



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Θερμότητας
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης
Θερμοδυναμικής

ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μαυρογιάννης Βασίλειος

Επιβλέπουσα
Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. Κορωνάκη Ειρήνη

ΑΘΗΝΑ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα Ειρήνη Κορωνάκη, αναπληρώτρια καθηγήτρια Ε.Μ.Π.. Τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ ερευνητικά στο ιδιαίτερα ενδιαφέρον και εθνικά κρίσιμο πεδίο αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας, μιας εγχώριας και ταυτόχρονα ήπιας πηγής ενέργειας, όσο κυρίως για τη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα δόκτορα Μιχάλη Νίτσα για την ανιδιοτελή βοήθεια και διαρκή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, για τον χρόνο που διέθεσε για την διόρθωση της, αλλά και για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Τις ευχαριστίες μου επίσης εκφράζω προς τον δόκτορα Γρηγόρη Καρυδάκη, Μηχανικό Μεταλλείων στο ΙΓΜΕ, για την εποικοδομητική συνεργασία και τα ερεθίσματα να σχηματίσω μια κατά το δυνατό πληρέστερη ολιστική αντίληψη του πολύ-παραμετρικού πεδίου που αποτελεί η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ξεχωριστά την φίλη και συμφοιτήτριά μου Ευαγγελία Κυριακίδου για όλη την υποστήριξη της όλα αυτά τα χρόνια. Η επιστημονική και ψυχολογική βοήθειά της αποτέλεσαν ακρογωνιαίο λίθο για την ολοκλήρωση των σπουδών.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, και ιδιαίτερα στους γονείς μου, Γιάννη και Βασιλική, για την απεριόριστη ενθάρρυνση και στήριξη τους σ' όλη τη μέχρι σήμερα εκπαιδευτική, και όχι μόνο, πορεία μου.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι θεωρητική προσέγγιση ηλεκτρικών μονάδων παραγωγής ενέργειας καθώς και η μοντελοποίηση μιας τέτοιας μονάδας, σε επίπεδο προκαταρκτικής έρευνας, πιθανού γεωθερμικού δυναμικού σε περιοχές υψηλής ενθαλπίας στην Μήλο και Νίσυρο.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό και το υπολογιστικό. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών της γεωθερμικής ενέργειας καθώς και η κατανομή της στον ευρωπαϊκό χάρτη με κύρια εστίαση στις περιοχές υψηλής ενθαλπίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι τρόποι αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας για παραγωγή η ηλεκτρικής ενέργειας σε πεδία μέσης και υψηλής ενθαλπίας και στη συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της γεωθερμίας

Το τέταρτο κεφάλαιο αφιερώνεται στη περιγραφή τυπικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης και υψηλής ενθαλπίας.

Τέλος ακολουθεί το υπολογιστικό μοντέλο μιας υβριδικής μονάδας και παρουσιάζεται η μελέτη της επίδρασης της πίεσης ατμοποίησης , του Pinch Point καθώς και η επιλογή του εργαζόμενου μέσου.

Abstract

The purpose of this thesis is the theoretical approach of geothermal power plants and modeling of one , in a preliminary research, potential high enthalpy temperatures in areas of Milos and Nisyros.

The thesis comprises of two parts, a theoretical and a computational. The first chapter describes the characteristics of geothermal energy as well as its distribution on the European map with focus on high enthalpy areas.

The second chapter discusses on potential ways to utilize geothermal energy for electricity production in medium and high enthalpy areas, following with the third chapter which deals with the environmental impacts of geothermal energy.

The fourth chapter describes a typical geothermal power plant and its components for a medium and high enthalpy geothermal brine.

Finally, a computational model of a hybrid geothermal power plant follows, and a study of the effect of high pressure, Pinch Point and the choice of the working fluid is conducted.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| | 0 |
| Κεφάλαιο 1. Γεωθερμικό Δυναμικό | 8 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 8 |
| 1.2 Γεωθερμική Ενέργεια | 10 |
| 1.2 Ταξινόμηση με βάση την ενθαλπία | 12 |
| 1.3 Γεωθερμική έρευνα | 13 |
| 1.3.1 Μέθοδοι έρευνας | 13 |
| 1.4 Γεωθερμικά πεδία στην Ευρώπη | 15 |
| 1.5 Γεωθερμικά Πεδία στην Ελλάδα..... | 19 |
| 1.5.1 Νίσυρος..... | 22 |
| 1.5.2 Μήλος | 23 |
| Κεφάλαιο 2. Συστήματα μετατροπής γεωθερμικής ενέργειας | 27 |
| 2.1 Μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα (Back pressure type) | 28 |
| 2.2 Μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου (Single flash steam type) | 29 |
| 2.3 Μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου (Double flash steam type) | 29 |
| 2.4 Μονάδες ξηρού ατμού (Dry steam type) | 31 |
| 2.5 Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary type)..... | 31 |
| 2.6 Μονάδες δυαδικού τύπου Organic Rankine Cycle (ORC) | 33 |
| 2.7 Μονάδες δυαδικού τύπου Kalina (Kalina Cycle)..... | 34 |
| 2.8 Μονάδες συνδυασμένου ή υβριδικού τύπου (Combined or hybrid type) | 35 |
| Κεφάλαιο 3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από τη Γεωθερμία | 37 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 37 |
| 3.2 Επιπτώσεις στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και του νερού | 39 |
| 3.3 Υγρά και στερεά γεωθερμικά απόβλητα | 40 |
| 3.3.1 Υγρά γεωθερμικά απόβλητα | 41 |
| 3.3.2 Στερεά γεωθερμικά απόβλητα | 42 |
| 3.4 Άλλα περιβαλλοντικά θέματα | 43 |
| 3.4.1 Θερμική ρύπανση..... | 44 |
| 3.4.2 Ηχορύπανση | 44 |
| 3.4.3 Σεισμικότητα των Βελτιωμένων Γεωθερμικών Συστημάτων (EGS)..... | 45 |
| 3.5 Προστασία τοπίου και οικοτόπων | 46 |
| 3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων | 47 |
| Κεφάλαιο 4. Περιγραφή τυπικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης και υψηλής ενθαλπίας | 48 |
| 4.1. Επιλογή τεχνικής αξιοποίησης του γεωθερμικού ρευστού προς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας | 48 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Κύκλα Ισχύος | 49 |
| 4.2.1 Κύκλο Rankine | 50 |
| 4.3 Θερμοδυναμικός Βαθμός Απόδοσης..... | 51 |
| 4.4. Εναλλάκτες θερμότητας..... | 53 |
| 4.4.1. Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη θερμότητας..... | 54 |
| 4.4.2. Αποτελεσματικότητα εναλλακτών | 55 |
| 4.5. Ατμοστροβίλοι..... | 56 |
| 4.5.1 Κατηγορίες ατμοστροβίλων..... | 58 |
| 4.5.1.3 Πίεση τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής | 61 |
| 4.5.2. Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου | 62 |
| 4.6. Γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας | 63 |
| 4.7 Συμπυκνωτές-Πύργοι ψύξης..... | 64 |
| 4.7.1. Συμπυκνωτές | 64 |
| 4.7.2. Πύργοι Ψύξης | 65 |
| Κεφάλαιο 5. Υπολογιστικό Μοντέλο..... | 69 |
| 5.1 Pinch Point | 70 |
| 5.2 Επιλογή εργαζόμενου μέσου | 71 |
| 5.3 Θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας των κύκλων | 72 |
| 5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων..... | 76 |
| 5.4.1 Χρήση του R245fa ως εργαζόμενο μέσο | 77 |
| 5.4.2 Χρήση του R134a ως εργαζόμενο μέσο..... | 80 |
| 5.4.1 R152A | 83 |
| 5.4.4 Χρήση Isobutane ως εργαζόμενο μέσο | 86 |
| 5.4 .5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα | 89 |
| 5.5 Συμπεράσματα | 91 |
| 5.6 Προτάσεις για μελλοντική εργασία | 91 |
| Βιβλιογραφία..... | 93 |
| Παράρτημα. Κώδικας σε Matlab για ρευστό R134a | 94 |

Κεφάλαιο 1. Γεωθερμικό Δυναμικό

1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη σε κάθε πτυχή της καθημερινότητας του ανθρώπου. Από τη θέρμανση μιας οικείας στην μετακίνηση, από το φωτισμό μιας περιοχής στη μαγειρική, απαραίτητη αποτελεί η ενεργειακή κατανάλωση προκειμένου να τροφοδοτηθούν όλες αυτές οι δραστηριότητες. Η ζήτησή της ολοένα και αυξάνεται, έχοντας λάβει αναγκαίο πλέον χαρακτήρα στη διαβίωση, ως επακόλουθο την ανάπτυξη των παραγωγικών μονάδων. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιούμε προέρχεται από συμβατικές πηγές ενέργειας όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Παρά την μεγάλη απόδοσή και την ευκολότερη εξόρυξή τους, συγκαταλέγονται στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τα παράγωγά τους να δημιουργούν μια σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων, με κυριότερο το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Λύση των παραπάνω προβλημάτων αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας, η αποκέντρωση παραγωγής και κυρίως η εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο και η αύξηση του ποσοστού αυτών. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούνται από την ηλιακή, την αιολική, την υδροηλεκτρική, τη βιομάζα καθώς και τη γεωθερμική με την οποία και θα ασχοληθούμε εκτενέστερα.

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα είναι η εντυπωσιακότερη απόδειξη της θερμότητας που υπάρχει στο εσωτερικό της γης. Άλλες γεωθερμικές ενδείξεις είναι οι ατμοί, τα θερμά νερά και τα αέρια που σχηματίζουν θερμοπίδακες, θερμές πηγές και ατμίδες. Η θερμική ενέργεια της γης βρίσκεται σε αφθονία, αλλά είναι πολύ διεσπαρμένη, σπάνια συγκεντρώνεται, και συχνά βρίσκεται σε βάθη πολύ μεγάλα για να μπορεί να αξιοποιηθεί. Σημαντικό πλεονέκτημα της γεωθερμίας, είναι ότι δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και σύμφωνα με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό από τις ενεργειακές ανάγκες μας.

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Λαρνταρέλλο της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του 18^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο υπέρθερμος φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και για να θερμάνει διάφορα κτήρια. Το 1904 έγινε στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία. Η πρώτη συστηματική αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στην Ισλανδία, όπου πλέον καλύπτεται πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.

Κατά το 2005, 72 χώρες φαίνεται να έχουν αναπτύξει γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας, κάτι που δηλώνει σημαντική πρόοδο σε σχέση με το 1995, όταν είχαν αναφερθεί εφαρμογές μόνο σε 28 χώρες. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής κατά το 2005, ανήλθε σε 8.927,63 MW. Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής

είναι 1.124,43 Mwe (2005). Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς γεωθερμικών μονάδων μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας ανήλθε το 2007 στα 28268 MWt.

Σήμερα, η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα, περιορίζεται σε μεμονωμένες άμεσες χρήσεις σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η θέρμανση θερμοκηπίων, ιαματικά λουτρά, και λιγότερο στη θέρμανση οικιών, συνεισφέροντας στην εξοικονόμηση ενέργειας από συμβατικές πηγές και έμμεση μείωση των εκπομπών CO₂. Στο παρελθόν έχουν γίνει αρκετές έρευνες και μελέτες με στόχο την αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της χώρας, εστιάζοντας ωστόσο κυρίως στην παραγωγή ενέργειας και δευτερευόντως σε άλλες άμεσες χρήσεις. Οι μελέτες αυτές, έχουν γίνει μεμονωμένα από δημόσιους φορείς και ιδιώτες, αναφέρονται σε συγκεκριμένα πεδία και προτείνουν τρόπους εκμετάλλευσής τους. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις του Δήμου Αλεξανδρούπολης, που είναι φορέας του πεδίου Αρίστινου και εστιάζει στην αξιοποίηση του πεδίου στο άμεσο μέλλον, αλλά και της ΔΕΗ, που εδώ και αρκετά χρόνια κάνει έρευνες στα πεδία της χώρας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Γεωθερμική Ενέργεια

Η εντυπωσιακότερη απόδειξη της θερμότητας που υπάρχει στο εσωτερικό της γης είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Άλλες γεωθερμικές ενδείξεις είναι οι ατμοί, τα θερμά νερά και τα αέρια που σχηματίζουν θερμοπίδακες, θερμές πηγές και ατμίδες. Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας και η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της Γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» δηλώνει συνήθως τη προς αξιοποίηση θερμότητα από τον άνθρωπο. Η γεωθερμική ισχύς είναι η θερμική και ηλεκτρική ισχύς που παράγεται (σε δεύτερο στάδιο) ισχύς που παράγεται από την περιεχόμενη στη Γη θερμική ενέργεια. Στα σύγχρονα πρότυπα της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της Γης συμπεριλαμβάνεται η θερμότητα που συνεχώς παράγεται από τη διάσπαση των μακράς διάρκειας ζωής ραδιενεργών ισοτόπων, του ουρανίου, του θορίου και του καλίου, τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της Γης.

Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας με το βάθος από την επιφάνεια της γης είναι γνωστός με το όνομα γεωθερμική βαθμίδα, και κυμαίνεται από 5 μέχρι 70°C/km, με μέση τιμή τους 30°C/km. Περιοχές με θεωρητικά γεωθερμικό ενδιαφέρον είναι οι περιοχές που διαθέτουν γεωθερμική βαθμίδα μεγαλύτερη από τη μέση τιμή. Τέτοιες περιοχές βρίσκονται συνήθως στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια φυσική, ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας, που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό από τις ενεργειακές ανάγκες μας. Η θερμική ενέργεια της γης βρίσκεται σε αφθονία, αλλά είναι πολύ διεσπαρμένη, σπάνια συγκεντρώνεται, και συχνά βρίσκεται σε βάθη πολύ μεγάλα για να μπορεί να αξιοποιηθεί. Μέχρι σήμερα, η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιοριστεί σε περιοχές όπου οι γεωλογικές συνθήκες επιτρέπουν σε κάποιο φορέα (νερό ή ατμό) να μεταφέρει τη θερμότητα από θερμές ζώνες που βρίσκονται βαθιά στο υπέδαφος στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτή. Σημαντικό πλεονέκτημα της γεωθερμίας, είναι ότι δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι χρήσεις και οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας, η οποία συναντάται σε αρκετές περιοχές της γης, ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό και περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τις αγροτικές διεργασίες (π.χ. ξήρανση σιτηρών), τη θέρμανση οικιών, τη δημιουργία ψύξης κτλ. Η περιοχή των θερμοκρασιών των θερμών νερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτείνεται από τους 20°C (για θέρμανση χώρων με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) μέχρι τους 280°C (για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος). Ενώ το δυναμικό της γεωθερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο (αλλά και στην Ελλάδα) είναι σημαντικό, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στο να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αυτό το δυναμικό. Οι τύποι των περιορισμών είναι τεχνικής φύσεως (διάβρωση, δημιουργία επικαθίσεων),

περιβαλλοντικής φύσεως (εκπομπές τοξικών αερίων, θερμική ρύπανση) και οικονομικής φύσεως. Η εκμετάλλευσή της είναι εφικτή μόνο με την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο. Εξασφαλίζουν ένα οικονομικό αποτέλεσμα. Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας από θερμοδυναμικής πλευράς βασίζεται στη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ του υπόγειου ύδατος ή πετρώματος με ρευστό που βρίσκεται την επιφάνεια της γης. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας επιτρέπει την παραγωγή θερμικής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να μετατραπεί σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Η χώρα μας είναι ιδιαίτερα ευνοημένη όσον αφορά στην ύπαρξη γεωθερμικής ενέργειας και τα τελευταία 30 περίπου χρόνια έχει πραγματοποιηθεί αξιόλογη βασική έρευνα, εντοπίζοντας ένα σημαντικό αριθμό γεωθερμικών πεδίων και πλήθος γεωθερμικά ελπιδοφόρων περιοχών. Η Ελλάδα, μαζί με την Ιταλία και την Πορτογαλία, είναι οι μόνες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις οποίες υπάρχουν πεδία υψηλής ενθαλπίας (με θερμοκρασία ρευστών μεγαλύτερη των 150°C) και από τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν τα γεωθερμικά ρευστά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, η χώρα μας διαθέτει πληθώρα 9 περιοχών, κυρίως στην Κεντρική και Βόρεια Ελλάδα και στα νησιά του Αιγαίου, με θερμοκρασίες ταμειυτήρων που φτάνουν και μερικές φορές ξεπερνούν τους 100°C. Τα ρευστά των ταμειυτήρων αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση σειράς εφαρμογών όπως θέρμανση χώρων, θέρμανση θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λπ.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι φιλική στο περιβάλλον (ιδανικά χωρίς επιβλαβή εκπομπή καυσαερίων, συμπεριλαμβανοντας CO,CO₂,NO_x,So_x) ασφαλής, και σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πραγματικά ανεξάντλητη και σταθερή στη διάρκεια του χρόνου.

1.2 Ταξινόμηση με βάση την ενθαλπία

Ως γεωθερμικό σύστημα ορίζουμε ένα γεωλογικό σχηματισμό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μέσα στο οποίο είναι αποθηκευμένη η γεωθερμική ενέργεια.

Τα γεωθερμικά συστήματα ταξινομούνται σε τρεις ευρύτερες ομάδες με βάση τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού που βρίσκεται στον ταμιευτήρα. Η σημαντικότερη κατηγοριοποίηση των συστημάτων αυτών καθώς έτσι μπορούμε να αποφανθεί ο τρόπος αξιοποίησής τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- **Πεδία χαμηλής ενθαλπίας:** Πρόκειται για πεδία στα οποία η θερμοκρασία του γεωρευστού εντός του ταμιευτήρα δεν υπερβαίνει τους 90°C. Αυτά τα πεδία βρίσκονται σε περιοχές όπου η πηγή της θερμότητας είναι σε μεγάλο βάθος και στις οποίες η ροή της θερμότητας είναι πολύ χαμηλή. Για να χαρακτηριστεί ένα πεδίο οικονομικά εκμεταλλεύσιμο έπρεπε να έχει θερμοκρασία τουλάχιστον 60°C, αλλά με την πάροδο των χρόνων και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πεδία με θερμοκρασία άνω των 30°C θεωρούνται ικανοποιητικά.
- **Πεδία μέσης ενθαλπίας:** Πρόκειται για γεωθερμικά πεδία στα οποία η θερμοκρασία του γεωρευστού στον ταμιευτήρα κυμαίνεται μεταξύ 90°C και 150 °C, εφαρμογές των οποίων είναι πάρα πολλές στη βιομηχανία, στις καλλιέργειες καθώς και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την αξιοποίηση διαδυκών συστημάτων με τα οποία και θα ασχοληθούμε εκτενέστερα.
- **Πεδία υψηλής ενθαλπίας:** Πρόκειται για γεωθερμικά πεδία στα οποία η θερμοκρασία του γεωρευστού ξεπερνά τους 150 °C. Αυτά τα πεδία βρίσκονται συνήθως σε αρκετά μεγάλο βάθος σε περιοχές του φλοιού της Γης, στις οποίες η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή λόγω πρόσφατης διείσδυσης σε αυτές μαγματικό υλικό. Στα πεδία αυτά το ρευστό βρίσκεται σε ακραίες θερμοκρασίες και πίεσης εξού και η εμφάνιση διφασικού μίγματος ατμού-υγρού με συνηθέστερο τον υπέρθερμο ατμό ο οποίος καθώς ανεβαίνει στην επιφάνεια του εδάφους χάνει πίεση και εκτονώνεται σε ατμό. Η αξιοποίησή του ενδείκνυται για ηλεκτροπαραγωγή με καλύτερο βαθμό απόδοσης έναντι του διαδυκού τύπου, λόγω της μεγαλύτερης υπάρχουσας θερμοκρασίας.

1.3 Γεωθερμική έρευνα

Η γεωθερμική έρευνα αποσκοπεί στον εντοπισμό προσβάσιμων περιοχών γεωθερμικών πόρων όπου η αξιοποίηση της αποθηκευμένη γεωθερμικής ενέργειας είναι οικονομικότερη σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Στόχος της γεωθερμικής έρευνας αφορά:

- Τον προσδιορισμό του είδους του πεδίου (χαμηλής, μέσης ή υψηλής ενθαλπίας)
- Το γεωλογικό μοντέλο του συστήματος καθώς και τη γεωμετρία του ταμιευτήρα
- Τα θερμοδυναμικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του γεωθερμικού συστήματος
- Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των γεωθερμικών ρευστών

Τα κυριότερα στάδια μιας γεωθερμικής έρευνας είναι κατά σειρά:

1. Η μελέτη των υπαρχόντων δεδομένων για τη γεωλογία, γεωχημεία, τεκτονική, θερμές πηγές κλπ. Της ευρύτερης περιοχής ούτως ώστε να περιοριστεί σε μικρότερες περιοχές με γεωθερμικό ενδιαφέρον.
2. Επιτόπιες συστηματικές και εξειδικευμένες εργασίες στην περιοχή που ήδη έχουμε επιλέξει από το 1^ο στάδιο.
3. Εκτέλεση ερευνητικών γεωτρήσεων με βάση τα αποτελέσματα του 2^{ου} σταδίου έρευνας για την επιβεβαίωση των γεωθερμικών συνθηκών της περιοχής.
4. Εκτέλεση αντλήσεων και διαγραφιών για την εκτίμηση του δυναμικού του πεδίου και των χαρακτηριστικών των γεωθερμικών ρευστών.

1.3.1 Μέθοδοι έρευνας

Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες αποτελούν την αφετηρία κάθε ερευνητικού προγράμματος. Η βασική τους συνεισφορά αφορά στον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης των περιοχών που θα πρέπει να ερευνηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, καθώς και στην υπόδειξη των καταλληλότερων μεθόδων έρευνας για τις συγκεκριμένες περιοχές. Οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές μελέτες παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλες τις επόμενες φάσεις της γεωθερμικής έρευνας, ακόμη και στον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών και παραγωγικών γεωτρήσεων. Επίσης, παρέχουν τις βασικές πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που συγκεντρώνονται από τις άλλες μεθόδους, την εκτίμηση του δυναμικού του γεωθερμικού πεδίου και τελικά, την κατασκευή ενός ρεαλιστικού προτύπου (μοντέλου) του γεωθερμικού συστήματος. Τα στοιχεία των μελετών αυτών

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και στη φάση παραγωγής σχετικά με την ορθολογική διαχείριση του γεωθερμικού ταμιευτήρα και γενικότερα του πεδίου.

Φαίνεται λοιπόν ότι η διάρκεια και το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής έρευνας μπορεί να μειωθούν αν ο προγραμματισμός της γίνει με σωστό σχεδιασμό και αποδοτικό συντονισμό.

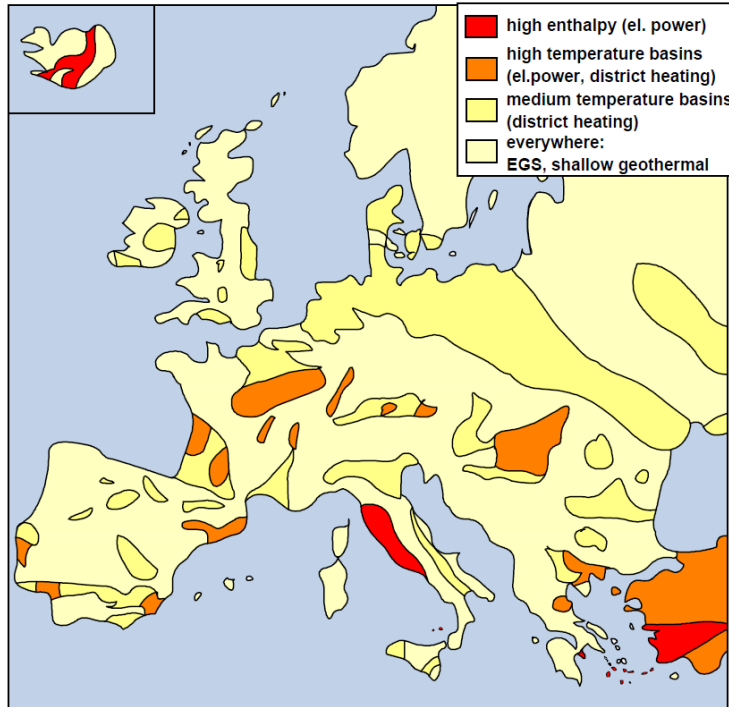
Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις σκοπεύουν στην έμμεση απόκτηση γνώσης, από την επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν, για τις φυσικές παραμέτρους των γεωλογικών σχηματισμών που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Θερμοκρασία (θερμική έρευνα)
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα (γεωηλεκτρική και ηλεκτρομαγνητική μέθοδος)
- Ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων (σεισμική μέθοδος)
- Πυκνότητα (βαρυτομετρική μέθοδος)
- Μαγνητική επιδεκτικότητα (μαγνητική μέθοδος)

Μερικές από τις παραπάνω μεθόδους, όπως η σεισμική, η βαρυτομετρική και η μαγνητική, οι οποίες κατά παράδοση εφαρμόζονται στην έρευνα πετρελαίου έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα, το μέγεθος, το βάθος και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά βαθιών γεωλογικών δομών, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελούν ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα. Όμως, οι μέθοδοι αυτές παρέχουν λίγα έως καθόλου στοιχεία για την ύπαρξη ή όχι ρευστών, κάτι που αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της γεωθερμικής έρευνας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται σκοπιμότερη η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων για την αποσαφήνιση λεπτομερειών κατά τα τελευταία στάδια του γεωθερμικού ερευνητικού προγράμματος, πριν ακριβώς τον καθορισμό της θέσης των ερευνητικών γεωτρήσεων. Πληροφορίες για την παρουσία γεωθερμικών ρευστών στις βαθιές γεωλογικές δομές μπορούν να αποκτηθούν με τη βοήθεια γεωηλεκτρικών και των ηλεκτρομαγνητικών διασκοπήσεων, οι οποίες είναι πιο ευαίσθητες από τις άλλες γεωφυσικές μεθόδους στην ύπαρξη τέτοιων ρευστών καθώς και στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πράγματι, οι δύο αυτές τεχνικές έχουν ευρεία εφαρμογή στην γεωθερμική έρευνα και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μαγνητοτελλουργική μέθοδος (MT), η οποία αξιοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από τις ηλιακές καταιγίδες, έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, προσφέροντας πλέον δυνατότητες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρά το γεγονός ότι προϋποθέτει πολύ εξεζητημένο τεχνολογικό εξοπλισμό και είναι ευαίσθητη στους βασικούς θορύβους των αστικών ή βιομηχανικών περιοχών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μαγνητοτελλουργική μεθόδου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό βαθύτερων, σε σχέση με αυτές που προσδιορίζονται από την ηλεκτρομαγνητική ή τη γεωηλεκτρική μέθοδο δομών.

1.4 Γεωθερμικά πεδία στην 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



Εικόνα 1 Γεωθερμικά πεδία υψηλής και μέσης ενθαλπίας στην Ευρώπη

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.

| | Εγκατεστημένο Δυναμικό (2007) | | Δυνατότητα* | |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| | MW _e | MW _t ** | GWh _e | GWh _{du} |
| Australia | 0,2 | - | - | - |
| Austria | 1,1 | 352 | 400 | 7.700 |
| Belgium | - | 63,9 | 800 | 8 |
| Bulgaria | - | 109,6 | 1.600 | 3.850 |
| China | 27,8 | - | - | - |
| Costa Rica | 162,5 | - | - | - |
| Croatia | - | 114 | 384 | 7.700 |
| Cyprus | - | - | 80 | 50 |
| Czech Republic | - | 204,5 | 0 | 770 |
| Denmark | - | 330 | 0 | 0 |
| El Salvador | 204,2 | - | - | - |
| Ethiopia | 7,3 | - | - | - |
| Finland | - | 260 | 0 | 0 |
| France | 14,7 | 308 | 800 | 1.540 |
| Georgia | - | - | - | - |
| Germany | - | 952 | 1.600 | 38.500 |
| Greece | - | 74 | 3.600 | 3.850 |
| Guatemala | 53 | - | - | - |
| Hungary | - | 694,2 | 3.040 | 15.400 |
| Iceland*** | 454,2 | 1844 | 48.000 | 50.000 |
| Indonesia | 992 | - | - | - |
| Ireland | - | 20 | 0 | 100 |
| Italy | 810,5 | 650 | 8.000 | 3.850 |
| Latvia | - | - | 0 | 385 |
| Lithuania | - | 21,3 | 0 | 385 |
| Macedonia | - | 62,3 | - | - |
| Netherlands | - | 253,5 | 80 | 2.310 |
| Japan | 535,2 | - | - | - |
| Kenya | 128,8 | - | - | - |
| Mexico | 953 | - | - | - |
| New Zealand | 471,6 | -- | - | - |
| Nicaragua | 87,4 | - | - | - |
| Papua – New Guinea | 56 | - | - | - |
| Portugal | 23 | 30,6 | 1.600 | 770 |
| Rumania | - | 145,1 | 1.600 | 15.400 |
| Russia | 79 | 308,2 | - | - |
| Serbia | - | 88,8 | - | - |
| Slovak Republic | - | 187,7 | 800 | 7.700 |
| Spain | - | 22,3 | 0 | 0 |
| Sweden | - | 384 | 0 | 0 |
| Switzerland | - | 650 | - | - |
| Thailand | 0,3 | - | - | - |
| Turkey | 38 | 1385 | 5.920 | 19.250 |
| USA | 2687 | - | - | - |

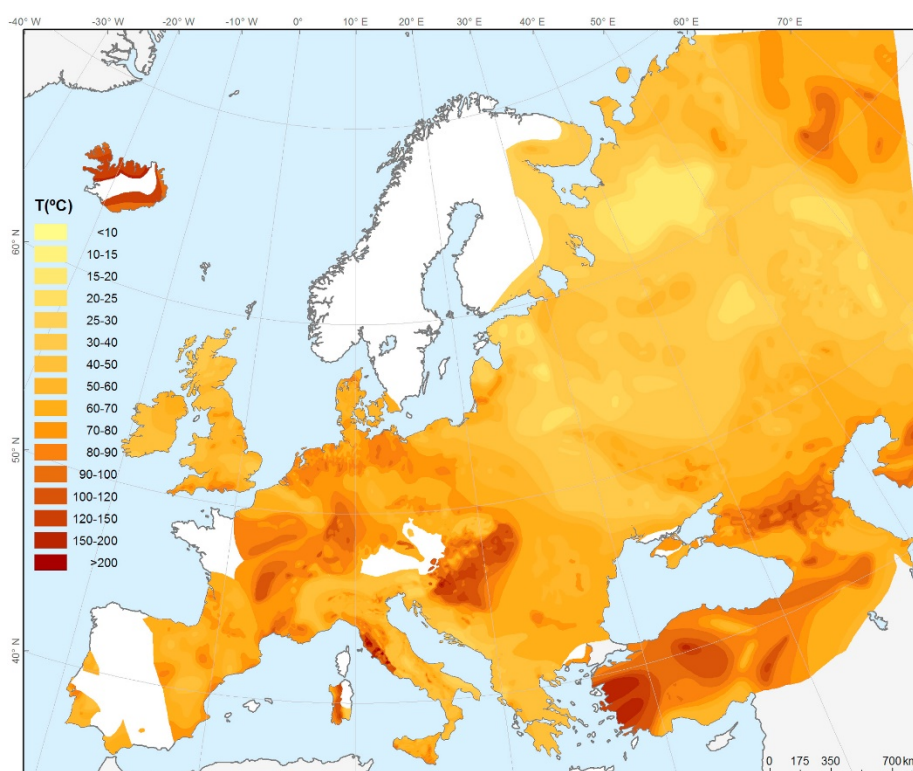
Πίνακας [] Παγκόσμια γεωθερμική εκμετάλλευση
(Bertani, Reggero, Antice, Miklos and Sanner, Burkhard (2007))

Ισλανδία

Γεωθερμική ενέργεια προερχόμενη λόγω της ηφαιστιογενούς φύσης της Ισλανδίας καθώς και της τοποθεσίας της στην Μεσο-Ατλαντική υφαλορράχη οδήγησαν την Ισλανδία στην αξιοποίηση της σε εμπορική χρήση από το 1930. Τα υψηλής ενθαλπίας πεδία βρίσκονται εντός της ηφαιστειακής περιοχής (από νοτιοδυτικά έως βορειοανατολικά) ενώ τα χαμηλής ενθαλπίας πεδία στην περίμετρο της χώρας.

