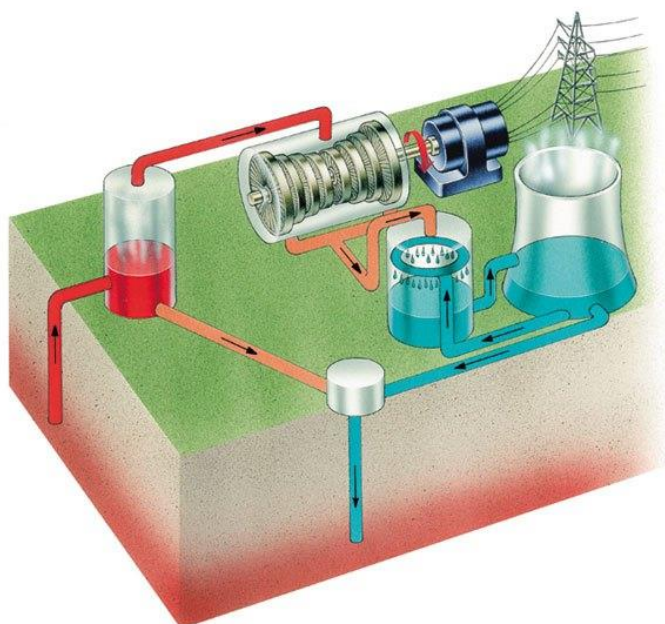




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Θερμότητας
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γουρνάς Νικόλαος

Επιβλέπουσα

Επικ. Καθηγήτρια Κορωνάκη Ειρήνη

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Κορωνάκη Ειρήνη για την συνεργασία και την βοήθεια που μου παρείχε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας καθώς και τους συμφοιτητές και φίλους μου που με βοήθησαν στο προγραμματιστικό κομμάτι.

Πρόλογος

Σε αυτήν την εργασία σκοπός είναι η θεωρητική προσέγγιση των γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και η μοντελοποίηση μιας πραγματικής μονάδας με τη δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου σε γλώσσα προγραμματισμού.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά για την γεωθερμική ενέργεια και την κατανομή της σε παγκόσμιο επίπεδο. Περιγράφονται τρόποι μελέτης και αξιοποίησής της καθώς και προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια.

Στην συνέχεια γίνεται μια θεωρητική αναφορά στις αντλίες θερμότητας. Περιγράφονται τα είδη των αντλιών θερμότητας, ο τρόπος λειτουργίας τους, οι επιδόσεις τους και το κόστος.

Έπειτα περνάμε στην περιγραφή και στην ανάλυση των ειδών των γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και κλείνουμε τη θεωρητική προσέγγιση με μια αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμίας.

Τέλος, ακολουθεί το υπολογιστικό μοντέλο με λεπτομερή περιγραφή, ανάλυση, παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτά.

Abstract

In this paper, the aim is the theoretical approach of geothermal power plants and the modeling of a real unit by creating a computational model in programming language.

Initially, there is a report on geothermal energy and its distribution at a global level. Describes ways of studying and exploiting it, as well as forecasts for the years to come.

Then a theoretical reference is made to heat pumps. Describe the types of heat pumps, their way of operation, their performance and cost.

We then go on to describe and analyze the types of geothermal power plants and close the theoretical approach with a reference to the environmental impact of geothermal energy.

Finally, he follows the computational model with detailed description, analysis, presentation of the results and the conclusions that result from them.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Γεωθερμικό δυναμικό.....	7
1.1. Διαχείριση και κόστος γεωθερμικού δυναμικού.....	7
1.2. Παγκόσμιο γεωθερμικό δυναμικό.....	10
1.3. Ροή και κατανομή της θερμικής ενέργειας στη γη.....	11
1.4. Θεωρητικό, τεχνικό και οικονομικό γεωθερμικό δυναμικό της γης.....	13
1.5. Ταξινόμηση γεωθερμικών αποθεμάτων.....	16
1.6. Ογκομετρική μέθοδος υπολογισμού του γεωθερμικού δυναμικού.....	17
1.7. Παγκόσμια παραγωγή και εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας.....	20
1.7.1. Παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς και προβλέψεις.....	21
1.7.2. Παγκόσμια εγκατεστημένη θερμική ισχύς, προβλέψεις και εφαρμογές.....	22
1.8. Γεωθερμική χαρτογράφηση των χώρων ηλεκτροπαραγωγής.....	29
1.8.1 Γεωθερμική χαρτογράφηση των χώρων άμμεσης χρήσης.....	32
2. Αντλίες θερμότητας.....	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Αρχές λειτουργίας.....	34
2.2.1 Βασικά τμήματα.....	35
2.2.2 Λειτουργία αντλίας θερμότητας στις 2 λειτουργίες (θέρμανση, ψύξη).....	36
2.3 Ιδανική αντλία.....	37
2.4 Θεωρητικός και πραγματικός κύκλος της αντλίας θερμότητας.....	39
2.5 Κατηγορίες αντλιών θερμότητας.....	39
2.6 Πηγές θερμότητας.....	42
2.6.1 Αέρας.....	42
2.6.2 Νερό.....	43
2.6.3 Έδαφος.....	44
2.6.4 Ηλιακή ενέργεια.....	45
2.7 Επιδόσεις λειτουργίας.....	45
2.8 Εφαρμογές αντλιών θερμότητας.....	50
2.8.1 Αντλία θερμότητας με θέρμανση δαπέδου.....	50
2.8.2 Αντλία συζευγμένη με κεντρική θέρμανση.....	50
2.9 Στοιχεία κόστους αντλίας θερμότητας.....	51
2.10 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.....	52
2.10.1 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (εγκατεστημένη ισχύς και προβλέψεις).....	55
3. Γεωθερμικές μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας.....	57
3.1. Τύποι γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.....	59
3.1.1. Εξοπλισμός μιας γεωθερμικής μονάδας.....	66
3.2 Τύποι μονάδων γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.....	61
3.2.1 Μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα (back pressure type).....	62
3.2.2 Μονάδες ξηρού ατμού.....	63
3.2.3 Μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου (single flash steam type).....	64
3.2.4 Μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου (double flash steam type).....	65
3.2.5 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με ένα αμοστρόβιλο.....	65
3.2.6 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δύο αμοστρόβιλους.....	67
3.2.7 Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary type).....	69
3.2.8 Μονάδες δυαδικού τύπου ORC.....	71
3.2.9 Μονάδες δυαδικού τύπου Kalina.....	72
3.2.10 Μονάδες συνδυασμένου ή υβριδικού τύπου (combined or hybrid type).....	73
3.2.11 Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.....	76
3.3 Τμήματα και τεχνικά στοιχεία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.....	77

3.4	Ειδική απόδοση θερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής.....	78
4	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη γεωθερμία.....	79
4.2	Επιπτώσεις στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και του νερού.....	82
4.3	Υγρά και στερεά γεωθερμικά απόβλητα.....	84
4.4	Υγρά γεωθερμικά απόβλητα.....	85
4.5	Στερεά γεωθερμικά απόβλητα.....	86
4.6	Άλλα περιβαλλοντικά θέματα.....	87
4.6.1	Θερμική ρύπανση.....	87
4.6.2	Ηχορύπανση	89
4.6.3	Σεισμικότητα των βελτιωμένων μονάδων EGS.....	90
4.7	Προστασία τοπίου και οικοτόπων.....	91
4.8	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκτέλεση γεωτρήσεων.....	91
5	Υπολογιστικό μοντέλο.....	93
5.2	Περιγραφή των κύκλων.....	96
5.3	Θερμοδυναμική ανάλυση των κύκλων.....	98
5.4	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	99
5.5	Συμπεράσματα.....	107
	Βιβλιογραφία.....	109

Κεφάλαιο 1

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ



Σχήμα 1.1 Γεωθερμική πηγή [34]

1.1 Διαχείριση και κόστος γεωθερμικού δυναμικού

Ο κίνδυνος της κλιματικής αλλαγής και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας έχουν συνειδητοποιήσει την ανάγκη για τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας , συμπεριλαμβανομένης και της γεωθερμικής ενέργειας . Αρκετές χώρες στην Ευρώπη έχουν αναπτύξει συστήματα κινήτρων που κάνουν την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας και τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) οικονομικά ελκυστικές , όπως τα πρότυπα χαρτοφυλάκια ανανεώσιμων και οι επιδοτήσεις . Άλλες σκοπιμότητες των χωρών είναι η ενεργειακή ανεξαρτησία και η ασφάλεια , το αυξανόμενο κόστος των ορυκτών καυσίμων και η ταχέως αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας .

Οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας εμφανίζονται για πρώτη φορά από την Παλαιολιθική εποχή για τελετουργικούς σκοπούς ή μπάνιο . Η βιομηχανική αξιοποίηση εμφανίζεται για πρώτη φορά στο Larderello της Ιταλίας με την παραγωγή βορικού οξέος , όπου από τον Piero Girori Conti στο γεωθερμικό πεδίο Larderello στην Ιταλία το 1904 στήθηκε η πρώτη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και το 1913 λειτούργησε η πρώτη εμπορική

μονάδα 250KW_e , ενώ τη δεκαετία του 1920 άρχισε η πρώτη προσπάθεια εγκατάστασης γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στις ΗΠΑ . Ουσιαστικά όμως οι πρώτες αξιόλογες γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εγκαταστάθηκαν στην Ιταλία το 1946 και ακολούθησαν η Νέα Ζηλανδία το 1958 και οι ΗΠΑ το 1960 . Η πρώτη μονάδα υγρού ατμού διπλού τύπου 55MW_e εγκαταστάθηκε στην Ιαπωνία το 1977 , ενώ η πρώτη μονάδα δυαδικού τύπου στις ΗΠΑ το 1984 .

Η GEA εκτιμά ότι η διεθνής αγορά γεωθερμικής ενέργειας αυξάνεται με σταθερό ετήσιο ρυθμό από 4% έως 5% . Σχεδόν 700 γεωθερμικά έργα βρίσκονται σε εξέλιξη σε 76 χώρες . Πολλές χώρες προβλέποντας τις απειλές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή συνειδητοποιούν τις αξίες της γεωθερμικής ενέργειας . Οι χώρες αυτές βρίσκονται σε κάθε ήπειρο και κυμαίνονται από μικρά νησιωτικά έθνη μέχρι μεγάλες ανεπτυγμένες οικονομίες , όπως η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες .

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας βασίζεται τόσο στη θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο φλοιό όσο και στην τρέχουσα ενέργεια που προκαλεί τη ψύξη της γης . Η θερμότητα της γεωθερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται με δυο τρόπους για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια και χωρίς μετατροπή για άμεση θέρμανση ή ψύξη .

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε 3 κύριες ομάδες ανάλογα , με την ενθαλπία (θερμοκρασία και πίεση) και τη σχέση τους με τη μαγματική δραστηριότητα:

- Γεωθερμικά συστήματα υψηλής ενθαλπίας (>180 °C) : Τα συστήματα αυτά αφορούν κυρίως γεωλογικές περιοχές πρόσφατης ηφαιστειακής δραστηριότητας και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας . Μερικά μη-ηφαιστειακής δραστηριότητας , είναι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας που αξιολογούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα EGS .
- Γεωθερμικά συστήματα μέσης ενθαλπίας (100-180 °C) : Αυτά κατανέμονται σχεδόν σε όλη τη γη σε βαθιές ιζηματογενείς λεκάνες . σε θερμά πετρώματα κάτω από ιζηματογενείς λεκάνες και σε περιοχές που σχετίζονται έμμεσα με ηφαιστειακή δραστηριότητα ή τεκτονικά ρήγματα και συχνά χρησιμοποιούνται για εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας .
- Γεωθερμικά συστήματα χαμηλής ενθαλπίας (10-100 °C) : Τα συστήματα αυτά συνήθως έχουν μικρή άμεση σχέση με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και

χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές θερμότητας (άμεση χρήση) και γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (θέρμανση ή/και ψύξη) .

Οι τύποι των μονάδων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας των πιο πάνω συστημάτων είναι :

- Μονάδες ξηρού ατμού (Dry steam power plants)
- Μονάδες υγρού ατμού (Flash steam power plants)
- Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary power plants)
- Μονάδες συνδυασμένου κύκλου ή υβριδικού (Combined-cycle or hybrid power plants)
- Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με βάση τη γεωθερμική ενέργεια (Geothermal-based combined heat and power plants ή Combined heat and power plants based on geothermal energy, CHP)
- Μονάδες παραγωγής θερμότητας με βάση τη γεωθερμική ενέργεια (Heating based on geothermal energy ή Geothermal heating systems , HP)
- Μονάδες βελτιωμένων γεωθερμικών συστημάτων (Enhanced Geothermal Systems , EGS)

Η επιτυχής ανάπτυξη και εξάπλωση της γεωθερμικής τεχνολογίας σημαίνει μεγαλύτερη ανάκτηση ενέργειας , διάρκεια ζωής και διάδοση της διαθέσιμης γεωθερμικής ενέργειας , βελτιώνοντας την ισχύ και μειώνοντας τη συντήρηση της μονάδας . Ενώ οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής συμβατικού τύπου (υγρού και ξηρού ατμού και δυαδικού τύπου) και άμεσης χρήσης (θερμότητα , ΓΑΘ) έχουν αναπτυχθεί επικερδώς η ανάπτυξη με εμπορική βιωσιμότητα των μονάδων EGS θα βελτιώσει ακόμη περισσότερο και τις συμβατικές μονάδες . Η γεωθερμική βιομηχανία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συμμετεχόντων και προμηθευτές εξοπλισμού , σχεδιαστές γεωθερμικών μονάδων και εταιρίες γεωτρήσεων . Η παγκόσμια γεωθερμική αγορά υποδιαιρείται σε (IPCC,2009) :

- Συμβατική ανάπτυξη γεωθερμικών πόρων για ηλεκτρική ενέργεια (υδροθερμικοί πόροι)
- Μη συμβατική ανάπτυξη γεωθερμικών πόρων για ηλεκτρική ενέργεια (βελτιωμένα γεωθερμικά συστήματα , EGS ή και θερμά ξηρά πετρώματα , HDR) και

- Ανάπτυξη γεωθερμικών πόρων για θερμική ενέργεια (άμεση χρήση)

Τα κύρια εμπόδια ανάπτυξης των γεωθερμικών μονάδων είναι (IEA , 2010) :

- Το υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου
- Η πιθανή αποτυχία και οι απαιτήσεις σε βάθος των γεωτρήσεων
- Η ανεπαρκής παραγωγικότητα και προσβασιμότητα του ταμιευτήρα
- Οι περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τη γεωθερμική ενέργεια , που σχετίζονται με την τεχνολογία και τις διάφορες επιλογές και τα πλεονεκτήματα τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για την άμεση χρήση
- Η έλλειψη παροχής κινήτρων και η μελλοντική αβεβαιότητα
- Η έλλειψη εκπαιδευμένων γεωθερμικών επιστημόνων και
- Η σωστή αντίληψη για τα περιβαλλοντικά θέματα

Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα των μοντέλων γεωθερμικής ανάπτυξης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (αλλά συχνά και θερμικής παραγωγής) για την αποφυγή των κινδύνων που συνδέονται με τις γεωτρήσεις και την αρχική διερεύνηση της ανάπτυξης της γεωθερμίας . Τα συνήθη μοντέλα γεωθερμικής ανάπτυξης είναι (GEA , 2013) :

- Το κράτος χρηματοδοτεί την αρχική γεωθερμική έρευνα και στη συνέχεια μισθώνει τους εντοπισμένους γεωθερμικούς πόρους σε ιδιώτες ή κρατικούς φορείς για την κατασκευή γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής
- Το κράτος μοιράζεται με ιδιώτες τους κινδύνους της αρχικής γεωθερμικής έρευνας , αναλαμβάνοντας κοινοπραξίες και επιχειρηματικές συμφωνίες για αναζητήσεις γεωθερμικών πόρων
- Το κράτος εκδίδει μακροχρόνιες παραχωρήσεις σε ιδιώτες για ολοκληρωμένη έρευνα των γεωθερμικών πόρων , αλλά και την ανάπτυξη , την κατασκευή και τη λειτουργία γεωθερμικών μονάδων , με αντάλλαγμα ένα σταθερό ποσοστό επί των πωλήσεων και με τη συμφωνία πρόσθετων οικονομικών κινήτρων .

1.2 Παγκόσμιο γεωθερμικό δυναμικό

Η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας γεωγραφικά εστιάζεται κυρίως σε τεκτονικά ενεργές περιοχές , όπως στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών στις ρηξιγενείς ζώνες , στις θερμές κηλίδες , κλπ. Τέτοιες ενεργές περιοχές υψηλής θερμικής

ροής υπάρχουν στο ‘Δαχτυλίδι της φωτιάς (Ring of fire)’ (Ινδονησία , Φιλιππίνες , Ιαπωνία , Νέα Ζηλανδία , Κεντρική Αμερική και τη δυτική ακτή των ΗΠΑ) και στις ρηξιγενείς περιοχές (Ισλανδία και Ανατολική Αφρική) , οι πιο ελπιδοφόρες για γεωθερμική ανάπτυξη στην επόμενη δεκαετία με δυνατότητα εγκατεστημένης ισχύος το 2030 στα 30GW_e (IEA, 2008) .

Περισσότερες από τριάντα χώρες (βρίσκονται κυρίως στην Αφρική, στην Κεντρική και Νότια Αμερική, στον Ειρηνικό και στην Νότιο-Ανατολική Ασία) θα μπορούσαν δυνητικά να αποκτήσουν το 100% της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα συνδυασμό των γεωθερμικών, των υδροηλεκτρικών και των αιολικών μορφών ενέργειας (IPCC, 2009). Η προοπτική της συμβολής των EGS στο τεχνικό και οικονομικό γεωθερμικό δυναμικό πιο προσεκτικά, αναγνωρίζοντας ότι υπάρχει πολύ περιορισμένη εμπειρία λειτουργίας με EGS σε εμπορική κλίμακα, θα είναι ιδιαίτερα απαραίτητη στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων των εκπομπών CO₂. Η GEA (2014a) εκτιμά ότι το 2014 η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτροπαραγωγής ήταν 12GW_e, ενώ περίπου 30GW_e γεωθερμικών πόρων βρίσκονται υπό ανάπτυξη σε όλο τον κόσμο.

1.3 Ροή και κατανομή της θερμικής ενέργειας στη γη

Στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών λόγω των κινήσεων τους εμφανίζονται ο κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες για σεισμική, ηφαιστειακή και γεωθερμική δραστηριότητα. Οι περιοχές γεωθερμικών πόρων βρίσκονται κυρίως σε αυτά τα σημεία της γης με έντονη νεοτεκτονική και ηφαιστειακή δραστηριότητα.

Γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που μπορεί να εξαχθεί από το εσωτερικό της γης. Αυτή η θερμότητα κάτω από την επιφάνεια της γης εμφανίζεται σε δύο μορφές :

- Τη δυναμική ενέργεια, ως η συνεχής ροή θερμικής ενέργειας από το μανδύα προς την επιφάνεια της γης και
- Τη στατική ενέργεια, ως η αποθηκευμένη θερμότητα στο φλοιό της γης.

Η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας βασίζεται τόσο στη θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο φλοιό όσο και στην τρέχουσα ενέργεια που προκαλεί τη ψύξη της γης. Η ψύξη της γης ή η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας προς την επιφάνεια της λαμβάνει χώρα δια μέσου τριών διαδικασιών στο φλοιό :

- Τη θερμική αγωγιμότητα

- Τη ροή του γεωθερμικού ρευστού και
- Τη ροή του μάγματος στο φλοιό της γης, που συχνά σχετίζεται με τις ηφαιστειακές εκρήξεις.

Οι απώλειες θερμότητας είναι υψηλότερες στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, που οφείλεται στην ύπαρξη και των τριών διαδικασιών μεταφοράς ενέργειας και στο μικρότερο πάχος του φλοιού, ενώ είναι χαμηλότερες στο εσωτερικό των λιθοσφαιρικών πλακών, αφού η θερμική αγωγιμότητα είναι σχεδόν αποκλειστικά υπεύθυνη για τη μεταφορά της ενέργειας από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της γης. Οι λιθοσφαιρικές πλάκες καλύπτουν περίπου το 85% της επιφάνειας της γης, ενώ το 15% της επιφάνειας καλύπτουν τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Όταν τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών είναι πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, οι πιο προφανείς εκδηλώσεις της μεταφοράς θερμικής ενέργειας είναι τα ενεργά ηφαίστεια και τα γεωθερμικά πεδία υψηλών θερμοκρασιών. Η μέση ροή μάγματος από τα ηφαίστεια παγκοσμίως εκτιμάται σε 15-25 $10^6 \text{Km}^3/\text{εκατομμύριο έτη}$. Το υπόλοιπο της παγκόσμιας ροής θερμότητας (απώλεια) οφείλεται στις υδροθερμικές κυκλοφορίες στη χερσαία μάζα της γης, προσδίνοντας σημαντικά στοιχεία για τη θεωρητική εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού της γης.

Κατά το EPRI (Electric Power Research Institute, 1978) η συνολική αποθηκευμένη θερμική ενέργεια που περιέχεται στη γη από την επιφάνεια (15°C) και μέχρι βάθους 3km κάτω από τις ηπείρους εκτιμάται στα 42.670.000EJ. Οι ήπειροι καταλαμβάνουν περίπου το 30% της επιφάνειας της γης και η ροή θερμότητας δια μέσου των ηπείρων είναι χαμηλότερη (65mW/m^2) σε σχέση με τον πυθμένα των ωκεανών (101mW/m^2). Με βάση αυτά η τρέχουσα ροή θερμικής ενέργειας στις ηπείρους εκτιμάται στα 10TW, που για να αποθηκευτούν τα 42.10⁶EJ απαιτούνται 140.000 έτη. Η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια (στατική) στα πετρώματα είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη συνεχή ροή θερμικής ενέργειας (δυναμική), επομένως θα απαιτηθεί πολύς χρόνος για να αντικατασταθεί η θερμική ενέργεια στη γη (3km) δια μέσου της θερμικής αγωγιμότητας. Αντίθετα στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών η διαδικασία μεταφοράς της θερμικής ενέργειας είναι γρηγορότερη αντικαθιστώντας την αντλούμενη γεωθερμική ενέργεια από τους ταμιευτήρες ταχύτερα.

Κατά τα τελευταία 10.000 χρόνια, 1511 ηφαίστεια έχουν δραστηριοποιηθεί στον κόσμο, από τα οποία τα 189 ηφαίστεια δεν είναι προσβάσιμα διότι βρίσκονται στο βυθό της θάλασσας ή στις αρκτικές περιοχές. Ως εκ τούτου, ο αριθμός 1322 θα μπορούσε να είναι πιο κατάλληλος ως βάση για την εκτίμηση του παγκοσμίου γεωθερμικού δυναμικού

ηλεκτροπαραγωγής, που υπολογίστηκε στα 209GW_e με ένα στατιστικό σφάλμα 27GW_e. Το γεωθερμικό δυναμικό που εκτιμάται παραπάνω αναφέρεται σε πόρους κατάλληλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στις περισσότερες περιπτώσεις σημαίνει την εξόρυξη του γεωθερμικού ρευστού με θερμοκρασία άνω των 130 °C. Επιπλέον, είναι προφανές ότι αυτή η εκτίμηση ισχύει μόνο για τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών της γης.

Τα γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία κάτω των 130 °C καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας γεωθερμικής ενέργειας, που η εκτίμηση τους γίνεται χρησιμοποιώντας την κατανομή της συχνότητας των γεωθερμικών πόρων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Εκτιμάται ότι το 32% της παγκόσμιας συνολικής γεωθερμικής ενέργειας αναφέρεται σε θερμοκρασίες άνω των 130 °C (ηλεκτρική ενέργεια) και το υπόλοιπο 68% σε θερμοκρασίες χαμηλότερες (θερμική ενέργεια). Με βάση αυτές τις προϋποθέσεις το παγκόσμιο γεωθερμικό δυναμικό για θερμοκρασίες κάτω των 130 °C προσεγγίστηκε στα 4.400GW_{th}, που είναι ισοδύναμο με 139EJ/ετησίως .

1.4 Θεωρητικό, τεχνικό και οικονομικό γεωθερμικό δυναμικό της γης

Το δυναμικό των γεωθερμικών πόρων ταξινομείται σε :

- Θεωρητικό δυναμικό : Είναι το δυναμικό των γεωθερμικών πόρων που αντιστοιχεί στην αποθηκευμένη θερμική ενέργεια στο φλοιό της γης.
- Τεχνικό δυναμικό : Είναι το δυναμικό των γεωθερμικών πόρων που αντιστοιχεί σε κλάσμα του θεωρητικού δυναμικού (αποθηκευμένη θερμική ενέργεια του φλοιού της γης) και είναι προσβάσιμο και εξαγωγίμο για χρήση με την υπάρχουσα τεχνολογία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το οικονομικό κριτήριο (κόστος).
- Το οικονομικό δυναμικό : Είναι το δυναμικό των γεωθερμικών πόρων (γεωθερμικά αποθέματα) που αντιστοιχεί σε κλάσμα του τεχνικού δυναμικού, που είναι προσβάσιμο και εξαγωγίμο για χρήση με την υπάρχουσα τεχνολογία με οικονομικούς όρους (σύγκριση κόστους και με τις άλλες μορφές ενέργειας).
- Η εκτίμηση του θεωρητικού, τεχνικού και οικονομικού γεωθερμικού δυναμικού των γεωθερμικών πόρων θεωρεί ότι μπορεί να καλύψει την παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 3% μέχρι το 2050 και σε ποσοστό 10% μέχρι το 2100, ενώ για θέρμανση και ψύξη σε 5% μέχρι το 2050 και σε 10% μέχρι το 2100.

Θεωρητικό γεωθερμικό δυναμικό (Theoretical potential)

Το θεωρητικό θερμικό δυναμικό είναι το δυναμικό που αντιστοιχεί που αντιστοιχεί στην αποθηκευμένη ενέργεια στο φλοιό της γης, όπου το θεωρητικό γεωθερμικό δυναμικό εκτιμάται στα 42.10^6 EJ κατά το EPRI (1978) και αντιστοιχεί στη συνολική αποθηκευμένη θερμική ενέργεια που περιέχεται στη γη από την επιφάνεια (15°C) μέχρι βάθους 3km κάτω από τις ηπείρους.

Τεχνικό γεωθερμικό δυναμικό (Technical potential)

Το τεχνικό θερμικό δυναμικό είναι το δυναμικό των γεωθερμικών πόρων (διαθέσιμη γήινη θερμότητα) που αντιστοιχεί σε κλάσμα του θεωρητικού δυναμικού, που είναι προσβάσιμο και εξαγωγίμο για χρήση κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών με την τρέχουσα ή την μελλοντική τεχνολογία. Ενδεικτικά το μέσο τεχνικό γεωθερμικό δυναμικό της γης σε βάθος μέχρι 3km για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ είναι 1.200GW_e , που αντιστοιχεί σε ηλεκτροπαραγωγή στα 660EJ/ετησίως και για την παραγωγή θερμικής ενέργειας (άμεση χρήση) σε θερμική ισχύ είναι 5.000GW_{th} , που αντιστοιχεί σε παραγωγή θερμικής ενέργειας στα 61EJ/ετησίως.

Σύμφωνα με την αποτελεσματική απόδοση μετατροπής της θερμότητας των γεωθερμικών πόρων σε ηλεκτρική ενέργεια για διάφορες κατηγορίες θερμοκρασιών (10% για $120-180^{\circ}\text{C}$, 20% για $180-300^{\circ}\text{C}$, 5% για EGS, κλπ) η ισοδύναμη θερμότητα που αντιστοιχεί στο τεχνικό δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής των 1200GW_e είναι περίπου 660EJ/έτος. Ο Stefansson V. (2005) έχει αξιολογήσει το τεχνικό δυναμικό παραγωγής θερμικής ενέργειας (άμεση χρήση) σε 61EJ/έτος, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή των γεωθερμικών πόρων σε διαφορετικά καθεστάτα θερμοκρασίας (με συντελεστή ικανότητας 40%) που αντιστοιχεί σε θερμική ισχύ 5.000GW_{th} . Επομένως το συνολικό τεχνικό δυναμικό (ηλεκτρικό και θερμικό) ανέρχεται περίπου σε 720EJ/έτος και είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με τη φυσική θερμότητα επαναφόρτισης των γεωθερμικών πόρων.

Με βάση μια στατιστική ανάλυση κατά τους Goldstein B. A. Et al. (2010) το ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό της θερμικής ανάκτησης της αποθηκευμένης γεωθερμικής ενέργειας σε βάθη 5km και 10km κυμαίνεται στα 0,5% και 20% αντίστοιχα. Με βάση την εκτίμηση αυτή η παγκόσμια τεχνικά ανακτήσιμη γεωθερμική ενέργεια είναι της τάξης των 9×10^6 EJ έως 5Km και 27×10^6 EJ έως 10km. Επίσης το τεχνικό γεωθερμικό δυναμικό για

ηλεκτροπαραγωγή εκτιμάται στα 118EJ/ετησίως για βάθη μέχρι 3km και 1.109EJ/ετησίως για βάθη μέχρι 10km, ενώ για άμεση χρήση στα 10EJ/ετησίως και 312EJ/ετησίως αντίστοιχα με μέσο όρο ροής της γήινης θερμότητας 312EJ/ετησίως στα 65mW/m².

Οικονομικό γεωθερμικό δυναμικό (Economic potential)

Το οικονομικό γεωθερμικό δυναμικό είναι ένα τμήμα του τεχνικού δυναμικού των γεωθερμικών πόρων που μπορεί να εξαχθεί ανταγωνιστικά σε σχέση με την παγκόσμια αγορά ενέργειας. Αναφέρεται σε γνωστές γεωθερμικές περιοχές με βάση τις γεωτρητικές, τις γεωφυσικές, τις γεωχημικές και τις γεωλογικές αποδείξεις.

Κατά το IPCC οι ρεαλιστικές οικονομικές δυνατότητες της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας (έως το 2050) από τους προσδιορισμένους γεωθερμικούς ταμιευτήρες εκτιμάται ότι κυμαίνονται μεταξύ ενός ελάχιστου 35GW_e και ενός μέγιστου 160GW_e με ένα μέσο όρο 70GW_e, ανάλογα με τις παραδοχές σχετικά με τη βελτίωση της τεχνολογίας, με τα κίνητρα ανάπτυξης ή με τους περιορισμούς που μπορεί να είναι σε ισχύ για τα επόμενα 40 χρόνια. Το ρεαλιστικό οικονομικά ανακτήσιμο δυναμικό της γεωθερμικής θερμικής ενέργειας για άμεσες χρήσεις (έως το 2050) από τους προσδιορισμένους γεωθερμικούς ταμιευτήρες εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ ενός ελάχιστου 265GW_e και ενός μέγιστου 815GW_{th} με ένα μέσο όρο 440GW_{th}, όπου η κυριαρχία των ΓΑΘ (GHP) μπορεί να φθάσει μέχρι και το 90%. Αν επιτευχθεί ο στόχος των 140GW_e για το έτος 2050 μπορεί να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ κατά 1.000 εκατομμύρια ton ετησίως.

Επίσης το οικονομικά ανακτήσιμο δυναμικό της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας για το 2100 εκτιμάται στα 800GW_e καλύπτοντας το 8,3% της απαιτούμενης παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας, που εξυπηρετεί το 17% του παγκόσμιου πληθυσμού, ενώ 40 χώρες μπορούν να καλύψουν 100% τις ενεργειακές τους ανάγκες από τη γεωθερμία.

1.5 Ταξινόμηση των γεωθερμικών αποθεμάτων



Σχήμα 1.2 Γεωθερμικοί πόροι [34]

Γεωθερμική πόροι (geothermal resources) είναι οι πόροι από όπου θερμική ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί οικονομικά και με νόμιμο τρόπο κάποια στιγμή στο λογικό μέλλον. Γεωθερμικά αποθέματα ορίζονται ως οι ποσότητες της θερμικής ενέργειας που αναμένεται να ανακτηθούν από γνωστούς ταμειυτήρες από μια συγκεκριμένη ημερομηνία προς τα εμπρός.

Τρεις κατηγορίες έχουν προταθεί για την ταξινόμηση των γεωθερμικών αποθεμάτων ενός γεωθερμικού πόρου :

- Τα αποδεδειγμένα ή επιβεβαιωμένα (proven reserves)
- Τα πιθανά (probable reserves)
- Τα ενδεχόμενα η τεκμαιρόμενα ή δυνατά (possible ή inferred reserves)

Εκφράζονται σε Kwh ή σε βαρέλια ισοδύναμου πετρελαίου, ενώ σε MW_e εκφράζονται μόνο όταν πρόκειται για σταθμό ηλεκτροπαραγωγής για ένα χρονικό διάστημα. Η πιο πάνω ταξινόμηση των αποθεμάτων γίνεται σύμφωνα με το SPE, όπου το ποσοστό πιθανότητας ύπαρξης για :

- Τα αποδεδειγμένα είναι 90%

- Τα αποδεδειγμένα + τα πιθανά είναι 50%
- Τα αποδεδειγμένα + τα πιθανά + τα ενδεχόμενα είναι 10%

Αποδεδειγμένα ή επιβεβαιωμένα αποθέματα : Ορίζονται ως το οικονομικά ανακτήσιμο τμήμα ενός μετρημένου γεωθερμικού πόρου. Συγκεκριμένα τα αποδεδειγμένα αποθέματα είναι η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μπορεί να εκτιμηθεί με βεβαιότητα με βάση τα δεδομένα της γεωεπιστήμης και της μηχανικής, ώστε να είναι εμπορικά ανακτήσιμα κατά το παρόν και το μέλλον, από γνωστούς ταμιευτήρες υπό τις τρέχουσες οικονομικές συνθήκες και τις μεθόδους λειτουργίας και με νόμιμο τρόπο.

Πιθανά αποθέματα : Είναι μη αποδεδειγμένα αποθέματα, που το πιο πιθανό είναι να ανακτηθούν, αλλά είναι λιγότερο αξιόπιστα από τα αποδεδειγμένα αποθέματα, όμως με επαρκείς δείκτες για τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα από κοντινές γεωτρήσεις ή από τα γεωθερμόμετρα των επιφανειακών εκδηλώσεων για το χαρακτηρισμό της θερμοκρασίας και του χημισμού τους και συμπληρώνονται με γεωφυσικά, γεωχημικά και γεωλογικά αποδεικτικά στοιχεία. Διαφέρουν από τα αποδεδειγμένα αποθέματα λόγω της μεγαλύτερης αβεβαιότητας, που συνήθως αφορά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανακτησιμότητα της θερμικής ενέργειας και τη μακροβιότητα του έργου, ενώ τα οικονομικά κριτήρια αξιοποίησης σε κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα είναι θετικά.

Ενδεχόμενα ή τεκμαιρόμενα αποθέματα : Έχουν αδιευκρίνιστες πιθανότητες ανάκτησης σε σχέση με τα πιθανά αποθέματα, αλλά διαθέτουν μια καλή βάση δεδομένων από την επιφανειακή έρευνα, όπως θερμές πηγές, φουμαρόλες, γεωφυσικά, γεωλογικά, γεωχημικά, κλπ, για τη δυνατότητα ύπαρξης ενός γεωθερμικού ταμιευτήρα αλλά δεν επαληθεύεται ως προς την έκταση ή την ικανότητα να παραδώσει γεωθερμική ενέργεια. Όμως από τα ενδεχόμενα ή τεκμαιρόμενα αποθέματα προς τη μετάβαση στα πιθανά αποθέματα υπάρχει μια αυξανόμενη γεωεπιστημονική και οικονομική αβεβαιότητα. Είναι ως επί το πλείστον σε περιοχές με προοπτική, όπου υπάρχουν αξιόλογες επιφανειακές θερμικές εκδηλώσεις και με μεσαία έως υψηλή εκτιμώμενη θερμοκρασία του ταμιευτήρα.

1.6 Ογκομετρική μέθοδος υπολογισμού του γεωθερμικού δυναμικού

Κατά την αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων εκτιμάται η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί από ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα και να χρησιμοποιηθεί οικονομικά για μια χρονική περίοδο, συνήθως αρκετές δεκαετίες. Η αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων είναι μια διαδικασία αποτίμησης των επιφανειακών δεδομένων κατά την άντληση και των δεδομένων εντός της γεώτρησης καθώς και η ενσωμάτωση με άλλες γεωεπιστημονικές πληροφορίες που λαμβάνονται από γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωχημικές μετρήσεις. Στόχος της γεωθερμικής αξιολόγησης είναι η επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός γεωθερμικού πόρου, που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί με ορισμένη παραγωγική ικανότητα με καθορισμένα τα χαρακτηριστικά των ρευστών και τη στρατηγική διαχείρισής τους για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας της παραγωγής για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων χρησιμεύει ως μηχανισμός για να εξακριβωθεί αν το έργο μπορεί να πραγματοποιηθεί από τεχνικής και οικονομικής άποψης. Η ακρίβεια των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση των γεωθερμικών αποθεμάτων εξαρτάται από τον τύπο, την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων της γεωεπιστήμης και της μηχανικής, τα οποία επίσης εξαρτώνται από το στάδιο ανάπτυξης και ωριμότητας ενός συγκεκριμένου γεωθερμικού πεδίου. Γενικά, η ακρίβεια των δεδομένων αυξάνεται καθώς νέες γεωτρήσεις εκτελούνται και περισσότερα δεδομένα παραγωγής γίνονται διαθέσιμα.

