https://247homerescue.co.uk/blog/ground-source-heat-pumps/>], ανακτήθηκε 29/4/2023]
- [39] How much does a geothermal heat pump cost?, 2023 [<https://www.energysage.com/clean-heating-cooling/geothermal-heat-pumps/costs-benefits-geothermal-heat-pumps/>], ανακτήθηκε 7/7/2023]
- [40] Koren, K., & Janža, M. (2019). Risk assessment for open loop geothermal systems, in relation to groundwater chemical composition (Ljubljana pilot area, Slovenia). Geologija, 62(2), 237–249. <https://doi.org/10.5474/geologija.2019.011>
- [41] Price M., (2022), Plastic Piping Materials for Geothermal Applications, Water Well Journal, [<https://waterwelljournal.com/plastic-piping-materials-for-geothermal-applications/>], ανακτήθηκε 10/2/2023]
- [42] [<https://www.dreamstime.com/ground-source-heat-pump-types-geothermal-energy-systems-outline-diagram-ground-source-heat-pump-types-geothermal-energy-image262837382>], ανακτήθηκε 11/9/2023]
- [43] [<https://climatecontrol.ie/ground-source-heat-pumps/>], ανακτήθηκε 4/3/2023]

- [44] Duren, Michael. (2017). Energy in Times After the Energy Transition. 10.1007/978-3-319-57966-5_3.
- [45] GEOTHERMAL HEAT PUMPS – ADVANTAGES AND DISADVANTAGES [https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/mechanical_engineering/Geothermal_Heat_Pumps_Advantages_And_Disadvantages.pdf], ανακτήθηκε 22/9/2023]
- [46] Heat pumps, 2023 [<https://www.cse.org.uk/advice/heat-pumps/>], ανακτήθηκε 3/4/2023]
- [47] Keegan P., Wheelless A., (2016), Is a Geothermal Heat Pump Right for You?, [<https://www.coloradocountrylife.coop/is-a-geothermal-heat-pump-right-for-you/>]
- [48] VDI 4640 Part 2: Thermal use of the underground Ground source heat pump systems, 2000.
- [49] Ochsner Karl, *Geothermal Heat Pumps: A Guide For Planning & Installing*, Earthscan, U.K., 2008
- [50] Worker drills the ground at the construction site, 2019 [<https://drainbrain.com/en/products/snake-oil/worker-drills-the-ground-at-the-construction-site/>], ανακτήθηκε 15/9/2023]
- [51] Rybach, L. (2011). Geothermal Heat Pumps. In: Gupta, H.K. (eds) Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7_70.
- [52] Jevgeni Fadejev, Raimo Simson, Jarek Kurnitski, Fariborz Haghighat, A review on energy piles design, sizing and modelling, Energy, Volume 122, 2017, Pages 390-407, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.097>.
- [53] Liu, J, Wang, F, Cai, W, Wang, Z, Wei, Q, Deng, J. Numerical study on the effects of design parameters on the heat transfer performance of coaxial deep borehole heat exchanger. *Int J Energy Res*. 2019; 43: 6337–6352. <https://doi.org/10.1002/er.4357>
- [54] Borehole Grouting [<https://adpgroupltd.com/drilling-services/borehole-grouting/>], ανακτήθηκε 7/5/2023]
- [55] Mahmoud, Montaser & Ramadan, Mohamad & Pullen, Keith & Abdelkareem, Mohammad & Wilberforce Awotwe, Tabbi & Olabi, Abdul-Ghani & Naher, Sumsun. (2021). A review of grout materials in geothermal energy applications. *International Journal of Thermofluids*. 10. 100070. 10.1016/j.ijft.2021.100070.