Ιταλία

Η Ιταλία είναι μια από τις πλουσιότερες χώρες όσον αφορά τους γεωθερμικούς πόρους που διαθέτει. Υψηλής θερμοκρασίας ταμιευτήρες με κυρίαρχο στοιχείο τον ατμό τοποθετούνται σε μία ζώνη από τα δυτικά της χώρας, από την Τοσκάνη στην Καμπάνια (κοντά στις Άλπεις). Αποτέλεσε μάλιστα πρωτοπόρο στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας κατασκευάζοντας τον πρώτο τύπο γεωθερμικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής το 1904.



Εικόνα 2 Χάρτης θερμοκρασίας Ευρώπης στα 2000m βάθος

Πορτογαλία (Αζόρες)

Οι περιορισμένοι γεωθερμικοί πόροι της ηπειρωτικής χώρας της Πορτογαλίας έχουν αναπτυχθεί για άμεση χρήση (τηλεθέρμανση, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας κλπ.), ενώ στα νησιά Αζόρες τα γεωθερμικά πεδία αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο για ηλεκτροπαραγωγή. Δώδεκα περιοχές με υποψίες πεδίων υψηλής ενθαλπίας έχουν αναγνωρισθεί στα νησιά των Faial, Pico, Graciosa, Terceira και São Miguel.

Γερμανία

Οι γεωθερμικές πηγές της Γερμανίας τοποθετούνται σε μια ιζηματογενή λεκάνη απορροής στο βόρειο τμήμα της και σε τεκτονικό βύθισμα του Ρήνου. Η Γερμανία δεν κατέχει πηγές υψηλής ενθαλπίας ωστόσο αυτό δεν την εμπόδισε να αξιοποιήσει τους μέσης θερμοκρασίας ταμειυτήρες για την παραγωγή ενέργειας τα τελευταία χρόνια. Μέχρι τα τέλη του 2006 η άμεση χρήση της γεωθερμικής ενέργειας υπολογίστηκε να έχει υπερβεί τα 900MW_{th} με άλλα 15 προγράμματα να ακολουθούν την επόμενη δεκαετία συνολικής παροχής 18MW_e ηλεκτρικής ενέργειας.

Γαλλία

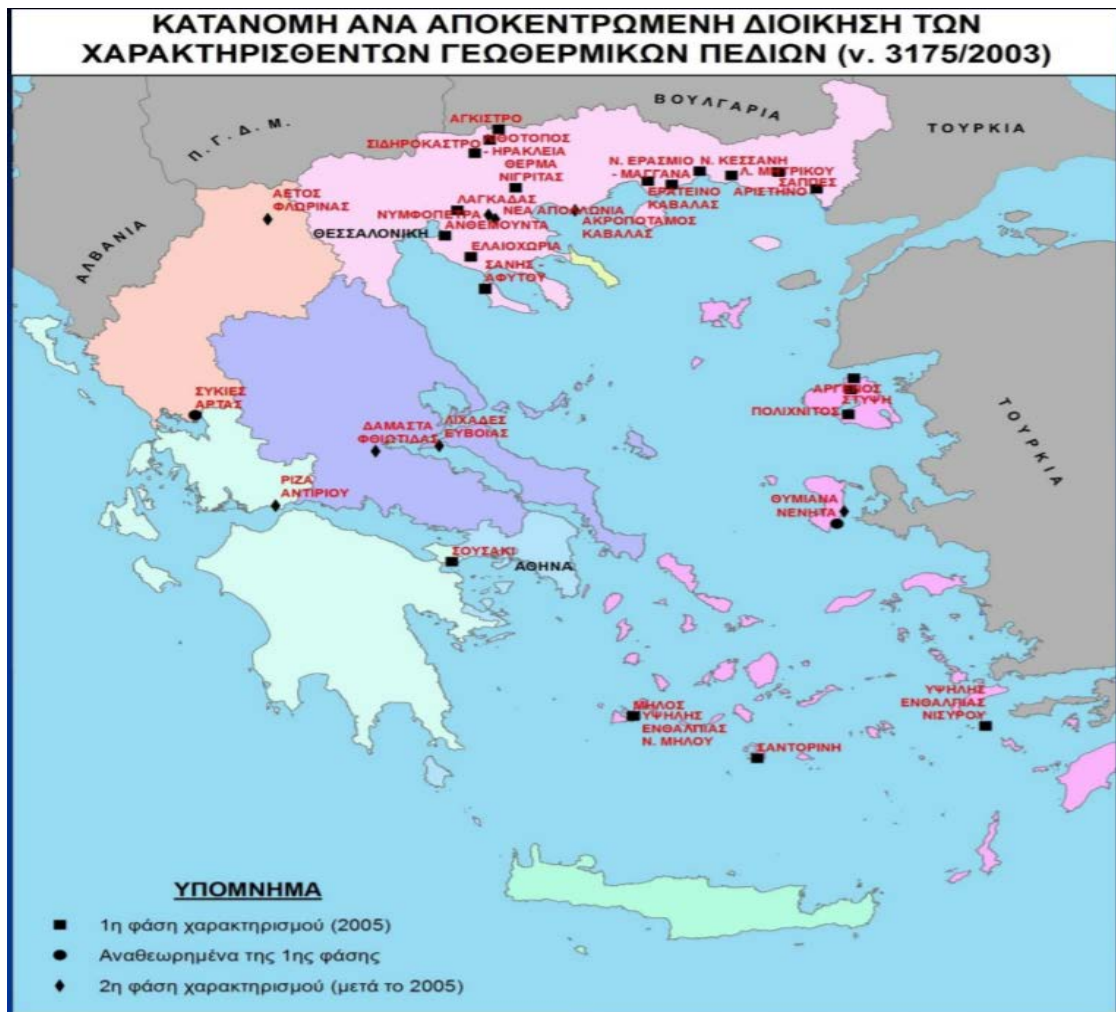
Υπάρχουν μόνο χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικές πηγές στην ηπειρωτική Γαλλία, με υψηλής ενθαλπίας ταμειυτήρες να βρίσκονται σε υπερπόντια τμήματα της χώρας. Οι πηγές τοποθετούνται σε δύο ιζηματογενείς λεκάνες απορροής, στο Παρίσι και στην Ακουιτανία στα νοτιοδυτικά. Την δεκαετία του 1980 περίπου 100 πηγές ανακαλύφθηκαν και αξιοποιήθηκαν ωστόσο μέχρι τα τέλη του 1990 τερματίστηκε η λειτουργία του ενός τρίτου λόγω μείωσης ενδιαφέροντος. Οι εναπομείναντες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για θέρμανση καθώς επίσης σε θερμοκήπια, ιχθυοτροφία και πισίνες.

Τουρκία

Ένας σημαντικός παράγοντας που συντελεί στην ύπαρξη υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικών πεδίων στη Τουρκία είναι η τοποθεσία της χώρας εντός οροσειρών των Άλπεων και των Ιμαλαίων. Η γεωθερμική αναζήτηση ξεκίνησε το 1960 και έκτοτε έχουν εντοπισθεί 170 πεδία εκ των οποίων μόλις το 5% είναι υψηλής ενθαλπίας.

1.5 Γεωθερμικά Πεδία στην Ελλάδα

Λόγω των ειδικών γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν, η Ελλάδα είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια. Διάσπαρτα χαμηλής κυρίως ενθαλπίας πεδία εντοπίζονται σε όλη τη χώρα, συνήθως σε αγροτικές περιοχές. Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) στην μακροχρόνια του πορεία και διαβλέποντας τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας, αλλά και τις σημαντικές επιπτώσεις από την αύξηση της κατανάλωσης συμβατικών ενεργειακών πόρων, από την δεκαετία του 1980 ανέπτυξε σημαντική ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα εντοπισμού και αξιοποίησης γεωθερμικών κοιτασμάτων. Τα διαθέσιμα μέχρι σήμερα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν αυτήν την ερευνητική προσπάθεια Πάνω από 38 περιοχές έχουν ερευνηθεί με γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας με μεγάλη γεωγραφική κατανομή και αρκετά από αυτά να πλησιάζουν θερμοκρασίες 75-92°C. Η ύπαρξή τους οφείλεται λόγω νεοτεκτονικής ή ηφαιστειακής δραστηριότητας, και συγκεκριμένα βρίσκονται στις περιοχές στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, στις περιοχές θερμών κηλίδων και στις περιοχές ηπειρωτικών βυθισμάτων. Αντίθετα, γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν εντοπιστεί μόνο κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου νοτίου Αιγαίου, συγκεκριμένα στην Μήλο και τη Νίσυρο.



Εικόνα 3 Σημαντικά Γεωθερμικά Πεδία Ελλάδας

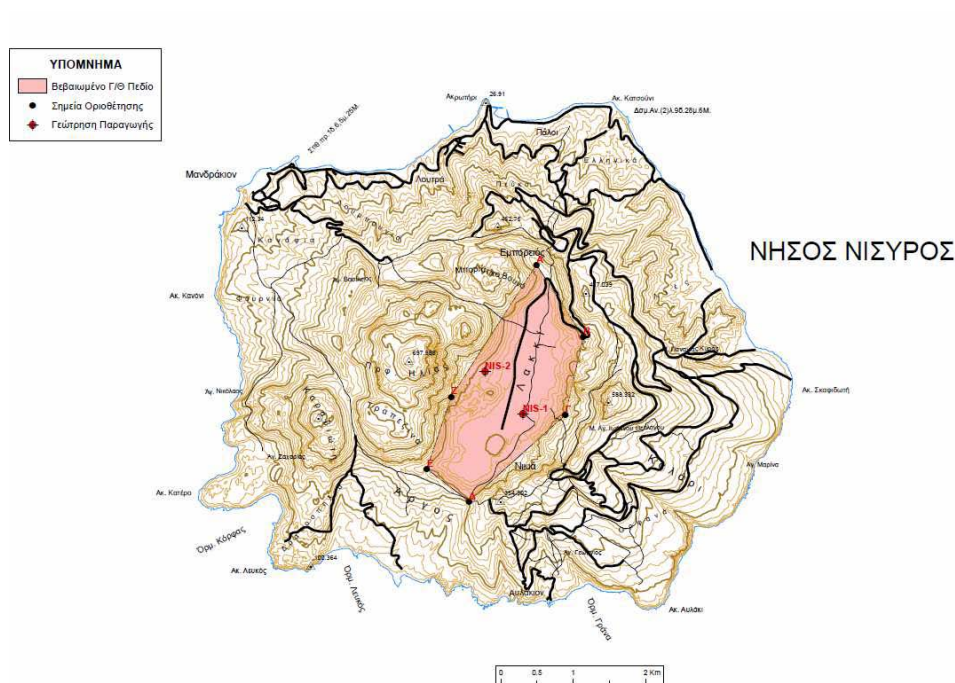
Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας

| ΠΕΡΙΟΧΗ | ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (°C) | ΒΑΘΟΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ (m) | ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h) |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Ιεράπετρα Λασιθίου | 25 | --- | --- |
| Αμάραντος Ιωαννίνων | 25 | --- | --- |
| Βούλα Αττικής | 30 | --- | --- |
| Ληλάντιο Πεδίο Ευβοίας | 31 | --- | --- |
| Σούδα Χανίων | 32 | 50-200 | 750 |
| Λουτράκι Κορινθίας | 32 | --- | --- |
| Υπάτη Φθιώτιδας | 32 | --- | --- |
| Ζάζαρη Χειματίτιδα Φλώρινας | 33 | --- | 15 |
| Κυλλήνη Ηλείας | 35 | --- | --- |
| Πλατύστομο Φθιώτιδας | 35 | --- | 10 |
| Τυχερό Θράκης | 35 | --- | 350 |
| Μέθανα Αττικής | 38 | --- | --- |
| Αντίρριο Αιτωλοακαρνανίας | 38 | --- | --- |
| Αλεξάνδρεια Ημαθίας | 38 | --- | 200 |
| Γέρας Λέσβου | 38 | --- | --- |
| Αγίασμα Χίου | 38 | --- | --- |
| Θερμοπύλες Φθιώτιδας | 39 | --- | 1000 |
| Λαγκαδάς Θεσ/νίκης | 40 | <210 | 300 |
| Λεκάνη Ανθεμούντα Θεσ/νίκης | 40 | >100 | 15 |
| Σάμπες Ροδόπης | 40 | 50-380 | 100 |
| Λίμνη Μητρικού | 40 | 350-500 | --- |
| Καϊάφας Ηλείας | 40 | --- | --- |
| Σκύδρα Πέλλας | 40 | --- | --- |
| Αριδαία Πέλλας | 40 | --- | 200 |
| Νυμφόπετρα Θεσ/νίκης | 40 | --- | 200 |
| Ίβηρα Σερρών | 40 | --- | --- |
| Αγ.Παρασκευή Χαλκιδικής | 41 | --- | --- |
| Ελαιοχώρια Χαλκιδικής | 42 | 250 | --- |
| Θέρμη Λήμνου | 44 | --- | --- |
| Σάνη – Άφυτος Κασσάνδρας | 45 | 500 | 100 |

| | | | |
|-----------------------------|----|----------------------|------|
| Αγ. Φωκάς | 45 | --- | --- |
| Καλλονή Λέσβου | 45 | --- | --- |
| Άγκιστο Σερρών | 48 | 100-300 | 80 |
| Καμένα Βούρλα Φθιώτιδας | 48 | --- | --- |
| Αγ. Κήρυκος | 50 | --- | --- |
| Συκιές Άρτας | 51 | >320 | 100 |
| Κίμωλος | 61 | --- | 200 |
| Λιθότοπος Ηρακλείας | 62 | 300-450 | --- |
| Θέρμα Νιγρίτσας Σερρών | 64 | 70-500 | 1000 |
| Σαντορίνη | 65 | 50-250 | --- |
| Λισβόρι Λέσβου | 65 | --- | --- |
| Ν.Εράσμιο-Μάγγανα Ξάνθης | 68 | 350-500 | 250 |
| Ερατεινό Καβάλας | 70 | 650 | 300 |
| Σιδηρόκαστρο Σερρών | 75 | 30-500 | 200 |
| Σουσάκι Κορινθίας | 75 | 50-200 / 600- 900 | 600 |
| Νένητα Χίου | 82 | 300-500 | 60 |
| Ν.Κεσσάνη Ξάνθης | 83 | 160-500 | >300 |
| Αιδηψός Ευβοίας | 85 | --- | 240 |
| Αρίστηνο Αλεξανδρούπολης | 90 | 150-450 | 200 |
| Ακροπόταμος Καβάλας | 90 | 100-185 / 240-515 | 415 |
| Άαργενος Λέσβου | 90 | <150 | 300 |
| Στύψη Λέσβου | 90 | 150-200 | --- |
| Πολιχνίτος Λέσβου | 95 | 50-200 | 300 |

1.5.1 Νίσυρος

Όπως και η Μήλος, η Νίσυρος ανήκει στα νησιά με υψηλή ροή στο ηφαιστειακό τόξο του Ν.Αιγαίου, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από την σημαντική ηφαιστειακή της δραστηριότητα και τους κρατήρες που υπάρχουν στο εσωτερικό της. Οι άφθονες θερμές πηγές της Νισύρου είναι μια ακόμα απόδειξη της γεωθερμικής δραστηριότητας του νησιού, σε πολλά σημεία μάλιστα κατά μήκος του των ακτών αναβλύζει θερμό νερό που φτάνει τους 60οC. Ταυτόχρονα με την Μήλο από έρευνες του Ι.Γ.Μ.Ε. εντοπίζεται το δεύτερο γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας την δεκαετία του 1970. Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία λοιπόν με διάνοιξη ερευνητικών αβαθών γεωτρήσεων, πλήθους εννέα, με σκοπό τη μέτρηση της γεωθερμικής βαθμίδας. Λίγο αργότερα, τη δεκαετία του 1980, η Δ.Ε.Η., βασίστηκε στα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνών διάνοιξε δύο βαθιές γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής βάθους 1800m και εντοπίστηκε θερμοκρασία πυθμένα 350°C.

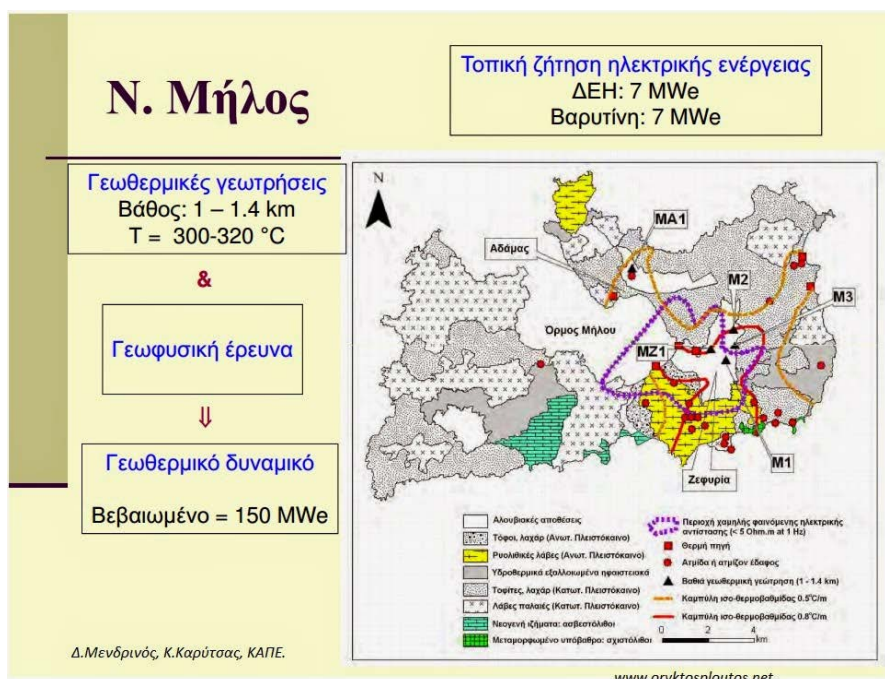


Εικόνα 4 Χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Νισύρου και τα σημεία των γεωτρήσεων παραγωγής

Δυστυχώς η αξιοποίηση γεωθερμικής ενέργειας συνάντησε εναντίωση από τον τοπικό πληθυσμό και τη δημοτική αρχή, κυρίως λόγω έλλειψης κατάλληλης ενημέρωσης, και σε συνδυασμό με νομοθετικά πλαίσια μη ευνοϊκά (τότε τουλάχιστον που η αξιοποίηση της γεωθερμική ενέργειας δεν ήταν διαδεδομένη) για την αξιοποίηση της γεωθερμίας με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή, μέχρι και σήμερα δεν υπάρχει εγκατεστημένη μονάδα σε λειτουργία σε κανένα από τα δύο νησιά που εντοπίζονται περιοχές υψηλής ενθαλπίας.

1.5.2 Μήλος

Η Μήλος είναι από τα πρώτα και πιο χαρακτηριστικά νησιά του ηφαιστειακού τόξου του Ν.Αιγαίου που προκάλεσε το γεωθερμικό ενδιαφέρον από το 1970. Βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου Αιγαίου και περιέχει δύο μεγάλα αλλά ανενεργά ηφαίστεια, το ηφαίστειο της Φυρίπλακας και το ηφαίστειο του Τράχηλα. Μπορεί να βρίσκονται σε μη ενεργή κατάσταση ωστόσο λαμβάνουν χώρα ακόμα διάφορες εκδηλώσεις που προδιαθέτουν την ύπαρξη επικοινωνίας ανάμεσα στην επιφάνεια του νησιού και το εσωτερικό της γης και επίσης συναντάμε κυρίως στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού διάφορες ατμίδες (πηγές αερίων) και διάσπαρτες θερμές πηγές σε όλο το νησί. Με αφορμή τα παραπάνω την δεκαετία του 1970 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες έρευνες από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) με αποτέλεσμα να εντοπιστεί το πρώτο ελληνικό γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας.



Εικόνα 5 Γενικές πληροφορίες γεωθερμικού πεδίου της Μήλου

Κατά τη γεωθερμική έρευνα που ακολούθησε και με την εκτέλεση γεωτρήσεων σε βάθη 60-80m εντοπίστηκαν στο κέντρο του νησιού περιοχές με θερμική ροή 20 φορές μεγαλύτερη της κανονικής. Τη σκυτάλη στη συνέχεια πήρε η Δ.Ε.Η. με την εκτέλεση πέντε ερευνητικών γεωτρήσεων (1974-81) σε βάθη 1000-1400m και επιβεβαιώθηκε η ύπαρξη αξιόλογου πεδίου υψηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες ρευστών του ταμειυτήρα να φτάνουν τους 320°C. Η Δ.Ε.Η. εγκατέστησε τελικά το 1985 μια πειραματική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας το γεωθερμικό δυναμικό του νησιού με εγκατεστημένη ισχύ 2MW εντούτοις η εγκατάσταση τέθηκε ανενεργή το 1989.

1.5.2.1 Γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας ν. Μήλου

Στη ν. Μήλο του νομού Κυκλάδων έχει εντοπιστεί το πρώτο γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας στη χώρα. Παράλληλα διαπιστώθηκε, από τις ερευνητικές εργασίες του ΙΓΜΕ, ότι σε ολόκληρο το νησί αναπτύσσεται ένα γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας μέχρι του βάθους των 200 μέτρων περίπου, στο οποίο αδιαπέραστοι λιθολογικοί σχηματισμοί το διαχωρίζουν από το υψηλής ενθαλπίας πεδίο που εντοπίζεται σε μεγαλύτερα βάθη. Τόσο από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες του ΙΓΜΕ όσο και νεώτερες της ΜΗΛΟΣ Α.Ε. περιχαράσσεται ένα βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας, ενώ ολόκληρο το νησί αποτελεί ένα πιθανό πεδίο.

Τα χαρακτηριστικά του βεβαιωμένου πεδίου έχουν ως εξής:

Έκταση 63 Km²

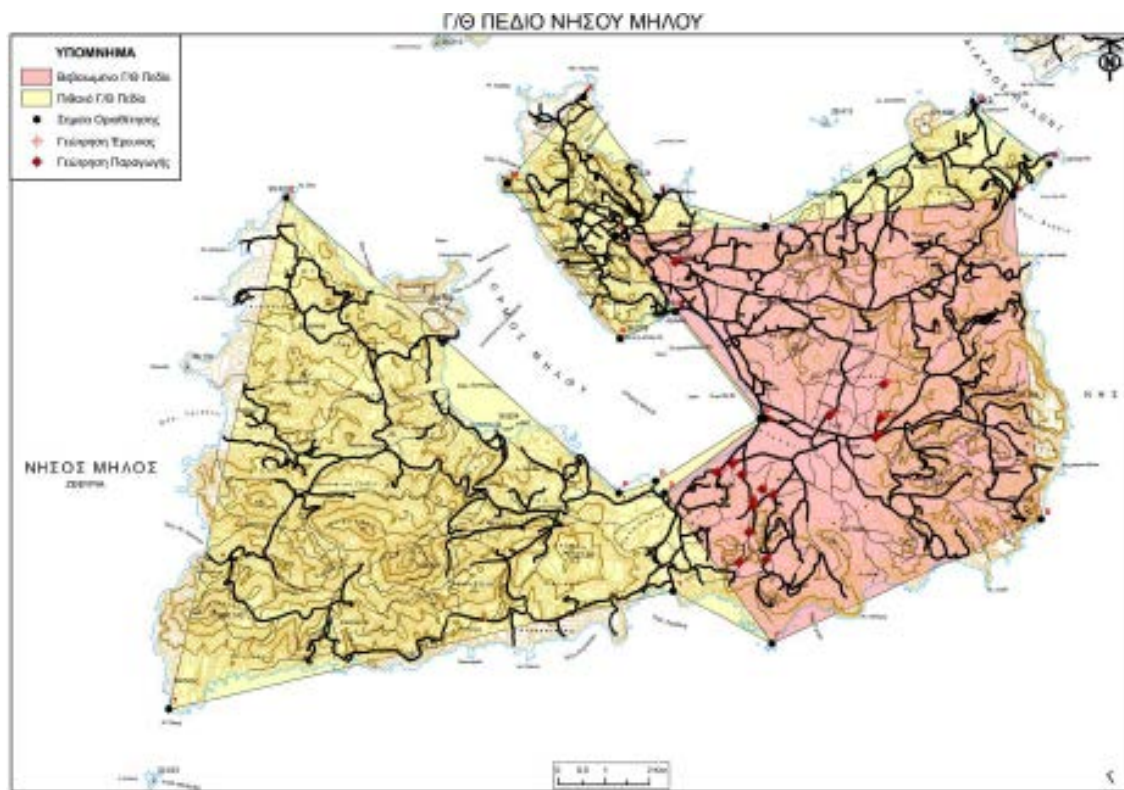
Θερμοκρασία 60- 99 °C

Βάθος ταμιευτήρα: 50 – 200 m

Παροχή: 750 m³/h

Τα χαρακτηριστικά του πιθανού πεδίου έχουν ως εξής:

Έκταση 87 Km²



Εικόνα 6 Χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας της Μήλου και τα σημεία των γεωτρήσεων παραγωγής

1.5.2.2 Γεωθερμικό πεδίο υψηλής ενθαλπίας ν. Μήλου

Το γεωθερμικό πεδίο υψηλής θερμοκρασίας της Μήλου ερευνήθηκε σε πρώτη φάση από το ΙΓΜΕ τη δεκαετία του 1970 με την εκτέλεση διαφόρων μεθόδων επιφάνειας μεταξύ των οποίων τη διάνοιξη 48 αβαθών γεωτρήσεων προσδιορισμού της γεωθερμικής βαθμίδας. Στη συνέχεια η ΔΕΗ διάνοιξε πέντε βαθιές γεωτρήσεις έρευνας – παραγωγής και εκτέλεσε δοκιμές παραγωγής.

Κατά τη δεκαετία του 1980 εγκαταστάθηκε εκεί και λειτούργησε για λίγο, σε πειραματική βάση, μικρή πιλοτική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 1,8 Mwe. Η βιομηχανική αξιοποίηση δεν προχώρησε λόγω αντίθεσης των κατοίκων.

Τα χαρακτηριστικά του βεβαιωμένου αυτού πεδίου έχουν ως εξής :

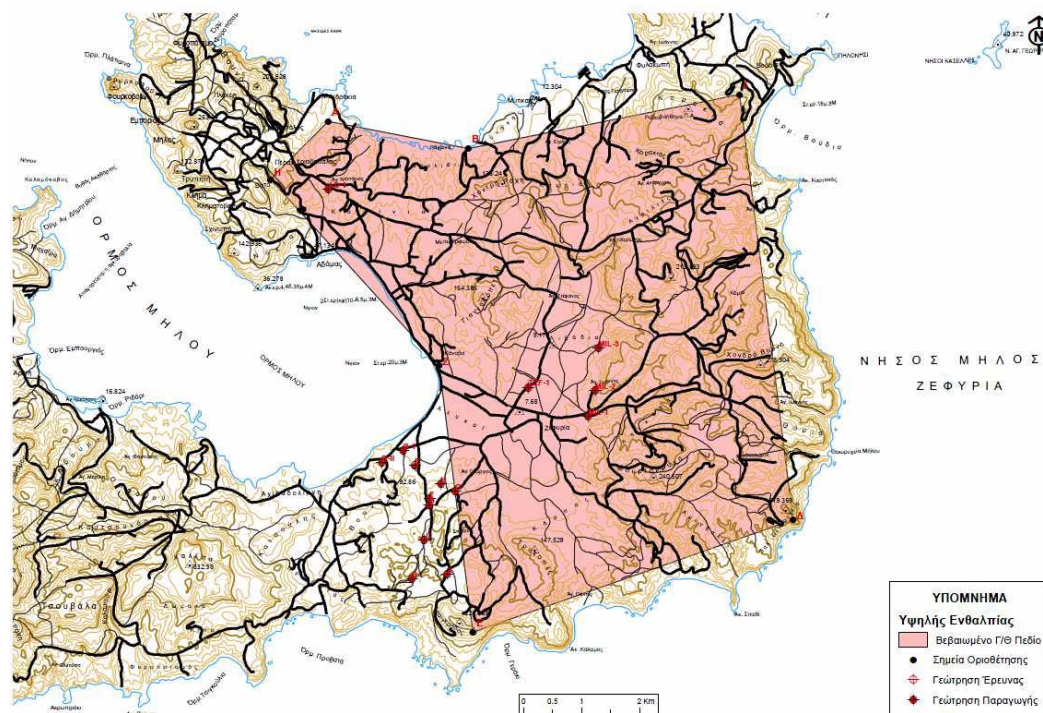
Έκταση 50 Km²

Θερμοκρασία (στον πυθμένα των γεωτρήσεων) 280- 320 °C

Βάθος ταμειυτήρα: 1000 – 1380 m.

Παραγωγή: 339 ton/h ρευστού εκ των οποίων 200 ton/h κεκορεσμένου ατμού και 139ton/h θερμού νερού.

Πίεση: 11 – 29 ATM.



Εικόνα 7 Χωροθέτηση του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας της Μήλου και τα σημεία των γεωτρήσεων παραγωγής

1.5.2.3 Κινήσεις για αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της Μήλου

Μετά τον εντοπισμό του ιδιαίτερα υψηλού γεωθερμικού δυναμικού της Μήλου, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, ξεκίνησε την κατασκευή σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το νησί της Μήλου και το ευρύ νησιωτικό σύμπλεγμα.

Ωστόσο, η κύρια γεώτρηση ορύχθηκε στην περιοχή της Ζεφυρίας, πολύ κοντά στη μεγαλύτερη πόλη του νησιού, τον Αδάμαντα, όπου είχε μόλις ξεκινήσει η τουριστική ανάπτυξη. Επιπλέον, η αρνητική εμπειρία του κοινού από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις (το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού είχε ήδη υποστεί επιδράσεις από την τοπική μεταλλευτική δραστηριότητα), είχε σαν αποτέλεσμα τη σφοδρή αντίδραση των κατοίκων ως προς το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής, με το απλό σύνθημα «σε καμία περίπτωση!»

Αιτίες της αρνητικής τοποθέτησης του κοινού ήταν η ιδιαίτερα επιβαρυσμένη ατμόσφαιρα, οφειλόμενη στην ανεξέλεγκτη διαρροή υδρόθειου και άλλων επικίνδυνων αερίων από τη γεώτρηση, τη ρύπανση των επιφανειακών νερών (βρόχινο νερό και νερό υδατοδεξαμενών) με αρσενικό και θειικά ιόντα και την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων υγρών και στερεών αποβλήτων στον όρμο της Αγίας Κυριακής.

Αποτέλεσμα των ανωτέρω επιπτώσεων, ήταν η δημιουργία έντονων διαμαρτυριών, με συγκεντρώσεις και απεργίες, οι οποίες διήρκεσαν 2 περίπου χρόνια (1987-1989) και οδήγησαν στην επιβολή παύσης λειτουργίας του πιλοτικού σταθμού.

Μέχρι και σήμερα, 20 περίπου χρόνια μετά, οι αρνητικές αντιδράσεις των κατοίκων δεν έχουν επιλυθεί (Πολύζου, 2007).

Κεφάλαιο 2. Συστήματα μετατροπής γεωθερμικής ενέργειας

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία των ρευστών υπερβαίνει τους 100°C, όπου η υγρή νερό και η αέρια (ατμός) φάση έχουν την ίδια χημική σύσταση, τότε μπορούν να εγκατασταθούν γεωθερμικές μονάδες παραγωγής-μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τύπος της μονάδας ο οποίος χρησιμοποιείται καθορίζεται συνήθως από το είδος του πεδίου (ξηρός ατμός, διφασικό ρευστό), από τη θερμοκρασία και την πίεση των ρευστών (δηλαδή από την ενθαλπία τους), από τη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών (π.χ. ποσοστό μη συμπυκνώσιμων αερίων, παρουσία αλάτων), από τη δυναμικότητα της μονάδας και από τη τάση των ρευστών για δημιουργία επικαθίσεων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών. Οι συνηθέστεροι μονάδων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα είναι ο κύκλος ατμού, ο κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού, ο δυαδικός κύκλος και ο κύκλος συνολικής ροής. 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 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 ξηρού ατμού (Dry 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)

- 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.