Η εκτίμηση των γεωθερμικών πόρων μιας περιοχής γίνεται σε δύο φάσεις, η πρώτη φάση εφαρμόζεται κατά το πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης του πεδίου για να δικαιολογήσει την εκτέλεση γεωτρήσεων και την εκτίμηση ενός συγκεκριμένου μεγέθους μονάδας συνήθως με την ογκομετρική μέθοδο, ενώ η δεύτερη φάση εφαρμόζεται όταν υπάρχουν σημαντικός αριθμός γεωτρήσεων και δεδομένα παραγωγής για να θεωρηθεί αξιόπιστη με τη μέθοδο αριθμητικής μοντελοποίησης (numerical modelling) :

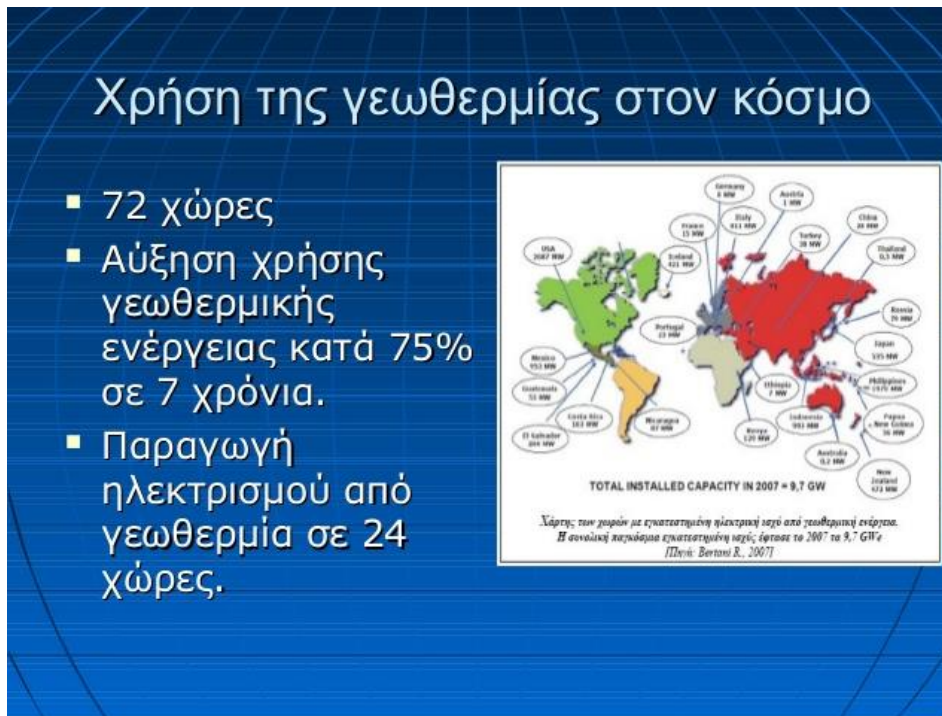
- Αρχική εκτίμηση των γεωθερμικών πόρων : Στο πρώτο στάδιο της γεωθερμικής ανάπτυξης ενός ταμιευτήρα, όταν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα, χρησιμοποιούνται σχετικά απλές μέθοδοι για την αξιολόγηση του. Μια πρώτη αξιολόγηση των γεωθερμικών πόρων γίνεται κατά τη διάρκεια της αναγνωριστικής και διερευνητικής φάσης πριν από την εκτέλεση γεωτρήσεων. Μια πρώτη προσέγγιση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα γίνεται με τη μέθοδο των

γεωθερμομέτρων, που στηρίζεται στην ύπαρξη ορυκτών των οποίων η παρουσία συνδέεται με τις υψηλές θερμοκρασίες των γεωθερμικών πόρων. Κατά την εκτέλεση της διάτρησης μιας γεώτρησης διάφορα ορυκτά χρησιμοποιούνται ως δείκτες για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας στο βάθος. Μετά την αξιολόγηση των επιφανειακών δεδομένων ακολουθεί το ερευνητικό γεωτρητικό πρόγραμμα με μια πρώτη βαθιά ερευνητική γεώτρηση, που στοχεύει στον εντοπισμό της κύριας ζώνης του γεωθερμικού πόρου και ακολουθούν άλλες δύο γεωτρήσεις για την πλευρική επέκταση του ταμιευτήρα. Με την επιβεβαίωση της ύπαρξης ενός γεωθερμικού συστήματος μετά την προκαταρκτική γεώτρηση ακολουθεί η αρχική αξιολόγηση των πόρων με την ογκομετρική μέθοδο.

- Τελική εκτίμηση των γεωθερμικών πόρων : Όμως στην πορεία της ανάπτυξης του ταμιευτήρα με την προσθήκη περισσότερων δεδομένων εξελιγμένα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης του (geothermal simulation models) χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της παραγωγικής ικανότητας του συγκεκριμένου γεωθερμικού ταμιευτήρα. Η έκταση και το πάχος του ταμιευτήρα εκτιμάται από τις παραμέτρους που λαμβάνονται κατά τη διάτρηση των γεωτρήσεων και τις μετρήσεις σε αυτές. Η έκταση των γεωθερμικών πόρων προσεγγίζεται με βάση τις καμπύλες θερμοκρασιών και τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ κατά τη διάτρηση των γεωτρήσεων ενδείξεις της διαπερατότητας και της θερμοκρασίας μετρούνται απευθείας από τις γεωτρήσεις.

Η ογκομετρική μέθοδος υπολογισμού (geothermal volumetric method) υπολογίζει την ποσότητα της θερμότητας που περιέχεται σε ένα δεδομένου όγκου ταμιευτήρα (πετρώματα + ρευστά) και καθορίζει την απόδοση ισχύος της μονάδας με βάση το ποσό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με οικονομικό και νόμιμο τρόπο για ένα σταθερό χρονικό διάστημα με την παραδοχή των συντελεστών θερμικής ανάκτησης και ικανότητας μετατροπής, αλλά και της τελικής θερμοκρασίας αναφοράς μετά την εκμετάλλευση. Το πάχος η έκταση και το πορώδες του ταμιευτήρα είναι μερικές από τις μεταβλητές παραμέτρους που μπορούν να συμβάλλουν στην υπερεκτίμηση της θερμικής ενέργειάς του.

1.7 Παγκόσμια παραγωγή και εφαρμογές γεωθερμικής ενέργειας



Σχήμα 1.3 Χρήση της γεωθερμίας ανά τον κόσμο [34]

Σε περιφερειακό επίπεδο οι χώρες με δυνατότητες ανάπτυξης συμβατικών γεωθερμικών πόρων παρουσιάζουν μια μεταβλητότητα. Οι εκτιμήσεις των υπαρχόντων γεωθερμικών πόρων διεθνώς υπολογίζονται :

- Στην Ανατολική Αφρική 10.000-20.000MW με μόνη σημερινή αξιοποίηση 200MW στην Κένυα.
- Στην Ανατολική Ασία η Ινδονησία, οι Φιλιππίνες και η Ιαπωνία κυριαρχούν στον παγκόσμιο γεωθερμικό χάρτη, όπου η Ινδονησία είναι από τις μεγαλύτερες χώρες γεωθερμικών υπερβαίνοντας τα 27.500MW.
- Στην Κεντρική Αμερική στην πλειοψηφία των χωρών έχουν εντοπιστεί ήδη 50 περιοχές με δυνατότητα παραγωγής 3.000-13.000MW. Στο Ελ Σαλβαδόρ η εγκατεστημένη ισχύς είναι 204MW καλύπτοντας το 24% των αναγκών του, ενώ στην Κόστα Ρίκα είναι 208MW καλύπτοντας το 15% των αναγκών του.
- Στην Ευρώπη η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς το 2011 ήταν 1.600MW, όπου η Ιταλία κατέχει το 50% και η Ισλανδία το 25%. Στην

Ισλανδία το 90% των αναγκών για θέρμανση χώρων καλύπτεται από τη γεωθερμία. Στις χώρες της Ε.Ε. υπάρχουν 109 νέες μονάδες υπό μελέτη.

Η θερμότητα της γεωθερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται με δυο τρόπους για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια και χωρίς μετατροπή ως θερμική ενέργεια. Η σταδιακή εισαγωγή των νέων τεχνολογικών βελτιώσεων αναμένεται να ενισχύσουν το ρυθμό ανάπτυξης της ηλεκτροπαραγωγής εκθετικά τα επόμενα έτη, όπως οι μονάδες δυαδικού τύπου EGS εισέρχονται στη φάση επίδειξης για να αποδειχθεί η εμπορική βιωσιμότητά τους. Η εμπορική προσθήκη της νέας τεχνολογίας των EGS με δυνατότητα γεωγραφικής διεύρυνσης της γεωθερμίας μπορεί να αυξήσει ακόμη περισσότερο την εγκατεστημένη ισχύ το 2030.

1.7.1 Παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς και προβλέψεις

Αρκετές από τις αναπτυσσόμενες χώρες εντάσσονται στις πρώτες 15 κορυφαίες χώρες αξιοποίησης της γεωθερμίας, αλλά υπάρχουν και άλλες αναπτυσσόμενες με πολλούς ανεκμετάλλετους γεωθερμικούς πόρους, όπως το Περού και η Χιλή.

Την 5ετία 2000-2005 για παραγωγή γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος ήταν 200MWe/ετησίως, ενώ την 5ετία 2005-2010 ήταν 350MWe/ετησίως. Η GEA εκτιμά ότι η διεθνής αγορά γεωθερμικής ενέργειας αυξάνεται με σταθερό ετήσιο ρυθμό από 4% έως 5%. Σχεδόν 700 γεωθερμικά έργα βρίσκονται σε εξέλιξη σε 76 χώρες.

Πολλές χώρες προβλέποντας τις απειλές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή συνειδητοποιούν τις αξίες της γεωθερμικής ενέργειας ως βασικού φορτίου και μερικές φορές ως ευέλικτης πηγής ανανεώσιμης ενέργειας. Οι χώρες αυτές βρίσκονται σε κάθε ήπειρο και κυμαίνονται από μικρά νησιωτικά έθνη μέχρι μεγάλες ανεπτυγμένες οικονομίες, όπως η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες. Σύμφωνα με την GEA το 2014 η παγκόσμια εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς ήταν 12.000MWe (<1% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής) με πρόβλεψη για το 2017 τα 13.450MWe με βάση τα υπό κατασκευή έργα, ενώ περίπου 30.000MWe γεωθερμικών πόρων βρίσκονται υπό ανάπτυξη σε όλο τον κόσμο. Οι γεωθερμικοί πόροι εκτιμάται ότι ενδεχομένως να υποστηρίξουν μεταξύ

35.000MWe – 72.000MWe της παγκόσμιας ικανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη τεχνολογία.

Η GEA (2012) προσδιόρισε την παγκόσμια παραγωγή γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας τις αρχές του 2012 σε 11.224MWe σε 24 χώρες του κόσμου. Ο αριθμός των χωρών με έργα υπό κατασκευή ή υπό μελέτη αυξήθηκε κατά 52% (από 46 χώρες σε 70) μέσα σε τρία έτη (2008-2010). Κατά την GEA (2013) ο ηγέτης των υπό κατασκευή γεωθερμικών μονάδων είναι η Ινδονησία με 425MWe και ακολουθούν η Κένυα με 296MWe, η Ισλανδία με 260MWe, οι ΗΠΑ με 178MWe, η Νέα Ζηλανδία με 166MWe, οι Φιλιππίνες με 110MWe, κλπ. Επίσης η Γερμανία έχει 8 νέες μονάδες υπό κατασκευή συνολικής ισχύος 47MWe.

Η παγκόσμια γεωθερμική αγορά αν και γνώρισε περιορισμένη ανάπτυξη τα τελευταία έτη, η επανεμφάνιση του προβλήματος των εκπομπών του CO₂ κυρίως αλλά και οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις δημιουργούν μια δυναμική επανεκκίνησής της. Περισσότερες από 30 εταιρείες στον κόσμο έχουν ένα μερίδιο ιδιοκτησίας σε τουλάχιστον ένα γεωθερμικό έργο. Συνολικά 20 ιδιοκτήτες ελέγχουν περίπου το 90% του συνόλου της παγκόσμιας αγοράς εγκατεστημένης γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια ταξινόμηση των τύπων των μονάδων γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής με βάση το μέσο μέγεθος ισχύος ανά μονάδα είναι :

- Μικρό μέγεθος 5MWe/μονάδα : Δυαδικού τύπου και τύπου απευθείας εκτόνωσης (Binary & Back pressure power plant)
- Μεσαίο μέγεθος 30MWe/μονάδα : Απλού και διπλού τύπου υγρού ατμού (Single & Double flash steam power plant)
- Μεγάλο μέγεθος 45MWe/μονάδα : Τύπου ξηρού ατμού (Dry steam power plant)

1.7.2 Παγκόσμια εγκατεστημένη θερμική ισχύς, προβλέψεις και εφαρμογές

Η γεωθερμική ενέργεια για άμεση χρήση είναι σήμερα εμπορικά ανταγωνιστική. Στο μέλλον αναμένεται μια σχετική αύξηση λόγω της οικονομικής εξάρτησης της από την απόσταση της γεωθερμικής πηγής με την περιοχή εφαρμογών. Η ανάπτυξη της άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας εμφανίζει αργούς ρυθμούς, αφού τα ορυκτά καύσιμα

είναι ένας σημαντικός ανταγωνιστής ‘ρουτίνας’ και οι αρχικές επενδυτικές δαπάνες είναι υψηλές. Όμως η γεωθερμική γεωγραφική διεύρυνση τελευταία με την ανάπτυξη γεωθερμικών πηγών χαμηλών θερμοκρασιών για συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες δυαδικού τύπου ευνοεί την ανάπτυξη και την καθετοποίηση των θερμικών χρήσεων στις αναπτυσσόμενες χώρες και όχι μόνο. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς της γεωθερμικής ενέργειας ως θερμικής υπερβαίνει κατά πολύ την αντίστοιχη της ως ηλεκτρικής.

Πάνω από 70 χώρες δραστηριοποιούνται στις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας, που περιλαμβάνουν γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, πισίνες και λουτροθεραπεία, θέρμανση χώρων, θερμοκήπια και θέρμανση εδάφους, βιομηχανικές χρήσεις, υδατοκαλλιέργεια, τήξη χιονιού, ξήρανση αγροτικών προϊόντων και διάφορες χρήσεις. Ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία έτη γνωρίζουν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας για θέρμανση και ψύξη κτιρίων. Όλες αυτές οι άμεσες χρήσεις λαμβάνουν χώρα σε τοπικό επίπεδο, όμως είναι εφικτή η μεταφορά ατμού περίπου μέχρι 2Km και ζεστού νερού ίσως και μέχρι 20km, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια από την άλλη πλευρά μπορεί να μεταφερθεί σε μακρινές αποστάσεις. Οι άμεσες χρήσεις που κυριαρχούν είναι στην Ιαπωνία η λουτροθεραπεία, στην Ισλανδία η τηλεθέρμανση και στην Κίνα η ιχθυοκαλλιέργεια.

Μια σημαντική ‘εμπορική’ παράμετρος των εφαρμογών άμεσης χρήσης είναι ο συντελεστής ικανότητας CF. Είναι ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου προς το ποσό της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου προς το ποσό της ενέργειας που θα παραγόταν την ίδια περίοδο σε πλήρη δυναμικότητα της μονάδας.

Οι μη ηλεκτρικές χρήσεις δεν είναι εύκολο να στατικοποιηθούν και να ταξινομηθούν, λόγω των πολλών και ποικίλων χρήσεων και των συνεχών μεταβολών στις θερμοκρασίες απόρριψης.

Στον παρακάτω πίνακα για την δεκαετία 1995-2010 για άμεσες χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας έχουμε τα εξής στοιχεία.

Έτος	Ισχύς (MWth)	Παραγωγή (TJ/έτος)	Συντελεστής ικανότητας
1995	8.644	112.441	0,41
2000	15.145	190.699	0,40
2005	28.269	273.372	0,31
2010	50.583	438.071	0,27

Πίνακας 1.1 Χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για το διάστημα 1995-2010 [31]

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, η ετήσια παραγωγή ενέργειας και ο συντελεστής ικανότητας τις αρχές του 2010 για άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας σε διάφορες εφαρμογές.

Εφαρμογές	Ισχύς (MWth)	Παραγωγή (TJ/έτος)	Συντελεστής ικανότητας
ΓΑΘ	35.236	214.782	0,19
Λουτροθεραπεία και πισίνες	6.689	109.032	0,52
Θέρμανση χώρων	5.391	62.984	0,37
Θερμοκήπια	1.544	23.264	0,48
Βιομηχανικές χρήσεις	533	11.746	0,70
Υδατοκαλλιέργεια	653	11.521	0,56
Τήξη χιονιού και ψύξη	368	2.126	0,18

Πίνακας 1.2 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς και εφαρμογές [31]

Με βάση τα στοιχεία αυτά στις εφαρμογές της άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας ως προς την εγκατεστημένη ισχύ κυριαρχούν οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας σε ποσοστό 70%, ενώ ακολουθούν οι ιαματικές χρήσεις σε 13% και η θέρμανση χώρων σε 11%

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι 10 πρώτες χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς (MWth) για άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας το 2010, αντιπροσωπεύοντας το 80% παγκοσμίως, με πρώτη τις ΗΠΑ και ακολουθούν Κίνα,

Σουηδία, Νορβηγία, Γερμανία, κλπ. Επίσης οι 10 αυτές χώρες αντιπροσωπεύουν το 75% παγκοσμίως της ετήσιας παραγωγής ενέργειας (GWh/έτος) με πρώτη την Κίνα και ακολουθούν ΗΠΑ, Σουηδία, Τουρκία, Ιαπωνία, κλπ. Οι μεγαλύτερες αυξητικές τάσεις για άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας εμφανίζονται ιδιαίτερα στις βόρειες Ευρωπαϊκές χώρες και οφείλονται αποκλειστικά στη ραγδαία αύξηση των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

α/α	Χώρες	Ισχύς (MWth)	Παραγωγή (GWh/έτος)	Συντελεστής ικανότητας
1	ΗΠΑ	12.611	15.710	0,14
2	Κίνα	8.898	20.932	0,27
3	Σουηδία	4.460	12.585	0,32
4	Νορβηγία	3.300	7.000	0,24
5	Γερμανία	2.485	3.546	0,16
6	Ιαπωνία	2.099	7.139	0,39
7	Τουρκία	2.084	10.247	0,56
8	Ισλανδία	1.826	6.768	0,42
9	Ολλανδία	1.410	2.972	0,24
10	Γαλλία	1.345	3.592	0,30

Πίνακας 1.3 Εγκατεστημένη ισχύς [31]

Η κατανομή ανά είδος εφαρμογής της άμεσης θερμικής αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας τις αρχές του 2010 είναι :

- Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (geothermal heat pumps, GHP ή ΓΑΘ) : Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ) είναι σήμερα η ταχύτερα μακροπρόθεσμα αναπτυσσομένη εφαρμογή άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας σε σχέση με τις άλλες μορφές της. Σύμφωνα με τους Lund J. W. et al. (2010) το 2010 στις εφαρμογές της άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας κυριαρχούν, αφού η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς τους ανήλθε σε 35.236MWth (70% του συνόλου της άμεσης χρήσης 50.583MWth), ενώ η ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας (κατανάλωση) ανήλθε σε 214.872TJ/έτος (49% του

συνόλου της άμεσης χρήσης 438.071TJ/έτος) μειωμένη λόγω του μικρότερου συντελεστή ικανότητας.

- Θέρμανση χώρου (space heating) : Για τη θέρμανση χώρου με γεωθερμική ενέργεια το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε 5.391MWth (10,7% του συνόλου της άμεσης χρήσης) με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 62.984TJ/έτος (14,4% του συνόλου της άμεσης χρήσης) και μέσο συντελεστή ικανότητας 0,37. Η αύξηση κατά τη 15ετία 1995-2010 της εγκατεστημένης ισχύος (85%), αλλά και της ετήσιας θερμικής παραγωγής (84%) αντιστοιχεί στην τηλεθέρμανση (district heating). Η θέρμανση χώρων και η ζήτηση ζεστού νερού καλύπτουν ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών των χωρών. Στις βιομηχανικές χώρες το 35-40% της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται στα κτιριακά συγκροτήματα, όπου στην Ευρώπη το 30% της καταναλισκόμενης ενέργειας αφορά τη θέρμανση και τη χρήση ζεστού νερού στα κτήρια και είναι το 75% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου.
- Θέρμανση θερμοκηπίων (greenhouses heating) : Για τη θέρμανση θερμοκηπίων και για την καλυμμένη υπεδάφια θέρμανση αγροτικών προϊόντων με γεωθερμική ενέργεια το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε 1.544MWth (3,1% του συνόλου της άμεσης χρήσης) με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 23.364TJ/έτος (5,3% του συνόλου της άμεσης χρήσης) και με μέσο συντελεστή ικανότητας 0,48. Η αύξηση κατά τη 15ετία 1995-2010 της εγκατεστημένης ισχύος ήταν περίπου 42%. Τουλάχιστον 34 χώρες δραστηριοποιούνται στον τομέα της γεωθερμικής θέρμανσης θερμοκηπίων με πρωταγωνιστές την Τουρκία, την Ουγγαρία, την Ρωσία, την Κίνα και την Ιταλία. Τα κύρια αγροτικά προϊόντα είναι λαχανικά και ανθοκομικά. Μια μέση τιμή της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση θερμοκηπίων διεθνώς εκτιμάται στα 2TJ/ετησίως ανά στρέμμα, επομένως για το 2010 με βάση την ετήσια χρήση θερμικής ενέργειας των 23.264TJ/ετησίως ενδεικτικά υπολογίζεται ότι λειτουργούν παγκοσμίως περίπου 11.632 στρέμματα γεωθερμικών θερμοκηπίων.
- Υδατοκαλλιέργεια (aquaculture pond) : Για τη θέρμανση υδατοκαλλιεργειών με γεωθερμική ενέργεια το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε

653MWh (1,3% του συνόλου της άμεσης χρήσης) με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 11.521TJ/έτος (2,6% του συνόλου της άμεσης χρήσης) και με μέσο συντελεστή ικανότητας 0,56. Κατά τη 15ετία 1995-2010 υπήρξε μείωση της εγκατεστημένης ισχύος περίπου κατά 40%. Τουλάχιστον 22 χώρες δραστηριοποιούνται στον τομέα της γεωθερμικής υδατοκαλλιέργειας με πρωταγωνιστές την Κίνα, τις ΗΠΑ, την Ιταλία, την Ισλανδία, την Ιαπωνία, την Νέα Ζηλανδία και το Ισραήλ. Η δραστηριοποίηση αναφέρεται κυρίως στον τομέα της ιχθυοκαλλιέργειας με μια ενδεικτική ετήσια παραγωγή +45.000ton για το 2010.

- Τήξη χιονιού (snow melt) : Για την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών για το λιώσιμο του χιονιού με γεωθερμική ενέργεια το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε 368MWh (0,70% του συνόλου της άμεσης χρήσης) με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 2.126TJ/έτος (0,49% του συνόλου της άμεσης χρήσης) και με μέσο συντελεστή ικανότητας 0,18. Κατά τη 15ετία 1995-2010 υπήρξε μεγάλη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος περίπου κατά 220%. Η εφαρμογή της τήξης του χιονιού δραστηριοποιείται κυρίως στα πεζοδρόμια, στους δρόμους και στους χώρους στάθμευσης σε χώρες με ψυχρότερα κλίματα, με κυρίαρχη χώρα την Ισλανδία και ακολουθούν ΗΠΑ, Αργεντινή, Ιαπωνία και Ελβετία. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί και με το γεωθερμικό νερό μετά τη χρήση του από τα συστήματα θέρμανσης της πόλης, όπως στις ΗΠΑ, στην Ισλανδία, στην Ιαπωνία και στην Αργεντινή.
- Ιαματικές χρήσεις και πισίνες (bathing and swimming) : Για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για ιαματικές χρήσεις και πισίνες το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε σε 6.689MWh (13,22% του συνόλου της άμεσης χρήσης) με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 109.032TJ/έτος (24,9% του συνόλου της άμεσης χρήσης) και με μέσο συντελεστή ικανότητας 0,52. Κατά τη 15ετία 1995-2010 υπήρξε τεράστια αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος περίπου κατά 516%. Οι ιαματικές χρήσεις των γεωθερμικών νερών είναι γνωστές παγκοσμίως στις διάφορες λουτροπόλεις. Τουλάχιστον 67 χώρες δραστηριοποιούνται στον τομέα των ιαματικών χρήσεων και των γεωθερμικών πισίνων (κυρίως θερμαινόμενες) με πρωταγωνιστές με πρωταγωνιστές την Ιαπωνία, την Κίνα, την Τουρκία, την Βραζιλία και το Μεξικό. Η Ιαπωνία είναι η πρώτη χώρα στις ιαματικές χρήσεις διαθέτοντας

2.000 τουριστικά θέρετρα, 5.000 δημόσια λουτρά και 15.000 ξενοδοχεία σε λουτροπόλεις.

- Άλλες χρήσεις (other uses) : Για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για άλλες χρήσεις το 2010 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε μόλις σε 41MWth με ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας 956TJ/έτος και με μέσο συντελεστή ικανότητας 0,73. Οι άλλες χρήσεις δραστηριοποιούνται στην κτηνοτροφία, στην καλλιέργεια σπιρουλίνας, στην αφαλάτωση νερού και στην αποστείρωση φιαλών.

Η δυσκολία διάθεσης του γεωθερμικού ατμού για άμεσες χρήσεις, όπως στη γεωργία και στη βιομηχανία, οφείλεται σε ορισμένα υπαρκτά δεδομένα :

- Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής/μέσης ενθαλπίας βρίσκονται σε ηφαιστιογενείς περιοχές, συνήθως μακριά από ανθρώπινες δραστηριότητες.
- Ο γεωθερμικός ατμός μπορεί να μεταφερθεί σε σχετικά μικρές αποστάσεις (έως 2km), ενώ το ζεστό νερό σε αρκετά μεγαλύτερες (έως 20km), αυξάνοντας όμως το κόστος και με αναγκαστική πτώση πίεσης.
- Ο γεωθερμικός ατμός δεν είναι ένα εύκολα διαχειρίσιμο 'εμπόρευμα' πωλητή χρήστη
- Η ανάπτυξη των γεωθερμικών πεδίων απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα (5-8 έτη)
- Οι περιορισμοί στη θερμοκρασία (159-184 °C) και στην πίεση (5-10bar-g) διακίνησης και διάθεσης του γεωθερμικού ατμού μετά την ηλεκτροπαραγωγή απαιτεί ταμειυτήρες με θερμοκρασία 200-250 °C.
- Το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι υψηλό για την ανάπτυξη του γεωθερμικού πεδίου, των γεωτρήσεων και της διανομής
- Ενώ το κόστος παραγωγής ατμού και ζεστού νερού είναι σημαντικό, αντίθετα η συμμετοχή του στο παραγόμενο βιομηχανικό ή αγροτικό προϊόν σπανίως υπερβαίνει το 5% του συνολικού κόστους παραγωγής του συγκεκριμένου προϊόντος.
- Οι επενδυτές είναι συχνά επιφυλακτικοί και δεν είναι εξοικειωμένοι με αυτήν την πηγή ενέργειας.
- Υπάρχουν πολύ λίγες εταιρείες που πωλούν γεωθερμικό ατμό και γεωθερμικό νερό σε βιομηχανικές ζώνες μετά την ηλεκτροπαραγωγή, ενώ έχουν δείξει μέχρι τώρα περιορισμένο ενδιαφέρον σε μικρής κλίμακας βιομηχανικές χρήσεις.

- Η ανάπτυξη του ιδιωτικού τομέα στη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή είναι περιορισμένη σε σχέση με το δημόσιο τομέα.
- Το γεωθερμικό νομικό πλαίσιο για μίσθωση και διαχείριση γεωθερμικών πεδίων είναι νέο ή συχνά και ανύπαρκτο σε κάποιες χώρες.
- Η λήψη περιβαλλοντικών αδειών και παραχώρησης των γεωθερμικών πόρων απαιτεί συνήθως αρκετό χρόνο.
- Οι γεωθερμικές περιοχές ειδικά υψηλής ενθαλπίας συχνά βρίσκονται σε άμορφο φυσικό περιβάλλον ή/και εντός προστατευμένων περιοχών (εθνικά πάρκα, ηφαιστειογενείς περιοχές), όπου η άδεια γεωθερμικές εκμετάλλευσης περιπλέκεται.

1.8 Γεωθερμική χαρτογράφηση των χωρών ηλεκτροπαραγωγής

Η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας ηλεκτρικής παραγωγής γεωγραφικά εστιάζεται κυρίως σε τεκτονικά ενεργές περιοχές, όπως στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, στις ρηξιγενείς ζώνες, στις θερμές κηλίδες, κλπ. Τέτοιες ενεργές περιοχές υψηλής θερμικής ροής υπάρχουν στο ‘Δαχτυλίδι της φωτιάς’ (Ινδονησία, Φιλιππίνες, Ιαπωνία, Νέα Ζηλανδία, Κ. και Ν. Αμερική και δυτική ακτή των ΗΠΑ) και στις ρηξιγενείς περιοχές (Ισλανδία και Ανατολική Αφρική), οι πιο ελπιδοφόρες για γεωθερμική ανάπτυξη στην επόμενη δεκαετία με δυνατότητα εγκατεστημένης ισχύος 30GWe το 2030.

Σύμφωνα με την GEA (2014a) οι επικρατούσες γεωθερμικές συνθήκες ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως είναι :

- Στην περιοχή του ρήγματος στην Αν. Αφρική οι γεωθερμικοί πόροι παραμένουν ανεκμετάλλευτοι, αν και μπορούν να υποστηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 10-20GWe. Ήδη η Κένυα και η Αιθιοπία σχεδιάζουν έργα μεγάλης ισχύος.
- Αρκετές χώρες στην Κ. και Ν. Αμερική διαθέτουν σημαντικούς γεωθερμικούς πόρους, όμως μόνο το Ελ Σαλβαδόρ και η Κόστα Ρίκα έχουν εμπλακεί ενεργά στην αξιοποίηση, ενώ η Χιλή, η Αργεντινή, η Κολομβία και η Ονδούρα βρίσκονται ακόμη στα πρώτα στάδια της εξερεύνησης και στον εντοπισμό των πόρων τους.
- Στην περιοχή της Ασίας οι χώρες Ινδονησία, Φιλιππίνες και Ιαπωνία έχουν έντονη γεωθερμική δράση, όπου η Ινδονησία διαθέτει το μεγαλύτερο ποσοστό των γνωστών

γεωθερμικών πόρων, εκτιμάται σε 28GWe, ή το 40% του παγκόσμιου συνόλου. Από το ποσό αυτό, περίπου το 5% έχει αναπτυχθεί.

- Ηφαιστειακά νησιά στον Ειρηνικό Ωκεανό (Παπούα-Νέα Γουινέα, Νήσοι Σολομώντος, Φίτζι, κλπ) έχουν σημαντικές δυνατότητες για την ανάπτυξη από γνωστούς γεωθερμικούς πόρους.
- Στις αρχές του 2014, η GEA εκτιμά ότι η Ευρώπη και η Τουρκία είχαν μια συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1.996MWe για γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή, και υπήρχαν 111 νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής υπό κατασκευή ή υπό έρευνα στα κράτη μέλη της ΕΕ. Μέσα στην Ευρώπη, η Ιταλία είναι ο ηγέτης της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής με πάνω από το 50% της ευρωπαϊκής κοινότητας. Η Ισλανδία καλύπτει το 25-33% των ηλεκτρικών αναγκών και το 90% της θέρμανσης από γεωθερμικές πηγές, Η γεωθερμική ιστορία της Ισλανδίας θεωρείται πρότυπο για τη μετάβαση αυτοχθόνων πρακτικών με τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας.
- Η εμπορική προσθήκη της νέας τεχνολογίας των EGS με δυνατότητα γεωγραφικής διεύρυνσης της γεωθερμίας μπορεί να αυξήσει ακόμη περισσότερο την εγκατεστημένη ισχύ. Οι συνθήκες εκμετάλλευσης των EGS διαφέρουν κατά περιοχή, που έχει επιπτώσεις στο ρυθμό ανάπτυξης τους ακόμη και μετά την τεχνολογική βελτίωση καθιστώντας αυτά εμπορικά βιώσιμα. Ήδη σε χώρες της Ευρώπης, στις ΗΠΑ και στην Αυστραλία δοκιμάζονται επιταχύνοντας την ανάπτυξη τους, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες της Ασίας, της Αφρικής και της Νότιας Αμερικής πιθανά να υπάρξει καθυστέρηση στην ανάπτυξη τους. Το 2050 το ήμισυ της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής προβλέπεται να προέρχεται από τα EGS, αν και θα επηρεαστεί από την τεχνική των γεωτρήσεων, την υδραυλική ρωγμάτωση, κλπ.

Μέση Ανατολή και Αφρική

Η Μέση Ανατολή (Τουρκία) και η Ανατολική Αφρική διαθέτουν αρκετές ελπιδοφόρες περιοχές γεωθερμικών πόρων. Όμως εκτός από την Τουρκία (163MWe) και την Κένυα (202MWe) Οι υπόλοιπες χώρες βρίσκονται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης των γεωθερμικών πόρων και αναζήτησης των κανονισμών, της νομοθεσίας και των επιχειρηματικών κινήτρων. Παρά ταύτα κατά την επόμενη 10ετία αναμένεται μια σημαντική ανάπτυξη στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας, αφού πολλές άλλες χώρες κατά μήκος του ανατολικού αφρικανικού ρήγματος μπορούν να αξιοποιήσουν τους δεδομένους γεωθερμικούς πόρους που έχουν εκτιμώμενους στα 10-20GWe. Στην Ανατολική Αφρική γεωτεκτονικά βρίσκεται σε εξέλιξη η δημιουργία ταφρογένεσης (κλειστός ωκεανός) με

άνοδο μάγματος ως ηπειρωτική διάρρηξη με απομάκρυνση τμήματος της προς τα ανατολικά, όπου οφείλεται και το γεωθερμικό ενδιαφέρον υψηλής ενθαλπίας .

Ευρώπη

Στην Ευρώπη βρίσκονται αρκετά γεωθερμικά έργα σε εξέλιξη και 15 έργα σε κατασκευή. Εκτός από την Ιταλία και στην Ισλανδία, τα γεωθερμικά έργα στην Ευρώπη δεν υπερβαίνουν το μέγεθος των 10MWe έκαστο, ενδεικτικά στη Γερμανία υπάρχουν 8 γεωθερμικά έργα υπό κατασκευή συνολικής ισχύος 47MWe. Υπάρχουν χώρες της Ευρώπης με μεγάλα αποθέματα γεωθερμικών πόρων χαμηλής ενθαλπίας κυρίως μέσα σε ιζηματογενείς λεκάνες σε διάφορα βάθη με πιθανότητες εκτός από άμεσες χρήσεις και ηλεκτροπαραγωγής με δυαδικού τύπου μονάδες. Στην Ανατολική Ευρώπη βρίσκεται σε εξέλιξη έντονη ερευνητική γεωθερμική δραστηριότητα. Στην Κροατία, Ρουμανία, Τσεχία και Σλοβακία η έρευνα και η κατασκευή γεωθερμικών μονάδων είναι σε εξέλιξη, ενώ μια εκτίμηση του δυναμικού στα 6.000MWe στην ευρύτερη περιοχή δίνει ιδιαίτερη ώθηση στην προσπάθεια αυτή. Στην Δυτική Ευρώπη και ειδικά στην Ολλανδία, στη Γερμανία, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ελβετία και στην Ιρλανδία βρίσκονται γεωθερμικά έργα των EGS σε εξέλιξη και σε δοκιμές παραγωγής. Επίσης στην Ελλάδα βρίσκεται σε εξέλιξη η διαδικασία εξεύρεσης εταιρειών για επενδυτική δραστηριοποίηση σε γνωστές γεωθερμικές περιοχές. Στην Ευρώπη η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ηλεκτρική ισχύς το 2013 ήταν 1.750MW, όπου η Ιταλία κατέχει το 50% και η Ισλανδία το 40% ενώ η πρόβλεψη για το 2016 είναι στα 1.946MW.

Στην Ελλάδα συγκεκριμένα, μονάδες ηλεκτροπαραγωγής σε λειτουργία δεν υπάρχουν, παρά το σχετικό υψηλό γεωθερμικό δυναμικό (βάθος 1.000-2.000m και θερμοκρασίες 300-350 °C) που υπάρχει κυρίως στα νησιά του ηφαιστειακού τόξου Ν. Αιγαίου. Από το 1987 στην Μήλο εγκαταστάθηκε μια πιλοτική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 2MWe χωρίς όμως να λειτουργήσει. Αξιόλογο γεωθερμικό ενδιαφέρον υπάρχει για πεδία μέσης ενθαλπίας στην Αν. Μακεδονία και Θράκη. Υπάρχουν ήδη 5 έργα υπό αξιολόγηση για ηλεκτροπαραγωγή με μονάδες υγρού ατμού και δυαδικού τύπου με ιδιαίτερη έμφαση στη νήσο Λέσβο.

Βόρεια Αμερική

Η Βόρεια Αμερική με την ιδιαίτερη παρουσία των ΗΠΑ είναι ο παγκόσμιος ηγέτης της γεωθερμικής ενέργειας. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς μέσα από μια σειρά ρυθμιστικών και διαρθρωτικών αλλαγών προσπαθούν να αποφύγουν την επιβράδυνση των

γεωθερμικών έργων. Το Μεξικό βρίσκεται σε ιδιαίτερη φάση γεωθερμικής ανάπτυξης με ήδη αρκετές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και προγράμματα νέων υπό κατασκευή μονάδων. Στην Βόρεια Αμερική η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς το 2012 ήταν 4.145MWe, όμως στα επόμενα 5-7 έτη αναμένεται να διπλασιαστεί. Μέχρι το 2050 στις Δυτικές ΗΠΑ εκτιμάται ότι η τεχνικά εφικτή εγκατεστημένη ισχύς θα προσεγγίσει τα 30GWe, ενώ στην Αλάσκα τα 5GWe.

Ασία

Η περιοχή της Νοτιανατολικής Ασίας χαρακτηρίζεται ως η πιο ενδιαφέρουσα γεωθερμική περιοχή παγκοσμίως για ηλεκτροπαραγωγή, αφού ανήκει στο ‘Δαχτυλίδι της φωτιάς’ από τις πιο ενεργές περιοχές υψηλής θερμικής ροής. Στην Ανατολική Ασία η Ινδονησία είναι από τις μεγαλύτερες χώρες γεωθερμικών αποθεμάτων υπερβαίνοντας τα 27.500MW. Οι χώρες όπως οι Φιλιππίνες και η Ινδονησία καταλαμβάνουν τη δεύτερη και την Τρίτη θέση από την άποψη της παγκόσμιας εγκατεστημένης γεωθερμικής δυναμικότητας και έχουν ήδη ξεπεράσει τις ΗΠΑ ως προς το ρυθμό αύξησης της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής. Ήδη βρίσκονται υπό κατασκευή νέες μονάδες ισχύος 5.200MWe, ενώ έχουν εντοπιστεί νέοι γεωθερμικοί πόροι δυναμικού 7.200MWe. Στην Ινδία υπάρχουν αρκετές ιαματικές πηγές, όπου οι γεωθερμικοί πόροι είναι ακόμη ανεξερεύνητοι. Απομακρυσμένες περιοχές όπως η Καμτσάτκα της Ρωσίας και το Θιβέτ διαθέτουν προσδιορισμένους γεωθερμικούς πόρους με μεγάλες δυνατότητες επέκτασής τους.

Ωκεανία

Αρκετές ανατολικές νησιωτικές περιοχές της Ωκεανίας βρίσκονται στο ‘Δαχτυλίδι της φωτιάς’ (Νέα Ζηλανδία, Παπούα-Νέα Γουινέα, Νήσοι Σολομώντος, Φίτζι, κλπ) με έντονο γεωθερμικό ενδιαφέρον, ενώ η Αυστραλία πρωτοστατεί στην ανάπτυξη των γεωθερμικών συστημάτων EGS.

