



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Γεωθερμικά Ρευστά
Μέσης Ενθαλπίας. Η περίπτωση του Ακροποτάμου Καβάλας»**

Ξυπόλυτου Ευαγγελία

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &
Μηχανικός Υπολογιστών

Επιβλέπων: **Δρ. Ευάγγελος Γ. Καπετάνιος**

ΑΘΗΝΑ, 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Γεωθερμικά Ρευστά Μέσης Ενθαλπίας. Η περίπτωση του Ακροποτάμου Καβάλας»

Ξυπόλυτου Ι. Ευαγγελία
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &
Μηχανικός Υπολογιστών

Επιβλέπων: Δρ. Ευάγγελος Γ. Καπετάνιος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19η Οκτωβρίου 2011.

.....
Δρ. Ε. Καπετάνιος

.....
Μ. Φούντη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Αντωνιάδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

.....

Ξυπόλυτου Ι. Ευαγγελία

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Ξυπόλυτου Ι. Ευαγγελία, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του Δρ. Ευάγγελου Καπετάνιου και αφορά τη μελέτη μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας, στην περιοχή του Ακροποτάμου Καβάλας.

Η εργασία αυτή αντιπροσωπεύει συνεχείς προσπάθειες πολλών μηνών. Μέσω αυτής θεωρώ ότι έθεσα γερά θεμέλια σε βασικές αρχές της Θερμοδυναμικής με τις οποίες είχα έρθει σε επαφή κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, αλλά και κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Επιπλέον, η εμπιστοσύνη που μου έδειξε ο κ. Ευάγγελος Καπετάνιος αλλά και η καίρια καθοδήγηση του όχι μόνο έκαναν δυνατή την εκπλήρωση της εργασίας αλλά μου έδωσαν κίνητρο να ασχοληθώ σε βάθος με τις Διεργασίες, τις Τεχνικές και με τις Τεχνολογίες Αντιμετώπισης της Ρύπανσης. Για αυτό και για πολλά ακόμα τον ευχαριστώ πολύ.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής την καθηγήτρια κ. Μαρία Φούντη και τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Αντωνιάδη, για την προσεκτική και αντικειμενική κριτική της εργασίας μου.

Ξυπόλυτου Ευαγγελία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο το φαινόμενο της γεωθερμίας και τη χρησιμοποίησή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της γεωθερμίας ως φυσικό φαινόμενο, περιγράφονται και ταξινομούνται τα γεωθερμικά συστήματα και οι χρήσεις των γεωθερμικών πόρων και παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τους βεβαιωμένους και πιθανούς γεωθερμικούς πόρους μέσης και υψηλής ενθαλπίας του ελλαδικού χώρου. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι μέθοδοι και οι τεχνικές αξιοποίησης των γεωθερμικών ρευστών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί μια τεχνική περιγραφή μιας τυπικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας. Επιλέγεται το γεωθερμικό πεδίο του Ακροποτάμου Καβάλας για εφαρμογή μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καταστρώνονται τρία θερμοδυναμικά σενάρια, επιλέγεται το βέλτιστο, διαστασιολογείται ο τεχνολογικός εξοπλισμός της μονάδας και τέλος γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης του κόστους της μονάδας αυτής.

ABSTRACT

This thesis is concerned with the phenomenon of geothermal energy and its use for electricity generation. Initially, there is an introduction to the concept of geothermal energy as a natural phenomenon. The geothermal systems and the uses of geothermal resources are described and classified and information is given about the asserted and potential geothermal resources of medium and high enthalpy of Greece. Then, methods and techniques for the use of geothermal power generation are described. Continuing, there is a technical description of a typical power plant of medium enthalpy geothermal fluids. The geothermal field Akropotamos in Kavala is chosen in order to design there a power plant, three thermodynamic scenarios are studied, the best is chosen, the technological equipment is sized, and finally an effort to approach the cost of this unit is made.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ	9
1.1.	ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ-ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	9
1.2.	ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	11
1.3.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	14
1.4.	ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	18
2.	ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ –Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	23
2.1.	Πιθανοί γεωθερμικοί πόροι μέσης ενθαλπίας στην Ελλάδα.....	23
2.2.	Γεωθερμικοί πόροι υψηλής ενθαλπίας.....	28
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ	
	ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ	31
3.1.	Τύποι γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.....	32
3.2.	Συλλογή και μεταφορά γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας	33
3.3.	Κύκλος απευθείας χρήσης του ατμού	36
3.4.	Κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού	37
3.5.	Διαδικός κύκλος.....	39
3.6.	Συνδυασμένος κύκλος.....	42
3.7.	Κύκλος εκτόνωσης της συνολικής ροής.....	43
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ	
	ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΜΕΣΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ	43

4.1. Επιλογή τεχνικής αξιοποίησης του γεωθερμικού ρευστού προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	44
4.2. Κύκλα Ισχύος	45
4.2.1. Κύκλο Rankine.....	45
4.3. Θερμοδυναμικός Βαθμός Απόδοσης	47
4.4. Εναλλάκτες θερμότητας	49
4.4.1. Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας εναλλάκτη θερμότητας	51
4.4.2. Αποτελεσματικότητα εναλλακτών.....	52
4.5. Ατμοστρόβιλοι.....	53
4.5.1. Κατηγορίες ατμοστρόβιλων.....	55
4.5.1.1. Το πλήθος των βαθμίδων : μονοβάθμιες και πολυβάθμιες	56
4.5.1.2. Ο τύπος των πτερυγώσεων	57
4.5.1.3. Πίεση τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής.....	59
4.5.1.4. Απώλειες ατμοστρόβιλων	60
4.5.2. Βαθμός απόδοσης ατμοστρόβιλου	61
4.6. Γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	62
4.6.1. Σύγχρονη γεννήτρια.....	63
4.6.2. Ταχύτητα περιστροφής σύγχρονης γεννήτριας.....	66
4.6.3. Ονομαστική τάση, ταχύτητα και συχνότητα σύγχρονης γεννήτριας	66
4.6.4. Ρύθμιση τάσης και απώλειες σύγχρονης γεννήτριας.....	67
4.6.5. Ισχύς και ροπή στην έξοδο σύγχρονων γεννητριών.....	69
4.7. Συμπυκνωτές-Πύργοι ψύξης.....	70
4.7.1. Συμπυκνωτές	70
4.7.2. Πύργοι Ψύξης.....	71
5. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΑΚΡΟΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΒΑΛΑΣ	74
5.1. Περιγραφή Πεδίου.....	75
5.1.1. Γεωλογικά-τεκτονικά χαρακτηριστικά.....	78

5.1.2. Γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 1 (σύμφωνα με τη γεώτρηση του ΙΓΜΕ Οκτώβριος 2003 - Φεβρουάριος 2006).....	79
5.1.3. Γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 3 (σύμφωνα με τη γεώτρηση του ΙΓΜΕ Οκτώβριος 2003 - Φεβρουάριος 2006).....	81
5.2. Υπολογισμός Ισχύος γεωθερμικής μονάδας Ακροποτάμου Καβάλας.....	84
5.2. 1. Επιλογή δευτερεύοντος ρευστού λειτουργίας.....	85
5.2. 2. Παραδοχές-Θερμοδυναμικά σενάρια.....	88
5.2.2.1. 1 ^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο.....	90
5.2.2.2. 2 ^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο.....	99
5.2.2.3. 3 ^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο.....	102
5.3. Αποτελέσματα-Επιλογή βέλτιστου θερμοδυναμικού σεναρίου.....	104
5.3.1 Προτάσεις-βελτιώσεις πρώτου θερμοδυναμικού σεναρίου.....	106
5.4. Διαστασιολόγηση εξοπλισμού-Παραδοχές.....	108
5.4.1. Διαστασιολόγηση εναλλάκτη θερμότητας.....	109
5.4.2. Διαστασιολόγηση Ατμοστροβίλου.....	115
5.4.3. Διαστασιολόγηση γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	117
5.4.4. Διαστασιολόγηση συμπιεστή-πύργου ψύξης.....	120
6. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΚΡΟΠΟΤΑΜΟΥ.....	123
6.1. Ολοκληρωμένες γεωθερμικές δαπάνες της γεώτρησης.....	125
6.2. Κόστος των εναλλακτών θερμότητας και των συμπυκνωτών.....	126
6.3. Κόστος στροβίλου.....	127
6.4. Κόστος γεννητριών.....	128
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	131

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

Γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, ενώ ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της γης ανά μονάδα μήκους ονομάζεται *γεωθερμική βαθμίδα*. Η μέση της τιμή είναι $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ και χαρακτηρίζεται ως κανονική γεωθερμική βαθμίδα. Ως γεωθερμική ενέργεια, όμως, χαρακτηρίζεται κυρίως το μέρος της θερμότητας που μπορεί να εκμεταλλευτεί και να αξιοποιήσει ο άνθρωπος.

Η γεωθερμία είναι μια φυσική, ήπια και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Είναι σημαντικό ότι η γεωθερμία δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ηλιακή, αιολική) και είναι σε θέση να προσφέρει ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση. Η εκμετάλλευσή της είναι εφικτή μόνο με την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο εξασφαλίζουν ένα οικονομικό αποτέλεσμα.

Τέλος, ως θετική *γεωθερμική ανωμαλία* χαρακτηρίζεται η ύπαρξη τοπικά μιας αυξημένης θερμικής ροής (μεγαλύτερης της μέσης γήινης που ισούται $1,43\text{ }\mu\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$), με συνέπεια την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών γεωθερμικής βαθμίδας σε σχέση με την κανονική. [3]

1.1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ-ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

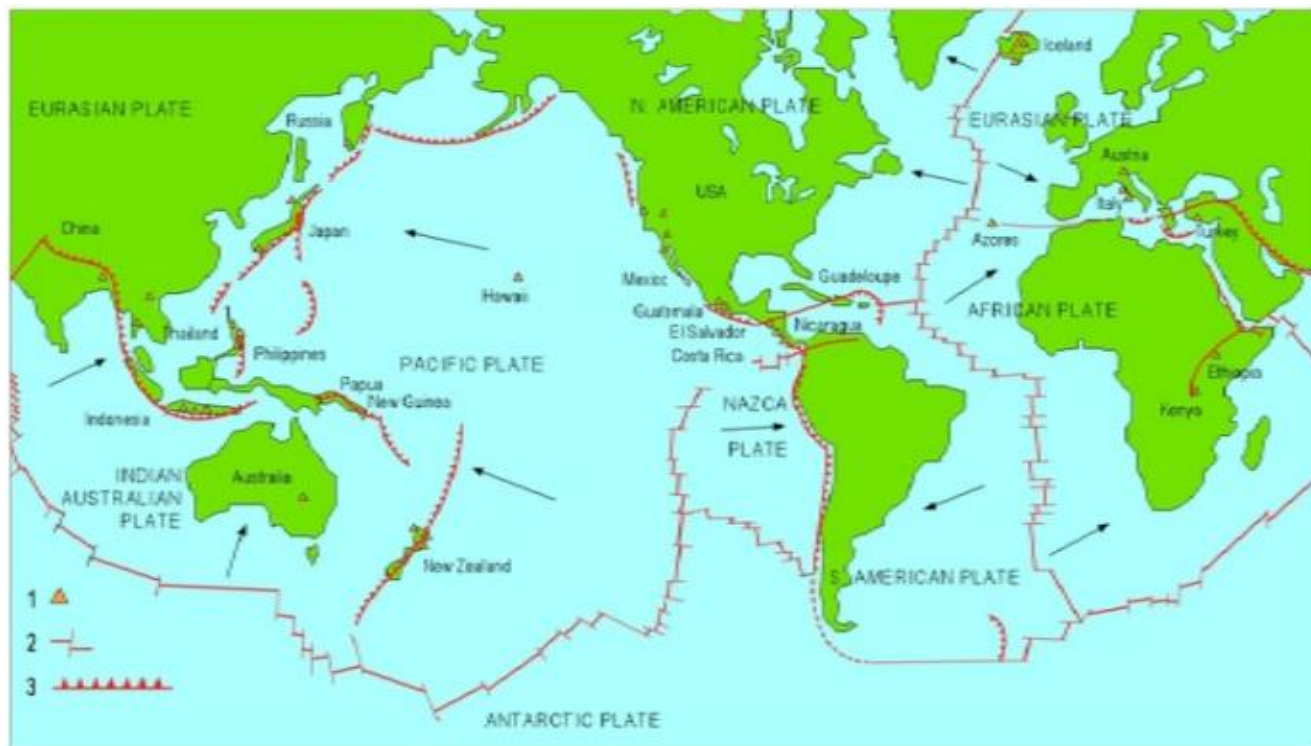
Η προέλευση της θερμότητας της γης δεν είναι γνωστή με ακρίβεια. Διάφορες θεωρίες έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται στους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην παραγωγή της. Οι κυριότεροι μηχανισμοί είναι δύο:

α) Η διάσπαση ορισμένων ραδιενεργών ορυκτών της γης, τα οποία περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής, όπως $\text{U}238$ και $\text{U}235$, $\text{Th}232$ και $\text{K}40$. Ο μηχανισμός της διάσπασης των ραδιενεργών ισωτόπων είναι πιθανόν ο σημαντικότερος μηχανισμός παραγωγής θερμικής ενέργειας (Muffler, 1993).

β) Η θερμότητα της γης προέρχεται από τις διεργασίες που οδήγησαν στη δημιουργία της, δηλαδή έχει αστρική προέλευση. [3]

γ) Από την άλλη πλευρά, η θεωρία των τεκτονικών πλακών, εκτός από τα ηφαίστεια και τη σεισμική δραστηριότητα, προσφέρει ένα καλό πλαίσιο ερμηνείας και στην περίπτωση της γεωθερμίας. Η θεωρία υποστηρίζει ότι η επιφάνεια της Γης αποτελείται από στερεές πλάκες οι οποίες κινούνται η μία σε σχέση με την άλλη (κίνηση της τάξης cm/yr), και η παραμόρφωση

περιορίζεται μόνο στα όρια μεταξύ αυτών. Οι μεσοωκεάνιες ράχες, τα ρήγματα μετασχηματισμού και οι ζώνες καταβύθισης σχηματίζουν ένα εκτεταμένο δίκτυο που χωρίζει την επιφάνεια της γης σε έξι λιθοσφαιρικές πλάκες.



Σχήμα 1. Τεκτονικές πλάκες, μεσοωκεάνιες ράχες, ωκεάνιες τάφροι, ζώνες καταβύθισης και γεωθερμικά πεδία. [1]

Εξαιτίας των τάσεων που προκαλούνται από τη γήινη θερμική μηχανή και την ασυμμετρία των ζωνών που δημιουργούν και καταστρέφουν το λιθοσφαιρικό υλικό, οι πλάκες αυτές κινούνται αργά η μία προς την άλλη, αλλάζοντας συνεχώς τη σχετική τους θέση. Η Ελλάδα βρίσκεται πάνω στην πλέον ενεργή -γεωλογικά- περιοχή της Αλπιδο-Ιμαλαϊανής ζώνης. Η αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την περιοχή του Αιγαίου, αρχίζοντας τη βύθισή της νότια της Κρήτης και στο ύψος των Κυκλάδων φθάνει σε βάθη 200 km. Εκεί προκαλεί τήξη των πετρωμάτων και δημιουργείται το μάγμα. Το λιωμένο αυτό πέτρωμα προσπαθεί να βρει διέξοδο προς τα πάνω, στις περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες ρωγμές του φλοιού της γης. Εκεί εξέρχεται στην επιφάνεια, ήπια ή εκρηκτικά, ψύχεται ή στερεοποιείται, παίρνει το χρώμα της λάβας ή της τέφρας, σχηματίζονται πετρώματα από τα οποία αποτελούνται τα ηφαίστεια ηφαιστειογενούς προέλευσης.

Τα όρια των πλακών αντιστοιχούν σε πολύ διαρρηγμένες ζώνες του φλοιού, που χαρακτηρίζονται από έντονη σεισμικότητα, μεγάλο αριθμό ηφαιστείων και, λόγω της ανόδου πολύ θερμών υλικών προς την επιφάνεια, από υψηλή γήινη θερμική ροή. Έτσι, οι πιο σημαντικές γεωθερμικές περιοχές εντοπίζονται κοντά στα όρια των πλακών.[3]

Όταν μιλάμε για γεωθερμικούς πόρους, συνήθως αναφερόμαστε στους προσβάσιμους πόρους, δηλαδή στους χρήσιμους πόρους που μπορούν να ανακτηθούν σήμερα με οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο και στους πόρους που σήμερα δεν είναι οικονομικοί, αλλά θα μπορούσαν να γίνουν οικονομικοί στο μέλλον. Επομένως, μέρη όπου η εκμετάλλευση της γεωθερμίας είναι δυνατή, είναι εκεί όπου υπάρχουν ταμιευτήρες σχετικά κοντά στην επιφάνεια, ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση σε αυτούς μέσω γεωτρήσεων. Επίσης και όπου οι γεωλογικές διεργασίες έχουν επιτρέψει στο μάγμα να ανέλθει ψηλά μέσα στον φλοιό. Τέτοιες περιοχές είναι:

α) Εκείνες όπου οι μεγάλες ωκεάνιες και κρυσταλλικές πλάκες συγκρούονται μεταξύ τους, και η μία διολισθαίνει κάτω από την άλλη (π.χ. βόρεια της Κρήτης η αφρικανική πλάκα καταβυθίζεται κάτω από την ευρωπαϊκή πλάκα).

β) Τα επίκεντρα όπου οι πλάκες απομακρύνονται ή μια από την άλλη (Ισλανδία, Ατλαντικός Ωκεανός κ.λπ.).

γ) Τα θερμά σημεία στον φλοιό όπου υπάρχει συνεχής έκλυση μάγματος στην επιφάνεια. Καθώς η πλάκα κινείται συνεχώς κατά μήκος των σημείων αυτών, δημιουργούνται αλυσίδες ηφαιστείων, όπως π.χ. στα νησιά της Χαβάης. [3]

1.2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται στις περιοχές με κανονική ή λίγο μεγαλύτερη από τη μέση γήινη γεωθερμική βαθμίδα, και κυρίως στις περιοχές γύρω από τα περιθώρια των τεκτονικών πλακών, όπου η βαθμίδα μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη της μέσης τιμής. Στην πρώτη περίπτωση, τα γεωθερμικά συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες, που συνήθως δεν ξεπερνούν τους 100°C σε οικονομικά και προσβάσιμα βάθη. Στη δεύτερη περίπτωση, οι θερμοκρασίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από 400°C. [3]

Γενικότερα, το γεωθερμικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως «ένα σύστημα» που βρίσκεται σε περιορισμένο χώρο στον ανώτερο φλοιό της γης και αποτελείται από «κινούμενο νερό», το

οποίο μεταφέρει θερμότητα από μια «πηγή» σε μια «δεξαμενή» θερμότητας, που συνήθως είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι λοιπόν, ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από τρία στοιχεία:

1. την εστία θερμότητας,
2. τον ταμιευτήρα και
3. το ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας.

1. Η εστία θερμότητας μπορεί να είναι είτε μια μαγματική διείδυση πολύ υψηλής θερμοκρασίας (>600°C) που έχει φτάσει σε σχετικά μικρά βάθη (5-10 km), είτε στα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας, η κανονική θερμοκρασία των πετρωμάτων του εσωτερικού της γης, η οποία, όπως αναφέρθηκε, αυξάνεται με το βάθος.

2. Ο ταμιευτήρας είναι ένας σχηματισμός από θερμά υδατοπερατά πετρώματα, που επιτρέπει την κυκλοφορία των ρευστών μέσα σε αυτόν και από τον οποίο τα ρευστά αντλούν θερμότητα. Πάνω από τον ταμιευτήρα βρίσκεται συνήθως ένα κάλυμμα αδιαπέραστων πετρωμάτων. Ο ταμιευτήρας πολλές φορές συνδέεται με μια επιφανειακή περιοχή τροφοδοσίας, δια μέσου της οποίας μετεωρικό ή επιφανειακό γενικά νερό κατεισδύει και αντικαθιστά μερικώς ή ολικώς τα ρευστά που απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα και εξέρχονται στην επιφάνεια με τη μορφή θερμών πηγών ή αντλούνται από γεωτρήσεις.

3. Το γεωθερμικό ρευστό συνήθως είναι νερό, στις περισσότερες περιπτώσεις μετεωρικής προέλευσης, το οποίο, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα, βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση. Συχνά το ρευστό είναι εμπλουτισμένο σε χημικά στοιχεία και αέρια, όπως CO₂, H₂S, κ.λπ. Ο μηχανισμός που διέπει τη λειτουργία των γεωθερμικών συστημάτων εν γένει ελέγχεται από τη μεταφορά θερμότητας μέσω της συναγωγής/κυκλοφορίας των ρευστών (fluid convection). [3]

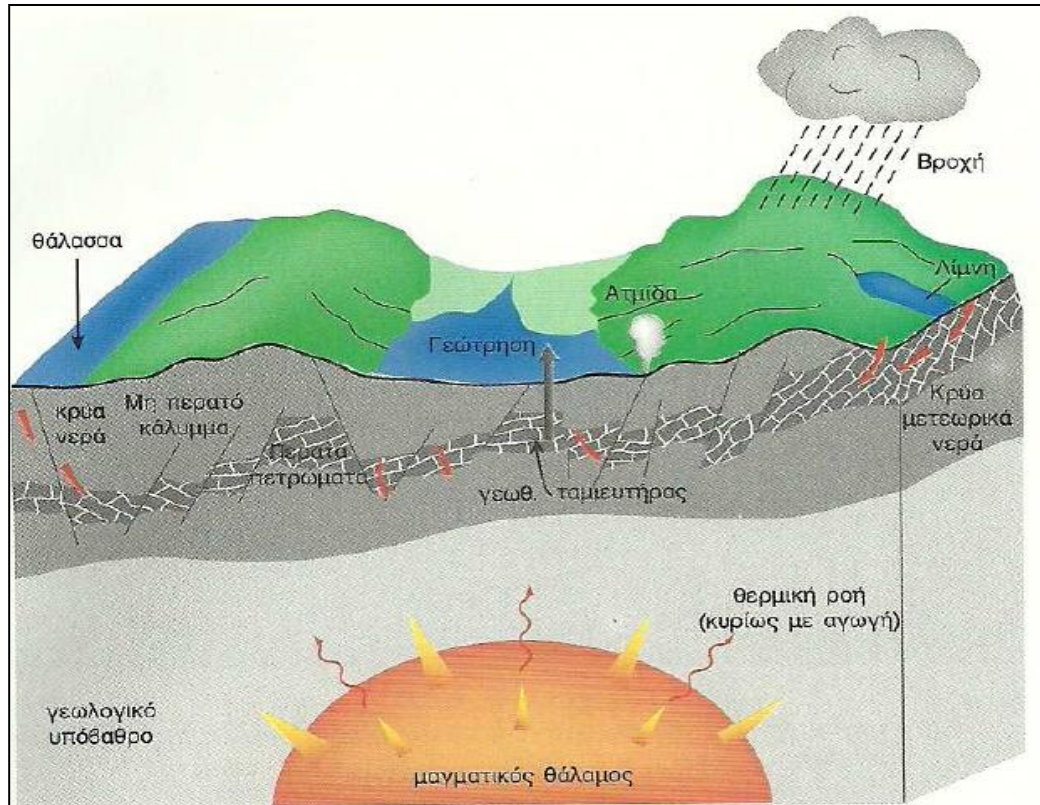
Η θερμική συναγωγή λαμβάνει χώρα λόγω της θέρμανσης και, κατ' επέκταση, της θερμικής διαστολής των ρευστών σε ένα πεδίο βαρύτητας. Η ενέργεια που προκαλεί το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ουσιαστικά η θερμότητα που προσφέρεται από την εστία στη βάση του συστήματος κυκλοφορίας. Η πυκνότητα των ρευστών που θερμαίνονται μειώνεται, οπότε αυτά παρουσιάζουν τάσεις ανόδου προς μικρότερα βάθη, ενώ αντικαθίστανται στη συνέχεια από

ρευστά μικρότερης θερμοκρασίας και μεγαλύτερης πυκνότητας, που προέρχονται από τα περιθώρια του γεωθερμικού συστήματος.

Τέλος, από τα τρία στοιχεία ενός γεωθερμικού συστήματος, η εστία θερμότητας είναι το μόνο που απαραίτητως πρέπει να έχει φυσική προέλευση. Εάν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, τα άλλα δύο στοιχεία μπορεί να είναι και τεχνητά. Για παράδειγμα, τα γεωθερμικά ρευστά που αντλούνται από τον ταμιευτήρα και χρησιμοποιούνται ως η κινητήρια δύναμη ενός γεωθερμικού ατμοστρόβιλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν μετά την ενεργειακή εκμετάλλευσή τους να επανεισαχθούν στον ταμιευτήρα μέσω συγκεκριμένων *γεωτρήσεων επανεισαγωγής (injection wells)*. Έτσι λοιπόν, η φυσική τροφοδοσία ενός ταμιευτήρα μπορεί να συνοδευθεί και να συμπληρωθεί από μια τεχνητή επανατροφοδοσία. [1], [3]

Στα γεωθερμικά πεδία συνήθως επικρατεί ο μεικτός τρόπος μετάδοσης της θερμότητας: με αγωγή (επαφή) και συναγωγή (μεταφορά), όπως παρουσιάζεται και στο [Σχήμα 2](#).