- [56] Sáez Blázquez, Cristina & Martín Nieto, Ignacio & Martín, Arturo & González-Aguilera, Diego & Carrasco, Pedro. (2019). Comparative Analysis of Different Methodologies Used to Estimate the Ground Thermal Conductivity in Low Enthalpy Geothermal Systems. *Energies*. 12. 1672. 10.3390/en12091672.
- [57] Kurevija, Tomislav & Macenić, Marija & Strpić, Kristina. (2018). Steady-state heat rejection rates for a coaxial borehole heat exchanger during passive and active cooling determined with the novel step thermal response test method. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 33. 1-21. 10.17794/rgn.2018.3.2.
- [58] Climate change: Cardiff study says ground-water could heat homes, BBC, 2019 [<https://www.bbc.com/news/uk-wales-49579094> , ανακτήθηκε 19/11/2022]
- [59] Kwader T., (2000), Well Diameter And Well Yield: Methods of Drilling, Development Usually Play a Larger Role in Yield Than Diameter [<https://www.thedriller.com/articles/84323-well-diameter-and-well-yield>, ανακτήθηκε 19/9/2023]
- [60] Koenig A., (2012), The 4 Differences Between Geothermal Standing Column Well and Closed Loop Systems, *Heatspring Magazine* [<https://blog.heatspring.com/geothermal-wells/>]
- [61] Kruseman, G. P. και de Ridder, *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data* 2nd edition. N. A. 1991. International Institute for Land Reclamation and Improvement
- [62] Pavlova, Alexandra & Hansen, Jan & Obermeyer, Hennes & Pavlova, I. (2016). Geothermal heat in a heat pump use. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 43. 012025. 10.1088/1755-1315/43/1/012025.
- [63] ΝΟΜΟΣ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 4602, (2019), Έρευνα, εκμετάλλευση και διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού της Χώρας, σύσταση Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, ιδιοκτησιακός διαχωρισμός δικτύων διανομής φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις., Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 1^ο τεύχος, [https://www.kodiko.gr/nomologia/download_fek?f=fek/2019/a/fek_a_45_2019.pdf&t=d405bdf061ffffdc59c20fcc3550eb5a, ανακτήθηκε 1/3/2023].
- [64] Αριθμ. Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488, (2009), Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης – ψύξης χώρων μέσω εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών,

επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό, Εφημερίς Της Κυβερνήσεως Της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος 2º, [https://www.sate.gr/data_source/2009%CE%A5%CE%A0%CE%91%CE%9D-%CE%A6%CE%95%CE%9A1249%CE%92.pdf], ανακτήθηκε 3/3/2023]

[65] Renewable energy targets, European Commission, [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en], ανακτήθηκε 5/3/2023]

[66] 2001/77/ΕΚ, (2001), ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 27ης Σεπτεμβρίου 2001 για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0077>], ανακτήθηκε 2/3/2023]

[67] 2009/28/ΕΚ, (2009), ΟΔΗΓΙΑ 2009/28/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 23ης Απριλίου 2009 σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, [<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EL:PDF>], ανακτήθηκε 3/3/2023]

[68] EU overachieves 2020 renewable energy target, (2022), Eurostat, [<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220119-1>], ανακτήθηκε 6/4/2023]

[69] Mouterde P., (2022), France to pay up to €500m for falling short of renewable energy targets, [https://www.lemonde.fr/en/environment/article/2022/11/25/renewable-energy-france-will-have-to-pay-several-hundred-million-euros-for-falling-short-of-its-objectives_6005566_114.html], ανακτήθηκε 7/3/2023]

[70] 2018/2001/ΕΕ, (2018), ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2018/2001 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 11ης Δεκεμβρίου 2018 για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής

- Ένωσης, [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>, ανακτήθηκε 7/3/2023]
- [71] Renewable energy statistics, (2023), Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics&oldid=510001, ανακτήθηκε 6/4/2023]
- [72] Share of energy from renewable sources, (2023), Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_IND_REN_custom_7510758/default/table , ανακτήθηκε 18/9/2023]
- [73] A European Green Deal Striving to be the first climate-neutral continent, European Commission, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, ανακτήθηκε 22/8/2023]
- [74] Delivering the European Green Deal, European Commission, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en, ανακτήθηκε 22/8/2023]
- [75] Shedding light on energy - 2023 edition, (2023), Eurostat, [<https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023>, ανακτήθηκε 18/7/2023]
- [76] Net greenhouse gas emissions (source: EEA), (2023), Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SDG_13_10/default/table, ανακτήθηκε 18/9/2023]
- [77] Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA), (2023), Eurostat, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE_custom_7521871/default/table?lang=en, ανακτήθηκε 19/9/2023]
- [78] Commission presents Renewable Energy Directive revision, (2021), European Commission, [https://commission.europa.eu/news/commission-presents-renewable-energy-directive-revision-2021-07-14_en, ανακτήθηκε 17/9/2023]
- [79] REPowerEU Affordable, secure and sustainable energy for Europe, (2022), European Commission, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en, ανακτήθηκε 25/8/2023]