1.8.1 Γεωθερμική χαρτογράφηση των χώρων άμεσης χρήσης

Η απευθείας χρήση της γεωθερμικής ενέργειας είναι η παλαιότερη, η πιο ευέλικτη και η πιο κοινή μορφή αξιοποίησης της. Εμφανίζεται για πρώτη φορά κατά την Παλαιολιθική εποχή για τελετουργικούς σκοπούς ή μπάνιο, ενώ η βιομηχανική αξιοποίηση εμφανίζεται για πρώτη φορά στο Larderello της Ιταλίας με την παραγωγή βορικού οξέος, Η ανάπτυξη της άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας εμφανίζει αργούς ρυθμούς, αφού

τα ορυκτά καύσιμα είναι ένας σημαντικός ανταγωνιστής ‘ρουτίνας’ και οι αρχικές επενδυτικές δαπάνες είναι υψηλές. Όμως οι αυξημένες περιοχές με γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας και η γεωθερμική γεωγραφική διεύρυνση τελευταία με την αξιοποίηση των γεωθερμικών πηγών χαμηλών θερμοκρασιών για συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες δυαδικού τύπου ευνοεί την ανάπτυξη και καθετοποίηση των θερμικών χρήσεων στις αναπτυσσόμενες χώρες και όχι μόνο. Επίσης η αυξανόμενη δημοτικότητα των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας έχει την πιο σημαντική επίπτωση στην άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας, καλύπτοντας το 2010 το 70% της εγκατεστημένης ισχύος της θερμικής αξιοποίησης της (ιδιαίτερα στις βόρειες Ευρωπαϊκές χώρες και στις ΗΠΑ). Οι μη ηλεκτρικές χρήσεις δεν είναι εύκολο να στατιστικοποιηθούν και να ταξινομηθούν, λόγω των πολλών και ποικίλων χρήσεων και των συνεχών μεταβολών στις θερμοκρασίες απόρριψης (ή και σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος)

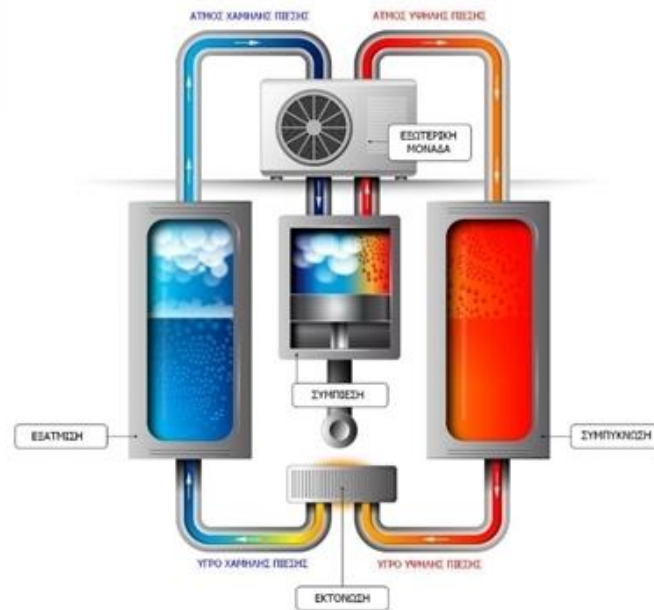
Ο αριθμός των χωρών που αξιοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια για άμεση χρήση το 1985 ήταν 28, το 2000 ήταν 58, το 2005 ήταν 72 και το 2010 ανήλθαν στις 78.

Κεφάλαιο 2

ΑΝΤΛΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Οι αντλίες θερμότητας (ΑΘ) είναι μηχανές που παράγουν θέρμανση και ψύξη καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια και λειτουργούν σύμφωνα με τον καλούμενο αντίστροφο θερμοδυναμικό κύκλο. Κατά τη διάρκεια του κύκλου αφαιρείται θερμότητα σε χαμηλή θερμοκρασία, που είναι διαθέσιμη σε μια ψυχρή πηγή, αυξάνει τη θερμοκρασία της με τη συμπίεση και κατόπιν την αποδίδει για τη θέρμανση χώρων. Οι συνηθέστερες ψυχρές πηγές είναι ο εξωτερικός αέρας και το νερό (πηγαδιού, ποταμού, λίμνης), ενώ τα τελευταία χρόνια αυξάνεται η χρήση του εδάφους και της ηλιακής ενέργειας. Η θερμότητα διατίθεται με τη μορφή θερμού αέρα ή θερμού νερού [18].



Σχήμα 2.1 Τυπική αντλία θερμότητας [32]

2.2 Αρχές λειτουργίας

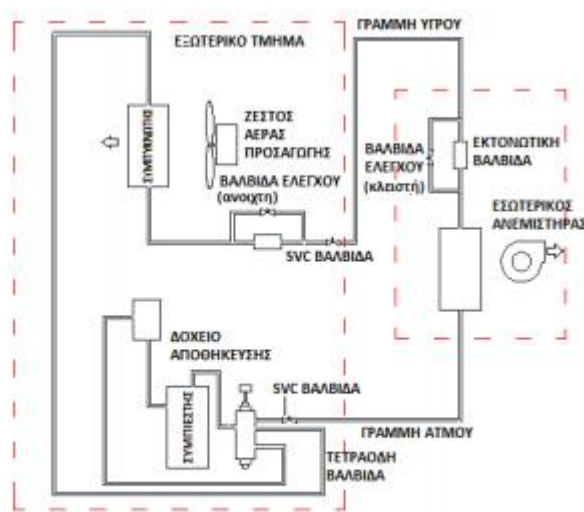
Η αντλία θερμότητας είναι συσκευή που έχει τη δυνατότητα αξιοποίησης του κύκλου ψύξης έτσι ώστε να δίνει άλλοτε ζεστό και άλλοτε κρύο αέρα ή νερό, ανάλογα πάντα με τις κλιματικές ανάγκες του χώρου. Όπως είναι γνωστό, η θερμότητα έχει φυσική ροή από καταστάσεις υψηλότερων θερμοκρασιών σε αντίστοιχες χαμηλότερων θερμοκρασιών. Το σύστημα όμως αυτό, έχει την ικανότητα να μεταφέρει τη θερμότητα αντίθετα προς τη φυσική της ροή. Αντλεί δηλαδή θερμότητα από χαμηλότερη στάθμη θερμοκρασίας προς μια υψηλότερη. Την ίδια ικανότητα έχει και ένα ψυγείο, μόνο που στην περίπτωση των αντλιών θερμότητας το ενδιαφέρον παρουσιάζεται για τη θερμότητα και όχι για την ψύξη.

Η αρχή λειτουργίας της [19] είναι η ίδια με αυτή που εφαρμόζεται και στα ψυγεία, όπου η θερμότητα μεταφέρεται από τον χώρο του ψυγείου στο χώρο του περιβάλλοντος, ή στις κλιματιστικές συσκευές, με τις οποίες η θερμότητα μεταφέρεται από το δωμάτιο στην ύπαιθρο. Έτσι λοιπόν, αν ο χώρος A είναι το εσωτερικό κτηρίου και το B το περιβάλλον, η αντλία θερμότητας έχει τη δυνατότητα με κατάλληλο χειρισμό να μεταφέρει θερμότητα από το χώρο A προς το χώρο B (ψύξη του κτηρίου) ή αντίστροφα από το χώρο B προς το χώρο A (θέρμανση του κτηρίου).

2.2.1 Βασικά τμήματα ΑΘ

Τα βασικά τμήματα [20] από τα οποία αποτελείται μια αντλία θερμότητας :

- Το τμήμα συμπίεστή – συμπυκνωτή, που απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον (ή κατά την αντίστροφη λειτουργία απορροφά θερμότητα)
- Το τμήμα ανεμιστήρα – ατμοποιητή, που απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο (ή κατά την αντίστροφη λειτουργία προσδίδει θερμότητα)
- Ο μηχανισμός αντιστροφής, που αποτελείται από μια τετράοδη βαλβίδα, η οποία μετατρέπει τον ψυκτικό κύκλο, σε θερμοαντικό (κύκλο θέρμανσης) και αντίστροφα
- Οι αυτοματισμοί για τον έλεγχο και τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης
- Η συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση, που αυξάνει τη θερμική απόδοσή του συστήματος, όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή. Μερικές φορές το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με αντιστροφή του κύκλου για περιορισμένο χρόνο.



Σχήμα 2.2 Κύκλος αντλίας θερμότητας για θέρμανση [32]

θερμότητας προσδίδονται στο αέριο, το οποίο αποκτά υψηλή πίεση και θερμοκρασία στο συμπιεστή.

2. Το συμπιεσμένο αέριο φθάνει στο συμπυκνωτή και προσδίδει ποσά θερμότητας στο μέσο συμπύκνωσης (αέρας ή νερό). Καθώς ο ατμός ψυκτικού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας διέρχεται από το συμπυκνωτή, υγροποιείται και εξέρχεται ως ψυκτικό υγρό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Με την υγροποίηση του ατμού αφαιρείται θερμότητα από αυτόν.
3. Το ψυκτικό υγρό οδηγείται στην εκτονωτική βαλβίδα. Κατά τη φάση της εκτόνωσης το συμπυκνωμένο ψυκτικό υγρό υψηλής πίεσης περνάει μέσα από μια εκτονωτική διάταξη, όπου μειώνεται η πίεση και η θερμοκρασία του και μετατρέπεται σε ένα μίγμα από υγρό και ατμό χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας και ο κύκλος ξαναρχίζει.

Ο κύκλος θέρμανσης περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με τον κύκλο ψύξης. Μόνο που στην περίπτωση αυτή το στοιχείο που εκτελούσε ατμοποίηση εκτελεί συμπύκνωση και το αντίστροφο.

Για να μπορεί να λειτουργήσει μια αντλία θερμότητας σε θέρμανση και ψύξη θα πρέπει να γίνεται εναλλαγή ρόλων μεταξύ των δύο εναλλακτικών, του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή το οποίο ονομάζεται αναστροφή του ψυκτικού κύκλου. Η μετατροπή του ψυκτικού κύκλου σε κύκλο θέρμανσης, γίνεται με τη βοήθεια τετράοδης βαλβίδας, που οδηγεί το ψυκτικό ρευστό μετά την έξοδό του από το συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου – αέρα (ή νερού), ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω διακόπτη.

2.3 Η ιδανική αντλία θερμότητας

Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας στηρίζεται στην αρχή της αντιστρεπτής θερμικής μηχανής του Carnot όταν λειτουργήσει αντίστροφα [22]. Οι αντιστρεπτές μηχανές χρησιμοποιούνται ως πρότυπες μηχανές για την αξιολόγηση της απόδοσης των πραγματικών μηχανών. Η αντίστροφη μηχανή Carnot μπορεί να λειτουργεί, είτε ως αντλία θερμότητας, είτε ως ψυκτική μηχανή. Στην κατάσταση θέρμανσης η αντλία θερμότητας αντλεί από το ψυχρό περιβάλλον ποσότητα θερμότητας Q_1 , προστίθεται μηχανικό έργο W στο συμπιεστή και αποδίδει ποσό θερμότητας Q_2 στο χώρο. Όταν η αντλία λειτουργεί σε κατάσταση θέρμανσης, το θερμό είναι ο χώρος, το ψυχρό το περιβάλλον και το ζητούμενο είναι το ;2

Σε λειτουργία ψύξης [23] είναι το αντίστροφο. Η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας χαρακτηρίζεται από το συντελεστή λειτουργίας $COP(=T_2/(T_2-T_1))$. Ο συντελεστής εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες T_1 , T_2 των δεξαμενών θερμικής ενέργειας και είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Για την ίδια θερμοκρασιακή διαφορά T_2-T_1 ο COP βελτιώνεται όσο υψηλότερης στάθμης είναι η θερμοκρασία T_2 . Επίσης,, όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά T_2-T_1 μεταξύ του κλιματιζόμενου και του εξωτερικού χώρου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο COP. Οι παρατηρήσεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία για την Ελλάδα λόγω των ειδικών κλιματολογικών συνθηκών :

- Ήπιος καιρός το χειμώνα με υψηλές σχετικά θερμοκρασίες εξωτερικού χώρου
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης της ηλιακής ενέργειας βοηθητικά στην αντλία θερμότητας, κατά την περίοδο του χειμώνα
- Δυνατότητα (σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας βοηθητικά στην αντλία θερμότητας.

Μια αντλία θερμότητας με συντελεστή COP ίσο με 4, μεταφέρει 4kw ενέργειας καταναλώνοντας 1kW ηλεκτρισμού, ή αλλιώς, η μεταφορά ενέργειας κοστίζει 25% με τη συγκεκριμένη αντλία. Ο συντελεστής COP εξαρτάται από τις θερμοκρασίες ψυχρού και θερμού χώρου και δεν είναι σταθερός. Οι συντελεστές που δίνουν τα φυλλάδια των κατασκευαστών, είναι μετρημένοι συντελεστές επίδοσης, σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, τυποποιημένες σύμφωνα με το πρότυπο Eurovent. Οι θερμοκρασίες αυτές είναι για τη θέρμανση (θερμοκρασία ξηρού βολβού) : θερμοκρασία εσωτερικού χώρου 20 °C και θερμοκρασία εισόδου εξωτερικού αέρα 7 °C.

Απόδοση λειτουργίας σε ψύξη

Όταν η αντλία θερμότητας λειτουργεί ως ψυκτική μηχανή για να καλύψει τις ανάγκες ψύξης το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα είναι το ποσό θερμότητας Q_1 . Η αποδοτικότητα μιας αντλίας θερμότητας όταν λειτουργεί ως ψυκτική μηχανή χαρακτηρίζεται από το συντελεστή λειτουργίας $\beta_{\Lambda/\Theta}(=1/((Q_2/Q_1)-1))$ ή EER (Energy Efficiency Ratio) .

2.4 Θεωρητικός και πραγματικός κύκλος της ΑΘ

Οι μεταβολές του κύκλου πάνω στο διάγραμμα $\ln p-h$, είναι : συμπίεση, συμπύκνωση, στραγγαλισμός και ατμοποίηση των ατμών του χρησιμοποιούμενο ψυκτικού μέσου. Στην πράξη όμως, όπως είναι γνωστό, πρέπει να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις [24]. Οι αναγκαστικές τροποποιήσεις του θεωρητικού κύκλου είναι οι εξής :

1. Λόγω κινδύνου σχηματισμού σταγόνων υγρού μέσα στο συμπιεστή, ο ατμός οδηγείται προς αυτόν υπέρθερμος.
2. Επειδή ο συμπιεστής δεν έχει την δυνατότητα να εκτελέσει ισεντροπική συμπίεση, απαιτείται περισσότερο μηχανικό έργο. Το επιπλέον έργο W γίνεται θερμότητα, που δημιουργεί ανύψωση της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού.
3. Στους εναλλάκτες θερμότητας (συμπυκνωτή – ατμοποιητή), οι μεταβολές είναι θεωρητικά ισοβαρείς και ισόθερμες. Στην πράξη όμως, λόγω ταχύτητας που διατηρείται αρκετά μεγάλη, παρουσιάζεται πτώση πίεσης.
4. Λόγω κινδύνου σχηματισμού ατμού πριν την εκτονωτική βαλβίδα (από απρόβλεπτη θέρμανση ή πτώση πίεσης), γίνεται υπόψυξη του υγρού, με τη βοήθεια ενδιάμεσου ψύκτη.

2.5 Κατηγορίες αντλιών θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας κατατάσσονται ακολούθως :

1. Ανάλογα με το μέσο από όπου αντλείται και το μέσο όπου αποβάλλεται η θερμότητα, έχουμε τις εξής κατηγορίες :
 - Αέρα-Αέρα (A-A)
 - Αέρα-Νερού (A-N)
 - Νερού-Νερού (N-N)
 - Νερού-Αέρα (N-A)
 - Εδάφους-Αέρα (E-A)
 - Εδάφους-Νερού (E-N)



Σχήμα 2.4 Κατηγορίες ΑΘ και κόστος [32]

Οι πρώτες αντλούν θερμότητα από την ατμόσφαιρα και αποδίδουν θερμό αέρα ενώ οι δεύτερες αντλούν θερμότητα από την ατμόσφαιρα και ζεσταίνουν νερό [25]. Οι πιο διαδεδομένες εμπορικές λύσεις είναι οι αντλίες θερμότητας αέρα/αέρα και οι αέρα/νερού. Αυτές κατασκευάζονται πλέον αποκλειστικά σε αναστρέψιμα μοντέλα δηλαδή μπορούν να λειτουργήσουν με κύκλο θέρμανσης και κύκλο ψύξης. Ένα συνηθισμένο κλιματιστικό είναι μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, ενώ μια αντλία αέρα-νερού αντλεί θερμότητα από την ατμόσφαιρα και ζεσταίνει νερό που μετά μπορεί να κυκλοφορεί σε ένα σύστημα θέρμανσης για να ζεστάνει κάποια θερμαντικά σώματα.

Υπάρχουν αντλίες θερμότητας που λειτουργούν μόνο για θέρμανση και άλλες που παρέχουν και θέρμανση και ψύξη. Εκτός από αυτά τα είδη, αναπτύσσονται και αντλίες θερμότητας νερού – νερού, οι οποίες αντλούν θερμότητα από νερό και την αποδίδουν σε νερό εσωτερικού δικτύου, καθώς και αντλίες θερμότητας νερού – αέρα, οι οποίες αντλούν θερμότητα από νερό και την αποδίδουν σε εσωτερικό δίκτυο με αεραγωγούς. Κατά την περίοδο του χειμώνα αντλείται θερμότητα (ή αντίστοιχα κατά την περίοδο του θέρους απορρίπτεται), ενώ το νερό μπορεί να είναι νερό από πύργο ψύξης, ποτάμι, θάλασσα ή ακόμη και νερό από γεώτρηση ή πηγάδι. Στην περίπτωση αυτή τοποθετούνται και κάποιες από τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

Επίσης, αναπτύσσονται και αντλίες θερμότητας εδάφους – αέρα και εδάφους – νερού όπου η άντληση θερμότητας κατά το χειμώνα γίνεται άμεσα στο έδαφος, δηλαδή ο ατμοποιητής ή συμπυκνωτής αντίστοιχα είναι τοποθετημένος εντός του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή, τα εσωτερικά δίκτυα είναι είτε δίκτυα νερού είτε δίκτυα αέρα.

2. Ανάλογα με το είδος την κινητήριας μηχανής, οι αντλίες θερμότητας κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες :

- Ηλεκτροκίνητοι συμπιεστές
- Συμπιεστές κινούμενοι από μηχανές εσωτερικής καύσης (πετρέλαιο, ατμός αέριο, κλπ)
- Συμπιεστές απορρόφησης και προσρόφησης (θερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας).

Οι πιο διαδεδομένοι συμπιεστές είναι οι ηλεκτροκίνητοι και τούτο διότι η μεγαλύτερη ανάπτυξη και χρήση αντλιών θερμότητας γίνεται στον κτηριακό τομέα και ειδικότερα σε κτήρια γραφείων, εμπορικά και κατοικιών. Σε άλλες εφαρμογές όπως, βιομηχανίες, πλοία και μεταφορικά μέσα γενικότερα έχουν αναπτυχθεί και συμπιεστές κινούμενοι από μηχανές εσωτερικής καύσης ή συνδεδεμένες σε μηχανές εσωτερικής καύσης με μηχανικό τρόπο.

Η περίπτωση των συμπιεστών απορρόφησης [26] και προσρόφησης είναι μια ειδική περίπτωση και ειδική τεχνολογία όπου δεν υφίσταται η έννοια της συμπίεσης αλλά της αύξησης της πίεσης σε υγρό και η επωνυμία, συμπιεστές, δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται μια άλλη τεχνική όπου η μεταβολή της πίεσης προέρχεται από διαχωρισμό μέσων και άντληση υγρών.

3. Ανάλογα με τη θέση των διαφόρων μηχανισμών της αντλίας θερμότητας διακρίνονται δύο κατηγορίες :

- Ενιαίες ή αυτόνομες (Compact). Σε αυτές όλοι οι μηχανισμοί βρίσκονται σε κοινό κέλυφος.
- Διμερούς τύπου (Split units). Εδώ ο ατμοποιητής (ή ο συμπυκνωτής) είναι ανεξάρτητος του υπόλοιπου συστήματος.

Οι πιο διαδεδομένες σήμερα αντλίες θερμότητας σε μικρές μονάδες είναι οι διμερούς τύπου. Αντίθετα κατά την ανάπτυξη των συστημάτων είχαν εφαρμοσθεί αρχικά οι αυτόνομες ή ενιαίες μονάδες αλλά λόγω προβλημάτων κυρίως θορύβου με το χρόνο αποσύρθηκαν (ως τεχνολογία).

4. Ανάλογα με τον τρόπο αναστροφής της λειτουργίας τους οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Σταθερού κυκλώματος ψυκτικού μέσου. Η ροή του ψυκτικού μέσου διατηρείται σταθερή και αλλάζει η θέση των μέσων προσαγωγής ή απαγωγής της θερμότητας.
- Μεταβλητού κυκλώματος ψυκτικού μέσου. Η αναστροφή της ροής του ψυκτικού μέσου γίνεται με χρήση τετράοδης βαλβίδας.

Στην περίπτωση των μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδων, οι πλέον διαδεδομένες είναι οι μονάδες μεταβλητού κυκλώματος ψυκτικού μέσου. Σε μεγαλύτερες μονάδες και σε ειδικές εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί και αντλίες θερμότητας σταθερού κυκλώματος ψυκτικού μέσου, με αντιστροφή στην περιοχή του μέσου προσαγωγής – απαγωγής θερμότητας (κυρίως σε εγκαταστάσεις νερού).

2.6 Πηγές θερμότητας

Υπάρχουν αρκετές πηγές για την άντληση θερμότητας, όπως : ο αέρας, το νερό, το έδαφος, η ηλιακή ενέργεια.

2.6.1 Αέρας

Ο εξωτερικός αέρας αποτελεί ένα μέσο που χρησιμοποιείται παγκοσμίως ως ψυχρή πηγή για τις αντλίες θερμότητας. Για να μεταφερθεί η θερμότητα ανάμεσα στον αέρα και το ψυκτικό χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας (μονάδες θερμικής συναλλαγής) μεγάλης επιφάνειας με βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα (τεχνητό ρεύμα). Γενικά στις μονάδες αέρα – αέρα, αυτές οι επιφάνειες είναι κατά 50-100% μεγαλύτερες από εκείνες της εσωτερικής μονάδας. Η παροχή του εξωτερικού αέρα που διασχίζει τη μονάδα είναι συνήθως μεγαλύτερη από εκείνη του εσωτερικού αέρα κατά το ίδιο περίπου ποσοστό.

Η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον εξωτερικό αέρα και στο ψυκτικό μέσο που ατμοποιείται μέσα στη μονάδα κατά τη λειτουργία σε θέρμανση κυμαίνεται συνήθως ανάμεσα σε -12°C και -4°C . Όταν πρέπει να γίνει επιλογή αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιεί εξωτερικό αέρα ως ψυχρή πηγή, πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο παράγοντες : η τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας και ο σχηματισμός πάχνης στη μονάδα. Με την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας μειώνεται η ισχύς θέρμανσης της αντλίας θερμότητας.

Κατά την θέρμανση [27], η επιλογή της συσκευής για ορισμένη θερμοκρασία μελέτης είναι πιο κρίσιμη από ότι σε ένα σύστημα κεντρικής θέρμανσης. Συνεπώς, πρέπει να δοθούν στη συσκευή οι διαστάσεις για ένα σημείο ισορροπίας που είναι, στην πράξη, όσο το δυνατόν πιο χαμηλό για τη θέρμανση, ώστε να μη καταλήγουμε σε υπερβολική ισχύ ψύξης για τη συσκευή η οποία είναι μεγαλύτερη από το σημείο σχεδιασμού της μελέτης και στην πράξη άχρηστη.

Το πλεονέκτημα της πηγής αυτής είναι ότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Παρουσιάζει όμως πρόβλημα όταν η εξωτερική θερμοκρασία το χειμώνα είναι πολύ χαμηλή και η αντλία δεν έχει τη δυνατότητα να αντλήσει θερμότητα από τον αέρα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται εφεδρικό συμβατικό σύστημα για την κάλυψη των φορτίων αιχμής. Το εφεδρικό σύστημα μπορεί να είναι λέβητας πετρελαίου ή αερίου, νυχτερινή ή ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κλπ.

Σημαντικό πρόβλημα είναι το πάγωμα του ατμοποιητή όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι μικρότερη από $0 - 2^{\circ}\text{C}$ οπότε επέρχεται στερεοποίηση της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Όσο αυξάνει η ποσότητα του δημιουργούμενου πάγου, τόσο μειώνεται η παροχή του αέρα που διέρχεται από τον ατμοποιητή. Αρχικά το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με ηλεκτρικές αντιστάσεις με τις οποίες έλιωνε ο πάγος. Σήμερα όμως η πιο γνωστή μέθοδος είναι η αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου (ή παράκαμψη θερμού αερίου προς τον ατμοποιητή από την έξοδο του συμπιεστή μέσω ειδικού παρακαμπτήριου αγωγού). Με τον τρόπο αυτό, όταν απαιτείται απόψυξη, η τετράοδη βαλβίδα ενεργοποιείται και μπαίνει σε λειτουργία ο ψυκτικός κύκλος, οπότε το ζεστό αέριο οδηγείται στον ατμοποιητή και λιώνει τον πάγο (σύστημα απόψυξης). Κατά την απόψυξη, ο εξωτερικός ανεμιστήρας σταματά να παρέχει κρύο αέρα, με αποτέλεσμα ο συμπιεστής να αντιμετωπίζει μόνο τα φορτία του πάγου.

2.6.2 Νερό

Το νερό σε πολλές περιπτώσεις αντιπροσωπεύει την ιδανική ψυχρή πηγή. Δυστυχώς η χρήση του είναι περιορισμένη λόγω προβλημάτων διαθεσιμότητας. Ιδιαίτερα, το νερό πηγαδιού έχει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας του η οποία είναι σχεδόν σταθερή. Παρ' όλα αυτά, αυτή η πηγή γίνεται όλο και πιο σπάνια και η χρήση της σε εγκαταστάσεις είναι μάλλον περιορισμένη. Σε πολλές περιπτώσεις τα πηγάδια προσφέρουν ικανοποιητική διαθεσιμότητα νερού, συχνά όμως οι συνθήκες του νερού είναι τέτοιες που προκαλούν διάβρωση στους εναλλάκτες θερμότητας ή ευνοούν το σχηματισμό αλάτων.

Άλλες επισημάνσεις γίνονται για το κόστος της γεώτρησης της εγκατάστασης των σωληνώσεων, της άντλησης και των μέσων για τη διάθεση του χρησιμοποιούμενου νερού.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το νερό λιμνών ή ποταμών, αλλά σε περίπτωση χαμηλών χειμερινών θερμοκρασιών, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο πρέπει να είναι περιορισμένη, για να εμποδιστεί το πάγωμα του εναλλάκτη. Σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές, το νερό που εκκενώνεται από διάφορες διαδικασίες, για παράδειγμα από πλυντήρια ή από συμπυκνωτές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμική πηγή σε ειδική εγκατάσταση αντλίας.

Λόγω του υψηλού κόστους χρήσης νερού από το δημόσιο δίκτυο, συχνά προτιμάται νερό από ιδιωτικές αντλήσεις. Σε αυτή την περίπτωση, προκύπτουν αρκετές δαπάνες λειτουργίας, όπως είναι η συντήρηση των αντλιών φρεατών, οι αποχετεύσεις του απορριπτόμενου νερού κλπ.

Επίσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση νερού λίμνης, ποταμού ή ακόμα και θάλασσας (έχει ήδη εφαρμοσθεί σε παραθαλάσσια ξενοδοχεία). Στην τελευταία περίπτωση, πρέπει να μελετηθεί με ιδιαίτερη προσοχή ο τρόπος της υδροληψίας, γιατί αφενός μεν οι θαλάσσιοι οργανισμοί κλείνουν συχνά τις εισόδους των σωληνών, αφετέρου δε η αναρρόφηση της άμμου μαζί με το νερό, προκαλεί προβλήματα φθοράς στις αντλίες και στους εναλλάκτες του συστήματος.

2.6.3 Έδαφος

Το έδαφος χρησιμοποιείται σπάνια ως ψυχρή πηγή με εναλλάκτες θερμότητας τοποθετημένους εντός του υπεδάφους (θαμμένες σερπαντίνες). Αυτό οφείλεται στα μεγάλα έξοδα εγκατάστασης, στην αναγκαιότητα διάθεσης κάποιας επιφάνειας και στην αβεβαιότητα των προβλέψεων για τις επιδόσεις.

Η σύνθεση του εδάφους είναι μεταβλητή, αφού μπορεί να ποικίλει από υγρή άργιλο μέχρι άμμο. Αυτό έχει μεγάλη επιρροή στις θερμικές ιδιότητες και συνεπώς στις γενικές επιδόσεις. Οι μέσες θερμοκρασίες του εδάφους ακολουθούν περίπου τη μέση ετήσια κλιματική θερμοκρασία. Γενικά, οι σερπαντίνες στο έδαφος ακολουθούν περίπου τη μέση ετήσια κλιματική θερμοκρασία. Γενικά, οι σερπαντίνες στο έδαφος απέχουν οριζόντια 1-2 μέτρα μεταξύ τους και θάβονται σε βάθος 1-2 μέτρων.

Η πηγή αυτή παρουσιάζει δύο βασικά προβλήματα, Το πρώτο είναι η συντήρηση του στοιχείου και την αντιμετώπιση της διάβρωσης και των διαρροών και το δεύτερο η απαιτούμενη μεγάλη έκταση για την παραλαβή και απόρριψη της θερμότητας στο έδαφος.

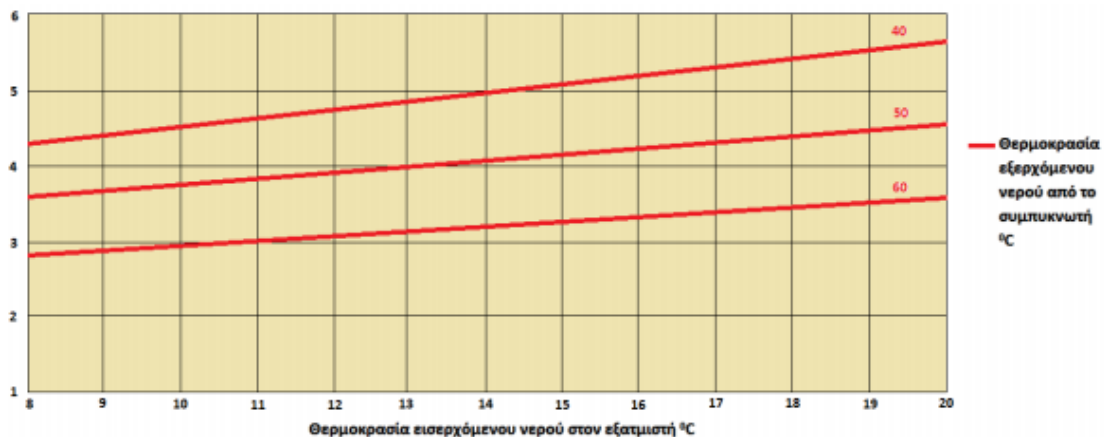
Τελευταία, ερευνητές έχουν αξιοποιήσει τη μεγάλη θερμοχωρητικότητα που παρουσιάζει το έδαφος και γενικότερα ο υπεδαφικός χώρος ο οποίος λειτουργεί παράλληλα και ως φυσικός αποθηκευτικός χώρος θερμικής ενέργειας (κυρίως ηλιογενούς προέλευσης) και φυσικά αυτό δύναται να δημιουργήσει σημαντική βελτίωση των συντελεστών λειτουργίας EER και COP μιας αντλίας θερμότητας. Σε συνδυασμό με την ανάγκη για μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων, τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και την παράλληλη εξέλιξη της τεχνολογίας για την αντιμετώπιση των διαβρώσεων και της έκτασης των συστημάτων, εφαρμόζονται παγκοσμίως μέθοδοι εκμετάλλευσης της υπόγειας ενέργειας τόσο για τη θέρμανση κτηρίων αλλά και του υπογείου χώρου για την αποθήκευση θερμότητας από τα κτήρια κατά την περίοδο του θέρους. Σήμερα, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των πλαστικών, το πρόβλημα των διαβρώσεων έχει επιλυθεί, με αποτέλεσμα η γη να αποτελεί μια σημαντική λύση στη χρήση της κανονικής γεωθερμίας.

2.6.4 Ηλιακή ενέργεια

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας ως πηγή θερμότητας, προκαλεί μεγάλο ενδιαφέρον. Το κύριο πλεονέκτημα της ως θερμική πηγή είναι ότι μπορεί να παρέχει θερμότητα σε υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνη των άλλων φυσικών πηγών. Η έρευνα και η ανάπτυξη των ηλιακών αντλιών θερμότητας κατευθύνθηκαν προς δύο βασικά συστήματα : το άμεσο και το έμμεσο. Στο άμεσο σύστημα, οι σωλήνες του ατμοποιητή είναι ενσωματωμένα σε έναν συνήθως επίπεδο ηλιακό συλλέκτη. Ανακαλύφθηκε ότι, όταν ο συλλέκτης δεν έχει γυάλινο κάλυμμα, η ίδια επιφάνεια μπορεί να χρησιμεύσει για να αφαιρεθεί θερμότητα από τον εξωτερικό αέρα. Η ίδια επιφάνεια μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί ως συμπυκνωτής, χρησιμοποιώντας τον εξωτερικό αέρα για τη διάθεση της θερμότητας που αφαιρείται κατά τον κύκλο ψύξης. Το σύστημα του έμμεσου τύπου χρησιμοποιεί ενδιάμεσο ρευστό, νερό ή αέρα, που κυκλοφορεί μέσα στον ηλιακό συλλέκτη μέχρι τον εναλλάκτη θερμότητας με το ψυκτικό. Σε όλα τα συστήματα αντλίας θερμότητας στα οποία η ηλιακή ενέργεια αποτελεί τη μοναδική ψυχρή πηγή, κατά τη διάρκεια των εποχών με ανεπαρκή ακτινοβολία απαιτείται ένα εναλλακτικό σύστημα θέρμανσης ή μια συσσώρευση θερμότητας.

2.7 Επιδόσεις λειτουργίας

Στη συνήθη λειτουργία οι αντλίες θερμότητας νερού-νερού προσφέρουν σταθερότητα επιδόσεων που είναι συνάρτηση της σταθερότητας της θερμοκρασίας της ψυχρής πηγής. Στην περίπτωση νερού γεώτρησης ή πηγαδιού, η παραγωγή θερμικής ισχύος διατηρείται σχεδόν σταθερή ακόμη και κάτω από αισθητές μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών. Η χαρακτηριστική πορεία του COP, σε φάση θέρμανσης, για διάφορες συνθήκες χρήσεις παρουσιάζεται στο σχήμα.



Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστική πορεία COP σε αντλία θερμότητας νερού-νερού [32]

Συνήθως διατηρείται διαφορά θερμοκρασίας 5K στο ψυχρό νερό που τροφοδοτεί την αντλία θερμότητας και στο θερμό νερό που παράγεται.

Οι επιδόσεις λειτουργίας των αντλιών θερμότητας αέρα-νερού επηρεάζονται άμεσα από τις μεταβολές της θερμοκρασίας ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα. Η θερμική ισχύς που παράγεται (και η ψυκτική στη φάση θερινού κλιματισμού) είναι για το λόγο αυτό μεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας και με την εποχή λειτουργίας. Γενικά, η πορεία παραγωγής της θερμικής ισχύος είναι αντίθετη με την πορεία της ζήτησης. Στις πιο χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, όταν η ζήτηση θέρμανσης είναι μεγαλύτερη, η συσκευή παράγει ανεπαρκή θερμική ισχύ, χαμηλότερη από την τιμή μελέτης. Κατά την επιλογή του μηχανήματος δε μπορεί να παραβλέπεται αυτή η χαρακτηριστική συμπεριφορά. Η επιλογή με βάση το χειμερινό θερμικό φορτίο της μελέτης μπορεί να γίνει αντισυμβατική, από πλευράς κόστους επένδυσης καθώς και κόστους λειτουργίας λόγω της υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας αφού θα προέκυπτε συσκευή υπερβολικών διαστάσεων, ως προς τη συνήθη ζήτηση, που θα ήταν αναγκασμένη για αυτό να λειτουργεί με αντισυμβατικές

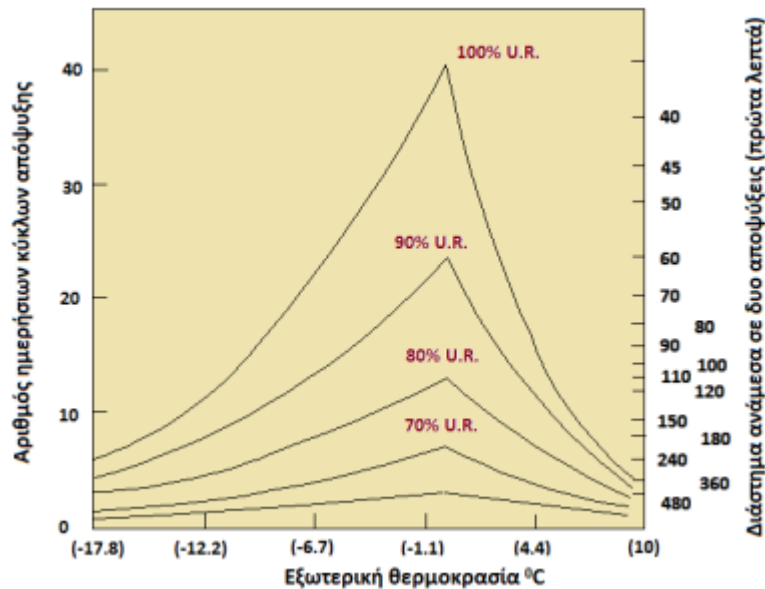
συνθήκες ρύθμισης. Για αυτό μπορεί να είναι, αντίθετα, δικαιολογημένη η δημιουργία βοηθητικού συστήματος θέρμανσης, αφήνοντας τη θέση του στην αντλία θερμότητας στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Στα μοντέρνα και καλά μονωμένα κτήρια γραφείων στα εμπορικά κέντρα και σε άλλες εφαρμογές του τριτογενούς τομέα οι απαιτήσεις θέρμανσης τείνουν συνεχώς να μειωθούν εξαιτίας των θερμικών φορτίων εσωτερικής προέλευσης και σε μερικές περιπτώσεις αυτό μπορεί να διευκολύνει την επιλογή της αντλίας θερμότητας χωρίς συμπληρωματικές πηγές θερμότητας.