Αρχικά, η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή (επαφή) από τις μαγματικές διεισδύσεις, λόγω μεγάλου βάθους (υψηλές θερμοκρασίες, αυξημένη γεωθερμική βαθμίδα), στα υπερκείμενα μεταμορφωμένα και ρηγματωμένα πετρώματα. Ακολούθως, η θερμότητα πάλι με αγωγή (επαφή) μεταδίδεται από τα θερμαθέντα ρηγματωμένα πετρώματα στο μετεωρικό νερό που κυκλοφορεί στις ρωγμές τους. Στις περιοχές αυτές (επαφή νερού - πετρώματος) αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, επομένως, μειώνεται η πυκνότητά του σε σχέση με το υπερκείμενο κρύο νερό. Τότε, λόγω διαφοράς πυκνότητας προκαλείται ροή του νερού (μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά), έως ότου όλος ο όγκος του στον ταμιευτήρα αποκτήσει μια θερμοκρασιακή ισορροπία. [3]



Σχήμα 2. Μοντέλο δημιουργίας ενός γεωθερμικού πεδίου που παράγει ατμό και τα κύρια συστατικά του (από πάνω προς τα κάτω): η περιοχή επαναφόρτισης, το αδιαπέρατο κάλυμμα, ο ταμειυτήρας ρευστών και η πηγή ενέργειας. διαπιστώνεται η ανανεωσιμότητα του γεωθερμικού συστήματος, αφού τροφοδοτείται συνεχώς από επιφανειακά νερά [38].

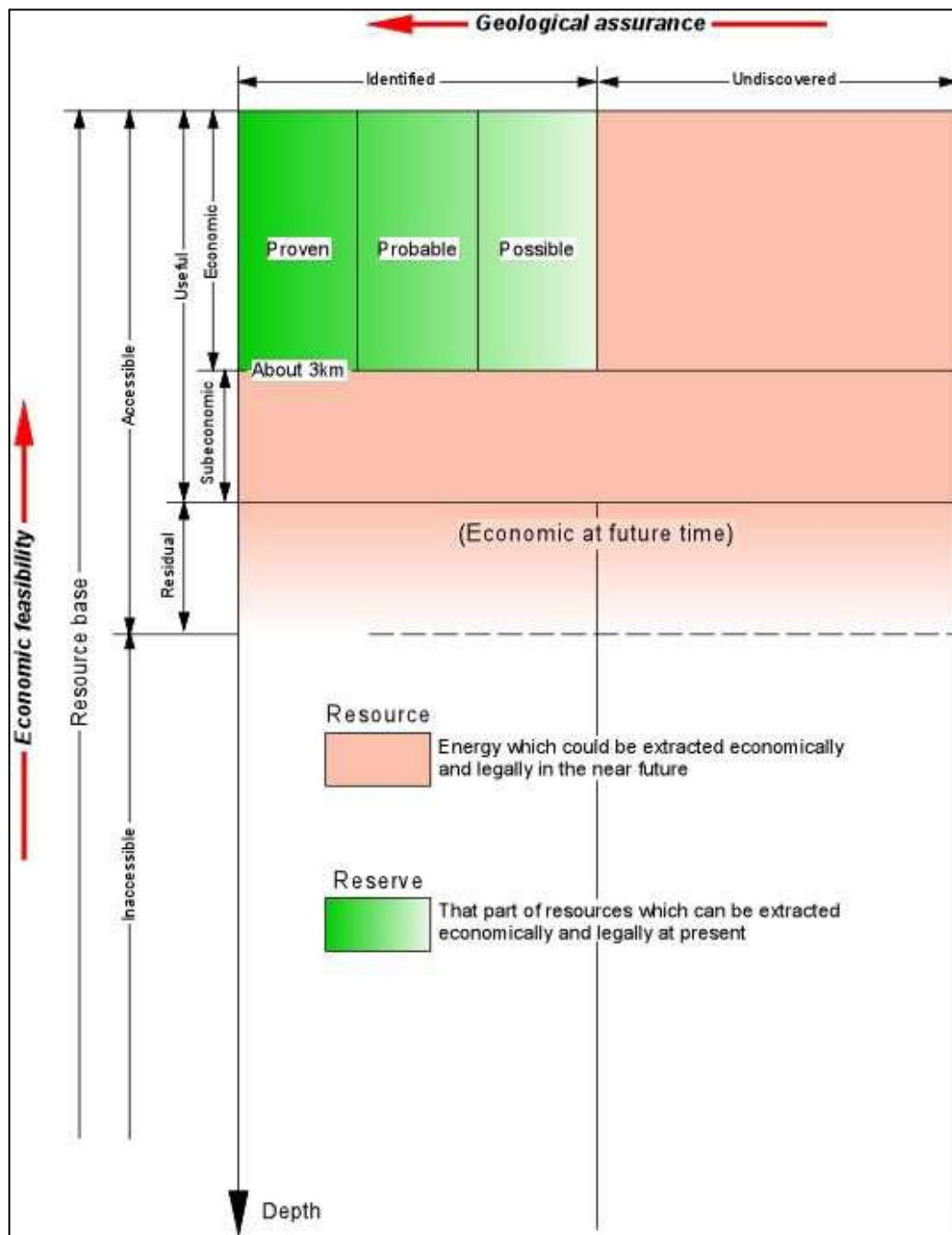
1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορα κριτήρια, όπως είναι:

- το είδος των γεωθερμικών πόρων,
- ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών,
- ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά,
- το είδος της εστίας θερμότητας,
- αν κυκλοφορούν ή όχι ρευστά στον ταμειυτήρα, κ.ά.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια, η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως υψηλής θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες πάνω από 150° C), μέσης

θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες 100 - 150° C) και χαμηλής θερμοκρασίας (για θερμοκρασίες μικρότερες από 100° C). [4]



Σχήμα 3. Γραφική παράσταση που δίνει τις διάφορες κατηγορίες των γεωθερμικών πόρων (Από Muffler & Cataldi, 1978). Ο κάθετος άξονας παριστάνει το βαθμό της οικονομικής επιτευξιμότητας, ενώ ο οριζόντιος το βαθμό της γεωλογικής βεβαιότητας. [3]

Σύμφωνα με τους Muffler & Cataldi (1978), ο γενικός όρος «γεωθερμικός πόρος» αναφέρεται στην προσβάσιμη βασική πηγή (accessible resource base). Η προσβάσιμη βασική πηγή είναι

ουσιαστικά όλη η θερμική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη κάτω από συγκεκριμένη περιοχή μεταξύ της επιφάνειας της γης και ενός συγκεκριμένου βάθους στο φλοιό. Αυτή η ενέργεια ξεκινά από την τοπική μέση ετήσια θερμοκρασία. Η προσβάσιμη πηγή περιλαμβάνει τον *ωφέλιμο προσβάσιμο πόρο (useful accessible resource base)*, εκείνο δηλαδή το τμήμα της γεωθερμικής ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί με οικονομικά συμφέροντα και νόμιμο τρόπο, κάποια στιγμή στο σχετικά άμεσο μέλλον (μέσα σε λιγότερο από 100 χρόνια). Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τους *ταυτοποιημένους οικονομικά συμφέροντες πόρους (identified economic resources)*, οι οποίοι είναι γνωστοί και ως *αποθέματα (reserves)* και αναφέρονται στις ποσότητες της γεωθερμικής ενέργειας μιας συγκεκριμένης περιοχής που μπορούν να αξιοποιηθούν με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με τις άλλες πηγές ενέργειας, και οι οποίοι πόροι είναι γνωστό ότι υπάρχουν και έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα γεωτρητικών, γεωχημικών, γεωφυσικών και άλλων γεωλογικών ερευνών-μελετών.

Το [Σχήμα 3](#) παρουσιάζει σε γραφική μορφή τους παραπάνω και άλλους όρους, που μπορούν να χρησιμοποιούνται από τους ειδικούς στη γεωθερμία.

Το πλέον συνηθισμένο κριτήριο για την ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων είναι αυτό που βασίζεται στην **ενθαλπία** των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία λειτουργούν ως ο φορέας «μεταφοράς» της θερμότητας από τα βαθιά και θερμά πετρώματα προς την επιφάνεια. Η *ενθαλπία*, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής «αξίας» τους. Άλλωστε, η λέξη ενθαλπία προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη ενθάλπω που σημαίνει θερμαίνω [5]. Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους. Στον Πίνακα που ακολουθεί, αναφέρονται οι χαρακτηριστικοί τρόποι ταξινόμησης, όπως αυτοί προτάθηκαν από διάφορους συγγραφείς. Όπως ακριβώς και για την ορολογία, μια κοινώς αποδεκτή μέθοδος ταξινόμησης θα βοηθούσε στην αποφυγή συγχύσεων και παρανοήσεων. Όμως, μέχρι να γίνει αυτό, θα πρέπει κάθε φορά και κατά περίπτωση να δηλώνουμε τις τιμές των θερμοκρασιών ή το εύρος τους, διότι όροι όπως «χαμηλή», «ενδιάμεση» ή «υψηλή» δεν έχουν πάντα την ίδια ερμηνεία και πολλές φορές είναι παραπλανητικοί. [4]

ΕΝΘΑΛΠΙΑ	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Χαμηλή Ενθαλπία	< 90	<125	<100	≤150	≤190
Μέση Ενθαλπία	90-150	125-225	100-200	-	-
Υψηλή Ενθαλπία	>150	>225	>200	>150	>190

Πίνακας 1 Ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων (°C) [4]

(a) Muffler and Cataldi (1978).

(b) Hochstein (1990).

(c) Benderitter and Cormy (1990).

(d) Nicholson (1993).

(e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων, διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων:

1. Τα *υδροθερμικά συστήματα* ή πόροι (hydrothermal systems or resources), τα οποία είναι υπόγεια φυσικά, θερμά ρευστά και βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες. Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με ανοδική κυκλοφορία του νερού (υγρό ή ατμός), το οποίο θερμαίνεται από μία εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης με τη μορφή θερμών εκδηλώσεων. Τα συστήματα αυτά συχνά ταυτίζονται με το σύνολο σχεδόν των γεωθερμικών πεδίων, αφού σήμερα είναι ουσιαστικά τα μόνα συστήματα που αξιοποιούνται. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και συστήματα συναγωγής (convective systems) ή *δυναμικά συστήματα*, επειδή η θερμότητα μεταφέρεται με το μηχανισμό της συναγωγής. Άλλα υδροθερμικά συστήματα μεταφοράς οφείλονται στην κυκλοφορία μετεωρικού νερού μέσω ρηγμάτων και περατών σχηματισμών, όπου, λόγω μεγάλου βάθους ή μαγματικών διεισδύσεων, θερμαίνεται και ακολουθεί ανοδική πορεία. [1]

2. Τα *γεωπιεσμένα συστήματα* (geopressed systems), τα οποία αποτελούνται από ρευστά που έχουν εγκλωβιστεί από μη περατά πετρώματα σε μεγάλο βάθος. Μέσα στους περατούς ιζηματογενείς σχηματισμούς υπάρχει ζεστό νερό που παγιδεύτηκε κατά την απόθεση των ιζημάτων, εγκλωβισμένο από στεγανά περιβάλλοντα πετρώματα, υπό πίεση αρκετά μεγαλύτερη

της υδροστατικής που αντιστοιχεί στο βάθος. Περιέχουν επίσης και μεγάλες ποσότητες μεθανίου. Παρόλο που τεχνολογικά η εκμετάλλευσή τους φαίνεται εφικτή, το μεγάλο κόστος που προκύπτει από την εκμετάλλευση σε μεγάλα βάθη και από τη χρονική διάρκειά της, καθιστούν τους γεωθερμικούς ταμειυτήρες υπό πίεση μη αξιοποιήσιμους. [1]

3. Τα *μαγματικά συστήματα* (magma systems), στα οποία η απόληψη της θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις, που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος, γίνεται με συμβατική τεχνολογία και μικρό σχετικά κόστος. [1]

4. Τα συστήματα *βαθιών θερμών-ξηρών πετρωμάτων* (hot dry rock systems), όπου η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή, όμως η έλλειψη ρηγματώσεων δεν επιτρέπει την κυκλοφορία και ύπαρξη νερού. Το σύστημα αυτό, συνήθως υψηλής θερμοκρασίας, επιτρέπει την εισαγωγή κρύου νερού από γεώτρηση, τη θέρμανση του στον τεχνικό ταμειυτήρα και την εξαγωγή ως ζεστού νερού από άλλη γεώτρηση. Αν και τεχνολογικά φαίνεται εφικτή η αξιοποίηση των βαθιών θερμών-ξηρών πετρωμάτων, η εκτίμηση της θερμικής απόδοσης του συστήματος και του ρυθμού απωλειών πρέπει να αξιολογηθούν ώστε να καταστεί οικονομικά βιώσιμη μια τέτοια εκμετάλλευση. [1]

5. Τα συστήματα *αγωγιμότητας*, τα οποία αναφέρονται σε γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας που θερμαίνονται με αγωγή και εμφανίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες. [1]

1.4. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Η γεωθερμική ενέργεια, όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες :

- Χαμηλής ενθαλπίας (<90 °C)
- Μέσης ενθαλπίας (90-150 °C)
- Υψηλής ενθαλπίας (>150 °C)

Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατεστημένη ισχύς των γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο ανέρχεται σε 6.000 MWe περίπου.

Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης ενθαλπίας βρίσκεται σε διεθνές επίπεδο πολλές εφαρμογές στη γεωργία, τη γεωργική βιομηχανία, την κτηνοτροφία –ιχθυοκαλλιέργεια και τη θέρμανση χώρων.

Η τεχνολογία που απαιτείται για την εκμετάλλευση των γεωθερμικών ρευστών αυτής της κατηγορίας έχει αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό και είναι ευρύτατα γνωστή [7]. Οι άμεσες χρήσεις της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών για θέρμανση είναι οι παλαιότερες, οι πιο πολύπλευρες και οι πλέον συνηθισμένες μορφές αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας. Η λουτροθεραπεία, η θέρμανση χώρων και η τηλεθέρμανση, οι αγροτικές εφαρμογές, οι υδατοκαλλιέργειες και κάποιες βιομηχανικές χρήσεις είναι οι πιο γνωστές μορφές χρήσεις, όμως οι αντλίες θερμότητας αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή αξιοποίησης (12,5 % της συνολικής χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας κατά το έτος 2000). Υπάρχουν φυσικά και κάποιοι άλλοι μικρότερης κλίμακας τρόποι εκμετάλλευσης της γεωθερμίας, οι οποίοι όμως δεν είναι τόσο συνηθισμένοι.

Ο **γεωθερμικός κλιματισμός** (θέρμανση και δροσισμός) χώρων άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά από τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας. Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την απόληψη και χρήση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου των σωμάτων χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι, τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού, κλπ.

Η **τηλεθέρμανση**, δηλαδή η περιφερειακή θέρμανση οικισμών και πόλεων ευρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες. Με την εφαρμογή τηλεθέρμανσης με γεωθερμική ενέργεια δύνανται να δημιουργηθούν ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες εκμετάλλευσης διότι η παραγωγή θερμικής ενέργειας εξασφαλίζεται από εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους κατασκευής, συντηρήσεως και, κυρίως, λειτουργίας.

Οι **αγροτικές εφαρμογές** της γεωθερμίας συνίστανται κυρίως στις ανοικτές καλλιέργειες και τη θέρμανση θερμοκηπίων. Το θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ανοικτές καλλιέργειες για την άρδυσή τους και/ή τη θέρμανση του εδάφους. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της

άρδευσης με χλιαρό νερό εντοπίζεται στο γεγονός ότι, για να επιτευχθεί κάποια αξιόλογη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους θα πρέπει οι μεγάλες ποσότητες νερού να έχουν θερμοκρασία τόσο χαμηλή ώστε να μην προκαλούν ζημιές στις αρδευόμενες καλλιέργειες. Πιθανή λύση αυτού του προβλήματος θα ήταν η χρήση υπεδάφινων αρδευτικών συστημάτων σε συνδυασμό με ένα υπόγειο σύστημα σωλήνωσης, το οποίο θα λειτουργεί ως το μέσο θέρμανσης του εδάφους. Η θέρμανση του εδάφους με υπεδάφινους σωλήνες χωρίς την ύπαρξη του αρδευτικού συστήματος θα προκαλούσε μείωση της θερμικής αγωγιμότητάς του, εξαιτίας της μείωσης της υγρασίας γύρω από τους σωλήνες, και κατ' επέκταση θα οδηγούσε σε θερμική μόνωση. Η βέλτιστη λύση φαίνεται λοιπόν ότι θα ήταν ο συνδυασμός θέρμανσης εδάφους και άρδευσης.

Η πιο συνηθισμένη γεωθερμική εφαρμογή στον αγροτικό τομέα είναι η **θέρμανση θερμοκηπίων**, η οποία αναπτύχθηκε ιδιαίτερα σε πολλές χώρες. Η εκτός εποχής καλλιέργεια κηπουρικών, οπωρικών και ανθοκομικών προϊόντων ή η ανάπτυξή τους σε περιοχές με μη ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί σήμερα να βασιστεί σε μια ευρέως εφαρμοσμένη τεχνολογία. Υπάρχουν ποικίλες λύσεις για την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης των φυτών, οι οποίες βασίζονται στη χρήση της καλύτερης θερμοκρασίας για το κάθε είδος, στη σωστή ένταση του φωτός, στην ιδανική συγκέντρωση CO₂ μέσα στο θερμοκήπιο, στην κατάλληλη υγρασία του εδάφους και του αέρα και στην κίνηση του αέρα μέσα στα θερμοκήπια. Η χρήση των γεωθερμικών ρευστών για τη θέρμανση ενός θερμοκηπίου μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά του έξοδα, τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις φτάνουν το 35% του κόστους παραγωγής (οπωρικά, άνθη, διακοσμητικά φυτά και δενδρύλλια). [6]



Σχήμα 4. Σύστημα θέρμανσης θερμοκηπίων με γεωθερμία [31]

Η εκτροφή **κτηνοτροφικών ειδών** και οι υδρόβιοι οργανισμοί, όπως ακριβώς και τα φυτά, επωφελούνται σημαντικά από τις άριστες συνθήκες της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, τόσο ως προς την ποιότητα όσο και ως προς την ποσότητα παραγωγής τους. Σε πολλές περιπτώσεις τα γεωθερμικά νερά θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ακόμη επικερδέστερα, μέσα από τη συνδυασμένη χρήση τους σε κτηνοτροφικές μονάδες και γεωθερμικά θερμοκήπια. Η ενέργεια που χρειάζεται για τη θέρμανση μιας μονάδας εκτροφής ζώων είναι περίπου το 50% αυτής που απαιτείται για ένα θερμοκήπιο ίδιας επιφάνειας, οπότε η κλιμακωτή χρήση των γεωθερμικών ρευστών θεωρείται ενδεδειγμένη. Η εκτροφή ζώων σε ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας συνεισφέρει στη βελτίωση της υγείας τους, ενώ η χρήση των θερμών ρευστών θα μπορούσε να επεκταθεί στον καθαρισμό και την εξυγίανση των χώρων τους, αλλά και στην ξήρανση των αποβλήτων τους. [6]

Οι **υδατοκαλλιέργειες**, οι οποίες στην ουσία αποτελούν την ελεγχόμενη εκτροφή υδρόβιων οργανισμών, αποκτούν σήμερα ολοένα και μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της αυξημένης ζήτησής τους στην αγορά. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας εκτροφής των ειδών αυτών είναι πολύ πιο σημαντικός σε σχέση με τα είδη που αναπτύσσονται στην ξηρά (θηλαστικά και πτηνά). Διατηρώντας με τεχνητά μέσα τη θερμοκρασία σε βέλτιστα επίπεδα, καθίσταται δυνατή και η εκτροφή εξωτικών ειδών, η βελτίωση της παραγωγής ή ακόμη και ο διπλασιασμός του αναπαραγωγικού κύκλου σε μερικά είδη. Τα είδη που κατά παράδοση εκτρέφονται σε τέτοιες μονάδες είναι: κυπρίνος, γατόψαρο, λαβράκια, κέφαλοι, χέλια, σολομοί, μουρούνες, γαρίδες, αστακοί, караβίδες, κάβουρες, στρείδια, μύδια, χτένια κλπ. [6]

Οι θερμοκρασίες που απαιτούνται για τα υδρόβια είδη κυμαίνονται κατά βάση μεταξύ 20 και -30°C. Το μέγεθος των εγκαταστάσεων εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία των ρευστών, τη θερμοκρασία που απαιτείται στις δεξαμενές εκτροφής και από τις θερμικές απώλειες των τελευταίων. [6]

Η καλλιέργεια της σπιρουλίνας θεωρείται επίσης μια μορφή υδατοκαλλιέργειας. Λόγω της υψηλής διατροφικής του αξίας, αυτό το μονοκυτταρικό, σπειροειδές και γαλάζιο-πράσινο φίκος, συχνά αποκαλείται «υπερ-τροφή». Επίσης, έχει προταθεί ως λύση στο πρόβλημα της ασιτίας στις φτωχότερες περιοχές του πλανήτη, όμως για την ώρα χαρακτηρίζεται στο εμπόριο απλά ως «συμπλήρωμα διατροφής». Η σπιρουλίνα καλλιεργείται σήμερα σε αρκετές τροπικές και υπο-τροπικές χώρες, σε λίμνες ή τεχνητές δεξαμενές, όπου επικρατούν ιδανικές συνθήκες για τη

γρήγορη ανάπτυξή της (μέσα σε ένα ζεστό, αλκαλικό περιβάλλον, πλούσιο σε CO₂). Παρόλα αυτά, σε αρκετές χώρες των εύκρατων ζωνών η γεωθερμική ενέργεια έχει ήδη αξιοποιηθεί επιτυχώς σε τέτοιες υδατοκαλλιέργειες, για την ανάπτυξη της *spirulina* σε ετήσια βάση, παρέχοντας την απαραίτητη θερμότητα αλλά και το CO₂. [6]

Τα γεωθερμικά ρευστά, σε ολόκληρο το θερμοκρασιακό τους εύρος, είτε πρόκειται για ατμό είτε για νερό, μπορούν να αξιοποιηθούν και σε **βιομηχανικές εφαρμογές**. Οι διάφορες δυνατές μορφές αξιοποίησης περιλαμβάνουν θέρμανση κατά τη διεργασία, εξάτμιση, ξήρανση, απόσταξη, αποστείρωση, πλύσιμο, λιώσιμο πάγων και ανάκτηση αλάτων. Η Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με γεωθερμικά ρευστά σαν θερμαντικό μέσο δύνανται να επιτευχθεί με τη μέθοδο της πολυσταδιακής εξάτμισης εν κενό (MES). Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αφαλάτωση πρέπει η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών να είναι τουλάχιστον 60 °C. Η θερμοκρασία απόρριψης σχεδιάζεται να είναι 40-50 °C. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για περίπτωση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 75 °C και παροχής 100 m³/h επιτυγχάνεται αφαλάτωση 600 m³/h την ημέρα, σε οκτώ δράσεις, με εκτιμώμενο κόστος επένδυσης 550.000,000 δρχ. και κόστος αφαλάτωσης νερού περί της 350 δρχ./m³. Για να θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα μία εκμετάλλευση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας χαμηλής ενθαλπίας πρέπει το κόστος της γεωθερμικής ενέργειας να αντιστοιχεί το πολύ στο 60% του κόστους αφαλάτωσης με πετρέλαιο. [6]

Η χρήση της γεωθερμικής θερμότητας κατά τη βιομηχανική επεξεργασία διάφορων προϊόντων εφαρμόζεται σε 19 χώρες, όπου οι εγκαταστάσεις είναι γενικά πολύ μεγάλες και η κατανάλωση ενέργειας υψηλή. Άλλα συγκεκριμένα παραδείγματα βιομηχανικών εφαρμογών είναι η εμφιάλωση νερού και ανθρακούχων ποτών, η παραγωγή χαρτιού, τμημάτων αυτοκινήτων, η ανάκτηση λαδιού, η παστερίωση γάλακτος, η χρήση στη βυρσοδεψία, η χημική ανάκτηση προϊόντων, η παραγωγή με διαχωρισμό του CO₂, η χρήση σε πλυντήρια, η ξήρανση γης διατόμων, η επεξεργασία πολτού και χαρτιού και η παραγωγή βορικών αλάτων και βορικού οξέος. [6]

Υπάρχουν επίσης εφαρμογές για χρήση των γεωθερμικών ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας για λιώσιμο πάγου και **αντιπαγετική προστασία** πεζοδρομίων, δρόμων και πλατειών, ως και

σχέδια για τη διάλυση της ομίχλης σε κάποια αεροδρόμια. Στην Ιαπωνία λειτουργεί μια μικρή βιομηχανία που χρησιμοποιεί τις λευκαντικές ιδιότητες του υδρόθειου (H₂S) των γεωθερμικών νερών για την παραγωγή πρωτοποριακών και εξαιρετικής ποιότητας υφασμάτων για γυναικεία ρούχα. Στην ίδια χώρα, εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο μια τεχνική για τη βιοτεχνική-βιομηχανική παρασκευή ενός ελαφρού «γεωθερμικού ξύλου», το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για ειδικές κατασκευές. Κατά την επεξεργασία του κανονικού ξύλου με το νερό μιας γεωθερμικής πηγής, τα πολυσακχαρίδιά του υφίστανται υδρόλυση, οπότε το υλικό γίνεται πιο πορώδες και συνεπώς ελαφρύτερο [6].

2. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ –Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η *ενθαλπία*, η οποία σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι είναι ανάλογη της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να εκφράσει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών και δίνει μια γενική εικόνα της ενεργειακής «αξίας» τους. Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας πίνακας θερμοκρασίας-ενθαλπίας του νερού. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού, τόσο αυξάνεται και η ενθαλπία του.