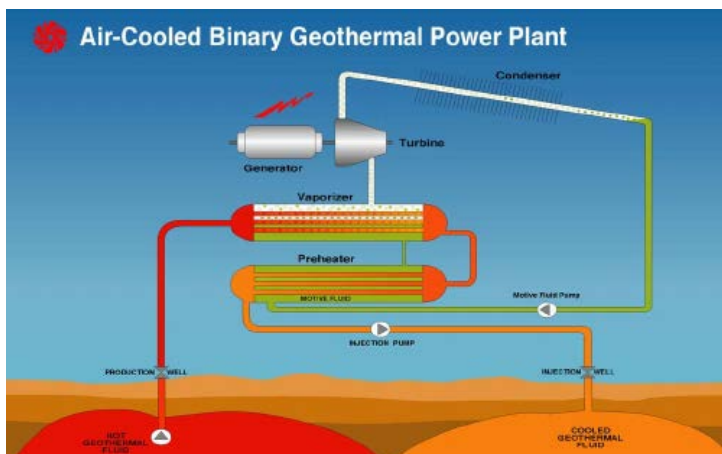
Μια ταξινόμηση των τύπων των μονάδων γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής με βάση το μέσο μέγεθος ισχύος ανά μονάδα είναι :

- 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

2.1 Μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα (Back pressure type)

Οι πιο απλές γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής ενέργειας που έχουν κατασκευαστεί είναι οι μονάδες απευθείας εκτόνωσης στην ατμόσφαιρα. Η βασική τους χρήση είναι ως δοκιμαστικές μονάδες κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των γεωθερμικών πόρων μιας περιοχής και σε υβριδικά συστήματα.

Ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση παραγωγής υγρός ατμός διοχετεύεται πρώτα στο διαχωριστή, όπου ο ατμός κατευθύνεται στον αμοστρόβιλο και η 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, 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



Εικόνα 8 Single flash steam-back pressure pipe

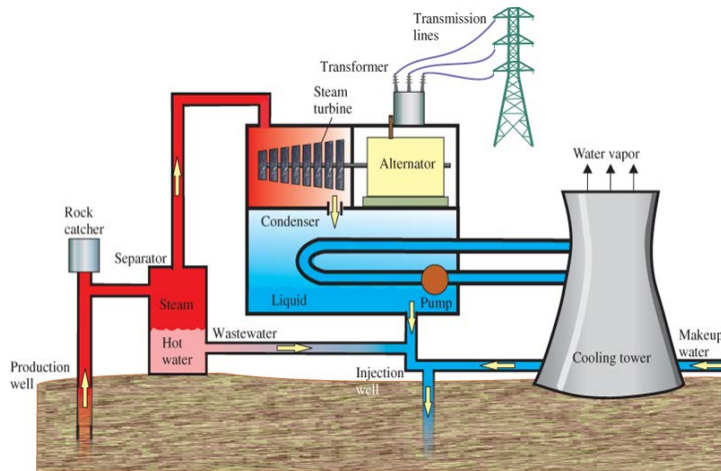
θερμοκρασιών (200-320°C) των γεωθερμικών ρευστών. Αν και δεν συνηθίζεται η αυτόνομη εφαρμογή τους υπάρχουν ειδικά στο Μεξικό από το 1980 μερικές μονάδες των 5MWe λειτουργούν ακόμη με επιτυχία.

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.

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

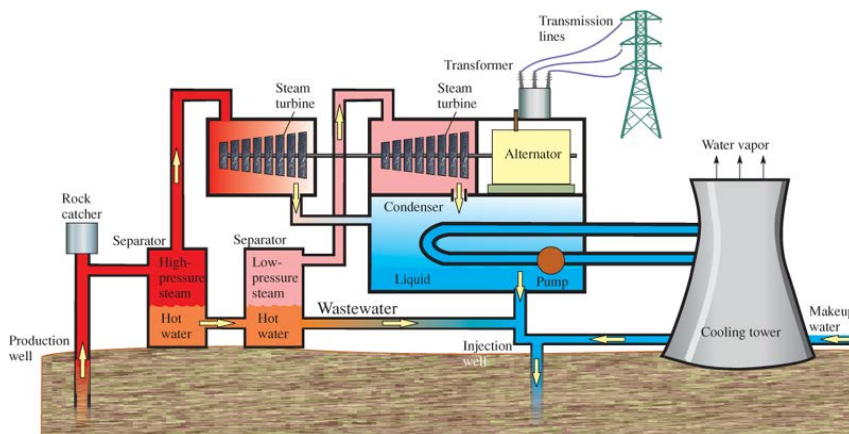
Οι μονάδες υγρού ατμού απλού τύπου καταλαμβάνουν ο μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση παραγωγής υγρός ατμός διοχετεύεται πρώτα στο διαχωριστή, όπου ο υγρός ατμός διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο η δε άλμη (συμπιεσμένο νερό) στη γεώτρηση 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.



Εικόνα 9 Single flash steam type

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

Οι μονάδες υγρού ατμού διπλού τύπου 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 1ου διαχωριστή) σε χαμηλότερη θερμοκρασία/ πίεση σε ένα 2ο διαχωριστή. Η προσθήκη ενός δεύτερου ατμοστρόβιλου



Εικόνα 10 Double flash steam type

χαμηλότερης πίεσης αυξάνει με 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 ατμοστρόβιλο διπλής πίεσης (Steam Power Plant – Double Pressure HP & LP)**

Ο ατμοστρόβιλος 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 2ο διαχωριστή διοχετεύεται στον ίδιο ατμοστρόβιλο που διοχετεύθηκε και ο ατμός από τον 1ο διαχωριστή. Όμως η θέση εισόδου του ατμού από το 2ο διαχωριστή στον ατμοστρόβιλο είναι διαφορετική (ενδιάμεση) από αυτή του 1ου διαχωριστή

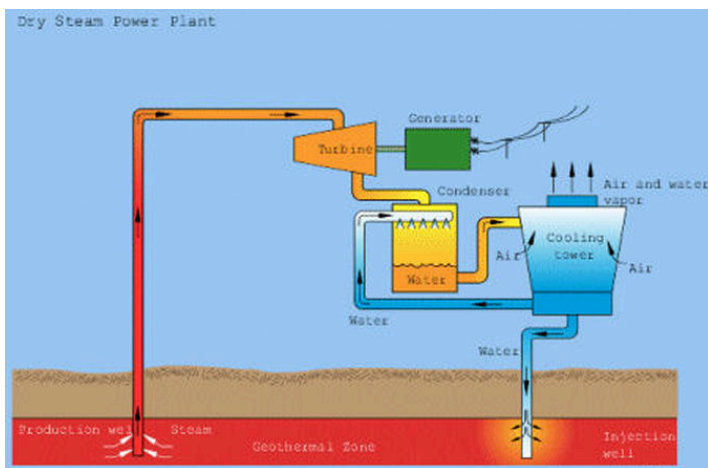
- **Η διάταξη μονάδας υγρού ατμού διπλού τύπου με δυο χωριστούς ατμοστροβίλους (Steam Power Plant – Double Flash HP & LP)**

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

2.4 Μονάδες ξηρού ατμού (Dry steam type)

Στις μονάδες ξηρού ατμού ο εξερχόμενος από τη γεώτρηση ξηρός ατμός διοχετεύεται απευθείας στον ατμοστρόβιλο εκτός και αν υπάρχουν υδρατμοί οπότε τοποθετείται πριν την είσοδο του ατμού στον ατμοστρόβιλο ένας διαχωριστής



Εικόνα 11 Dry steam type

αφαίρεσης υγρασίας ατμού. Το δημιουργούμενο συμπύκνωμα (ή άλμη) στον συμπυκνωτή από τον εξερχόμενο ατμό του ατμοστρόβιλου τμήμα ή όλο είτε επανεισάγεται στη γεώτρηση επανεισαγωγής σε κλειστό κύκλωμα, είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα διαμέσου του πύργου ψύξης.

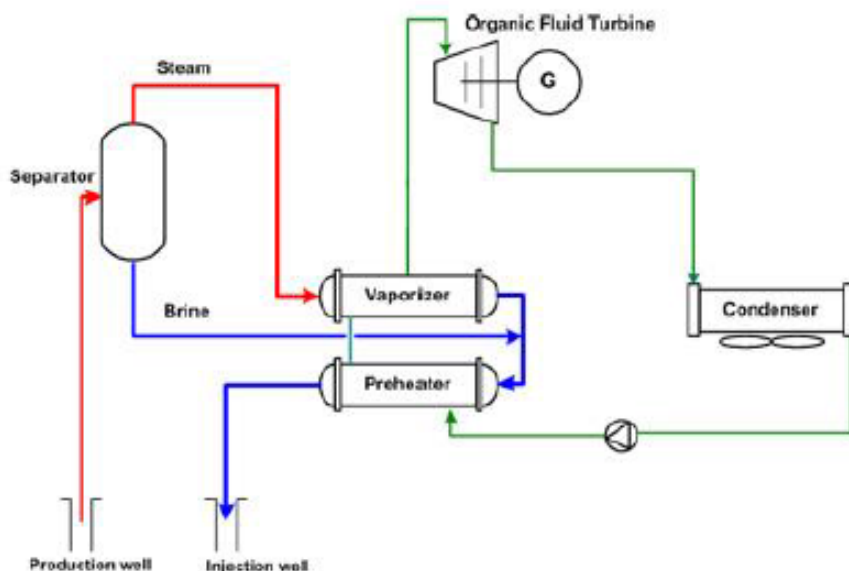
Στην περίπτωση αυτή οι ατμοστρόβιλοι είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν, συγκριτικά με τους άλλους τύπους μονάδων, σε χαμηλότερες πιέσεις και αρκετά μεγαλύτερες παροχές ατμού, χρησιμοποιώντας και συμπυκνωτές.

Μόνο τα γεωθερμικά πεδία στο Larderello της Ιταλίας και στο Geysers στις ΗΠΑ παράγουν ξηρό ατμό. Το τυπικό μέγεθος τέτοιων μονάδων ξηρού ατμού είναι 50-60MWe, αν και πρόσφατα έχουν τεθεί σε λειτουργία μονάδες της τάξης των 110MWe.

2.5 Μονάδες δυαδικού τύπου (Binary type)

Στις περιπτώσεις που η ενθαλπία περιορίζεται σε θερμοκρασίες πεδίων χαμηλής ή μέσης εφαρμόζονται μονάδες δυαδικού τύπου, υβριδικές μονάδες όπου το γεωθερμικό ρευστό διέρχεται δια μέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας για να θερμάνει ένα πτητικό ρευστό εργασίας 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 ατμοστρόβιλο. Ένα ρευστό που έχει ένα χαμηλό σημείο ζέσεως 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.



Εικόνα 12 Διάταξη μονάδας δυαδικού τύπου

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.

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 επαρκής ή και ικανοποιητικός.

Τελικά 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

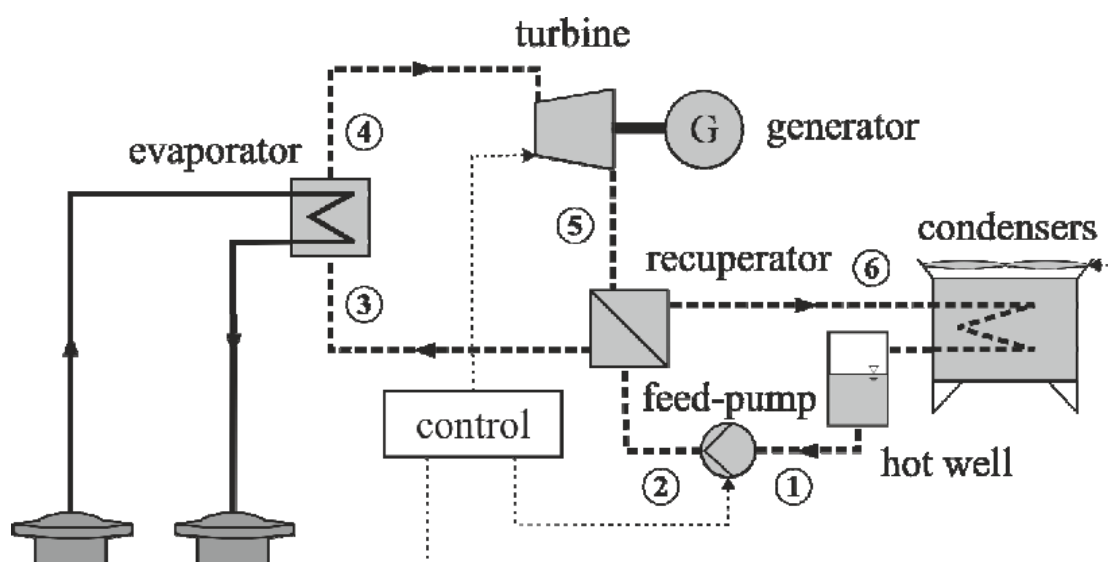
εξατμιστή, όπου εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό, και ακολούθως εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο σε αέρια φάση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εξερχόμενο από τον ατμοστρόβιλο διέρχεται από ένα συμπυκνωτή για τη ψύξη του σε υγρή φάση. Ακολούθως με μια αντλία κυκλοφορητή προωθείται 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 .

Υπάρχουν δύο 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)

2.6 Μονάδες δυαδικού τύπου Organic Rankine Cycle (ORC)

Η μονάδα δυαδικού τύπου (Binary Cycle) με σύστημα Organic Rankine Cycle (ORC) χρησιμοποιεί εκτός των άλλων εξαρτημάτων (ατμοστρόβιλος, αντλίες, πύργοι ψύξης, κλπ) και τέσσερις τύπους εναλλακτών θερμότητας (συμπυκνωτής, αναθερμαντήρας, προθερμαντήρας και εξατμιστής). Η διάταξη και η ροή του γεωθερμικού ρευστού και του πτητικού ρευστού και οι θερμοδυναμικές συνθήκες στη μονάδα δυαδικού τύπου ORC αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα.



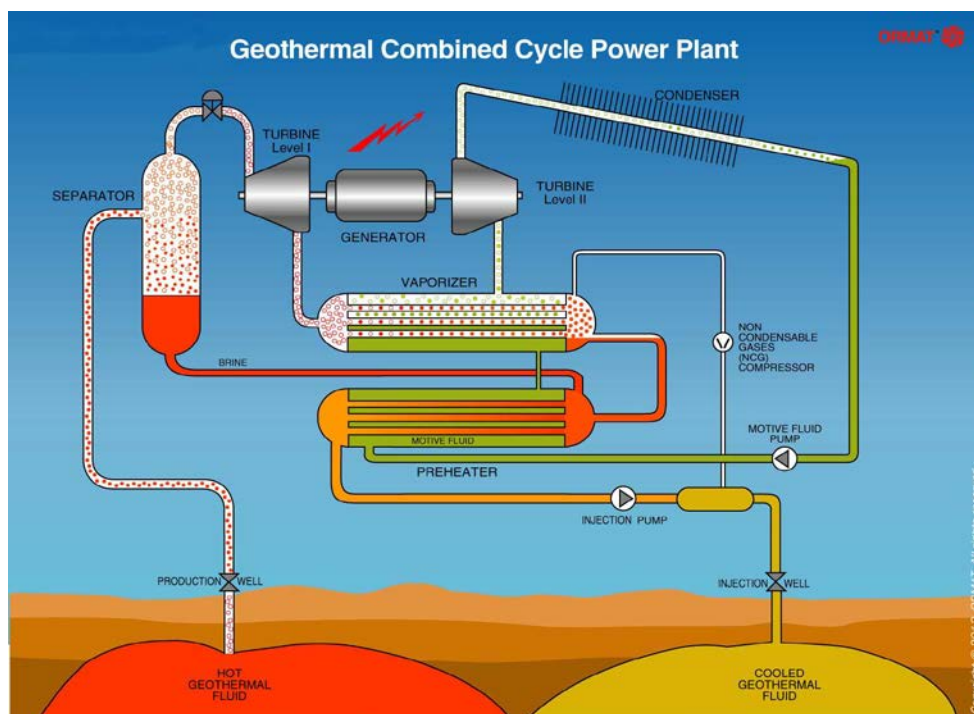
Εικόνα 13 Τυπική διάταξη μονάδας ORC

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.

2.8 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.



Εικόνα 15 Τυπική διάταξη συνδυασμένου κύκλου

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

- 1) 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.

- 2) 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 ατμοστρόβιλος (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 ατμοστρόβιλο. Κριτήριο είναι η ύπαρξη ίδιας πίεσης στη θέση που συναντιέται ο εξερχόμενος ατμός από τον ατμοστρόβιλο και η εξερχόμενη άλμη από το διαχωριστή.

- 3) 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
 - 1η μονάδα δυαδικού τύπου, όπου ο εξατμιστής θερμαίνεται με τον εξερχόμενο ατμό από τον ατμοστρόβιλο και
 - 2η μονάδα δυαδικού τύπου, όπου ο εξατμιστής θερμαίνεται με την εξερχόμενη άλμη (brine) από το διαχωριστή.

Κεφάλαιο 3. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις από τη Γεωθερμία



Εικόνα 16 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα Geysers της Καλιφόρνια

3.1 Εισαγωγή

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 στηρίξουν 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 διαπραγμάτευσης, 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.

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.

3.2 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 ατμοστρόβιλου, 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 ατμοστρόβιλου, ειδικά H₂S 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.

3.3 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 εξασθετισμένοι 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 ατμοστρόβιλο, 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 ατμοστρόβιλο 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.

3.3.1 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 ατμοστρόβιλο 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.

3.3.2 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 κροκυδωμένα 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 καταβύθισή 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 κλασική 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.

3.4 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

3.4.1 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 3οC 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 εξαφανιζόταν, 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.

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.

3.4.2 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.

3.4.3 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 λιθοσφαιρικών, 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 ταμειυτήρα.

3.5 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 παραβιάσουν την ακεραιότητά 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.

3.5 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 κρύνων 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 διαμέσου 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 4. Περιγραφή τυπικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης και υψηλής ενθαλπίας

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης και υψηλής ενθαλπίας. Συγκεκριμένα περιγράφονται:

- Η επιλογή της τεχνικής αξιοποίησης του γεωθερμικού ρευστού προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή ο τύπος της γεωθερμικής μονάδας
- Το κύκλο λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας παραγωγής
- Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης της μονάδας
- Τα βασικά τεχνολογικά εξαρτήματα που απαρτίζουν τη γεωθερμική μονάδα:
 1. Ο εναλλάκτης θερμότητας
 2. Ο στρόβιλος
 3. Η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
 4. Ο συμπιεστής
 5. Ο πύργος ψύξης

4.1. Επιλογή τεχνικής αξιοποίησης του γεωθερμικού ρευστού προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Ο τύπος (κύκλος) της μονάδας ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της γεωθερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική καθορίζεται συνήθως από το είδος του πεδίου (ξηρός ατμός, διφασικό ρευστό), από τη θερμοκρασία και την πίεση των ρευστών (δηλαδή από την ενθαλπία τους), από τη σύσταση των γεωθερμικών ρευστών (π.χ. ποσοστό μη συμπυκνώσιμων αερίων, παρουσία αλάτων), από τη δυναμικότητα της μονάδας και από την τάση των ρευστών για δημιουργία επικαθίσεων και διάβρωσης των μεταλλικών επιφανειών. Οι κυριότεροι τύποι μονάδων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα είναι ο κύκλος ατμού, ο κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού, ο δυαδικός κύκλος και ο κύκλος συνολικής ροής.

Τα δυαδικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αξιοποιούν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ 85-170°C. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ρευστά χαμηλής-μέσης θερμοκρασίας και από το υψηλής θερμοκρασίας νερό που εξέρχεται από τους διαχωριστές στα γεωθερμικά πεδία υγρής φάσης, σημειώνει αξιόλογη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως εξαιτίας της προόδου που επιτεύχθηκε στην τεχνολογία των δυαδικών ρευστών. Σε τέτοιου τύπου εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ένα δευτερεύον –συνήθως οργανικό-

ρευστό (ισο-πεντάνιο), το οποίο έχει χαμηλό σημείο ζέσεως και υψηλή τάση ατμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, αν συγκριθεί με τον υδάτινο ατμό.

Το δευτερεύον ρευστό, απορροφώντας μέρος της θερμότητας του γεωθερμικού ρευστού, αποκτά περισσότερη «θερμική ενέργεια», δηλαδή μεγαλύτερη ενθαλπία, άρα μπορεί να παράξει μεγαλύτερο έργο από ότι θα παρήγαγε μόνο το γεωθερμικό ρευστό. Κατάλληλα ρευστά για τη χρήση αυτή είναι όπως προαναφέρθηκε το φρέον, το ισοβουτάνιο, το προπάνιο, το χλωριούχο αιθύλιο τα οποία έχουν χαμηλό σημείο ζέσεως, οπότε ακόμα και με απορρόφηση μικρής ποσότητας θερμότητας, αποκτούν ικανοποιητική θερμική ενέργεια. Αυτό προκύπτει και από το διάγραμμα των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ρευστών αυτών, το οποίο συγκρινόμενο με το αντίστοιχο διάγραμμα του νερού, παρατηρείται ότι για ίδια θερμοκρασία, η ενθαλπία του ρευστού είναι μεγαλύτερη από την ενθαλπία του νερού. Το δευτερεύον ρευστό χρησιμοποιείται μέσα σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR) .

4.2. Κύκλα Ισχύος

Η παραγωγή ισχύος πραγματοποιείται από συστήματα που λειτουργούν σε ένα θερμοδυναμικό κύκλο. Τα θερμοδυναμικά κύκλα χωρίζονται σε κύκλα ισχύος και σε κύκλα ψύξης. Ο όρος κύκλος ισχύος αντιστοιχεί σε μια επαναλαμβανόμενη κυκλική διαδικασία κατά την οποία έχουμε συνεχή παραγωγή ισχύος.

Τα κύκλα διαιρούνται σε κύκλα αερίου και σε κύκλα ατμού, ανάλογα με τη φάση του ρευστού εργασίας. Στα κύκλα αερίου, το ρευστό εργασίας είναι σε αέρια φάση σε ολόκληρο το κύκλο, ενώ στα κύκλα ατμού είναι σε αέρια φάση σε ένα τμήμα και σε υγρή σε άλλο τμήμα του κύκλου.

Τα κύκλα μπορούν να επίσης διαιρεθούν σε ανοικτά και σε κλειστά κύκλα. Στα κλειστά κύκλα, το ρευστό εργασίας στο τέλος του κύκλου επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και επανακυκλοφορεί στο σύστημα, ενώ στα ανοικτά ανανεώνεται στο τέλος του κύκλου.

Το κατά πόσο ένας κύκλος μπορεί να εφαρμοστεί είναι συνάρτηση του κόστους και του βαθμού απόδοσής του.

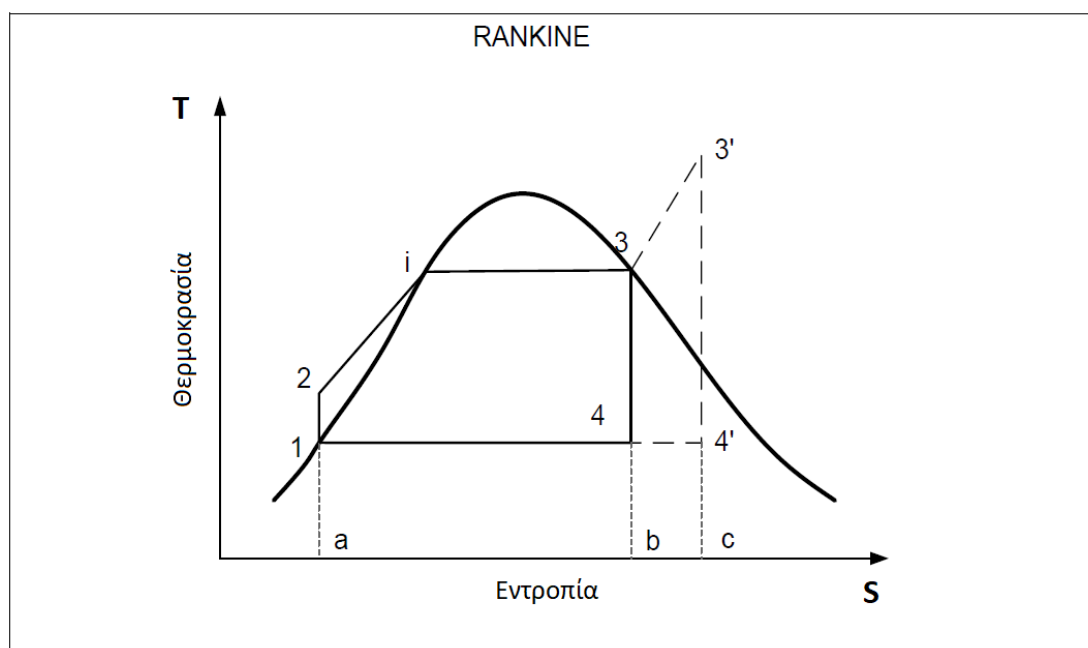
4.2.1 Κύκλο Rankine

Το κύκλο Rankine είναι το ιδανικότερο κύκλο για μια απλή εγκατάσταση ισχύος με ατμό. Αποτελείται από τις παρακάτω τέσσερις διαδικασίες:

- Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση σε μια αντλία , 1-2.
- Μεταφορά θερμότητας, υπό σταθερή πίεση, στο λέβητα, 2-i-3.
- Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση στο στρόβιλο, 3-4.
- Αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή, υπό σταθερή πίεση, 4-1.

Αν έχουμε υπερθέρμανση του ατμού, το διάγραμμα του κύκλου είναι το 1-2-3-3'-4'.

Σε έναν τυπικό κύκλο Rankine αρχικά ανυψώνεται η θερμοκρασία του νερού υπό σταθερή πίεση μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί την πίεση λειτουργίας του λέβητα (σημείο i). Στη συνέχεια έχουμε βρασμό (ή και υπερθέρμανση) και στην έξοδο του λέβητα έχουμε κορεσμένο ατμό (σημείο 3) ή υπέρθερμος ατμό (σημείο 3'). Το νερό εισέρχεται στην αντλία (σημείο 1) σαν κορεσμένο υγρό και συμπιέζεται ισεντροπικά μέχρι μια ορισμένη πίεση. Αυτό συμβαίνει σε ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας με χρήση καυσίμου και λέβητα.



Εικόνα 17 Κύκλος Rankine

Στην περίπτωση της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ρευστό, όλο το παραπάνω στάδιο δεν υπάρχει.

Καθώς το ρευστό είτε έχει ήδη την απαιτούμενη θερμοκρασία, ώστε μετά από διαχωρισμό αέριας και υγρής φάσης, να προκύψει ο κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός, είτε χρησιμοποιείται για να προσφέρει θερμότητα σε ένα δευτερεύον υγρό μέσω εναλλακτών θερμότητας, οπότε το τελευταίο εξατμίζεται ώστε να προκύψει και

πάλι κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός. Ο ατμός, κορεσμένος ή υπέρθερμος, μπαίνει στο στρόβιλο όπου εκτονώνεται ισεντροπικά και παράγει έργο περιστρέφοντας τον άξονα του ατμοστροβίλου ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης, η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού πέφτουν (σημείο 4 ή 4'). Στη συνέχεια ο ατμός, συνήθως μίγμα υγρού ατμού υψηλής ποιότητας, ψύχεται, εισέρχεται στο συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται, υπό σταθερή πίεση, αποβάλλοντας θερμότητα. Ο ατμός βγαίνει από το συμπυκνωτή σαν κορεσμένο υγρό και εισέρχεται στην αντλία, κλείνοντας έτσι τον κύκλο, Εικόνα [17]

Η μορφή του διαγράμματος T-s (Εικόνα [17]) ενός ρευστού εργασίας καθορίζει αν το ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με το κύκλο Rankine. Το επιθυμητό είναι να έχουμε ένα ρευστό με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία και στενή καμπύλη κορεσμού έτσι ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο το ιδανικό κύκλο Carnot. Τα απαιτούμενα όρια της πίεσης πρέπει επίσης να είναι λογικά. Σημαντικοί φυσικά παράγοντες είναι το κόστος και η διαθεσιμότητα του ρευστού. Η συνολική ποσότητα του ρευστού που κυκλοφορεί στο κύκλο εξαρτάται από την ενθαλπία εξάτμισης, αφού αυτή καθορίζει την ενέργεια που μπορεί να δοθεί στο υγρό στην υψηλή θερμοκρασία. Αν όλοι αυτοί οι παράγοντες ληφθούν υπ όψη το νερό αποδεικνύεται καλή επιλογή για το κύκλο Rankine.

4.3 Θερμοδυναμικός Βαθμός Απόδοσης

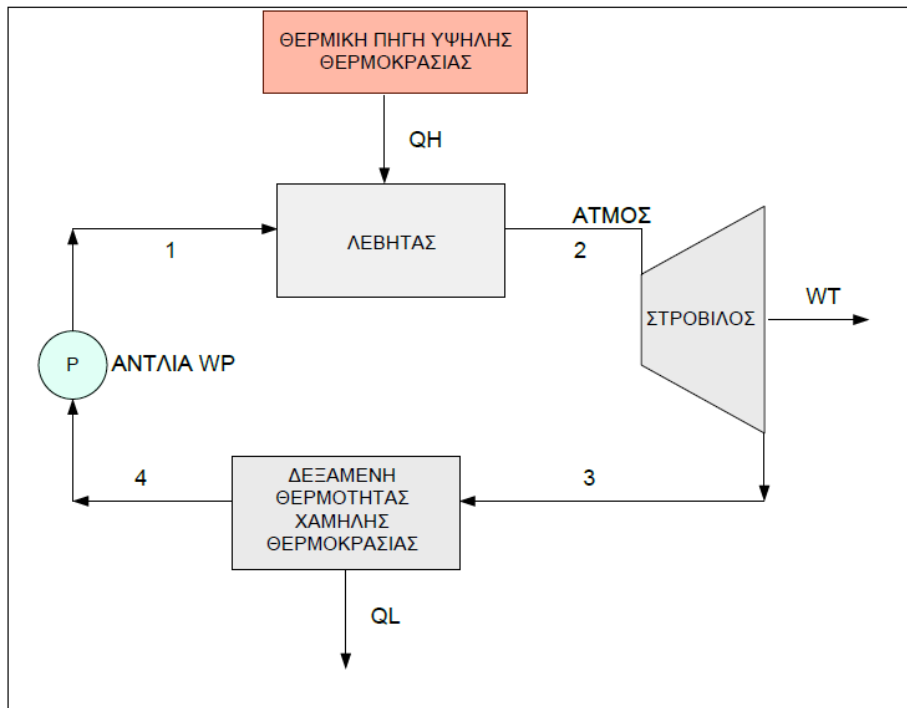
Θερμική μηχανή είναι ένα σύστημα που λειτουργεί σε ένα θερμοδυναμικό κύκλο και παράγει ένα έργο σαν αποτέλεσμα μιας διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας από μια δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας σε ένα ρευστό εργασίας. Μέρος της θερμότητας που πήρε το ρευστό αποβάλλεται σε μια δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας. Μια απλή εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με ατμό είναι ένα παράδειγμα θερμικής μηχανής.

Επειδή η θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη τη θερμότητα που παραλαμβάνει σε ωφέλιμο έργο, ο θερμοδυναμικός ή θερμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται σαν το ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας (θερμότητας) που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια:

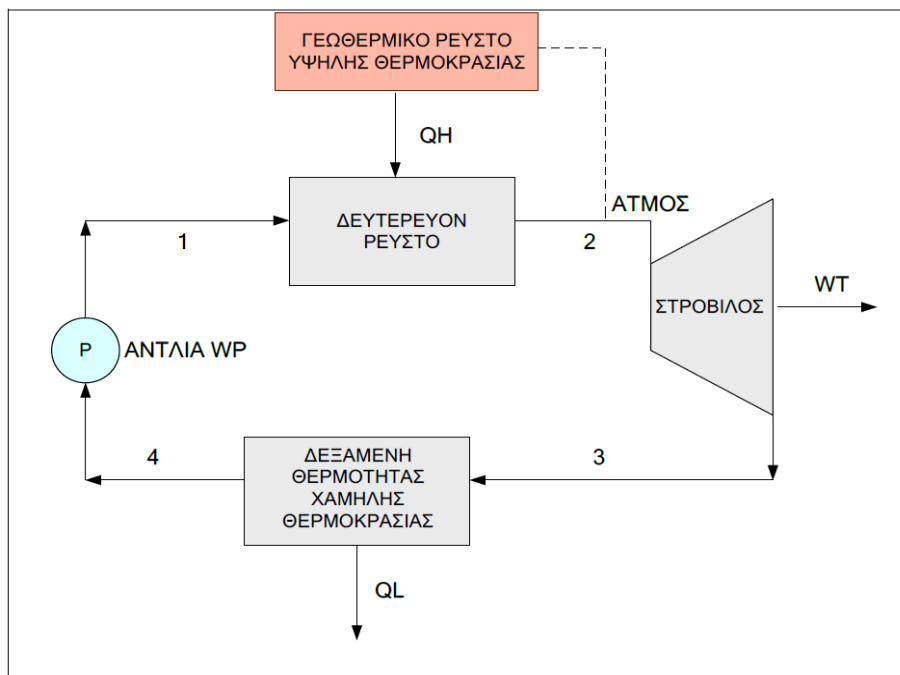
$$\eta_{th} = \frac{\text{παραγόμενο έργο}}{\text{εισερχόμενη θερμότητα}} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

Η εκτίμηση του συνολικού βαθμού απόδοσης σύγχρονων μεγάλων εγκαταστάσεων είναι μια αρκετά δύσκολη υπόθεση.