Η χρήση των αντλιών θερμότητας αέρα-νερού είναι γενικά πιο δαπανηρή από εκείνη των αντλιών θερμότητας νερού-νερού. Πέρα από τις περισσότερο δυσχερείς συνθήκες λειτουργίας, λόγω των χαμηλοτέρων θερμοκρασιών εξάτμισης το χειμώνα, πρέπει να συνυπολογιστεί η απαιτούμενη από τους εξωτερικούς ανεμιστήρες ενέργεια καθώς και η ενέργεια που καταναλώνεται για την απόψυξη, διότι κατά τη φάση της ατμοποίησης του ψυκτικού, η εξωτερική μονάδα τείνει να καλυφθεί με πάχνη για θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα που κυμαίνονται από +5 έως 0°C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες το περιεχόμενο υγρασίας του αέρα δημιουργεί αποθέματα πάχνης σε επαφή με την πιο ψυχρή επιφάνεια της μονάδας. Η δημιουργία πάχνης μειώνει την επιφάνεια διέλευσης του αέρα από τη μονάδα και αναγκάζει τη συσκευή να λειτουργεί με όλο και χαμηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης που επιταχύνουν, με τη σειρά τους, τη διαδικασία σχηματισμού πάχνης. Ταυτόχρονα, με τον ίδιο ρυθμό μειώνεται η θερμική ισχύς που παράγεται, ενώ αντίθετα, αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας.

Η πραγματική πορεία του COP των αντλιών θερμότητας που χρησιμοποιούν εξωτερικό αέρα ως ψυχρή πηγή παρουσιάζεται μια έντονη πτώση σε αυτό το πεδίο θερμοκρασίας. Το συνηθέστερο σύστημα για την απόψυξη της εξωτερικής μονάδας συνίσταται σε μια στιγμιαία αντιστροφή του ψυκτικού κύκλου κατά την οποία το υπέρθερμο αέριο του συμπιεστή εισέρχεται στη μονάδα και προκαλεί το λιώσιμο της πάχνης. Αυτό το σύστημα ενεργοποιείται στις προαναφερθείσες κρίσιμες θερμοκρασίες του εξωτερικού αέρα, επαναλαμβάνεται σε σταθερά διαστήματα που επιλέγονται ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες του τόπου και έχει διάρκεια λίγων λεπτών. Ταυτόχρονα, οι εξωτερικοί ανεμιστήρες σταματούν. Στις αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα ο εσωτερικός ανεμιστήρας συνήθως παραμένει σε λειτουργία ενεργοποιώντας μια ηλεκτρική συμπληρωματική μονάδα για να προληφθεί η διανομή του ψυχρού αέρα στο περιβάλλον.

Ο αριθμός των κύκλων απόψυξης εξαρτάται κυρίως από το κλίμα του τόπου και από τις ώρες λειτουργίας. Αντιπροσωπεύει μια επιπλέον κατανάλωση ενέργειας που κυμαίνεται από 5 έως 10% της συνολικής κατανάλωσης της αντλίας θερμότητας. Στο παρακάτω

διάγραμμα παρουσιάζεται ο αριθμός των ημερήσιων κύκλων απόψυξης που μπορεί να χρειαστούν ανάλογα με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και τη σχετική υγρασία.



Σχήμα 2.6 Αριθμός ημερήσιων κύκλων απόψυξης ανάλογα με θερμοκρασία και υγρασία [32]

Επειδή ο συντελεστής απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας εξαρτάται κατά σημαντικό ποσοστό από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, δηλαδή του περιβάλλοντα αέρα ή της διαθέσιμης λιθογραφικής μάζας, η τιμή των συντελεστών λειτουργίας για ψύξη και θέρμανση (EER/COP) δεν είναι σταθερή.

Επίσης, επισημαίνεται ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας στο διάστημα 0 έως 30°C και όσο περισσότερο αυτή πλησιάζει τη θερμοκρασία χρήσης, τόσο υψηλότερος είναι και ο συντελεστής EER/COP. Συνεπώς, σε μια αντλία θερμότητας διακρίνονται :

- Ο παράγοντας EER/COP, που εκφράζει την απόδοση της αντλίας θερμότητας με καθορισμένες θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας. Από τον κατασκευαστή της αντλίας θερμότητας δίνεται η θεωρητική τιμή του EER/COP.
- Ο ετήσιος ή εποχιακός συντελεστής SCOP, που δίνεται από το λόγο της θερμικής ενέργειας, που παρήγαγε η αντλία θερμότητας, προς την ενέργεια που κατανάλωσε μέσα σε ένα έτος ή σε μια εποχή λειτουργίας θέρμανσης ή και ψύξης. Όταν διατίθενται μετρήσεις ορισμένων ετών λειτουργίας,

προσδιορίζεται ο μέσος ετήσιος συντελεστής συμπεριφοράς SCOP της αντλίας θερμότητας. Ο μέσος (αναγόμενος) εποχικός συντελεστής επίδοσης SCOP για τις περισσότερες περιοχές της χώρας είναι μεγαλύτερος από τον ονομαστικό COP, επειδή η μέση θερμοκρασία κατά τη χειμερινή περίοδο είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία αέρα ονομαστικής λειτουργίας που είναι 7°C. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς της ενεργειακής απόδοσης κτηρίου συνίσταται η χρήση του μέσου εποχικού συντελεστή επίδοσης των αντλιών θερμότητας.

- Ο μέσος εποχιακός συντελεστής συμπεριφοράς (SEER), όταν διατίθενται μετρήσεις ορισμένων μηνών λειτουργίας. Ο SEER είναι ο συνολικός συντελεστής απόδοσης της συσκευής, που ορίζεται ως ο λόγος της ετήσιας ανάγκης σε ψύξη προς τη συνολική ετήσια ενέργεια που καταναλώνεται για την ψύξη. Ο μέσος εποχικός δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας SEER είναι χαμηλότερος από τον ονομαστικό EER όταν η μέση θερμοκρασία στη διάρκεια της ημέρας κατά τη θερινή περίοδο είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία αέρα ονομαστικής λειτουργίας που είναι 35°C.
- Ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης SPF αναφέρεται στην απόδοση της αντλίας θερμότητας σε μια ολόκληρη εποχή. Η ισχύς εισόδου και εξόδου συσσωρεύονται για την εποχή. Τότε η συνολική ενέργεια εξόδου διαιρείται με τη συνολική ενέργεια εισόδου, για να δώσει το SPF δηλαδή : Συνολική ισχύς εξόδου (kWh) / Σύνολο εισροών ενέργειας (kWh) = SPF

Το SPF είναι μια καλή μέθοδος σύγκρισης της απόδοσης αντλιών θερμότητας, καθώς το ποσό αυτό δίνει μια πιο ακριβή εκτίμηση του κόστους λειτουργίας σε μια ολόκληρη περίοδο.

Ένας άλλος παράγοντας οικονομικής απόδοσης της αντλίας θερμότητας είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας, που μπορεί να παράγει κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από :

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

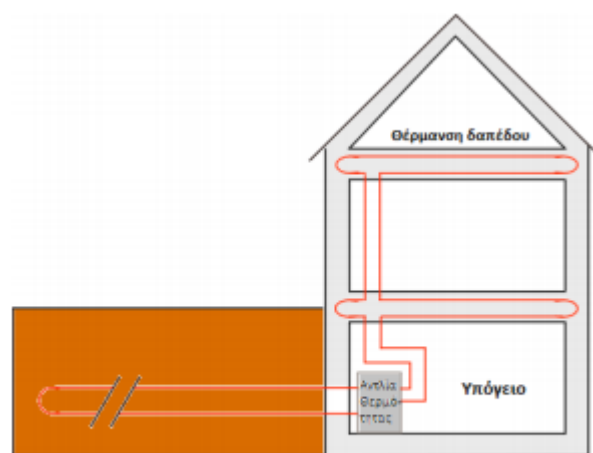
Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι ευνοϊκότεροι στην Ελλάδα, σε σχέση με τις χώρες της δυτικής και βόρειας Ευρώπης. Συνεπώς, τα κίνητρα για να αναπτυχθεί η χρήση αντλιών θερμότητας στην Ελλάδα είναι ισχυρότερα. Οι υπεδαφικές θερμοκρασίες του Ελληνικού

χώρου μπορούν να γίνουν γνωστές τόσο από τις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του αέρα, όσο και από άμεσες μετρήσεις, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε υπόγεια νερά.

2.8 Εφαρμογές αντλιών θερμότητας

2.8.1. Αντλία θερμότητας με θέρμανση δαπέδου

Η αντλία θερμότητας αντλεί θερμότητα από το έδαφος και θερμαίνει νερό (πχ σε 40°C) το οποίο στη συνέχεια κυκλοφορεί μέσα σε ενδοδαπέδιο σύστημα, που διαχέει τη θερμότητα προς το θερμαινόμενο χώρο εύκολα. Η ενδοδαπέδια θέρμανση, λειτουργεί με νερό χαμηλής θερμοκρασίας, από 30°C έως 45°C, που κυκλοφορεί σε σωλήνες εγκαθιστημένους στο δάπεδο. Το ζεστό νερό μεταφέρει θερμότητα στο θερμομοπετόν που περιβάλλει τους πλαστικούς σωλήνες και στη συνέχεια το δάπεδο ακτινοβολεί θερμότητα. Το έδαφος, σαν πηγή θερμότητας, έχει το πλεονέκτημα να διατηρεί ετησίως περίπου σταθερή θερμοκρασία.

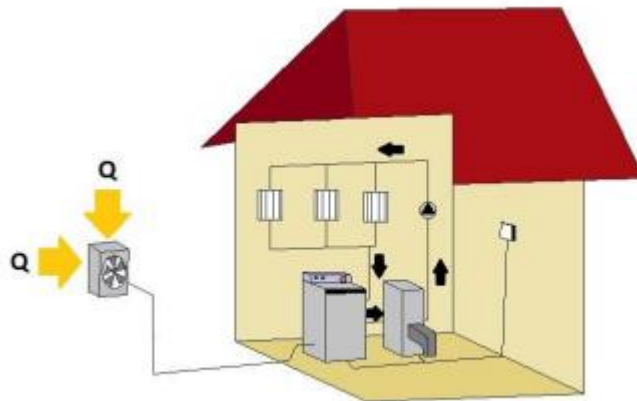


Σχήμα 2.7 Αντλία θερμότητας με θέρμανση δαπέδου [32]

2.8.2 Αντλία θερμότητας συζευγμένη με κεντρική θέρμανση

Σε υπάρχουσες κατοικίες που έχουν ήδη εγκατασταθεί λέβητες αερίου ή πετρελαίου, η αντλία θερμότητας, μπορεί να συνδυαστεί με το υπάρχον σύστημα θέρμανσης και να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης, σε όλη τη διάρκεια του έτους. Έτσι ο λέβητας, είτε

χρησιμοποιείται μόνο ως ενισχυτική – δευτερεύουσα πηγή κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών συνθηκών του χειμώνα, είτε μπορεί να αποξηλωθεί. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9 η αντλία θερμότητας έχει συνδεθεί σε σειρά με κεντρική θέρμανση, με σκοπό τη θέρμανση της κατοικίας. Η αντλία θερμότητας που είναι τύπου αέρα/νερού, λειτουργεί ως φορτίο βάσης, χωρίς η κεντρική θέρμανση να λειτουργεί. Όταν εμφανίζεται φορτίο αιχμής (πχ πολύ ψυχρή χειμερινή περίοδος), τότε η κεντρική θέρμανση μπαίνει σε λειτουργία για την κάλυψη του φορτίου αιχμής.



Σχήμα 2.8 Αντλία θερμότητας συζευγμένη με κεντρική θέρμανση [32]

2.9 Στοιχεία κόστους αντλίας θερμότητας

Η αντλία θερμότητας [28], εκμεταλλεζόμενη ποσά θερμότητας του φυσικού περιβάλλοντος, δίνει την οικονομικότερη λύση για τον κλιματισμό μεμονωμένων χώρων ή μικρών κτηρίων. Ειδικότερα, στη θέρμανση η αντλία θερμότητας είναι φθηνότερη από τη θερμοσυσσώρευση και ανταγωνίζεται τις μικρές εγκαταστάσεις του κλασσικού συστήματος θέρμανσης (καλοριφέρ). Ο έντονος ανταγωνισμός μεγάλων κατασκευαστών έχει ήδη υψηλούς βαθμούς απόδοσης στις αντλίες θερμότητας. Συνοπτικά, μπορούν να καταγραφούν τα ακόλουθα :

- Το κόστος της αρχικής εγκατάστασης μιας αντλίας θερμότητας, είναι μεγαλύτερο από αυτό των συμβατικών εγκαταστάσεων θέρμανσης.
- Το κόστος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας εξαρτάται μόνο από την κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό είναι αισθητά χαμηλότερο από το σημερινό κόστος λειτουργίας και συντήρησης μιας μικρής εγκατάστασης θέρμανσης, με αποτέλεσμα να ισοσκελίζεται σύντομα το μικτό κόστος (λειτουργίας και αρχικής εγκατάστασης)

προς το αντίστοιχο των συμβατικών εγκαταστάσεων θέρμανσης σε πολλές περιπτώσεις.

- Δε συμβάλλει στη ρύπανση του περιβάλλοντος. Ο βαθμός απόδοσης των αντλιών θερμότητας σε κάθε περίοδο είναι κατά πολύ υψηλότερος από αυτό των εγκαταστάσεων λεβήτων με αποτέλεσμα τη μειωμένη ρύπανση περιβάλλοντος.
- Η εγκατάσταση δεν απαιτεί μεγάλους χώρους.
- Η εγκατάσταση έχει την ικανότητα να ψύχει ή να θερμαίνει ένα χώρο, ανάλογα με τις απαιτήσεις του καταναλωτή, πράγμα που δεν προσφέρουν οι κοινές εγκαταστάσεις θέρμανσης.
- Για ήπια κλίματα, σαν αυτό της Ελλάδας, η αντλία θερμότητας παρουσιάζει υψηλό συντελεστή επίδοσης COP και EER
- Σε μεγάλες εγκαταστάσεις αντλιών θερμότητας, η κίνηση δίνεται από μία μηχανή λ.χ. πετρελαιοκινητήρας. Στην περίπτωση αυτή, ο βαθμός απόδοσης μεταξύ της καύσης του πετρελαίου και της θερμικής απόδοσης της αντλίας, είναι σημαντικά υψηλότερος από αυτόν που περιλαμβάνει τις σοβαρές απώλειες παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, της ηλεκτροκινούμενης αντλίας θερμότητας.
- Τα μεγάλα πλεονεκτήματα της αντλίας θερμότητας, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι εκμεταλλεύεται πάρα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, δείχνουν πως θα αποτελέσει ένα σοβαρό αντίπαλο, για οποιοδήποτε άλλο σύστημα θερμάνσεων στο μέλλον.

2.10 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

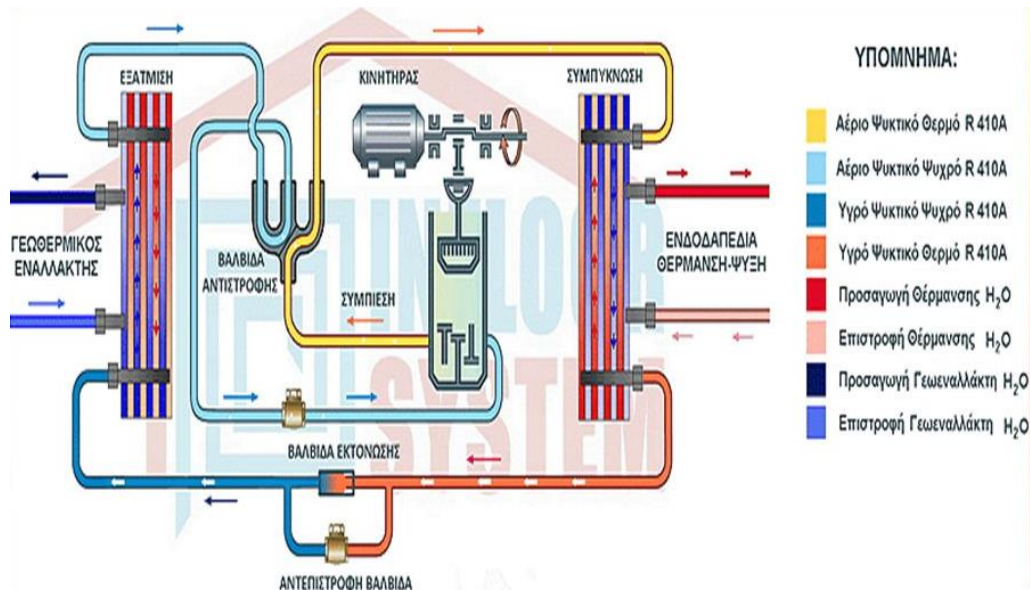
Η γεωθερμική αντλία θερμότητας (Ground Source Heat Pump, GSHP) ορίζεται ως η αντλία θερμότητας η οποία εκμεταλλεύεται ως πηγή τη θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δεν χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό, με σκοπό τη θέρμανση ή και την ψύξη χώρων ή/και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και χρησιμοποιούν ψυκτικό μέσο, το οποίο είναι πιστοποιημένο για τη φιλικότητα που παρουσιάζει προς το περιβάλλον.

Τα συστήματα Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ), τα οποία χρησιμοποιούνται για θέρμανση /ψύξη και παραγωγής ζεστού νερού χρήσης (ZNX), αποτελούνται από το σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός εδάφους (εναλλάκτης εδάφους ή υδρογεώτρηση) τη γεωθερμική αντλία θερμότητας και το σύστημα θέρμανσης-ψύξης

χαμηλής θερμοκρασίας εντός κτηρίου. Τα συστήματα ΓΑΘ αξιοποιούν την πρακτικά σταθερή θερμοκρασία του εδάφους οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ηλεκτρικής και πρωτογενούς ενέργειας και μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση τους.

Με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, αξιοποιείται η καλούμενη περιβαλλοντική θερμική ενέργεια, δηλαδή αυτή που περιέχεται στις μάζες του άμεσου περιβάλλοντος του κτηρίου, δηλαδή τις αέριες, στις υδάτινες και στις εδαφικές-υπεδαφικές (λιθογραφικές). Η αξιοποίηση της κανονικής γεωθερμικής ενέργειας αποτελεί μεταξύ άλλων αποδοτική εφαρμογή σε συστήματα κλιματισμού κτηρίων (θέρμανση-δροσισμός), σε παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, σε εφαρμογές στη γεωργία, στην ιχθυοκαλλιέργεια και σε οικονομικά ελκυστικά συστήματα αφαλάτωσης νερού. Η εφαρμογή συστημάτων θέρμανσης-ψύξης χώρων με χρήση της θερμότητας των πετρωμάτων και του υπογείου νερού, παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα.

Ένα γεωθερμικό σύστημα αξιοποιεί την εντός του εδάφους υπάρχουσα σταθερή θερμοκρασία. Έτσι το χειμώνα, ένα ρευστό που κυκλοφορεί στον γεωθερμικό εναλλάκτη απορροφά τη θερμότητα του εδάφους και μέσω της αντλίας θερμότητας την αποδίδει στο κτήριο. Το θέρος λειτουργώντας αντίστροφα, απάγει τη θερμότητα από το κτήριο και μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη την αποδίδει στο δροσερότερο έδαφος. Με δεδομένο το σταθερό ενεργειακό δυναμικό που παρουσιάζεται, τόσο στα πετρώματα μικρού βάθους, όσο και στα νερά του υδροφόρου ορίζοντα, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων εξασφαλίζει οικονομικότερη λειτουργία, έως και 60%, ανάλογα με το αν πρόκειται για θέρμανση ή ψύξη αντίστοιχα.



Σχήμα 2.9 Γεωθερμική αντλία θερμότητας [32]

Ένα σύστημα ΓΑΘ αποτελείται από :

- Σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός του εδάφους, το οποίο είναι είτε γεωεναλλάκτης θερμότητας είτε υδρογεώτρηση.
- Γεωθερμική αντλία θερμότητας.
- Σύστημα θέρμανσης/ψύξης χαμηλών θερμοκρασιών εντός του κτηρίου.

Το σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός εδάφους μπορεί να είναι κλειστό είτε ανοικτό. Στο κλειστό κύκλωμα, οι γεωεναλλάκτες θερμότητας είναι είτε οριζόντιοι, δηλαδή σωλήνες εντός του εδάφους σε οριζόντια διάταξη μέσα σε τάφρους, σε βάθος 1,2-2,0 m ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες, είτε κατακόρυφοι (Borehole Heat Exchangers – BHEs), δηλαδή σωλήνες εντός του εδάφους σε κατακόρυφη διάταξη μέσα σε γεωτρήσεις (boreholes). Στο ανοικτό κύκλωμα το νερό αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από την παραγωγική γεώτρηση και επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής.

Οι ΓΑΘ [29] είναι αντλίες θερμότητας κυρίως νερού-νερού και χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και την ψύξη κτηρίων, όπως επίσης και για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Τα βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται μια ΓΑΘ είναι ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής, ο ατμοποιητής, η βαλβίδα εκτόνωσης. Τις περισσότερες φορές η ΓΑΘ είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε το ίδιο το μηχάνημα να μπορεί να λειτουργήσει και σε συνθήκες θέρμανσης αλλά και σε συνθήκες ψύξης. Βασικό χαρακτηριστικό για την ορθή λειτουργία μιας ΓΑΘ είναι η επιλογή του ψυκτικού μέσου το οποίου εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας του μηχανήματος. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι : να μην είναι

τοξικό, εύφλεκτο και να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες της εφαρμογής. Ψυκτικά ρευστά τα οποία συγκεντρώνουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ άλλων τα R134a,R407c,R410 και R410a.

Οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται στις ΓΑΘ είναι συνήθως σπειροειδείς (scroll) με ρύθμιση on-off ή συμπιεστές μεταβλητής ισχύος και ως ψυκτικά υγρά χρησιμοποιούνται τα R407c ή R134a με την τάση να αντικατασταθούν από το R410a, το οποίο έχει καλύτερες ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας και καλύτερη απόδοση σε αναστρέψιμα συστήματα για λειτουργία θέρμανσης/ψύξης. Ήδη έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται και συμπιεστές μεταβλητής ισχύος. Αυτό βεβαίως δεν επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση λόγω της ελάχιστης (περίπου μηδενικής) επίδρασης των συνθηκών του περιβάλλοντος στην απόδοσή τους. Η βελτίωση σχετίζεται κυρίως με τον τρόπο χρήσης των εγκαταστάσεων και με τον αυτές είναι συνολικής ή μερικής χρήσης.

Η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων ΓΑΘ ενισχύεται όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος ψύξης οδηγούν σε καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Τα συστήματα χαμηλών θερμοκρασιών είναι το ενδοδαπέδιο σύστημα, το ενδοτοιχίο σύστημα, τα fan-coils, οι κεντρικές κλιματιστικές μονάδες και τα συστήματα οροφής.

Σημαντικό ρόλο στην απόδοση ενός συστήματος έχει και η κλιματική ζώνη όπου είναι εγκατεστημένο. Στην Ελλάδα, για ήπιες κλιματικά περιοχές, όπως είναι αυτές που ανήκουν στην κλιματική Ζώνη Α, η απόδοση των συστημάτων ΓΑΘ είναι μεγαλύτερη κατά την περίοδο θέρμανσης, όμως σε αυτές τις περιοχές η περίοδος θέρμανσης έχει μικρή διάρκεια. Αντιθέτως, στις ψυχρότερες περιοχές (Κλιματικές Ζώνες Γ και Δ) τα συστήματα έχουν μικρότερο COP για την ίδια ισχύ συστήματος ΓΑΘ, ενώ η περίοδος θέρμανσης είναι σαφώς μεγαλύτερη. Στις παραπάνω περιπτώσεις τα συστήματα ΓΑΘ με υψηλή απόδοση έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας για θέρμανση και ψύξη χώρων, αλλά και τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Ο συντελεστής COP των ΓΑΘ ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης ενέργειας προς την ηλεκτρική κατανάλωση και αφορά σε μια συγκεκριμένη στιγμή, ή συνθήκες. Ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης SPF είναι το ολοκλήρωμα του COP κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης. Τυπικές τιμές των COP για συνδυασμό της αντλίας θερμότητας με γεωεναλλάκτη θερμότητας και ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης είναι μεταξύ 3,5 και 5,0. Στην περίπτωση που η αντλία θερμότητας συνδέεται με ανοικτό σύστημα δηλαδή με υδρογεώτρηση, οι τυπικές τιμές των COP είναι μεταξύ 4,0 και 6,5.

2.10.1 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (εγκατεστημένη ισχύς και προβλέψεις)

Το σύστημα μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας (ΓΑΘ) [30] περιλαμβάνει τρία κύρια υποσυστήματα το υποσύστημα σύνδεσης υπεδάφους, γνωστό και ως γεωεναλλάκτης, το υποσύστημα αντλίας θερμότητας, ο μηχανολογικός εξοπλισμός και το υποσύστημα διανομής θερμικής ενέργειας στις κτιριακές εγκαταστάσεις.

Η πρώτη εμφάνιση των ΓΑΘ ήταν τη 10ετία του 1980, όμως τα τελευταία 20 έτη η εξέλιξή τους ήταν ραγδαία. Η εξοικονόμηση ενέργειας με τις ΓΑΘ κυμαίνεται 50-60% σε σχέση με τη χρήση πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της International Geothermal Association (2010) η εγκατεστημένη ισχύς των ΓΑΘ παγκοσμίως το 2000 ήταν 5.000MW, ενώ το 2010 ανήλθε στα 35.000MW (7πλάσια). Στην Ε.Ε. περίπου το 40% της ενέργειας που καταναλώνεται αφορά τη θέρμανση/ψύξη των κτηριακών εγκαταστάσεων, ενώ στην Ελλάδα αφορά το 33% που για αρκετά έτη καλύπτεται από τα συμβατικά καύσιμα. Στην Ε.Ε το 1995 ήταν 1.000MW, ενώ το 2010 ανήλθε στα 12.000MW (άνω του 30% παγκοσμίως) με περίπου 1.000.000 μονάδες εφαρμογής ΓΑΘ. (Σουηδία 33%, Γερμανία 19%, Αυστρία, Ελβετία, κλπ), ενώ οι χώρες της Ν. Ευρώπης (Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία, Γαλλία) υπολείπονται αισθητά καλύπτοντας μόλις το 18%.

Στην Ελλάδα η εγκατεστημένη ισχύς των ΓΑΘ το 2010 ήταν της τάξης των 70MW με περίπου 360 μονάδες εφαρμογής ΓΑΘ. Μια πιθανή εκτίμηση της ΕΗΡΑ αναφέρει ότι, εάν 70 εκατομμύρια νέα συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας εγκατασταθούν στην Ευρώπη μέχρι το 2020, θα συνεισφέρουν πέραν του 20% του στόχου εξοικονόμησης ενέργειας της ΕΕ από τις ανανεώσιμες πηγές και κατά 20% μείωσης των εκπομπών CO₂.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας είναι σήμερα η ταχύτερα μακροπρόθεσμα αναπτυσσόμενη εφαρμογή άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας σε σχέση με τις άλλες μορφές της (τηλεθέρμανση, αγροτική, βιομηχανική, κλπ), όπου η αύξηση είναι σχετική, με περίπου 3.000.000 ΓΑΘ να έχουν εγκατασταθεί στις αρχές του 2010 παγκοσμίως. Μακροπρόθεσμα από το 2010 έως το 2100 οι ΓΑΘ θα αυξηθούν ενδεικτικά κατά 45πλάσιο (από 35GWth στα 1600GWth), ενώ οι άλλες μορφές άμεσης χρήσης αθροιστικά θα αυξηθούν μόνο κατά το 10πλάσιο (από 16GWth στα 150GWth)

Το 2010 στις εφαρμογές της άμεσης χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας κυριαρχούν, αφού η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς τους ανήλθε σε 35.236MWth (70% του συνόλου της άμεσης χρήσης 50.583MWth), ενώ η ετήσια

παραγωγή θερμικής ενέργειας ανήλθε σε 214.872TJ/έτος (49% του συνόλου της άμεσης χρήσης 438.071TJ/έτος) μειωμένη λόγω του μικρότερου συντελεστή ικανότητας 0,19.

Ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος των ΓΑΘ κατά τη 15ετία 1995-2010 θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ‘εκθετικός’, αφού αυξήθηκε στο 18πλάσιο.

Για την εγκατάσταση ΓΑΘ με ένα μέσο συντελεστή απόδοσης COP=3,5 το ελάχιστο μέγεθος ισχύος είναι 5,5KW για μικρές οικίες ενώ το όριο χαρακτηρισμού μιας μονάδας μικρής ή μεγάλης είναι το θερμικό φορτίο των 30KW. Ο μέσος αριθμός των ωρών λειτουργίας πλήρους φορτίου που χρησιμοποιείται διεθνώς είναι 2.200 ώρες ετησίως με ένα μέσο συντελεστή ικανότητας 0,25. Όμως αυτός ποικίλει έντονα ανάλογα τη γεωγραφική θέση, όπως στις Σκανδιναβικές χώρες (6.000 ώρες με αρκετά μεγάλο συντελεστή ικανότητας 0,68). Στην Ελλάδα κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες (συντελεστής ικανότητας 0,12-0,23) ανάλογα τη γεωγραφική θέση (Β. Ελλάδα, Αττική, Ν. Ελλάδα, κλπ), όπου υπάρχει αυξομείωση στο χρόνο θερμικής και ψυκτικής χρήσης.

Οι μεγαλύτερες αυξητικές τάσεις εφαρμογής ΓΑΘ εμφανίζονται στις ΗΠΑ και στην Βόρεια Ευρώπη (Σουηδία, Νορβηγία, Γερμανία, Ισλανδία, Ολλανδία, Ελβετία, Αυστρία, Φιλανδία, κλπ). Η ευρωπαϊκή αγορά των ΓΑΘ αναμένεται να βιώσει τη συνεχιζόμενη ισχυρή ανάπτυξη που οφείλεται σε μια ποικιλία της ενεργειακής απόδοσης και των στόχων της προστασίας του κλίματος και τις πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των οργανώσεων των ενδιαφερόμενων μερών. Η Ελβετία διαθέτει πάνω από 30.000 μονάδες ΓΑΘ, όπως και η Σουηδία και οι ΗΠΑ (EERE,2009).

Κεφάλαιο 3

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Σχήμα 3 Γεωθερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής [34]

Οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εγκαθίστανται μόνο στην περίπτωση των γεωθερμικών πεδίων για θερμοκρασίες ρευστών άνω των $\pm 100^{\circ}\text{C}$ (π.χ. για 100°C και 50bar η ενθαλπία του ρευστού είναι $422,72\text{KJ/Kg}$), όπου η υγρή (νερό και η αέρια (ατμός) φάση έχουν την ίδια χημική σύσταση. Στα περισσότερα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας και σε όλα τα πεδία μέσης ενθαλπίας το ρευστό στον ταμιευτήρα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση (νερό), αφού συνήθως η θερμοκρασία του είναι μικρότερη της θερμοκρασίας ζέσεως του στην υφιστάμενη πίεση του ταμιευτήρα. Κατά την εκτέλεση μιας γεώτρησης το γεωθερμικό ρευστό (νερό) θα εισέλθει στη γεώτρηση, όπου στον πυθμένα ή σε κάποιο βάθος της θα διαχωριστεί σε δύο φάσεις υγρή και αέρια ως υγρός ατμός (νερό + ατμός), λόγω απότομης πτώσης της πίεσης και επομένως της θερμοκρασίας ζέσεως, με συνέπεια την εμφάνιση διφασικής ροής ρευστών στη σωλήνωση της γεώτρησης. Με την εκτέλεση της γεώτρησης μέχρι το βάθος του ταμιευτήρα και τη στεγανοποίηση

(τσιμέντωση) των σωληνώσεων με τους υπερκείμενους σχηματισμούς, ο γεωθερμικός ταμιευτήρας, η γεώτρηση και οι διαχωριστές της μονάδας αποτελούν ένα ενιαίο υδραυλικό σύστημα. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση του ρυθμού ροής των ρευστών κατά την άντληση με βάση τα σταθερά δεδομένα του ταμιευτήρα για την επίτευξη της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας.

Οι μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας του ρευστού επηρεάζουν την ενθαλπία και την ποιότητα του ατμού, που με τη σειρά τους προσδιορίζουν την παραγωγική ικανότητα του ταμιευτήρα και κατ' επέκταση την ισχύ της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Προς τούτο κατά τη διάρκεια των δοκιμών παραγωγής σε μια γεωθερμική γεώτρηση μέσης ή υψηλής ενθαλπίας μετρούνται η ροή του ρευστού (συνολικός μαζικός αριθμός ροής), το ενεργειακό περιεχόμενο του και τα χαρακτηριστικά του. Για το σχεδιασμό του τύπου, του μεγέθους και της παραγωγής των γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής εμπλέκονται επίσης και διάφοροι δείκτες γεωθερμικής παραγωγής, όπως ο συντελεστής ικανότητας, ο συντελεστής διαθεσιμότητας, ο συντελεστής θερμικής ανάκτησης και ο συντελεστής μετατροπής ή η απόδοση μετατροπής. Μια γεωθερμική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνει τα πιο κάτω τμήματα :

- Τις γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής
- Τις επιφανειακές εγκαταστάσεις και υποδομές : Περιλαμβάνουν τους σταθμούς συγκέντρωσης του ατμού και της άλμης (διαχωριστές), τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής (σωληνώσεις) των γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις παραγωγής στους διαχωριστές και στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και τα δίκτυα απομάκρυνσης (σωληνώσεις) των γεωθερμικών ρευστών μετά τη θερμική αξιοποίηση τους στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής.
- Τα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας : Η μονάδα μετατροπής της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική περιλαμβάνει αμοστρόβιλους, ηλεκτρογεννήτριες, συμπυκνωτές, διαχωριστές, αντιρρυπαντικά συστήματα, πύργοι ψύξης, εναλλάκτες, κλπ.

Οι τύπο των μονάδων αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή είναι :

- Μονάδες ξηρού ατμού (Dry steam power plants)
- Μονάδες υγρού ατμού (Flash steam power plants)

- Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary power plants)
- Μονάδες συνδυασμένου κύκλου ή υβριδικού τύπου (Combined cycle or hybrid power plants)
- Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με βάση τη γεωθερμική ενέργεια (Geothermal-based combined heat and power plants or Combined heat and power plants based on geothermal energy, CHP)
- Μονάδες βελτιωμένων γεωθερμικών συστημάτων (Enhanced Geothermal Systems, EGS)

Στα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας το θερμοδυναμικό σύστημα από τον ταμιευτήρα (είσοδος του γεωθερμικού ρευστού στη σωλήνωση της γεώτρησης) μέχρι την έξοδο του στον ατμοστρόβιλο είναι ένα ανοικτό θερμοδυναμικό σύστημα με σταθερό όγκο και σταθερό ρυθμό ροής μάζας γεωθερμικού ρευστού. Είναι γενικά αδιαβατικά μονωμένο σύστημα, όπου δεν γίνεται μεταφορά θερμότητας από ή προς το σύστημα (αδιαβατική διεργασία).

3.1 Τύποι γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Ο εξοπλισμός επιφάνειας μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής διαχειρίζεται ατμό ή νερό ή νερό και ατμό, που αποτελούνται από δίκτυα σωληνώσεων, διαχωριστές, εναλλάκτες, τουρμπίνες, πύργους ψύξης, κλπ, ανάλογα τον τύπο της μονάδας. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της μονάδας απαιτεί τη γνώση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα. Η διάταξη μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας περιλαμβάνει τα πιο κάτω επιμέρους βασικά τμήματα, που συνδέονται μεταξύ τους δια μέσου του δικτύου σωληνώσεων μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών :

- Τις γεωτρήσεις παραγωγής (production wells)
- Τους σταθμούς διαχωρισμού του υγρού ατμού (separation station)
- Τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (power plant)
- Τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής (re-injection wells)

3.1.1 Εξοπλισμός μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής

Αποτελείται από τις επιφανειακές εγκαταστάσεις και υποδομές και το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας :

- Επιφανειακές εγκαταστάσεις και υποδομές : Περιλαμβάνουν τους σταθμούς συγκέντρωσης του ατμού και της άλμης (διαχωριστές), τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής (σωληνώσεις) των γεωθερμικών ρευστών από τις γεωτρήσεις παραγωγής στους διαχωριστές και στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και τα δίκτυα απομάκρυνσης (σωληνώσεις) των γεωθερμικών ρευστών μετά τη θερμική αξιοποίησή τους στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος τους είναι ο χημισμός των γεωθερμικών ρευστών, οι τιμές των υλικών κατασκευής (χάλυβας, τσιμέντο), το ανάγλυφο της περιοχής (τοπογραφία), η πρόσβαση, η ευστάθεια των πρανών, η παραγωγικότητα των γεωτρήσεων, η διάμετρος και το μήκος των αγωγών και η πίεση, η θερμοκρασία και ο χημισμός των ρευστών μεταφοράς στις σωληνώσεις και στους διαχωριστές.
- Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας : Η μονάδα μετατροπής της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική περιλαμβάνει ατμοστρόβιλους, ηλεκτρογεννήτριες, συμπυκνωτές, διαχωριστές αντιρρυπαντικά συστήματα, πύργους ψύξης, εναλλάκτες, κλπ. Το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής εξαρτάται από τον τύπο του (υγρού ή ξηρού ατμού, δυαδικού, υβριδικού) και από το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιείται (πύργοι ψύξης νερού ή αέρα). Επίσης το κόστος επηρεάζεται από την ενθαλία και το χημισμό των ρευστών, τη θέση της εγκατάστασης, τη διαθεσιμότητα νερού για ψύξη και το μέγεθος της μονάδας (MW, το κόστος μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους). Οι δαπάνες για έργα επέκτασης της μονάδας κοστίζουν κατά 10-15% λιγότερο από τις αντίστοιχες δαπάνες για το νέο έργο δεδομένου ότι ήδη υπάρχουν επενδύσεις στον τομέα των υποδομών και της έρευνας.
- Η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται στις γεωθερμικές μονάδες ποικίλει ανάλογα με τον τύπο των γεωθερμικών ρευστών, τον τύπο της μονάδας (υγρού ή ξηρού ατμού ή υβριδικού) και τον τύπο των γεωθερμικών ρευστών, τον τύπο της μονάδας και τον τύπο του συστήματος επανεισαγωγής των αποβλήτων (άλμη) , αλλά κυρίως από τον τύπο του συστήματος ψύξης (υδρόψυκτος ή αερόψυκτος). Οι

μονάδες υγρού ατμού χρησιμοποιούν πολύ λιγότερο, ενώ οι μονάδες δυαδικού τύπου με αερόψυκτο σύστημα πύργου ψύξης δεν χρησιμοποιούν καθόλου νερό. Η κατανάλωση νερού κατά κύριο λόγο είναι συνάρτηση του υδρόψυκτου συστήματος του πύργου ψύξης (όταν δεν υπάρχει το αερόψυκτο σύστημα) αντικαθιστώντας κυρίως την ποσότητα του νερού που χάνεται εξαμιζόμενο στον πύργο ψύξης.