Temperature (°C)	Enthalpy (cal g ⁻¹)
50	50.0
75	75.0
100	100.1
125	125.4
150	151.0
175	177.0
200	203.6
225	230.9
250	259.2
275	289.0
300	321.0

Σχήμα 5. Σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας υγρού νερού (Πηγή: Geothermal Energy-An alternative resource for the 21st century) [10]

2.1. Πιθανοί γεωθερμικοί πόροι μέσης ενθαλπίας στην Ελλάδα

Σημαντικός αριθμός γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας (25-90°C) έχουν εντοπισθεί σε όλη την Ελλάδα. Στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη βρέθηκαν ήδη αξιόλογα «ρηγά»

γεωθερμικά πεδία σε ιζηματογενείς λεκάνες και είναι δυνατόν να προσδιορισθούν θερμότερα ρευστά μέσης ενθαλπίας σε μεγαλύτερα βάθη (έως 1-3 km), οπότε να συνδυασθούν με κατασκευή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής «δυναμικού κύκλου» στην ίδια περιοχή. [3]

Παρά το μεγάλο γεωθερμικό δυναμικό της χώρας, η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Δεν υπάρχει καμιά εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής. Στις άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας στην Ελλάδα περιλαμβάνονται η λουτροθεραπεία, η θέρμανση θερμοκηπίων και εδάφους, οι υδατοκαλλιέργειες, η θέρμανση χώρων και η ξήρανση αγροτικών προϊόντων, ενώ σημαντική ανάπτυξη παρουσιάζεται τελευταία στην εφαρμογή συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) στην μακροχρόνια ερευνητική 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 επιβεβαίωσαν αυτήν την ερευνητική προσπάθεια.

Στα γεωγραφικά όρια της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης με τις συστηματικές μελέτες και έρευνες του Ι.Γ.Μ.Ε. έχουν εντοπισθεί σημαντικά γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες ως 95°C, και πιθανά, σε βαθύτερους και οικονομικά προσεγγίσιμους ορίζοντες, ως 150°C. [3]

Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας που έχουν εντοπισθεί από το Ι.Γ.Μ.Ε. στην περιοχή είναι τα ακόλουθα: (Σχήμα 6):

- Γεωθερμικό πεδίο Αριστηνού - Αλεξανδρούπολης Ν. Έβρου, με ρευστά θερμοκρασίας 30-90°C
- Γεωθερμικό πεδίο Κρωβύλης - Σαππών Ν. Ροδόπης, με νερά θερμοκρασίας 30- 40oC
- Γεωθερμικό πεδίο Λίμνης Μητρικού Ν. Ροδόπης, με νερά θερμοκρασίας 30-40oC
- Γεωθερμικό πεδίο Νέας Κεσσάνης Ν. Ξάνθης, με ρευστά θερμοκρασίας μέχρι 83oC
- Γεωθερμικό πεδίο Νέου Ερασμίου - Μαγγάνων Ν. Ξάνθης, με νερά θερμοκρασίας μέχρι 68oC
- Γεωθερμικό πεδίο Ερατεινού Ν. Καβάλας, με νερά θερμοκρασίας μέχρι 70oC
- Γεωθερμικό πεδίο Ακροποτάμου Ν. Καβάλας, με ρευστά θερμοκρασίας μέχρι 90oC.

Εκτός από προαναφερθέντα πεδία, τα οποία έχουν αναγνωρισθεί και έχουν χαρακτηριστεί ως «βεβαιωμένα και πιθανά γεωθερμικά πεδία» με βάση Υπουργικές αποφάσεις, δημοσιευμένες στα Φ.Ε.Κ. 1012/τ.Β'/19-7-2005 («Χαρακτηρισμός και υπαγωγή σε κατηγορίες των Γεωθερμικών Πεδίων της Χώρας») σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι ακόλουθες περιοχές της Θράκης (Σχήμα 6):

- Γεωθερμική περιοχή Φυλακτού - Τυχερού Ν. Έβρου, με ρευστά θερμοκρασίας έως 37°C σε βάθη 138-400 m.
- Νήσος Σαμοθράκη, με πολλές θερμές πηγές, των οποίων τα νερά έχουν θερμοκρασίες 35-58°C, καθώς και με τρεις ρηχές γεωτρήσεις (βάθους 40-120 m) μέσα στον χώρο των θερμών πηγών με θερμά ρευστά θερμοκρασίας μέχρι 100°C.



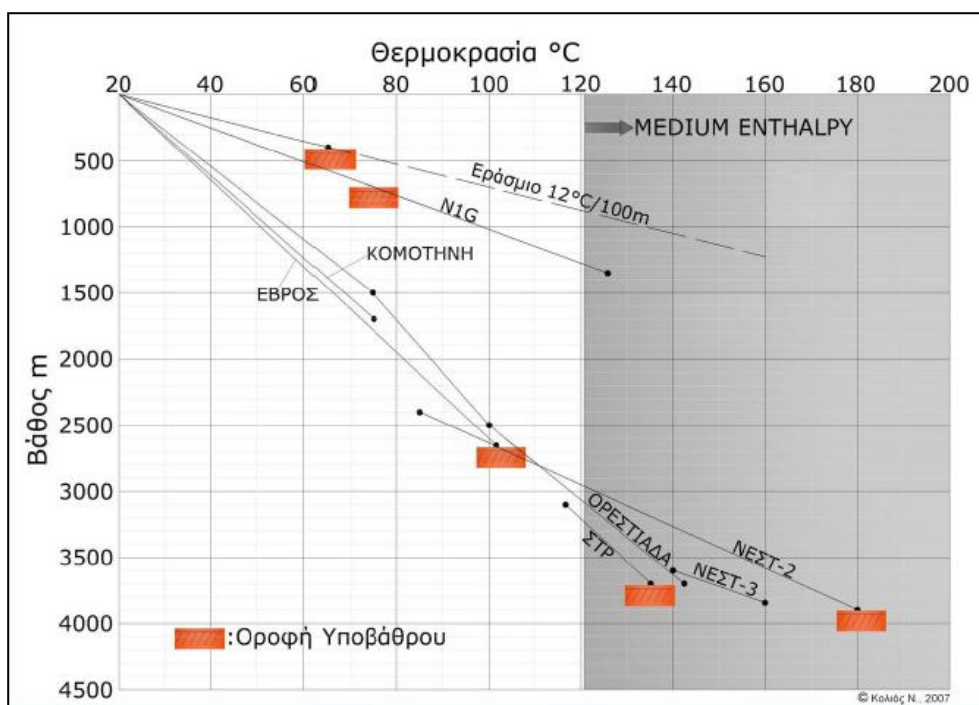
Σχήμα 6. Χάρτης της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης με τις θέσεις των εντοπισθέντων, βεβαιωμένων και πιθανών, γεωθερμικών πεδίων (Αρίστηνου, Σαπτιών - Κρωβύλης, Λίμνης Μητρικού, Ν. Κεσσάνης Ν. Εράσμιου, Ερατεινού, Ακροποτάμου) καθώς και των γεωθερμικών περιοχών Τυχερού και Νήσου Σαμοθράκης.[3]

Το άμεσα απολήψιμο θερμοενεργειακό δυναμικό στις ιζηματογενείς λεκάνες του Δέλτα του Νέστου, της Ξάνθης - Κομοτηνής και του Έβρου φαίνεται να ξεπερνά σε ισχύ τα 100 MWth, με

σοβαρές δυνατότητες αύξησης της ισχύος αυτής στο άμεσο μέλλον στα 500 MWh, διαμορφώνοντας δυνατότητες άμεσης αξιοποίησης σε μία σειρά ενεργοβόρων παραγωγικών διαδικασιών και συμβάλλοντας έτσι στο ενεργειακό ισοζύγιο της περιφέρειας και της χώρας.[3]

Στην Ελλάδα έχουν γίνει έρευνες από το Ινστιτούτο Γεωθερμικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) και παρουσιάζονται αποτελέσματα γεωθερμικής βαθμίδας των βαθιών γεωτρήσεων που έχει πραγματοποιήσει η Δ.Ε.Π. και το Ι.Γ.Μ.Ε. (Σχήμα 7). Έχουν βρεθεί πιθανοί γεωθερμικοί πόροι μέσης ενθαλπίας στις παρακάτω περιοχές:

- Λεκάνη Δέλτα Νέστου (Γεωθερμικό πεδίο Ερατεινού)
- Λεκάνη Δέλτα Έβρου (Γεωθερμικό πεδίο Αριστηνού)
- Λεκάνη Στρυμόνα
- Νησιά Ανατολικού Αιγαίου (Σαμοθράκη, Λέσβος, Χίος)
- Γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμου Καβάλας (ευρύτερη περιοχή λεκάνης Στρυμόνα)



Σχήμα 7. Αποτελέσματα γεωθερμικής βαθμίδας βαθιών γεωτρήσεων στην Ελλάδα.[11]

Η έρευνα στην Ελλάδα νέων γεωθερμικών πεδίων συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό και συνεχώς ανακαλύπτονται νέα βεβαιωμένα και πιθανά γεωθερμικά πεδία, μερικές περιοχές εμφανίζονται

στο Σχήμα 8. Οι νέες περιοχές εμφανίζονται με κίτρινο, σαφώς δεν είναι όλες μέσης ενθαλπίας, και είναι:

- Αλμώπια Ν.Πέλλας
- Αλεξάνδρεια Ημαθίας
- Βόλβη Θεσσαλονίκης
- Λεκάνη Σπερχειού
- Χερσόνησος Λιχάδων Βόρεια Εύβοια
- Ρίζα Αντιρρίου
- Θυμιανά Χίου



Σχήμα 8. Νέα βεβαιωμένα και πιθανά γεωθερμικά πεδία στην Ελλάδα [3]

2.2. Γεωθερμικοί πόροι υψηλής ενθαλπίας

Γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν εντοπισθεί στη Μήλο και Νίσυρο, με ρευστά θερμοκρασίας μέχρι 325 και 350°C αντίστοιχα, ενώ περιοχές ευνοϊκές για τον εντοπισμό γεωθερμικών ρευστών μέσης ή και υψηλής ενθαλπίας είναι η Κίμωλος, η Σαντορίνη, το Σουσακι, τα Μέθανα, η Κως, η Λέσβος, η Χίος, η Σαμοθράκη, το Δέλτα του Νέστου, το Δέλτα του Έβρου κ.ά.

Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω παρατίθενται περιοχές της Ελλάδας όπου υπάρχουν ή εικάζεται ότι υπάρχουν γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας, οι οποίες απεικονίζονται στο [Σχήμα 9](#).

Στο γεωθερμικό πεδίο **Μήλου**, μετά από πολύπλευρες έρευνες του ΙΓΜΕ προσδιορίστηκαν το 1973 συγκεκριμένες θέσεις για βαθιές γεωτρήσεις. Η ΔΕΗ έκανε (1975-1981) 5 συνολικά γεωτρήσεις σε βάθος 1.000 - 1.400 μέτρων, που παράγουν συνολικά 350 t/h (μίγμα ρευστών, νερού και ατμού σε σχέση 1:1 περίπου). Εγκατέστησε (1985) μια πειραματική γεωθερμοηλεκτρική μονάδα ισχύος 2 MW η οποία έδειξε ότι το νερό του μίγματος που διαχωρίζεται έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα, που δημιουργούν σοβαρά αλλά όχι ανυπέρβλητα προβλήματα διάβρωσης και περιλίθωσης. Το γεωθερμικό δυναμικό της Μήλου σε ρευστά υψηλής ενθαλπίας κατά μία πρώτη εκτίμηση ανέρχεται σε 120 MW τουλάχιστον. Δεν αποκλείουν όμως οι ειδικοί να υπερβεί και τα 200 MWe. [7]

Στο Γεωθερμικό πεδίο **Νισύρου**, ύστερα από Πολύπλευρες έρευνες στην περίοδο 1972-81, εντοπίστηκαν οι θέσεις για τις δύο πρώτες γεωτρήσεις έρευνας - παραγωγής. Οι γεωτρήσεις αυτές εκτελέσθηκαν κατά το 1982-83. Η πρώτη, παρόλο που συνάντησε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (400 οC) αλλά και πολύ δύσκολες συνθήκες ρευστών παράγει σήμερα μικρές μόνο ποσότητες μίγματος ατμών και νερού από το "Ρηχότερο" ταμιευτήρα των 1.500 μ. (Ο βαθύτερος ταμιευτήρας στα 1.800 μ. έχει εγκαταλειφθεί λόγω ανυπέρβλητων τεχνικών προβλημάτων κατά την κατασκευή της γεώτρησης). Η δεύτερη γεώτρηση παράγει από βάθος 1.500 μ. (όπου η θερμοκρασία είναι περίπου 350 °C) μίγμα ατμού και νερού. Η παραγωγή ατμού ανέρχεται περίπου στους 23 t/h και ισοδυναμεί με 3 MW . Το συνολικό γεωθερμικό δυναμικό της Νισύρου κατά μία πρώτη εκτίμηση ανέρχεται σε 40 MW περίπου. [7]

Πιθανά πεδία υψηλής ενθαλπίας βρίσκονται στα νησιά **Κίμωλος, Πολύαιγος, Σαντορίνη, Κως και Λέσβος**. Οι πιθανότητες είναι πολύ μεγάλες στα δύο πρώτα νησιά και μικρότερες στα άλλα, για τα οποία αλλού υπάρχουν εντελώς ελλιπή στοιχεία (Κως) και αλλού πολλά, αλλά με μικρές πιθανότητες (Λέσβος).

Περιοχές υψηλής ενθαλπίας με ελάχιστες πιθανότητες είναι αυτές του **Σουσακίου Κορινθίας** και των **Μεθάνων Τροιζηνίας**. Η περιοχή **Σουσακίου Κορινθίας**, μετά από τη συνθετική ερμηνεία όλων των στοιχείων που προέκυψαν από τη γεωθερμική έρευνα, φαίνεται ότι έχει δυνατότητες παραγωγής ρευστών μέσης ενθαλπίας. Αυτά τα ρευστά έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μη ηλεκτρικές χρήσεις, σύμφωνα με τις συνθήκες της περιοχής. [7]

Στα νησιά **Κίμωλος και Πολύαιγος**, οι γεωθερμικές έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι συνθήκες σε αυτά είναι εντελώς παρόμοιες με αυτές της Μήλου. Πρόκειται για πολύ πιθανά πεδία υψηλής ενθαλπίας. Παρόμοιο γεωθερμικό ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο αβαθής υποθαλάσσιος χώρος μεταξύ των τριών νησιών όπως επίσης και αυτός του Όρμου Μήλου. Μελλοντικά σ' αυτούς τους χώρους μπορεί να γίνουν κεκλιμένες γεωτρήσεις από την παραλία ή και ακόμα στη θάλασσα. [7]

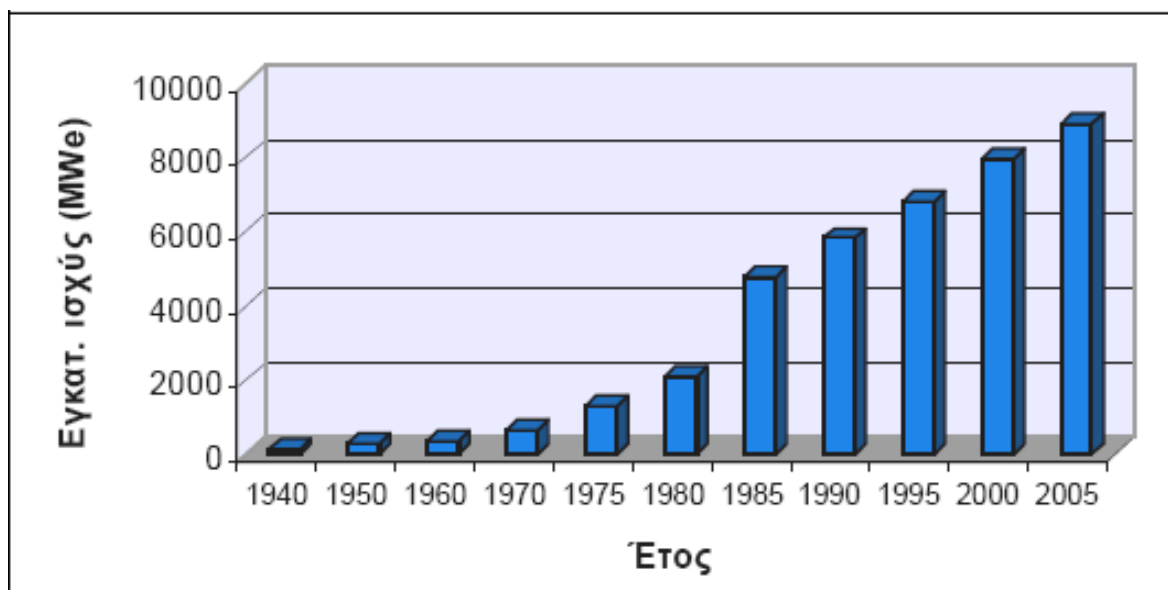
Στη **Λέσβο**, από τις μέχρι τώρα πολύπλευρες και εκτεταμένες γεωλογικές-γεωθερμικές έρευνες και τη συνθετική ερμηνεία των αποτελεσμάτων εντοπίστηκαν τρεις κύριες περιοχές ενδιαφέροντος: Πέτρας-Αργένου, Καλλονής-Στύψης και Πολιχνίτου. Οι πιθανές θερμοκρασίες των ρευστών στον ταμιευτήρα αναμένονται να είναι της τάξης των 100-140 °C, χωρίς να αποκλείονται εντελώς και υψηλότερες. Η περιοχή που προτάθηκε για τις πρώτες βαθιές γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής βρίσκεται νότια του χώρου Στύψη.

Στη **Σαντορίνη** η γεωθερμική έρευνα προσδιόρισε σαν ενδιαφέρουσα την περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των οικισμών Μεγαλοχωρίου, Εμπορίου και Ακρωτηρίου. Μερικές συμπληρωματικές βαθιές γεωφυσικές έρευνες θα βοηθήσουν ουσιαστικά στην επιλογή της καλύτερης θέσης για την πρώτη βαθιά γεώτρηση έρευνας-παραγωγής, η οποία θα δώσει και την οριστική απάντηση σχετικά με την κατηγορία των ρευστών (υψηλής ή μέσης ενθαλπίας). [7]

Στην **Κω** η εντελώς προκαταρκτική διερεύνηση έδωσε ενθαρρυντικά στοιχεία. Η δυτική περιοχή του νησιού χρειάζεται συστηματική και πολύπλευρη γεωθερμική έρευνα. Η περιοχή του ηφαιστείου των Μεθάνων έχει καταρχήν ενδιαφέρον από γεωθερμική άποψη. Οι δυσμενείς όμως συνθήκες τοπογραφίας και γεωλογίας, τα λιγοστά στοιχεία και οι προκαταρκτικές

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Η πρώτη προσπάθεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση γεωθερμικών ρευστών ξεκίνησε το 1904 στο Larderello της Ιταλίας από τον Πρίγκιπα Ginori Conti. Η πρώτη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 250 kW λειτούργησε τελικά το 1913 και μέχρι το 1940 η ισχύς των γεωθερμικών μονάδων στην περιοχή έφτασε τα 130 MW, πριν καταστραφούν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ακολούθησαν αρκετά χρόνια αργότερα η μονάδα στο Wairakei της Νέας Ζηλανδίας το 1958 και δύο χρόνια αργότερα η πρώτη μονάδα στο πεδίο The Geysers των Η.Π.Α. Η ανάπτυξη της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής τα τελευταία 65 χρόνια παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.[9]



Διάγραμμα 1 Η ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τη γεωθερμική ενέργεια τα τελευταία 65 χρόνια (Bertani, 2005).[9]

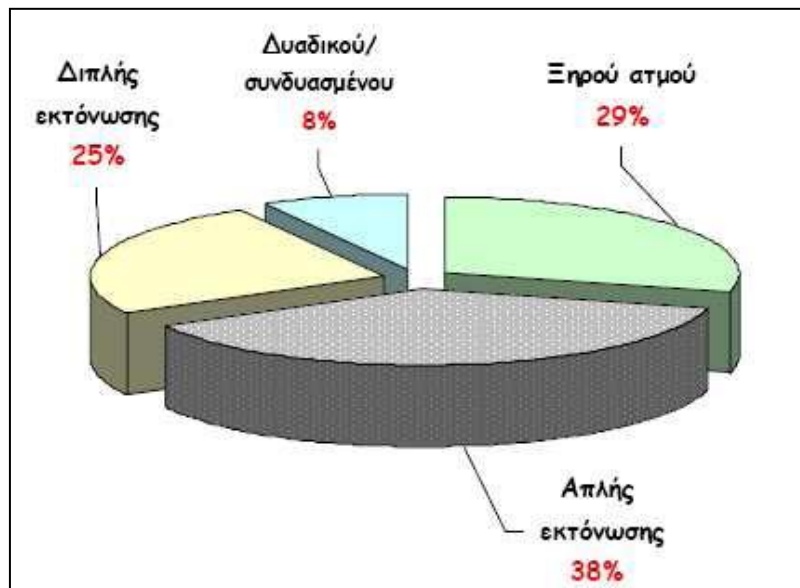
Το 2000, περίπου 7.954 MW γεωθερμικής ισχύος ήταν εγκατεστημένα σε 21 χώρες του πλανήτη μας, με μέσο συντελεστή λειτουργίας 0,71. Ανάμεσα στο 1995 και το 2000 σημειώθηκε αύξηση 17% ή ετήσια αύξηση 3,2%. Η συνολική παραγωγή γεωθερμικού ηλεκτρισμού το 2000 αποτιμάται σε 12,5 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (με την υπόθεση ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι 35%). Η παραγωγή γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά 11 εκατομμύρια τόνους το χρόνο, στην περίπτωση που η γεωθερμική ενέργεια αντικαθιστά το πετρέλαιο (Huttrer, 2001). Σύμφωνα με τον Bertani (2005), η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς σε 24 χώρες

ανήλθε σε 8.933 MW (αύξηση μόλις 13% σε σχέση με το 2000), ενώ η ενεργός ισχύς ήταν 8.030 MW. Το 2004, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμήθηκε στις 57.000 GWh, σημειώνοντας αύξηση 15% σε σχέση με το 2000. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η συνεισφορά της γεωθερμικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται περίπου στο 0,4% (σε σύνολο παραγόμενου ηλεκτρισμού 15×10^6 GWh/year). Θα πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι αν και οι δυαδικές μονάδες αποτελούν μικρό ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συμμετοχή τους ενισχύεται τελευταία όλο και περισσότερο με την αξιοποίηση ρευστών θερμοκρασίας 100-120°C. Σε δέκα χώρες παρουσιάστηκε αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 10% ή και περισσότερο σε σχέση με το 2000. Οι χώρες αυτές είναι η Κόστα Ρίκα, η Γαλλία, τη Ισλανδία, η Ινδονησία, η Κένυα, το Μεξικό, η Νικαράγουα, οι Η.Π.Α. και η Ρωσία. Τα νέα μέλη της γεωθερμικής κοινότητας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας την τελευταία πενταετία είναι η Αυστρία, η Γερμανία και η Παπούα – Νέα Γουινέα. Οι Φιλιππίνες φαίνεται να πλησιάζουν τις Η.Π.Α. στο μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος και σύντομα πιθανόν να τεθούν επικεφαλής του καταλόγου των γεωθερμικών χωρών. Σύμφωνα με τους Φυτίκα & Ανδρίτσο (2004), το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τη γεωθερμία κυμαίνεται από 0,03 έως 0,08 €/kW, τιμές χαμηλές όταν συγκρίνονται με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά υψηλότερες όταν συγκρίνονται με τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την καύση γαιανθράκων. Ο σχεδιασμός μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος περιλαμβάνει την επιλογή του μεγέθους της μονάδας, την επιλογή του κύκλου λειτουργίας, τη λειτουργία και συντήρηση της μονάδας, την επιλογή των υλικών και τη διαχείριση των ρευστών μετά τη χρήση τους για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το μέγεθος της μονάδας εξαρτάται από το μέγεθος του γεωθερμικού ταμιευτήρα, το οποίο θα πρέπει να ερευνηθεί με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και τις ανάγκες της αγοράς.[9]

3.1. Τύποι γεωθερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

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. Η ποσοστιαία κατανομή τους ανά τον κόσμο εμφανίζεται στο [Σχήμα 10](#). Πριν περιγραφούν οι παραπάνω κύκλοι, θα παρουσιαστούν τα κυριότερα είδη συσκευών που βρίσκονται στην κεφαλή της γεώτρησης ή στην επιφάνεια και χρησιμοποιούνται στα ρευστά υψηλής ενθαλπίας.[9]

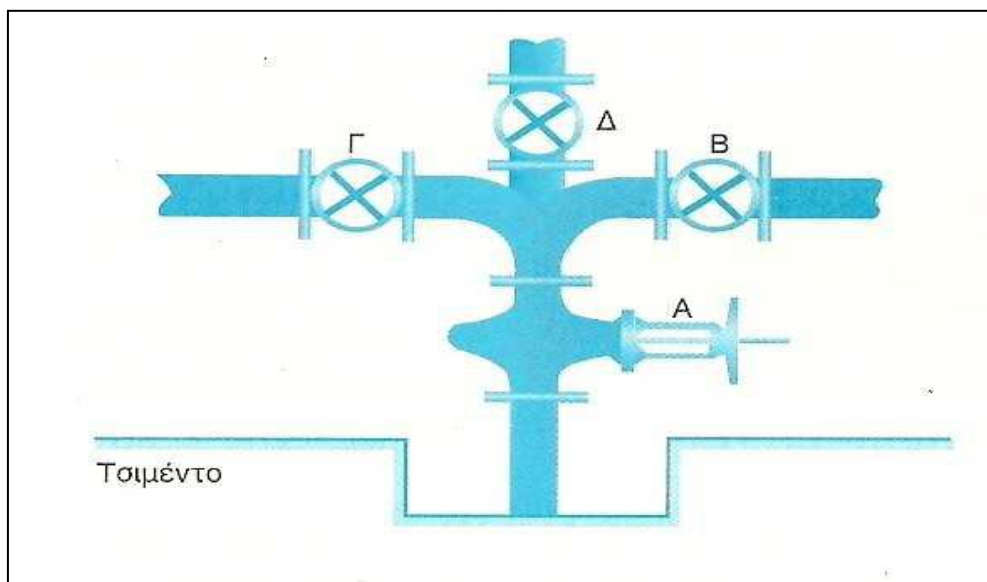


Σχήμα 10. Κατανομή τύπων γεωθερμικών μονάδων το 2004 (Bertani, 2005).