- [80] Kim, Y. & Lee, J.S. & Jeon, S.W.. (2016). Hybrid ground-source heat pump systems. 10.1016/B978-0-08-100311-4.00012-1.
- [81] Samotyj M., (2009), *Hybrid Geothermal Heat Pump Systems*. EPRI, Palo Alto, CA: 2009. 1017888.
- [82] Hackel S., Hybrid ground-source heat pumps SAVING ENERGY AND COST, Energy Center of Wisconsin, [www.ecw.org, ανακτήθηκε 16/7/2023]
- [83] Qi, Zishu & Gao, Qing & Liu, Yan & Yan, Y.Y. & Spitler, Jeffrey. (2014). Status and development of hybrid energy systems from hybrid ground source heat pump in China and other countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29. 37-51. 10.1016/j.rser.2013.08.059.
- [84] REMEDIAL ENGINEERING, [<https://www.facilitydynamics.com/services/remedial-engineering/>, ανακτήθηκε 18/7/2023]
- [85] HST Engineering Team, (2023), Types of cooling towers, working principles, operation, and maintenance., [https://www.hegelsystech.com/post/types-of-cooling-towers-working-principles-operation-and-maintenance, ανακτήθηκε 23/9/2023]
- [86] NATURAL DRAFT COOLING TOWER, [<https://www.hamon.com/25-natural-draft-cooling-tower/index.html>], ανακτήθηκε 19/7/2023]
- [87] Cooling tower diagram: A go-to guide to learn about their function, 2022 [https://www.linquip.com/blog/cooling-tower-diagram/, ανακτήθηκε 24/9/2023]
- [88] Man, Yi & Yang, Hongxing & Wang, Jinggang. (2010). Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like Hong Kong. *Applied Energy*. 87. 2826-2833. 10.1016/j.apenergy.2009.04.044.
- [89] Luthfi I. Lubis, Mehmet Kanoglu, Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, Thermodynamic analysis of a hybrid geothermal heat pump system, *Geothermics*, Volume 40, Issue 3, 2011, Pages 233-238, ISSN 0375-6505, [<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.06.004>].
- [90] Singh, J and Foster, G. *Advantages of Using Hybrid Geothermal Option*. The Second Stockton International Geothermal Conference, 1998., EPRI HGSHPS
- [91] Barfield, A. Hybrid Geothermal for Hotel. *ASHRAE Journal*. June 2008.

- [92] Ramkumar, J. *Hybrid Geothermal Systems and Possible Applications in Sporting Venue*. IGSHA, Stillwater, OK. 2008. [<https://slideplayer.com/slide/1530163/>, ανακτήθηκε 8/8/2023]
- [93] Alessandro, Miglioli & Niccolao, Aste & Claudio, Del & Fabrizio, Leonforte. (2021). Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and design methods. *Energy and Built Environment*. 4. 10.1016/j.enbenv.2021.07.002.
- [94] SOLAR ASSISTED HEAT PUMP, [<https://www.knowledge-share.eu/en/patent/solar-assisted-heat-pump/>, ανακτήθηκε 9/8/2023]
- [95] Ασπετάκης Γ.Φ., (2020), *SIMULATION AND ANALYSIS OF THREE SOLAR ASSISTED GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [96] Solar Flat Plate Collectors for Solar Hot Water, [<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [97] Evacuated Tube Collector, [<https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [98] Vacuum Tube Solar Collector, [<https://www.indiamart.com/proddetail/vacuum-tube-solar-collector-11618826073.html>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [99] Santos B., (2023), Solar-thermal heat pump configurations for buildings, pv magazine, [<https://www.pv-magazine.com/2023/02/16/solar-thermal-heat-pump-configurations-for-buildings/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [100] Figueiredo Ramos, C. A. & Alcaso, Aderito & Cardoso, A.J.M.. (2019). Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 354. 012048. 10.1088/1755-1315/354/1/012048.
- [101] Alessandro, Miglioli & Niccolao, Aste & Claudio, Del & Fabrizio, Leonforte. (2021). Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and design methods. *Energy and Built Environment*. 4. 10.1016/j.enbenv.2021.07.002.