Στην περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά, η θερμική μηχανή δεν περιλαμβάνει πλέον λέβητα, αφού το ίδιο το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται είτε για να κινήσει απευθείας τον ατμοστρόβιλο, είναι για να θερμάνει και να εξατμίσει ένα δευτερεύον ρευστό, το οποίο στη συνέχεια θα κινήσει τον ατμοστρόβιλο, Σχήμα [].



Εικόνα 18 Εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με ατμό



Εικόνα 19 Εγκατάσταση γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ισχύος με ατμό

4.4. Εναλλάκτες θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση (και εξάτμιση) σε έναν εναλλάκτη του δευτερεύοντος ρευστού (νερό και αμμωνία, ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, CO₂ κ.λ.π.), το οποίο έχει μικρότερο σημείο ζέσεως σε σχέση με το νερό.

Ο εναλλάκτης συνήθως αποτελείται από διάταξη χαλύβδινων αυλών, γυμνών ή πτερυγοφόρων, στο εσωτερικό των οποίων ρέει το υπό πίεση ρευστό τροφοδοσίας, ενώ στο εξωτερικό το δευτερεύον ρευστό λειτουργίας. Είναι μια συσκευή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και επειδή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι μικρός, είναι μια συσκευή μεγάλων διαστάσεων.

Στην περίπτωση της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικό ρευστό, αυτό ρέει μέσα στον εναλλάκτη και μεταδίδει τη θερμότητά του στο δευτερεύον ρευστό (χαμηλότερου σημείου ζέσεως από το γεωθερμικό ρευστό) και επομένως το τελευταίο εξατμίζεται και στην συνέχεια οδηγείται στο στρόβιλο της μονάδας για παραγωγή μηχανικού έργου.

Οι εναλλάκτες θερμότητας ή αλλιώς οικονομητήρες, χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη. Διακρίνονται σε δύο τύπους ανάλογα με τη γεωμετρική τους διάταξη: οριζόντιων ή κατακόρυφων αυλών και σαν παράλληλης ή εγκάρσιας ροής ανάλογα με τη ροή του δευτερεύοντος ρευστού ως προς τη γεωμετρία των αυλών. [12]

Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, οι εναλλάκτες θερμότητας διακρίνονται σε εναλλάκτες άμεσης, έμμεσης ή ημιάμεσης μετάδοσης.

Στους εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης, η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό με άμεση επαφή, ή ανάμιξη των δύο ρευστών.

Στους εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης, το θερμό και το ψυχρό ρευστό ρέουν ταυτόχρονα μέσα στον εναλλάκτη, διαχωρίζονται δε από ενδιάμεσα τοιχώματα, μέσω των οποίων και γίνεται η μεταφορά θερμότητας. Η πλειοψηφία των εμπορικών εναλλακτών ανήκουν στην κατηγορία αυτή, για αυτό και σε τμήματα της βιβλιογραφίας αναφέρονται σαν εναλλάκτες κλασικού τύπου.

Οι εναλλάκτες ημιάμεσης μετάδοσης είναι διατάξεις στις οποίες η ίδια η επιφάνεια θέρμανσης εκτίθεται διαδοχικά στο θερμό και στο ψυχρό ρευστό. Η επιφάνεια αυτή απάγει και αποθηκεύει θερμότητα από το θερμό ρευστό, όταν βρίσκεται σε επαφή με αυτό. Όταν στη συνέχεια διακοπεί η ροή του θερμού ρευστού και ακολουθήσει η ροή του ψυχρού ρευστού, η επιφάνεια αποδίδει σε αυτό την αποθηκευμένη θερμότητα. Οι εναλλάκτες αυτού του τύπου είναι γνωστοί σαν αναγεννητές.

Ανάλογα με τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη, διακρίνονται σε εναλλάκτες ομοροής, αντιροής και δέσμης σωλήνων-κελύφους.

4.4.1. Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη θερμότητας

Η θερμοροή που μεταφέρεται σε έναν εναλλάκτη από το θερμό στο ψυχρό ρευστό υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = kA\Delta T_{in}$$

Όπου k ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη [W/m²K]

A συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη [m²]

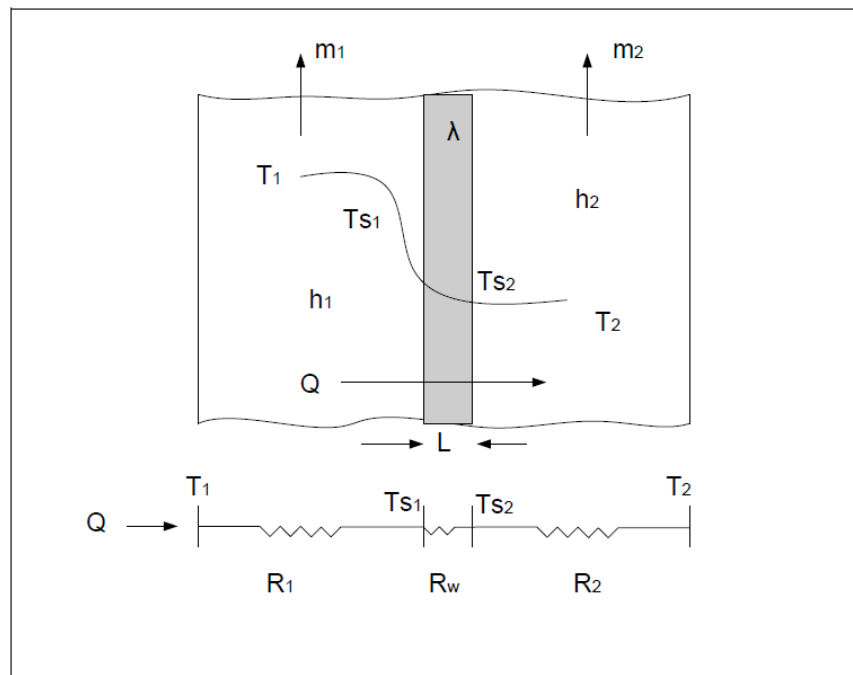
ΔT_{in} η μέση θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη [oC]

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας συνδέεται τη συνολική θερμική αντίσταση μεταξύ των δύο ρευστών με τη σχέση:

$$kA = 1/R_{o\lambda}$$

Η συνολική θερμική αντίσταση είναι το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων που εμφανίζονται στη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή από το ένα ρευστό στο άλλο. Στην περίπτωση δηλαδή ενός απλού στοιχείου εναλλάκτη (διαχωρισμός των δύο ρευστών από επίπεδο τοίχωμα πάχους L με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ), η συνολική θερμική αντίσταση θα είναι [14]:

$$R_{o\lambda} = R_1 + R_w + R_2 = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}$$



Εικόνα 20 Βασικό στοιχείο εναλλάκτη

Ανεξάρτητα από τη διάταξη της ροής των ρευστών και του τύπου του εναλλάκτη θερμότητας, η συνολική θερμορροή μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού δίνεται από τον τύπο:

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1,i} - T_{1,o}) = \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2,o} - T_{2,i})$$

Όπου \dot{m} η παροχή του εκάστοτε ρευστού σε μονάδες [kg/sec]

c_p η ειδική θερμότητα του ρευστού σε μονάδες [J/kg*K]

T η θερμοκρασία του ρευστού σε μονάδες [K]

Ο δείκτης «1» αναφέρεται στο θερμό ρευστό και ο δείκτης «2» στο ψυχρό. Ο δείκτης «i» αναφέρεται στην είσοδο και ο δείκτης «o» στην έξοδο του εναλλάκτη θερμότητας. Έτσι $T_{1,i}$ είναι η θερμοκρασία εισόδου του θερμού ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας, ενώ $T_{2,o}$ είναι η θερμοκρασία εξόδου του ψυχρού ρευστού από τον εναλλάκτη θερμότητας.

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ των δύο ρευστών και με τις παραδοχές ότι οι απώλειες θερμότητας του εναλλάκτη προς το περιβάλλον είναι αμελητέες όπως επίσης αμελητέες είναι και οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας των ρευστών κατά τη διαδρομή τους μέσα στον εναλλάκτη.

4.4.2. Αποτελεσματικότητα εναλλακτών

Με τον όρο αποτελεσματικότητα (ή βαθμό απόδοσης) εναλλάκτη θερμότητας, ορίζουμε το λόγο πραγματικής θερμορροής στον εναλλάκτη προς τη μέγιστη δυνατή θερμορροή:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$$

Η μέγιστη δυνατή θερμορροή δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{max} = \dot{W}_{min} (T_{1,i} - T_{2,i})$$

Όπου \dot{W}_{min} η μικρότερη από τις δύο θερμοχωρητικές παροχές (θερμού ή ψυχρού ρευστού)

Η μέγιστη δυνατή θερμορροή μπορεί να επιτευχθεί σε εναλλάκτη αντιρροής απείρου μήκους. Σε έναν τέτοιο εναλλάκτη, στο ένα από τα δύο ρευστά, σε αυτό με τη μικρότερη θερμοχωρητική παροχή \dot{W} , θα εμφανιστεί η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά $T_{1,i} - T_{2,i}$ που μπορεί να υπάρξει σε εναλλάκτη.

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι :

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_1 (T_{1,i} - T_{1,0})}{\dot{W}_{min} (T_{1,i} - T_{2,i})}$$

ή

$$\varepsilon = \frac{\dot{W}_2 (T_{2,0} - T_{2,i})}{\dot{W}_{min} (T_{1,i} - T_{2,i})}$$

4.5. Ατμοστρόβιλοι

Οι στρόβιλοι μετατρέπουν την ενέργεια μιας μορφής σε περιστροφική κινητική ενέργεια. Οι ατμοστρόβιλοι συγκεκριμένα μετατρέπουν την ενέργεια του ατμού σε κινητική ενέργεια. Προκειμένου να προβεί κανείς στην εκλογή στροβίλου και στη συνέχεια στη λειτουργία του, πρέπει να ξέρει πώς γίνεται αυτή η μετατροπή.

Σε έναν ατμοστρόβιλο, θερμός και υπό πίεση ατμός ρέει μέσα από ειδικά διαμορφωμένες οπές που ονομάζονται ακροφύσια. Έτσι καθώς ο ατμός περνάει μέσα από τα ακροφύσια, η θερμική του ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην πτώση τόσο της πίεσης όσο και της θερμοκρασίας του. Σχηματίζεται όμως μια δέσμη ατμού με υψηλή ταχύτητα που μπορεί να εξασκήσει αρκετή δύναμη. Η «δέσμη» αυτή κατευθύνεται στα πτερύγια του άξονα του στροβίλου, οπότε εξασκείται σε αυτά μια σταθερή δύναμη. Έτσι ο ατμός εκτελεί έργο στα πτερύγια. Με τον τρόπο αυτό η κινητική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε μηχανική περιστροφική ενέργεια.

Ο ατμοστρόβιλος μετατρέπει μέρος της ενέργειας του ατμού που περνάει μέσα από αυτόν σε κινητική ενέργεια του περιστρεφόμενου άξονα. Η ενέργεια του ατμού είναι μεγάλη, αλλά δυστυχώς μόνο ένα μέρος της ενέργειας αυτής μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια του άξονα. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί, μπορεί να υπολογιστεί από το διάγραμμα Mollier.

Όπως είναι γνωστό οι άξονες στο διάγραμμα Mollier, δίνουν τα μεγέθη της εντροπίας και της ενθαλπίας, Η εντροπία είναι ένα μέγεθος που δεν μπορεί να μετρηθεί με όργανα. Χρησιμοποιείται προκειμένου να καθοριστεί η «διαθέσιμη» ενέργεια του ατμού, δηλαδή το μέγιστο μέρος της ενέργειας που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια του άξονα.

Για παράδειγμα , έστω ατμός πίεσης 1 MPa και θερμοκρασίας 400oC. Από το διάγραμμα Mollier προκύπτει ότι ο ατμός έχει ενθαλπία 3260KJ/kg. Θέλουμε να βρούμε πόση από την ενέργεια του ατμού μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική, αν ο ατμός εκτονωθεί σε πίεση 50KPa. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να προκύψει από τη μεταβολή αυτή, προκύπτει αν η μεταβολή πραγματοποιηθεί ισεντροπικά. Τότε η

ενθαλπία του ατμού στην τελική κατάσταση θα είναι 2600KJ/kg. Επειδή η διαθέσιμη ενέργεια ισούται με τη διαφορά της αρχικής και τελικής ενθαλπίας θα είναι:

$$\text{Διαθέσιμη ενέργεια} = 3260 - 2600 = 660 \text{KJ/kg}$$

Δηλαδή μόνο 660KJ/kg από τα αρχικά 3260KJ/kg μπορούν να μετατραπούν σε μηχανική ενέργεια. Το ποσό αυτό μπορεί να αυξηθεί είτε με την αύξηση της αρχικής πίεσης και θερμοκρασίας του ατμού είτε με μείωση της τελικής πίεσης εκτόνωσης.

Τα δύο βασικά στοιχεία των στροβίλων είναι τα ακροφύσια (ή σταθερά πτερύγια) και τα κινητά πτερύγια ή κάδοι. Όλα τα άλλα μέρη π.χ. περίβλημα, άξονας, δαχτυλίδια, τροχοί κ.τ.λ. είναι βοηθητικά των δύο παραπάνω στοιχείων.

Σκοπός των ακροφυσίων είναι η δημιουργία στενής δέσμης ατμού μεγάλης ταχύτητας. Η δέσμη πρέπει να διατηρεί κατά το δυνατόν το σχήμα της, για να επενεργεί δραστικά στα πτερύγια. Η ταχύτητά της εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης κατά μήκος του ακροφυσίου (όσο μεγαλύτερη η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα) και από την αρχική θερμοκρασία του ατμού.

Ο ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας στην είσοδο του ακροφυσίου έχει σχετικά μικρή ταχύτητα και έτσι η κινητική του ενέργεια θεωρείται αμελητέα. Καθώς περνάει μέσα από το ακροφύσιο, η θερμοκρασία του πέφτει σημαντικά. Η θερμοκρασία είναι δείκτης της ενθαλπίας του ατμού. Καθώς λοιπόν ο ατμός περνάει μέσα από το ακροφύσιο χάνει ενθαλπία και αποκτά κινητική ενέργεια. Έχουμε δηλαδή μετατροπή της ενθαλπίας σε κινητική ενέργεια.

Αν λοιπόν ο στρόβιλος είναι μια συσκευή που μετατρέπει την ενθαλπία του ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας σε περιστροφική κινητική ενέργεια μέσω των πτερυγίων, τα ακροφύσια μετατρέπουν την ενέργεια του ατμού σε κινητική ενέργεια και στη συνέχεια απλώς τα πτερύγια μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε περιστροφική κινητική ενέργεια. [12]

Στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η ονομαστική ισχύς των ατμοστροβίλων κυμαίνεται από 100 MW έως 1.300 MW. Ωστόσο, η ολοένα και αυξανόμενη εμφάνιση ανεξάρτητων παραγωγών ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο υλικό διαφόρων ειδών απόβλητα, και κυρίως στερεά αστικά απόβλητα, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σταθμών παραγωγής ενέργειας μικρότερης ισχύος από 10 MW έως 80 MW.

Η ταχύτητα περιστροφής των ατμοστροβίλων σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 3.000 rpm για συχνότητα 50 Hz και 3.600 rpm για 60 Hz.

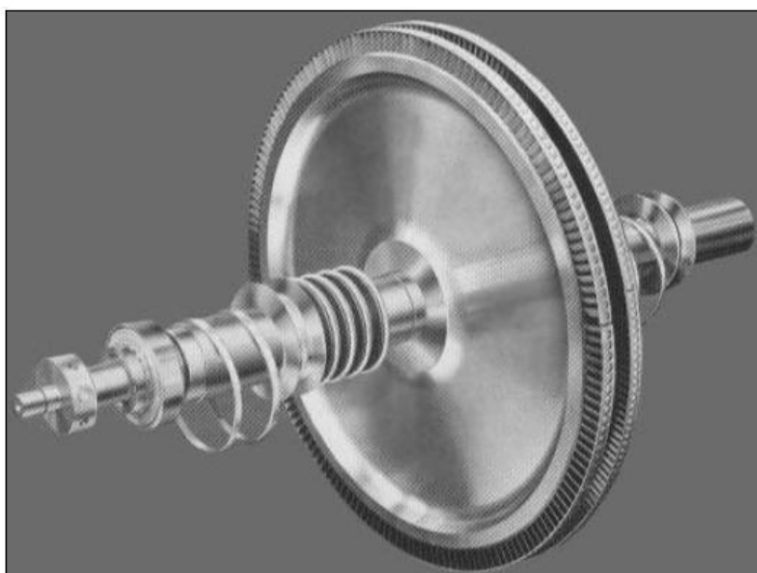
Η μέγιστη επιτρεπόμενη υγρασία στους ατμοστρόβιλους περιορίζεται μεταξύ 10% και 15% κατά βάρος. Η ύπαρξη υγρασίας στον ατμό είναι εξαιρετικά διαβρωτική, ιδιαίτερα κατά τις υψηλές ταχύτητες περιστροφής του ατμοστρόβιλου. Για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών διάβρωσης χρησιμοποιούνται για τα πτερύγια ειδικά υλικά και μήκη. [21]

4.5.1 Κατηγορίες ατμοστρόβιλων

Συνηθίζεται οι ατμοστρόβιλοι να χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με ορισμένα χαρακτηριστικά τους, που σχετίζονται με το είδος σχεδίασης, τη διάταξη των επιμέρους τμημάτων τους και την κατάσταση του ατμού στην είσοδο ή στην έξοδό τους. Είναι χρήσιμη η παρουσίαση των κατηγοριών αυτών, μια που από το χαρακτηρισμό μιας μηχανής με αυτόν τον τρόπο δίνεται άμεσα μια εικόνα για τα βασικά χαρακτηριστικά της.

4.5.1.1 Το πλήθος των βαθμίδων : μονοβάθμιες και πολυβάθμιες

Στις μονοβάθμιες, ο ατμός επιταχύνεται διά μέσου ακροφυσίων και οδηγείται στα περιστρεφόμενα πτερύγια για την παραγωγή ισχύος. Από την είσοδο στα ακροφύσια μέχρι την έξοδο του ατμού από τα πτερύγια έχουμε μία μοναδική πτώση πίεσης. Οι μονοβάθμιοι ατμοστρόβιλοι είναι μικροί σχετικά σε μέγεθος και η ισχύς εξόδου τους περιορίζεται σε μερικές χιλιάδες kW. Η μηχανική τους απόδοση κυμαίνεται από 30% έως 60%. Κατά το σχεδιασμό των μονοβάθμιων ατμοστρόβιλων έμφαση δίνεται στην απλότητα, την αξιοπιστία και το χαμηλό αρχικό κόστος.



Εικόνα 21 Ρότορας μονοβάθμιου ατμοστρόβιλου

Ο πολυβάθμιος ατμοστρόβιλος περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες βαθμίδες σε ένα μόνο κέλυφος, και κάθε βαθμίδα παρέχει ένα μέρος της συνολικής πτώσης πίεσης. Στους πολυβάθμιους ατμοστρόβιλους γίνεται συνδυασμός μίας πρώτης βαθμίδας τύπου Curtis ή Rateau (βλ. παρακάτω) ακολουθουμένης από μία ή περισσότερες βαθμίδες τύπου Rateau. Οι πολυβάθμιοι ατμοστρόβιλοι είναι περισσότερο αποδοτικού από τους μονοβάθμιους και η μηχανική τους απόδοση κυμαίνεται από 50% έως 80%. Είναι δε πιο σύνθετοι και ακριβοί και το αρχικό κόστος μπορεί να είναι πολλαπλάσιο μιας μονοβάθμιας μονάδας, ανάλογα με το πλήθος των βαθμίδων.



Εικόνα 22 Πολυβάθμιος ατμοστρόβιλος

4.5.1.2 Ο τύπος των πτερυγώσεων

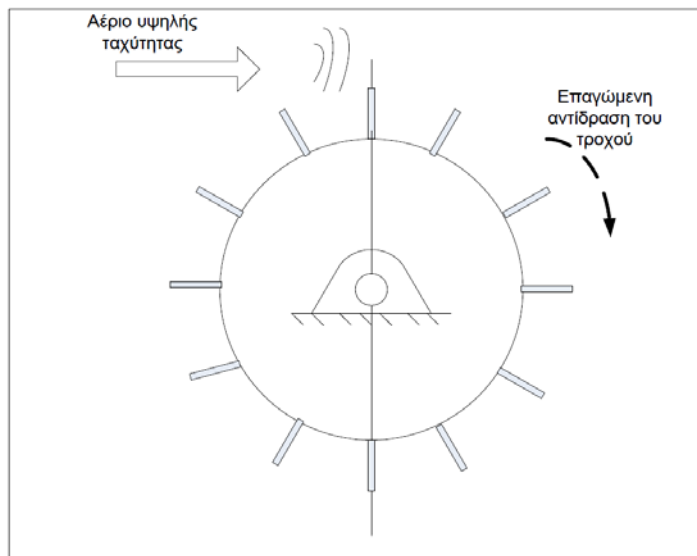
Το σχήμα και η διάταξη των ακροφυσίων (στατικά πτερύγια) και των κινούμενων πτερυγίων είναι το σημαντικότερο στοιχείο κατά το σχεδιασμό του ατμοστρόβιλου. Το σχήμα των πτερυγίων επιδρά στη μορφή της ροής που ακολουθεί ο ατμός και στην ενέργεια που μεταφέρεται από τον ατμό στο ρότορα. Από την άλλη, ένας ικανός αριθμός πτερυγίων απαιτείται για την εξασφάλιση της βέλτιστης ροής, ενώ όσο περισσότερα πτερύγια προστίθενται τόσο αυξάνει η αντίσταση ροής. Συνεπώς, η διάταξη της ροής αντανακλάται στο κατασκευαστικό κόστος και τις απαιτήσεις συντήρησης, οπότε είναι ανάγκη να επέλθει κάποια ισορροπία μεταξύ της λειτουργικής απόδοσης και του κόστους.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες σχεδιασμού πτερυγώσεων : δράσης και αντίδρασης, ενώ στην πράξη συναντώνται συνδυασμοί των δύο.

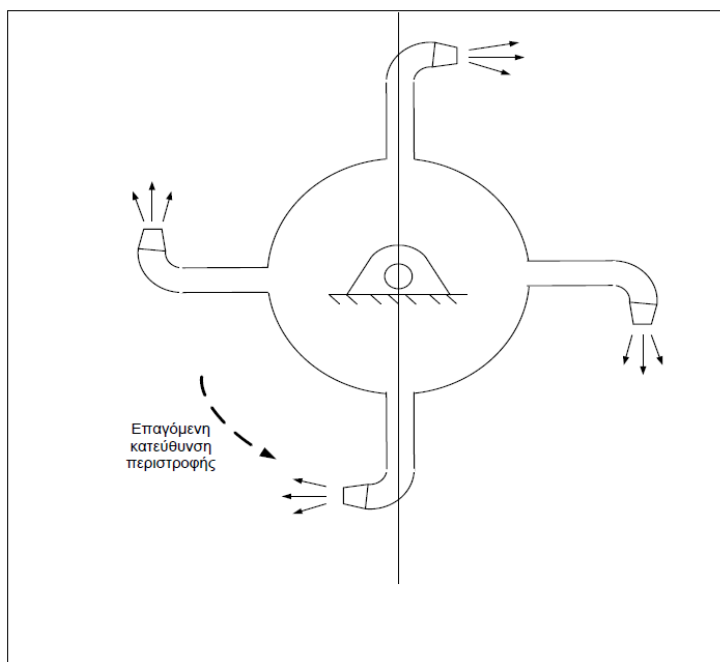
Στους ατμοστρόβιλους δράσης (impulse turbine), η πτώση πίεσης μιας ολόκληρης βαθμίδας πραγματοποιείται στα στάσιμα ακροφύσια, τα οποία κατευθύνουν τον ατμό ώστε να ρέει σε μορφή πιδάκων υψηλής ταχύτητας. Η πτώση πίεσης επιταχύνει τον ατμό, η ταχύτητα του οποίου σχετίζεται με την τετραγωνική ρίζα της διαφοράς ενθαλπίας. Οι πίδακες προσκρούουν στα κινούμενα πτερύγια και η κινητική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε μηχανική περιστρέφοντας τον άξονα του ατμοστρόβιλου. Δεν πραγματοποιείται πτώση πίεσης στον ατμό καθώς αυτός διέρχεται από τα κινούμενα πτερύγια. Συνεπώς, στους ατμοστρόβιλους δράσης η μετατροπή της ενθαλπίας του ατμού, μέσω της πτώσης πίεσης, σε κινητική ενέργεια λαμβάνει χώρα στα στατικά πτερύγια. (Εικόνα [23]).

Στους ατμοστρόβιλους αντίδρασης (reaction turbine), αξιοποιείται η δύναμη αντίδρασης, η οποία δημιουργείται καθώς ο ατμός επιταχύνεται διά μέσου των

ακροφυσίων. Τα ακροφύσια σχηματίζονται από τα πτερύγια. Κάθε βαθμίδα συντίθεται από μία γραμμή στατικών και μία γραμμή κινούμενων βαθμίδων. Ο ατμός εκτονώνεται και στις δύο γραμμές. Μέσω των στατικών πτερυγίων αυξάνεται η ταχύτητα του ατμού, ο οποίος κατευθύνεται προς τα κινούμενα πτερύγια. Τα πτερύγια των αμμοστροβίλων αντίδρασης σχεδιάζονται έτσι ώστε η επιφάνεια μεταξύ δύο γειτονικών πτερυγίων της ίδιας γραμμής να σχηματίζουν ένα συγκλίνον ακροφύσιο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πτώση πίεσης, και κατά συνέπεια, αύξηση της σχετικής ταχύτητας διά μέσου κάθε γραμμής. Η πτήση πίεσης στα κινούμενα πτερύγια παράγει δύναμη αντίδρασης, η οποία συνεισφέρει επιπλέον στην ορμή του ατμού (Εικόνα [24]).



Εικόνα 23 Αρχή λειτουργίας στροβίλου δράσης



Εικόνα 24 Αρχή λειτουργίας στροβίλου αντίδρασης

4.5.1.3 Πίεση τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής

Ανάλογα με την πίεση ατμού τροφοδοσίας διακρίνουμε τους ατμοστροβίλους σε:

- Χαμηλής πίεσης ατμοστροβίλους, όταν η πίεση τροφοδοσίας είναι μέχρι 20bar.
- Μέσης πίεσης, για πίεση τροφοδοσίας μέχρι 40bar.
- Υψηλής πίεσης, για πίεση τροφοδοσίας μέχρι 170bar.
- Υπερυψηλής πίεσης, για πίεση τροφοδοσίας πάνω από 170bar.
- Υπερκρίσιμης πίεσης, για πιέσεις πάνω από 225bar.

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής διακρίνουμε τους ατμοστροβίλους σε :

- Σταθερής ταχύτητας, για μηχανές που λειτουργούν για παραγωγή ηλεκτρισμού και περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα περιστροφής.
- Κανονικής ταχύτητας, για ταχύτητα 3000rpm
- Χαμηλής ταχύτητας για ταχύτητα μικρότερη των 3000rpm(π.χ. 1500rpm για κίνηση τετραπολικής γεννήτριας)
- Υψηλής ταχύτητας, για ταχύτητα μεγαλύτερη των 3000rpm (για να κινηθεί γεννήτρια χρησιμοποιείται μειωτήρας)
- Μεταβλητής ταχύτητας, που χρησιμοποιούνται σαν κινητήριες μηχανές αντλιών, ανεμιστήρων, συμπιεστών, για πρόωση πλοίων κ.τ.λ.

4.5.1.4 Απώλειες ατμοστροβίλων

Με τον όρο απώλειες, εννοούμε όλους τους μηχανισμούς που οδηγούν στην παραγωγή ισχύος στην άτρακτο του στροβίλου, μικρότερης από αυτήν που θα παραγόταν αν είχαμε ιδανική αποτόνωση της συνολικής ποσότητας του ατμού τροφοδοσίας στις συνθήκες εξόδου του στροβίλου. Οι διάφορων ειδών απώλειες είναι αυτές που τελικά διαμορφώνουν στο βαθμό απόδοσης μιας μηχανής.

Ο ατμοστροβίλος αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό βαθμίδων. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης διαμορφώνεται από τα φαινόμενα που συμβαίνουν στις επιμέρους βαθμίδες, και συνεπώς του βαθμού απόδοσής τους, αλλά και από τα φαινόμενα που αφορούν τη συνολική διάταξη.

Οι απώλειες λοιπόν που εμφανίζονται κατά την αποτόνωση του ατμού μέσω ενός στροβίλου, μπορούν να χωριστούν σε εσωτερικές και εξωτερικές απώλειες με τις εξής υποκατηγορίες:

- **Απώλειες ροής στις πτερυγώσεις (εσωτερικές):** Οι απώλειες αυτές μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους υποκατηγορίες, δηλαδή απώλειες πτερυγώσεων, απώλειες τρισδιάστατων συνεκτικών φαινομένων (δευτερεύουσες ροές).
- **Απώλειες τριβών και ανεμισμού (εσωτερικές):** Οι απώλειες αυτές δεν δημιουργούνται μέσα στην κύρια διαδρομή του ατμού, μέσω της οποίας

πραγματοποιείται η αποτόνωση και η παραγωγή μηχανικού έργου. Δημιουργούνται από την τριβή των περιστρεφόμενων τμημάτων με το ρευστό που τα περιβάλλει, σε περιοχές που δεν αποτελούν τμήμα της κύριας διαδρομής του ατμού. Ένα τυπικό παράδειγμα θέσης στην οποία δημιουργούνται τέτοιες απώλειες είναι ο χώρος μεταξύ στρεφόμενων δίσκων, που φέρουν τα κινητά πτερύγια, και ακίνητων διαφραγμάτων που περιβάλλονται μεταξύ τους.

- **Απώλειες διαφυγών (εσωτερικές):** Με τον όρο αυτόν χαρακτηρίζονται όλες οι απώλειες που οφείλονται στο πέρασμα ποσοτήτων ατμού μέσα από διάκενα που σχηματίζονται μεταξύ κινητών και ακίνητων τμημάτων.
- **Μηχανικές απώλειες (εξωτερικές):** Αυτές περιλαμβάνουν την ισχύ που καταναλίσκεται από τριβές στα έδρανα καθώς και την ισχύ που απαιτείται για την κίνηση μηχανικών παρελκόμενων, όπως π.χ. η αντλία λίπανσης. Οι απώλειες αυτές χαρακτηρίζονται και σαν «απώλειες λειτουργίας εν κενώ», γιατί η ισχύς που καταναλώνουν είναι ανεξάρτητη του φορτίου του ατμοστροβίλου και σχετίζεται μόνο με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής.
- **Απώλειες ψύξεως και Ακτινοβολίας (εξωτερικές) :** Αυτές οι απώλειες οφείλονται στο ότι τα τοιχώματα των μηχανών δεν είναι αδιαβατικά αλλά έχουν κάποια θερμοπερατότητα και έτσι αποβάλλουν θερμότητα στο περιβάλλον είτε με συναγωγή είτε με ακτινοβολία.