3.2. Συλλογή και μεταφορά γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας

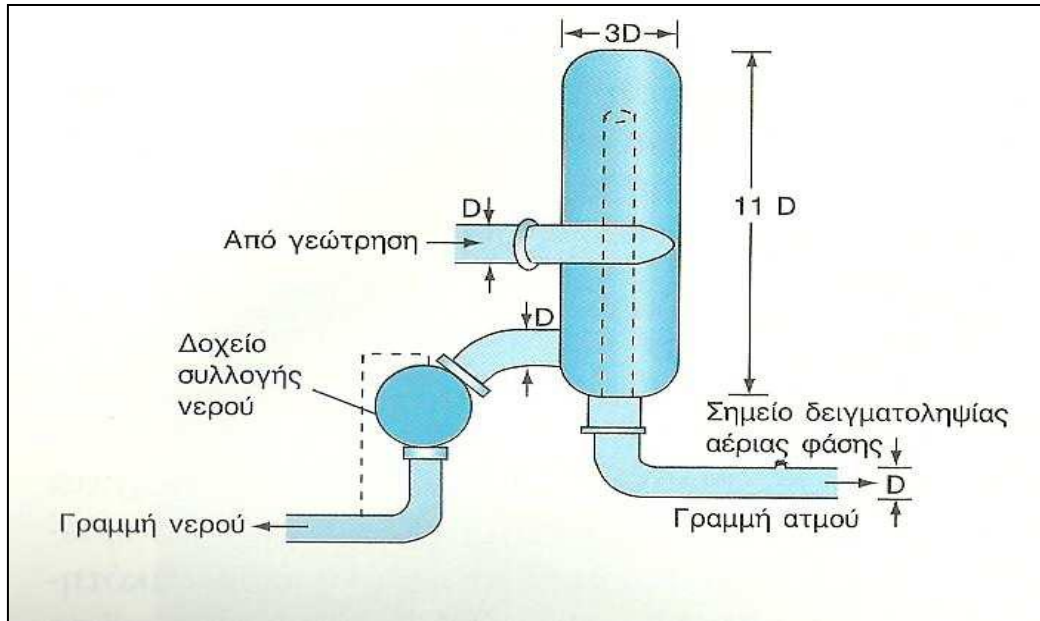
Κάθε γεώτρηση υψηλής ενθαλπίας συνοδεύεται από τις απαραίτητες συσκευές για τον έλεγχο της ροής των ρευστών που εξέρχονται από τη γεώτρηση, το διαχωρισμό του νερού από τον ατμό (στον κύκλο εκτόνωσης του διφασικού ρευστού), την ασφαλή διάθεση των ανεπιθύμητων ρευστών και τη μείωση του θορύβου στη φάση των δοκιμών. Οι βαλβίδες ελέγχου τοποθετούνται στην κεφαλή της γεώτρησης, δηλαδή στο υπέργειο μέρος των τοιχωμάτων της γεώτρησης, επάνω ακριβώς από το τσιμεντένιο βάθρο. Οι κυριότερες βαλβίδες που χρησιμοποιούνται είναι: η βαλβίδα διακοπής της ροής που απομονώνει τη γεώτρηση, η βαλβίδα λειτουργίας που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ροής και της πίεσης των ρευστών, ιδιαίτερα κατά τις δοκιμές και μία βαλβίδα για την παράκαμψη της ροής όταν απαιτείται (by-

pass valve). Επίσης μπορεί να προστεθεί και μια μικρή βαλβίδα για την απομάκρυνση των μη συμπυκνώσιμων αερίων από τη γεώτρηση. Όταν για κάποιο λόγο σταματά η λειτουργία της γεώτρησης, πρέπει να υπάρχει μια μικρή ροή του ρευστού από τη βαλβίδα παράκαμψης για να μην κρυώσουν τα τοιχώματα της γεώτρησης και να μην καταπονηθεί η τσιμέντωση της γεώτρησης. Μία διάταξη βαλβίδων που χρησιμοποιείται στα συστήματα ατμού παρουσιάζεται στο [Σχήμα 11](#).



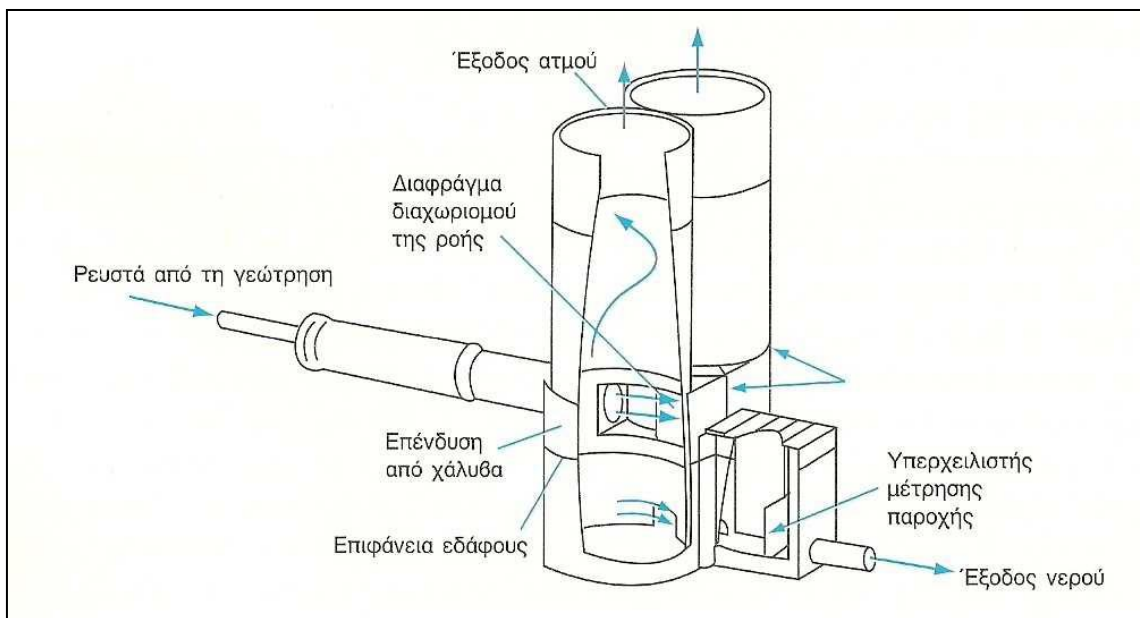
Σχήμα 11. Διάταξη βαλβίδων στην κεφαλή μιας γεώτρησης ατμού. Α: βαλβίδα κλεισίματος, Β: βαλβίδα ελέγχου κατά τη λειτουργία της μονάδας, Γ: βαλβίδα παρεκτροπής της ροής του ατμού προς το σιγαστήρα και Δ: βαλβίδα για την εισαγωγή συσκευών ή αισθητήρων μέσα στη γεώτρηση [38],[9]

Έχουν σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί πληθώρα τύπων διαχωριστή των δύο φάσεων, αλλά ίσως ένας από τους αποδοτικότερους τύπους είναι ο διαχωριστής Webre, σχηματικό διάγραμμα του οποίου απεικονίζεται στο [Σχήμα 12](#).



Σχήμα 12. Σχηματική παράσταση και τυπικές διαστάσεις ενός διαχωριστή ατμού / νερού τύπου Webre [38].

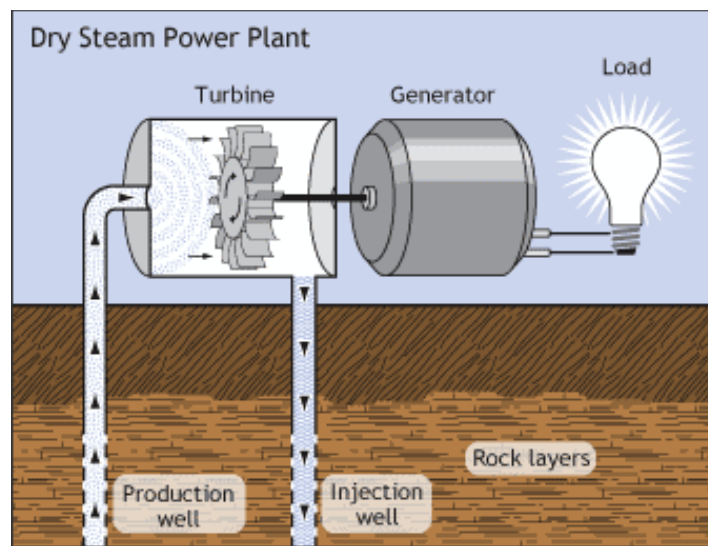
Ο διαχωριστής αυτός είναι ικανός να επιτύχει απόδοση διαχωρισμού των φάσεων 99,9%, αν και η απόδοσή του μειώνεται σημαντικά για ταχύτητες εισόδου του γεωθερμικού ρευστού μεγαλύτερες από 50 m/s. Η υψηλή απόδοση του διαχωριστή Webre οφείλεται στη σπειροειδή είσοδο των ρευστών, σε αντίθεση με την επικρατούσα εφαπτομενική είσοδο. Οι διαχωριστές αυτού του τύπου μπορούν να δεχθούν συνολική ροή του γεωθερμικού ρευστού μέχρι και 300 t/h σε πίεση 8 bar. Όταν κατά τη διάρκεια των δοκιμών ή σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας της μονάδας το γεωθερμικό ρευστό παρεκτρέπεται από την κεφαλή της γεώτρησης προς τους χώρους διάθεσης, δημιουργείται ισχυρότατος θόρυβος από την εκροή της διφασικής ροής και είναι αναγκαία η ύπαρξη σιγαστήρα. Το σκαρίφημα ενός σιγαστήρα, ο οποίος δοκιμάστηκε αρχικά στη Νέα Ζηλανδία και κατόπιν χρησιμοποιήθηκε σε πολλά πεδία, παρουσιάζεται στο Σχήμα 13. Το ρευστό προσκρούει στο οξύ άκρο ενός κατάλληλου χαλύβδινου τμήματος που βρίσκεται στο σημείο επαφής δύο κυλινδρικών πύργων από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από χάλυβα. Η υγρή φάση περιστρέφεται γύρω από τους κυλίνδρους, χάνοντας έτσι την κινητική της δύναμη, προτού οδηγηθεί στη δεξαμενή συλλογής. Ο ατμός εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από την κορυφή των πύργων, με τον περισσότερο θόρυβο να κατευθύνεται προς την ατμόσφαιρα.[9]



Σχήμα 13. Σκαρίφημα δίδυμου κυκλωνικού διαχωριστή [38].

3.3. Κύκλος απευθείας χρήσης του ατμού

Ο κύκλος απευθείας χρήσης του ατμού ή απλά κύκλος ατμού (direct steam expansion) είναι ο απλούστερος τύπος γεωθερμικής μονάδας και ο τύπος που απαιτεί το μικρότερο κόστος κεφαλαίου. Εφαρμόζεται στα ολιγάριθμα πεδία που παράγουν υπέρθερμο γεωθερμικό ατμό (Larderello και Amiata στην Ιταλία, The Geysers στις Η.Π.Α. κ.α.). Συνοπτικά, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 14, ατμός από μία ή περισσότερες γεωτρήσεις οδηγείται κατευθείαν σε ένα στρόβιλο, χωρίς καμιά επεξεργασία ή ύστερα από επεξεργασία για την αφαίρεση του HCL ή άλλων επιβλαβών ουσιών που βρίσκονται στον ατμό. Η μονάδα μπορεί να έχει συμπυκνωτή (condensing type), όπου η πίεση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα με τυπική τιμή 0,12 bar, ή όχι (back pressure type), δηλαδή ο ατμός εξέρχεται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα. Η επιλογή του τύπου γίνεται ανάλογα με την περιεκτικότητα του ατμού σε μη συμπυκνώσιμα αέρια. Για ατμό με μεγάλη περιεκτικότητα σε μη συμπυκνώσιμα αέρια (της τάξης του 50% mol/mol) δε συνιστάται η χρήση συμπυκνωτή. Πρέπει πάντως να σημειώσουμε ότι ο τύπος χωρίς συμπυκνωτή παρουσιάζει αισθητά χαμηλότερη απόδοση (σχεδόν τη μισή) από ότι ο τύπος με συμπυκνωτή, έχει όμως απλούστερη λειτουργία και μικρότερο κόστος καθώς δεν απαιτείται συμπυκνωτής, πύργος ψύξης και σύστημα άντλησης του νερού ψύξης.[9]



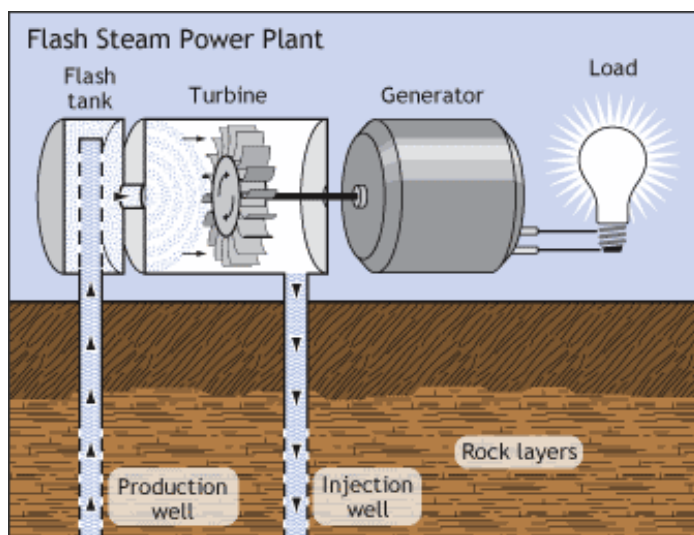
Σχήμα 14. Σκαρίφημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ξηρό ατμό.
Πηγή: "Energy Efficiency and Renewable Energy"

Οι συμπυκνωτές είναι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την υγροποίηση του ατμού με την απομάκρυνση της λανθάνουσας θερμότητάς του. Οι συμπυκνωτές διακρίνονται σε έμμεσης επαφής, όταν ο ατμός και το ψυκτικό μέσο διαχωρίζονται από την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας και σε συμπυκνωτές άμεσης επαφής, όταν τα ρεύματα ατμού και ψυκτικού μέσου (νερού) αναμιγνύονται και εγκαταλείπουν το συμπυκνωτή ως ένα μονό ρεύμα. Οι τελευταίοι είναι φθηνότεροι από τους συμπυκνωτές έμμεσης επαφής και απαιτούν μικρότερες ποσότητες νερού [37].

3.4. Κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού

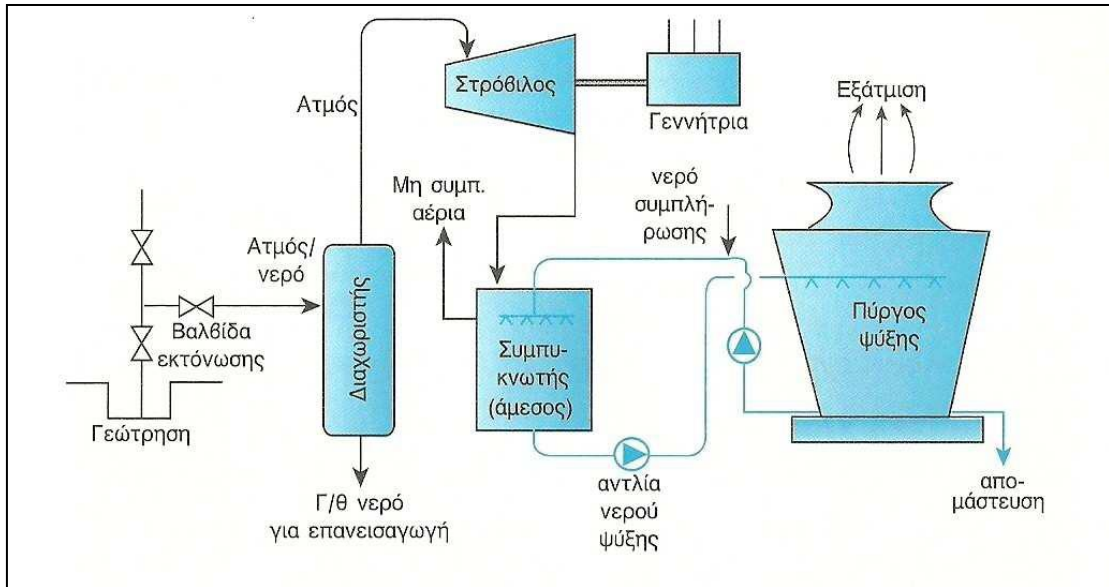
Ο κύκλος εκτόνωσης διφασικού ρευστού (flash condensing type) χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που έχουμε νερό σε υψηλή θερμοκρασία (>150 °C) και πίεση (τυπικά παραδείγματα Wairakei Νέας Ζηλανδίας, Salton Sea Η.Π.Α., LATERA Ιταλίας και Μήλος). Στον τύπο αυτόν, το γεωθερμικό ρευστό είτε έρχεται ως διφασική ροή από τη γεώτρηση, είτε εκτονώνεται σε πίεση χαμηλότερη από εκείνη που επικρατεί στην κεφαλή της γεώτρησης και μετατρέπεται σε διφασικό μίγμα. Το μίγμα αυτό διαχωρίζεται σε κατακόρυφο διαχωριστή και ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 15 και 16. Αν η θερμοκρασία και η πίεση του γεωθερμικού υγρού το επιτρέπουν, τότε το υγρό

μπορεί να εκτονωθεί για δεύτερη (dual flashing) ή και περισσότερες φορές (multistage flashing), ώστε να παραχθεί επιπλέον ατμός που θα αυξήσει σημαντικά την απόδοση της μονάδας. Από την άλλη μεριά βεβαίως, η ύπαρξη διπλής (ή πολλαπλής) εκτόνωσης προσθέτει επιπλέον κατασκευαστικό κόστος. Σημειώνεται επίσης ότι για γεωθερμικά ρευστά υψηλής αλατότητας (Salton Sea, Μήλος κ.α.) ο ατμός ψεκάζεται με νερό πριν από το στρόβιλο προκειμένου να απομακρυνθούν οι ποσότητες αλάτων που συμπαρασύρονται από τον ατμό.



Σχήμα 15. Σκαρίφημα παραγωγής ατμού (και εν συνεχεία ηλεκτρισμού) με εκτόνωση διφασικού γεωθερμικού ρευστού. Πηγή: "Energy Efficiency and Renewable Energy"

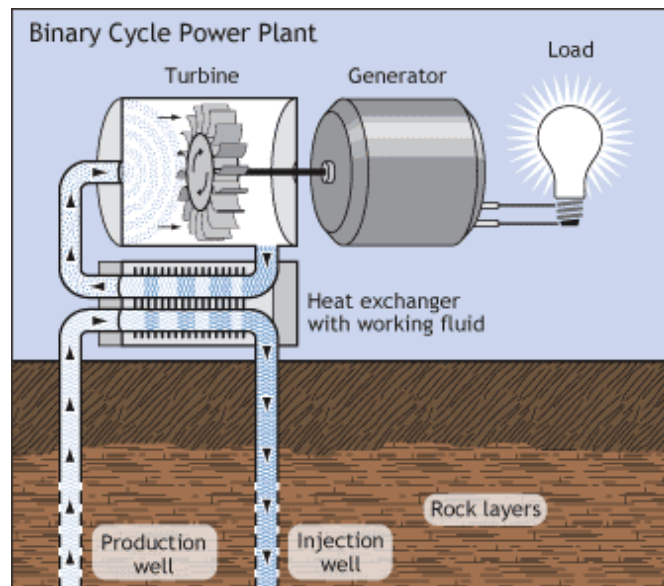
Οι μονάδες εκτόνωσης διφασικού ρευστού μπορεί να διαθέτουν συμπυκνωτή ή όχι, όπως στον κύκλο ατμού, με τα ίδια περίπου πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η πλειονότητα των μονάδων χωρίς συμπυκνωτή είναι σχετικά μικρές (1-5 MW) και χαρακτηρίζονται από χαμηλές αποδόσεις (60%), σε αντίθεση με την ισχύ των μονάδων με συμπυκνωτή που φτάνει τα 60 MW και με απόδοση που προσεγγίζει το 85%. Το νερό στους συμπυκνωτές ψύχεται σε πύργους ψύξης είτε με φυσική συναγωγή είτε με εξαναγκασμένη. Τα συστήματα εκτόνωσης του διφασικού ρευστού αποτελούν την πλέον αποδοτική τεχνολογία, όταν η θερμοκρασία των ρευστών υπερβαίνει τους 150 °C [37], [9].



Σχήμα 16. Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με εκτόνωση διφασικού ρευστού και άμεση συμπύκνωση του ατμού [38].

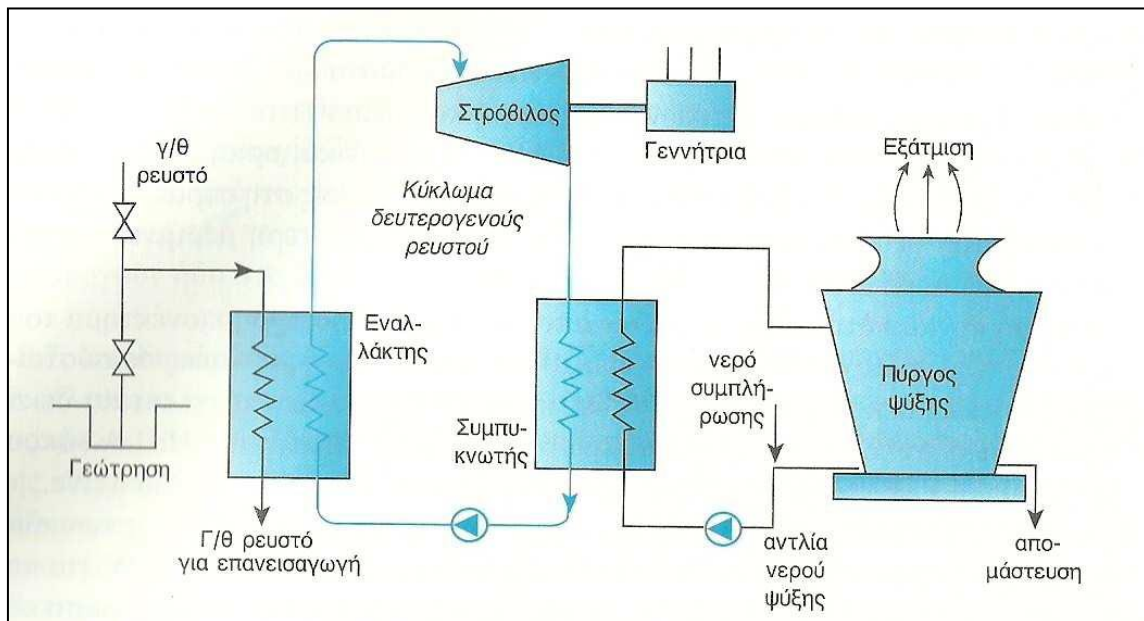
3.5. Διαδικός κύκλος

Ο διαδικός κύκλος (binary fluid cycle) ή κύκλος Rankine με οργανικό ρευστό (organic Rankine cycle) χρησιμοποιείται με ρευστά θερμοκρασίας 85-175οC. Επειδή τα πεδία μέσης ενθαλπίας είναι περισσότερα, ο διαδικός κύκλος τείνει να επικρατήσει.



Σχήμα 17. Σκαρίφημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο του διαδικού κύκλου. Πηγή: "Energy Efficiency and Renewable Energy"

Τα κύρια τμήματα ενός δυαδικού συστήματος είναι ο εναλλάκτης γεωθερμικού νερού – δευτερεύοντος ρευστού (ψυκτικού), ο ατμοστρόβιλος, η ηλεκτρική γεννήτρια, ο συμπυκνωτής (συνήθως εναλλάκτης αυλών και κελύφους), η αντλία κυκλοφορίας του ψυκτικού, η αντλία επανεισαγωγής (αν απαιτείται) και οι απαραίτητες βαλβίδες ελέγχου. Συνοπτικά, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 17 και 18, 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. Οι ατμοί του δευτερεύοντος ρευστού οδηγούνται αρχικά στο στρόβιλο κι εν συνεχεία στο συμπυκνωτή. Τέλος, το ρευστό από το συμπυκνωτή συμπιέζεται και επανεισάγεται πάλι στον εναλλάκτη μέσω της αντλίας ανακυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου. Τα δυαδικά συστήματα είναι μικρές, αρθρωτές (modular) μονάδες, των οποίων η ισχύς ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες kWε μέχρι περίπου 3 MW [37].