- [102] Bi, Yuehong & Guo, Tingwei & Zhang, Liang. (2004). Solar and ground source heat-pump system. *Applied Energy*. 78. 231-245. 10.1016/j.apenergy.2003.08.004.
- [103] Bakirci, Kadir & Ozyurt, O. & Comakli, Kemal & Comakli, Omer. (2011). Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed-loop for heating applications. *Energy*. 36. 3224–3232. 10.1016/j.energy.2011.03.011.
- [104] Stojanović, B & Akander, Jan. (2009). Build-up and long-term performance test of a full-scale solar-assisted heat pump system for residential heating in Nordic climatic conditions. *Applied Thermal Engineering*. 30. 2-3. 10.1016/j.applthermaleng.2009.08.004.
- [105] Dai, Orchid & Li, Sufen & Lin, Duanmu & Xiangli, Li & Shang, Yan & Ming, Dong. (2014). Experimental performance analysis of a solar assisted ground source heat pump system under different heating operation modes. *Applied Thermal Engineering*. 75. 325-333. 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.061.
- [106] Andresen, Hanne & Li, Yong. (2015). Modelling the Heating of the Green Energy Lab in Shanghai by the Geothermal Heat Pump Combined with the Solar Thermal Energy and Ground Energy Storage. *Energy Procedia*. 70. 10.1016/j.egypro.2015.02.111.
- [107] Heat Recovery from Wastewater Using Gravity-Film Heat Exchanger, (2001), Produced for the U.S. Department of Energy (DOE) by the Oak Ridge National Laboratory, [<https://gfxtechnology.com/Femp.pdf>, ανακτήθηκε 9/8/2023]
- [108] Li, Hongqiang & Kang, Shushuo & Yu, Zhun & Cai, Bo & Zhang, Guoqiang. (2014). A feasible system integrating combined heating and power system with ground-source heat pump. *Energy*. 74. 240–247. 10.1016/j.energy.2014.06.015.
- [109] Liu, Zhijian & Xu, Wei & Zhai, Xue & Qian, Cheng. (2017). Feasibility and performance study of the hybrid ground-source heat pump system for one office building in Chinese heating dominated areas. *Renewable Energy*. 101. 1131-1140. 10.1016/j.renene.2016.10.006.
- [110] Nam, Yujin & Ooka, Ryozi & Shiba, Yoshiro. (2010). Development of dual-source hybrid heat pump system using groundwater and air. *Energy and Buildings - ENERG BLDG*. 42. 909-916. 10.1016/j.enbuild.2009.12.013.
- [111] Pardo Garcia, Nicolas & Montero, Alvaro & Martos, J. & Urchueguia, Javier. (2010). Optimization of hybrid – ground coupled and air source – heat pump systems

in combination with thermal storage. Applied Thermal Engineering. 30. 1073-1077. 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.015.

[112] Refrigerant, Wikipedia, [<https://en.wikipedia.org/wiki/Refrigerant>, ανακτήθηκε 12/8/2023]

[113] Dreepaul, Raj & Elahee, Khalil. (2018). Barriers to the use of Low GWP Refrigerants in the Refrigeration and Air Conditioning Sector in Mauritius. 1-6. 10.1109/EFEA.2018.8617096.

[114] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) αριθ. 517/2014, (2014), ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) αριθ. 517/2014 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 16ης Απριλίου 2014 για τα φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου και για την κατάργηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 842/2006, [<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517>, ανακτήθηκε 12/8/2023]

[115] Dudita M., Kauffeld M., (2021), Environmental impact of HFO refrigerants & alternatives for the future, [<https://www.openaccessgovernment.org/hfo-refrigerants/112698/>, ανακτήθηκε 12/8/2023]

[116] Johnson A., (2015), HFO Refrigerants – What You Need to Know, [<https://refrigeranthq.com/hfo-refrigerants-need-know/>, ανακτήθηκε 12/8/2023]

[117] Direk, Mehmet & Keleşoğlu, Alper. (2019). AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING SYSTEM WITH AN INTERNAL HEAT EXCHANGER USING R1234YF AND DIFFERENT EVAPORATION AND CONDENSATION TEMPERATURES. 23. 1115-1125.

[118] HFOs Refrigerant solutions with zero ODP and very low GWP, [https://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfo_refrigerants/index.html, ανακτήθηκε 13/8/2023]

[119] Nair, Vipin. (2020). HFO refrigerants: A review of present status and future prospects.. International Journal of Refrigeration. 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039.

[120] Dey A.K., What are HFO Refrigerants? Their Benefits and Applications, [https://whatispiping.com/hfo-refrigerants/?expand_article=1&expand_article=1, ανακτήθηκε 13/8/2023]

[121] Kashif Nawaz, Bo Shen, Ahmed Elatar, Van Baxter, Omar Abdelaziz, R1234yf and R1234ze(E) as low-GWP refrigerants for residential heat pump water heaters,

International Journal of Refrigeration, Volume 82, 2017, Pages 348-365, ISSN 0140-7007, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.06.031>.

[122] Aprea, Ciro & Greco, A. & Maiorino, Angelo. (2017). An experimental investigation of the energetic performances of HFO1234yf and its binary mixtures with HFC134a in a household refrigerator. International Journal of Refrigeration. 76. 109-117. 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.005.

[123] Corberan, Jose. (2016). New trends and developments in ground-source heat pumps. 10.1016/B978-0-08-100311-4.00013-3.

[124] Bentivegna, Marcello & Clodic, Denis. (2011). R-1234yf Mixtures for replacing R-407C in residential heat pumps.