4.5.2. Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου

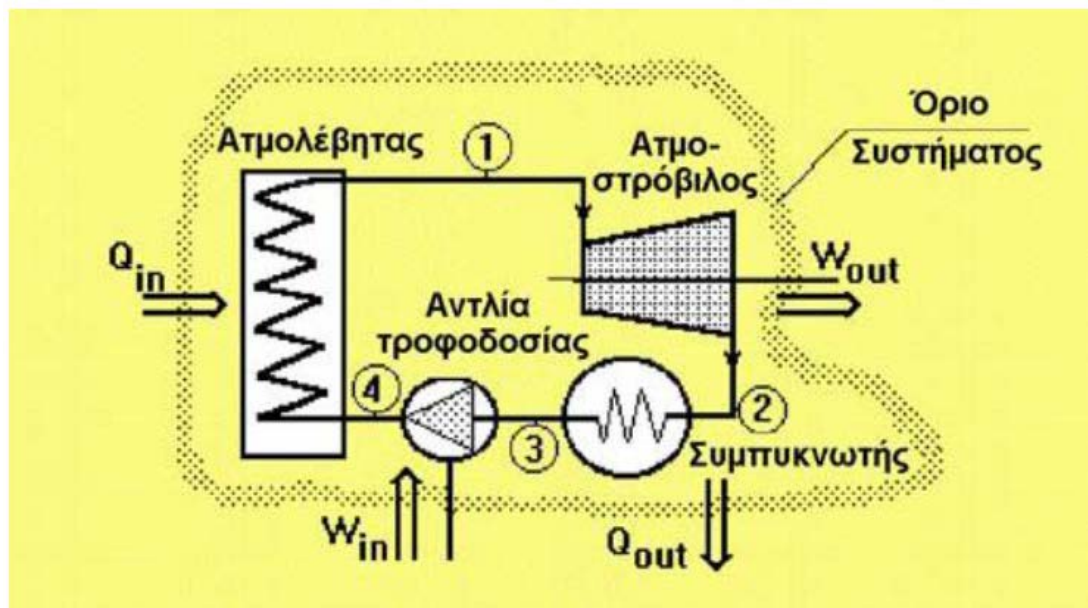
Ο θερμοδυναμικός κύκλος του ατμοστροβίλου είναι ο κύκλος Rankine, παρόλο που εφαρμόζονται και κάποιοι άλλοι, όπως οι κύκλοι αναθέρμανσης και αναγέννησης, και ο συνδυασμένος κύκλος. Ο κύκλος Rankine είναι ο βασικός κύκλος των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και συνίσταται κατ' αρχήν από μια πηγή θερμότητας (λέβητας) που μετατρέπει το νερό σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο και παράγει μηχανική ισχύ, και μπορεί να είναι υγρός, ξηρός κορεσμένος ή υπέρθερμος. Όταν εξέρχεται από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του παραπάνω κύκλου, η ωφέλιμη ισχύς του στροβίλου σε κατάσταση σταθερής ροής είναι:

$$P = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας του ατμού μέσα από τον στρόβιλο, ενώ h_1 και h_2 είναι η ειδική ενθαλπία του ατμού στην είσοδο και την έξοδο του στροβίλου αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα των ατμοστροβίλων συχνά περιγράφεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης της διαδικασίας εκτόνωσης. Η παρουσία σταγονιδίων στον ατμό μειώνει την απόδοση του στροβίλου και προκαλεί τη φυσική διάβρωση των πτερυγίων. Για

το λόγο αυτό, ο λόγος ξηρότητας του ατμού στην έξοδο του στροβίλου δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 0,9.



Εικόνα 25 Τα στάδια ενός ολοκληρωμένου συστήματος ατμοστροβίλου

4.6. Γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το έργο που παράγεται από τον ατμοστρόβιλο χρησιμοποιείται για την περιστροφή γεννήτριας ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του στροβίλου σε ηλεκτρική. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μηχανών εναλλασσόμενου: οι σύγχρονες(ή αλλιώς εναλλακτήρες) και οι ασύγχρονες (ή αλλιώς επαγωγικές) .

Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Οι γεννήτρια αυτή ονομάζεται σύγχρονη, γιατί οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους .

Από την άλλη, για να λειτουργήσει μια ασύγχρονη γεννήτρια , δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης. Η τάση στο δρομέα, που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα, ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματά του αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Αν και μια ασύγχρονη (επαγωγική) μηχανή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως γεννήτρια όσο

και ως κινητήρας, τα μειονεκτήματα στην περίπτωση που λειτουργεί ως γεννήτρια είναι πάρα πολλά και έτσι σπάνια χρησιμοποιείται με αυτόν τον τρόπο.

4.7 Συμπυκνωτές-Πύργοι ψύξης

4.7.1. Συμπυκνωτές

Ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Ο εκτονωθείς ατμός, προερχόμενος από την τελευταία βαθμίδα του ατμοστρόβιλου, συμπυκνώνεται στην υγρή φάση του νερού και επαναχρησιμοποιείται ως νερό τροφοδοσίας στον ατμοπαραγωγό για να ακολουθήσει νέος θερμοδυναμικός κύκλος.

Κατά τη συμπύκνωση του ατμού δημιουργείται κενό, το οποίο μειώνει την αντίθλιψη του ατμοστρόβιλου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοσή του. Το ψυκτικό νερό απορροφά την περιεχόμενη στον ατμό θερμότητα, ενώ κατά τη συμπύκνωση ο όγκος του ατμού μειώνεται σημαντικά. Στο νερό της συμπύκνωσης καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό τμήμα του όγκου και έτσι δημιουργείται το κενό. Η συνεχιζόμενη συμπύκνωση του ατμού εκτόνωσης μειώνει την πίεση σε επίπεδα κάτω της ατμοσφαιρικής.

Οι συμπυκνωτές χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού για να απορρίψουν τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη συμπύκνωση του ατμού. Για το λόγο αυτό, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας πρέπει είτε να τοποθετούνται σε περιοχές με σημαντική επάρκεια σε υδάτινα αποθέματα, είτε να χρησιμοποιούν πύργους ψύξης ή αερόψυκτους συμπυκνωτές.

Η θερμοκρασία του νερού ψύξης επηρεάζει σημαντικά την πίεση αντίθλιψης του ατμοστρόβιλου. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία αυτή τόσο υψηλότερη είναι η αντίθλιψη και συνεπώς μικρότερος ο θερμικός βαθμός απόδοσης με αντίστοιχη μείωση στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Για παράδειγμα, νερό ψύξης θερμοκρασίας 13 °C, αντιστοιχεί σε αντίθλιψη 1.5'' Hg ενώ θερμοκρασία 13 °C αντιστοιχεί σε 3.5'' Hg.

Διακρίνουμε δύο βασικούς κατασκευαστικούς τύπους συμπυκνωτών : άμεσης επαφής ή ανοιχτού τύπου – (direct contact) και κλειστού τύπου – (surface condenser).

- **Άμεσης επαφής ή ανοιχτού τύπου:** Σε ανοιχτού τύπου συμπυκνωτές ο ατμός εκτόνωσης και το νερό ψύξης άρχονται σε άμεση επαφή. Η θερμοκρασίες του νερού ψύξης και του συμπυκνώματος είναι ίδιες μετά την έξοδο από το συμπυκνωτή.

Ένας συμπυκνωτής ανοικτού τύπου αποτελείται από ακροφύσια ψεκασμού, την είσοδο του ατμού, θαλάμους ανάμιξης ομορροής ή αντιρροής, και θερμές

δεξαμενές. Χρησιμοποιούνται όταν έχουμε ξηρούς πύργους ψύξης σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις.

- **Κλειστού τύπου:** Ο κλειστού τύπου συμπυκνωτής μοιάζει με έναν εναλλάκτη θερμότητας και αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο στο οποίο έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα πολλοί αυλοί μικρής διαμέτρου. Στο νερό ψύξης ρέει μέσα στους αυλούς, ενώ ο ατμός εκτόνωσης κυκλοφορεί έξω από αυτούς στον υπόλοιπο χώρο του δοχείου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το νερό τροφοδοσίας είναι εντελώς χωριστό από το νερό τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού και μπορεί να κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα ή να προέρχεται από φυσική δεξαμενή, όπως λίμνες, ποτάμια, θάλασσες. Επίσης, το νερό ψύξης μπορεί να εκτελεί μία ή περισσότερες διαδρομές εντός του συμπυκνωτή μέχρι να απορριφθεί στο περιβάλλον. Το συμπύκνωμα συλλέγεται στο κάτω μέρος του συμπυκνωτή, το θερμό πηγάδι ή hot well, και στη συνέχεια μέσω αντλίας τροφοδοτείται στους προθερμαντήρες του νερού τροφοδοσίας.

4.7.2. Πύργοι Ψύξης

Οι πύργοι ψύξης των εγκαταστάσεων ισχύος χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο μεταφοράς θερμότητας από το νερό στον αέρα και την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την κίνηση του αέρα μέσα στον πύργο. Ένας πύργος ψύξης που ανταλλάσσει θερμότητα με άμεση επαφή του αέρα με το νερό ονομάζεται υγρός πύργος. Ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η εξάτμιση. Σε ένα ξηρό πύργο, το νερό και ο αέρας χωρίζονται με μια αγωγίμη επιφάνεια μέσα στον πύργο και η θερμότητα απομακρύνεται με αγωγή. Ένας ξηρός πύργος είναι ουσιαστικά ένας εναλλάκτης θερμότητας υγρού-αέρα. Αν και οι δυο μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε ένα πύργο τότε ονομάζεται υγρός/ξηρός πύργος.

Η κυκλοφορία του αέρα μέσα στον πύργο προκαλείται, τουλάχιστον μερικά, από τη θερμότητα που μεταφέρεται στον αέρα από το νερό. Έτσι ο αέρας μέσα στον πύργο είναι πιο ελαφρύς από τον ψυχρότερο αέρα και άρα σχετικά βαρύτερο αέρα του περιβάλλοντος. Η διαφορά αυτή στην πυκνότητα προκαλεί την κυκλοφορία του αέρα μέσα στον πύργο. Πύργοι που βασίζονται αποκλειστικά στο φαινόμενο αυτό της ανόδου ονομάζονται πύργοι φυσικής κυκλοφορίας (ελκυσμού). Όταν για την ενίσχυση της ροής του αέρα μέσα στον πύργο χρησιμοποιούνται μεγάλοι ανεμιστήρες, τότε ο πύργος ονομάζεται πύργος μηχανικού ελκυσμού. Ο πύργος μηχανικού ελκυσμού μπορεί να είναι ελκυσμού ή κατάθλιψης ανάλογα με τη θέση του ανεμιστήρα.

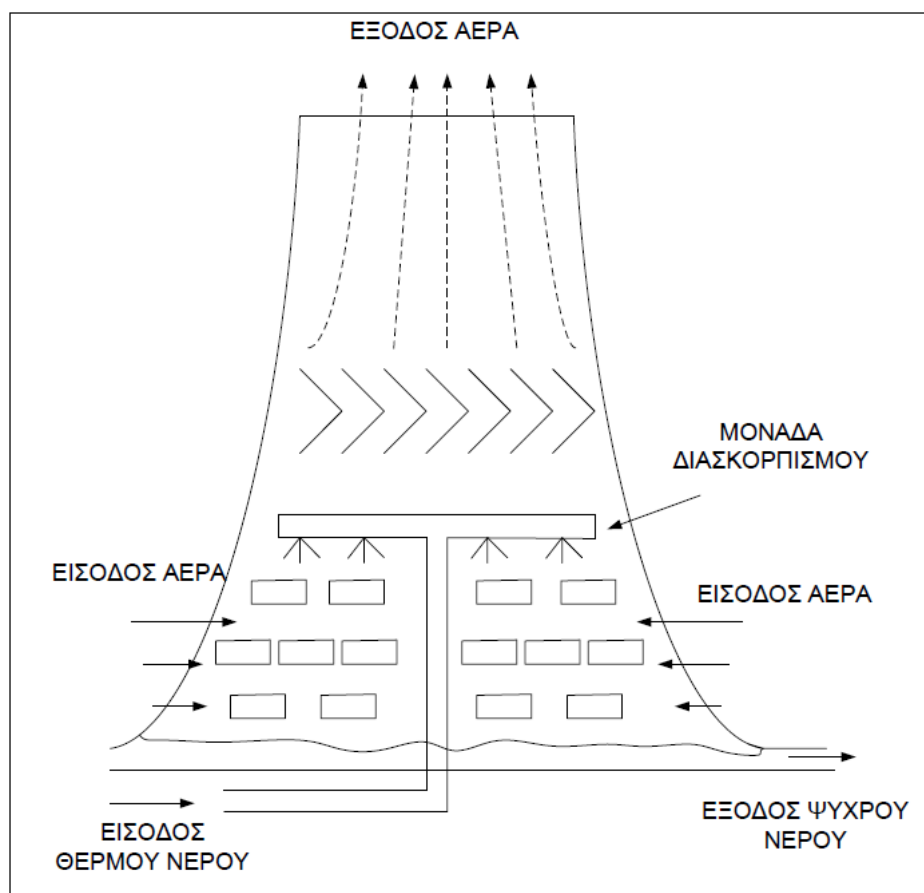
Αν και οι πύργοι φυσικού ελκυσμού είναι πιο δαπανηροί από τους πύργους μηχανικού ελκυσμού, χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή ισχύος. Οι πύργοι

φυσικού ελκυσμού είναι υπερβολοειδούς μορφής(για μεγαλύτερη αντοχή και όχι για θερμοδυναμικούς λόγους) και πολύ μεγάλου μεγέθους (15800 lt/s και συχνά 150m ύψος), Σχήμα 35.

Οι περισσότεροι από τους πύργους ψύξης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι υγρού τύπου και 25% περίπου από αυτούς είναι φυσικού ελκυσμού. Όλοι οι φυσικού ελκυσμού πύργοι είναι υγρού τύπου.

Αν και το κύκλο ψύξης του συμπυκνωτή είναι κλειστό (Σχήμα 21), υπάρχουν απώλειες στο νερό που κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα. Ένα μέρος του νερού χάνεται λόγω εξάτμισης, μέρος επειδή παρασύρεται από τον αέρα και μέρος λόγω της απομάστευσης που γίνεται πριν τον πύργο προκειμένου να απομακρυνθούν τα στερεά που σχηματίζονται. Η απώλεια λόγω εξάτμισης είναι περίπου 1% για κάθε 5οC ψύξης. Ο αέρας επίσης που βγαίνει από τον πύργο παρασύρει μικρές σταγόνες νερού και η απώλεια από αυτό μπορεί να φτάσει το 0.2% του νερού που κυκλοφορεί στο σύστημα.

Σε μια τυπική εγκατάσταση 700 MW, μέσα στον πύργο κυκλοφορούν 1300x103 m3 νερού ημερησίως. Οι ανάγκες για συμπλήρωμα σε νερό σε μια τέτοια εγκατάσταση φτάνουν τα 25x103 m³ την ημέρα.



Εικόνα 26 Πύργος Ψύξης

Οι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται πύργοι ψύξης και όχι εναλλάκτες θερμότητας είναι δύο:

- 1) Η ατμοποίηση είναι πολύ πιο αποδοτικός τρόπος μεταφοράς ενέργειας από αυτόν που έχουμε στους εναλλάκτες (συναγωγή), οπότε ο όγκος του πύργου είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που θα απαιτείτο για εναλλάκτη.
- 2) Ο μηχανισμός εξάτμισης επιτρέπει την ψύξη του νερού σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου t_1 του αέρα στην είσοδο του πύργου. Θεωρητικά η θερμοκρασία του νερού θα μπορούσε να πέσει μέχρι τη θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου του αέρα στην είσοδο. Στην πράξη λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του νερού και του αέρα, έχουμε μεταφορά ενέργειας και τη μορφή θερμότητας. Έτσι αν η θερμοκρασία των σταγονιδίων του νερού πέσει σημαντικά κάτω από αυτήν του αέρα (θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου του αέρα), θα έχουμε αξιόλογη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα προς το νερό. Έτσι στην πράξη οι πύργοι ψύξης σχεδιάζονται με θερμοκρασία εξόδου του νερού περίπου 80°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου της ατμόσφαιρας. Αντίθετα, με εναλλάκτη θερμότητας η θερμοκρασία εξόδου του νερού οφείλει να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου της ατμόσφαιρας, προκειμένου να έχουμε μεταφορά θερμότητας από το νερό προς τον αέρα.

Το θερμό νερό που προέρχεται από το συμπυκνωτή (Σχήμα 21), διασκορπίζεται στον πύργο ψύξης και πέφτει με τη μορφή σταγονιδίων,. Ψυχρός αέρας της ατμόσφαιρας εισάγεται από τη βάση του πύργου και καθώς ανέρχεται στον πύργο, περιβάλλει τα σταγονίδια του θερμού νερού. Ο ψυχρός αέρας της ατμόσφαιρας είναι μη κορεσμένος, έχει δηλαδή σχετική υγρασία $\phi_1 < 1$. Καθώς λοιπόν περιβάλλει τα σταγονίδια του θερμού νερού, επέρχεται μερική ατμοποίηση του νερού, με αποτέλεσμα την ψύξη του νερού και την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα. Ο αέρας εξέρχεται από τον πύργο ψύξης θερμότερος από ότι ήταν στην είσοδο και σχεδόν κορεσμένος, δηλαδή με σχετική υγρασία $\phi_2 \approx 1$. Η όλη διεργασία γίνεται πρακτικά υπό σταθερή πίεση, ίση με την ατμοσφαιρική. Αφού ένα μέρος του θερμού νερού ατμοποιείται και παρασύρεται από τον αέρα, είναι προφανές ότι η παροχή μάζας του ψυχρού νερού στην έξοδο του πύργου είναι μικρότερη από την παροχή μάζας στην είσοδο του πύργου. Πριν λοιπόν οδηγηθεί το ψυχρό νερό στον συμπυκνωτή θα πρέπει να προσθέσουμε νερό.

Μια σημαντική παράμετρος στη λειτουργία των πύργων ψύξης είναι το εύρος ψύξης. Το εύρος ψύξης ΔT_{CR} ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 του θερμού νερού που μπαίνει στον πύργο και T_2 του ψυχρού νερού που βγαίνει από τον πύργο.

$$\Delta T_{CR} = T_1 - T_2$$

Μια άλλη παράμετρος είναι η απόδοση ψύξης που ορίζεται σαν ο λόγος της πραγματικής προς τη μέγιστη δυνατή ψύξη. Η σχέση υπολογισμού είναι:

$$n_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{WB}}$$

Όπου T_{WB} η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου της ατμόσφαιρας.

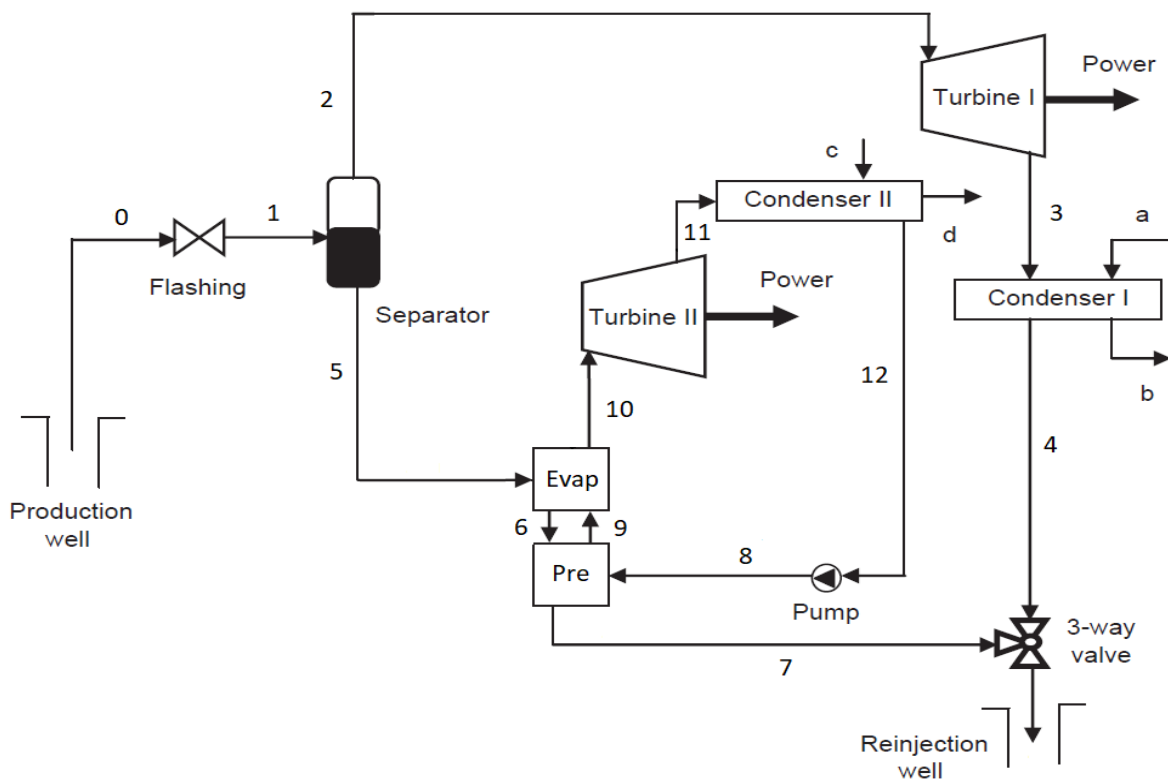
Ο υπολογισμός διαφόρων μεγεθών (π.χ. πρόσθετη παροχή νερού, παροχή αέρα) γίνεται με χρήση των ενεργειακών ισοζυγίων και ισοζυγίων μάζας.

Κεφάλαιο 5. Υπολογιστικό Μοντέλο

Στο αυτό το κεφάλαιο της εργασίας θα πραγματοποιηθεί μία εκτενής μελέτη γύρο από τη λειτουργία και τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος, δύο μονάδων, μιας μονάδας υγρού ατμού απλού τύπου 'back pressure' και μιας μονάδας δυαδικού τύπου. Αναλυτικότερα θα μελετηθεί η επίδραση της υψηλής πίεσης του κύκλου καθώς και του Pinch Point στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, στην αξιοποίηση του γεωθερμικού πεδίου, στον ηλεκτρικό όσο και στον θερμικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης, κτλ.

Παράλληλα θα ασχοληθούμε με έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που αφορούν τις μονάδες δυαδικού τύπου, και αυτός είναι η επιλογή του εργαζομένου μέσου. Θα συγκρίνουμε τέσσερα από τα πιο δεδομένα οργανικά μέσα, τα Isobutane, R134a, R152a και R245fa. Σκοπός αυτής της σύγκρισης είναι η αντιστοίχιση εργαζόμενου μέσου και γεωθερμικής πηγής έτσι ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και εκμετάλλευσης του γεωθερμικού πεδίου.

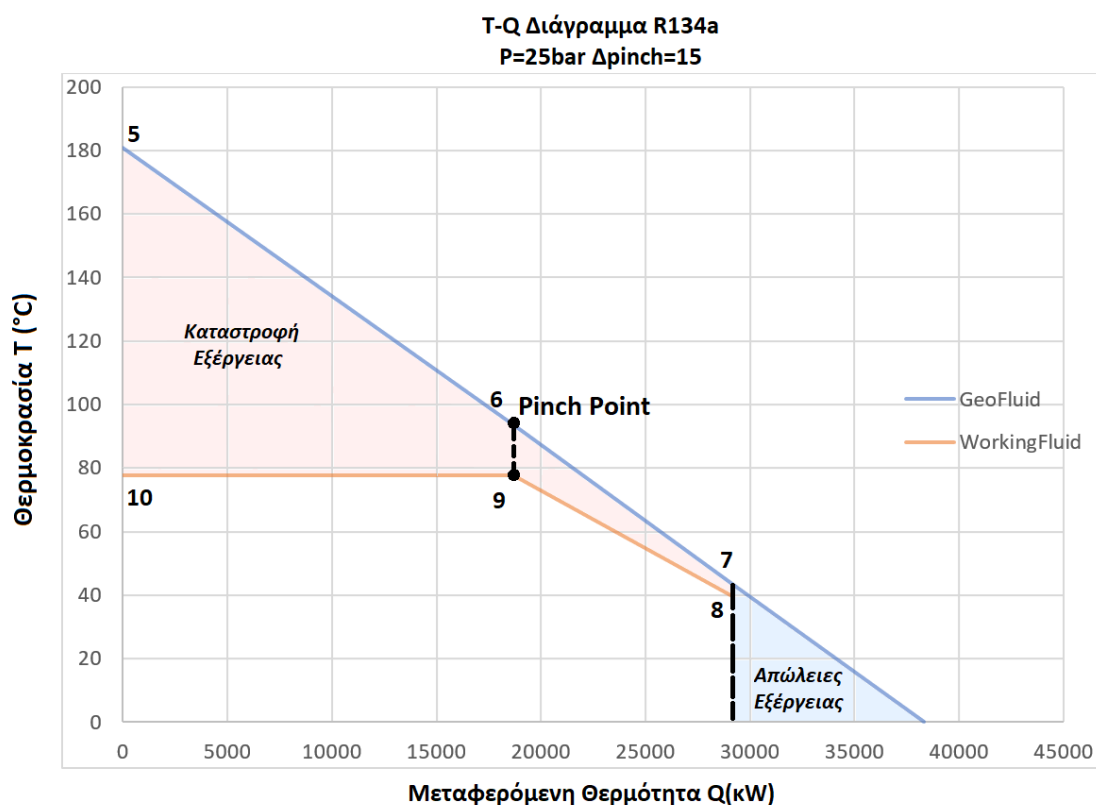
Το υπολογιστικό περιβάλλον που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς των παραπάνω μεγεθών είναι η Matlab, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Coolprop μια βιβλιοθήκη της C++ που περιλαμβάνει θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των εν λόγω ρευστών. Στην συνέχεια τα στοιχεία που έχουν υπολογιστεί μέσω της Matlab θα αναλυθούν



Εικόνα 27 Σχηματική απεικόνιση του υβριδικού υπολογιστικού μοντέλου

5.1 Pinch Point

Προκειμένου να εξετάσουμε καλύτερα το σύστημα των εναλλακτών θερμότητας χρησιμοποιούμε τα διαγράμματα θερμοκρασίας – μεταφερόμενης θερμότητας, ή αλλιώς τα διαγράμματα T-Q. Σε αυτά τα διαγράμματα η τετμημένη αναπαριστά τη θερμότητα σε kW η οποία μεταφέρεται από τη γεωθερμική άλμη στο εργαζόμενο μέσο, μέσω των εναλλακτών θερμότητας. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα [].



Εικόνα 28 Διάγραμμα T-Q για πίεση 25bar Δpinch 15 οργανικού μέσου R134a

Ο προθερμαντής προσδίδει την απαιτούμενη θερμότητα προκειμένου το εργαζόμενο μέσο να φτάσει στο σημείο βρασμού του. Στην κατάσταση 9 έχουμε το σημείο όπου μέσα στον εναλλάκτη η γεωθερμική άλμη και το εργαζόμενο μέσο βιώνουν την μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά τους και καλείται pinch point. Ουσιαστικά αποτελεί τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στη γεωθερμική άλμη και το εργαζόμενο μέσο στην έξοδο του προθερμαντή. Στην παρούσα μελέτη θα μεταβάλουμε το pinch point ώστε να δούμε πως επιδρά στην παροχή του οργανικού μέσου, στην θερμοκρασία επανεισόδου της γεωθερμικής άλμης και κατ' επέκτασίν των διάφορων βαθμών απόδοσης. Η ατμοποίηση συμβαίνει στο διάστημα 9-10, όπου έχουμε μία ισόθερμη μεταβολή, έτσι ώστε το εργαζόμενο μέσο να μετατραπεί από κορεσμένο υγρό σε κορεσμένο ατμό.

5.2 Επιλογή εργαζόμενου μέσου

Το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιείται στους δυαδικούς κύκλους πρέπει να εξατμίζεται σε ατμοσφαιρική πίεση και να έχει χαμηλό σημείο βρασμού. Αυτά τα δύο αποτελούν σημαντικά κριτήρια που ένα εργαζόμενο μέσο πρέπει να ικανοποιεί. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή ενός εργαζόμενου μέσου είναι : α) δεν πρέπει να είναι διαβρωτικό, β) εύφλεκτο και γ) δεν θα πρέπει να αντιδρά ή να διασπάται στις πιέσεις και στις θερμοκρασίες στις οποίες χρησιμοποιείται.

Πολλά οργανικά ενδέχεται να μην πληρούν τις παραπάνω ιδιότητες καθώς πολλά από αυτά είναι εύφλεκτα και δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Τα οργανικά μέσα που χρησιμοποιούνται σε μικρές δυαδικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που στεγάζονται σε οικήματα δεν είναι υποχρεωτικό να πληρούν όλες τις προϋποθέσεις. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης οργανικών μέσων είναι ότι καθώς αυτό εισέρχεται μέσα στο στρόβιλο παρατηρούνται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες εξαιτίας της εκτόνωσης του οργανικού μέσου, με αποτέλεσμα ο θάλαμος του στρόβιλου να μην χρειάζεται πολύ συχνό καθάρισμα.