3.2 Τύποι μονάδων γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής χωρίζονται βασικά σε δυο κύριες ομάδες, στις μονάδες ατμού (υψηλής ενθαλπίας, steam cycles) και στις μονάδες δυαδικού τύπου (μέσης ενθαλπίας, binary cycles). Οι συνηθισμένοι τύποι γεωθερμικών συστημάτων διαφορετικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής είναι :

- Μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα (Single flash steam back-pressure power plants)
- Μονάδες ξηρού ατμού (Dry steam power plants)
- Μονάδες υγρού ατμού (Flash steam power plants) : Μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου (single flash steam power plants), μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου (double flash steam power plants), μονάδες υγρού ατμού τριπλού τύπου (triple flash steam power plants)
- Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary power plants) : Μονάδες δυαδικού τύπου Organic Rankine Cycle (ORC), μονάδες δυαδικού τύπου Kalina.
- Μονάδες συνδυασμένου κύκλου ή υβριδικού τύπου (Combined-cycle or hybrid power plants) : Υβριδικό σύστημα δύο μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου και μιας μονάδας δυαδικού τύπου, υβριδικό σύστημα δύο μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου και μιας μονάδας δυαδικού τύπου, υβριδικό σύστημα τριών μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου και δύο μονάδων δυαδικού τύπου.
- Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (Geothermal-based combined heat and power plants or Combined heat and power plants based on geothermal energy, CHP)
- Μονάδες βελτιωμένων γεωθερμικών συστημάτων (Enhanced Geothermal Systems, EGS).

- Μονάδες υπέρθερμων γεωθερμικών ρευστών (Supercritical hydrous fluids, 440-600°C). Η δυνατότητα μελλοντικής αξιοποίησης τους θα μπορούσε να αυξήσει την απόδοση μιας γεώτρησης πάνω και από το 10πλάσιο μειώνοντας αισθητά το κόστος παραγωγής.

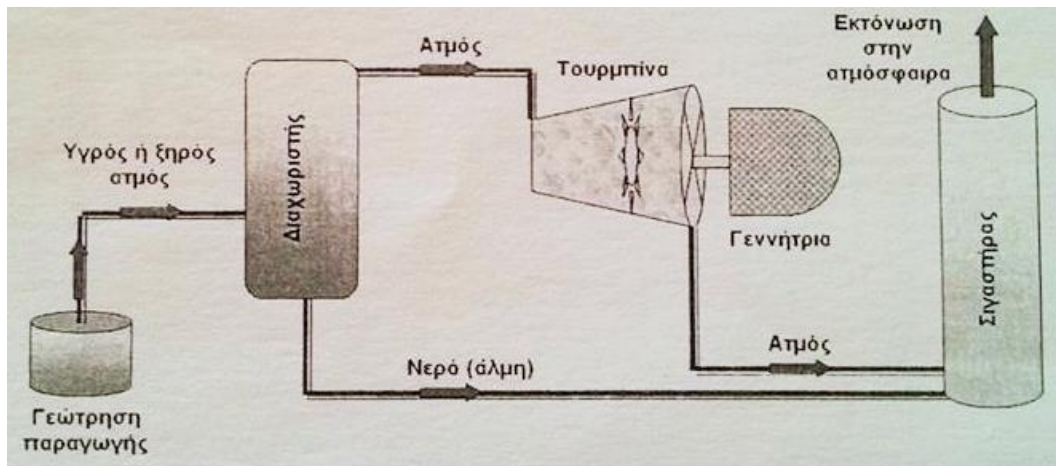
Μια ταξινόμηση των τύπων των μονάδων γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής με βάση το μέσο μέγεθος ισχύος ανά μονάδα είναι :

- Μικρό μέγεθος +5MWe/μονάδα : Δυαδικού τύπου και τύπου απευθείας εκτόνωσης
- Μεσαίο μέγεθος +30MWe/μονάδα : Απλού και διπλού τύπου υγρού ατμού
- Μεγάλο μέγεθος +45MWe/μονάδα : Τύπου ξηρού ατμού

3.2.1 Μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα (Back-pressure type)

Οι μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα είναι οι πιο απλές γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με αρκετά μικρότερο κόστος. Ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση παραγωγής υγρός ατμός διοχετεύεται πρώτα στο διαχωριστή, όπου ο μεν ατμός κατευθύνεται στον αμοστρόβιλο η δε άλμη στη γεώτρηση επανεισαγωγής. Δεν διαθέτουν συμπυκνωτή και πύργους ψύξης και ο εξερχόμενος ατμός από τον αμοστρόβιλο εκτονώνεται απευθείας στην ατμόσφαιρα δια μέσου ενός σιγαστήρα. Είναι μικρού μεγέθους (μερικών MWe), που τροφοδοτούνται από μεμονωμένες γεωτρήσεις με μειωμένη απόδοση ισχύος της τάξης του 50-60% της αντίστοιχης με συμπυκνωτή και πύργους ψύξης. Καλύπτουν αρκετά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (200-320°C) των γεωθερμικών ρευστών. Αν και δεν συνηθίζεται η αυτόνομη εφαρμογή τους υπάρχουν ειδικά στο Μεξικό από το 1980 μερικές μονάδες των 5MWe λειτουργούν ακόμη με επιτυχία. Βασικά χρησιμοποιούνται ως δοκιμαστικές μονάδες κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των γεωθερμικών πόρων μιας περιοχής και σε υβριδικά συστήματα.

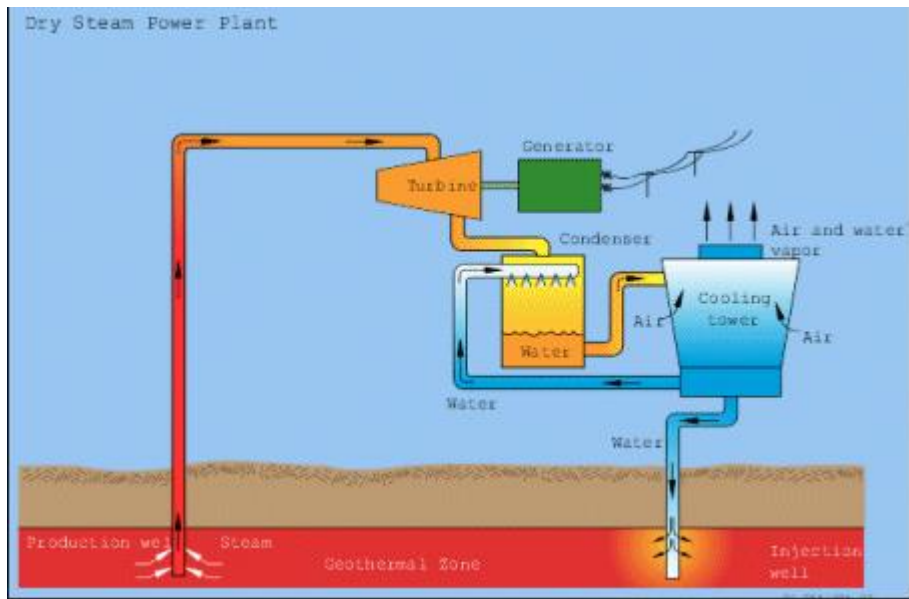
Ο όρος ‘back pressure’ χρησιμοποιείται επειδή στον τύπο αυτό της μονάδας η πίεση (>1bar) του εξερχόμενου ατμού από τον αμοστρόβιλο, που ρυθμίζεται από μια βαλβίδα με απευθείας εκτόνωση στην ατμόσφαιρα, είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πίεση (0,06-0,15bar) στον τύπο της μονάδας με συμπυκνωτή και εκτόνωση στον πύργο ψύξης. Προς τούτο στις μονάδες αυτές η απαιτούμενη κατανάλωση ατμού για ίδια παραγόμενη ισχύ είναι σχεδόν διπλάσια από εκείνη για μονάδες με συμπυκνωτή με την ίδια πίεση εισόδου του ατμού στον αμοστρόβιλο.



Σχήμα 3.1 Διάταξη μονάδας απευθείας εκτόνωσης (back-pressure type) [31]

3.2.2 Μονάδες ξηρού ατμού (dry steam type)

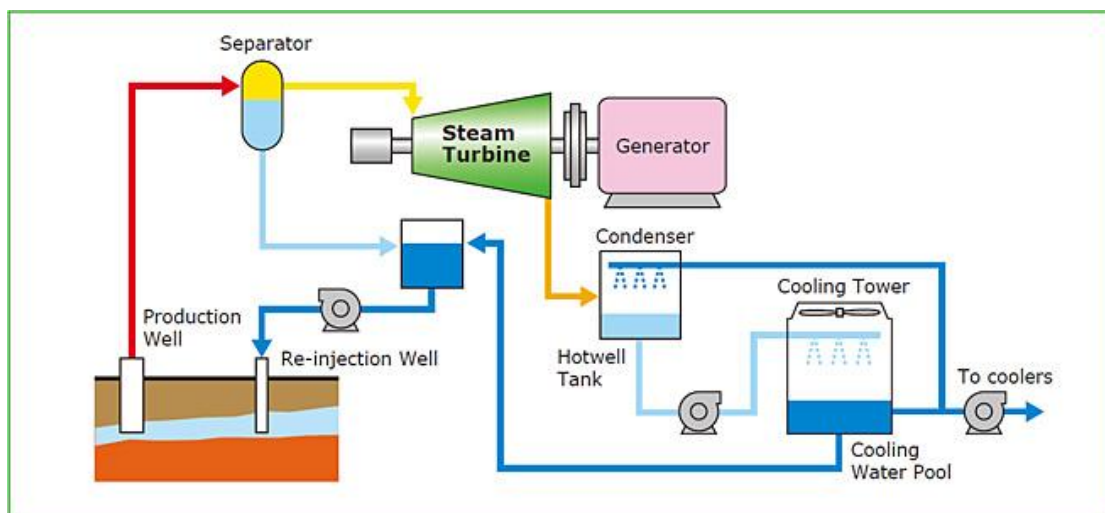
Μόνο τα γεωθερμικά πεδία στο Larderello της Ιταλίας και στο Geysers στις ΗΠΑ παράγουν ξηρό ατμό. Στις μονάδες ξηρού ατμού ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση ξηρός ατμός διοχετεύεται απευθείας στον αμοστρόβιλο εκτός και αν υπάρχουν υδρατμοί οπότε τοποθετείται πριν την είσοδο του ατμού στον αμοστρόβιλο (τουρμπίνα) ένας διαχωριστής αφαίρεσης υγρασίας ατμού (moisture remover separator). Το δημιουργούμενο συμπύκνωμα (ή άλμη) στον συμπυκνωτή από τον εξερχόμενο ατμό του αμοστροβίλου τμήμα ή όλο είτε επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής σε κλειστό κύκλωμα, είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα διαμέσου του πύργου ψύξης. Στην περίπτωση αυτή οι αμοστρόβιλοι είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν, συγκριτικά με τους άλλους τύπους μονάδων, σε χαμηλότερες πιέσεις και αρκετά μεγαλύτερες παροχές ατμού, χρησιμοποιώντας και συμπυκνωτές. Το τυπικό μέγεθος τέτοιων μονάδων ξηρού ατμού είναι 50-60MWe, αν και πρόσφατα έχουν τεθεί σε λειτουργία μονάδες της τάξης των 110MWe.



Σχήμα 3.2 Διάταξη μονάδας ξηρού ατμού (dry steam type) [31]

3.2.3 Μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου (Single flash steam type)

Το μεγαλύτερο μέρος της γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο παράγεται από μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου. Ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση παραγωγής υγρός ατμός διοχετεύεται πρώτα στο διαχωριστή, όπου ο μεν ατμός διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο η δε άλμη (συμπιεσμένο νερό) στη γεώτρηση επανεισαγωγής. Μετά την έξοδο του ατμού από τον ατμοστρόβιλο διοχετεύεται προς το συμπυκνωτή, όπου το δημιουργούμενο συμπύκνωμα είτε επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής σε κλειστό κύκλωμα, είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα από τον πύργο ψύξης. Το τυπικό μέγεθος τέτοιων μονάδων υγρού ατμού είναι 2 – 45MWe.



Σχήμα 3.3 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου (single flash steam type) [31]

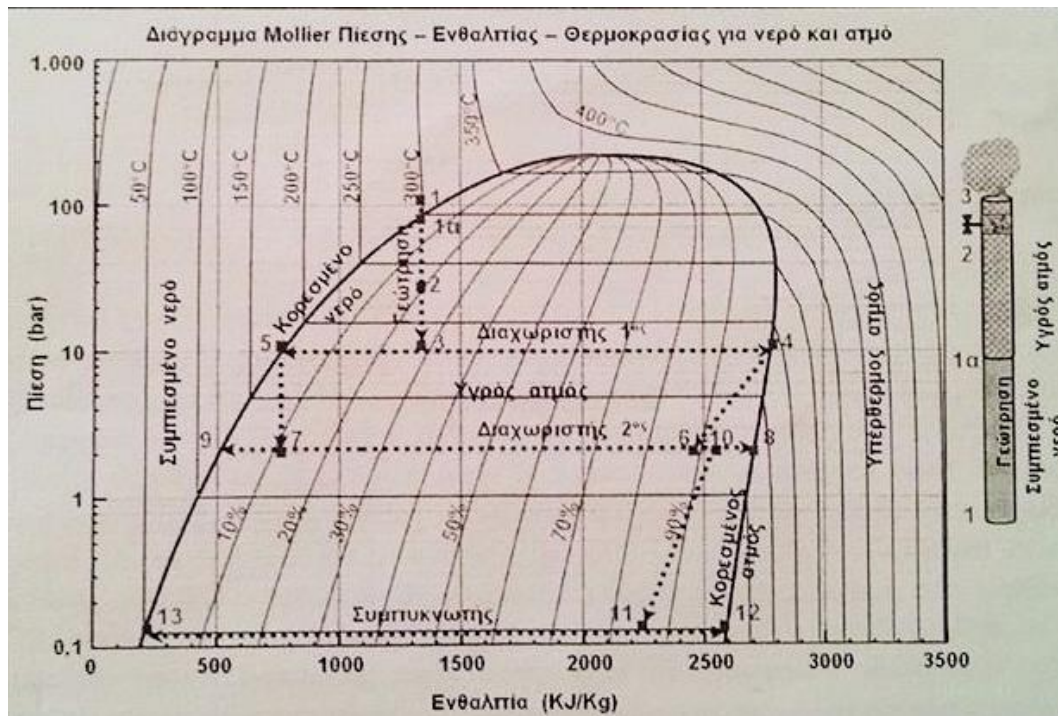
3.2.4 Μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου (Double flash steam type)

Οι μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου (Steam Power Plant – Double Flash και Steam Power Plant – Double Pressure) στοχεύουν στην αξιοποίηση της υπό πίεση εξερχόμενης άλμης (νερό) από το διαχωριστή αυξάνοντας τη συνολική ηλεκτρική ισχύ του συστήματος σε ποσοστό 15-25% από μια μονάδα υγρού ατμού απλού τύπου για τις ίδιες γεωθερμικές συνθήκες του ρευστού. Μια μονάδα υγρού ατμού διπλού τύπου τροφοδοτείται από τον παραγόμενο ατμό με παράλληλη εκτόνωση (ατμοποίηση) της άλμης (υγρή φάση του 1^{ου} διαχωριστή) σε χαμηλότερη θερμοκρασία/ πίεση σε ένα 2^ο διαχωριστή. Η προσθήκη ενός δεύτερου αμοστρόβιλου (double flash steam) χαμηλότερης πίεσης αυξάνει μεν τη συνολική ισχύ της μονάδας, όμως εμφανίζεται ο κίνδυνος πυριτικών επικαθίσεων (αν υπάρχουν) ειδικά στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Υπάρχουν δυο διατάξεις μονάδων υγρού ατμού διπλού τύπου :

- Η διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με ένα αμοστρόβιλο διπλής πίεσης (Steam Power Plant – Double Pressure HP & LP)
- Η διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δυο χωριστούς αμοστρόβιλους (Steam Power Plant – Double Flash HP & LP)

3.2.5 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με ένα αμοστρόβιλο

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη υγρού ατμού διπλού τύπου με ένα αμοστρόβιλο διπλής πίεσης. Ο αμοστρόβιλος ως προς την πίεση λειτουργίας αποτελείται από δυο τμήματα με δική τους είσοδο ατμού, το τμήμα υψηλής πίεσης και το τμήμα χαμηλής πίεσης. Η διαφοροποίηση έγκειται στο ότι ο εξερχόμενος ατμός από το 2^ο διαχωριστή διοχετεύεται στον ίδιο αμοστρόβιλο που διοχετεύθηκε και ο ατμός από τον 1^ο διαχωριστή. Όμως η θέση εισόδου του ατμού από το 2^ο διαχωριστή στον αμοστρόβιλο είναι διαφορετική (ενδιάμεση) από αυτή του 1^{ου} διαχωριστή.

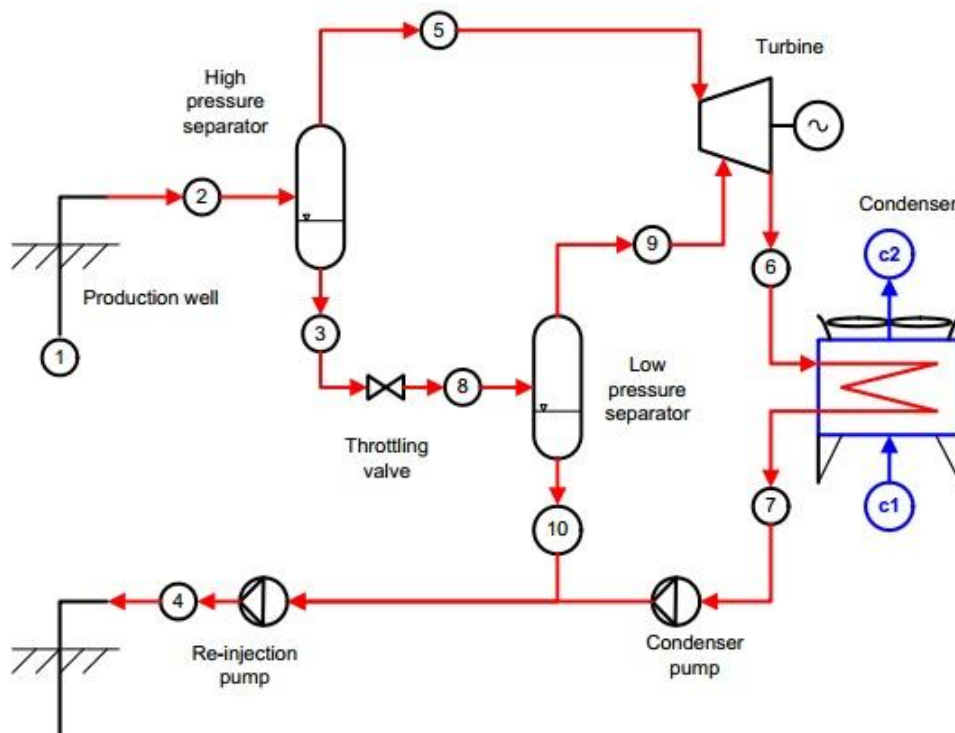


Σχήμα 3.5 Διάγραμμα Mollier της μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με ένα αμοστρόβιλο [31]

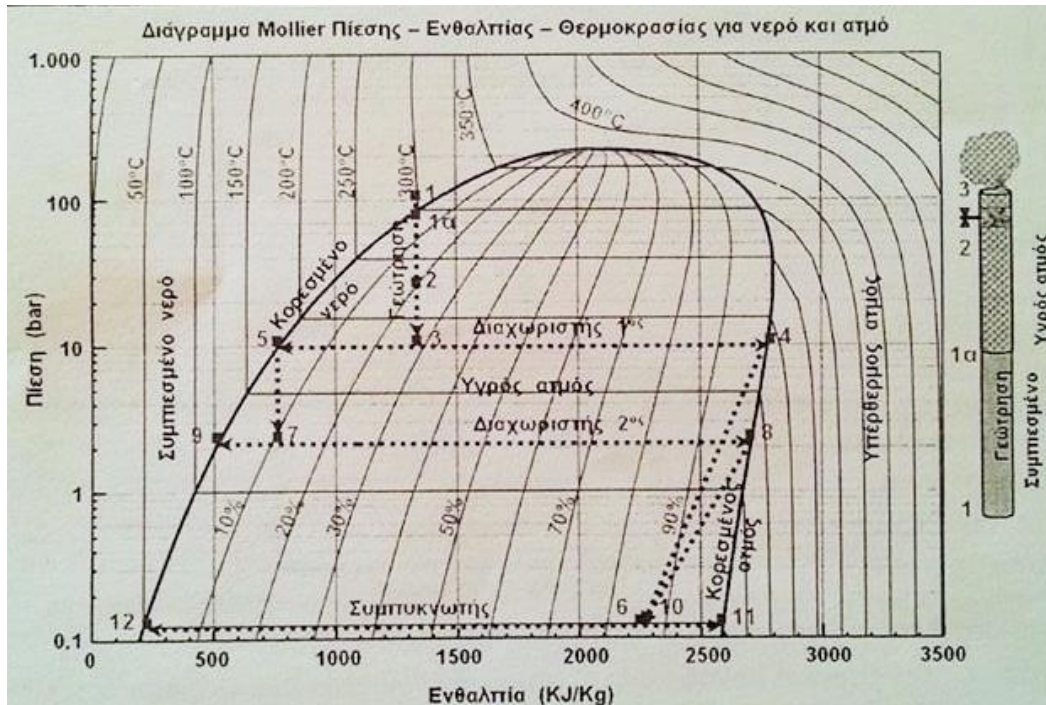
3.2.6 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δυο αμοστρόβιλους

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη υγρού ατμού διπλού τύπου με δυο χωριστούς αμοστρόβιλους (Steam Power Plant – Double Flash). Ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση παραγωγή υγρός ατμός διοχετεύεται στον 1^ο διαχωριστή υψηλής πίεσης, όπου ο μεν ατμός διοχετεύεται στον 1^ο αμοστρόβιλο η δε άλμη στο 2^ο διαχωριστή χαμηλής πίεσης. Μετά την έξοδο του ατμού από τον 1^ο αμοστρόβιλο προς το συμπυκνωτή, το δημιουργούμενο συμπύκνωμα είτε επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής σε κλειστό κύκλωμα, είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα διαμέσου του πύργου ψύξης.

Η εξερχόμενη άλμη υψηλής ενθαλπίας από τον 1^ο διαχωριστή διοχετεύεται δια μέσου βαλβίδας στραγγαλισμού στο 2^ο διαχωριστή χαμηλής πίεσης, όπου ο μεν ατμός (κορεσμένος) διοχετεύεται στο 2^ο αμοστρόβιλο για επιπλέον παραγωγή ενέργειας, η δε άλμη στη γεώτρηση επανεισαγωγής. Μετά την έξοδο του ατμού από τον 1^ο και το 2^ο αμοστρόβιλο διοχετεύεται προς τους συμπυκνωτές, όπου το δημιουργούμενο συμπύκνωμα είτε επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής σε κλειστό κύκλωμα, είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα διαμέσου του πύργου ψύξης.



Σχήμα 3.6 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δύο ατμοστρόβιλους [31]



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα Mollier μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δύο ατμοστρόβιλους [31]

3.2.7 Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary type)

Οι μονάδες δυαδικού τύπου εφαρμόζονται σε χαμηλής ή μέσης ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία, αλλά και σε υψηλής ενθαλπίας (υβριδικές μονάδες, όπου το γεωθερμικό ρευστό (σε υγρή φάση) διέρχεται δια μέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας για να θερμάνει ένα πτητικό ρευστό (σε υγρή φάση) διέρχεται δια μέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας για να θερμάνει ένα πτητικό ρευστό εργασίας (working or process or motive fluid) και ακολούθως διοχετεύεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής. Λειτουργούν με ένα ενδιάμεσο πτητικό ρευστό (working fluid), όπως το ισοπεντάνιο ή ισοβουτάνιο ή μίγμα αμμωνίας-νερού, το οποίο εξατμίζεται και κινεί ένα αμοστρόβιλο. Ένα ρευστό που έχει ένα χαμηλό σημείο βρασμού και υψηλή πίεση ατμών σε σύγκριση και υψηλή πίεση ατμών σε σύγκριση με το νερό σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Πρόκειται για ένα κλειστό κύκλωμα ροής του γεωθερμικού ρευστού με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Πτητικά ρευστά ονομάζονται τα ρευστά που παρατηρείται πτητικότητα, όπου με τον όρο πτητικότητα χαρακτηρίζεται η φυσική ιδιότητα ενός συνήθως υγρού για την ιδιαίτερη ευκολία της εξάτμισής του σε κανονικές συνθήκες. Τα πτητικά υγρά εργασίας (working fluids) χρησιμοποιούνται στα δυαδικά συστήματα για να επιτευχθεί μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά θερμότητας με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Η εμφάνιση των μονάδων δυαδικού τύπου έχει καταστήσει εφικτή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και από γεωθερμικά ρευστά με χαμηλές θερμοκρασίες (-+100-180°C), έναντι των άλλων τύπων μονάδων που χαρακτηρίζονται οικονομικά ή/και τεχνικά μη βιώσιμες για τις θερμοκρασίες αυτές, επεκτείνοντας γεωγραφικά τη γεωθερμική δραστηριότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά στην Αλάσκα λειτουργεί μονάδα δυαδικού τύπου με γεωθερμικό ρευστό πολύ χαμηλής θερμοκρασίας μόλις 57°C. Το μέγεθος μιας μονάδας δυαδικού τύπου συνήθως φτάνει μέχρι +10MWe. Η πτώση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού στον εναλλάκτη δημιουργεί συχνά τάσεις επικαθίσης αλάτων που απαιτεί τη ρύθμιση του pH στο 5,0-5,5.

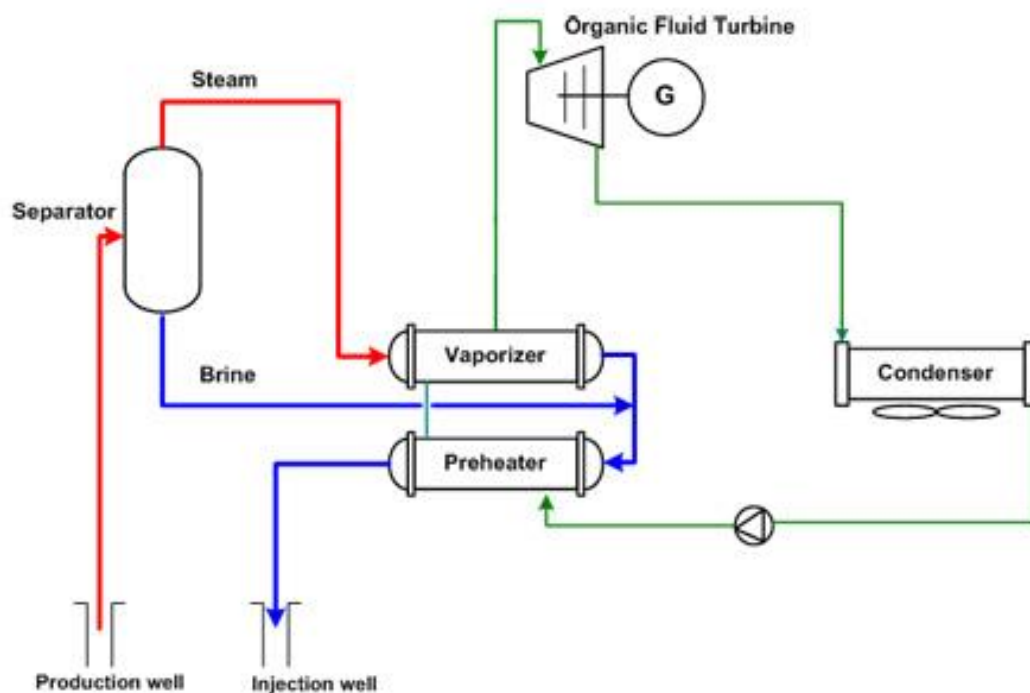
Το γεωθερμικό ρευστό, που διέρχεται δια μέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας για να θερμάνει το πτητικό ρευστό εργασίας, θα πρέπει να είναι υποχρεωτικά σε υγρή φάση για τη βέλτιστη απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας και την αποφυγή επικαθίσεων και ακολούθως διοχετεύεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής. Όμως η υγρή φάση δεν επιτυγχάνεται συνήθως στα γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας, αφού η θερμοκρασία του αντλούμενου ρευστού με αρτεσιανισμό μπορεί να είναι πάνω από το σημείο βρασμού ή/και με υψηλή

συγκέντρωση σε αέρια στην κεφαλή της γεώτρησης με συνέπεια την εμφάνιση διφασικής ροής (υγρός ατμός).

Η χρήση τότε αντλητικού συγκροτήματος είναι απαραίτητη για τη συμπίεση του γεωθερμικού ρευστού, έτσι ώστε να μη φθάσει στη θερμοκρασία βρασμού (flash point) ούτε να αποδεσμεύσει το αέριο (bubble point), διατηρώντας το σε υγρή φάση. Επίσης μια άλλη παράμετρος χρήσης αντλητικού συγκροτήματος είναι όταν ο αρτεσιανός ρυθμός ροής των ρευστών δεν είναι υπαρκτός ή και ικανοποιητικός.

Τα συνήθη αντλητικά συγκροτήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι :

- Ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (Electrical Submersible Pumps, ESP)
- Αντλίες τύπου τουρμπίνας (Line shaft turbines) σε συνδυασμό με επιφανειακή αντλία μέσης πίεσης. Οι αντλίες αυτές χρησιμοποιούνται για την αποφυγή απελευθέρωσης αερίων που προκαλούν κυρίως επικαθίσεις αλάτων. Η χρήση τους είναι περιορισμένη ακόμη και έχουν μικρό βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 3.8 Διάταξη μονάδας δυαδικού τύπου (Binary type) [31]

Μια γενική διάταξη λειτουργίας της μονάδας δυαδικού τύπου παρουσιάζεται στο πάνω σχήμα. Το εξερχόμενο από τη γεώτρηση παραγωγής γεωθερμικό ρευστό σε υγρή φάση, συνήθως με χρήση αντλητικού συγκροτήματος, διοχετεύεται πρώτα στον εξατμιστή

(εναλλάκτης θερμότητας), ακολούθως στον προθερμαντήρα, όπου ψυχόμενο μεταφέρει τη θερμότητα του στο πτητικό ρευστό εργασίας.

Τέλος οδεύει προς τη γεώτρηση επανεισαγωγής σε ένα κλειστό κύκλωμα ροής του γεωθερμικού ρευστού με μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το πτητικό ρευστό εργασίας λειτουργεί και αυτό σε κλειστό κύκλωμα. Διέρχεται από τον εξατμιστή, όπου εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό, και ακολούθως εισέρχεται στον αμοστρόβιλο σε αέρια φάση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εξερχόμενο από τον αμοστρόβιλο διέρχεται από ένα συμπυκνωτή για τη ψύξη του σε υγρή φάση.

Ακολούθως με μια αντλία κυκλοφορητή προωθείται προς τον προθερμαντήρα για την πρώτη αύξηση της θερμοκρασίας του από το γεωθερμικό ρευστό και ακολούθως οδεύει στον εξατμιστή για την επανάληψη του κλειστού κύκλου διεργασίας του. Οι εναλλάκτες θερμότητας (συμπυκνωτής, αναθερμαντήρας, προθερμαντήρας και εξατμιστής) που χρησιμοποιούνται στις μονάδες δυαδικού τύπου είναι συνήθως τύπου κελύφους – αυλών (shell and tube exchanger).

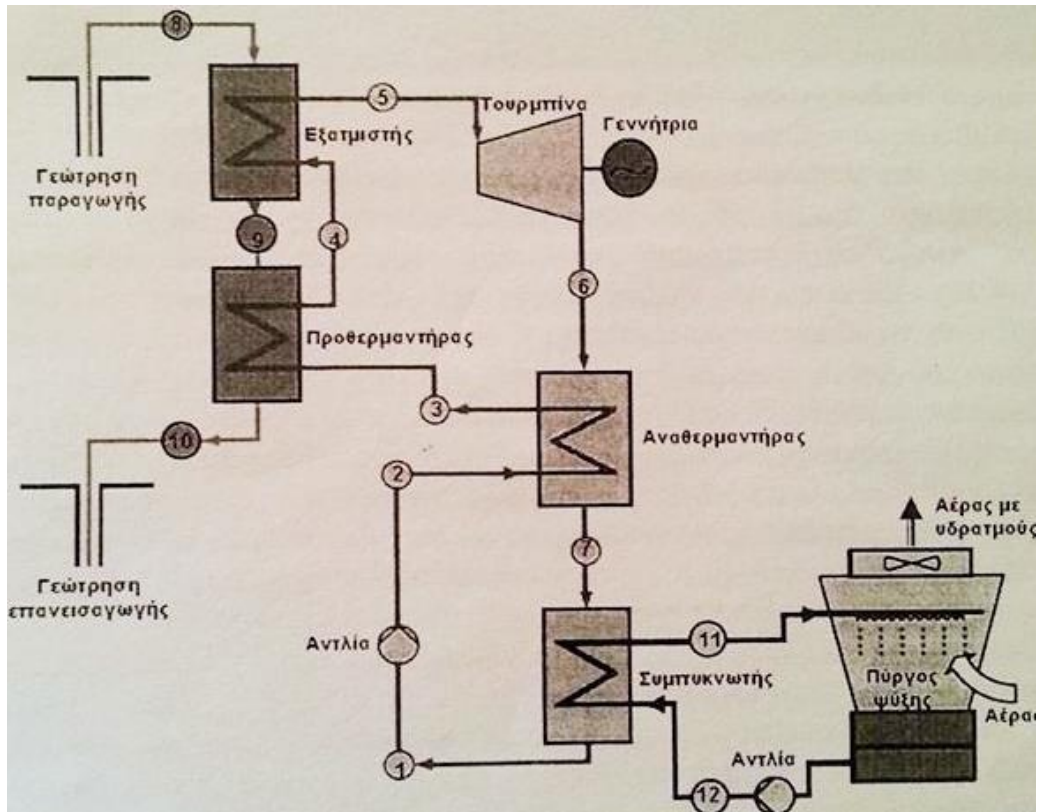
Υπάρχουν τρεις διατάξεις μονάδων δυαδικού τύπου με κύρια διαφοροποίηση στην επιλογή του πτητικού ρευστού εργασίας :

- Η διάταξη μονάδας δυαδικού τύπου Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC) : Χρησιμοποιεί κυρίως το ισοπεντάνιο (isopentane)
-
- Η διάταξη μονάδας δυαδικού τύπου Kalina (Kalina Cycle) : Χρησιμοποιεί το υδατικό διάλυμα αμμωνίας (ammonia-water mixture)
- Η διάταξη μονάδας δυαδικού τύπου Kalex/New Kalina : Ένας νέος κύκλος γνωστός ως Kalex/New Kalina έχει εφευρεθεί πρόσφατα από τον ίδιο τον Kalina Α. Αυξημένες πληροφορίες θεωρητικά και εμπορικά δεν υπάρχουν ακόμη.

3.2.8 Μονάδες δυαδικού τύπου Organic Rankine Cycle (ORC)

Η μονάδα δυαδικού τύπου (Binary Cycle) με σύστημα Organic Rankine Cycle (ORC) χρησιμοποιεί εκτός των άλλων εξαρτημάτων (αμοστρόβιλος, αντλίες, πύργοι ψύξης, κλπ) και τέσσερις τύπους εναλλακτών θερμότητας (συμπυκνωτής, αναθερμαντήρας, προθερμαντήρας και εξατμιστής). Η διάταξη και η ροή του γεωθερμικού ρευστού και του

πητικού ρευστού και οι θερμοδυναμικές συνθήκες στη μονάδα δυαδικού τύπου ORC αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα.



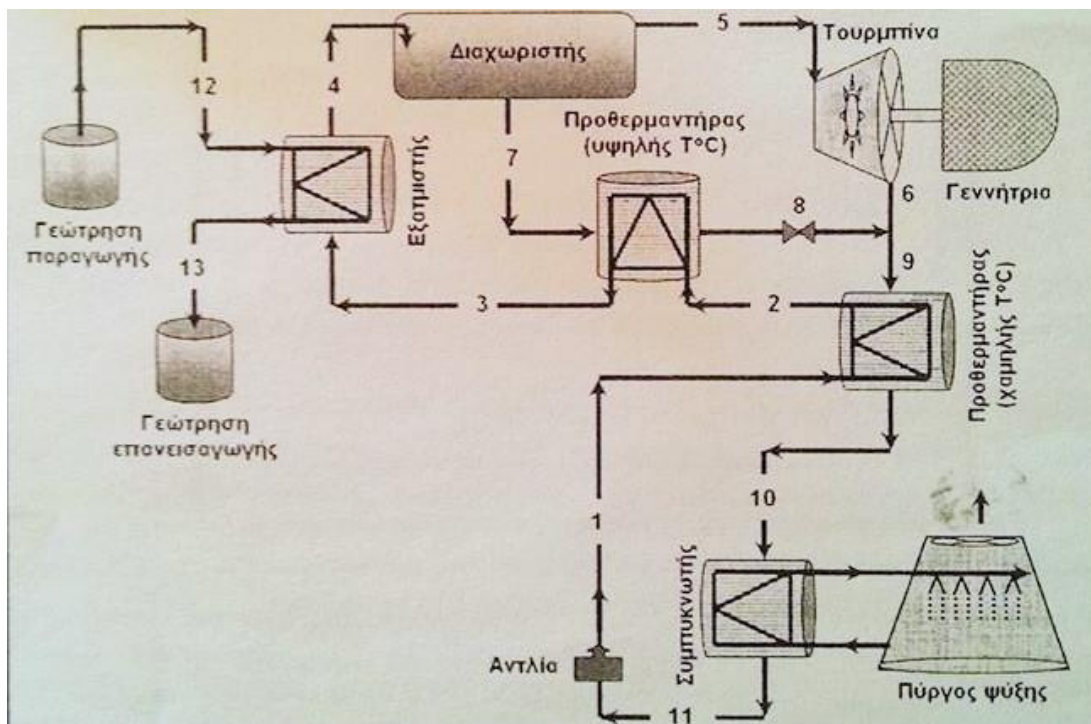
Σχήμα 3.9 Διάταξη μονάδας ORC [31]

3.2.9 Μονάδες δυαδικού τύπου Kalina (Kalina Cycle)

Ο κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες δυαδικού τύπου Kalina Cycle είναι τροποποίηση του Clausius-Rankine Cycle και οφείλουν το όνομά τους στον εφευρέτη τους A. Kalina. Ως πτητικό ρευστό εργασίας χρησιμοποιούν το υδατικό διάλυμα αμμωνίας. Η θετική διαφοροποίησή τους από τις μονάδες δυαδικού τύπου ORC έγκειται ότι τόσο η εξάτμιση όσο και η συμπύκνωση του υδατικού διαλύματος αμμωνίας διεκπεραιώνεται σε μια μεταβλητή θερμοκρασία (περιοχή θερμοκρασιών). Όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι κάτω από 150°C ο κύκλος Kalina έχει ένα πλεονέκτημα έναντι του κύκλου ORC. Άλλο πλεονέκτημα του κύκλου Kalina έναντι του ORC είναι ότι εργάζεται σε υψηλότερα επίπεδα πίεσης, επομένως για την ίδια ισχύ απαιτεί μικρότερη ροή όγκου πτητικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διαστάσεις του ατμοστροβίλου και των σωληνώσεων να είναι μικρότερες.