Σχήμα 18. Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με χρήση δευτερεύοντος οργανικού ρευστού. Ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι αερόψυκτος [38].

Ο συμπυκνωτής μπορεί να είναι αερόψυκτος [38]. Σύμφωνα με τους Φυτίκα και Ανδρίτσο (2004), τα πλεονεκτήματα του δυαδικού κύκλου είναι τα εξής:

1. Κάνει δυνατή την ανάκτηση μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας, με την απόρριψη των ρευστών σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

2. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν γεωθερμικά νερά μέσης ενθαλπίας, επειδή το σημείο ζέσεως των οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλότερο από 100°C. Με κατάλληλη επιλογή του δευτερεύοντος ρευστού, τα δυαδικά συστήματα μπορεί να λειτουργήσουν και με θερμοκρασίες γεωθερμικών ρευστών μέχρι και 85°C.
3. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί διφασικό μίγμα, αν και καλό θα ήταν να αποφεύγεται η χρήση του.
4. Περιορίζει ουσιαστικά τα προβλήματα διάβρωσης και σχηματισμού επικαθίσεων στον εναλλάκτη, ενώ δεν παρουσιάζει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αφού γίνεται επανεισαγωγή των ρευστών στον ταμιευτήρα.
5. Κάνει δυνατή την αξιοποίηση ρευστών που περιέχουν διαβρωτικά συστατικά και σημαντικές ποσότητες μη συμπυκνώσιμων αερίων.

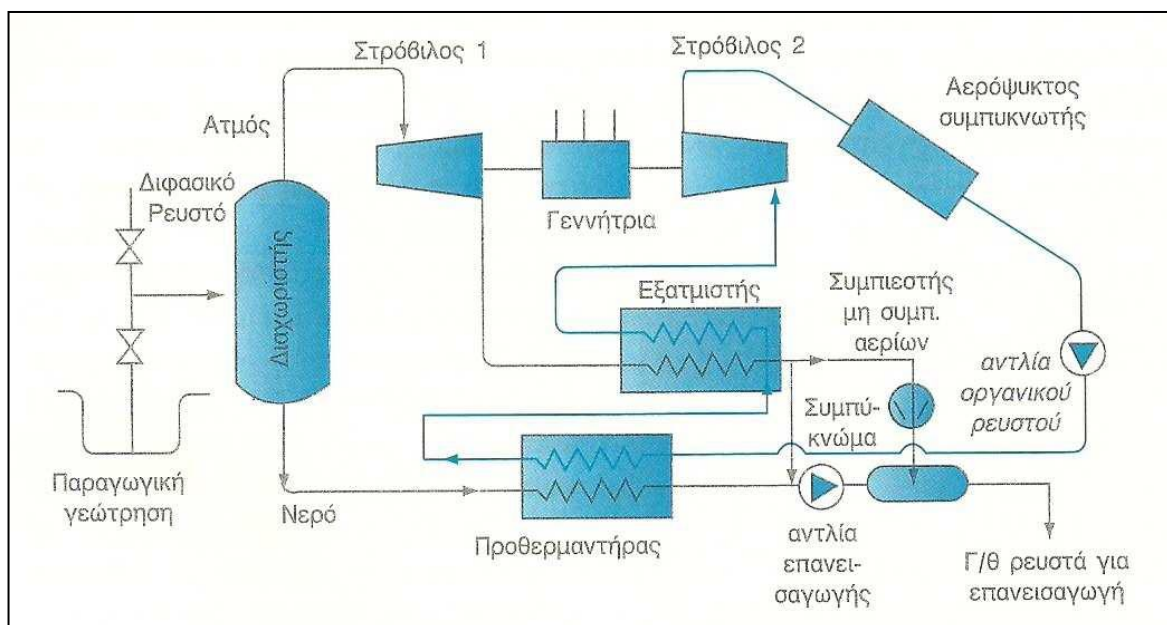
Από την άλλη μεριά, μία μονάδα δυαδικού κύκλου παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

1. Κάνει απαραίτητη τη χρήση εναλλάκτη, ο οποίος είναι γενικά μια δαπανηρή συσκευή, που συνήθως παρουσιάζει έντονα προβλήματα διάβρωσης. Αντιμετωπίζονται με τη χρήση ανθεκτικών μετάλλων ή κραμάτων (τιτάνιο).
2. Τα οργανικά ρευστά που χρησιμοποιούνται είναι πτητικά, ορισμένα από αυτά είναι τοξικά, ενώ πολλές οργανικές ουσίες είναι επιβλαβείς στη στρατοσφαιρική στοιβάδα του όζοντος και θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την αποφυγή διαρροών.
3. Η μικρή δυναμικότητα των μονάδων αποτελεί το σοβαρότερο μειονέκτημα του κύκλου. Για το λόγο αυτό κατασκευάζονται πολλές μικρές μονάδες σε συστοιχία. Πάντως, δεκάδες τέτοιες μονάδες έχουν εγκατασταθεί τα τελευταία δέκα χρόνια σε όλο τον κόσμο και ιδιαίτερα στις δυτικές πολιτείες των Η.Π.Α., όπου η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τέτοιων μονάδων υπερβαίνει τα 250 MW.
4. Το κόστος των δυαδικών συστημάτων είναι υψηλότερο από το κόστος συστημάτων ατμού. Οι τυπικές τιμές κόστους ανέρχονται σε 1500 \$/kW για τα συστήματα ατμού, 2000 \$/kW για τα συστήματα απλής εκτόνωσης διφασικού ρευστού και περισσότερο από 3000 \$/kW για τα δυαδικά συστήματα για μονάδες μεγαλύτερες από 5 MW. Για μικρότερης δυναμικότητας μονάδες, το κόστος ανά kW μεγαλώνει.

Ένας νέος κύκλος, τύπου δυαδικού κύκλου αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1990, ο κύκλος Kalina. Ο κύκλος αυτός είναι περισσότερο αποδοτικός από τον κύκλο Rankine, αλλά περισσότερο σύνθετος. Ως δευτερεύων ρευστό χρησιμοποιείται μίγμα αμμωνίας-νερού σε αναλογία 70/30. Το μίγμα αυτό εκτονώνεται σε υπέρθερμες συνθήκες και διέρχεται από το στρόβιλο υψηλής πίεσης. Ακολούθως αναθερμαίνεται πριν περάσει από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Μικρές μονάδες του κύκλου αυτού λειτουργούν ήδη στο Husavik της Ισλανδίας (2 MW) και στην Ιαπωνία (DiPirro, 2002).

3.6. Συνδυασμένος κύκλος

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ο λεγόμενος συνδυασμένος κύκλος (combined cycle), ο οποίος αποτελεί το συνδυασμό του κύκλου εκτόνωσης του διφασικού ρευστού και του δυαδικού κύκλου, με συνέπεια τη σημαντική αύξηση της απόδοσης της μονάδας. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 19, γίνεται περαιτέρω αξιοποίηση της θερμότητας από τη συμπύκνωση του ατμού από τον κύριο στρόβιλο και μέρους της θερμότητας της υγρής φάσης για τη λειτουργία ενός δυαδικού κύκλου.



Σχήμα 19. Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με συνδυασμένο κύκλο [38].

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η συμπύκνωση του ψυκτικού μέσου γίνεται με αέρα (αερόψυκτος συμπυκνωτής) και ότι το σύνολο των γεωθερμικών ρευστών επανεισάγονται στον ταμειευτήρα [37].

3.7. Κύκλος εκτόνωσης της συνολικής ροής

Στις μονάδες εκτόνωσης του διφασικού ρευστού, ένα μέρος μόνο της θερμότητας των ρευστών αξιοποιείται, δηλαδή η ενθαλπία του ατμού που διαχωρίζεται. Στον τύπο της μονάδας εκτόνωσης της συνολικής ροής (total flow expansion), γίνεται εκτόνωση όλου του ρευστού με τη βοήθεια κατάλληλου ακροφυσίου (nozzle) και το διφασικό ρευστό (σε μορφή τζετ) κινεί μία περιστρεφόμενη συσκευή (π.χ. στρόβιλο τύπου Pelton), που μετατρέπει την ορμή σε περιστροφική κίνηση. Ο ατμός από το διφασικό στρόβιλο οδηγείται κατόπιν σε ένα συμβατικό ατμοστρόβιλο. Τουλάχιστον 40% περισσότερη ισχύς επιτυγχάνεται με τον κύκλο αυτό σε μία συγκεκριμένη γεώτρηση. Πιλοτικές μονάδες που χρησιμοποιούσαν αυτό τον κύκλο, λειτούργησαν με επιτυχία στο Coso Hot Springs της Καλιφόρνιας και στο Cerro Prieto του Μεξικού, ενώ μία μονάδα 9 MW λειτούργησε για κάποια χρόνια στο Desert Peak της Νεβάδας [37], [9].

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΥΠΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΜΕΣΗΣ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ

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

- Η επιλογή της τεχνικής αξιοποίησης του γεωθερμικού ρευστού προς παραγωγής 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:
 - Ο εναλλάκτης θερμότητας
 - Ο στρόβιλος
 - Η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
 - Ο συμπιεστής και 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 **δυναμικά 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) . [3]

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 κύκλο 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. [12]

4.2.1. Κύκλο Rankine

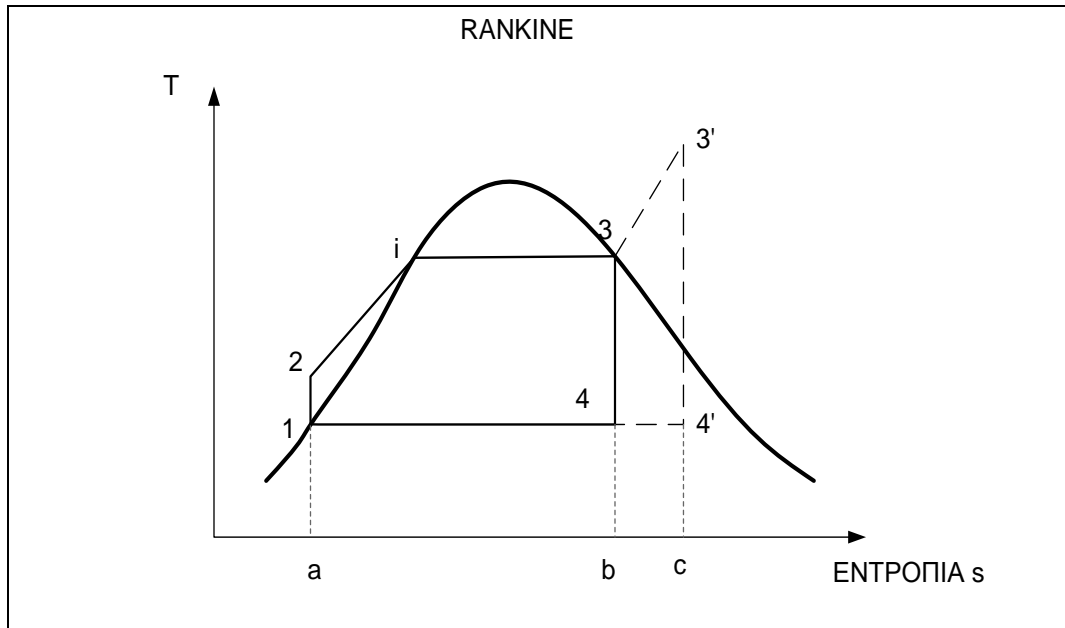
Το κύκλο Rankine είναι το ιδανικότερο κύκλο για μια απλή εγκατάσταση ισχύος με ατμό. Αποτελείται από τις παρακάτω τέσσερις διαδικασίες:

1. Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) συμπίεση σε μια αντλία, 1-2.
2. Μεταφορά θερμότητας, υπό σταθερή πίεση, στο λέβητα, 2-i-3.
3. Αντιστρεπτή αδιαβατική (ισεντροπική) εκτόνωση στο στρόβιλο, 3-4.
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 υπέρθερμο 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. [12]



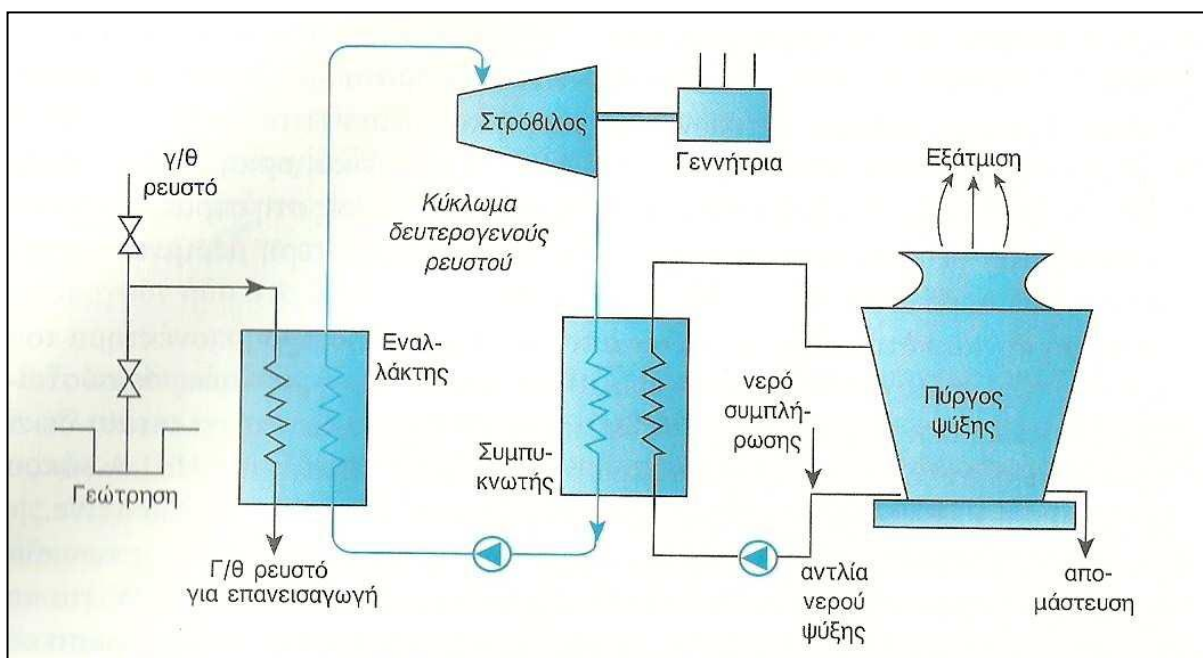
Σχήμα 20. Κύκλο Rankin [12]

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 αμοστροβίλου 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, Σχήμα 21. [12]

Η μορφή του διαγράμματος T-s (Σχήμα 20) 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. [12]



Σχήμα 21. Δυαδικός κύκλος [9]

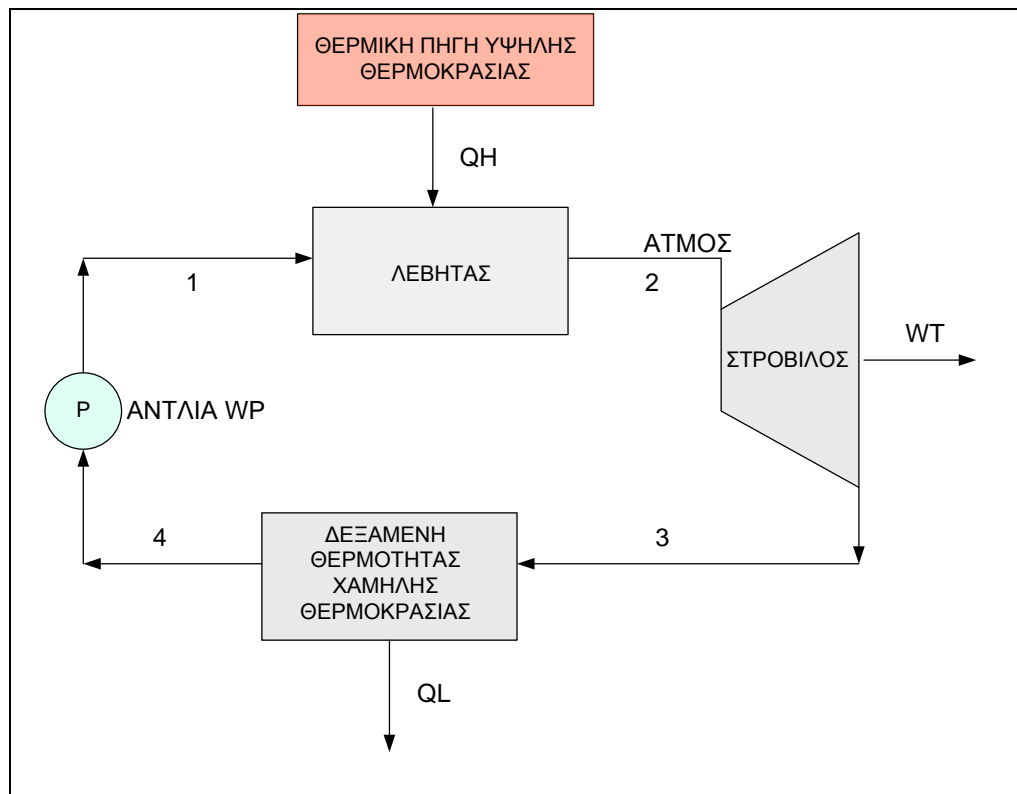
4.3. Θερμοδυναμικός Βαθμός Απόδοσης

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, Σχήμα 22. [12]

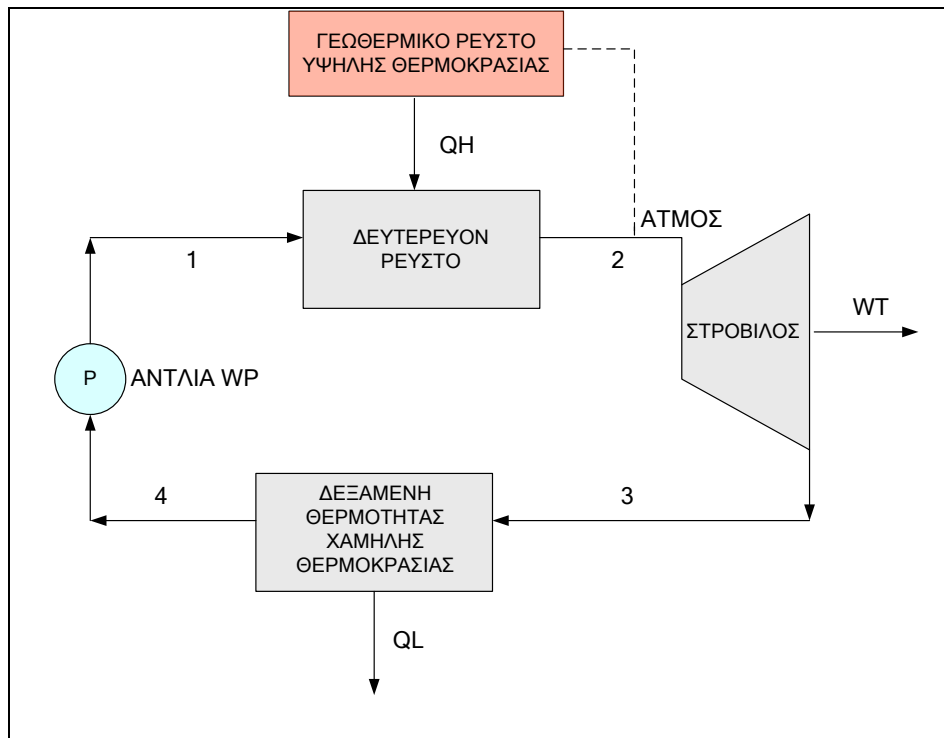
Επειδή η θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει όλη τη θερμότητα που παραλαμβάνει σε ωφέλιμο έργο, ο θερμοδυναμικός ή θερμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται σαν το ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας (θερμότητας) που μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια:

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

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



Σχήμα 22. Εγκατάσταση παραγωγής ισχύος με ατμό [12]



Σχήμα 23. Εγκατάσταση γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ισχύος με ατμό [12]

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 23 [12]

4.4. Εναλλάκτες θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται για τη θέρμανση (και εξατμισμό) σε έναν εναλλάκτη του δευτερεύοντος ρευστού (νερό και αμμωνία, ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, CO_2 κ.λ.π.), το οποίο έχει μικρότερο σημείο ζέσεως σε σχέση με το νερό.

Ο εναλλάκτης συνήθως αποτελείται από διάταξη χαλύβδινων αυλών, γυμνών ή περυγοφόρων, στο εσωτερικό των οποίων ρέει το υπό πίεση ρευστό τροφοδοσίας, ενώ στο εξωτερικό το δευτερεύον ρευστό λειτουργεί. 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. [14]

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:

$$Q = kA\Delta T_m$$

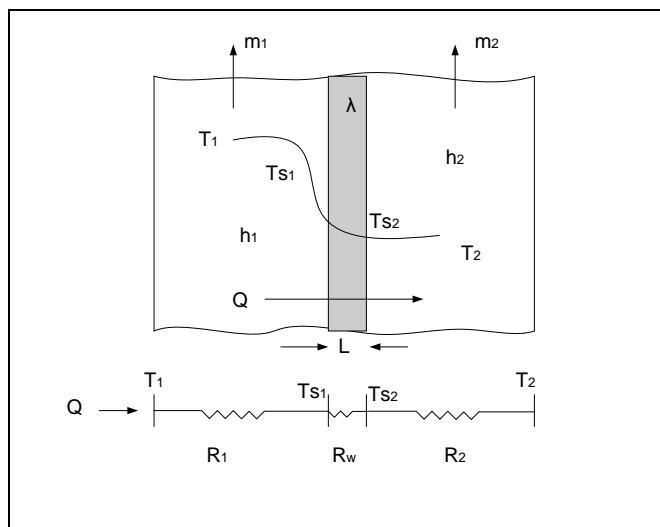
Όπου k ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη [W/m^2K]
 A η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη [m^2]
 ΔT_m η μέση θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη [$^{\circ}C$]

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]:

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



Σχήμα 24. Βασικό στοιχείο εναλλάκτη [14]

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:

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

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 [14]:

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

ή

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

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. [12]

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 400°C. 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. [12]

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 ατμοστρόβιλων 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 ατμοστρόβιλων σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 3.000 rpm για συχνότητα 50 Hz και 3.600 rpm για 60 Hz. [21]

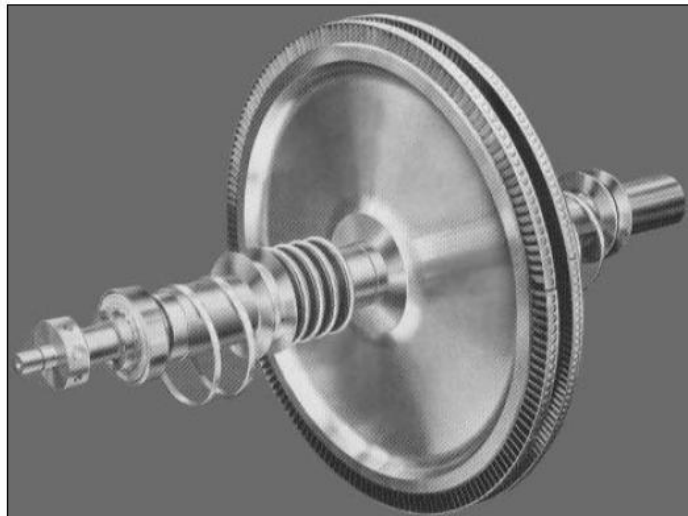
Η μέγιστη επιτρεπόμενη υγρασία στους ατμοστρόβιλους περιορίζεται μεταξύ 10% και 15% κατά βάρος. Η ύπαρξη υγρασίας στον ατμό είναι εξαιρετικά διαβρωτική, ιδιαίτερα κατά τις υψηλές ταχύτητες περιστροφής του ατμοστρόβιλου. Για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών διάβρωσης χρησιμοποιούνται για τα 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. [13]

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 ατμοστροβίλοι 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 ατμοστροβίλων έμφαση δίνεται στην απλότητα, την αξιοπιστία και το χαμηλό αρχικό κόστος. [21]



Σχήμα 25. Ρότορας μονοβάθμιου ατμοστροβίλου [21]

Ο πολυβάθμιος ατμοστροβίλος περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες βαθμίδες σε ένα μόνο κέλυφος, και κάθε βαθμίδα παρέχει ένα μέρος της συνολικής πτώσης πίεσης. Στους πολυβάθμιους ατμοστροβίλους γίνεται συνδυασμός μίας πρώτης βαθμίδας τύπου Curtis ó Rateau (βλ. παρακάτω) ακολουθουμένης από μία ή περισσότερες βαθμίδες τύπου Rateau. Οι πολυβάθμιοι ατμοστροβίλοι 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. [21]



Σχήμα 26. Πολυβάθμιος ατμοστρόβιλος, [25]

4.5.1.2. Ο τύπος των πτερυγώσεων

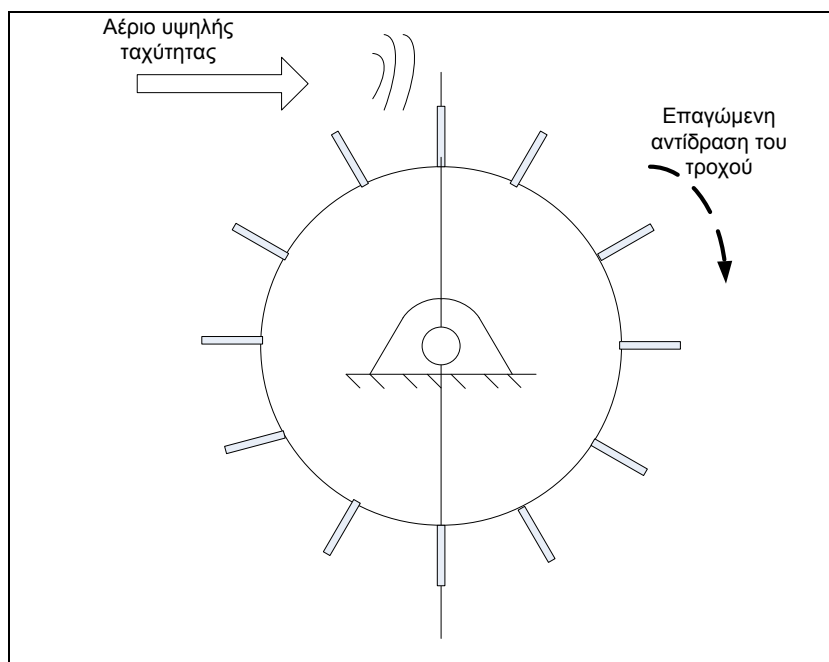
Το σχήμα και η διάταξη των ακροφυσίων (στατικά πτερύγια) και των κινούμενων πτερυγίων είναι το σημαντικότερο στοιχείο κατά το σχεδιασμό του ατμοστρόβιλου. Το σχήμα των πτερυγίων επιδρά στη μορφή της ροής που ακολουθεί ο ατμός και στην ενέργεια που μεταφέρεται από τον ατμό στο ρότορα. Από την άλλη, ένας 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. [12]

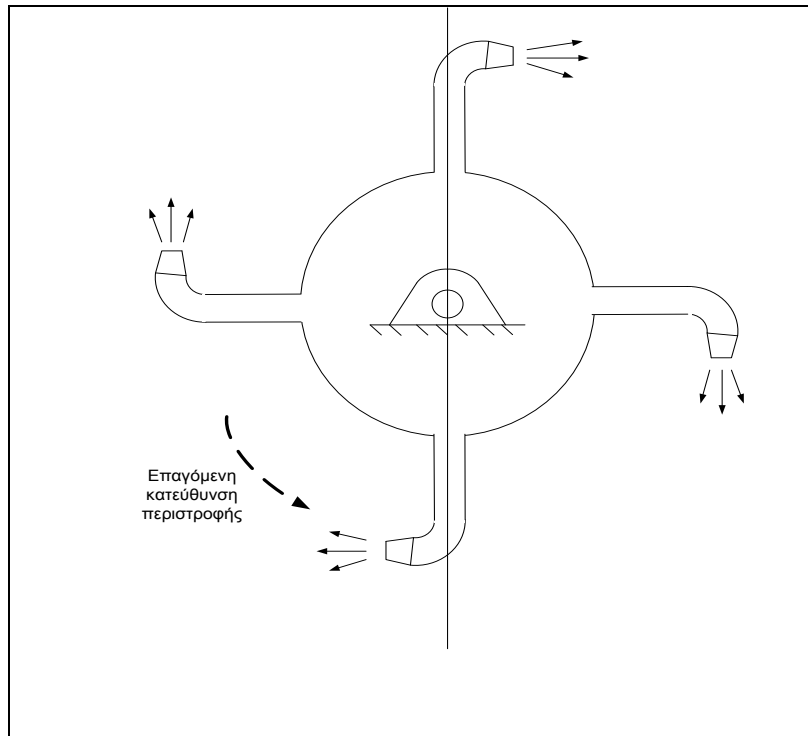
Στους **ατμοστρόβιλους δράσης** (impulse turbine), η πτώση πίεσης μιας ολόκληρης βαθμίδας πραγματοποιείται στα στάσιμα ακροφύσια, τα οποία κατευθύνουν τον ατμό ώστε να ρέει σε μορφή πιδάκων υψηλής ταχύτητας. Η πτώση πίεσης επιταχύνει τον ατμό, η ταχύτητα του οποίου σχετίζεται με την τετραγωνική ρίζα 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. (Σχήμα 27).