Όλα τα οργανικά μέσα εμπίπτουν στο πεδίο GHGs (Green House Gases, αέρια του θερμοκηπίου) και μελλοντικά θα τραβήξουν το ενδιαφέρον των περιβαλλοντολόγων. Πιο κάτω παρατίθενται πίνακες με τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το περιβάλλον και με θέματα υγείας (πίνακας []) καθώς και με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (πίνακας []) ορισμένων υποψήφιων εργαζόμενων μέσων.

| Εργαζόμενο Μέσο | Χημικός Τύπος | Τοξικότητα | Αναφλεξιμότητα | ODP ⁽¹⁾ | GWP ⁽²⁾ |
|-----------------|---|---------------------|----------------|--------------------|--------------------|
| R-12 | CCl ₂ F ₂ | μη τοξικό | μη εύφλεκτο | 1.0 | 4,500 |
| R-114 | C ₂ Cl ₂ F ₄ | μη τοξικό | μη εύφλεκτο | 0.7 | 5,850 |
| Προπάνιο | C ₃ H ₈ | χαμηλής τοξικότητας | πολύ υψηλή | 0 | 3 |
| i-Βουτάνιο | i-C ₄ H ₁₀ | χαμηλής τοξικότητας | πολύ υψηλή | 0 | 3 |
| n-Βουτάνιο | C ₄ H ₁₀ | χαμηλής τοξικότητας | πολύ υψηλή | 0 | 3 |
| i-Πεντάνιο | i-C ₅ H ₁₂ | χαμηλής τοξικότητας | πολύ υψηλή | 0 | 3 |
| n-Πεντάνιο | C ₅ H ₁₂ | χαμηλής τοξικότητας | πολύ υψηλή | 0 | 3 |
| Αμμωνία | NH ₃ | τοξικό | χαμηλή | 0 | 0 |
| Νερό | H ₂ O | μη τοξικό | μη εύφλεκτο | 0 | - |

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το περιβάλλον και την υγιεινή.

| Εργαζόμενο Μέσο | Χημικός Τύπος | T _c (°C) | T _c (°F) | P _c (Mpa) | P _c (lbf/in ²) | P _s @ 300K (MPa) | P _s @ 400K (MPa) |
|-----------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Προπάνιο | C ₃ H ₈ | 96.95 | 206.5 | 4.236 | 614.4 | 0.9935 | - |
| i-Βουτάνιο | i-C ₄ H ₁₀ | 135.92 | 276.7 | 3.685 | 534.4 | 0.3727 | 3.204 |
| n-Βουτάνιο | C ₄ H ₁₀ | 150.8 | 303.4 | 3.718 | 539.2 | 0.2556 | 2.488 |
| i-Πεντάνιο | i-C ₅ H ₁₂ | 187.8 | 370.1 | 3.409 | 494.4 | 0.09759 | 1.238 |
| n-Πεντάνιο | C ₅ H ₁₂ | 193.9 | 380.9 | 3.240 | 469.9 | 0.07376 | 1.036 |
| Αμμωνία | NH ₃ | 133.65 | 272.5 | 11.62 | 1686.3 | 1.061 | 10.3 |
| Νερό | H ₂ O | 374.14 | 705.4 | 22.08 | 3203.6 | 0.00353 | 0.2455 |

Πίνακας 3 Θερμοδυναμικές ιδιότητες υποψήφιων εργαζόμενων μέσων

5.3 Θερμοδυναμική ανάλυση της λειτουργίας των κύκλων

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

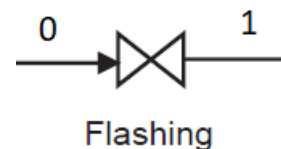
Στραγγαλιστική Βαλβίδα (Flashing): υπό συνθήκες αναπτυσσόμενης ροής και σταθερής κατάστασης οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας της στραγγαλιστικής βαλβίδας υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_0 = \dot{m}_1$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_0 h_0 = \dot{m}_1 h_1$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_0 s_0 + \dot{S}_{gen,fls} = \dot{m}_1 s_1$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_0 ex_0 = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{D,fls}$$



Εικόνα 29 Στραγγαλιστική βαλβίδα

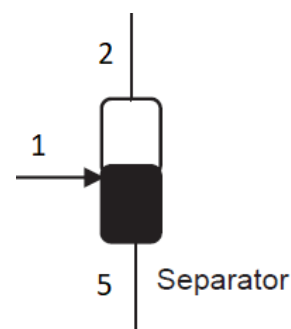
Διαχωριστής (Separator): οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του διαχωριστή υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_5$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{gen,sep} = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_5 s_5$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_1 ex_1 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{D,sep}$$



Εικόνα 30 Διαχωριστής

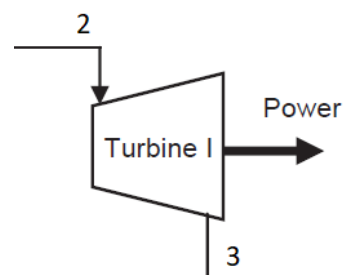
Στρόβιλος I (Turbine I): υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του στροβίλου I υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{W}_{tur_I}$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_{gen,tur_I} = \dot{m}_3 s_3$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_2 ex_2 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{W}_{tur_I} + \dot{E}x_{D,tur_I}$$



Εικόνα 31 Στρόβιλος I

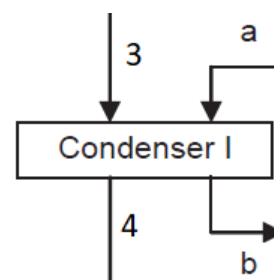
Συμπυκνωτής I (Condenser I): οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του συμπυκνωτή I υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_3 = \dot{m}_4, \dot{m}_a = \dot{m}_b$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_b h_b$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_a s_a + \dot{S}_{gen,con_I} = \dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_b s_b$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_a ex_a = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_b ex_b + \dot{E}x_{D,con_I}$$



Εικόνα 32 Συμπυκνωτής I

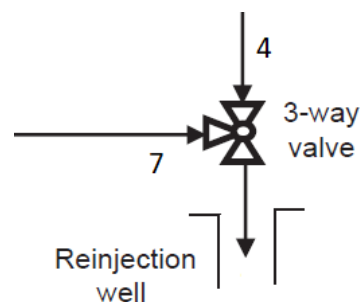
3-Way Βαλβίδα (Valve): οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας της βαλβίδας εκροής υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_7 + \dot{m}_4 = \dot{m}_{reinj}$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{reinj} h_{reinj}$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{gen,v} = \\ = \dot{m}_{reinj} s_{reinj}$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_3 ex_3 = \\ \dot{m}_{reinj} ex_{reinj} + \dot{E}x_{D,v}$$



Εικόνα 33 3-way Βαλβίδα

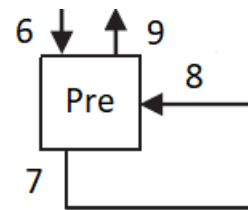
Προθερμαντής (Preheater) : υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του προθερμαντή υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_6 = \dot{m}_7, \dot{m}_8 = \dot{m}_9$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_9 h_9$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{gen,pre} = \dot{m}_7 s_7 + \\ \dot{m}_9 s_9$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_8 ex_8 = \dot{m}_7 ex_7 + \\ \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{D,pre}$$



Εικόνα 34 Προθερμαντήρας

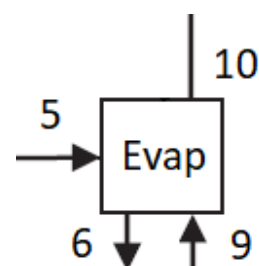
Ατμοποιητής (Evaporator) : υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του ατμοποιητή υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_5 = \dot{m}_6, \dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_9 h_9$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_6 s_6 + \dot{m}_{10} s_{10} + \dot{S}_{gen,eva} = \dot{m}_5 s_5 + \\ \dot{m}_9 s_9$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_{10} ex_{10} = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_9 ex_9 + \\ \dot{E}x_{D,eva}$$



Εικόνα 35 Ατμοποιητής

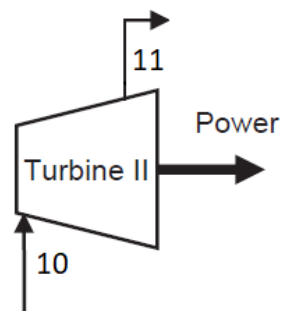
Στρόβιλος II (Turbine II): οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του στροβίλου II υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{W}_{tur_II}$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_{10}s_{10} + \dot{S}_{gen,tur_II} = \dot{m}_{11}s_{11}$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_{10}ex_{10} = \dot{m}_{11}ex_{11} + \dot{W}_{tur_II} + \dot{E}x_{D,tur_II}$$



Εικόνα 36 Στρόβιλος II

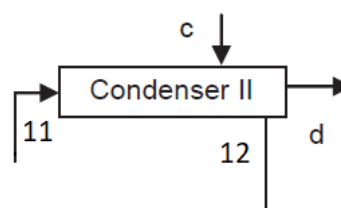
Συμπυκνωτής II (Condenser II): οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας του συμπυκνωτή II υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}, \dot{m}_c = \dot{m}_d$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_c h_c = \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_d h_d$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_{11}s_{11} + \dot{m}_c s_c + \dot{S}_{gen,con_II} = \dot{m}_{12}s_{12} + \dot{m}_d s_d$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_{11}ex_{11} + \dot{m}_c ex_c = \dot{m}_{12}ex_{12} + \dot{m}_d ex_d + \dot{E}x_{D,con_II}$$



Εικόνα 37 Συμπυκνωτής II

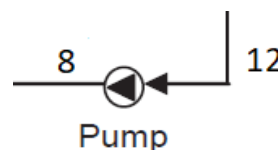
Αντλία (Pump): υπό συνθήκες αναπτυγμένης ροής και σταθερής κατάστασης οι ισολογισμοί της παροχής, ενέργειας, εντροπίας και εξέργειας της αντλίας υπολογίζονται ως

$$\text{Παροχή: } \dot{m}_{12} = \dot{m}_8$$

$$\text{Ενέργεια: } \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{W}_{pump} = \dot{m}_8 h_8$$

$$\text{Εντροπία: } \dot{m}_{12}s_{12} + \dot{S}_{pump} = \dot{m}_8 s_8$$

$$\text{Εξέργεια: } \dot{m}_{12}ex_{12} + \dot{W}_{pump} = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{pump}$$



Εικόνα 38 Αντλία

Για ανάλυση της απόδοσης μιας δυαδικής μονάδας παραγωγής ενέργειας συνήθως χρησιμοποιούνται ο βαθμός απόδοσης του πρώτου και δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου. Ωστόσο ο πρώτος δεν αναδεικνύει την θερμοδυναμική ποιότητα της διαδικασίας της μετατροπής. Ο δεύτερος νόμος όμως είναι καταλληλότερος για την αξιολόγηση της απόδοσης μια δυαδικής μονάδας παραγωγής.

$$n_I = \frac{W_{net}}{m_{geo}(h_{geo} - h_{reinj})}$$

$$n_{II} = \frac{W_{net}}{m_{geo}[(h_{geo} - h_o) - T_o(S_{geo} - S_o)]}$$

όπου με δείκτη «ο» συμβολίζεται το περιβάλλον αναφοράς συνήθως $T_o = 25^\circ\text{C}$.

5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Λαμβάνοντας ως δεδομένα μετρήσεις που λήφθηκαν από μετρήσεις της ΔΕΗ και του ΙΓΜΕ στην περιοχή της Μύλου με υψηλή ενθαλπία, στήθηκε υπολογιστικό μοντέλο στο οποίο εξετάζονται οι βαθμοί απόδοσης, οι θερμοκρασίες εξόδου και η απαιτούμενη παροχή του οργανικού ρευστού.

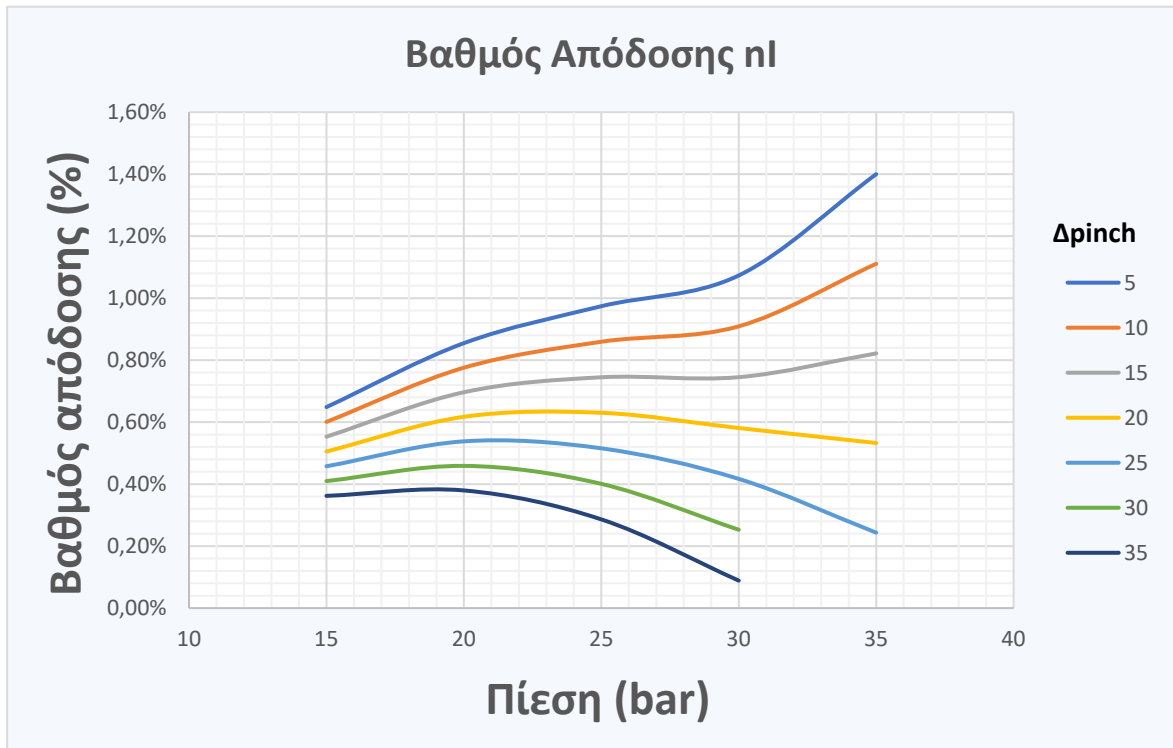
Τα στοιχεία του κύκλου που χρησιμοποιήθηκαν και είναι κοινά για κάθε θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενο μέσο είναι τα εξής:

| | | | |
|--|----------|---|-----------|
| Ροή μάζας γεωθερμικής άλμης (mbrine) | 100 kg/s | Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου I | 0.95 |
| Ροή μάζας ατμού μετά τον διαχωριστή (msteam) | 50 kg/s | Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου II | 0.85 |
| Ροή μάζας νερού μετά τον διαχωριστή (mwater) | 50 kg/s | Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου | 0.99 |
| Χαμηλή πίεση κύκλου (P _{low}) | 8bar | Σύστημα ψύξης | Υδρόψυκτο |

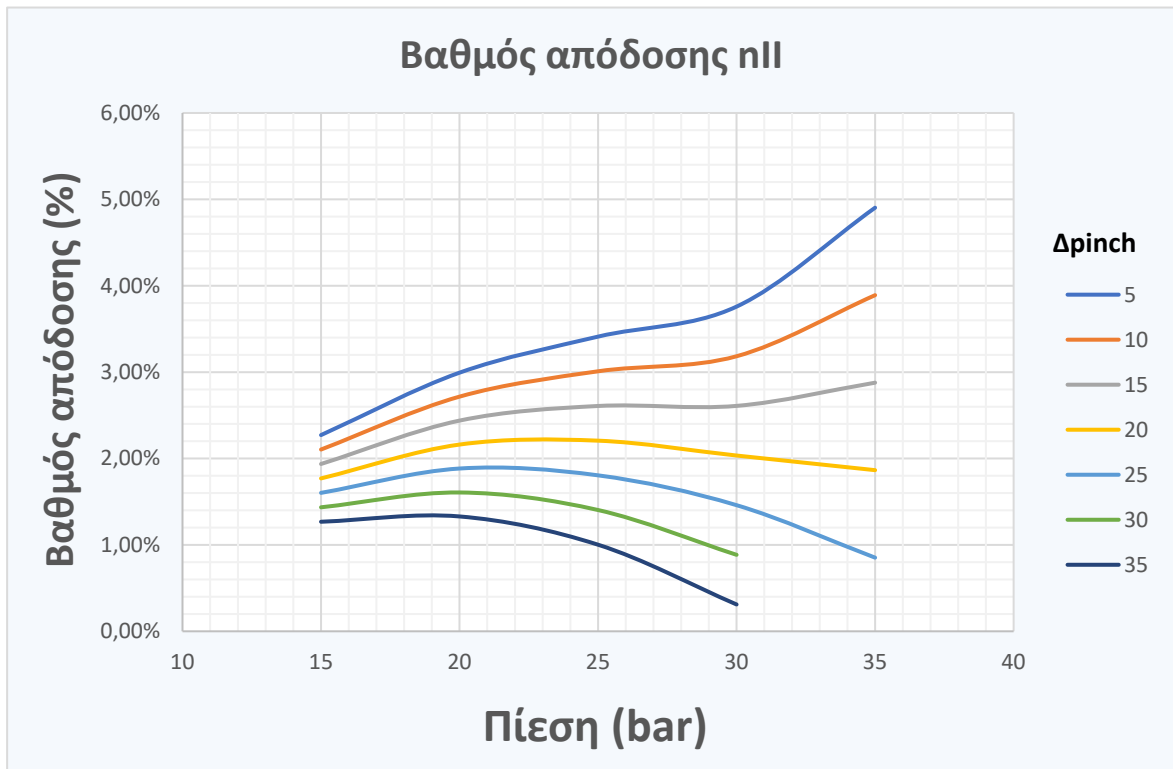
Πίνακας 4 Δεδομένα του υπό μελέτη συστήματος

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών θεωρώντας θερμοκρασία εισόδου στην μονάδα, μετά τον στραγγαλισμό, $T_1 = 180^\circ\text{C}$ και στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για μικρότερες θερμοκρασίες.

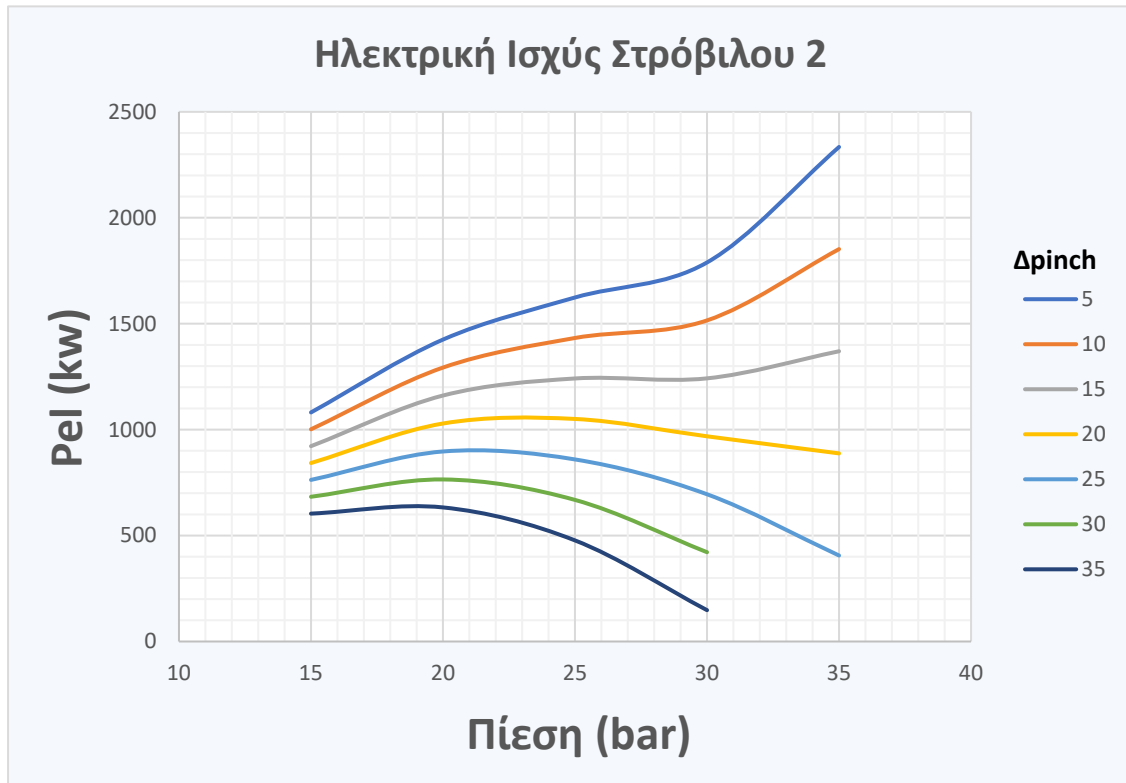
5.4.1 Χρήση του R245fa ως εργαζόμενο μέσο



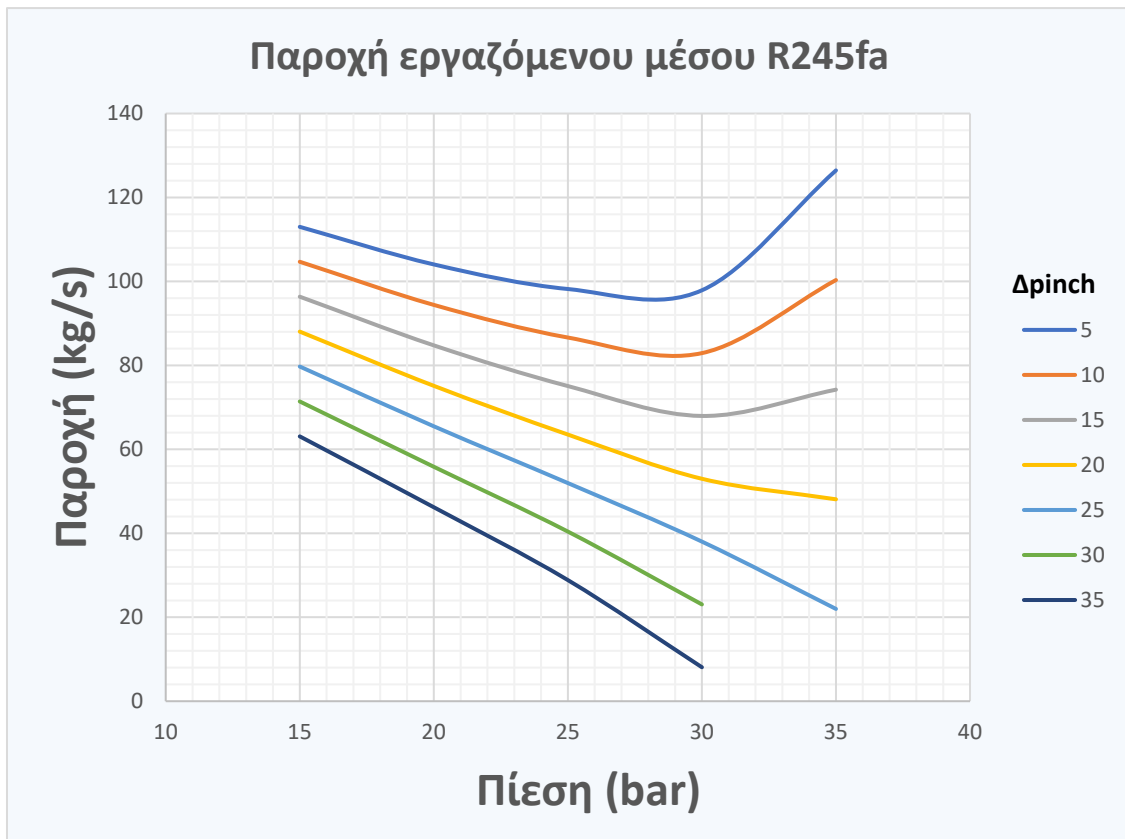
Διάγραμμα 1 Βαθμός απόδοσης από 1ο θερμοδυναμικό νόμο



Διάγραμμα 2 Βαθμός απόδοσης από 2ο θερμοδυναμικό νόμο

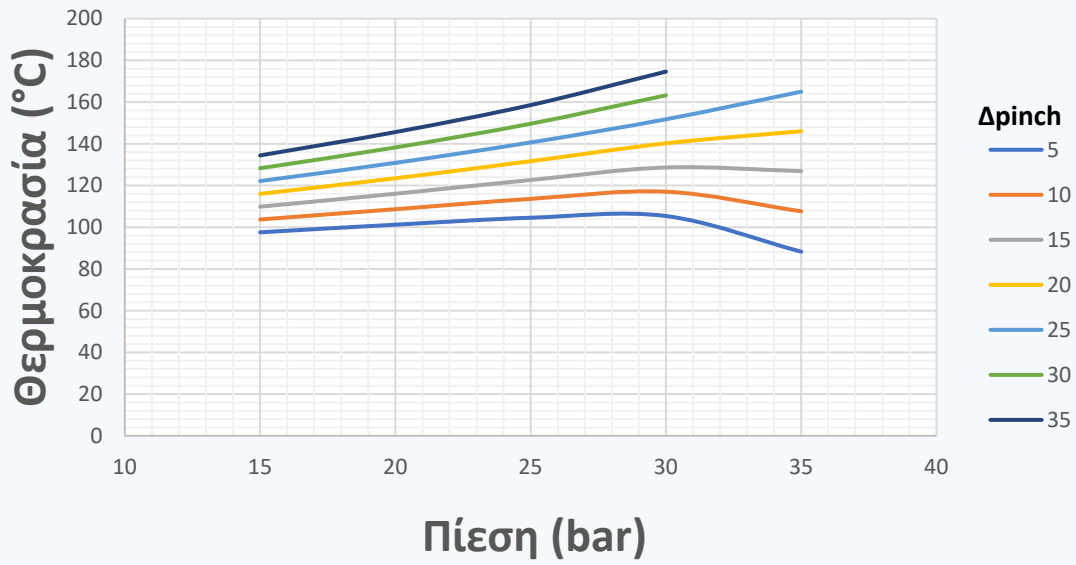


Διάγραμμα 3 Ηλεκτρική ισχύς στρόβιλου 2



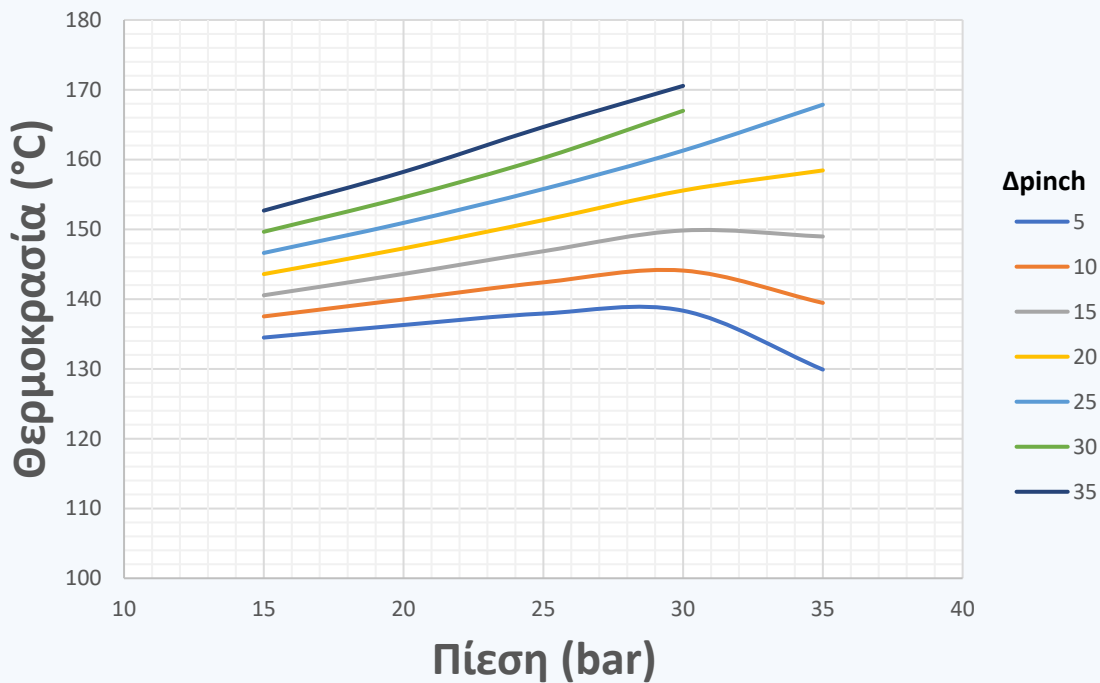
Διάγραμμα 4 Παροχή οργανικού ρευστού R245fa

Θερμοκρασία Εξόδου Άλμης απο Προθερμαντήρα T7



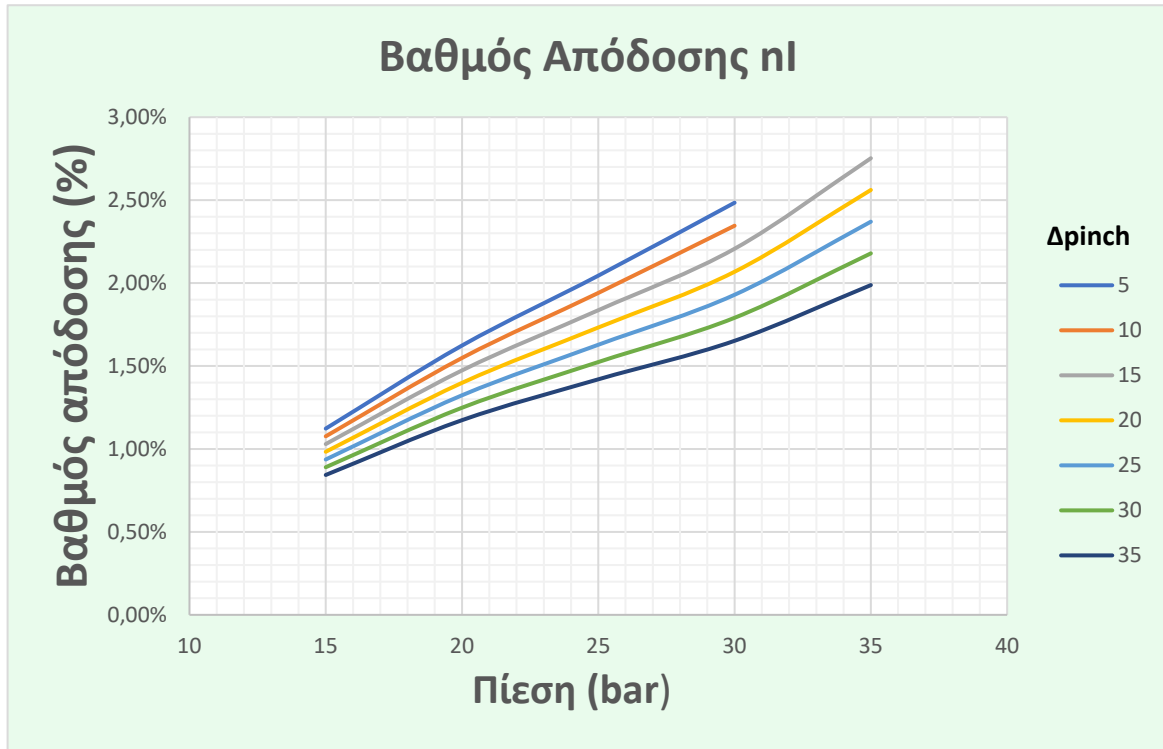
Διάγραμμα 5 Θερμοκρασία εξόδου άλμης από προθερμαντήρα (T7)

Θερμοκρασία Επανεισόδου Άλμης στο Έδαφος Treinj

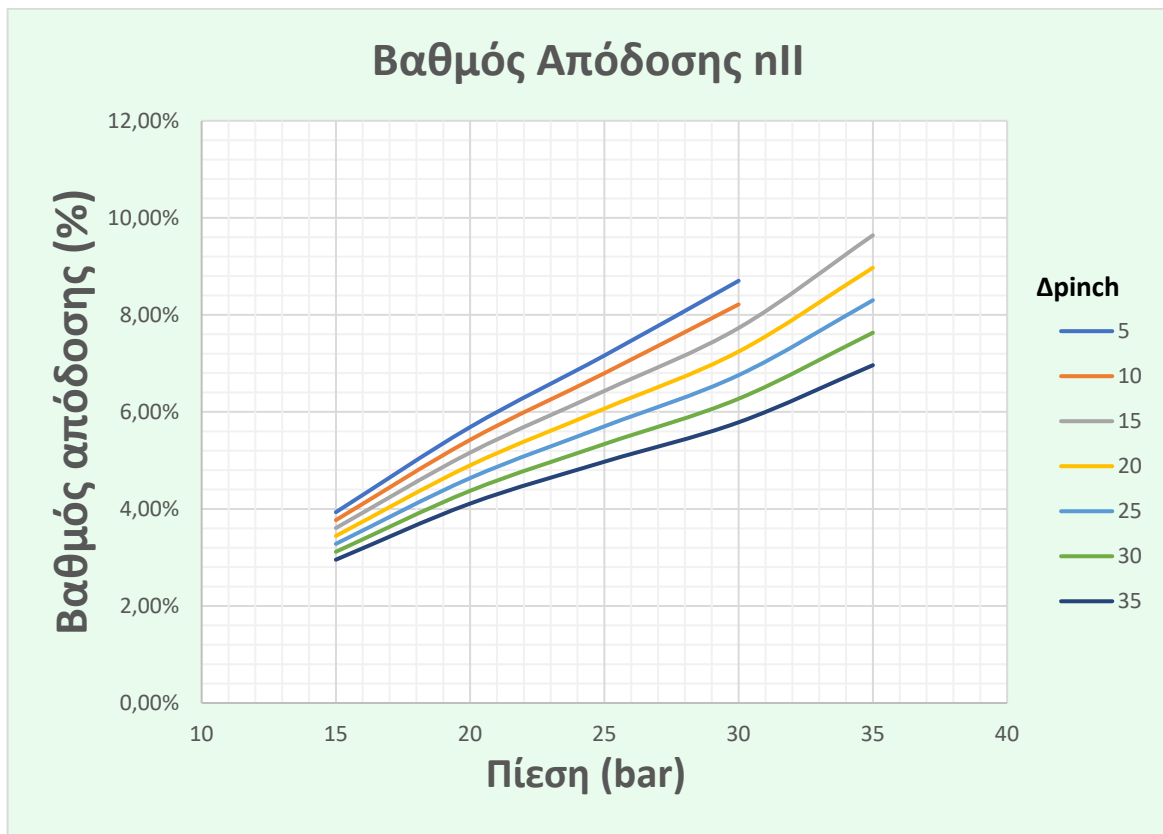


Διάγραμμα 6 Θερμοκρασία επανεισόδου άλμης στο έδαφος (Treinj)