[125] Longo, G. & Mancin, Simone & Righetti, Giulia & Zilio, Claudio. (2015). HFC32, a low GWP substitute for HFC410A in medium size chillers and heat pumps. International Journal of Refrigeration. 53. 10.1016/j.ijrefrig.2015.01.014.

[126] Ammonia, the “New Thing” in Refrigerants?, (2018), <https://www.goodway.com/hvac-blog/2018/10/ammonia-the-new-thing-in-refrigerants/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]

[127] Ammonia As a Refrigerant: Pros and Cons, (2023), <https://www.goodway.com/hvac-blog/2009/08/ammonia-as-a-refrigerant-pros-and-cons/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]

[128] ASHRAE Position Document on AMMONIA AS A REFRIGERANT, (2002), https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/ASHRAE_PD_Ammonia_Refrigerant_2010_1.pdf, ανακτήθηκε 14/8/2023]

[129] Palm, Björn. (2008). Ammonia in low capacity refrigeration and heat pump systems. International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid - INT J REFRIG. 31. 709-715. 10.1016/j.ijrefrig.2007.12.006.

[130] CO₂ heat pumps: Bringing natural refrigerants to Japanese homes, (2016), <https://r744.com/co2-heat-pumps-bringing-natural-refrigerants-to-japanese-homes/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]

[131] Wilson A., (2013), Next Up in Heat-Pump Refrigerants: Carbon Dioxide, <https://www.buildinggreen.com/product-review/next-heat-pump-refrigerants-carbon-dioxide>, ανακτήθηκε 14/8/2023]

- [132] About CO₂ refrigeration: Why use CO₂ as a refrigerant? [<https://r744.com/about-co2-refrigeration-why-use-co2-as-a-refrigerant>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [133] Welter T., (2020), HAVE WE REACHED THE TIPPING POINT FOR CO₂ REFRIGERATION SYSTEMS?, [https://www.hendersonengineers.com/insight_article/have-we-reached-the-tipping-point-for-co2-refrigeration-systems/, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [134] What are the Pro's and Con's of CO₂ (R744) as a Refrigerant?, (2020), [<https://climadesign.co.uk/what-are-the-pros-and-cons-of-co2-r744-as-a-refrigerant/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [135] R744 refrigerant, [<https://www.intarcon.com/en/r744-refrigerant/>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [136] Jane Y., Why CO₂ is the most promising refrigerant in the cooling industry, [<https://blog.isa.org/why-co2-is-the-most-promising-refrigerant-in-the-cooling-industry>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [137] Hydrocarbons as refrigerants, (2016), Eurammon, [<http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/Hydrocarbons%20as%20refrigerants.pdf>, ανακτήθηκε 14/8/2023]
- [138] Hydrocarbons, Danfoss, [<https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/refrigerants-for-lowering-the-gwp/hydrocarbons/>, ανακτήθηκε 12/8/2023]
- [139] Hydrocarbon Natural Refrigerants, [<https://www.phchd.com/apac/biomedical/preservation/Product-technology/next-generation-HC-natural-refrigerants>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [140] Harbi, Khalid. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 73. 1247-1264. 10.1016/j.rser.2017.02.039.
- [141] Hydrocarbon refrigerants, [<https://iifir.org/en/encyclopedia-of-refrigeration/hydrocarbon-refrigerants>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [142] Hydrocarbon Refrigerants, [<https://refrigeranthq.com/refrigerant-2/hydrocarbons/> ανακτήθηκε 13/8/2023]

- [143] Johnson A., (2016), [<https://refrigeranthq.com/flammable-refrigerant-blamed-for-two-deaths/>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [144] Danfoss Announces Inverter Scroll Compressor Range for Light-Commercial R290 Heat Pumps, 2023 [<https://hydrocarbons21.com/danfoss-announces-inverter-scroll-compressor-range-for-light-commercial-r290-heat-pumps/>, ανακτήθηκε 13/8/2023]
- [145] Wu, Di & Hu, Bin & Wang, R.Z.. (2020). Vapor compression heat pumps with pure Low-GWP refrigerants. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 138. 110571. 10.1016/j.rser.2020.110571.
- [146] Palm, Björn. (2008). Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – A review. International Journal of Refrigeration. 31. 552-563. 10.1016/j.ijrefrig.2007.11.016.
- [147] Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards), Eurostat, 2023 [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204/default/table?lang=en, ανακτήθηκε 16/8/2023]
- [148] Gas prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards), Eurostat, 2023 [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_202__custom_7407780/default/table?lang=en, ανακτήθηκε 16/8/2023]
- [149] Geothermal Heat Pump Market by Technology (Open Loop Systems, Closed Loop Systems), by End Use (Residential, Commercial, Industrial): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031, Allied Market Research, 2022, [<https://www.alliedmarketresearch.com/geothermal-heat-pump-market-A10486>, ανακτήθηκε 17/8/2023]
- [150] Pullen T., (2022), Ground source heat pump: Costs, plus all questions answered, [<https://www.homebuilding.co.uk/advice/ground-source-heat-pumps>, 18/8/2023]
- [151] Vishnubhotla V., How Much Does a Ground Source Heat Pump Cost?, (2023), [<https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/04/how-much-does-a-ground-source-heat-pump-cost>, ανακτήθηκε 18/8/2023]