Τα υδατικά διαλύματα αμμωνίας χρησιμοποιούνται ήδη για 10ετίες ως πτητικά ρευστά εργασίας στα συστήματα ψύξης αν και η αμμωνία είναι τοξική. Για υδατικά διαλύματα με μικρή συγκέντρωση αμμωνίας, η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας είναι στην αρχή της εξάτμισης, ενώ με μεγάλη συγκέντρωση είναι στο τέλος της εξάτμισης. Μια μέση συγκέντρωση αμμωνίας είναι η πιο ενδεδειγμένη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες δυαδικού τύπου Kalina Cycle. Η θερμοκρασία και η ενθαλπία εξάτμισης ενός υδατικού διαλύματος αμμωνίας για δεδομένη πίεση είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας στο υδατικό διάλυμα.

Η μονάδα δυαδικού τύπου Kalina Cycle χρησιμοποιεί εκτός των άλλων εξαρτημάτων (ατμοστρόβιλος, αντλίες, πύργοι ψύξης, κλπ) και τέσσερις τύπους εναλλακτών θερμότητας (συμπυκνωτής, εξατμιστής, προθερμαντήρας χαμηλής θερμοκρασίας και προθερμαντήρας υψηλής θερμοκρασίας). Η διάταξη και η ροή του γεωθερμικού ρευστού και του πτητικού ρευστού (υδατικό διάλυμα αμμωνίας) στη μονάδα δυαδικού τύπου αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.10 Διάταξη μονάδας Kalina [31]

3.2.10 Μονάδες συνδυασμένου ή υβριδικού τύπου (Combined or hybrid type)

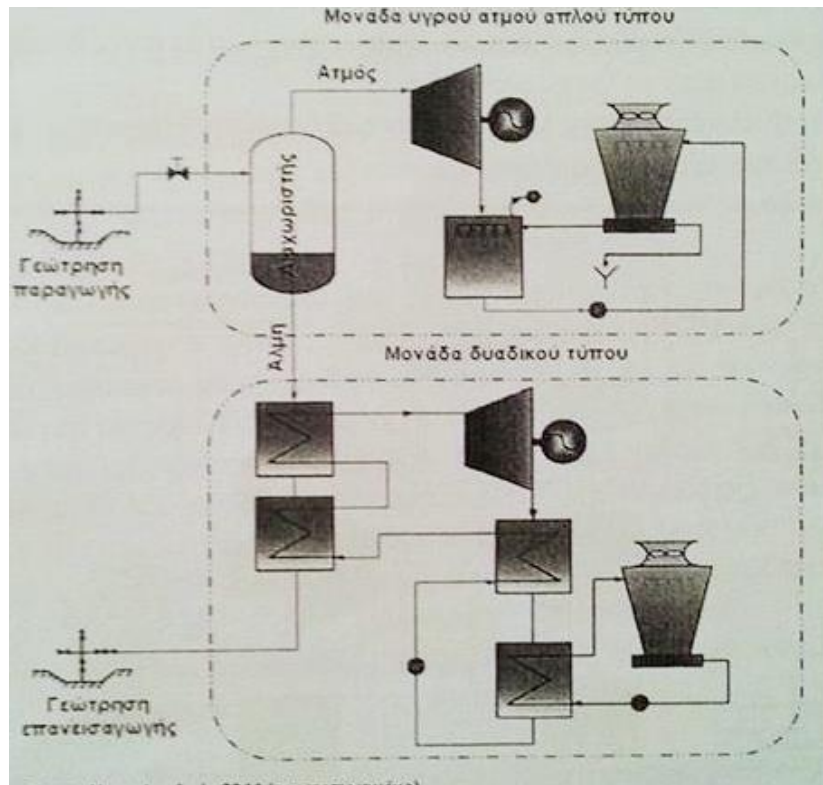
Οι μονάδες συνδυασμένου ή υβριδικού τύπου αναφέρονται στην ταυτόχρονη λειτουργία διαφορετικών τεχνολογιών γεωθερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, βελτιώνοντας τη συνολική θερμική και ηλεκτρική απόδοση της μονάδας. Κυρίως είναι συνδυασμός μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου (Single flash steam type) και μιας ή δυο μονάδων δυαδικού τύπου που αξιοποιούν ταυτόχρονα το ίδιο γεωθερμικό ρευστό. Εφαρμόζονται για γεωθερμικά ρευστά υψηλής ενθαλπίας αυξάνοντας αισθητά τη συνολική ισχύ της μονάδας.

Οι μονάδες αυτές αξιοποιούν επιπλέον είτε τον εξερχόμενο ατμό από τον ατμοστρόβιλο με διάταξη 'back pressure' είτε την άλμη από το διαχωριστή είτε και τα δυο συγχρόνως. Υπάρχουν και άλλου τύπου υβριδικές μονάδες, που χρησιμοποιούν ταυτόχρονα για την οικονομική βιωσιμότητα τους τη γεωθερμική και την ηλιακή ενέργεια, παρέχοντας σε μικρές βιομηχανίες επαρκείς δυνατότητες για την εφαρμογή τους.

Τρία είναι τα πιο συνηθισμένα συστήματα για μονάδες συνδυασμένου ή υβριδικού τύπου (Combined or hybrid type) :

A) Υβριδικό σύστημα δυο μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου και μιας μονάδας δυαδικού τύπου. Είναι συνδυασμός με διάταξη δυο μονάδων :

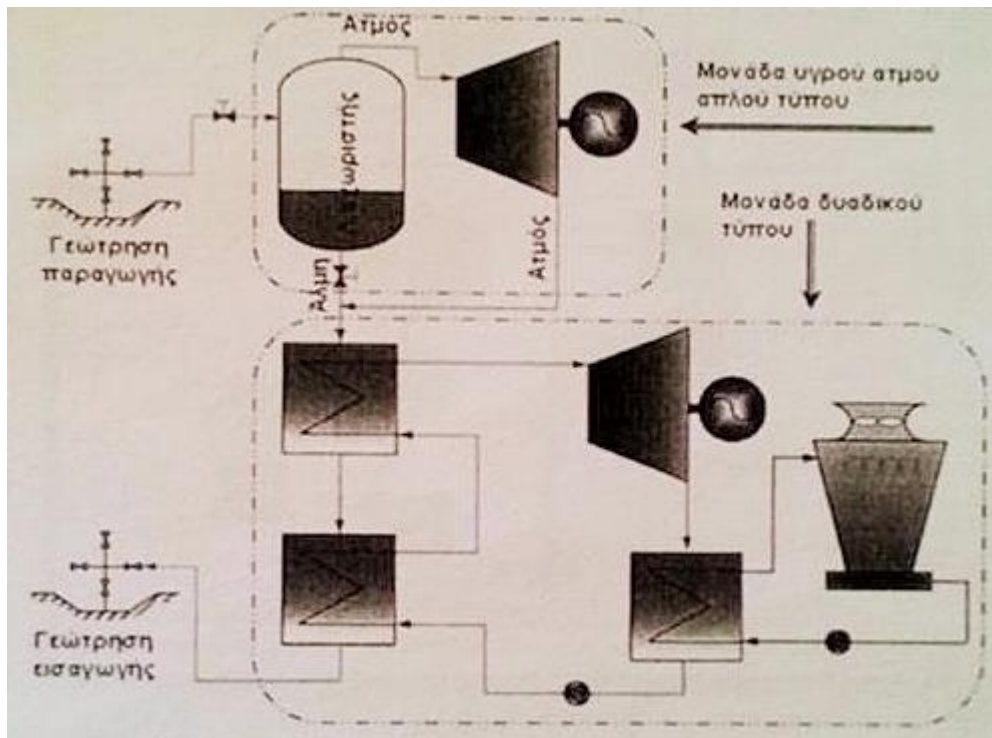
- Μονάδα υγρού ατμού (Single flash steam type), όπου ο ατμοστρόβιλος λειτουργεί με τον εξερχόμενο ατμό από το διαχωριστή και
- Μονάδα δυαδικού τύπου (Binary type), όπου ο εξατμιστής (vaporizer) θερμαίνεται με την εξερχόμενη άλμη από το διαχωριστή.



Σχήμα 3.11 Διάταξη μονάδας υβριδικού συστήματος [31]

B) Υβριδικό σύστημα δυο μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου ‘back pressure’ και μιας μονάδας δυαδικού τύπου. Είναι συνδυασμός με διάταξη δυο μονάδων :

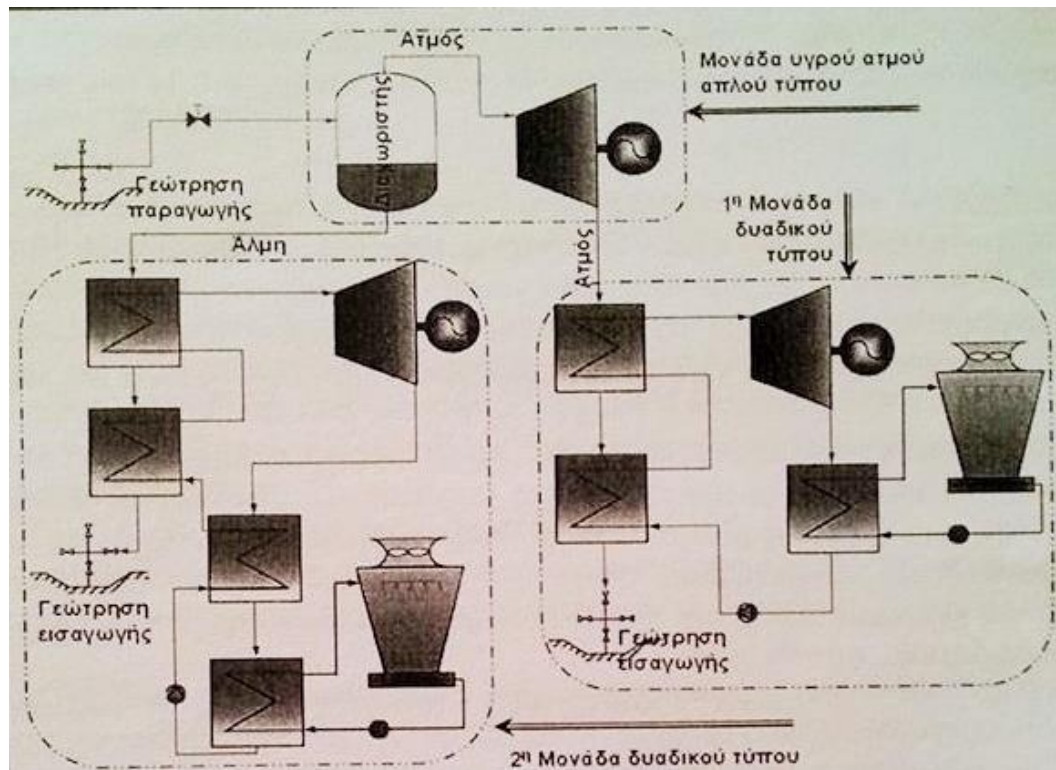
- Μονάδα υγρού ατμού (Single flash steam back pressure type), όπου ο αμοστρόβιλος (τύπου back pressure) λειτουργεί με τον εξερχόμενο ατμό από το διαχωριστή
- Μονάδα δυαδικού τύπου (Binary type), όπου ο εξατμιστής (vaporizer) θερμαίνεται συγχρόνως με την εξερχόμενη άλμη από το διαχωριστή και με τον εξερχόμενο ατμό από τον αμοστρόβιλο. Κριτήριο είναι η ύπαρξη ίδιας πίεσης στη θέση που συναντιέται ο εξερχόμενος ατμός από τον αμοστρόβιλο και η εξερχόμενη άλμη από το διαχωριστή.



Σχήμα 3.12 Διάταξη μονάδας συνδυασμένου τύπου [31]

Γ) Υβριδικό σύστημα τριών μονάδων μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου ‘back pressure’ και δυο μονάδων δυαδικού τύπου. Είναι συνδυασμός με διάταξη τριών μονάδων :

- Μονάδα υγρού ατμού , όπου ο ατμοστρόβιλος (τύπου ‘back pressure’) λειτουργεί με τον εξερχόμενο ατμό από το διαχωριστή
- 1^η μονάδα δυαδικού τύπου, όπου ο εξατμιστής θερμαίνεται με τον εξερχόμενο ατμό από τον ατμοστρόβιλο και
- 2^η μονάδα δυαδικού τύπου, όπου ο εξατμιστής θερμαίνεται με την εξερχόμενη άλμη (brine) από το διαχωριστή.



Σχήμα 3.13 Διάταξη υβριδικού συστήματος 3 μονάδων [31]

3.2.11 Μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP)

Οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με βάση τη γεωθερμική ενέργεια αξιοποιούν τη θερμότητα της άλμης με την τοποθέτηση ενός εναλλάκτη θερμότητας, πριν αυτή διοχετευθεί στη γεώτρηση επανεισαγωγής, για άμεση χρήση. Εφαρμόζονται σε μονάδες μέσης και υψηλής ενθαλπίας, αν υπάρχει επαρκής ζήτηση ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικές.

Το τυπικό μέγεθος τέτοιων μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας κυμαίνεται από μερικά MW μέχρι 45MW. Στην Ισλανδία υπάρχουν σε λειτουργία δυο μονάδες συνολικής ισχύος 300MW για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας μεταφέροντας ζεστό νερό για θέρμανση σε απόσταση από 12 έως 25km χωρίς ιδιαίτερη πτώση της θερμοκρασίας λόγω επαρκούς θερμομόνωσης και μεγάλης ταχύτητας ροής του ζεστού νερού. Έχει ιδιαίτερη εφαρμογή στην Ευρώπη (ειδικά στη βόρεια), όπως στην Ισλανδία, στη Γερμανία και στην Αυστρία, όπου η ζήτηση θέρμανσης χώρων είναι σημαντική και σταθερή στη διάρκεια του έτους.

συμπυκνωτές, διαχωριστές αντιρρυπαντικά συστήματα, πύργους ψύξης, εναλλάκτες θερμότητας, κλπ.

Τα βασικά τμήματα στις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ξηρού και υγρού ατμού, που επηρεάζουν κατασκευαστικά και αποδοτικά τους σταθμούς παραγωγής είναι :

- Η κεφαλή της γεώτρησης
- Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής (σωληνώσεις)
- Ο διαχωριστής
- Ο αμοστρόβιλος και η ηλεκτρογεννήτρια
- Ο συμπυκνωτής
- Ο πύργος ψύξης και
- Το σύστημα απαγωγής αερίων

Τα βασικά τμήματα στις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής δυαδικού τύπου, που επηρεάζουν κατασκευαστικά και αποδοτικά τους σταθμούς παραγωγής είναι :

- Η κεφαλή της γεώτρησης
- Το αντλητικό συγκρότημα (αν χρειάζεται)
- Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής (σωληνώσεις)
- Ο διαχωριστής
- Ο αμοστρόβιλος και η ηλεκτρογεννήτρια
- Ο συμπυκνωτής
- Οι εναλλάκτες θερμότητας (προθερμαντήρας, εξατμιστής, κλπ)
- Ο πύργος ψύξης και
- Το σύστημα απαγωγής αερίων

3.4 Ειδική απόδοση γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής

Οι παράμετροι επηρεασμού της βελτιστοποίησης της μέγιστης ειδικής καθαρής ισχύος (specific net power output) μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, δηλαδή η αποδιδόμενη στο δίκτυο ισχύς MW ανά μονάδα ρυθμού ροής μάζας του γεωθερμικού ρευστού (kg/s), που εκφράζεται σε MW/(kg/s), είναι :

- Η επιλογή του τύπου της μονάδας σε συνδυασμό με το κόστος επένδυσης και λειτουργίας-συντήρησης
- Η θερμοκρασία και η πίεση (ενθαλπία) του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα
- Η ποιότητα ατμού (x%) του γεωθερμικού ρευστού στην έξοδο της βαλβίδας στην κεφαλή της γεώτρησης (ρυθμίζεται με την πίεση)
- Η ύπαρξη ή μη πυριτικών ενώσεων (επηρεάζει τη ρύθμιση της πίεσης)
- Η πίεση στο διαχωριστή (είναι περίπου ίδια με την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης και στην είσοδο του αμοστροβίλου)
- Η υποπίεση στο συμπυκνωτή (0,06-0,30bar)
- Η ποιότητα ατμού στην έξοδο του αμοστροβίλου (υποχρεωτικά >85%)
- Η ισχύς του βοηθητικού εξοπλισμού (auxiliary power), όπως οι αντλίες κυκλοφορίας, οι αντλίες κενού, οι ανεμιστήρες, τα αντλητικά, κλπ, που αφαιρείται από την αποδιδόμενη ισχύ του αμοστροβίλου.

Κεφάλαιο 4

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Κάθε μεταβολή στο περιβάλλον θα πρέπει να αξιολογείται προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη τους σχετικούς νόμους και κανονισμούς (σε ορισμένες χώρες είναι πολύ αυστηροί), αλλά και επειδή κάθε φαινομενικά ασήμαντη αλλαγή θα μπορούσε να προκαλέσει αλυσιδωτά φαινόμενα, των οποίων οι επιπτώσεις είναι δύσκολο να εκτιμηθούν πλήρως εκ των προτέρων. Η υλοποίηση ενός αναπτυξιακού έργου σε μια περιοχή μπορεί να επηρεάσει τις κοινωνικές, φυσικές, χημικές και βιολογικές συνιστώσες του γύρω περιβάλλοντος. Πολλές νομοθετικές αποφάσεις σχετικά με την άδεια για τη δημιουργία του θα εξαρτηθεί από την ισορροπία μεταξύ των πλεονεκτημάτων που θα προκύψουν από την ανάπτυξή του και τη ζημία που μπορεί να επιβληθεί στο τοπικό περιβάλλον. Επίσης οι αποφάσεις αφορούν

τόσο τοπικά θέματα, όπως η πιθανή φυσική επίδραση στους φυσικούς οικοτόπους και την επιφανειακή μορφολογία, καθώς και τα εθνικά θέματα, όπως είναι η διατήρηση των μοναδικών χαρακτηριστικών που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς ολόκληρης της χώρας.

Κατά συνέπεια, η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι από τις πρώτες και πιο σημαντικές μελέτες που πρέπει να καταρτιστούν κατά τη διάρκεια της παρουσίας του έργου και θα στηρίζουν τις επόμενες αιτήσεις συναίνεσης και σχεδιασμού με την παρακολούθηση του προγράμματος.

Τα βασικά περιβαλλοντικά ζητήματα που τίθενται κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής (λιγνιτική, πυρηνική, φυσικού αερίου, πετρελαίου, γεωθερμική, κλπ) είναι :

- ❖ Φυσικές επιπτώσεις (physical effects) : Αναφέρονται στις τυχόν διαταραχές στην επιφανειακή μορφολογία, στους φυσικούς οικοτόπους και στον επηρεασμό της
- ❖ χλωρίδας και της πανίδας με τις αλλαγές και τη διαμόρφωση στο τοπίο και την εγκατάσταση ανθρωπογενών δομών, που δεν υπήρχαν.
- ❖ Θερμική ρύπανση (thermal pollution) : Αναφέρεται στις θερμικές επιδράσεις των μονάδων στο περιβάλλον, που χρησιμοποιούν αερόψυκτα ή υδρόψυκτα συστήματα για την απόρριψη της θερμότητας. Τα υδρόψυκτα συστήματα χρησιμοποιούν γλυκό ή αλμυρό νερό στους συμπυκνωτές, που αν διοχετευθεί στο επιφανειακό δίκτυο απορροής (λίμνη, ποταμός, θάλασσα) αυξάνει τη θερμοκρασία του επηρεάζοντας τη βιόσφαιρα, ενώ αν διοχετευθεί στους πύργους ψύξης αυξάνει τη θερμοκρασία και την υγρασία της τοπικής ατμόσφαιρας. Τα αερόψυκτα συστήματα χρησιμοποιούν τον ατμοσφαιρικό αέρα στους συμπυκνωτές, που αυξάνει τη θερμοκρασία της τοπικής ατμόσφαιρας.
- ❖ Χημική ρύπανση (chemical pollution) : Αναφέρεται αφενός στην ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω εκπομπής αερίων και αφετέρου στη ρύπανση του επιφανειακού και υπόγειου υδατικού και χερσαίου περιβάλλοντος λόγω απόρριψης αποβλήτων (υγρών και στερεών).
- ❖ Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (social and economic considerations) : Αναφέρεται στην πρόβλεψη, στην αξιολόγηση και στα μέτρα αντιμετώπισης των οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων στις τυχόν υπάρχουσες γειτονικές κατοικημένες περιοχές. Η κατασκευή των γεωθερμικών εγκαταστάσεων περιλαμβάνει συχνά μια προσωρινή αύξηση της απασχόλησης, αλλά και στην

εισαγωγή ενός εξωτερικού εργατικού δυναμικού. Επίσης η κατασκευή νέων δρόμων μπορεί να ‘ανοίξει’ νέες περιοχές και να αυξήσει τον τουρισμό, ειδικά αν οι φυσικές γεωθερμικές εκδηλώσεις παραμείνουν ανεπηρέαστες. Η ιδιοκτησία και η χρήση της γης συχνά είναι ένα βασικό σημείο τριβής με τον τοπικό πληθυσμό και είναι από τα βασικά θέματα διαπραγματεύσεως, ενώ η συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού στη διαδικασία ανάπτυξης μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής είναι ζωτικής σημασίας.

Όπως σε όλα τα κατασκευαστικά έργα, έτσι και οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλληλεπιδρούν με τον περιβάλλοντα χώρο με διάφορους τρόπους κατά τη διάρκεια της ζωής τους, αλλά δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι πρόκειται για μια από τις λιγότερο ρυπογόνες μορφές ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο βαθμός στον οποίο μια γεωθερμική μονάδα επηρεάζει το περιβάλλον είναι ανάλογος με το μέγεθος της. Κατά την αρχική φάση της έρευνας οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι συνήθως ελάχιστες, αλλά σταδιακά αυξάνονται όταν αρχίζουν οι γεωτρητικές εργασίες.

Οι πιο σημαντικές παρεμβάσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής της μονάδας με τη διαμόρφωση του τοπίου, των γεωτρήσεων και των επιφανειακών εγκαταστάσεων, ενώ συγχρόνως εμφανίζονται οι οικονομικές και κοινωνικές επιδράσεις στις τυχόν υπάρχουσες γειτονικές κατοικημένες περιοχές. Μετά την έναρξη λειτουργίας η γεωθερμική μονάδα βρίσκεται συνήθως σε μια μάλλον σταθερή αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, αν οι δραστηριότητες συντήρησης και λειτουργίας πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις βέλτιστες πρακτικές. Οι εκπομπές, ο θόρυβος, οι επιπτώσεις στο νερό (επιφανειακά ή υπόγεια) και η προστασία του τοπίου και των οικοτόπων είναι μεταξύ των παραγόντων που πρέπει να αναλυθούν στο πλαίσιο ενός γεωθερμικού έργου. Όλες οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις πρέπει να ικανοποιούν τα εθνικά και τοπικά περιβαλλοντικά πρότυπα, αν και οι εκπομπές μετρούνται συνήθως μέχρι ένα συγκεκριμένο χαμηλό όριο, κάτω από το οποίο συχνά είναι οι εκπομπές από τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις.

Η ανάπτυξη των γεωθερμικών πόρων παγκοσμίως ευνοείται από τις θετικές τους ιδιότητες και τις περιορισμένες έως μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η σωστή τεχνική εκμετάλλευσή τους ελαχιστοποιούν τις τυχόν αρνητικές επιπτώσεις από τη διάθεση των γεωθερμικών ρευστών και αερίων με συνέπεια οι γεωθερμικοί πόροι να είναι περιβαλλοντικά επωφελείς υπερκαλύπτοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης και ενεργειακής παρέμβασης. Η όλη προσπάθεια επικεντρώνεται στις τυχόν αρνητικές επιπτώσεις από καθιζήσεις και μικροσεισμικότητα (μόνο στα EGS συστήματα),

που είναι αντιμετωπίσιμες και διαχειρίσιμες από την τεχνολογία. Επίσης επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της χρήσης των υδάτων και της γης και στη βελτιστοποίηση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της γεωθερμικής παραγωγής για τις επόμενες γενιές.

Οι γεωθερμικές μονάδες σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα δεν λειτουργούν με καύση και επομένως εκπέμπουν πολύ χαμηλά επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου, ειδικά CO₂. Οι μονάδες δυαδικού τύπου ή υγρού ατμού/δυαδικού τύπου παράγουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεωθερμικές μηδενίζει την εξόρυξη, την επεξεργασία και τη μεταφορά που απαιτείται από τις μονάδες συμβατικών ορυκτών καυσίμων.

Η γεωθερμική ενέργεια επίσης καταλαμβάνει πολύ λιγότερη επιφάνεια εδάφους ανά μονάδα ισχύος σε σχέση με κάθε άλλη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων του λιγνίτη, των πυρηνικών και των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επίσης οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη χλωρίδα και στην πανίδα της περιοχής προσαρμοζόμενες ευκολότερα στους περιβαλλοντικούς κανονισμούς σε σχέση με τις άλλες μονάδες συμβατικών καυσίμων.

4.2 Επιπτώσεις στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και του νερού

Οι γεωθερμικές μονάδες σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα δεν λειτουργούν με καύση και επομένως εκπέμπουν πολύ χαμηλά επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου, ειδικά CO₂. Συγκριτικά οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων αποφεύγουν τις επιπλέον περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με :

- Την εξόρυξη, την επεξεργασία και τη μεταφορά (που συχνά σκοπίμως δεν λαμβάνονται υπόψη στη σύγκριση) και
- Την καύση των ορυκτών καυσίμων.

Με βάση τα πιο πάνω αναφερόμενα για τις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, η αντιμετώπιση μιας πιθανής χημικής ρύπανσης του περιβάλλοντος, που κατανέμεται αφενός στην ατμοσφαιρική ρύπανση λόγω εκπομπής αερίων και αφετέρου

στη ρύπανση του επιφανειακού και του υπόγειου υδατικού και χερσαίου περιβάλλοντος λόγω απόρριψης αποβλήτων (υγρών και στερεών), συνοπτικά καταλήγουμε στα πιο κάτω:

- ❖ Οι τύποι γεωθερμικών μονάδων κλειστού κυκλώματος (γεωτρήσεις παραγωγής, σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, γεωτρήσεις επανεισαγωγής) έχουν μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιλέγεται όπου είναι εφικτό τεχνικά και απαραίτητο περιβαλλοντικά.
- ❖ Οι τύποι γεωθερμικών μονάδων ανοικτού κυκλώματος, όπου οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατανέμονται :
 - Υγρά απόβλητα με διαλυμένες χημικές ουσίες : Μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο επιφανειακό και στο υπόγειο υδατικό και χερσαίο περιβάλλον είναι εφικτές με τη διοχέτευση τους με κλειστό σύστημα σωληνώσεων στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής, δηλαδή με κλειστό κύκλωμα ροής της υγρής φάσης (άλμη του διαχωριστή + συμπύκνωμα του συμπυκνωτή του αμοστρόβιλου, γεωτρήσεις επανεισαγωγής). Θεωρείται πλέον διεθνώς ως απαραίτητο τμήμα των γεωθερμικών μονάδων.
 - Μη συμπυκνώσιμα αέρια : Η ατμοσφαιρική ρύπανση εστιάζεται βασικά στην εκπομπή ρυπογόνων μη συμπυκνώσιμων αερίων από το συμπυκνωτή του αμοστρόβιλου, ειδικά H_2S και Hg. Εφαρμόζονται διεθνώς αποδεκτές περιβαλλοντικά τεχνολογίες για τη δέσμευση των ρυπογόνων μη συμπυκνώσιμων αερίων με βάση την ποιοτική και την ποσοτική σύσταση.
 - Στις μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου και στις μονάδες υγρού ατμού τριπλού τύπου για την ατμοσφαιρική ρύπανση ισχύουν τα ίδια με τις μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου ως προς την ποιότητα, αλλά εκπέμπουν λιγότερες ποσότητες. Αντίθετα έχουν αυξημένες συγκεντρώσεις ρυπαντών στην υγρή φάση, επομένως η επανεισαγωγή τους είναι πιο επιτακτική.
 - Στις μονάδες ξηρού ατμού για την ατμοσφαιρική ρύπανση ισχύουν τα ίδια με τις μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου ως προς την ποιότητα, αλλά εκπέμπουν περισσότερες ποσότητες. Αντίθετα η μη ύπαρξη υγρής φάσης (άλμη) δεν θέτει θέμα διαχείρισης υγρών και στερεών αποβλήτων αφορά το συμπύκνωμα του ατμού στο συμπυκνωτή, που είναι συγκριτικά σε πολύ μικρές ποσότητες.

4.3 Υγρά και στερεά γεωθερμικά απόβλητα

Σε όλες τις γεωθερμικές εγκαταστάσεις το σημαντικότερο περιβαλλοντικό ζήτημα που μπορεί να εμφανιστεί είναι στις εκπομπές στην ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με τα υγρά και τα στερεά γεωθερμικά απόβλητα, που είναι λιγότερο περιβαλλοντικό ζήτημα και αντιμετωπίζεται πλήρως με τις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Η διοχέτευση των γεωθερμικών υγρών και στερεών αποβλήτων στο επίγειο υδατικό σύστημα απορροής αλλάζει το χημισμό του, επηρεάζοντας δυσμενώς το υδάτινο και χερσαίο οικοσύστημα που χρησιμοποιεί αυτό το νερό. Αν και οι ίδιοι ρυπαντές περιέχονται και στις ιαματικές/ θερμές πηγές της περιοχής, συχνά είναι εξασθενημένοι σε μεγαλύτερο βαθμό λόγω καθίζησης στο έδαφος και στα ιζήματα. Οι ρυπογόνες συγκεντρώσεις των υγρών και στερεών αποβλήτων, ανάλογα με την προέλευσή τους (γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες) και τον τύπο της μονάδας, αξιολογούνται περιβαλλοντικά με βάση της τοξικές τους ιδιότητες σε συνδυασμό με την ποσότητά τους.

Τα υγρά και τα στερεά γεωθερμικά απόβλητα σε μια γεωθερμική μονάδα προέρχονται :

- Υγρά απόβλητα ως άλμη : Αφορούν τις μονάδες υγρού ατμού, όπου στο διαχωριστή διαχωρίζεται ο υγρός ατμός σε αέρια φάση και υγρή φάση (άλμη, ζεστό νερό), που είναι από 2 έως και πάνω από 3 φορές περισσότερη από τον ατμό.
- Υγρά απόβλητα ως συμπύκνωμα ατμού : Αφορούν ένα σημαντικό τμήμα του εξερχόμενου ατμού από τον αμοστρόβιλο, που υγροποιείται στο συμπυκνωτή, γνωστό ως συμπύκνωμα (ζεστό νερό). Είναι ποσοτικά αισθητά μικρότερο από την προαναφερθείσα άλμη. Το υπόλοιπο μικρό τμήμα του εξερχόμενου από τον αμοστρόβιλο ατμού, που δεν υγροποιείται στο συμπυκνωτή, αφορά τα μη συμπυκνώσιμα αέρια (0,5-10% κ.β.)
- Στερεά απόβλητα : Τα κυριότερα στερεά απόβλητα αφορούν τις λάσπες του πύργου ψύξης, τις επικαθήσεις στα δίκτυα και στον εξοπλισμό και τις καθιζήσεις από τυχόν επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

4.4 Υγρά γεωθερμικά απόβλητα

Τα γεωθερμικά υγρά απόβλητα είναι μια πιθανή πηγή χημικής ρύπανσης, αφού μπορεί να περιέχουν συγκεντρώσεις χημικών ουσιών, όπως βόριο, φθόριο, αρσενικό, κλπ, που πρέπει να αντιμετωπιστούν περιβαλλοντικά σε αυξημένες συγκεντρώσεις πέραν του επιτρεπόμενου ορίου, αλλά και τα τυχόν προστιθέμενα βιοκτόνα για τον καθαρισμό του πύργου και το υδροξείδιο του νατρίου για την αύξηση του pH. Η πλέον ασφαλής αντιμετώπιση με μηδενική περιβαλλοντική όχληση είναι η διοχέτευσή τους δια μέσου των γεωτρήσεων επανεισαγωγής στον υπόγειο ταμιευτήρα. Τα γεωθερμικά υγρά απόβλητα χαμηλής ενθαλπίας συνήθως περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις χημικών ουσιών, ως πιθανών πηγών χημικής ρύπανσης, ώστε να χαρακτηρίζονται ως ένα σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Παρά ταύτα και εδώ οι γεωτρήσεις επανεισαγωγής παρέχουν την πλέον ασφαλή αντιμετώπιση με μηδενική περιβαλλοντική όχληση. Όμως στην περίπτωση που δεν προκαλούν κινδύνους χημικής ρύπανσης, τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας διοχετεύονται αρχικά σε δεξαμενές ή τεχνητές λίμνες προς ψύξη για αποφυγή θερμικής ρύπανσης κατά τη διοχέτευσή τους στο επιφανειακό υδάτινο οικοσύστημα (ποτάμια, λίμνες, κλπ). Στις επικίνδυνες χημικές ουσίες της άλμης παρακολουθούνται οι συγκεντρώσεις τους με βάση τα επιτρεπόμενα όρια ρύπανσης, που ποικίλουν ανάλογα με τις εκάστοτε χρήσεις του νερού (άρδευση, ύδρευση, υδροβιότοπος, κλπ). Όμως πιθανά σε συμβατικές μονάδες υγρού ή ξηρού ατμού μετά το διαχωρισμό και τη συμπύκνωση του ατμού σε νερό μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο για ύδρευση ή άρδευση αντί της επανεισαγωγής του, όπως στην περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου στο Wairakei (Νέα Ζηλανδία) για άρδευση.

Στην άλμη (υγρή φάση) κατά την απομάκρυνση της από το διαχωριστή μεταφέρονται σχεδόν όλα τα μεταλλικά στοιχεία, που είναι διαλυμένα στο γεωθερμικό ρευστό του ταμιευτήρα και μάλιστα σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, αφού ένα μέρος του γεωθερμικού νερού αποδεσμεύεται στο διαχωριστή ως ατμός. Τα πιο σημαντικά ρυπογόνα συστατικά, που αν περιέχονται στα γεωθερμικά ρευστά κυρίως υψηλής ενθαλπίας, μεταφέρονται μετά το διαχωριστή ατμού/άλμης μερικώς ή ολικώς στην άλμη του διαχωριστή και μετά τον αμοστρόβιλο στο συμπύκνωμα του ατμού στο συμπυκνωτή είναι: βορικό οξύ, αρσενικό, υδράργυρος, υδρόθειο, αμμωνία, λίθιο και ραδόνιο, ιχνοστοιχεία (αντιμόνιο, θάλλιο, άργυρος, σελήνιο, κλπ).

Το συμπύκνωμα ατμού (υγρό απόβλητο από τον συμπυκνωτή θα έχει τυπικά υψηλότερες συγκεντρώσεις των πλέον πτητικών ρυπαντών (για παράδειγμα, διαλυμένα αέρια, H₂S, Hg, κλπ), ενώ η προερχόμενη από το διαχωριστή άλμη θα περιέχει υψηλότερες συγκεντρώσεις των μη πτητικών ρυπαντών ή των μόνο ελαφρώς πτητικών ρυπαντών, όπως το λίθιο, το αρσενικό και το βόριο.

4.5 Στερεά γεωθερμικά απόβλητα

Οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μπορεί συχνά να παράγουν σχετικές ποσότητες στερεών αποβλήτων, που απαιτούν τις κατάλληλες μεθόδους διάθεσής τους, λόγω των τοξικών ρυπαντών που πιθανά να περιέχουν. Τότε δεν πρέπει να διατεθούν στο επιφανειακό έδαφος, αφού δια μέσου των επιφανειακών απορροών μπορούν να ρυπάνουν τα τοπικά επιφανειακά και υπόγεια υδάτινα συστήματα.

Τα κυριότερα στερεά απόβλητα αφορούν τις λάσπες του πύργου ψύξης, που πιθανά περιέχουν συγκεντρώσεις θείου και υδραργύρου, όταν το υδρόθειο και ο υδράργυρος υπάρχουν στα μη συμπυκνώσιμα αέρια του ατμού. Αλλά στερεά απόβλητα αφορούν τις επικαθίσεις στα δίκτυα και στον εξοπλισμό που πιθανά περιέχουν συγκεντρώσεις αρσενικού. Επίσης η τυχόν επεξεργασία της άλμης δημιουργεί διάφορα κροκιδωμένα οξείδια. Κάποια από τα ρυπογόνα συστατικά των υγρών αποβλήτων μπορούν να προσροφηθούν σε επιφανειακά ιζήματα ή να καθιζάνουν, όπως το As, το B και ο Hg μπορούν να προσροφηθούν από επιφανειακά αργιλικά ή οργανικά υλικά. Όμως υπάρχει ο κίνδυνος με αλλαγή των χημικών ή βακτηριακών δράσεων να επανακυκλοφορήσουν.

Τα στερεά απόβλητα ως ρυπαντές που θα μπορούσαν δυνητικά να απορρίπτονται στο περιβάλλον από τις γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, είναι αυτά που διαλύονται αρχικά στα γεωθερμικά ρευστά και που καθιζάνουν κατά τη διάρκεια των διαδικασιών διαχείρισής τους στη μονάδα. Δυο μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των στερεών αποβλήτων ως ρυπαντών σε άλμη υψηλής αλατότητας, ελέγχοντας την καταβύθιση τους :

- Μέθοδος pH-mod (pH-modification) : Στοχεύει στην παραμονή των στερεών ρυπαντών διαλυμένων στην άλμη για αρκετό χρόνο, ώστε να είναι εφικτή η διοχέτευση τους στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής.
- Μέθοδος FCRC (flash crystallizer/reactor-clarifier) : Καταβύθιση των στερεών ρυπαντών της άλμης με κατάλληλο τρόπο και σε κατάλληλο τόπο, ώστε να

αφαιρεθούν και να διατεθούν κατάλληλα, ενώ η άλμη θα διοχετευθεί στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής χωρίς τον κίνδυνο μείωσης της διαπερατότητας του ταμιευτήρα.

Επομένως η σωστή διαχείριση των τυχόν επικίνδυνων στερεών αποβλήτων είναι να παραμείνουν διαλυμένα στην άλμη και δια μέσου αυτής να διοχετευθούν στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Αν αυτό δεν είναι εφικτό τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί η κλασσική περιβαλλοντική διαδικασία επεξεργασίας και ταφής τους προς αποφυγή μόλυνσης του ατμοσφαιρικού αέρα, του εδάφους και του επιφανειακού και υπόγειου υδάτινου συστήματος. Το κόστος αντιμετώπισης τους είναι περίπου το 1-2% του κόστους παραγωγής.