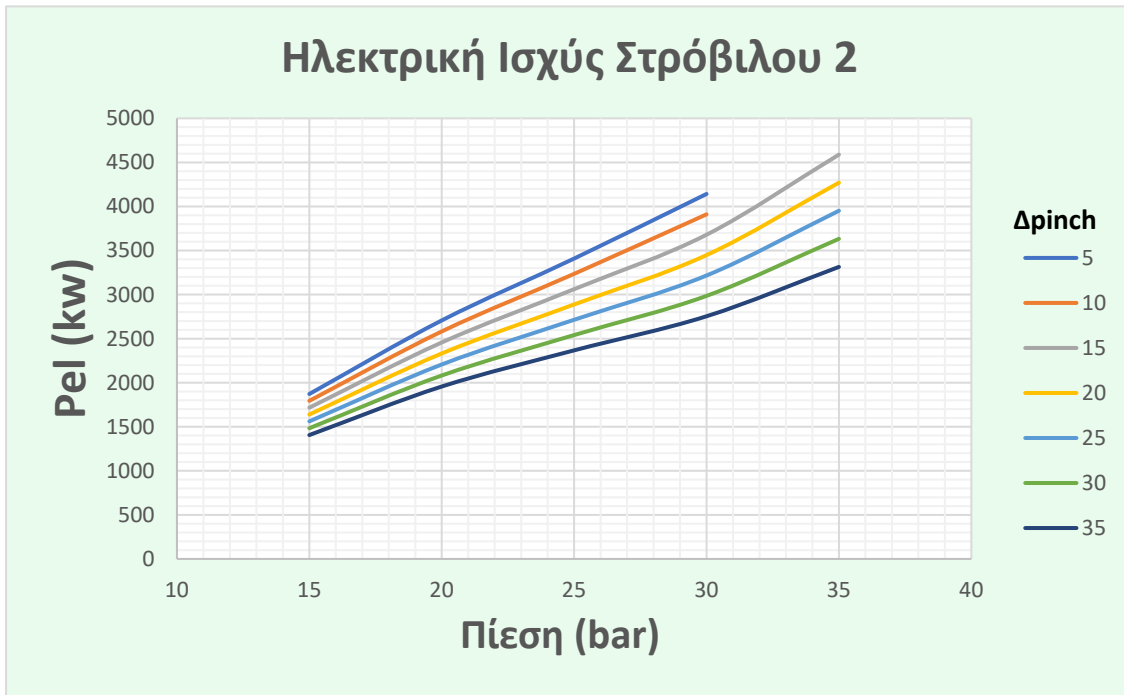
5.4.2 Χρήση του R134a ως εργαζόμενο μέσο



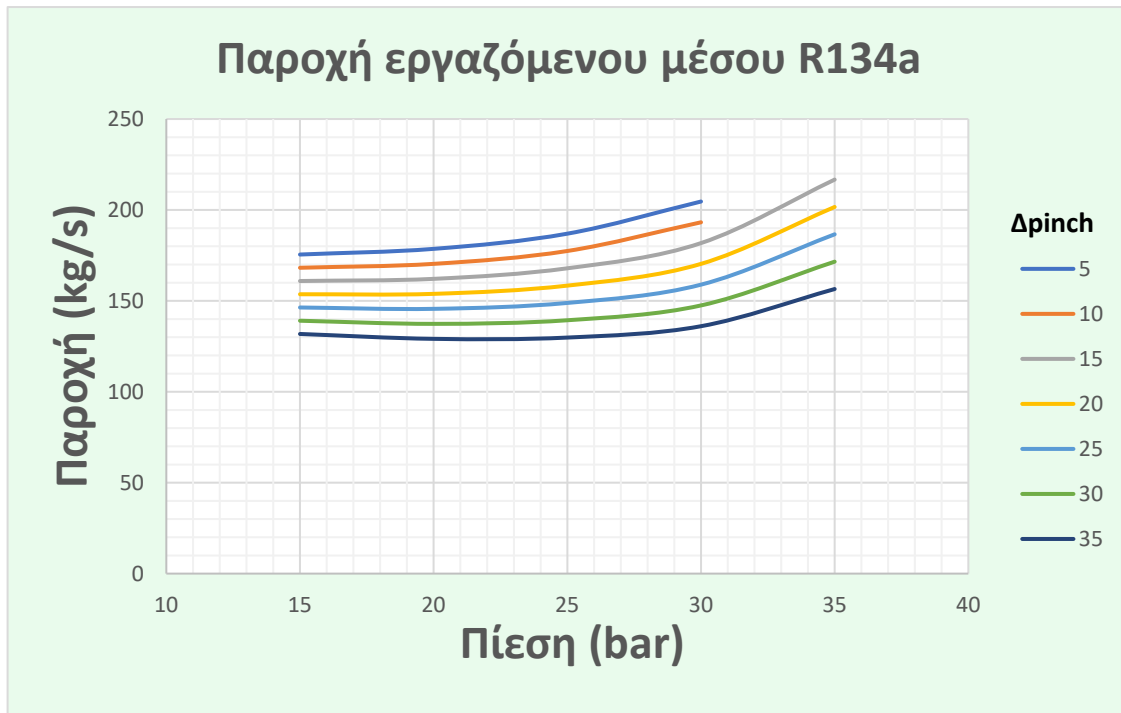
Διάγραμμα 8 Βαθμός απόδοσης από 1ο θερμοδυναμικό νόμο



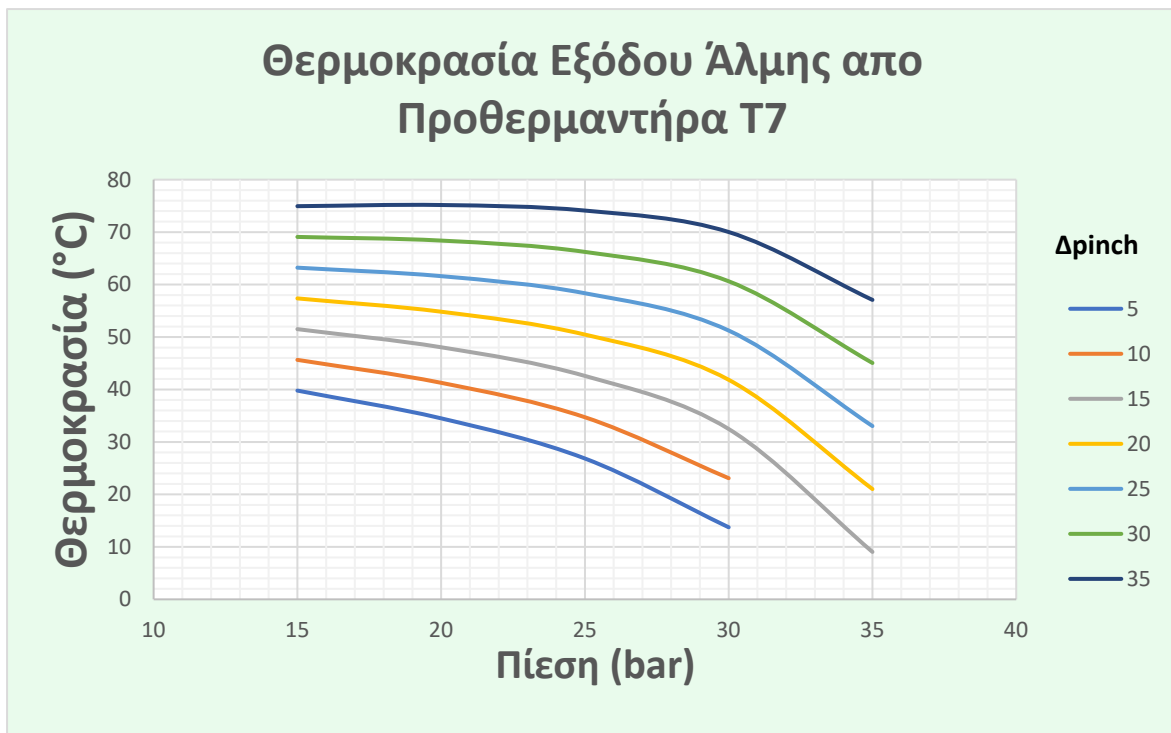
Διάγραμμα 7 Βαθμός απόδοσης από 2ο θερμοδυναμικό νόμο



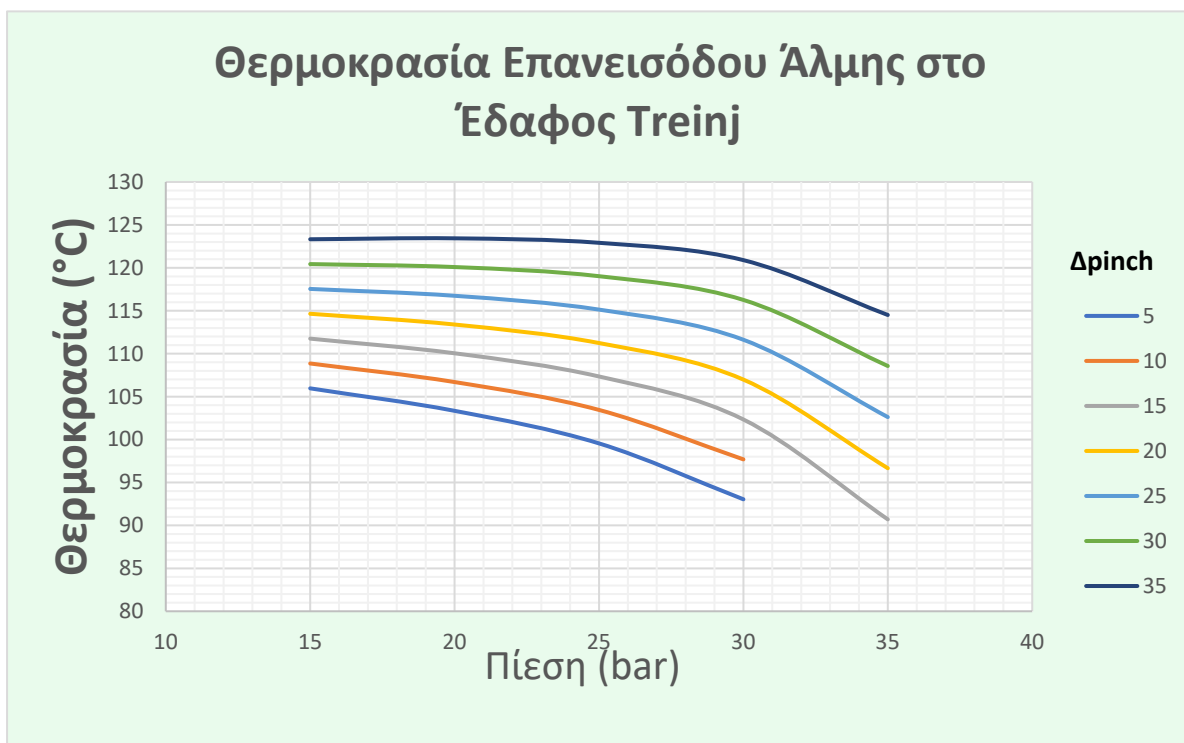
Διάγραμμα 9 Ηλεκτρική ισχύς στροβίλου 2



Διάγραμμα 10 Παροχή οργανικού ρευστού R134a

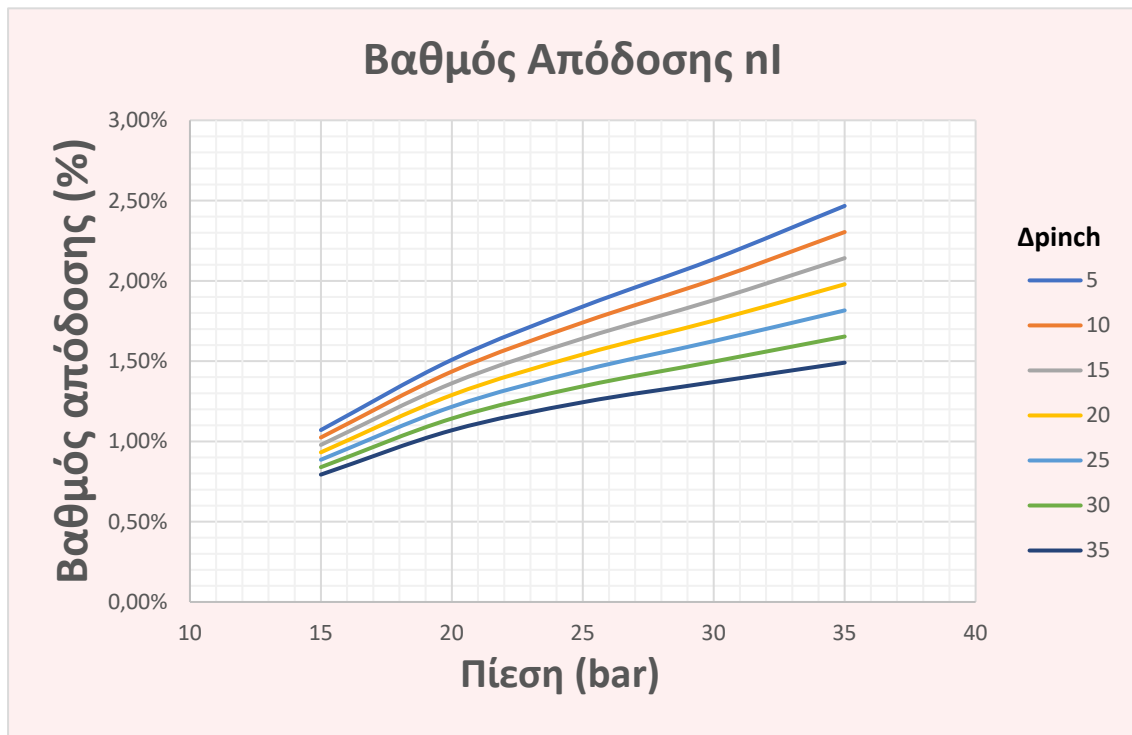


Διάγραμμα 11 Θερμοκρασία εξόδου άλμης από προθερμαντήρα (T7)

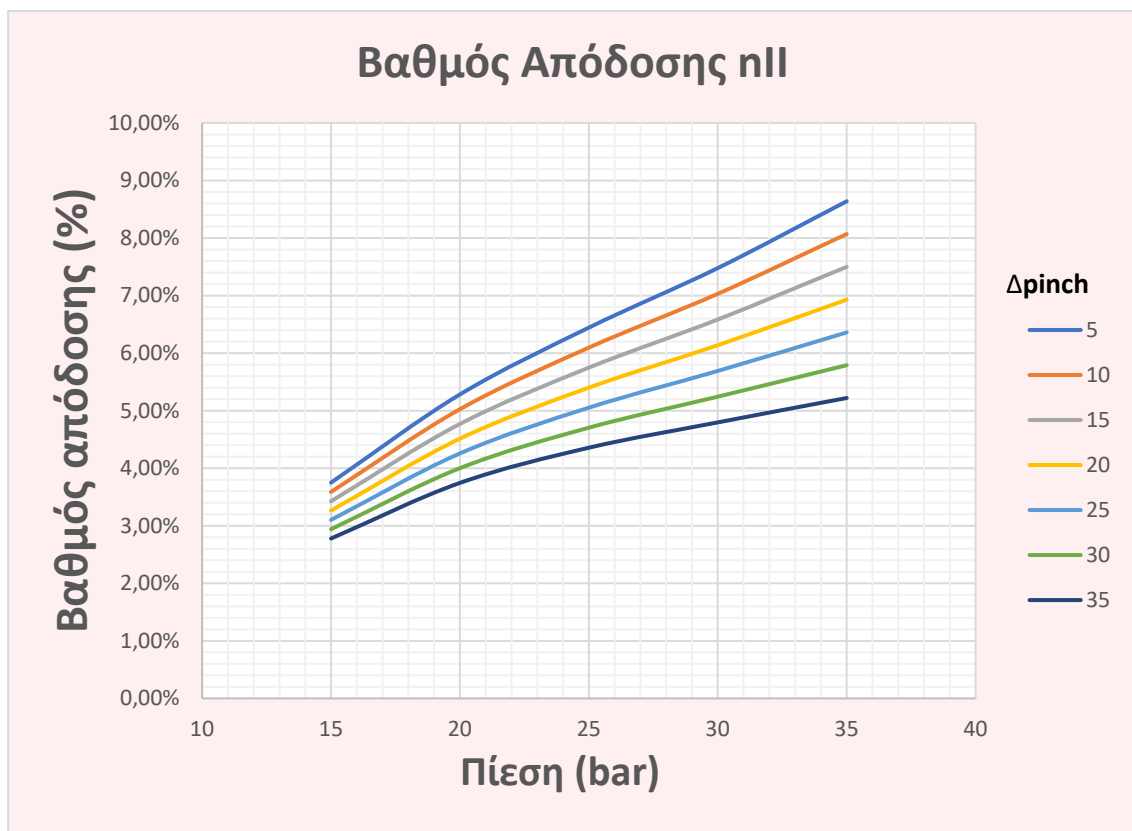


Διάγραμμα 12 Θερμοκρασία επανεισόδου άλμης στο έδαφος (Treinj)

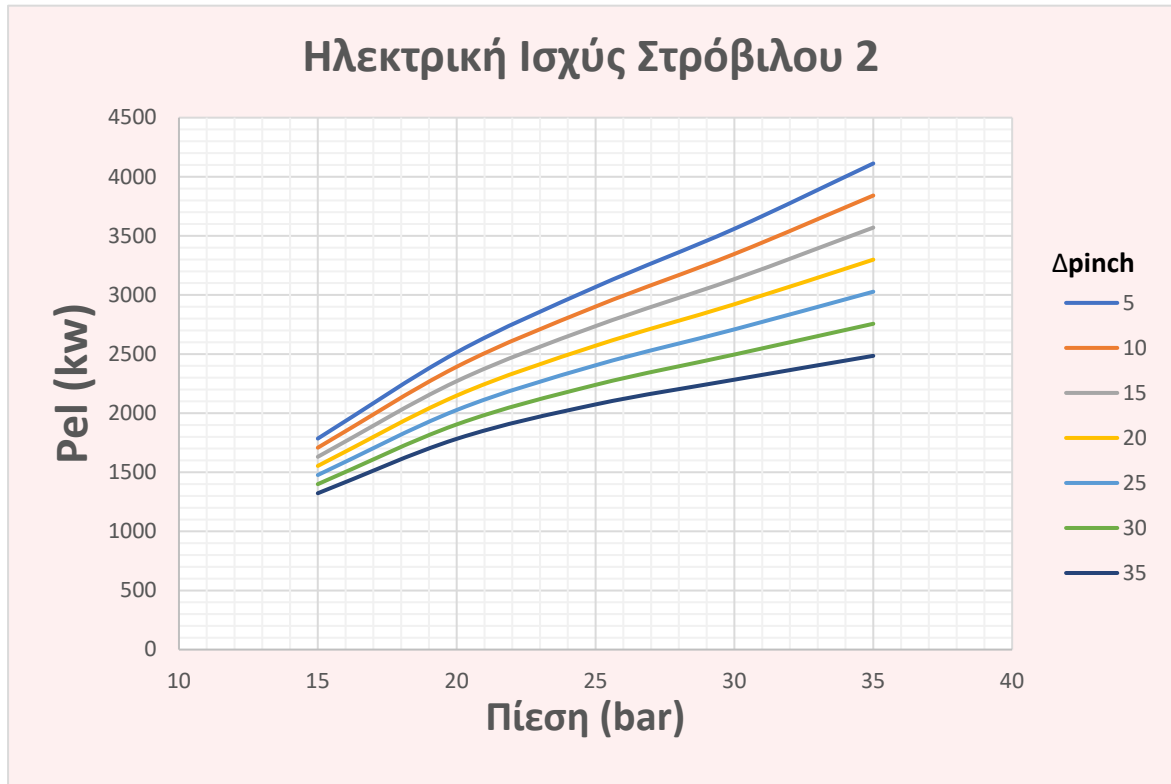
5.4.1 R152A



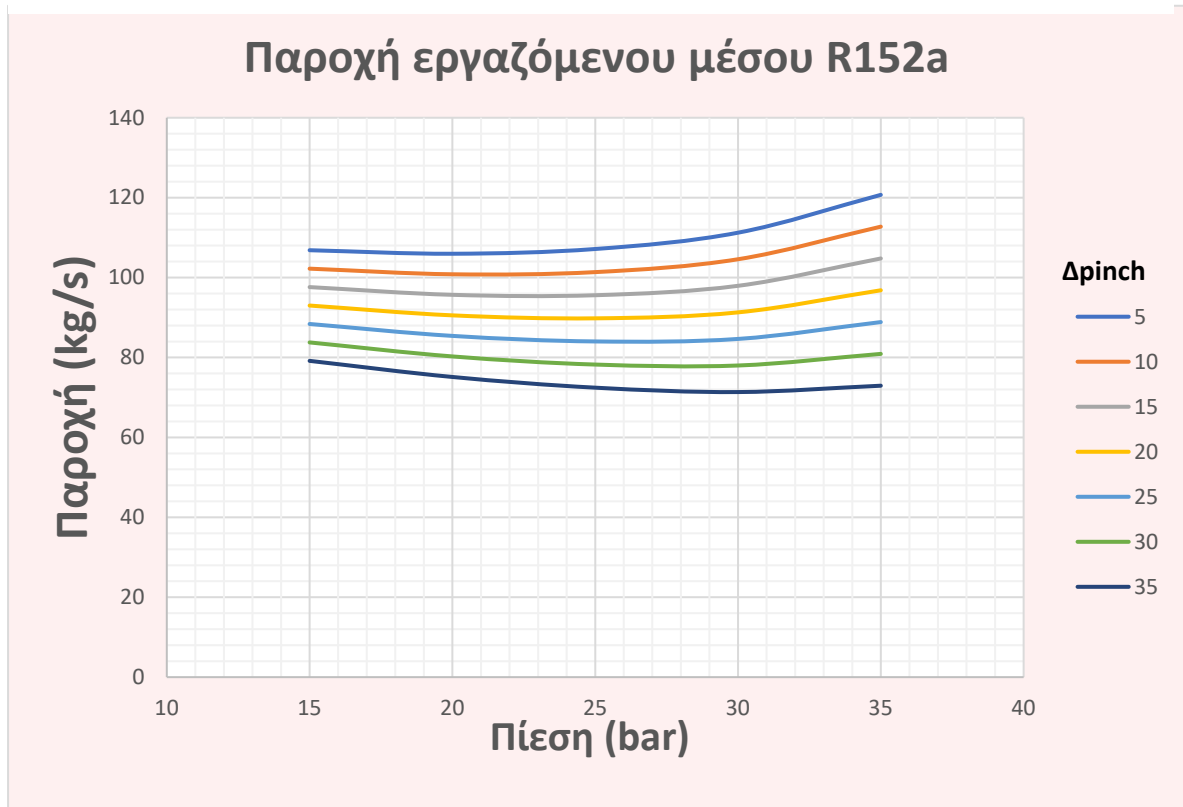
Διάγραμμα 13 Βαθμός απόδοσης από 1ο θερμοδυναμικό νόμο



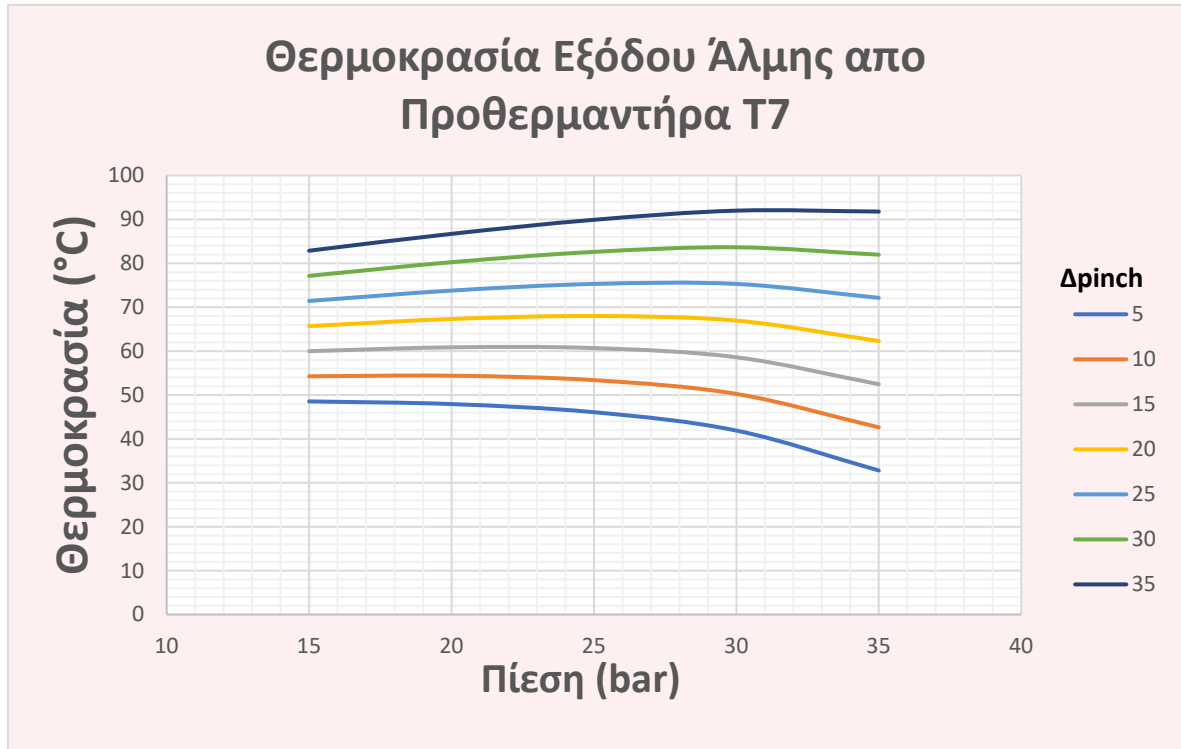
Διάγραμμα 14 Βαθμός απόδοσης από 2ο θερμοδυναμικό νόμο



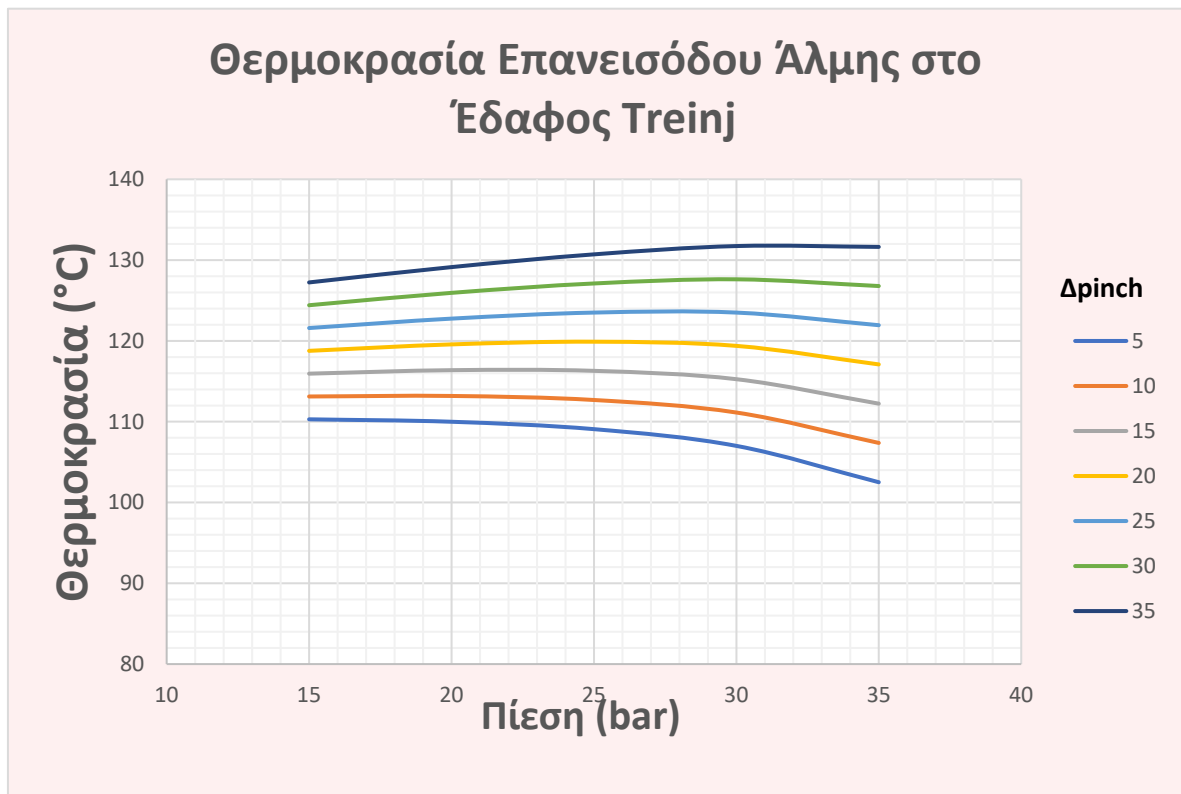
Διάγραμμα 15 Ηλεκτρική ισχύς στροβίλου 2



Διάγραμμα 16 Παροχή οργανικού ρευστού R152a

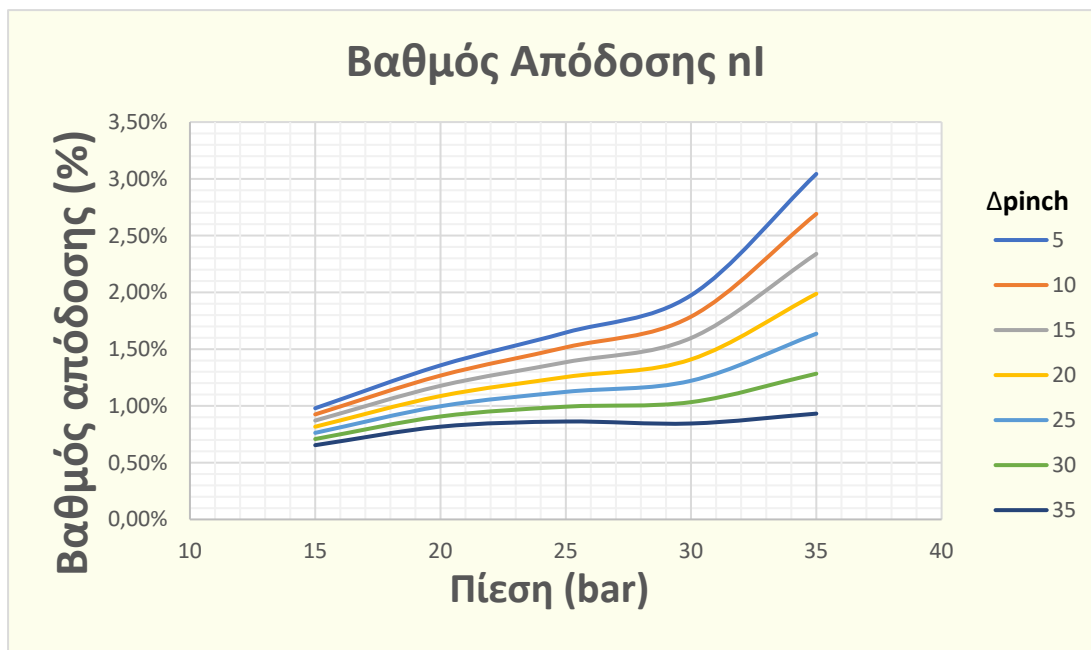


Διάγραμμα 18 Θερμοκρασία εξόδου άλμης από προθερμαντήρα (T7)

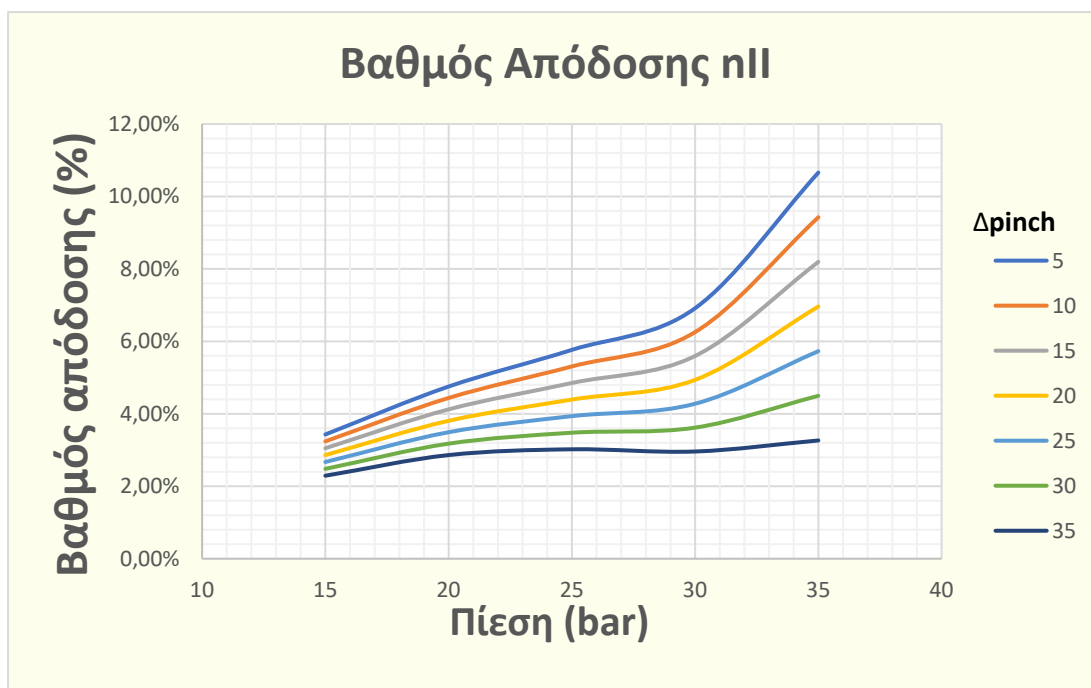


Διάγραμμα 17 Θερμοκρασία επανεισόδου άλμης στο έδαφος (Treinj)