- [152] What is the cost of installing a ground source heat pump in Britain?,
[<https://www.imsheatpumps.co.uk/blog/cost-of-installing-ground-source-heat-pump-in-uk/>, ανακτήθηκε 18/8/2023]
- [153] Vekony A.T., Ground Source Heat Pump Prices ,(2023),
[<https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/ground-source-heat-pumps-in-the-uk/ground-source-heat-pump-prices>, ανακτήθηκε 19/8/2023]
- [154] Potential Cost Reductions for Ground Source Heat Pumps, Department of Energy & Climate Change, 2016
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/498963/150113_Delta-ee_Final_GSHP_report_DECC.pdf, ανακτήθηκε 19/8/2023]
- [155] Yang Wang, Wei He, Temporospatial techno-economic analysis of heat pumps for decarbonising heating in Great Britain, Energy and Buildings, Volume 250, 2021, 111198, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111198>.
- [156] Massey J., (2023), Ground source heat pump costs and savings,
[<https://www.which.co.uk/reviews/ground-and-air-source-heat-pumps/article/ground-source-heat-pumps-explained/ground-source-heat-pump-costs-and-savings-aYYGN4A4NFpB>, ανακτήθηκε 20/8/2023]
- [157] Joshi M., (2023), Heat Pump Grants in the UK (2023),
[<https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/heat-pump-grant#boiler-upgrade-scheme>, ανακτήθηκε 20/8/2023]
- [158] How Much Does a Geothermal Heat Pump System Cost,
[<https://earthrivergeothermal.com/how-much-does-a-geothermal-heat-pump-system-cost/>, ανακτήθηκε 20/8/2023]
- [159] Browning K., (2022), What Is The Cost Of A Ground Source Heat Pump?,
[<https://climatebiz.com/cost-of-a-ground-source-heat-pump/>, ανακτήθηκε 20/8/2023]
- [160] Maday R., (2022), How Much Does a Geothermal Heat Pump Cost?,
[<https://www.bobvila.com/articles/geothermal-heat-pump-cost/>, ανακτήθηκε 20/8/2023]

- [161] Newcomb R., (2023), How Much Does a Heat Pump Cost? (2023 Guide), [<https://www.architecturaldigest.com/reviews/hvac/heat-pump-cost>, ανακτήθηκε 20/8/2023]
- [162] Residential Clean Energy Credit, IRS, 2022 [<https://www.irs.gov/credits-deductions/residential-clean-energy-credit>, ανακτήθηκε 21/8/2023]
- [163] Neves, R., Cho, H., & Zhang, J. (2020). Techno-economic analysis of geothermal system in residential building in Memphis, Tennessee. *Journal of building engineering*, 27, 100993.
- [164] Benefits of Geothermal Heat Pump Systems, [<https://www.californiageo.org/benefits-of-geothermal-heat-pump-systems/>, ανακτήθηκε 21/8/2023]
- [165] Pike, Christopher & Whitney, Erin. (2017). Heat pump technology: An Alaska case study. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 9. 061706. 10.1063/1.4986584.
- [166] Blum, Philipp & Campillo, Gisela & Kölbel, Thomas. (2011). Techno-economic and spatial analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany. *Energy*. 36. 3002-3011. 10.1016/j.energy.2011.02.044.
- [167] Aditya, Gregorius & Mikhaylova, Olga & Narsilio, Guillermo & Johnston, Ian. (2020). Comparative costs of ground source heat pump systems against other forms of heating and cooling for different climatic conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 42. 100824. 10.1016/j.seta.2020.100824.
- [168] Awad, Mostafa. (2011). Fouling of Heat Transfer Surfaces. 10.5772/13696.
- [169] Doelman J., (2014), Controlling Scale Deposits in Waterlines, [<https://modernpumpingtoday.com/controlling-scale-deposits-in-waterlines/>, ανακτήθηκε 18/8/2023]
- [170] Elwerfalli, Abdelnaser & Alsadaie, Salih & Mujtaba, Iqbal. (2021). Estimation of Shutdown Schedule to Remove Fouling Layers of Heat Exchangers Using Risk-Based Inspection (RBI). *Processes*. 9. 10.3390/pr9122177.
- [171] Fouling in Heat Exchanger, [<https://klarenbv.com/what-is-fouling-and-scaling-in-heat-exchanger/>, ανακτήθηκε 19/8/2023]
- [172] Jin Luo, Kanghui Pei, Peijia Li, Analysis of the thermal performance reduction of a groundwater source heat pump (GWHP) system, *Engineering Failure Analysis*, Volume

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105922>.