4.6 Άλλα περιβαλλοντικά θέματα

Εκτός από τα περιβαλλοντικά ζητήματα της χημικής ρύπανσης και των κανονικών και οικονομικών επιπτώσεων, που ήδη προαναφέρθηκαν, υπάρχουν και άλλα εξίσου βασικά περιβαλλοντικά ζητήματα που τίθενται κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία μιας γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Είναι μεταξύ των παραγόντων που πρέπει να αναλυθούν στο πλαίσιο ενός γεωθερμικού έργου. Αναφέρονται στις τυχόν διαταραχές στην επιφανειακή μορφολογία, στους φυσικούς οικοτόπους και στον επηρεασμό της χλωρίδας και της πανίδας με τις αλλαγές και τη διαμόρφωση στο τοπίο και με την εγκατάσταση ανθρωπογενών δομών, που δεν υπήρχαν. Τα περιβαλλοντικά αυτά θέματα κυρίως αφορούν :

- Τη θερμική ρύπανση (Thermal pollution)
- Την ηχορύπανση (Noise pollution)
- Τη σεισμικότητα (Seismicity) των EGS
- Την προστασία τοπίου και οικοτόπων (Landscape and Habitats Protection)
- Τις καθιζήσεις (Subsidence) και
- Τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων

4.6.1 Θερμική ρύπανση

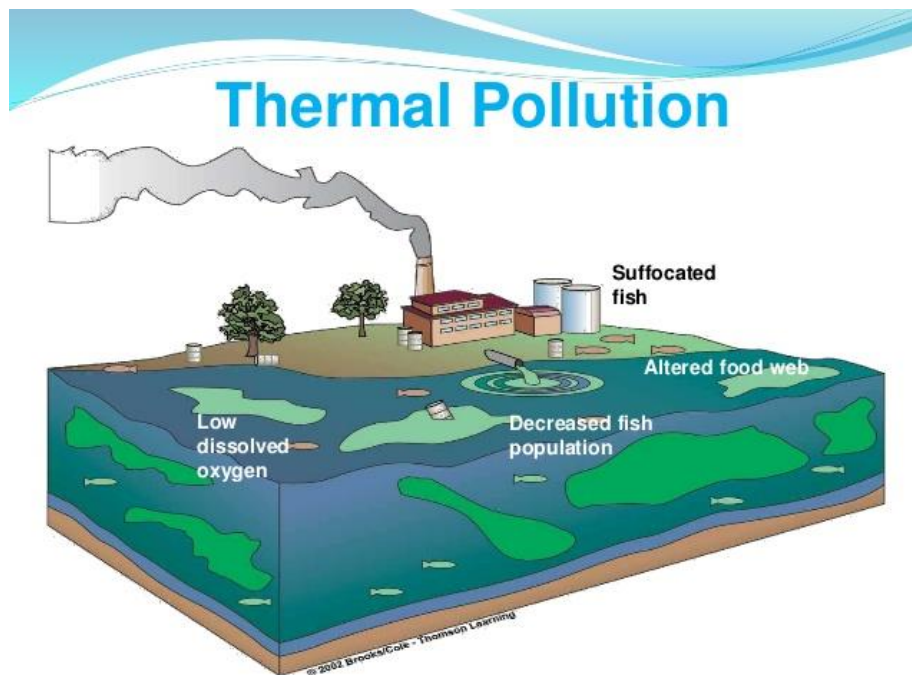
Το νερό των αποβλήτων από τους διαχωριστές και τους πύργους ψύξης έχει υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του νερού του επιφανειακού δικτύου απορροής, ως εκ τούτου αποτελεί μια πιθανή πηγή θερμικής ρύπανσης, όταν απορρίπτεται σε κοντινά ποτάμια και λίμνες. Επομένως πρέπει να διαχειρίζεται με βάση τα επιτρεπόμενα

επίπεδα απόρριψης της θερμοκρασίας. Βεβαίως αναφερόμαστε για γεωθερμικά ρευστά χωρίς ρυπογόνες χημικές ουσίες, αλλά μόνο με αυξημένη θερμοκρασία.

Η διοχέτευση των γεωθερμικών ρευστών μετά την αξιοποίησή τους (ως απόβλητα) στο επιφανειακό υδάτινο σύστημα απορροής με αυξημένες θερμοκρασίες δημιουργούν πιθανά προβλήματα στην ανάπτυξη των υδρόβιων οργανισμών, όταν υπάρχουν, αλλά και λόγω μείωσης της συγκέντρωσης του οξυγόνου που περιέχει το νερό. Απαιτείται λοιπόν, όταν υπάρχει θερμικό πρόβλημα, η συγκέντρωση των γεωθερμικών ρευστών μετά την αξιοποίησή τους σε υδάτινες δεξαμενές ψύξης για τη μείωση της θερμοκρασίας τους σε επιθυμητά επίπεδα πριν τη διοχέτευση στο επιφανειακό σύστημα απορροής. Σε αντίθετη περίπτωση η διοχέτευσή τους στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής είναι δεδομένη.

Ακόμη και μικρή αύξηση 2 έως 3°C της θερμοκρασίας του νερού σε ποταμό ή λίμνη, ως αποτέλεσμα της απόρριψης λυμάτων από μια γεωθερμική εφαρμογή θα μπορούσε να προκαλέσει δραστικές αλλαγές στο οικοσύστημά τους. Όσοι από τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς είναι ευαίσθητοι στις θερμοκρασιακές μεταβολές σταδιακά θα εξαφανίζονταν, αφήνοντας τα μεγαλύτερα ψάρια χωρίς την πηγή τροφής τους. Μια αύξηση της θερμοκρασίας του νερού θα μπορούσε επίσης να βλάψει την ανάπτυξη των αυγών άλλων ειδών ψαριών. Αν τα ψάρια αυτά αποτελούν βρώσιμο είδος και την αναγκαία στήριξη για την αλιευτική κοινότητα, τότε η εξαφάνισή τους θα ήταν κρίσιμη για την κοινωνία στο σύνολό της.

Είναι γνωστό ότι όλες οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αποβάλλουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα δια μέσου των πύργων ψύξης, όπου οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής αποβάλλουν την περισσότερη ανά μονάδα ισχύος. Τα δίκτυα μεταφοράς των γεωθερμικών ρευστών λόγω του συχνά μεγάλου μήκους τους θα πρέπει να έχουν θερμομόνωση για την αποφυγή θερμικών απωλειών προς τον περιβάλλοντα χώρο.



Σχήμα 4.1 Θερμική ρύπανση [34]

4.6.2 Ηχορύπανση

Η αρχική αντιληπτή επίπτωση περιστασιακών θορύβων στο περιβάλλον προέρχεται κατά την κατασκευή των γεωτρήσεων (ειδικά κατά τις δοκιμές παραγωγής) και ακολούθως των επιφανειακών εγκαταστάσεων της γεωθερμικής μονάδας και των απαιτούμενων υποδομών τους, που όμως διαρκούν πρόσκαιρα μέχρι την ολοκλήρωσή τους, όπως και κατά την κατασκευή οποιασδήποτε άλλης βιομηχανικής μονάδας. Αν και προσωρινός, αρκετά μικρού χρονικού διαστήματος, ο θόρυβος που προέρχεται κατά τη φάση των δοκιμών παραγωγής μιας γεώτρησης είναι ο πιο σοβαρός, που αντιμετωπίζεται κυρίως με τη χρήση σιγαστήρων εκτόνωσης του γεωθερμικού ρευστού.

Η ηχορύπανση που συνδέεται με τη λειτουργία των γεωθερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, θα πρέπει να αξιολογείται ειδικά όταν οι εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Τα επίπεδα θορύβου στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται χαμηλού βαθμού. Κατά την κανονική λειτουργία της μονάδας τυχόν θόρυβος προέρχεται από τους ανεμιστήρες στους πύργους ψύξης όμως σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Κατά τη φάση της παραγωγής υπάρχει ένας υψίσυχνος θόρυβος από τον ατμό κατά τη ροή του στα δικτυα των σωληνώσεων, που είναι εύκολα αντιμετωπίσιμος με κατάλληλη ηχομόνωση. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις των ατμοστροβίλων είναι πάντα αρκετά μονωμένες θερμικά και ακουστικά. Κατά την εκκίνηση της μονάδας ο προσωρινός θόρυβος από τις γεωτρήσεις είναι έντονος και αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με την εγκατάσταση

σιγαστήρων. Ο θόρυβος που προκαλείται από τις εφαρμογές άμεσης χρήσης των γεωθερμικών ρευστών είναι συνήθως αμελητέος.

4.6.3 Σεισμικότητα των Βελτιωμένων Γεωθερμικών Συστημάτων (EGS)

Η σεισμική δράση στις γεωθερμικές περιοχές είναι ένα φυσιολογικό γεωλογικό φαινόμενο λόγω της θέσης τους σε τεκτονικά ενεργές περιοχές στα όρια των λιθосφαιρικών, όπου συνυπάρχουν οι σεισμοί, η γεωθερμία και τα ηφαίστεια. Ο κίνδυνος των γεωθερμικών εγκαταστάσεων από σεισμούς σε τεκτονικά ενεργές περιοχές είναι μεγαλύτερος από ότι η αύξηση του σεισμικού κινδύνου λόγω της λειτουργίας των γεωθερμικών μονάδων. Είναι δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ των σεισμών που προκαλούνται από τη γεωθερμική και τη φυσική δραστηριότητα στην περιοχή.

Η διαδικασία της υψηλής πίεσης έγχυσης κρύου νερού σε θερμά πετρώματα δημιουργεί τοπικές γεωμηχανικές αλλαγές που συνήθως ενεργοποιούν μικρά σεισμικά γεγονότα μέσω υδρορωγμάτωσης ή ανακατανομής της θερμικής έντασης, που εφαρμόζεται στη μέθοδο των EGS με σκοπό τη διέγερση ρηγμάτων για την ενίσχυση της επανακυκλοφορίας νερού. Η σωστή διαχείριση του θέματος θα είναι ένα βασικό βήμα για τη διευκόλυνση της σημαντικής επέκτασης των μελλοντικών έργων EGS. Ίσως το μεγαλύτερο εμπόδιο που θα αποτρέψει την εξάπλωση των EGS είναι η ικανότητά τους (όχι συχνά) να προκαλέσουν και παροδικούς αισθητούς μικροσεισμούς κατά τη φάση της υδραυλικής ρωγμάτωσης, που φοβίζει τους ανθρώπους. Αφορά κυρίως την πρόκληση μικροσεισμικότητας ανιχνεύσιμης από ανθρώπους με αισθητές δονήσεις του εδάφους ή θόρυβο, αν και σε μικρή κλίμακα, που θέτουν ένα περιβαλλοντικό και κοινωνικό ζήτημα και συνδέονται με ορισμένα έργα επίδειξης των EGS, ιδιαίτερα κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, σημειώνοντας ότι δεν έχουν οδηγήσει σε ανθρώπινο τραυματισμό ή σοβαρή βλάβη. Συνήθως μόνο με ευαίσθητο εξοπλισμό.

Ένα διεθνές πρωτόκολλο έχει αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, όπου οι κατάλληλες μέθοδοι διαχείρισης ερευνώνται, στοχεύοντας στην ελαχιστοποίησή του. Οι σεισμοί είναι στην πραγματικότητα μια απαίτηση για την τεχνολογία των EGS. Κάποια παροδική μικροσεισμικότητα είναι αναπόφευκτη και αναμενόμενη στα EGS, όταν συμπιέζεται το ρευστό για να ενισχυθεί ή να δημιουργηθεί διαπερατότητα με τη μέθοδο της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Οι περισσότεροι σεισμοί που δημιουργούνται είναι πράγματι πολύ μικροί για να γίνουν αισθητοί. Όμως οι κίνδυνοι και κάποιων αισθητών σεισμών μπορούν να μειωθούν με την προσεκτική διαχείριση και την

παρακολούθηση και δεν πρέπει να θεωρηθούν ως εμπόδιο για την περαιτέρω ανάπτυξη των θερμών ξηρών πετρωμάτων ως γεωθερμική πηγή ενέργειας. Ήδη αναπτύσσεται μια νέα τεχνολογία χρήσης του CO₂ αντί νερού στην εισπίεση για υδραυλική ρωγμάτωση που φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα.

Κατά τη διάρκεια της υδραυλικής ρωγμάτωσης δημιουργούνται κύματα χαμηλής συχνότητας πολύ μικρότερης έντασης από αυτά των σεισμών. Η μικροσεισμική τεχνολογία έχει αναπτυχθεί για τον εντοπισμό αυτών των σημάτων και του σημείου προέλευσής τους. Τα στοιχεία από τέτοια μηνύματα προσφέρουν μια εικόνα του μεγέθους, του σχήματος και του προσανατολισμού του τεχνητού ταμιευτήρα.

4.7 Προστασία τοπίου και οικοτόπων

Τα γεωθερμικά έργα πρέπει να συμμορφώνονται με τους κανόνες προστασίας από τις φυσικές επιπτώσεις στο τοπίο, στους οικοτόπους και στην επιφανειακή μορφολογία. Οι γεωθερμικές μονάδες έχουν πολύ χαμηλή οπτική ενόχληση του τοπίου, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της μόνιμης υποδομής τους μπορεί να καλυφθεί και κάτω από το έδαφος. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των γεωθερμικών μονάδων είναι ότι απαιτείται ελάχιστη χρήση γης κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους (4-8 στρέμματα), όπου το κύριο οπτικό αντίκτυπο στο τοπίο κατά τη φάση αυτή είναι η παρουσία της εξέδρας της γεώτρησης. Επίσης ένα γεωθερμικό έργο θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις οδηγίες για τη διατήρηση της άγριας πανίδας και χλωρίδας. Οι αρμόδιες εθνικές αρχές με βάση τα συμπεράσματα της εκτίμησης των επιπτώσεων στο τοπίο, στους οικοτόπους και στην άγρια πανίδα και χλωρίδα, αφού βεβαιωθούν ότι δεν θα παραβλάψουν την ακεραιότητα τους, συμφωνούν με τις αποφάσεις υλοποίησης του έργου. Η ύπαρξη εθνικών πάρκων σε απομακρυσμένες ηφαιστειακές τουριστικές περιοχές είναι συχνά ένας ανασταλτικός παράγοντας για νέες γεωθερμικές προοπτικές.

4.8 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων

Η αρχική αντιληπτή επίπτωση στο περιβάλλον και η εμφάνιση περιστασιακών θορύβων προέρχεται κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων και των απαιτούμενων υποδομών τους, όπου το κύριο οπτικό αντίκτυπο στο τοπίο κατά τη φάση αυτή είναι η παρουσία της

εξέδρας της γεώτρησης. Οι κατάλληλες σωληνώσεις και τσιμεντώσεις στη γεώτρηση είναι αναγκαίες για την ασφάλεια της και την αποφυγή μόλυνσης των επιφανειακών κρύων υδροφόρων οριζόντων με γεωθερμικά ρευστά. Μετά την ολοκλήρωση των γεωτρητικών εργασιών θα πρέπει να αποκαθίσταται ο πέριξ χώρος και να απομακρύνονται τα διάφορα υλικά, όπου οι όποιες τυχόν επιπτώσεις στο περιβάλλον που προκαλούνται κατά την εκτέλεση της γεώτρησης σχεδόν αποκαθίστανται με την ολοκλήρωσή της. Κατά την εκτέλεση της γεώτρησης απαιτείται μια έκταση 500 – 3000m² ανάλογα το βάθος (300 – 2,500m), όπου μετά την ολοκλήρωση της παραμένουν υπό δέσμευση μια έκταση +-200m² και οι δρόμοι πρόσβασης προς αυτή

Περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη χρήση ως ρευστού διάτρησης μόνο νερού ή νερού με μπετονίτη ή αέρα με αφριστικό διάλυμα δε παρουσιάζονται. Πιθανά προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν με τη χρήση ορισμένων από τα χημικά πρόσθετα υλικά για τον έλεγχο των ιδιοτήτων του πολφού. Όμως σε αυτή την περίπτωση ιδιαίτερη περιβαλλοντική αντιμετώπιση πρέπει να δειχθεί στις λιγνοσουλφονικές ενώσεις αν έχουν επεξεργαστεί με χρώμιο ή δικαρβονίδια, στις ενώσεις χλωροαιθανόλης, στις ενώσεις πετρελαιοειδών, κλπ. Τα πιο συνηθισμένα αέρια στις γεωθερμικές γεωτρήσεις είναι τα διαβρωτικά H₂S, CH₄, τα οποία δια μέσου του ρευστού διάτρησης μεταφέρονται στην επιφάνεια.

Ένας απαεριωτής κενού χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση αερίων που περιέχονται στον πολφό διάτρησης και προέρχονται από τους σχηματισμούς κατά τη διάτρησή τους. Εάν η περιεκτικότητα σε αέρια στον πολφό είναι υψηλή, ένας διαχωριστής αερίου μεγαλύτερης χωρητικότητας από το πρότυπο χρησιμοποιείται με αυξημένο εμβαδόν επιφάνειας. Το διαχωριζόμενο αέριο μεταφέρεται από τις γραμμές εξαέρωσης σε μια απομακρυσμένη θέση όπου εκτονώνεται ή δεσμεύεται ή καίγεται. Για την ασφάλεια προσωπικού θα πρέπει να υπάρχουν ειδικοί ανιχνευτές εντοπισμού των πιο πάνω αερίων με συναγερμό, ατομικές μάσκες, ειδικό εξοπλισμό, εκπαιδευμένο προσωπικό, κλπ για την αντιμετώπιση εκτάκτων καταστάσεων. Για την αντιμετώπιση των διαβρωτικών τάσεων στον εξολισμό χρησιμοποιείται αυξημένο pH και ο απαεριωτής κενού για τη μη επανακύκλωση τους στον ποφό, αλλά και με προσθήκη ασβεστίου, ανθρακικών και πολυμερών που κατακρημνίζουν το CO₂ και απομονώνουν το H₂S.A

Κεφάλαιο 5

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

5.1 Εισαγωγή

Η γεωθερμική ενέργεια όπως ξέρουμε είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, όπου η θερμότητα εξάγεται από την λιωμένη μάζα και την καταστροφή ραδιενεργών υλικών σε μεγάλα βάθη στο εσωτερικό της γης. Σε αντίθεση με άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας η γεωθερμική ενέργεια είναι μια συνεχής πηγή ενέργειας. Έτσι η γη είναι μια τεράστια πηγή θερμικής ενέργειας με διάφορες μορφές όπως ηφαιστειακές εκρήξεις και θερμοπηγές οι οποίες κατευθύνονται στην ατμόσφαιρα μέσω του εδάφους. Οι πεπερασμένες ποσότητες ορυκτών καυσίμων, οι ποικιλία στις μορφές ενέργειας, η σταθερή ανάπτυξη, η ενεργειακή ασφάλεια και τα περιβαλλοντικά προβλήματα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη των εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Αυτές οι δραστηριότητες έχουν στόχο τη μείωση του κόστους της ανανεώσιμης ενέργειας και την ανταγωνιστικότητα με τα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα.

Πολλές μελέτες έχουν γίνει πάνω σε ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση των γεωθερμικών κύκλων ισχύος και κύκλων ισχύος με πηγή γεωθερμικής θερμότητας αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι η έλλειψη σε εξεργοοικονομικές αναλύσεις για γεωθερμικούς κύκλους παραγωγής είναι πολύ εμφανής στη βιβλιογραφία και αν έχει γίνει οικονομική ανάλυση, είναι πολύ περιορισμένη για να καθοριστεί το κόστος των μονάδων για τους κύκλους.

Ο Bodvardson και ο Eggers [1] μελέτησαν απλού (single flash) και διπλού (double flash) τύπου από ενεργειακές και εξεργειακές σκοπιές και πέτυχαν 38.7% και 49% εξεργειακή απόδοση αντίστοιχα.. Σε αυτήν την έρευνα η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού θεωρήθηκε 250°C. Γεωθερμική μονάδα δυαδικού τύπου χωρητικότητας 12,4 MW αναλύθηκε από τον Kanoglu [2] και η εξεργειακή απόδοση και η συνεισφορά όλων των τμημάτων του κύκλου στον ρυθμό καταστροφής της εξέργειας έχουν συμπεριληφθεί. Ο Yarı [3] μελέτησε διαφορετικές διαμορφώσεις ORC κύκλων για να παράξει ενέργεια από υψηλής θερμοκρασίας γεωθερμικό ρευστό και αυτοί οι κύκλοι συγκρίθηκαν μεταξύ τους από

ενεργειακή και εξεργειακή άποψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο κύκλος ORC με εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας με R123 ως εργαζόμενο μέσο ανάμεσα στους υπόλοιπους κύκλους έχει την μέγιστη απόδοση στον πρώτο νόμο που αντιστοιχεί σε 7,65%. Με αναφορά στην παραγωγή ενέργειας, τα εργαζόμενα μέσα ORC έχουν καλύτερη απόδοση όταν χρησιμοποιούν χαμηλότερης θερμοκρασίας πηγές θερμότητας σε σύγκριση με τον ατμό [4]. Ο DiPippo [5] έδειξε ότι αν μονάδα δυαδικού τύπου χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας από γεωθερμικό ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας, θα επιτευχθεί εξεργειακή απόδοση πάνω από 40%.

Ο Walraven [6] ανέλυσε διαφορετικούς συνδυασμούς ORC και Kalina για να παράξει ενέργεια από γεωθερμική πηγή θερμοκρασίας 100-150°C. Σε αυτήν την έρευνα η εξεργειακή απόδοση του πιο αποδοτικού κύκλου ξεπέρασε το 50%.

Ο Jalili [7] μελέτησε μονάδες απλού και διπλού τύπου της γεωθερμικής μονάδας παραγωγής Sebalan. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αν η πίεση του διαχωριστή και του συμπυκνωτή, για την μονάδα απλού τύπου, είναι 5,5 και 0,3 bar αντίστοιχα, η ισχύς του δικτύου που θα παραχθεί πάει στα 31MW. Επίσης στην περίπτωση του διπλού τύπου, αν οι πιέσεις του πρώτου, δεύτερου διαχωριστή και του συμπυκνωτή θεωρηθούν 7,5, 1.1 και 0.1 bar αντίστοιχα, η ενέργεια του δικτύου φθάνει τα 49,7MW.

Σε άλλη μελέτη ο DiPippo [8] εστίασε στις λεπτομέρειες των γεωθερμικών μονάδων παραγωγής στην Ιταλία και την Νέα Ζηλανδία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτοί οι σταθμοί μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλή εξεργειακή απόδοση.

Ο Cheng Zhou [9] μελέτησε υποκρίσιμους και υπερκρίσιμους ORC για να χρησιμοποιήσει γεωθερμικές και ηλιακές πηγές θερμότητας μέσω ενέργειας και εξέργειας. Σε αυτόν τον κύκλο γεωθερμική πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για τον προθερμαντήρα και τον αποστακτήρα και ηλιακή για τον υπερθερμαντήρα. Η εξεργειακή απόδοση ανάμεσα σε 23 έως 32 και 24 έως 37 λαμβάνεται για υποκρίσιμους και υπερκρίσιμους ORC αντίστοιχα.

Κύκλος ORC με γεωθερμική πηγή ενέργειας βελτιστοποιείται από τον Madhawa [10]. Η αναλογία της περιοχής μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας με την ενέργεια που παράγεται στο δίκτυο θεωρούνται ως αντικειμενική λειτουργία. Επίσης οι θερμοκρασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης και ο ρυθμός ροής του γεωθερμικού ρευστού επιλέγονται μεταβλητά για να υπάρχει περιθώριο βελτιστοποίησης. Αμμωνία, HCFC123, ν-πεντάνιο, PF5050 επιλέγονται ως εργαζόμενα μέσα για ORC. Τα αποτελέσματα έδειξαν με εργαζόμενο μέσο αμμωνία έχουμε τις χαμηλότερες αντικειμενικές λειτουργίες και τον μέγιστο ρυθμό ροής μάζας του γεωθερμικού ρευστού. Τα 2 επόμενα έχουν καλύτερη

απόδοση σε σύγκριση με το τελευταίο ως εργαζόμενα μέσα, ωστόσο τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του τελευταίου είναι πιο αποδεκτά από τα υπόλοιπα υγρά.

Ο Aksoy [11] έχει ερευνήσει το δυναμικό της Τουρκίας για να χρησιμοποιήσει γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εκδόθηκαν μέχρι τώρα για αυτήν την έρευνα, 311.87 MW ηλεκτρικά παρέχονται από γεωθερμικές μονάδες παραγωγής στην Τουρκία, ενώ έχει την ικανότητα να παράξει 2000MW ηλεκτρικά.

Ο Liu [12] διεξήγαγε ανάλυση ευαισθησίας για τις λειτουργικές παραμέτρους του διαδικού ORC. Εργαζόμενο μέσο, θερμοκρασία υπερθερμαντήρα, θερμοκρασία εξατμιστή και συμπυκνωτή, θερμοκρασία εξάτμισης, ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και του στροβίλου καθώς και το μέγεθός του επιλέγονται ως παράμετροι επιλογής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία εξάτμισης έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη θερμοδυναμική απόδοση του δυαδικού κύκλου. Επίσης σε αυτή τη μελέτη, οι ιδανικές τιμές υπολογίζονται για τις παραμέτρους επιλογής για την καλύτερη απόδοση του κύκλου.

Ο Wang [13] χρησιμοποίησε τον ORC με εργαζόμενο μέσο CO₂ για να κατηγοριοποιήσει γεωθερμικές πηγές ενέργειας. Στην ανάλυση, η πολλαπλών παραμέτρων βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε για να βρεθούν οι ιδανικές τιμές των παραμέτρων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε διαφορετικές καταστάσεις, με δεδομένη πίεση της τουρμπίνας, η εξεργειακή απόδοση του κύκλου φτάνει τις μέγιστες τιμές. Επίσης η αναλογία της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας του εναλλάκτη θερμότητας με την παραγόμενη ισχύ του δικτύου έχει την ελάχιστη τιμή.

Ο Herbele [14] ανέλυσε κύκλο ORC ως δυαδικό κύκλο για την παραγωγή ισχύος από ταμειυτήρα γεωθερμικού ρευστού. Σε αυτή τη μελέτη ισοβουτάνιο/ισοπεντάνιο και R227ea/R245fa μίγματα χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενα μέσα στον ORC. Επειδή οι θερμοκρασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης δεν είναι σταθερές, καλύτερη αντιστοίχιση της θερμοκρασίας θα συμβεί μεταξύ της ροής στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή, πράγμα που οδηγεί σε καλύτερη εξεργειακή απόδοση.

Tempesti και Fiaschi [15] ανέλυσαν CHP συστήματα στα οποία γεωθερμική πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στον ORC για την είσοδό του στον εξατμιστή. Σύμφωνα με αποτελέσματα από την έρευνα αυτή, ORC κύκλος με R245fa ως εργαζόμενο μέσο έχει το μικρότερο κόστος παραγόμενης ενέργειας ανάμεσα στα υπόλοιπα εργαζόμενα μέσα.

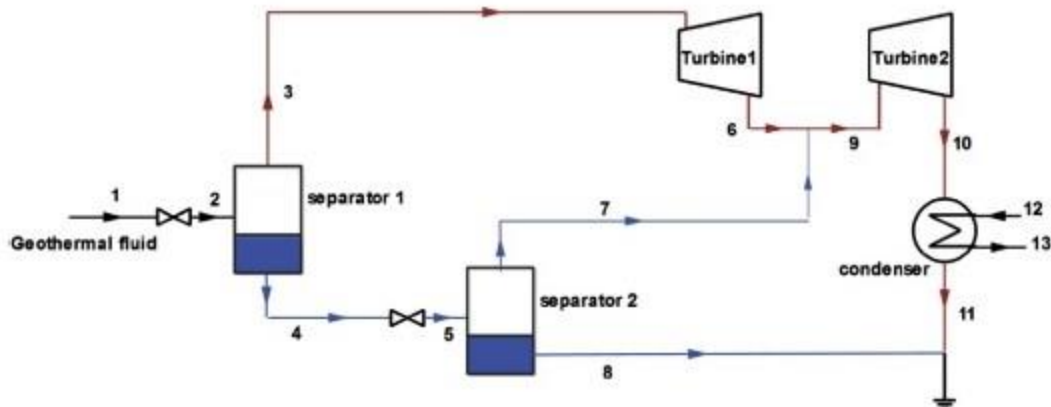
Επίσης κάποιες έρευνες έχουν γίνει στις ιδιότητες των οργανικών εργαζόμενων μέσων και στο πως επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος μετατροπής ενέργειας. Bao και Zhao [16] αναφέρουν τις επιλογές που υπάρχουν για τα εργαζόμενα μέσα σε ORC

κύκλους, συμπεριλαμβανομένης και μιας ανάλυσης της επίδρασης των κατηγοριών των εργαζόμενων μέσων στις θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες του ORC. Επίσης συζητείται η εφαρμογή καθαρών εργαζόμενων μέσων αλλά και μιγμάτων για την επιλογή του κατάλληλου για ένα αποτελεσματικό ORC σύστημα. Ο Chen [17] ερεύνησε την επίδραση των ιδιοτήτων 35 οργανικών ρευστών στην απόδοση του συστήματος ORC. Οι θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες, η σταθερότητα, το αντίκτυπο στο περιβάλλον, η ασφάλεια, η συμβατότητα, η διαθεσιμότητα και το κόστος των εργαζόμενων μέσων αναλύονται σε αυτή τη μελέτη. Σε αυτές τις μελέτες αναλύονται συνήθως οι θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες των ORC.

Οι εξεργοοικονομικές αναλύσεις είναι αυτές που λαμβάνονται υπόψη για την βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων μετατροπής ενέργειας και πολλοί ερευνητές ασχολούνται με αυτές.

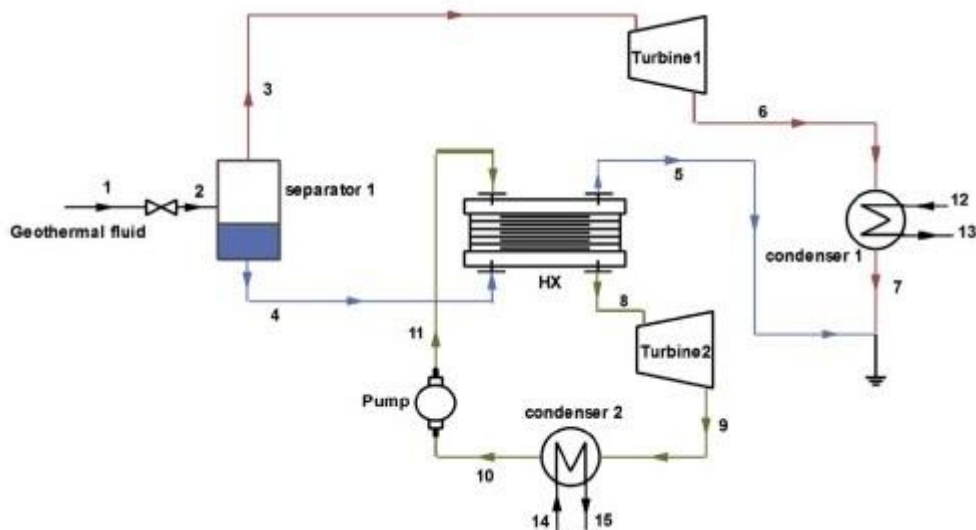
5.2 Περιγραφή των κύκλων

Η πρώτη διάταξη είναι ο γεωθερμικός κύκλος υγρού ατμού διπλού τύπου (double flash) και φαίνεται στο σχήμα 5.1. Το γεωθερμικό ρευστό με την δεδομένη θερμοκρασία (1) περνάει πρώτα από την βαλβίδα εκτόνωσης με σταθερή ενθαλπία στην είσοδο και στην έξοδο της, η πίεσή του πέφτει και εισέρχεται στην διαφασική φάση (2). Έτσι διαφασικό υγρό εισέρχεται στον πρώτο διαχωριστή και κορεσμένος ατμός εξέρχεται από αυτόν (3) και εισέρχεται στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και κορεσμένο υγρό εξέρχεται από τον πρώτο διαχωριστή (4) και περνάει από δεύτερη βαλβίδα εκτόνωσης. Έχοντας περάσει από την δεύτερη βαλβίδα εκτόνωσης και τον δεύτερο διαχωριστή, διαφασικό υγρό χωρίζεται σε δύο τμήματα στην πίεση εξόδου του στροβίλου υψηλής πίεσης. Το ένα μέρος (κορεσμένο ατμός) (7) με την ροή ατμού υψηλής πίεσης του στροβίλου υψηλής πίεσης (6) περνάει από τον στρόβιλο χαμηλής πίεσης και αποκτά την πίεση του συμπυκνωτή (10). Ο υπόλοιπος ατμός μαζί με ότι εξέρχεται από τον συμπυκνωτή (11) αποβάλλονται στο έδαφος.



Σχήμα 5.1 Διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου (double flash) [33]

Η δεύτερη διάταξη είναι συνδυασμένος κύκλος απλού τύπου (single flash) με ORC και φαίνεται στο σχήμα 5.2. Έχοντας περάσει από την βαλβίδα εκτόνωσης και τον διαχωριστή, το γεωθερμικό ρευστό χωρίζεται σε δύο μέρη. Κορεσμένος ατμός εξάγεται από τον διαχωριστή (3) εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο και αποκτά την πίεση του συμπυκνωτή. Κορεσμένο υγρό βγαίνει από τον διαχωριστή (4) και εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας όπου λειτουργεί ως η πηγή υψηλής θερμότητας για τον κύκλο ORC. Αφού πάρει θερμότητα από το κορεσμένο υγρό που βγαίνει από τον διαχωριστή περνάει στον στρόβιλο του ORC (8) και αποκτά την πίεση του συμπυκνωτή του ORC (9) όπου και ψύχεται. Ότι εξέρχεται από τον συμπυκνωτή (7) και τον εναλλάκτη (5) αναμιγνύεται και αποβάλλεται στο έδαφος.



Σχήμα 5.2 Διάταξη συνδυασμένης μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου/ORC [33]

5.3 Θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας των κύκλων

Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ενέργειας σε κάθε τμήμα γράφονται ως εξής :

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\sum \dot{m}_i X_i = \sum \dot{m}_e X_i \quad (2)$$

$$\sum \dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e \quad (3)$$

Το έργο του κάθε ατμοστροβίλου ορίζεται ως εξής :

$$\dot{W}_{T1} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_6 h_6$$

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{10} h_{10} \quad (\text{για double flash})$$

$$\dot{W}_{T2} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 \quad (\text{για single flash/ORC cycle})$$

Ενεργειακές εξισώσεις για τα τμήματα του κάθε κύκλου

Double flash geothermal power cycle

Βαλβίδα εκτόνωσης 1 (expansion valve) : $h_1 = h_2$

Διαχωριστής 1 (separator) : $\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$

Ατμοστρόβιλος 1 (turbine) : $\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_{T1}$

Βαλβίδα εκτόνωσης 2 (expansion valve) : $h_4 = h_5$

Διαχωριστής 2 (separator) : $\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8$

Ατμοστρόβιλος 2 (turbine) : $\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_{T2}$

Συμπυκνωτής (condenser) : $\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{11} h_{11}$

Single flash/ORC combined cycle

Βαλβίδα εκτόνωσης 1 (expansion valve) : $h_1 = h_2$

Διαχωριστής 1 (separator) : $\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$

Ατμοστρόβιλος 1 (turbine) : $\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_{T1}$

Συμπυκνωτής 1 (condenser) : $\dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_7 h_7$

Εναλλάκτης θερμότητας (heat exchanger) : $\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8$

Ατμοστρόβιλος 2 (turbine) : $\dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{T2}$

Συμπυκνωτής 2 (condenser) : $\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{14} h_{14} = \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{10} h_{10}$

Αντλία (pump) : $\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{W}_P = \dot{m}_{11} h_{11}$

Η ισχύς του δικτύου του κάθε κύκλου εκφράζεται ως εξής :

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} \text{ (για double flash)}$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} - \dot{W}_P \text{ (για single flash/ORC cycle)}$$

Ο βαθμός απόδοσης του κάθε κύκλου είναι :

$$\eta_{cycle} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_i h_i - \dot{m}_r h_r}$$

Όπου το i αναφέρεται στις ροές που εισέρχονται στον κύκλο και το r αναφέρεται στις απορριπτόμενες στο έδαφος ροές.

5.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Η ενεργειακή ανάλυση και για τους δύο κύκλους έγινε μέσω Matlab. Τα αρχικά δεδομένα που χρειάστηκαν για να γίνει η μελέτη και η ανάλυση αποτυπώνονται στον Πίνακα 1.