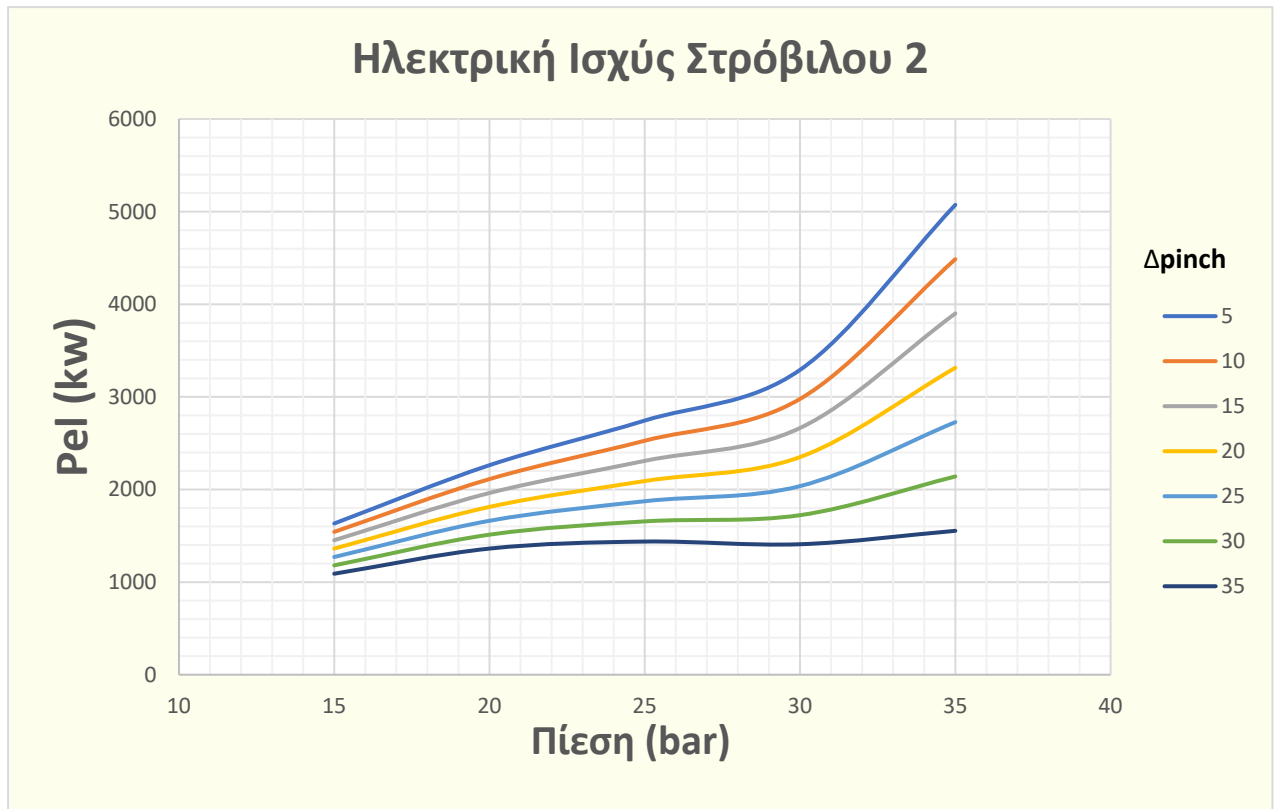
5.4.4 Χρήση Isobutane ως εργαζόμενο μέσο



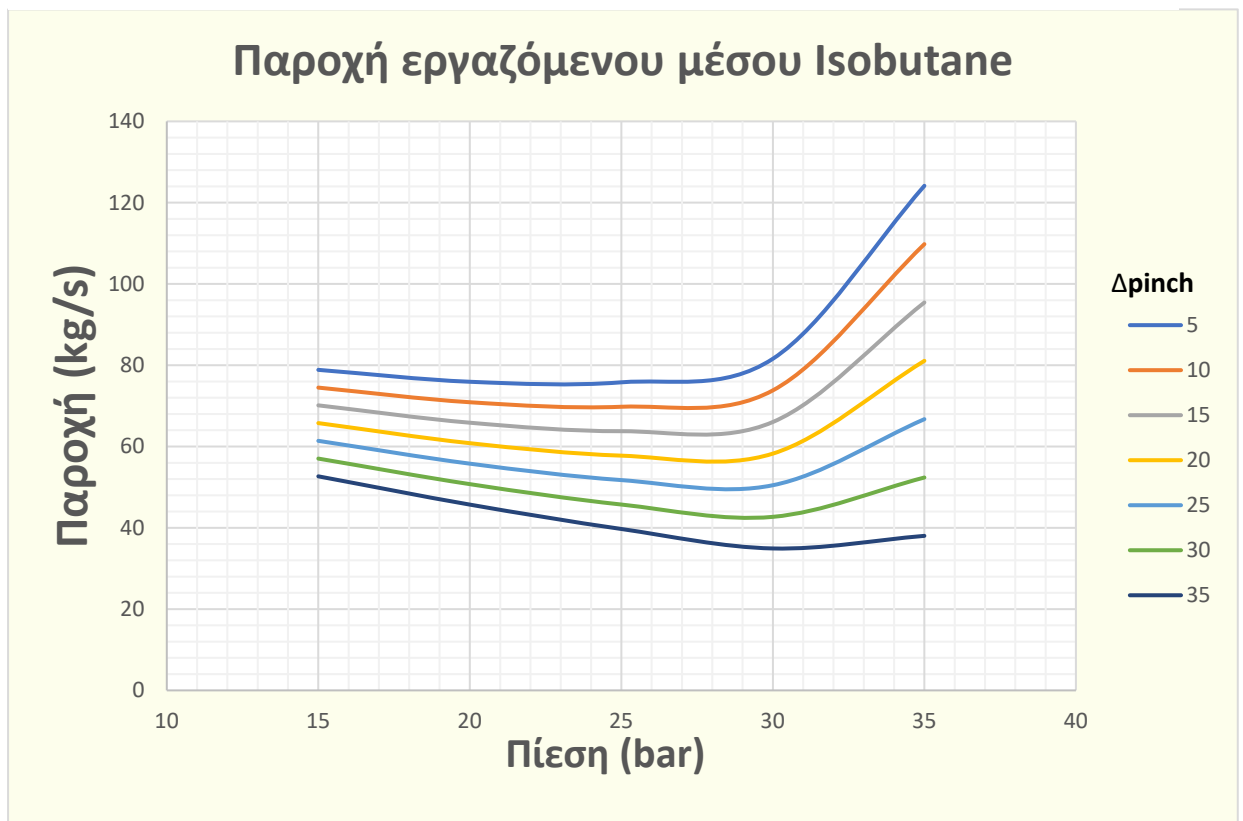
Διάγραμμα 19 Βαθμός απόδοσης από 1ο θερμοδυναμικό νόμο



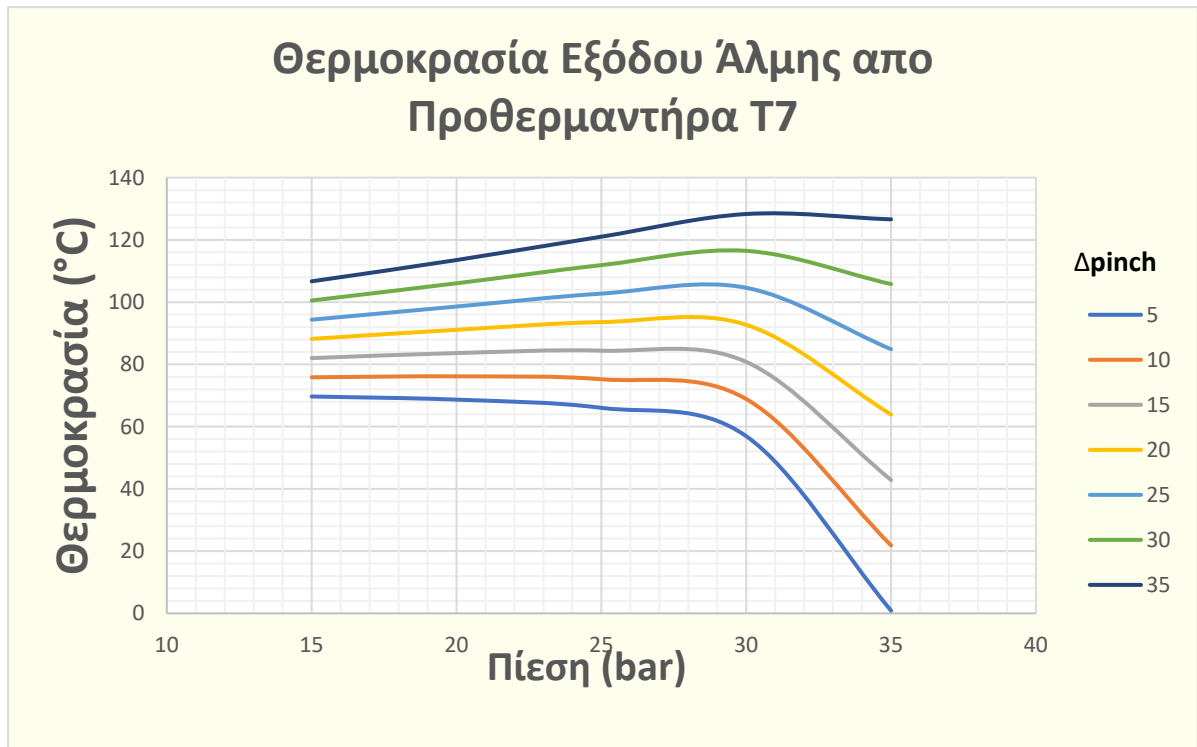
Διάγραμμα 20 Βαθμός απόδοσης από 2ο θερμοδυναμικό νόμο



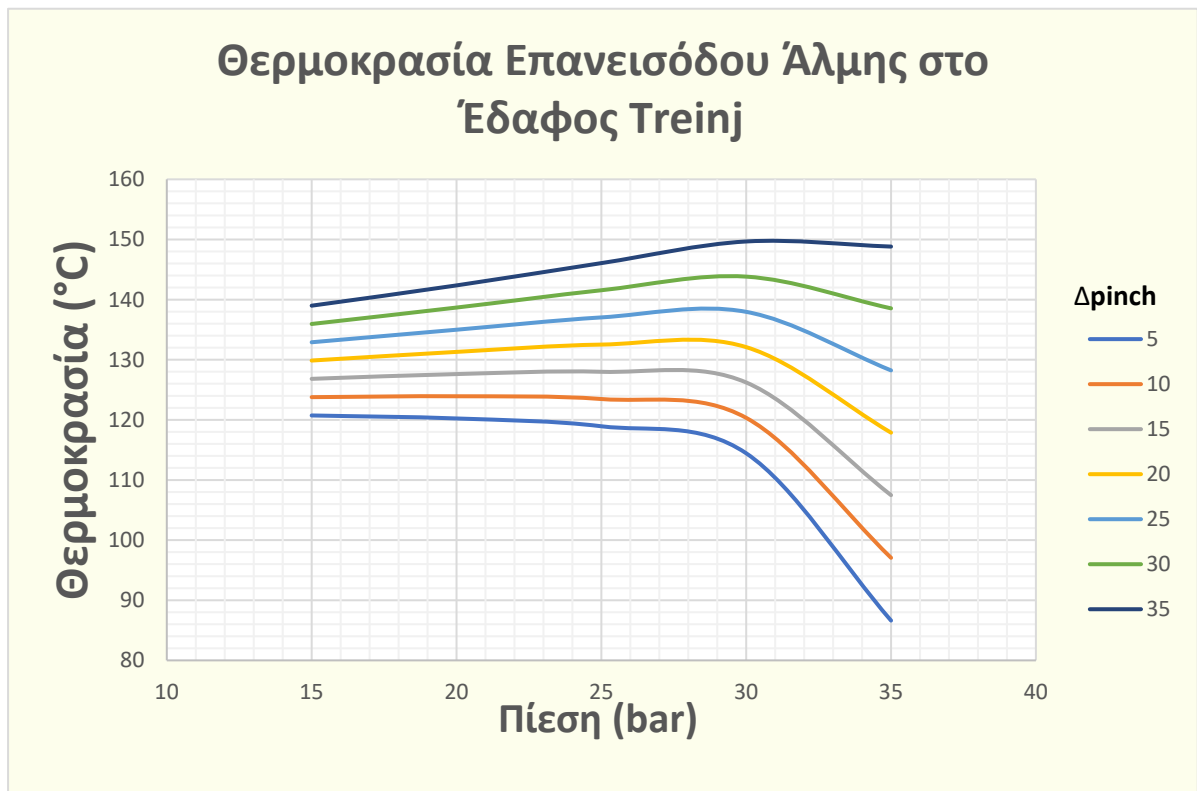
Διάγραμμα 22 Ηλεκτρική ισχύς στροβίλου 2



Διάγραμμα 21 Παροχή οργανικού ρευστού Isobutane



Διάγραμμα 24 Θερμοκρασία εξόδου άλμης από προθερμαντήρα (T7)



Διάγραμμα 23 Θερμοκρασία επανεισόδου άλμης στο έδαφος (Treinj)

5.4 .5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Περίπτωση : $T_{geo} = 180^{\circ}C$

| Εργαζόμενο μέσο | $\Delta pinch$ | P_{high} (bar) | nI (%) | nII (%) | $PeIT1$ (kW) | M_{wf} (kg/s) |
|------------------|----------------|------------------|----------|-----------|--------------|-----------------|
| <i>R245fa</i> | 5 | 35 | 1,38 | 4,83 | 2293 | 124 |
| <i>R134a</i> | 15 | 35 | 2,74 | 9,60 | 4561 | 215 |
| <i>R152a</i> | 5 | 35 | 2,45 | 8,61 | 4089 | 120 |
| <i>Isobutane</i> | 5 | 35 | 3,01 | 10,57 | 5023 | 123 |

Πίνακας 5 Αποτελέσματα για θερμοκρασία γεωθερμικής άλμης $180^{\circ}C$

Περίπτωση : $T_{geo} = 160^{\circ}C$

| Εργαζόμενο μέσο | $\Delta pinch$ | P_{high} (bar) | nI (%) | nII (%) | $PeIT1$ (kW) | M_{wf} (kg/s) |
|------------------|----------------|------------------|----------|-----------|--------------|-----------------|
| <i>R245fa</i> | 5 | 20 | 0,53 | 2,03 | 860 | 63 |
| <i>R134a</i> | 5 | 35 | 2,39 | 9,09 | 3855 | 182 |
| <i>R152a</i> | 5 | 35 | 1,83 | 6,95 | 2947 | 86 |
| <i>Isobutane</i> | 5 | 35 | 1,59 | 6,06 | 2568 | 63 |

Πίνακας 6 Αποτελέσματα για θερμοκρασία γεωθερμικής άλμης $160^{\circ}C$

Περίπτωση : $T_{geo} = 140^{\circ}C$

| Εργαζόμενο μέσο | $\Delta pinch$ | P_{high} (bar) | nI (%) | nII (%) | $PeIT1$ (kW) | Mwf (kg/s) |
|------------------|----------------|------------------|----------|-----------|--------------|--------------|
| <i>R245fa</i> | 5 | 15 | 0,27 | 1,14 | 427 | 45 |
| <i>R134a</i> | 5 | 35 | 1,67 | 6,97 | 2602 | 123 |
| <i>R152a</i> | 5 | 35 | 1,21 | 5,04 | 1881 | 55 |
| <i>Isobutane</i> | 5 | 20 | 0,66 | 2,75 | 1028 | 34 |

Πίνακας 7 Αποτελέσματα για θερμοκρασία γεωθερμικής άλμης
140°C

Περίπτωση : $T_{geo} = 120^{\circ}C$

| Εργαζόμενο μέσο | $\Delta pinch$ | P_{high} (bar) | nI (%) | nII (%) | $PeIT1$ (kW) | Mwf (kg/s) |
|------------------|----------------|------------------|----------|-----------|--------------|--------------|
| <i>R245fa</i> | 5 | 15 | 0,09 | 0,43 | 141 | 15 |
| <i>R134a</i> | 5 | 35 | 0,97 | 4,49 | 1454 | 69 |
| <i>R152a</i> | 5 | 25 | 0,73 | 3,41 | 1104 | 39 |
| <i>Isobutane</i> | 5 | 15 | 0,37 | 1,73 | 561 | 27 |

Πίνακας 8 Αποτελέσματα για θερμοκρασία γεωθερμικής άλμης
120°C

5.5 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικές πηγές μέσης και υψηλής ενθαλπίας, συγκεκριμένα σε πραγματικές μετρήσεις που έλαβαν χώρα στις περιοχές της Μήλου και Νισύρου. Οι μετρήσεις ως τώρα έχουν επιβεβαιώσει γεωθερμικά πεδία θερμοκρασιών μεγαλύτερων των 200°C τα οποία τα καθιστά υψηλής ενθαλπίας. Λαμβάνοντας ως δεδομένα μετρήσεις που λήφθηκαν από ΔΕΗ και ΙΓΜΕ μελετήθηκε η επίδραση τριών καθοριστικών παραμέτρων, της υψηλής πίεσης, του Pinch Point καθώς και του οργανικού ρευστού του δυαδικού συστήματος (R245fa, R134a, R152a, Isobutane).

Όσον αφορά τη μελέτη της επίδραση της υψηλής πίεσης, παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της, ειδικά στις υψηλές πιέσεις παρατηρείται ραγδαία άνοδος του βαθμού απόδοσης. Η Διαφορά θερμοκρασίας στον προθερμαντήρα, Pinch Point, φαίνεται να επιδρά αντίστροφα από την υψηλή πίεση, συγκεκριμένα όσο αυξάνεται αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά, τόσο ελαττώνεται και ο βαθμός απόδοσης, και κατ' επέκτασιν η ηλεκτρική ισχύς του συστήματος. Εξάιρεση αποτελεί το οργανικό ρευστό R245fa το οποίο σε μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές και πίεσης ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει καμπή και ελαττώνεται.

Η παροχή του οργανικού ρευστού, σε υψηλές πιέσεις εμφανίζεται μία απότομη άνοδος της, αυτό συμβαίνει διότι τα ρευστά αυτά παρουσιάζουν μια κρίσιμη πίεση κοντά στην οποία η θερμοκρασία παύει να αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό, συνεπώς και η ενθαλπία το ίδιο, ως εκ τούτου στον ισολογισμό ενέργειας των εναλλακτών χρειάζεται να αυξηθεί η παροχή για να ισχύει ο ισολογισμός.

Από τα τέσσερα, πιο συνηθισμένα, οργανικά ρευστά που επιλέχθηκαν καταλληλότερο για τις θερμοκρασίες χαμηλότερες των 180°C είναι το R134a λόγω του υψηλότερου βαθμού απόδοσης και τις ηλεκτρικής ισχύς που παράγει, ενώ για θερμοκρασίες 180°C το Isobutane έχει τον καλύτερο βαθμό. Το οργανικό ρευστό R152a αν και χαμηλότερη απόδοση και από τα δύο, έχει αισθητά καλύτερη απόδοση από το R245fa του οποίου η απόδοση αποκλίνει των υπόλοιπων.

5.6 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Ως στόχος της εργασίας αυτής, τέθηκε η μελέτη μιας μονάδας αξιοποίησης ενός γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εστιάζοντας στη διερεύνηση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων με σκοπό τη βελτιστοποίηση του βαθμού ενεργειακής απόδοσης της μονάδας, όπως αυτές μελετήθηκαν με μοντελοποίηση και χρήση προγράμματος matlab, και αναλυτικά παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλέον επίκαιρα βιβλιογραφικά δεδομένα, η όλη μελέτη αφορούσε υβριδικό σύστημα δύο μονάδων, αφενός μεν μιας μονάδας υγρού ατμού, αφ' ετέρου δε μιας μονάδας δυαδικού τύπου, ο συνδυασμός των οποίων φαίνεται πως οδηγεί στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση της γεωθερμικής μονάδας. Περαιτέρω αντικείμενο μελέτης αποτελεί η οικονομοτεχνική διερεύνηση κατασκευής και λειτουργίας μια τέτοιας γεωθερμικής μονάδας, η οποία θα πρέπει να περιλάβει και τη μελέτη εναλλακτικών σεναρίων από πλευράς της επιθυμητής αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος της μονάδας.

Σε συνέχεια της παρούσας μελέτης, πρόσθετο αντικείμενο διερεύνησης αποτελούν παραλλαγές του βασικού αυτού υβριδικού συστήματος (πχ χρήση δύο μονάδων υγρού ατμού απλού τύπου – Back Pressure, σε συνδυασμό με τη βασική μονάδα δυαδικού τύπου). Η μελέτη, αυτού ή οποιουδήποτε άλλου εναλλακτικού συστήματος, θα πρέπει επίσης να περιλάβει και την οικονομοτεχνική προσέγγιση του συστήματος, κατ' αντιστοιχία με την προτεινόμενη για το βασικό σύστημα που μελετήθηκε.

Η ολοκληρωμένη, τέλος, μελέτη κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας αξιοποίησης του μελετώμενου γεωθερμικού πεδίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να περιλάβει τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών παραγωγής που θα έχουν μελετηθεί, κατ' αρχάς με τα βασικά οικονομικά κριτήρια (ύψος επένδυσης, καθαρά παρούσα αξία, εσωτερικός βαθμός απόδοσης).

Βιβλιογραφία

- [1] Γεωθερμικά Συστήματα Γρηγ.Ι. Καρυδάκης Αθήνα 2016
- [2] 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.
- [3] Ι.Γ.Μ.Ε. – Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος – Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων, Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας (χαρακτηρισμός σύμφωνα με ν.3175/2003), Αθήνα 2007
- [4] Κανονική γεωθερμία-αρχές σχεδιασμού γεωθερμικών συστημάτων και εφαρμογές-Κεφάλαιο 3/
Δρ Μιχάλης Βραχόπουλος
- [5] Μ.Γρ. Βραχόπουλος, Γεωθερμία, Σημειώσεις στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Παραγωγή και διαχείριση Ενέργειας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.
- [6] Exergoeconomic analysis and comparison between ORC and Kalina cycles to exploit low and medium-high temperature heat from two different geothermal sites.
D. Fiaschi*, G. Manfrida, E. Rogai, L. Talluri
- [7] Modeling and optimization of a binary geothermal power plant
Hadi Ghasemi , Marco Paci , Alessio Tizzanini , Alexander Mitsos
- [8]Geothermal EnergyConversion
Murat Ozturk, Suleyman DemirelUniversity,Isparta,Turkey
Ibrahim Dincer, University of Ontario Institute of Technology ,Oshawa,ON,Canada;
- [9]Enhanced geothermal systems in Europe: An estimation and comparison of the technical and sustainable potentials
Author links open overlay panelCésar R.ChamorroJosé L.García-CuestabMaría E.MondéjaraAlfonsoPérez-Madraza,
- [10]Thermodynamic analysis and optimization of a geothermal Kalina cycle system
HamidSaffariSadeghSadeghiMohsenKhoshzatPooyanMehregan
- [11]California Energy Commission, « Comparative Study of Transmission Alternatives – Background Report», June 2004.
- [12]Εμμ. Κ. Κακαράς, «Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί», Εκδόσεις Fountas, 2η Έκδοση, Αθήνα, Ιανουάριος 2003
- [13] Marco Astofli, Luca Xodo, Matteo C. Romano, Ennio Macchi, «Technical and economical analysis of a solar-geothermal hybrid plant based on an Organic Rankine Cycle», Elsevier 2011
- [14] Ξυπόλυτου Ευαγγελία «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Γεωθερμικά Ρευστά Μέσης Ενθαλπίας. Η περίπτωση του Ακροποτάμου Καβάλας» 2011
- [15] Γεωθερμία, Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν.
- [16] Thermodynamic studies on an alternate binary working fluid combinations and configurations for a combined and cooling cycle, by SANJAY VIJAYARAGHAVAN, 2003
- [17] Α. Παπαιωάννου, Θερμοδυναμική: Βασικές Αρχές και Νόμοι-Καθαρές Ουσίες, Τόμος Ι, Εκδόσεις Κοράλι, 2007

Παράρτημα. Κώδικας σε Matlab για ρευστό R134a

```
import py.CoolProp.CoolProp.PropsSI

% Pressure P (pascal) , Temperature T (Kelvin) , Mass
vapor quality Q ,
% specific entropy S (J/kg/K) , specific enthalpy H
(J/kg) ,
% mass flow m (kg/s)
% mass specific constant pressure specific heat CP
(J/kg/K)

% (0) εξαγωγή γεωθερμικού ρευστού-στραγγαλισμός
% (1) είσοδος ρευστού στον διαχωριστή
% (2) είσοδος ατμού στο στρόβιλο 1
% (3) επανείσοδος στο έδαφος
% (4) είσοδος οργανικού ρευστού στον προθερμαντήρα
% (5) είσοδος γεωθερμικού ρευστού στον ατμοποιητή
% (6) είσοδος γεωθερμικού ρευστού στον προθερμαντήρα-
σημείο με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά Pinch Point
% (7) επανείσοδος στο έδαφος
% (8) είσοδος οργανικού ρευστού στον προθερμαντήρα
% (9) είσοδος οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή-
σημείο με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά Pinch Point
% (10) είσοδος στον στρόβιλο 2
% (11) είσοδος στο συμπηκνωτή
% (12) είσοδος στην αντλία

Dpinch = zeros;
Phigh = zeros;
Trej= zeros;
Pel = zeros;
n1 = zeros;
n2 = zeros;
nHex= zeros;
mwf = zeros;

% Θερμοκρασίες στον εναλλάκτη
T5 = zeros;
T6 = zeros;
T7 = zeros;
T8 = zeros;
T9 = zeros;
T10 = zeros;
```

```

%ενθαλπίες στον εναλλάκτη
H5 = zeros;
H6 = zeros;
H7 = zeros;
H8 = zeros;
H9 = zeros;
H10 = zeros;

To = 298.15;
Po = 101325;
Ho = PropsSI('H','T',To,'P',Po,'Water');
So = PropsSI('S','T',To,'P',Po,'Water');

msteam = 50;
mwater = 100-msteam;
mbrine = msteam + mwater;

P(1) = 1019875;
Q(1) = msteam/mbrine;
T(1) = PropsSI('T','P',P(1),'Q',Q(1),'Water');
H(1) = PropsSI('H','T',T(1),'Q',Q(1),'Water');
S(1) = PropsSI('S','T',T(1),'Q',Q(1),'Water');

T(2) = T(1);
P(2) = P(1);
Q(2) = 1;
H(2) = PropsSI('H','T',T(2),'Q',Q(2),'Water');
S(2) = PropsSI('S','T',T(2),'Q',Q(2),'Water');

nis=0.95;
Plow = 800000;
P(3) = Plow;
H3is = PropsSI('H','P',P(3),'S',S(2),'Water');
H(3) = H(2) - nis*(H(2)-H3is);
if H(3)<PropsSI('H','P',P(3),'Q',1,'Water') %διφασική
περιοχή
    Q(3) = (H(3)+
PropsSI('H','P',P(3),'Q',0,'Water'))/(PropsSI('H','P',
P(3),'Q',1,'Water')+PropsSI('H','P',P(3),'Q',0,'Wate
r'));
    T(3) = PropsSI('T','P',P(3),'Q',Q(3),'Water');
    S(3) = PropsSI('S','P',P(3),'Q',Q(3),'Water');
else %υπερθερμος ατμός
    T(3) = PropsSI('T','P',P(3),'H',H(3),'Water');
    S(3) = PropsSI('S','P',P(3),'H',H(3),'Water');
end
end

```



```

P(4) = P(3);
Q(4) = 0;
T(4) = PropsSI('T','P',P(4),'Q',Q(4),'Water');
H(4) = PropsSI('H','P',P(4),'Q',Q(4),'Water');
S(4) = PropsSI('S','P',P(4),'Q',Q(4),'Water');
PelT1 = msteam*(H(2)-H(3));
nT1 = PelT1/(mbrine*H(1));

for i = 1:5
    for j = 1:7

Dpinch(j) = 5*j;
Phigh(i) = 1000000+500000*i;

T(5) = T(1);
Q(5) = 0;
P(5) = PropsSI('P','T',T(5),'Q',Q(5),'Water');
H(5) = PropsSI('H','T',T(5),'Q',Q(5),'Water');
S(5) = PropsSI('S','T',T(5),'Q',Q(5),'Water');

Tref=273.15;
Href= PropsSI('H','T',Tref,'P',P(5),'Water');

Q(12) = 0;
P(12) = 1000000;
T(12) = PropsSI('T','P',P(12),'Q',Q(12),'R134a');
H(12) = PropsSI('H','P',P(12),'Q',Q(12),'R134a');
S(12) = PropsSI('S','P',P(12),'Q',Q(12),'R134a');

H(8) = H(12);
P(8) = Phigh(i);
T(8) = PropsSI('T','P',P(8),'H',H(8),'R134a');
S(8) = PropsSI('S','P',P(8),'H',H(8),'R134a');

P(9) = Phigh(i);
H(9) = PropsSI('H','Q',0,'P',P(9),'R134a');
T(9) = PropsSI('T','Q',0,'P',P(9),'R134a');
S(9) = PropsSI('S','Q',0,'P',P(9),'R134a');

P(10) = Phigh(i);
H(10) = PropsSI('H','Q',1,'P',P(10),'R134a');
T(10) = PropsSI('T','Q',1,'P',P(10),'R134a');
S(10) = PropsSI('S','Q',1,'P',P(10),'R134a');

Qref = mwater*(H(5)-Href);
Qpp = ((T(9)+Dpinch(j)-T(5))/(Tref-T(5)))*Qref;
P(6) = P(5);
T(6) = ((Tref-T(5))*Qpp)/Qref +T(5);

```

```

H(6) = PropsSI('H','T',T(6),'P',P(6),'Water');
S(6) = PropsSI('S','T',T(6),'P',P(6),'Water');
mwf(i,j) = Qpp/(H(10)-H(9));
P(7) = P(6);
H(7)= H(6)-(mwf(i,j)/mwater)*(H(9)-H(8));
if H(7)> 20
T(7) = PropsSI('T','H',H(7),'P',P(7),'Water');
S(7) = PropsSI('S','T',T(7),'P',P(7),'Water');

nisorc = 0.85;
P(11) = Plow;
H11is = PropsSI('H','P',P(11),'S',S(10),'R134a');
H(11) = H(10) - nisorc*(H(10)-H11is);
if H(11)<PropsSI('H','P',P(11),'Q',1,'R134a')
%διφασική περιοχή
    Q(11) = (H(11)+
PropsSI('H','P',P(11),'Q',0,'R134a'))/(PropsSI('H','P',
',P(11),'Q',1,'R134a')+PropsSI('H','P',P(11),'Q',0,'R
134a'));
    T(11) = PropsSI('T','P',P(11),'Q',Q(11),'R134a');
    S(11) = PropsSI('S','P',P(11),'Q',Q(11),'R134a');
else %υπερθερμος ατμός
    T(11) = PropsSI('T','P',P(11),'H',H(11),'R134a');
    S(11) = PropsSI('S','P',P(11),'H',H(11),'R134a');
end

Trej(i,j)= T(7)-273.15; % θερμοκρασία επανεισόδου
Pel(i,j) = mwf(i,j)*(H(10)-H(11));
Qheat = mbrine*(H(1)-Ho);
n1(i,j) = Pel(i,j)/Qheat;
n2(i,j) = Pel(i,j)/(mbrine*((H(1)-Ho)-To*(S(1)-So)));
nHex(i,j)=(mwf(i,j)*(H(10)-H(8)))/Qheat;
end
end
end

```