Στους **ατμοστροβίλους 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 ατμοστροβίλων 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 (Σχήμα 28).



Σχήμα 27. Αρχή λειτουργίας του στροβίλου δράσης [12]



Σχήμα 28. Αρχή λειτουργίας στροβίλου αντίδρασης [12]

4.5.1.3. Πίεση τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής

Ανάλογα με την πίεση ατμού τροφοδοσίας διακρίνουμε τους ατμοστροβίλους σε [13]:

- 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 [13]:

- 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 διαφόρων ειδών απώλειες είναι αυτές που τελικά διαμορφώνουν στο βαθμό απόδοσης μιας μηχανής.[13]

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). [13]

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. [13]

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. [13]

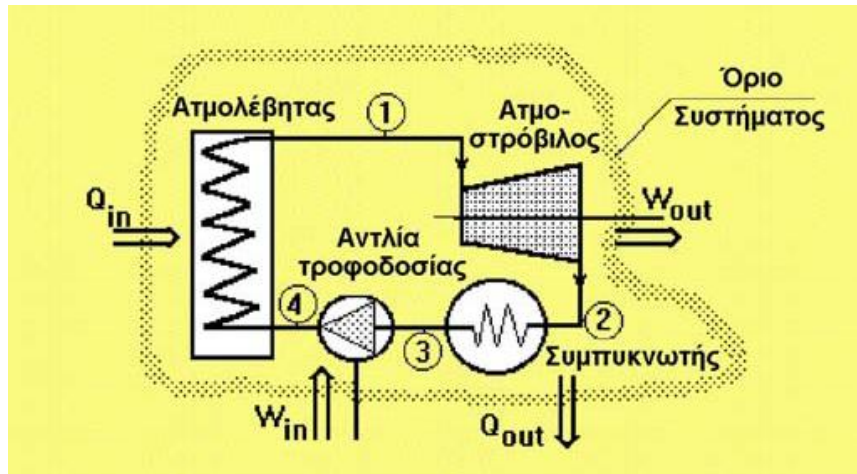
4.5.2. Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου

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](#). [32]

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. [32]



Σχήμα 29. 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). [22]

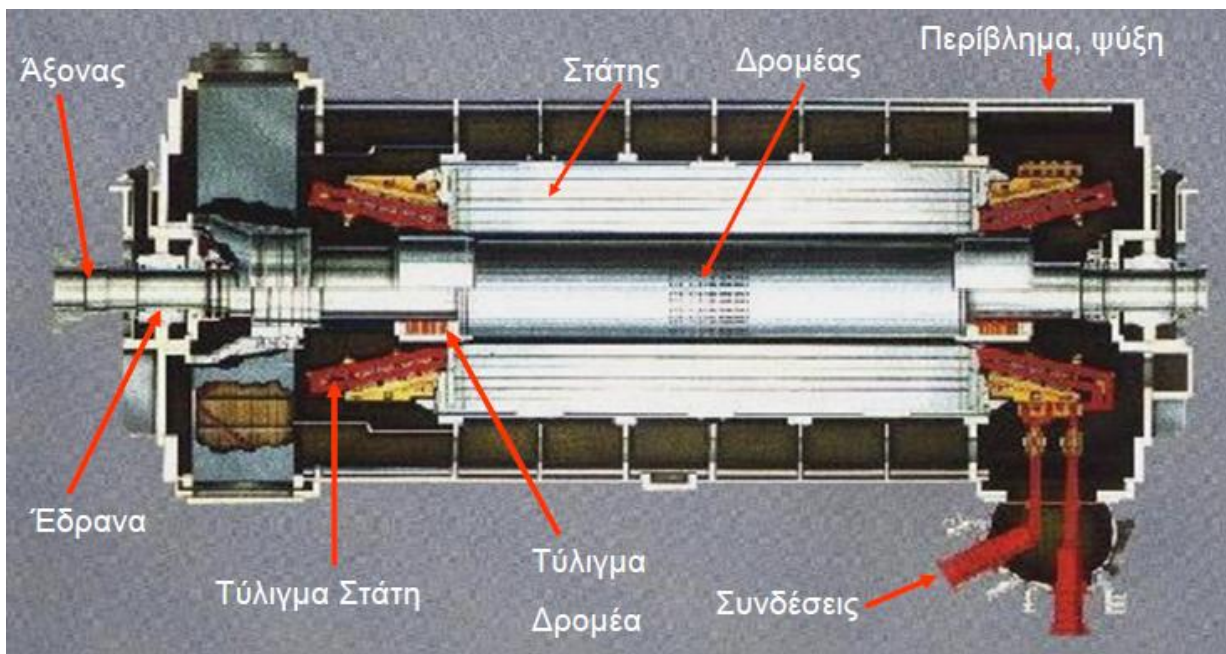
Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια **σύγχρονη γεννήτρια** είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο 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. [22]

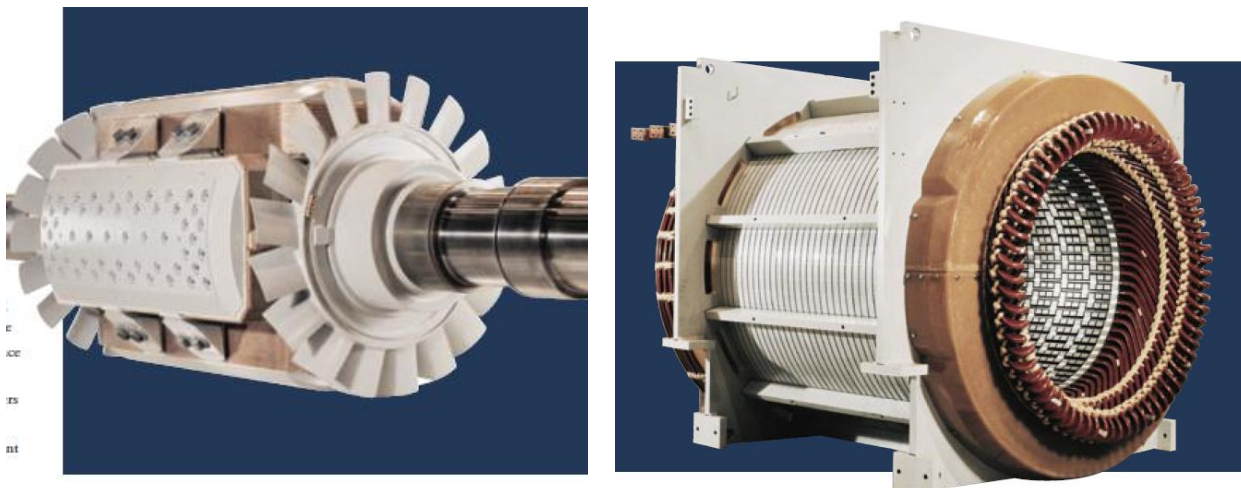
4.6.1. Σύγχρονη γεννήτρια

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η δομή μιας σύγχρονης γεννήτριας και τα στοιχεία που την απαρτίζουν. Ο δρομέας μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης, τα τυλίγματα του οποίου θα πρέπει να τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα. Επειδή όμως ο δρομέας περιστρέφεται, είναι ανάγκη να αναπτυχθεί ένας ειδικός τρόπος τροφοδοσίας του τυλίγματος του. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές τροφοδοσίας του δρομέα είναι:

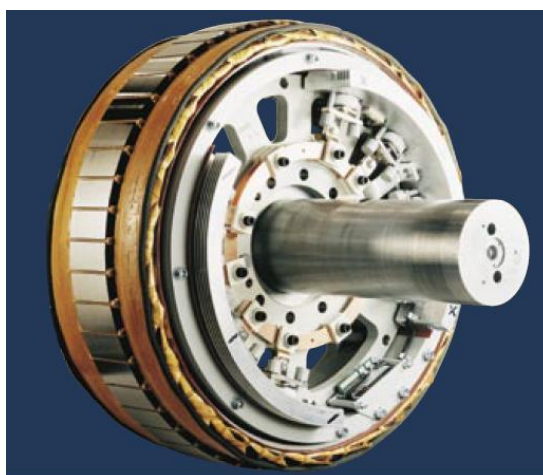
1. Με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε ο δρομέας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ψήκτρες και δαχτυλίδια.
2. Με τροφοδοσία από ειδική πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη πάνω στον άξονα της γεννήτριας. [22]



Σχήμα 30. Δομή σύγχρονης γεννήτριας [22]



Σχήμα 31. (Αριστερά) Δρομέας σύγχρονης γεννήτριας, (Δεξιά) Στάτης σύγχρονης γεννήτριας [33]



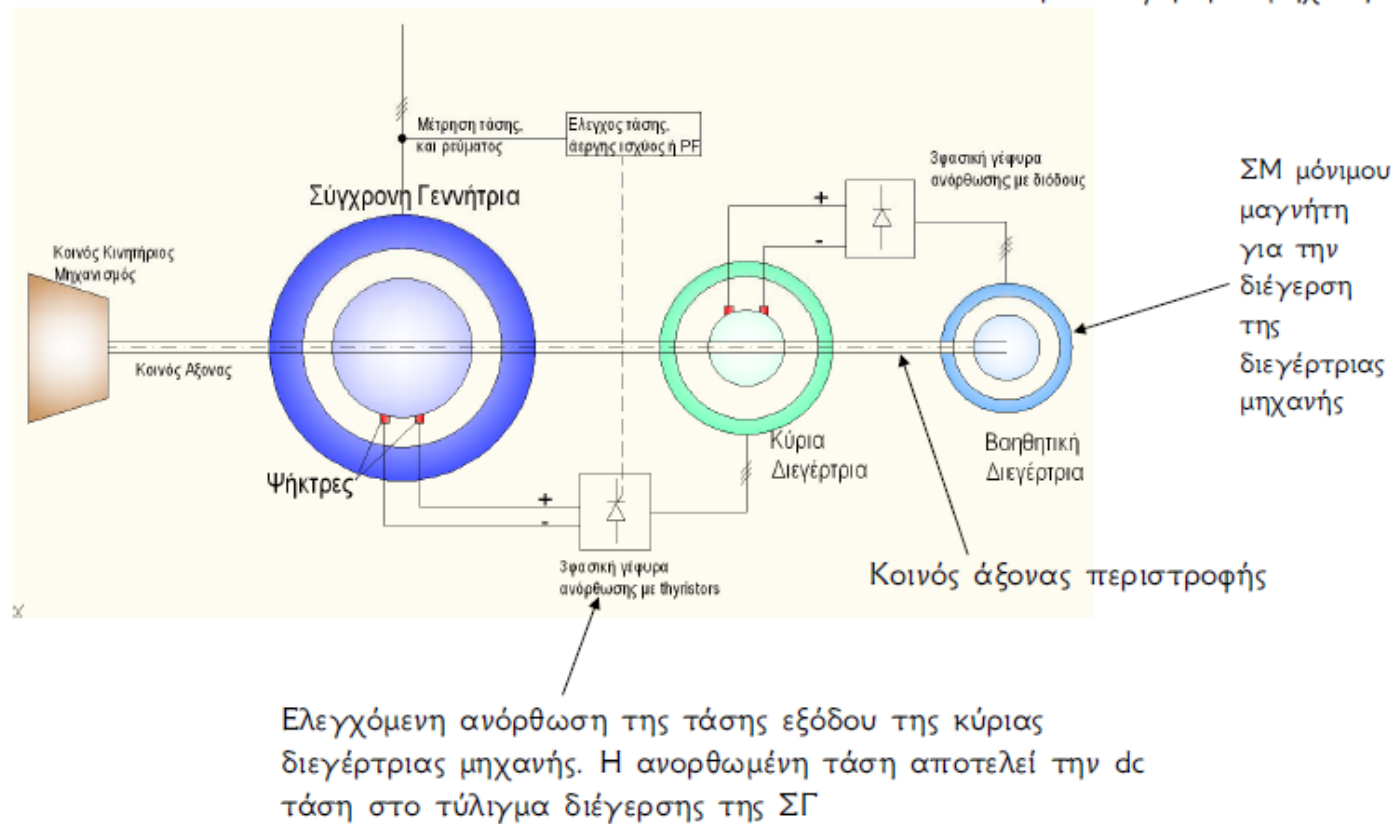
Σχήμα 32. Διεγέρτρια μηχανή σύγχρονης γεννήτριας [33]

Η χρήση δαχτυλιδιών και ψηκτρών για την τροφοδοσία του δρομέα της γεννήτριας με συνεχές ρεύμα απαιτεί συχνή αντικατάσταση αυτών, επειδή φθείρονται λόγω τριβής και επιπλέον η πτώση τάσης στις ψήκτρες μπορεί να προκαλέσει αρκετά σημαντικές απώλειες ισχύος, ιδίως όταν τα ρεύματα που τις διαρρέουν έχουν μεγάλη ένταση.

Σε μεγαλύτερες γεννήτριες χρησιμοποιούνται *διεγέρτριες μηχανές χωρίς ψήκτρες* για να τροφοδοτήσουν με συνεχές ρεύμα το δρομέα της κύριας γεννήτριας, οι οποίες με τη σειρά τους συχνά τροφοδοτούνται από μικρότερες προδιεγέρτριες μηχανές. [Σχήμα 32](#), [Σχήμα 33](#).

Μέθοδοι διέγερσης ΣΜ

ΣΜ η οποία χρησιμοποιείται
σαν κύρια διεγέρτρια μηχανή.



Σχήμα 33. Τρόπος διέγερσης Σύγχρονης γεννήτριας [22]

4.6.2. Ταχύτητα περιστροφής σύγχρονης γεννήτριας

Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$f_c = \frac{n_m P}{120}$$

Όπου	f_c	η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz.
	n_m	η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min(=η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές)
	P	ο αριθμός των πόλων

Επειδή λοιπόν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα που περιστρέφεται και το μαγνητικό πεδίο της, η παραπάνω εξίσωση δίνει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και της ηλεκτρικής συχνότητάς της. Όλες οι γεννήτριες όμως παράγουν συχνότητες 50Hz ή 60 Hz, οπότε η ταχύτητα περιστροφής τους για συγκεκριμένο αριθμό πόλων είναι προκαθορισμένη. Για παράδειγμα, κατά την παραγωγή συχνότητας 60 Hz, μια μηχανή δύο πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα 3600r/min, ενώ κατά την παραγωγή συχνότητας 50 Hz μια μηχανή τεσσάρων πόλων θα πρέπει να περιστρέφεται με ταχύτητα 1500 r/min. Δηλαδή η παραπάνω εξίσωση δίνει την ταχύτητα με την οποία θα πρέπει να περιστρέφεται μια μηχανή, ώστε να παράγει συγκεκριμένη συχνότητα. [22]

4.6.3. Ονομαστική τάση, ταχύτητα και συχνότητα σύγχρονης γεννήτριας

Η ονομαστική συχνότητα μιας σύγχρονης γεννήτριας, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του συστήματος στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα 50Hz (Ευρώπη, Ασία), τα 60Hz (Αμερική) και σε ειδικές εφαρμογές η συχνότητα των

400Hz. Το πιο σημαντικό στοιχείο των προδιαγραφών μιας γεννήτριας είναι η τάση που παράγει στην κανονική της λειτουργία. [22]

$$E_A = K\phi\omega$$

Όπου ϕ η μαγνητική ροή

ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

K σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}}$$

Και N_c ο αριθμός των αγωγών που τοποθετούνται στα αυλάκια της εσωτερικής επιφάνειας του στάτη (τα οποία αντιστοιχούν σε γωνία 0°)

Αυτή η τάση εξαρτάται από τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής, από την ταχύτητα περιστροφής και από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Όμως, επειδή η ταχύτητα και η δομή της μηχανής είναι δεδομένα, η αύξηση της τάσης στα άκρα είναι αποτέλεσμα της αύξησης της ροής στο εσωτερικό της. Όμως η μαγνητική ροή δεν είναι δυνατόν να αυξάνει απεριόριστα, αφού εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας το οποίο παρουσιάζει κάποιο μέγιστο ασφαλούς λειτουργίας.

Ακόμη ένας παράγοντας που περιορίζει την τάση λειτουργίας μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι η τάση διάσπασης της μόνωσης των τυλιγμάτων της. Η τάση εξόδου μιας μηχανής δεν θα πρέπει ποτέ να προκαλεί ρεύματα που να πλησιάζουν τα όρια της διάσπασης αυτής της μόνωσης. [22]

4.6.4. Ρύθμιση τάσης και απώλειες σύγχρονης γεννήτριας

Η ικανότητα μιας γεννήτριας να διατηρεί στα άκρα της μια τάση σταθερή, προσδιορίζεται από τη διακύμανση τάσης VR:

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} * 100\%$$

Όπου V_{nl} η τάση στα άκρα της γεννήτριας χωρίς φορτίο

V_{fl} η τάση στα άκρα της γεννήτριας υπό πλήρες φορτίο

Όσο πιο μικρή τιμή παίρνει το VR τόσο μεγαλύτερη η ικανότητα της γεννήτριας να διατηρεί σταθερή την τάση εξόδου της. [22]

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου, μια γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Κατά τη διαδικασία αυτή πάντα υπάρχουν απώλειες. Η απόδοση μιας σύγχρονης γεννήτριας και γενικότερα μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$$

Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου και της εξόδου μιας μηχανής είναι οι απώλειες που εμφανίζονται στο εσωτερικό της. Έτσι:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} * 100\%$$

Οι απώλειες που εμφανίζονται σε μια γεννήτρια χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

1. Ηλεκτρικές απώλειες χαλκού
2. Απώλειες πυρήνα
3. Μηχανικές απώλειες
4. Κατανεμημένες απώλειες [22]

4.6.5. Ισχύς και ροπή στην έξοδο σύγχρονων γεννητριών

Η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια είναι η μηχανική ισχύς που εφαρμόζεται στον άξονά της, ενώ η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική στο εσωτερικό της μηχανής είναι ίση με:

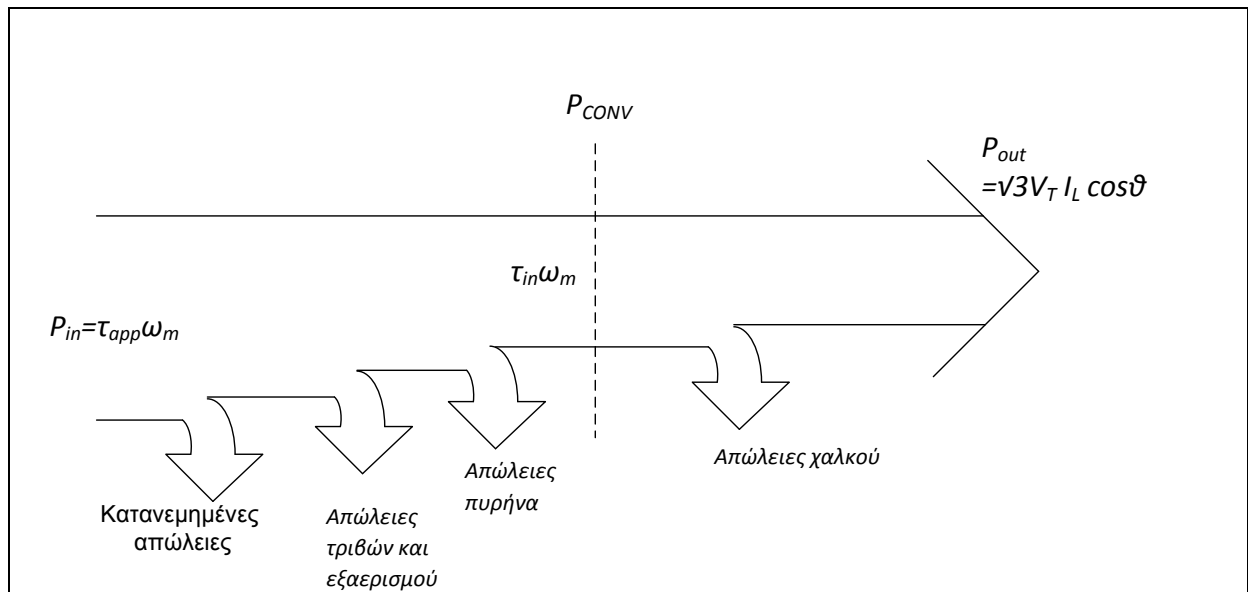
$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma$$

Όπου E_A και I_A η τάση και το ρεύμα της γεννήτριας και γ η γωνία μεταξύ αυτών.

Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου στη γεννήτρια και της ισχύος που μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική οφείλεται στις απώλειες πυρήνα, στις μηχανικές απώλειες και στις κατανεμημένες απώλειες της γεννήτριας. [22]

Η ενεργός ισχύς εξόδου της γεννήτριας P_{out} δίνεται από την :

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta$$



Σχήμα 34. Διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας [22]

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. [21]

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. [13]

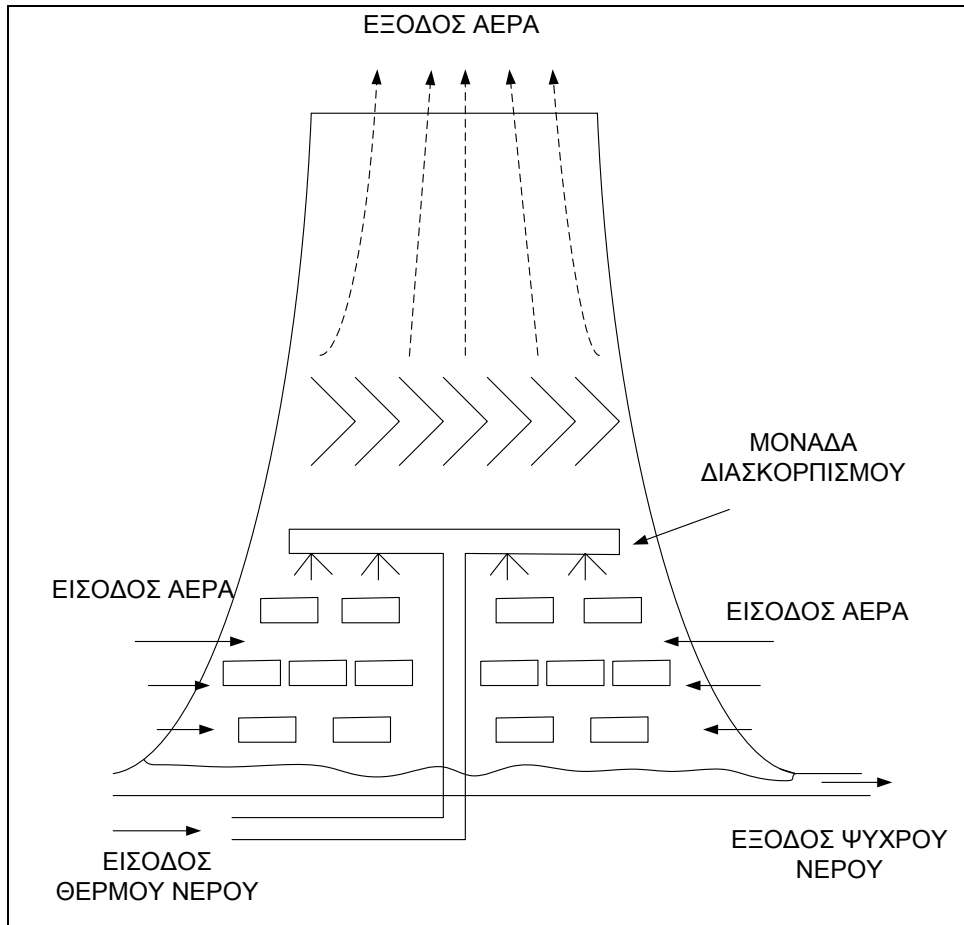
Κλειστού τύπου: Ο κλειστού τύπου συμπυκνωτής μοιάζει με έναν εναλλάκτη θερμότητας και αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο στο οποίο έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα πολλοί αυλοί μικρής διαμέτρου. Στο νερό ψύξης ρέει μέσα στους αυλούς, ενώ ο ατμός εκτόνωσης κυκλοφορεί έξω από αυτούς στον υπόλοιπο χώρο του 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. [12]

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](#).



Σχήμα 35. Πύργος ψύξης φυσικού ελκυσμού[12]

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 5°C 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 $1300 \times 10^3 \text{ m}^3$ νερού ημερησίως. Οι ανάγκες για συμπλήρωμα σε νερό σε μια τέτοια εγκατάσταση φτάνουν τα $25 \times 10^3 \text{ m}^3$ την ημέρα.

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 8°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.

Είναι δηλαδή:

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

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

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

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.

5. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΑΚΡΟΠΟΤΑΜΟΥ ΚΑΒΑΛΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά το γεωθερμικό πεδίο του Ακροποτάμου Καβάλας, υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από τα χαρακτηριστικά του πεδίου αυτού, και τέλος διαστασιολογείται ο τεχνολογικός εξοπλισμός της μονάδας.

5.1. Περιγραφή Πεδίου

Στα διοικητικά όρια του νομού Καβάλας και σε απόσταση 41km ΝΔ της Καβάλας και ανατολικά των εκβολών του ποταμού Στρυμόνα, εντοπίστηκε ένα γεωθερμικό πεδίο (βεβαιωμένο) χαμηλής και ενδεχομένως και μέσης ενθαλπίας.

Κατά τη χρονική περίοδο 2003-2006 το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών της Ελλάδας, (Ι.Γ.Μ.Ε.) , πραγματοποίησε μια σειρά συστηματικών γεωθερμικών ερευνών στην περιοχή που εκτείνεται μεταξύ του Στρυμονικού κόλπου και των ιαματικών λουτρών των Ελευθερών. Μετά από μια λεπτομερή μελέτη σχετικά με τα γεωλογικά και τα τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τις μετρήσεις θερμοκρασίας και τις γεωφυσικές έρευνες, κατασκευάστηκαν έξι γεωτρήσεις σε βάθη 180-545 m, όπου μετρήθηκε θερμοκρασία μέχρι και 90°C. Αυτές οι γεωτρήσεις, απέδειξαν την ύπαρξη ενός από τα πιο σημαντικά γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας της Ελλάδας. [19]

Οι γεωτρήσεις έρευνας-παραγωγής προσδιορίζουν τη στρωματογραφία, την κατανομή της θερμοκρασίας με το βάθος (γεωθερμική βαθμίδα), τη μεταβολή της αγωγιμότητας του νερού με το βάθος και τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, ενώ μερικές εξ' αυτών μπορούν να τεθούν προς εκμετάλλευση με ικανή ποσότητα γεωθερμικών ρευστών για ενεργειακές χρήσεις.

Το βεβαιωμένο πεδίο παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

Έκταση περιοχής	6,9 km
Βάθος ταμιευτήρα	
<i>Ρηχός ταμιευτήρας</i>	100-185 m
<i>Βαθύς ταμιευτήρας</i>	240-545 m
Θερμοκρασία γεωθερμικών ταμιευτήρων	45-90 C
Παροχή	415 m ³ /h
Χημική σύσταση γεωθερμικών ρευστών	Πίνακας 6

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά γεωθερμικού πεδίου Ακροποτάμου Καβάλας [11]

Στο συνημμένο χάρτη παρουσιάζεται η χωροθέτηση του πεδίου και στο συνημμένο πίνακα οι συντεταγμένες των σημείων οριοθέτησης του γεωθερμικού πεδίου και των εκτελεσθέντων γεωτρήσεων. [11]

ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΒΕΒΑΙΩΜΕΝΟΥ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ		
ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ(ΕΓΣΑ ' 87)	
	Χ	Υ
A	500284,69	4508515,00
B	500295,42	4509179,94
Γ	507040,10	4508150,01
Δ	507068,62	4507571,50

ΚΟΡΥΦΗ ΠΟΛΥΓΩΝΟΥ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ(ΗΑΤΤ)	
	Χ	Υ
A	3118,75	-2279,15
B	3129,22	-1613,95
Γ	9876,85	-2641,59
Δ	9905,62	-3220,31

Πίνακας 3 Συντεταγμένες των σημείων οριοθέτησης του γεωθερμικού πεδίου[11]

ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ(ΗΑΤΤ)	
	Χ	Υ
ΑΚΡ-1	7259,07	-3401,94
ΑΚΡ-2	4187,48	-2318,74
ΑΚΡ-3	5693,32	-3010,41
ΑΚΡ-4	5697,32	-2997,41
ΑΚΡ-6	9127,72	-3265,14

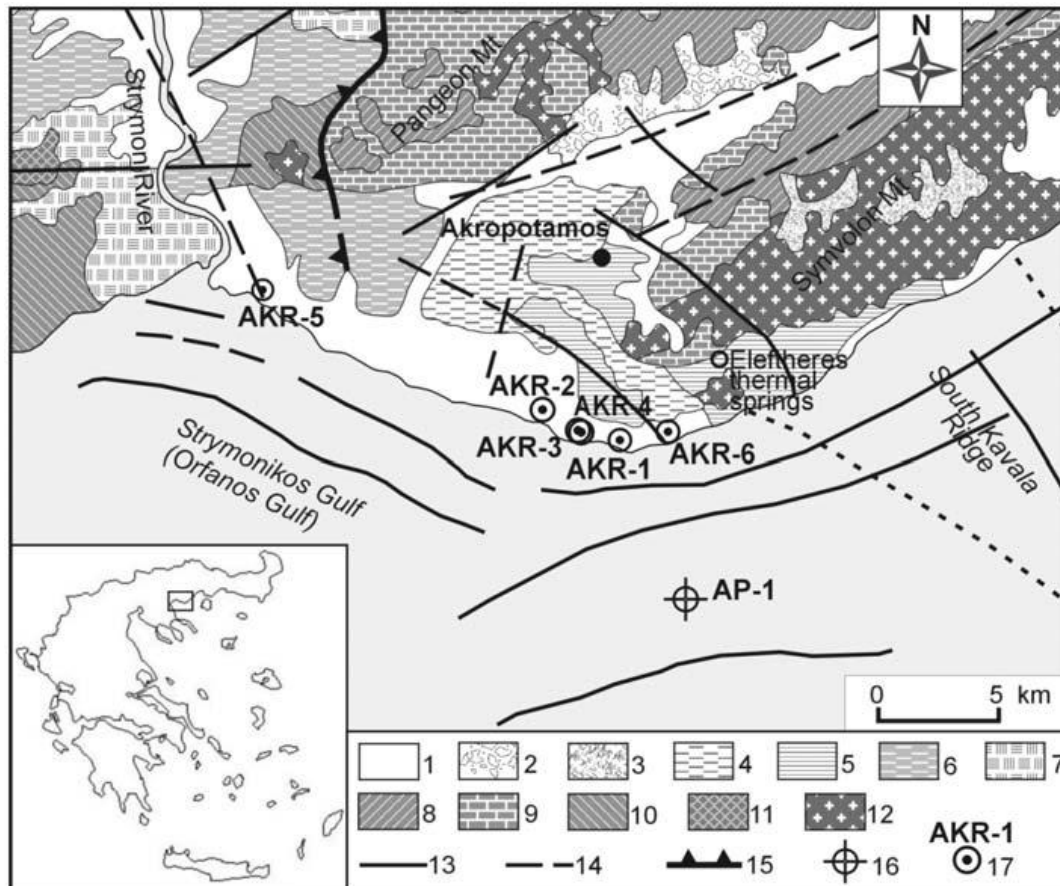
Πίνακας 4 Συντεταγμένες εκτελεσθέντων γεωτρήσεων [11]

"ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ"			
Δείγμα	Ra	U (μg/l)	Rn (pCi/l)
AKP-2		< 5	
AKP-4		< 5	

Πίνακας 6 Χημικές αναλύσεις των γεωθερμικών ρευστών [11]

5.1.1. Γεωλογικά-τεκτονικά χαρακτηριστικά

Το γεωθερμικό πεδίο του Ακροποτάμου ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του Στρυμονικού κόλπου, κοντά στις εκβολές αυτού. Παρακάτω παρατίθεται ένας χάρτης με τα γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής.



Χάρτης 2 Γεωλογικά-τεκτονικά χαρακτηριστικά περιοχής Ακροποτάμου [19]

Από τις έξι γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό ενδιαφέρον παρουσίασαν οι γεωτρήσεις Ακροπόταμος 1 και Ακροπόταμος 3. Για αυτόν το λόγο παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία για τις δύο αυτές γεωτρήσεις.

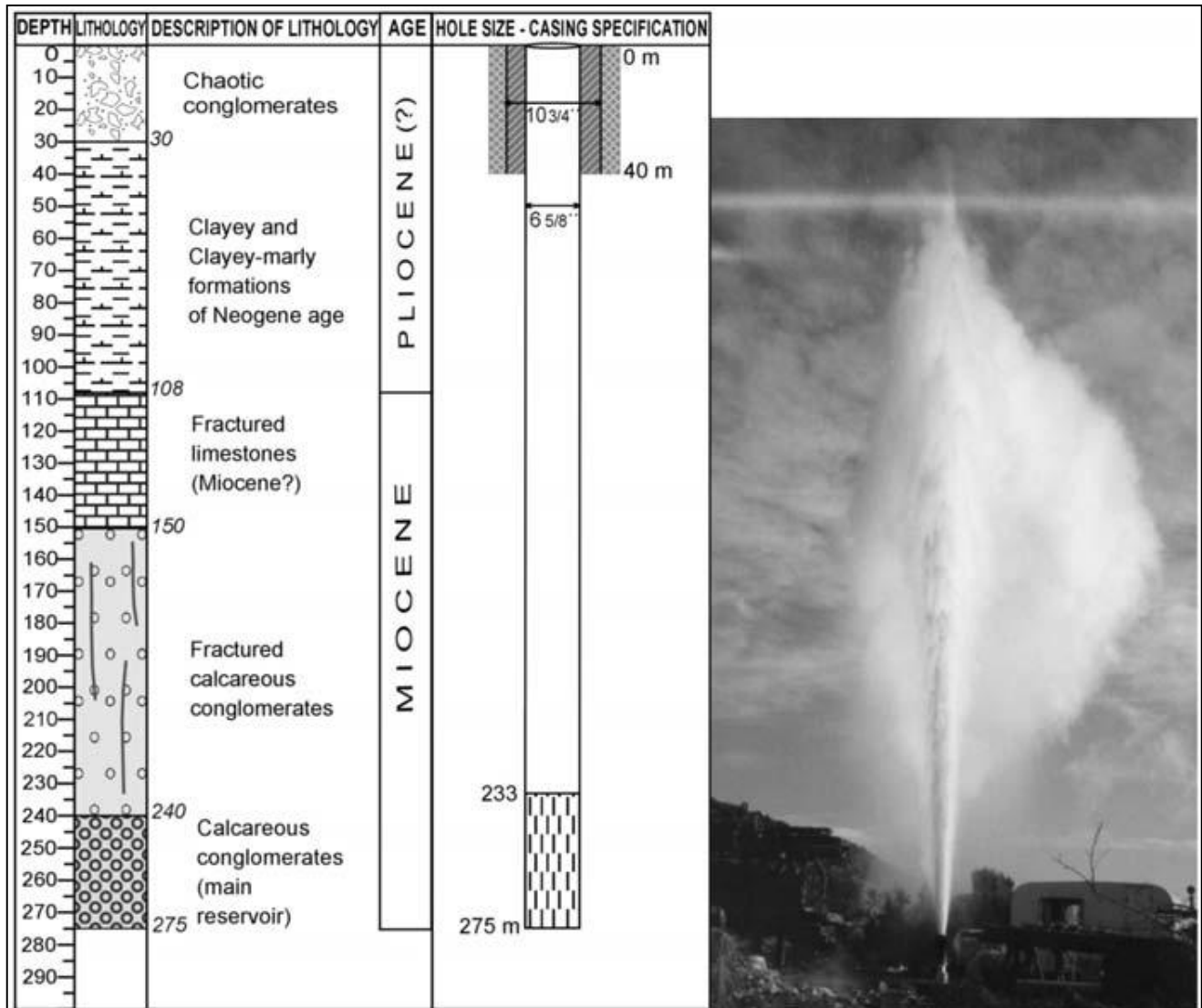
5.1.2. Γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 1 (σύμφωνα με τη γεώτρηση του ΙΓΜΕ Οκτώβριος 2003 - Φεβρουάριος 2006)

Η πρώτη γεώτρηση στην περιοχή του Ακροποτάμου Καβάλας, Ακροπόταμος 1, πραγματοποιήθηκε στην παράκτια ζώνη, νοτίως του δρόμου Θεσσαλονίκη-Νέα Πέραμος-Καβάλα. Οι συντεταγμένες της γεώτρησης είναι Χ: 504423 και Υ: 4507391(Greek Grid, GGRS1987) και το απόλυτο υψόμετρό της περίπου 9 μέτρα. Κατασκευάστηκε την περίοδο Οκτωβρίου-Δεκεμβρίου 2003. Το συνολικό βάθος της γεώτρησης είναι 275 μέτρα. Ο γεωθερμικός ταμιευτήρας βρίσκεται σε βάθος 240-275 μέτρων. Η στρωματογραφία της γεώτρησης φαίνεται στο [Σχήμα 36](#). [19]

Οθόνες τοποθετήθηκαν σε βάθος 233 έως 275 μέτρα. Η γεώτρηση αυτή στο γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 1, παράγει περίπου 150 m³/h νερού, θερμοκρασίας 83°C με αρτεσιανή ροή. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού είναι 7718 μS/cm και επίσης στο γεωθερμικό ρευστό εμπεριέχεται σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). [19]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Γ/Θ ΠΕΔΙΟΥ ΑΚΡ-1	
Συντεταγμένες	X: 504423 Y: 4507391
Απόλυτο υψόμετρο	9m
Συνολικό βάθος γεώτρησης	275m
Γεωθερμικός ταμιευτήρας	240-275m 83°C
Παροχή	150 m ³ /h
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	7718 μS/cm

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά Γ/Θ πεδίου Ακρ-1. [19]



Σχήμα 36. (αριστερά) Στρωματογραφία και μηχανικό διάγραμμα της γεώτρησης Ακροπόταμος 1, (δεξιά) Φωτογραφία που δείχνει τη ροή της γεώτρησης Ακροπόταμος 1. [19]

Έπειτα από επίσκεψη στην περιοχή τον Αύγουστο του 2011, βρέθηκε η γεώτρηση Ακροπόταμος 1 και παρουσιάζεται στις παρακάτω φωτογραφίες:



Εικόνα 1 Φωτογραφίες γεώτρησης στην περιοχή του Ακροποτάμου(ΑΚΡ-1)

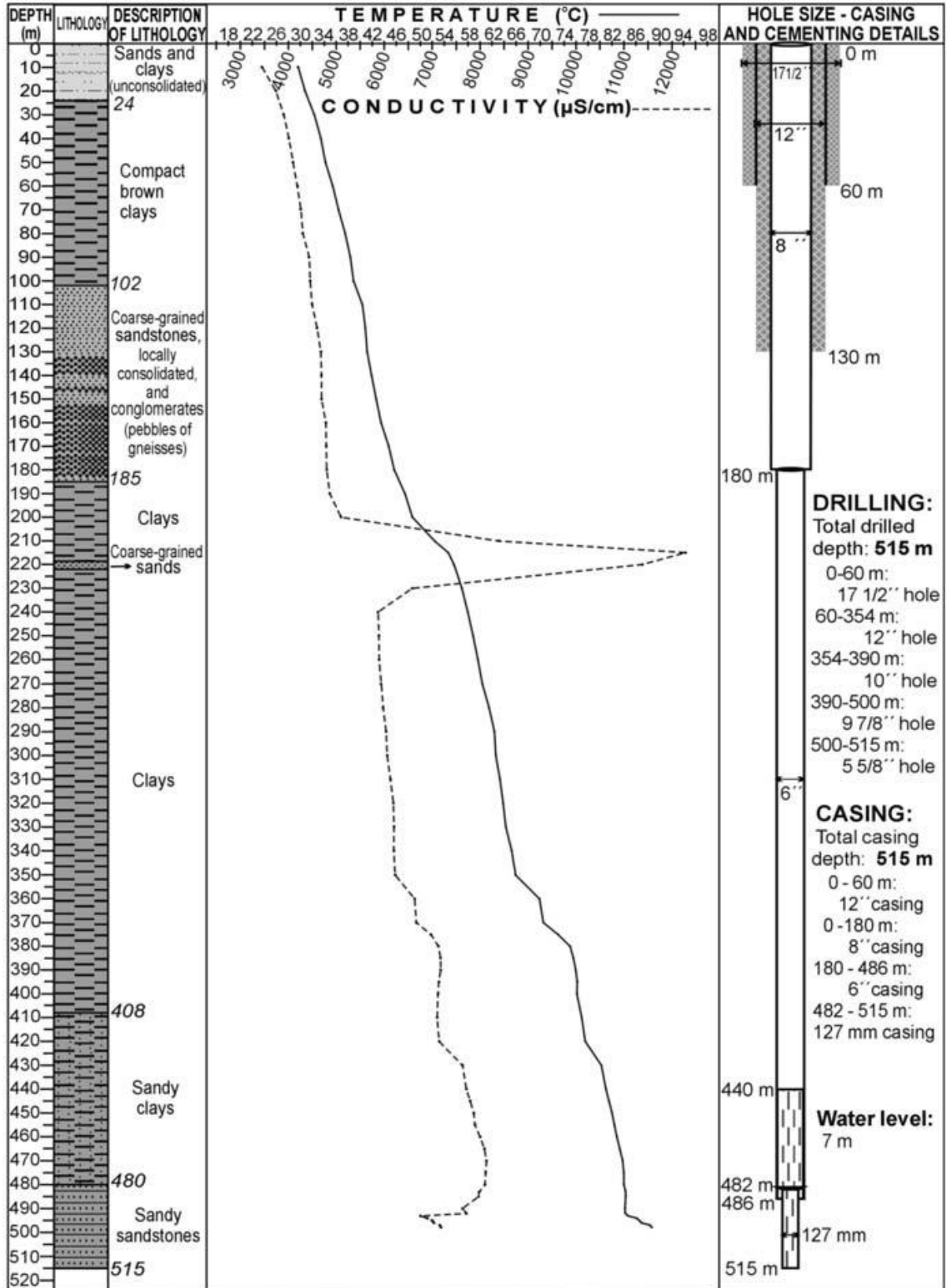
5.1.3. Γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 3 (σύμφωνα με τη γεώτρηση του ΙΓΜΕ Οκτώβριος 2003 - Φεβρουάριος 2006)

Η γεώτρηση έλαβε χώρα σε απόσταση 1.62 km νοτιοανατολικά της γεώτρησης Ακροπόταμος 2, στην παραλιακή ζώνη (Χάρτης 2). Οι συντεταγμένες της είναι Χ: 502858 και Υ: 4507783 (Greek Grid, GGRS1987) και το απόλυτο υψόμετρό της περίπου 2m. Κατασκευάστηκε την περίοδο Μαΐου-Οκτωβρίου 2004. Το συνολικό βάθος της γεώτρησης είναι 515m. Η στρωματογραφία της γεώτρησης φαίνεται στο [Σχήμα 37](#). Ο βαθύς γεωθερμικός ταμιευτήρας βρίσκεται περίπου σε βάθος 480-515 m και περιέχει γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας περίπου 90 °C. Ο ρηχός ταμιευτήρας βρίσκεται σε βάθος 102-185 m και περιέχει γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 48-49 °C. Οθόνες τοποθετήθηκαν σε βάθος 440 έως 515 m. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασίας και αγωγιμότητας εντός της γεώτρησης σε

διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν 88.9 °C σε βάθος 498 m. Αν λάβουμε υπόψη ότι η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της περιοχής είναι 16.8 °C, η μέση γεωθερμική βαθμίδα υπολογίζεται ίση με 14.48 °C/100 m μέχρι το βάθος των 498 m. Όλες οι μετρήσεις αγωγιμότητας παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στα βάθη 100-230 m και η μέγιστη τιμή είναι 14000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στα 215 m, η οποία καταγράφηκε στις 9/9/2004. Αυτό υποδεικνύει την παρουσία υφάλμυρου νερού στο ρηχό ταμιευτήρα, με θερμοκρασία 48-50 °C. Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται επίσης η σχέση της αγωγιμότητας με το βάθος του γεωθερμικού πεδίου, με βάση μετρήσεις που έγιναν στις 27 Σεπτεμβρίου 2004. Η γεώτρηση αυτή στο γεωθερμικό πεδίο Ακροπόταμος 3, παράγει περίπου 200 m^3/h νερού, θερμοκρασίας 90°C με αρτεσιανή ροή. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού είναι 5858 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και επίσης στο γεωθερμικό ρευστό εμπεριέχεται σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Συνοπτικά, τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα: [19]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Γ/Θ ΠΕΔΙΟΥ ΑΚΡ-3	
Συντεταγμένες	X: 502858 Y: 4507783
Απόλυτο υψόμετρο	2m
Συνολικό βάθος γεώτρησης	515m
Βαθύς γεωθερμικός ταμιευτήρας	480-515m 90°C
Ρηχός γεωθερμικός ταμιευτήρας	102-185m 48-49 °C
Παροχή	200 m^3/h
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	5858 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά Γ/Θ πεδίου Ακρ-3. [19]



Σχήμα 37. Γεώτρηση Ακροπόταμος 3. [19]

Η γεώτρηση που επιλέχτηκε για να μελετηθεί η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τρίτη κατά σειρά γεώτρηση Ακροπόταμος-3, καθώς εκεί βρέθηκε η μεγαλύτερη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού.

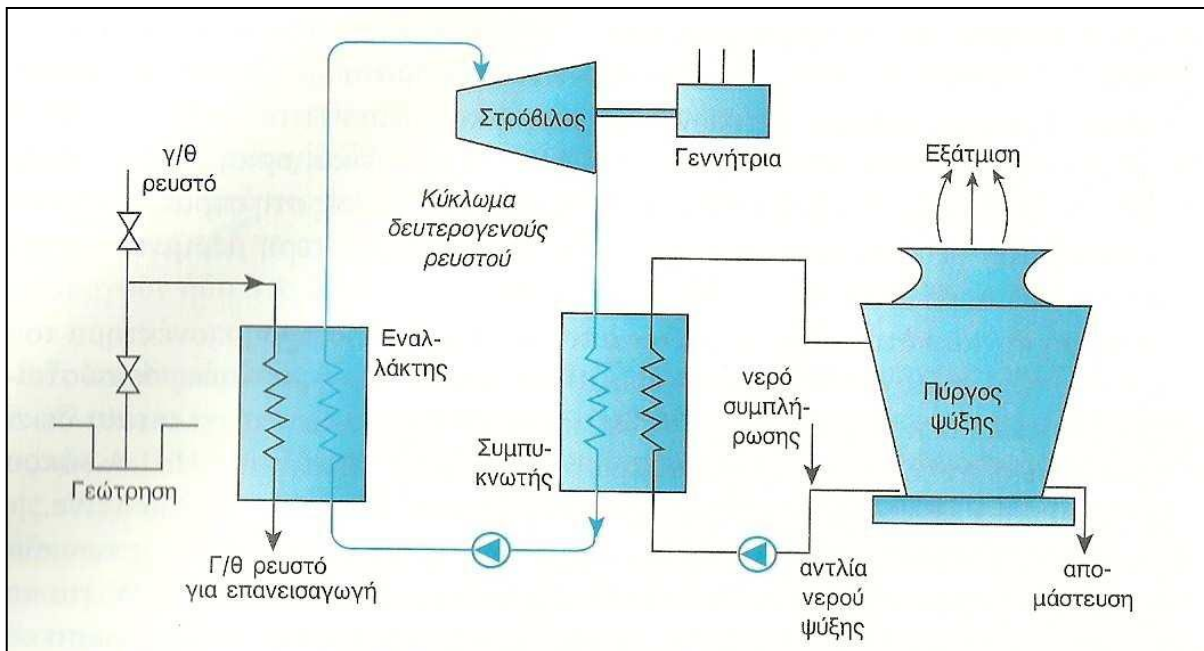
5.2. Υπολογισμός Ισχύος γεωθερμικής μονάδας Ακροποτάμου Καβάλας

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφηκε μια γεωθερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι πρόκειται για μια γεωθερμική μονάδα μέσης ενθαλπίας, ο κύκλος λειτουργίας της μονάδας είναι δυαδικός, ο οποίος είναι ο καταλληλότερος για την περίπτωση γεωθερμικών ρευστών χαμηλής ενθαλπίας, καθώς χρησιμοποιεί ένα δευτερεύον ρευστό ως ρευστό λειτουργίας, το οποίο έχει χαμηλότερο σημείο ζέσεως σε σχέση με το γεωθερμικό ρευστό. Το δευτερεύον ρευστό, μεταξύ άλλων επιλέχτηκε να είναι το ισοβουτάνιο, το οποίο χρησιμοποιείται μέσα σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine (OCR).