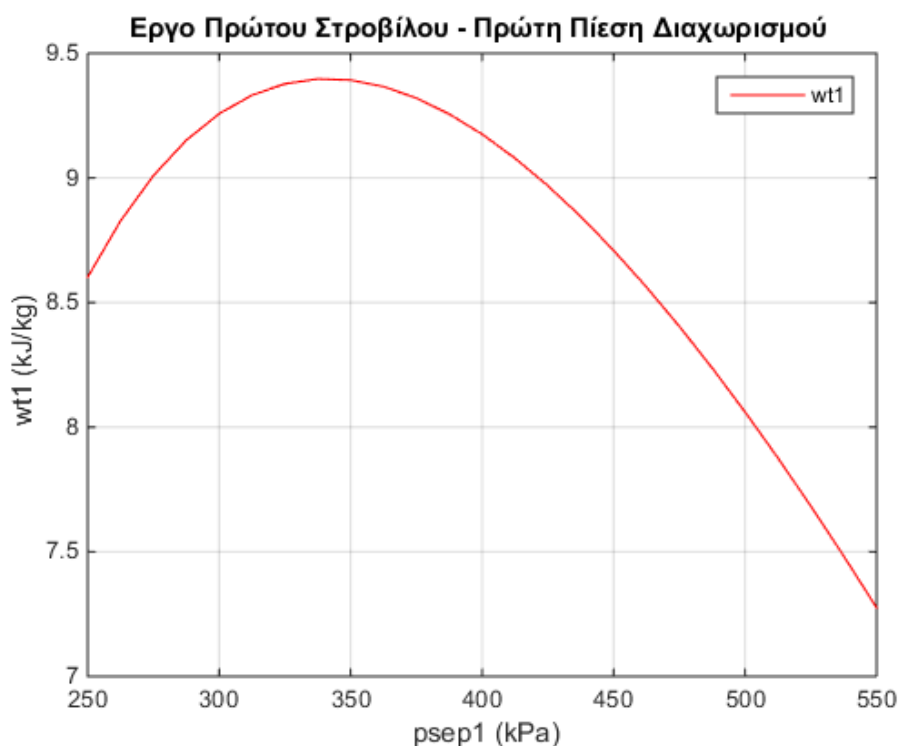
Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πραγματικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του ατμοστρόβιλου και του διαστολέα του ORC κύκλου εξαρτάται από διάφορα οργανικά εργαζόμενα μέσα, την εσωτερική πίεση και θερμοκρασία του διαστολέα, την ταχύτητα περιστροφής του διαστολέα, τον τύπο του διαστολέα και τις αποκλίσεις αυτών των χαρακτηριστικών από τις τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

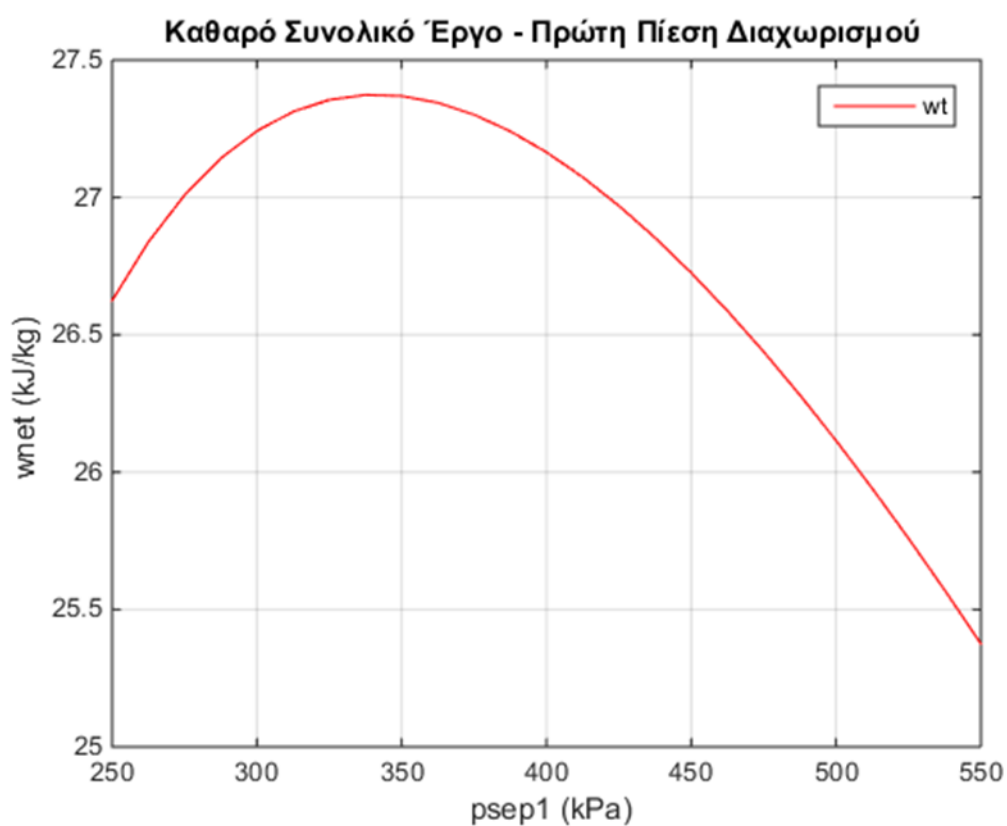
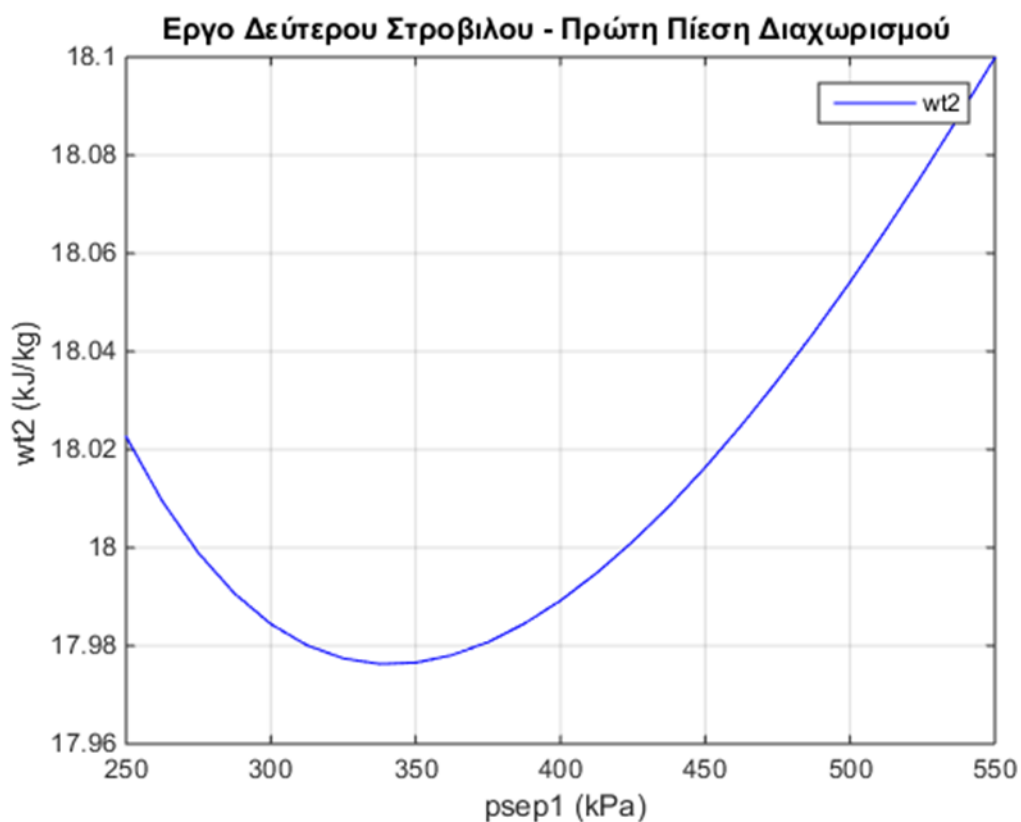
Σύμφωνα με τις πειραματικές τιμές που έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία η πειραματική τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του διαστολέα στον ORC κύκλο κυμαίνεται από 50-75% λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες που αναφέρονται παραπάνω. Σε αυτήν την μελέτη διάφορα εργαζόμενα μέσα χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε η τιμή του βαθμού απόδοσης του διαστολέα του ORC να επιλεγεί διαφορετικά.

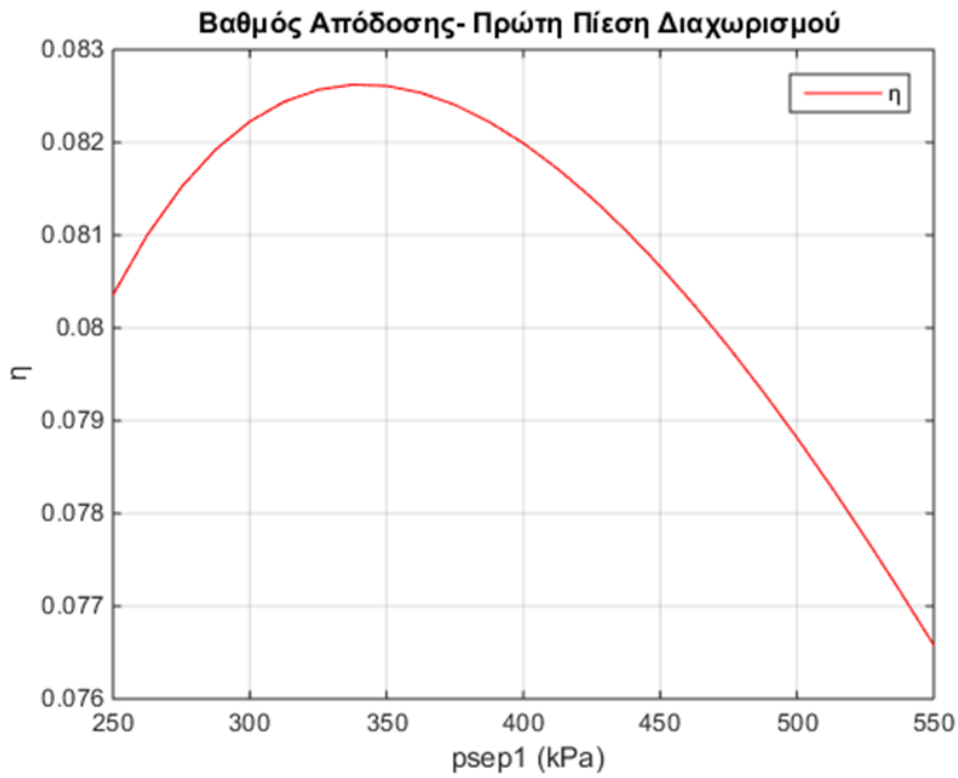
Πίνακας 1. Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη	
Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού που εισέρχεται στους κύκλους (°C) :	175
Μάζα γεωθερμικού ρευστού που εισέρχεται στους κύκλους (kg/s) :	100
Πίεση λειτουργίας 1ου διαχωριστή (kPa) :	320
Θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή στον ORC (°C) :	40
Διαφασική θερμοκρασία στον εναλλάκτη θερμότητας (°C) :	115
Θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ μεταξύ σημείου 4 και 8 στον ORC (°C) :	10
Πίεση εξόδου του ατμοστροβίλου 1 (kPa) :	30
Πίεση λειτουργίας 2ου διαχωριστή στον double flash (kPa) :	110
Πίεση συμπυκνωτή στον double flash (kPa) :	30

Με τα παραπάνω δεδομένα και την επίλυση των εξισώσεων για κάθε σημείο κάθε κύκλου προέκυψαν τα ζητούμενα διαγράμματα. Πρώτα εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τον double flash.

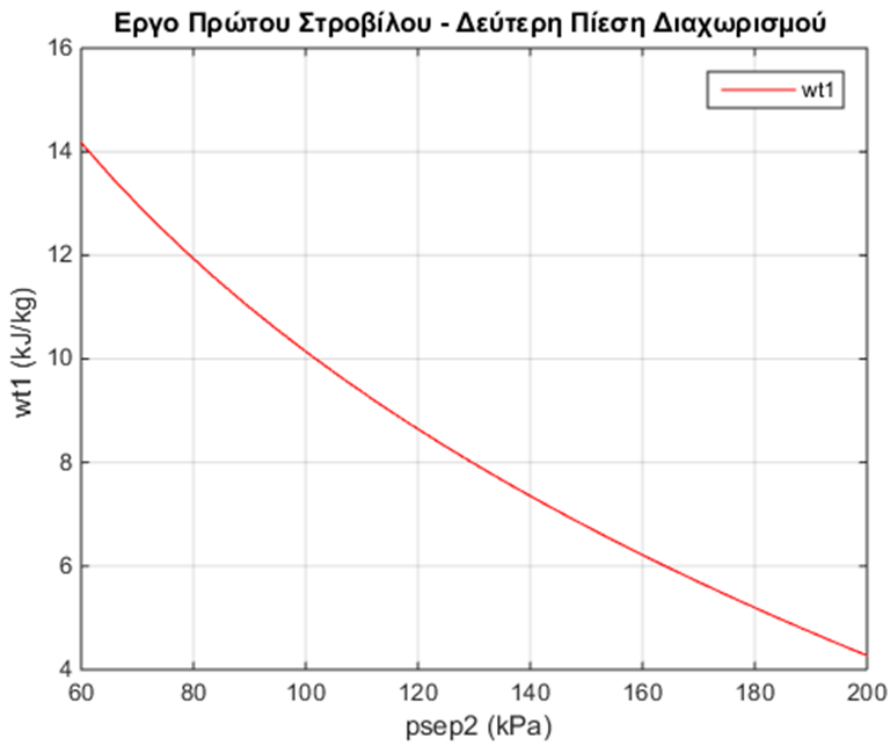
Ζητούμενα είναι τα διαγράμματα της μεταβολής του έργου 1^{ου} στροβίλου, του 2^{ου}, το καθαρό συνολικό έργο και ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πρώτης πίεσης διαχωρισμού.

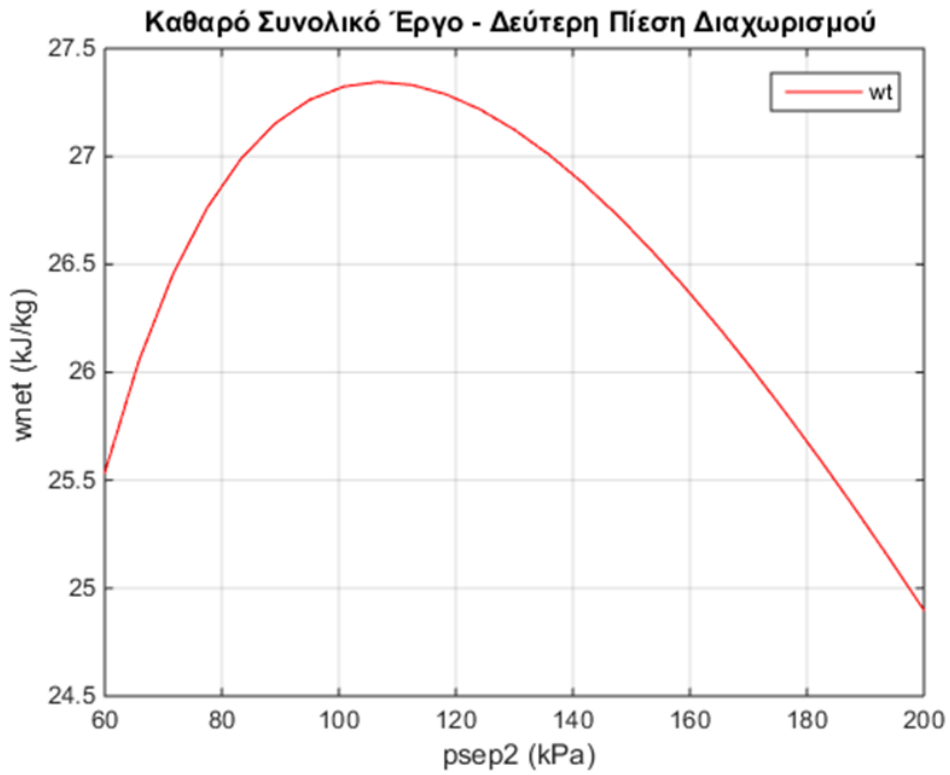
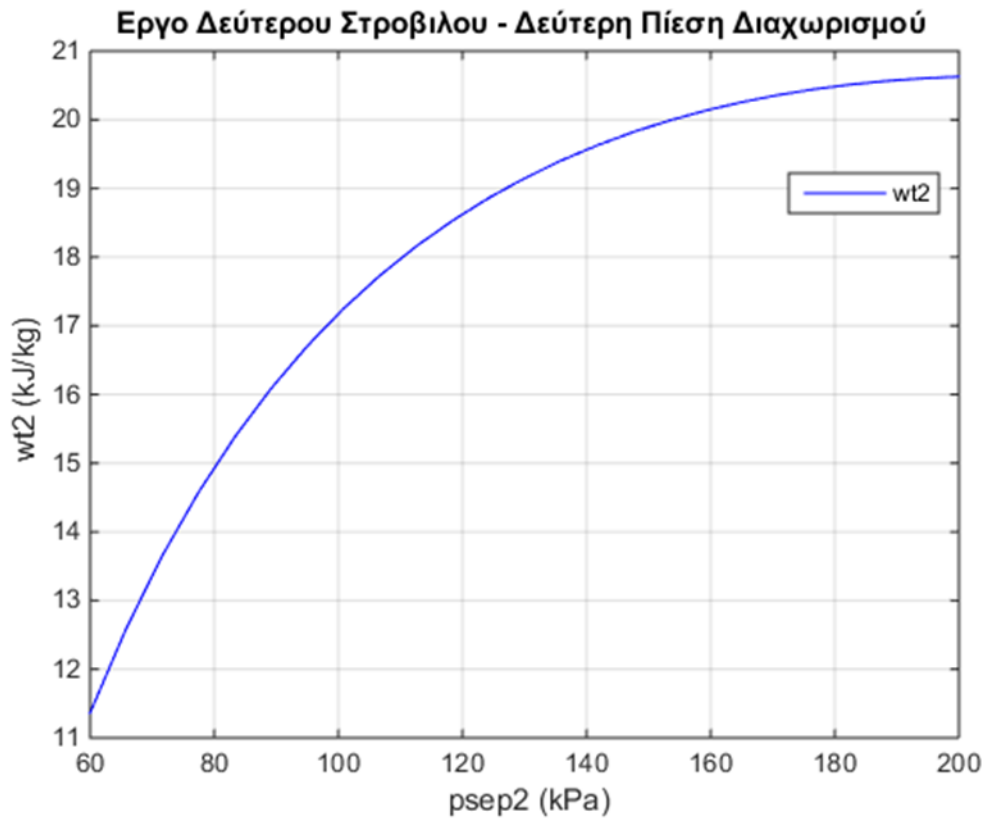


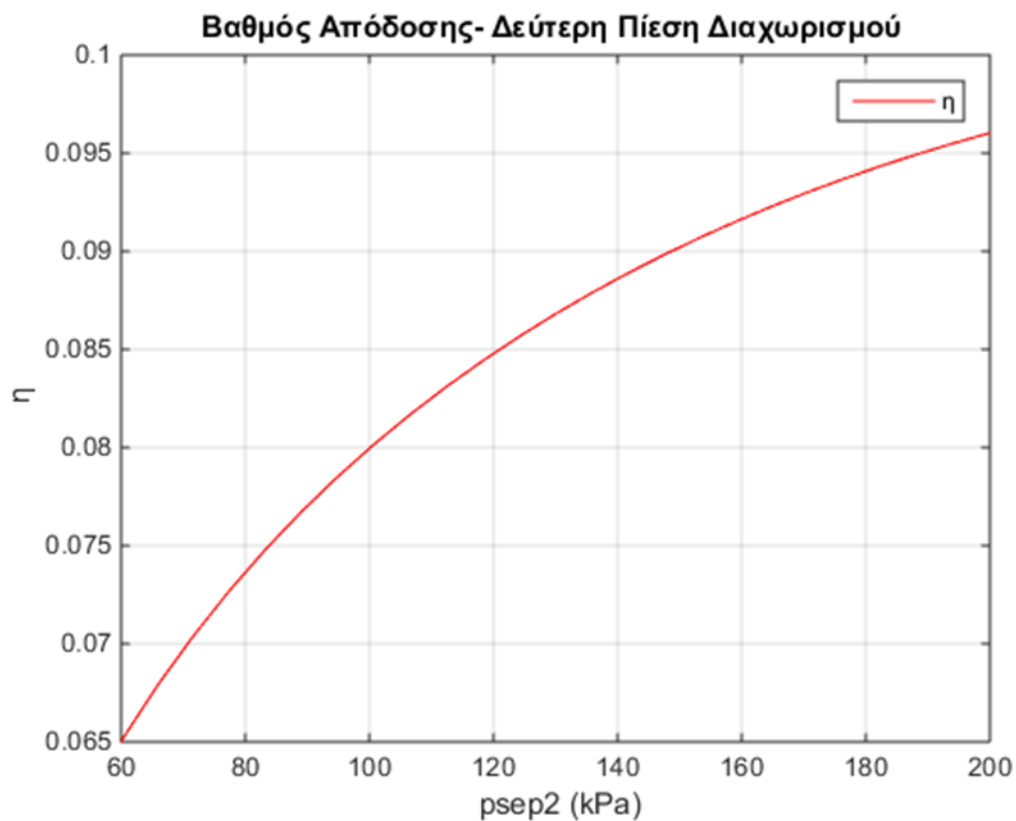




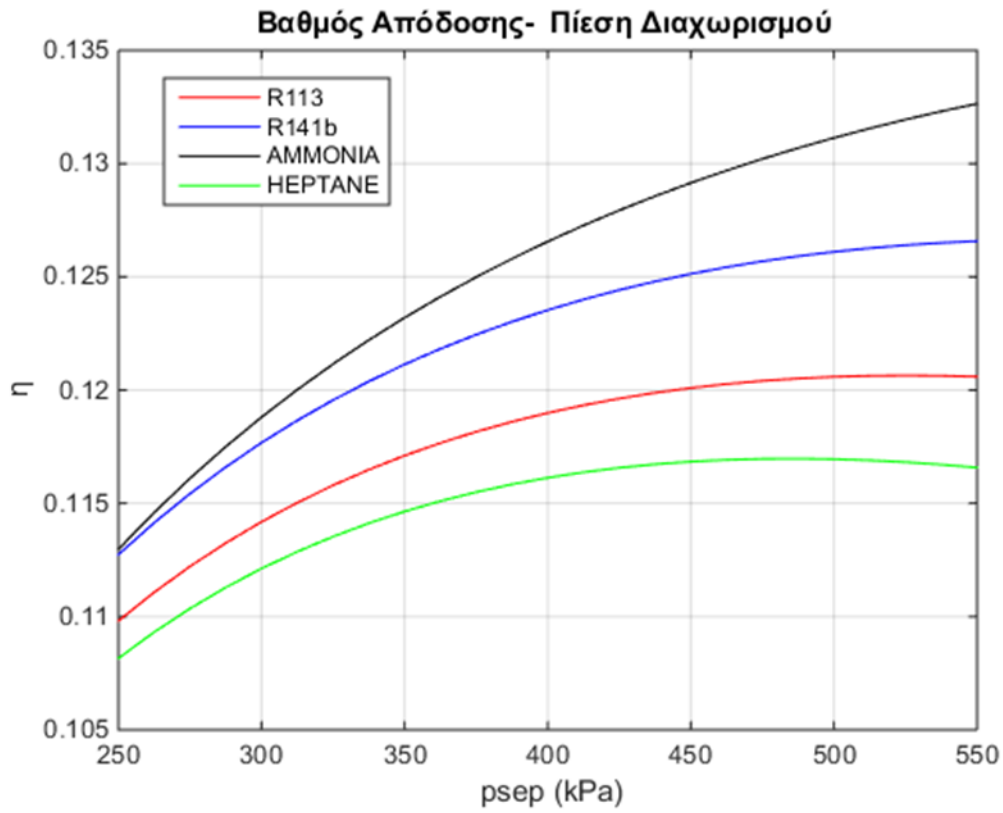
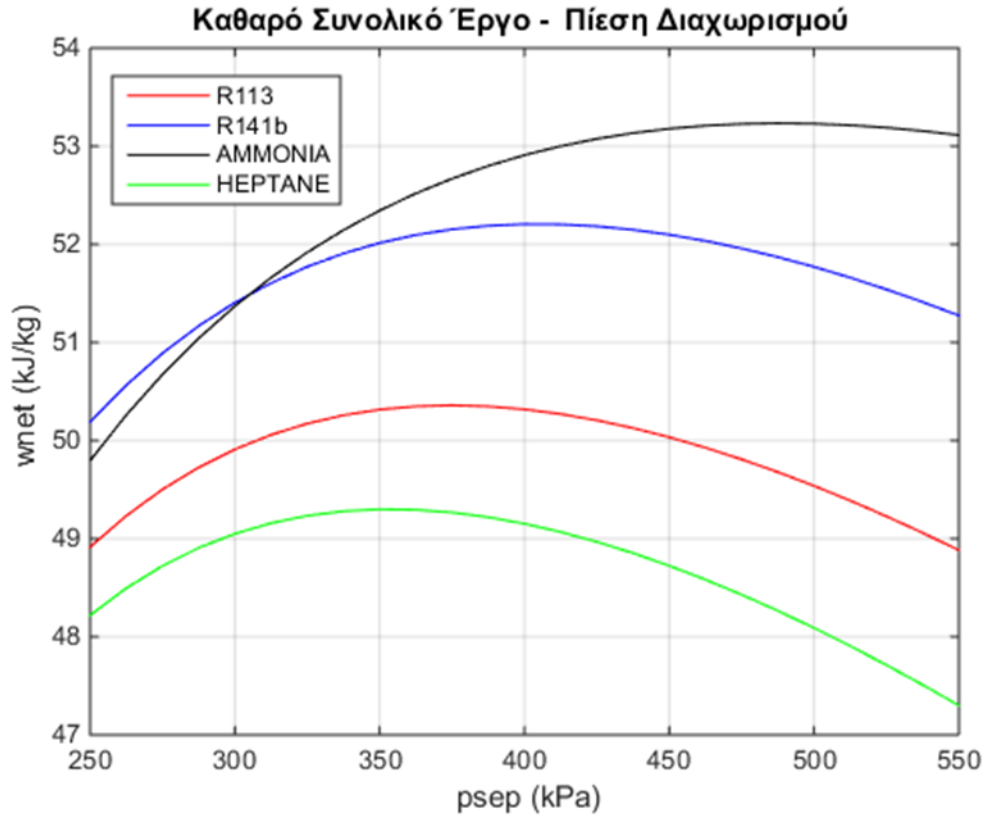
Υπολογισμός έργου 1^{ου} στροβίλου, 2^{ου}, καθαρού παραγόμενου έργου και βαθμού απόδοσης συναρτήσει της 2^{ης} πίεσης διαχωρισμού.



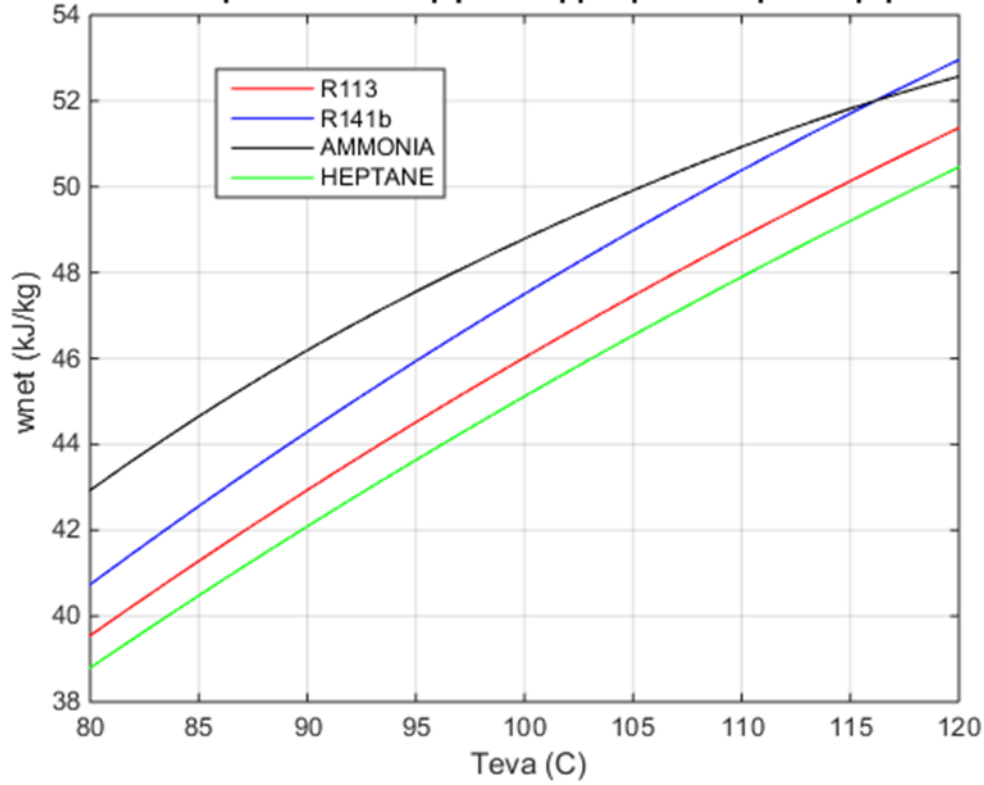




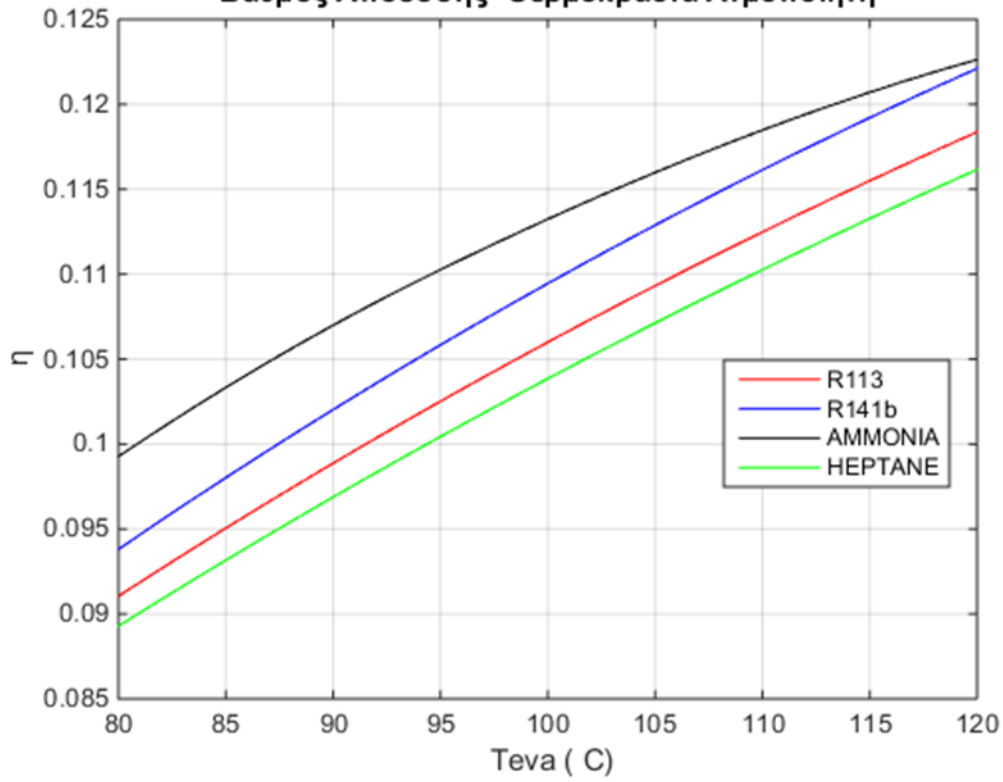
Για τον συνδυασμένο κύκλο single flash/ORC υπολογίστηκε το καθαρό συνολικό έργο και ο βαθμός απόδοσης συναρτήσει της πίεσης διαχωρισμού και της θερμοκρασίας ατμοποιητή για 4 διαφορετικά εργαζόμενα μέσα στον ORC, τα οποία είναι το R113, το R141b, η αμμωνία και το επτάνιο.



Καθαρό Συνολικό Έργο - Θερμοκρασία Ατμοποιητή



Βαθμός Απόδοσης- Θερμοκρασία Ατμοποιητή



5.5 Συμπεράσματα

Μελετώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση της διάταξης του συνδυασμού κύκλου απλής φάσης με οργανικό κύκλο μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι καταρχήν ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται αισθητά με την αύξηση της θερμοκρασίας που επικρατεί στον ατμοποιητή της εγκατάστασης ORC. Από τη σύγκριση της λειτουργίας με διάφορα ψυκτικά μέσα είναι προφανές από το ίδιο διάγραμμα ότι καλύτερο βαθμό απόδοσης επιτυγχάνουμε με τη χρήση της αμμωνίας ο χειρότερος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται στη λειτουργία με επτάνιο. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για τη μεταβολή του παραγόμενου καθαρού έργου. Από το αντίστοιχο διάγραμμα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι για υψηλές θερμοκρασίες ατμοποιητή το r141b παράγει περισσότερο έργο από την περίπτωση της λειτουργίας με αμμωνία που έχει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης

Όσον αφορά την μελέτη της επίδρασης της πίεσης διαχωρισμού παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της για μικρές σχετικά πιέσεις ο ρυθμός αύξησης είναι μεγάλος ενώ στις πιο μεγάλες πιέσεις η επίδραση της αύξησης στο βαθμό απόδοσης μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης τείνει να λάβει μια οριακή τιμή.

Οι παρατηρήσεις αυτές είναι σε συμφωνία και με τα όσα παρουσιάζονται και στα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν την μεταβολή του παραγόμενου έργου. Έτσι το παραγόμενο έργο εμφανίζει ραγδαία αύξηση με την αύξηση της πίεσης όσο η τελευταία λαμβάνει μικρές τιμές στη φτάνει σε μια μέγιστη τιμή για μια συγκεκριμένη πίεση και στη συνέχεια όταν η πίεση ξεπεράσει την οριακή αυτή τιμή τότε το παραγόμενο έργο αρχίζει να μειώνεται .

Για λειτουργία με διάφορα ψυκτικά παρατηρούμε ότι η οριακή τιμή της πίεσης για την οποία το έργο μεγιστοποιείται στην περίπτωση της αμμωνίας είναι η πιο υψηλή γεγονός που οδηγεί στην παρατηρούμενη αύξηση του παραγόμενου έργου σε επίπεδα αισθητά υψηλότερα σε σχέση με τη λειτουργία με άλλα ψυκτικά

Όσον αφορά στο κύκλωμα της διπλής φάσης παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος εμφανίζει μέγιστο για μια συγκεκριμένη τιμή της πρώτης πίεσης διαχωρισμού για την οποία μεγιστοποιείται αντίστοιχα και το καθαρά παραγόμενο έργο.

Για πιέσεις μικρότερες αυτής της τιμής το έργο που παράγει ο πρώτος στρόβιλος συνεχώς αυξάνεται ενώ για πιέσεις μεγαλύτερες το έργο του μειώνεται. Ο δεύτερος στρόβιλος παράγει ουσιαστικά το ίδιο έργο ανεξάρτητα της πίεσης του πρώτου διαχωρισμού

για αυτό και η λειτουργία του πρώτου στροβίλου είναι αυτή που καθορίζει και τη συμπεριφορά όλου του συστήματος σε σχέση με την πίεση του πρώτου διαχωρισμού

Η ανάλυση της επίδρασης της πίεσης του δεύτερου διαχωρισμού δείχνει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της ο βαθμός απόδοσης του κυκλώματος αυξάνεται και αυτός. Το καθαρό έργο που παράγει ο δεύτερος στρόβιλος μεγαλώνει ενώ το αντίστοιχο του πρώτου στροβίλου συνεχώς μειώνεται. Η αύξηση στην παραγωγή του δεύτερου στροβίλου είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη μείωση του έργου του πρώτου στροβίλου και συνυπολογίζοντας και τις διαφορετικές μάζες που διαρρέουν το κάθε στρόβιλο τελικά δεν παρατηρούνται αξιόλογες μεταβολές στο παραγόμενο συνολικό έργο το οποίο εμφανίζει μια οριακή μέγιστη τιμή σε μια ενδιάμεση τιμή της πίεσης αλλά ουσιαστικά οι μεταβολές του γύρω από αυτή την τιμή δεν είναι σημαντικές.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Bodvardson, D. Eggers, The exergy of thermal water, *Geothermics* 1 (3) (1972) 93-95.
- [2] M. Kanoglu, Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant, *Geothermics* 31 (2002) 709-724.
- [3] M. Yari, Exergetic analysis of various types of geothermal power plants, *Renew. Energy* 35 (2010) 112-121.
- [4] N. Shokati, F. Mohammadkhani, N. Farrokhi, F. Ranjbar, Thermodynamic and heat transfer analysis of heat recovery from engine test cell by organic Rankine cycle, *Heat Mass Transf.* 50 (2014) 1661-1671.
- [5] R. DiPippo, Second law assessment of binary plants generating power from low temperature geothermal fluids, *Geothermics* 33 (2004) 565-586.
- [6] D. Walraven, B. Laenen, W. D'haeseleer, Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources, *Energy Convers. Manag* 66 (2013) 220-233.
- [7] S. Jalili nasrabady, R. Itoi, P. Valdimarssonb, G. Saevarsdottirc, H. Fujii, Flash cycle optimization of sabalan geothermal power plant employing exergy concept, *Geothermics* 43 (2012) 75-82.
- [8] R. DiPippo, *Geothermal Power Plants : evolution and performance assessments*, *Geothermics* 53 (2015) 291-307.
- [9] C. Zhou, Hybridization of solar and geothermal energy in both subcritical and supercritical Organic Rankine Cycles, *Energy Covers. Manag.* 81 (2014) 72-82.
- [10] H.D. Madhawa Hettiarachchi, M. Golubovic, W.M. Worek, Y. Ikegami, Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy* 32 (2007) 1698-1706.
- [11] N. Aksoy, Power generation from geothermal resources in Turkey, *Renew. Energy* 68 (2014) 595-601.
- [12] X. Liu, X. Wang, C. Zhang, Sensitivity analysis of system parameters on the performance of the Organic Rankine Cycle system for binary-cycle geothermal power plants, *Appl. Therm. Eng.* 71 (2014) 175-183.
- [13] J. Wang, J. Wang, Y. Dai, P. Zhao, Thermodynamic analysis and optimization of a transcritical CO₂ geothermal power generation system based on the cold energy utilization of LNG, *Appl. Therm. Eng.* 70 (2014) 531-540.

- [14] F.Heberle, M. Preissinger, D. Bruggemann, Zeotropic Mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources, *Renew. Energy* 37 (2012) 364-370.
- [15] D. Tempesti, D. Fiaschi, Thermo-economic assessment of a micro CHP system fueled by geothermal and solar energy, *Energy* 58 (2013) 45-51.
- [16] J. Bao, L. Zhao, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine Cycle, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 24 (2013) 325-342.
- [17] H. Chen, D.Y. Goswami, E.K. Stefanakos, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 3059-3067.
- [18] Μ.Γρ. Βραχόπουλος, Γεωθερμία, Σημειώσεις στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Παραγωγή και διαχείριση Ενέργειας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
- [19] Α. Παπαιωάννου, Θερμοδυναμική: Βασικές Αρχές και Νόμοι-Καθαρές Ουσίες, Τόμος Ι, Εκδόσεις Κοράλι, 2007.
- [20] EN, 14511-1:2008. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 1: Terms and definitions. s.l. : EN 14511-1, 2008.
- [21] EN, 14511-2:2007. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling – Part 2: Test conditions. 2007.
- [22] EN, 14511-3:2007. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling – Part 3: Test methods . 2007.
- [23] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) αριθ. 626/2011 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ.
- [24] Α. Benou, J. Choropanitis, E. Kontoleonos, and C. Karytsas, GSHP systems in the built environment. International Forum, Geothermal Energy in the Spotlight, 11-12 December, Thessaloniki , 2009.
- [25] Α. Μπένου, Κ. Καρράς, Ε. Κοντολέοντος, Κ. Καρύτσας, Σύστημα Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας για θέρμανση-ψύξη στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών και Αποτίμηση Κύκλου Ζωής, 4ο Εθνικό Συνέδριο, Η εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προς ένα φιλόδοξο και αξιόπιστο εθνικό πρόγραμμα δράσης, 10-12 Μαΐου, Αθήνα , 2010.
- [26] Α. Benou, D. Mendrinou, and C. Karytsas, Ground Source Heat Pump Systems: Technology and Best Practices 6th National conference on Energy Efficiency and Renewable energy sources with international participation 29-30 October, Sofia, Bulgaria, 2007.

- [27] Οδηγία 2009/28/EK σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/EK και 2003/30/EK.
- [28] Απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2013/114/ΕΕ "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/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, 2013.
- [29] BS EN 14825:2012. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. 2012.
- [30] EN 12309-1:2014. Gas-fired sorption appliances for heating and/or cooling with a net heat input not exceeding 70 kW. Terms and definitions. 2014.
- [31] Γρηγόρης Ι. Καρυδάκης Μεταλλειολόγος Μηχανικός ΕΜΠ Γεωθερμικός Μηχανικός, Γεωθερμικά Συστήματα Τόμος Β
- [32] Κανονική γεωθερμία-αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές-Κεφάλαιο 3/ Δρ Μιχάλης Βραχόπουλος
- [33] Research paper : Comparative and parametric study of double flash and single flash/ORC combined cycles based on exergoeconomic criteria, Naser Shokati, Faramarz Ranjibar, Mortaza Yari.
- [34] Αναζήτηση στο Google για γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, γεωθερμία κτλπ