[173] Stenvik, Lars & Gjengedal, Sondre & Ramstad, Randi & Frengstad, Bjørn. (2022). How to avoid gas clogging in groundwater heat pump systems: a case study from the Lena terrasse system in Melhus, Norway. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 81. 10.1007/s10064-022-02652-9.

[174] Gjengedal, Sondre & Ramstad, Randi & Hilmo, Bernt & Frengstad, Bjørn. (2019). Fouling and clogging surveillance in open loop GSHP systems: A systematic procedure for fouling and clogging detection in the whole groundwater circuit. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 79. 10.1007/s10064-019-01556-5.

[175] Water Well Screens, [<https://roscoemoss.com/products/water-well-screens/>, ανακτήθηκε 20/8/2023]

[176] Care and Maintenance of Irrigation Wells, NDSU, 2022, [<https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/publications/care-and-maintenance-irrigation-wells>, ανακτήθηκε 20/8/2023]

[177] Casasso, Alessandro & Sethi, Rajandrea. (2019). Assessment and Minimization of Potential Environmental Impacts of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems. Water. 11. 1573. 10.3390/w11081573.

[178] Rafferty K., (2005), Ground Water Issues in Geothermal Heat Pump Systems, Groundwater, Volume 41, Issue 4, p. 408-410, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02374.x>

[179] Song, Wei & Liu, Xiaoxiu & Zheng, Tuanfeng & Yang, Jiaming. (2020). A review of recharge and clogging in sandstone aquifer. Geothermics. 87. 101857. 10.1016/j.geothermics.2020.101857.

[180] Bai, Xuelian & Luo, Te & Cheng, Kehui & Chai, Feng. (2014). Experimental study on fouling in the heat exchangers of surface water heat pumps. Applied Thermal Engineering. 70. 892-895. 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.009.

[181] Chandra, Kamlesh & Kain, Vivekanand & Sinha, S.K. & Gujar, H.G.. (2020). Metallurgical investigation of a heat-exchanger tube of 70/30 cupronickel failed by fretting corrosion. Engineering Failure Analysis. 116. 104756. 10.1016/j.engfailanal.2020.104756.

- [182] Stainless Steel Tanks, [<https://www.iqsdirectory.com/articles/stainless-steel-tank.html>], ανακτήθηκε 20/9/2023]
- [183] Verduco M., (2023), The Pros and Cons of PVC for Water Well Installations, [ανακτήθηκε 20/9/2023]
- [184] Gjengedal, Sondre & Ramstad, Randi & Hilmo, Bernt & Frengstad, Bjørn. (2018). Video inspection of wells in open loop ground source heat pump systems in Norway. 1-5. 10.22488/okstate.18.000025.
- [185] Well Rehabilitation, Inspection, and Sampling, [<https://www.kpventureswelldrilling.com/well-rehabilitation>], ανακτήθηκε 27/9/2023]
- [186] For Well Development and Rehabilitation, [https://www.flatwaterfleet.com/html/jetting_tool.html] ανακτήθηκε 27/9/2023]
- [187] Papachristou, Maria & Mendrinou, Dimitrios & Dalampakis, Paschalis & Arvanitis, Apostolos & Karytsas, Constantine & Andritsos, N.. (2016). Geothermal Energy Use, Country Update for Greece.
- [188] ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΩ 2023, [<https://exoikonomo2023.gov.gr/>], ανακτήθηκε 26/9/2023]
- [189] ΔΕΗ myEnergy HeatPump, [<https://www.dei.gr/el/gia-to-spiti/myenergy/myenergy-heatpump/>], ανακτήθηκε 26/9/2023]
- [190] Αρ. Πρωτ.: 5378/Φ.14-2337, Βόλος 31 / 10 / 2013, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ & ΣΠΟΡΑΔΩΝ ΤΜΗΜΑ Α΄
- [191] Αρ. Πρωτ.: 968/Φ.14-2248, Βόλος 20 / 5 / 2008, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΝΟΜ/ΚΗ ΑΥΤ/ΣΗ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
- [192] Αρ. Πρωτ.: 4253/Φ.14-2335, Βόλος 26 / 08 / 2013, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ & ΣΠΟΡΑΔΩΝ ΤΜΗΜΑ Α΄
- [193] Αρ. Πρωτ.: 6092/Φ.14-2395, Βόλος 12 / 11 / 2018, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ & ΣΠΟΡΑΔΩΝ ΧΟΡΗΓΗΣΗΣ ΑΔΕΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

[194] Αρ. Πρωτ.: Φ14-2446, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΕΝΟΤΗΤΩΝ ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ & ΣΠΟΡΑΔΩΝ ΧΟΡΗΓΗΣΗΣ ΑΔΕΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ (ΤΜΗΜΑ Α')

[195] ΑΕRMEC NXP [<https://www.calda.gr/product/aermec-nxp/>, ανακτήθηκε 27/9/2023]

[196] Αρ. Πρωτ.: Δ.Α/Φ.1.64/55/1437, Λάρισα 14-09-2010, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΝΜ/ΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΛΑΡΙΣΑΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΜΗΜΑ Β'

[197] Αρ. Πρωτ.: Δ.Α/Φ.1.64.53-1/519, Λάρισα 17-04-2012, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΓΕΝΙΚΗ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ, Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Π.Ε. ΛΑΡΙΣΑΣ ΤΜΗΜΑ Α'

[198] Αρ. Πρωτ.: Δ.Α/Φ.1.64.56/2340, Λάρισα 13-09-2010, ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΝΜ/ΚΗ ΑΥΤΟΔΙΟΙΚΗΣΗ ΛΑΡΙΣΑΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΜΗΜΑ Β'

Παράρτημα

Πίνακας Α: Χαρακτηριστικά πετρωμάτων στους 20 °C [26]

Πέτρωμα	Πυκνότητα ρ [10 ³ kg/m ³]	Θερμική αγωγιμότητα λ [W/(m*K)]	Ειδική θερμοχωρητικότητα [MJ/(m ³ *K)]
<i>Μαγματικά πετρώματα</i>			
Βασάλτης	2,6-3,2	1,3-2,3	2,3-2,6
Γρανίτης	2,4-3,0	2,1-4,1	2,1-3,0
<i>Μεταμορφωσιγενή πετρώματα</i>			
Γνεύσιος	2,4-2,7	1,9-4	1,8-2,4
Μάρμαρο	2,5-2,8	1,3-3,1	2
<i>Ιζηματογενή πετρώματα</i>			
Ασβεστόλιθος	2,6-2,7	2,5-4	2,1-2,4
Ψαμμίτης	2,2-2,7	1,3-5,1	1,6-2,8
<i>Ασυγχώνευτα πετρώματα</i>			
Χαλίκι, ξηρό	2,7-2,8	0,4-0,5	1,4-1,6
Χαλίκι, κορεσμένο με νερό	2,7	1,8	2,4
Άμμος, ξηρή	2,6-2,7	0,3-0,8	1,3-1,6
Άμμος, κορεσμένη με νερό	2,6-2,7	1,7-5,0	2,2-2,9
<i>Άλλες ουσίες</i>			
Μπεντονίτης	-	0,5-0,8	3,9
Άμμος, κορεσμένη με νερό	2	0,9-2,0	1,8

Πίνακας Β: Απόληψη θερμότητας από διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς [48]

Έδαφος	1800 ώρες λειτουργίας ετησίως [W/m]	2400 ώρες λειτουργίας ετησίως [W/m]
Γενικά χαρακτηριστικά:		
Θερμικά φτωχό έδαφος [$k < 1,5$ W/(m*K)]	25	20
Κανονικό βραχώδες έδαφος και ιζήματα κορεσμένα με νερό [$k = 1,5 - 3,0$ W/(m*K)]	65	50
Βραχώδες έδαφος [$k > 3,0$ W/(m*K)]	84	70
Τύπος εδάφους:		
Χαλίκι ή άμμος, ξηρά	<25	55-65
Χαλίκι ή άμμος, κορεσμένα με νερό	65-80	30-40
Άργιλος με υγρασία	35-50	45-60
Ασβεστόλιθος	55-70	55-65
Ψαμμίτης (Αμμόλιθος)	65-80	55-70
Όξινα πυριτικά πετρώματα (π.χ. Γρανίτης)	65-85	35-55
Πυριτικά πετρώματα (π.χ. Βασάλτης)	40-65	60-70
Γνεύσιος	70-85	80-100