Η εκτόνωση του υπό πίεση δευτερεύοντος ρευστού στο στρόβιλο και οι θερμοδυναμικές ιδιότητές του, είναι αυτά ουσιαστικά που καθορίζουν τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας, επομένως και τις διαστάσεις των μηχανών που την απαρτίζουν αλλά και το συνολικό κόστος.

Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής του Ακροποτάμου, θα έχει λοιπόν τα εξής χαρακτηριστικά (Σχήμα 38):

- Δυαδικό κύκλο λειτουργίας
- Επιλογή δευτερεύοντος ρευστού λειτουργίας
- Οργανικό κύκλο Rankine
- εναλλάκτη θερμότητας
- στρόβιλο
- γεννήτρια
- συμπιεστή και πύργο ψύξης



Σχήμα 38. Σχεδιάγραμμα μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ακροποτάμου Καβάλας [38]

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τρία διαφορετικά θερμοδυναμικά σενάρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον Ακροπόταμο Καβάλας, επιλέγεται το βέλτιστο και κατόπιν γίνεται διαστασιολόγηση του τεχνολογικού εξοπλισμού της μονάδας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα βήματα αυτά συνοψίζονται παρακάτω:

- Παρουσίαση δευτερεύοντος ρευστού ισοβουτανίου
- Θερμοδυναμικά σενάρια
- Επιλογή βέλτιστου θερμοδυναμικού σεναρίου

5.2. 1. Επιλογή δευτερεύοντος ρευστού λειτουργίας

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των χρησιμοποιούμενων ψυκτικών, τόσο στη μείωση του πάχους της στιβάδας του όζοντος όσο και στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, προωθείται η χρήση του ισοβουτανίου. Έτσι, τα παλαιότερα ψυκτικά μέσα (χλωροφθοράνθρακες, υδροχλωροφθοράνθρακες και υδροφθοράνθρακες) αντικαθίστανται σταδιακά από το φιλικότερο προς το περιβάλλον

ισοβουτάνιο, το οποίο έχει κυριαρχήσει σήμερα στην αγορά των οικιακών ψυγείων με την εμπορική ονομασία R600a. Το ισοβουτάνιο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως μείγμα με προπάνιο (R290). [24]

Παρακάτω παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας για τα ρευστά ισοβουτάνιο, φρέον και τετραφθοροαιθάνιο.

Βασικές φυσικές ιδιότητες του R600a(ισοβουτάνιο) σε σύγκριση με τα το R12(φρέον) και R134a(Τετραφθοροαιθάνιο)			
Παράμετροι	R600a	R134a	R12
Σημείο βρασμού (P = 0,1MPa), °C	-12	-26,5	-29,8
Σημείο ψύξης, °C	-159	-101,1	-158
Κρίσιμη θερμοκρασία, °C	135	101,15	122
Κρίσιμη πίεση, MPa	3,65	4,06	4,11
Πίεση κορεσμού -15 °C, MPa	0,089	0,164	0,182
Δυναμικό καταστροφής του όζοντος (ODP)	0	0	1

Πίνακας 9 Βασικές φυσικές ιδιότητες του R600a(ισοβουτάνιο) σε σύγκριση με τα το R12(φρέον) and R134a(Τετραφθοροαιθάνιο) [36]

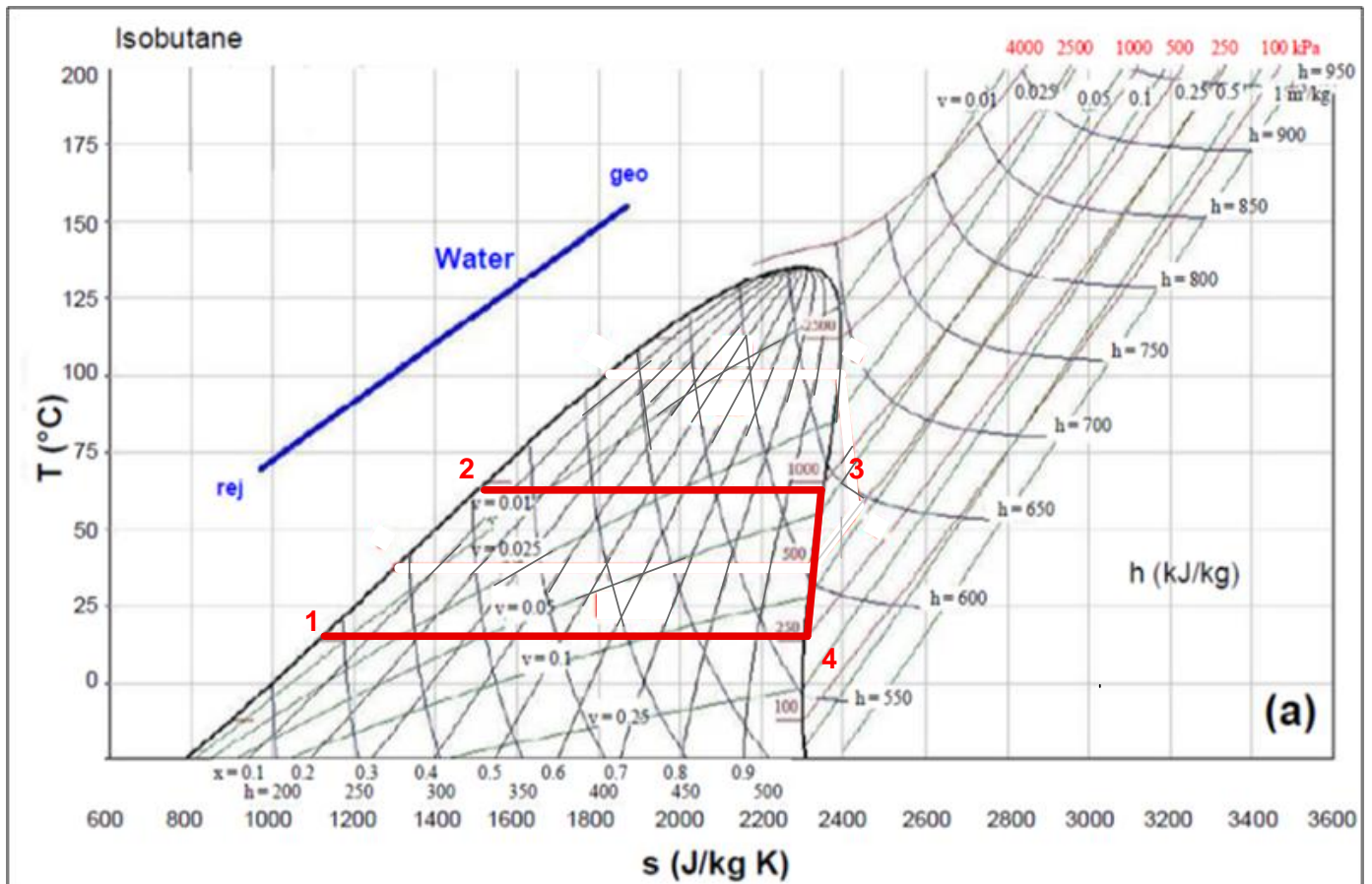
Το ισοβουτάνιο ή μεθυλοπροπάνιο ή τριμεθυλομεθάνιο ανήκει στην ομόλογη σειρά των αλκανίων, είναι δηλαδή άκυκλος κορεσμένος υδρογονάνθρακας, με χημικό τύπο C_4H_{10} και σύντομο συντακτικό τύπο $(CH_3)_3CH$. Είναι ισομερές του n-βουτανίου. Παράγεται από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο ή με ισομερείωση του n-βουτανίου. Χρησιμοποιείται κυρίως ως ψυκτικό και προωθητικό αέριο. Απομονώνεται από το φυσικό αέριο (-5%). Απομονώνεται από το υγραέριο. Απομονώνεται από αέρια μίγματα που προκύπτουν από πυρόλυση προϊόντων διύλισης πετρελαίου ή πολυμερών υδρογονανθράκων.

Το ισοβουτάνιο χρησιμοποιείται και ως πρώτη ύλη για την παραγωγή μιας πλειάδας οργανικών ενώσεων (βλέπε n-βουτάνιο). Κυρίως, όμως, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισοβουτυλενίου με αφυδρογόνωση, από το οποίο στη συνέχεια παράγεται το πρόσθετο βενζίνης MTBE, ενώ με οξείδωση δίνει 2-μεθυλο-2-προπανόλη. [24]

Επίσης χρησιμοποιείται σε αντιδράσεις αλκυλίωσης με προπένιο για την παραγωγή ενός μίγματος υδρογονανθράκων με διακλαδισμένες ανθρακικές αλυσίδες, δηλαδή προϊόντων με υψηλότερους αριθμούς οκτανίου από εκείνους των αντιδρώντων. Τέλος, το ισοβουτάνιο

χρησιμοποιείται ως προωθητικό αέριο για τρόφιμα συσκευασμένα σε δοχεία αεροζόλ με τον κωδικό αριθμό E943β,[24]. Στον πίνακα 10 παρατίθενται οι ιδιότητες του ισοβουτανίου

Το διάγραμμα Θερμοκρασίας-εντροπίας του ισοβουτανίου (Σχήμα 39), είναι το πιο σημαντικό στοιχείο της μελέτης, καθώς μας δίνει όλες τις πληροφορίες για την πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα, εντροπία, ενθαλπία του ισοβουτανίου σε κάθε σημείο του κύκλου Rankine:



Σχήμα 39. T-s διάγραμμα Ισοβουτανίου [17]

Το σημείο 1 του κύκλου Rankine στο παραπάνω σχήμα, αντιπροσωπεύει το σημείο εισόδου του ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας. Το σημείο 2 είναι η κατάσταση εξόδου του ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας, το σημείο 3 είναι η είσοδος του ρευστού στο στρόβιλο, το σημείο 4 είναι η έξοδος του ρευστού από το στρόβιλο μετά την ισοβαρή εκτόνωσή του και την παραγωγή έργου στο στρόβιλο και έτσι ο κύκλος κλείνει και το ρευστό

επανακυκλοφορεί. Στην παράγραφο που αναλύονται τα θερμοδυναμικά σενάρια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι θερμοκρασίες, η ενθαλπία και η πίεση του ρευστού σε κάθε σημείο του κύκλου Rankine.

ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ gr/mol	ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΙΕΣΗ ρc (MPa)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ Tc (C)	ΚΡΙΣΙΜΟΣ ΟΓΚΟΣ Vc (10 ⁻³ m ³ /kg)	ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ρc (kg/ m ³)
ΙΣΟΒΟΥΤΑΝΙΟ C₄H₁₀	58.123	3,65	134,95	4,5248	221
	ΑΝΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (MJ/ m³)	ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (MJ/ m³)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΙΕΣΗ (MPa)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (K)	
	133,119	122,91	35	600	
	ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ		ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ		
	ΣΗΜΕΙΟ ΒΡΑΣΜΟΥ °C	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/ m³ (στα 101.3 kPa στο σημείο βρασμού)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/ m³ (στα 101.3 kPa στο σημείο βρασμού)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ (στα 101.3 kPa και 15 °C)	ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ (m³/kg) (στα 101.3 kPa και 21 °C)
	-12	593.4	2.82	0.9675	0.406
	ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ				
	Cp kJ/(mol.K) (101.3 kPa και 15 °C)	Cv kJ/(mol.K)(101.3 kPa και 15 °C)	Cp/Cv	ΙΞΩΔΕΣ (101.3 kPa και 0 °C)	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ mW/(m.K) (101.3 kPa και 0 °C)
	0.095	0.086	1.095.845	0.0000689 Poise	13.97

Πίνακας 10 Ιδιότητες ισοβουτανίου [15], [18]

5.2. 2. Παραδοχές-Θερμοδυναμικά σενάρια

Πριν προχωρήσουμε στη διαστασιολόγηση των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν τη μονάδα μας, παραθέτουμε έναν πίνακα με όλα τα απαραίτητα δεδομένα, που αφορούν κυρίως στα δύο ρευστά του δυαδικού κύκλου αλλά και τις παραδοχές-στόχους της εγκατάστασης:

Το γεωθερμικό πεδίο της σύμφωνα με τη γεώτρηση Ακροπόταμος 3 , έχει δυνατότητα παροχής γεωθερμικού ρευστού μέγιστης θερμοκρασίας 90 °C και 200m³/h. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία που φτάνει στην επιφάνεια της γεώτρησης είναι 85 ° C. Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης μετατροπής της θερμικής ενέργειας του ρευστού λειτουργίας σε κινητική περιστροφική ενέργεια στον άξονα του στροβίλου θεωρείται ίσος με 0.3. Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας θεωρείται ίσος με 0,97 και ο βαθμός απόδοσης αμμοστροβίλου ίσος με 0,95. Η θερμοκρασία εισόδου του ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας είναι 15 °C. Τα παραπάνω συνοψίζονται στους πίνακες που ακολουθούν:

ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
Βαθμός απόδοσης αμμοστροβίλου	$\eta_m = 0,95$
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{GEN} = 0,97$
Ισεντροπικός θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th} = 0,3$

Πίνακας 11 Βαθμοί απόδοσης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ Γ/Θ ΠΕΔΙΟΥ ΑΚΡ-3	
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{m}_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$
Μέγιστη θερμοκρασία Γ/Θ ρευστού	$T_{1i} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$

Πίνακας 12 Δεδομένα Γ/Θ πεδίου Ακρ-3.

Στη συνέχεια θα μελετηθούν 3 διαφορετικά θερμοδυναμικά σενάρια με 3 υποκατηγορίες το καθένα. Θεωρώντας ότι αξιοποιείται όλη η παροχή του γεωθερμικού πεδίου (200 m³/h), θα μελετηθούν τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες γεωθερμικού ρευστού και τρεις διαφορετικοί βαθμοί απόδοσης για την κάθε θερμοκρασία:

1^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ/ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}^{*1}	$T_{1i} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	$\varepsilon = 0,7 \div 0,5$

Πίνακας 13 Δεδομένα 1^{ου} Θερμοδυναμικού σεναρίου

*1 Ο δείκτης 1 αναφέρεται στο γ/θ ρευστό

2^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ/ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}	$T_{1i}=75\text{ }^{\circ}\text{C}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	$\varepsilon=0,7\div 0,5$

Πίνακας 14 Δεδομένα 2^{ου} Θερμοδυναμικού σεναρίου

3^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ/ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}	$T_{1i}=65\text{ }^{\circ}\text{C}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	$\varepsilon=0,7\div 0,5$

Πίνακας 15 Δεδομένα 3^{ου} Θερμοδυναμικού σεναρίου

5.2.2.1. 1^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο

Στο πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο η θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στον εναλλάκτη είναι $T_{1i}=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, η αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας στις τρεις υποπεριπτώσεις είναι $\varepsilon_1=0,7$, $\varepsilon_2=0,6$, $\varepsilon_3=0,5$. Και η θερμοκρασία εισόδου στον κύκλο του δευτερεύοντος ρευστού (ισοβουτάνιο) είναι $T_{2i}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

1^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}	$T_{1i}=85\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας T_{2i} ^{*2}	$T_{2i}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200\text{ m}^3/\text{h}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας	$\varepsilon_1=0,7$ $\varepsilon_2=0,6$ $\varepsilon_3=0,5$

Πίνακας 16 Δεδομένα 1^{ου} Θερμοδυναμικού σεναρίου

^{*2} Ο δείκτης 2 αναφέρεται στο δευτερεύον ρευστό, το ισοβουτάνιο

Αρχικά, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού από τον εναλλάκτη θερμότητας, από το πρώτο σκέλος του τύπου της αποδοτικότητας του εναλλάκτη [14]:

$$\varepsilon = \frac{W_1}{W_{min}} * \frac{T_{1,i} - T_{1,o}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = \frac{W_2}{W_{min}} * \frac{T_{2,o} - T_{2,i}}{T_{1,i} - T_{2,i}}$$

Όπου $W_1 = \dot{m}_1 * c_{p1}$

$$W_2 = \dot{m}_2 * c_{p2}$$

Προκειμένου να έχουμε τη μέγιστη θερμοκρασία εξόδου ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας, πρέπει να ισχύει:

$$W_2 < W_1$$

Οπότε

$$W_2 = W_{min}$$

Έστω

$$\frac{W_1}{W_{min}} = 1,01$$

Τότε:

$$\varepsilon = \frac{W_1}{W_{min}} * \frac{T_{1,i} - T_{1,o}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = 1,01 * \frac{T_{1,i} - T_{1,o}}{T_{1,i} - T_{2,i}}$$

Και

$$T_{1,o} = T_{1,i} - \frac{\varepsilon(T_{1,i} - T_{2,i})}{1,01} = 90 - \frac{0,7 * (90 - 15)}{1,01} = 36,048 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του γ/θ ρευστού από τον εναλλάκτη θερμότητας, $T_{1,i}$ και $T_{1,o}$ την παροχή του, \dot{m}_1 , μπορεί να υπολογιστεί η συνολική θερμορροή του εναλλάκτη θερμότητας, από το πρώτο σκέλος της εξίσωσης [14]:

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

Η ειδική θερμότητα c_{p1} του γ/θ ρευστού υπολογίζεται από πίνακες [14], για μέση θερμοκρασία:

$$T_1 = -\frac{T_{1,i} + T_{1,o}}{2} = \frac{90 + 38,01}{2} = 60.74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Και

$$c_{p1} = 4185.29 \text{ [J/kg * K]}$$

Η παροχή του γεωθερμικού ρευστού όπως αναφέρεται παραπάνω είναι $\dot{V}_1 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$. Για να μετατρέψουμε την παροχή αυτή σε μονάδες kg/sec, πρέπει να γνωρίζουμε την πυκνότητά του, στη θερμοκρασία $T_{1,i} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$. Από πίνακες βρίσκουμε [14]:

$$\rho = 968.1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Και

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Οπότε

$$\dot{m}_1 = 53,78 \text{ [kg/sec]}$$

$$Q = \dot{m}_1 * c_{p1} * (T_{1,i} - T_{1,o}) = 53,78 * 4186,6 * (90 - 38.01) = 10.920.655,48 \text{ [Watt]}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας [14]:

$$\varepsilon = \frac{W_2}{W_{min}} * \frac{T_{2,o} - T_{2,i}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = \frac{T_{2,o} - T_{2,i}}{T_{1,i} - T_{2,i}} \Rightarrow$$

$$T_{2,o} = T_{2,i} + \varepsilon * (T_{1,i} - T_{2,i}) = 15 + 0,7 * (90 - 15) = 64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Η παροχή του ισοβουτανίου μπορεί να υπολογιστεί από τη γνωστή πλέον συνολική θερμορροή μεταξύ των δύο ρευστών του εναλλάκτη θερμότητας:

$$Q = \dot{m}_2 * c_{p2} * (T_{2,o} - T_{2,i}) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_2 = \frac{Q}{c_{p2} * (T_{2,o} - T_{2,i})}$$

Όπου η ειδική θερμοχωρητικότητα c_{p2} του ισοβουτανίου υπολογίζεται από πίνακες για μέση θερμοκρασία:

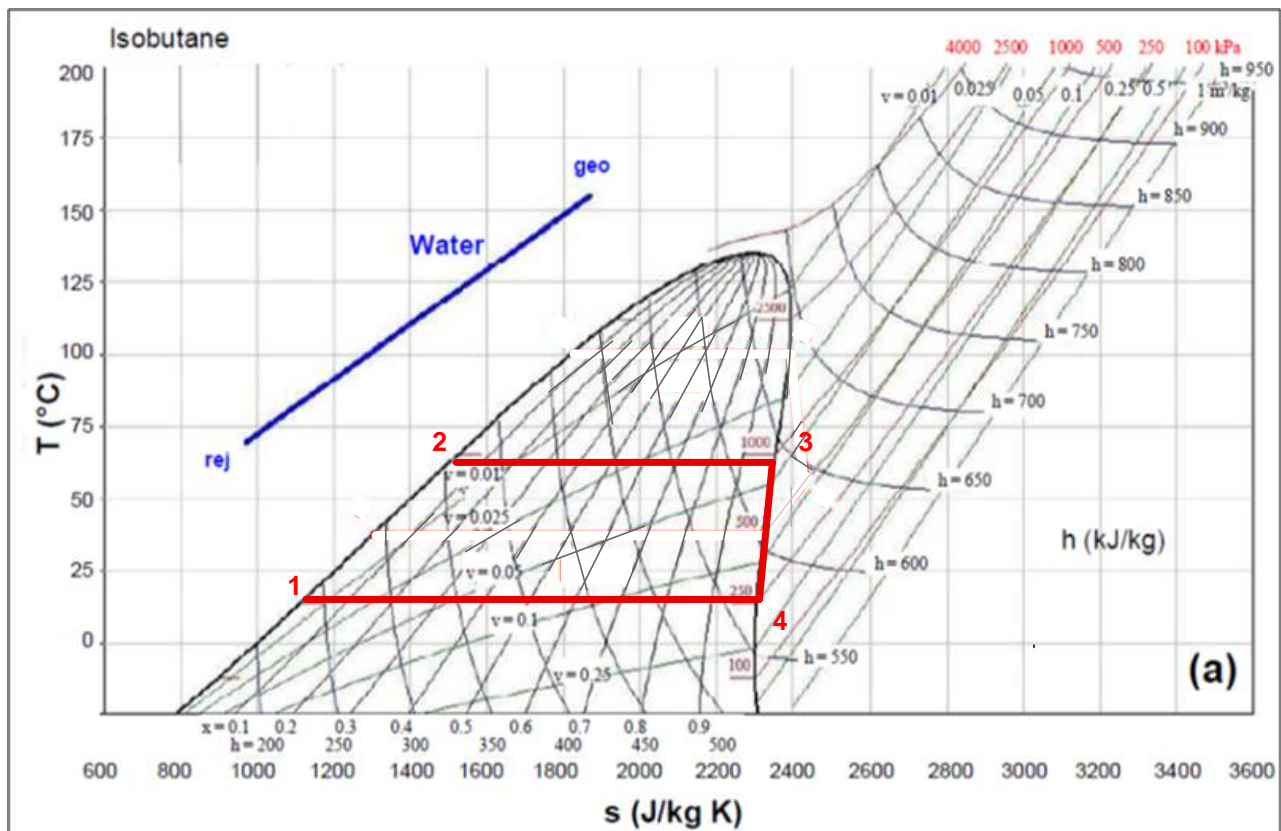
$$T_2 = -\frac{T_{2,i} + T_{2,o}}{2} = \frac{15 + 67,5}{2} = 39,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_{p2} = 5844,54 \text{ [J/kg * K]} \text{ [26]}$$

Οπότε

$$\dot{m}_2 = \frac{Q}{c_{p2} * (T_{2,o} - T_{2,i})} = \frac{11.702.667,57}{5871,86 * (67,5 - 15)} = 38,13 \text{ [kg/sec]}$$

Η θερμοκρασία αυτή είναι η θερμοκρασία εισόδου του ισοβουτανίου στο στρόβιλο, ενώ θερμοκρασία εισόδου του ισοβουτανίου στον εναλλάκτη $T_{2,i}$ είναι ουσιαστικά η θερμοκρασία εξόδου του ισοβουτανίου από το στρόβιλο, μετά από την ισεντροπική εκτόνωση. Από το διάγραμμα T-s του ισοβουτανίου βρίσκουμε την ενθαλπία που αντιστοιχεί σε κάθε θερμοκρασία:



Σχήμα 40. T-s διάγραμμα Ισοβουτανίου [17]

Σημείο 3 διαγράμματος T-S ισοβουτανίου: $T_{2,o} = 67,5 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow h_3 = 675 \text{ [KJ/kg]}$

Και

Σημείο 4 διαγράμματος T-S ισοβουτανίου: $T_{2,i} = 15 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$

Άρα

$$\Delta h = h_3 - h_4 = 95 \text{ [KJ/kg]}$$

Το έργο που πραγματοποιείται στο στρόβιλο με την ισεντροπική εκτόνωση του ισοβουτανίου είναι:

$$P_i = \dot{m}_2 * \Delta h = 38,13 * 95 = 3,62 \text{ [MWatt]}$$

Οι βαθμοί απόδοσης των επιμέρους τμημάτων του σταθμού δίνονται από τον Πίνακα 10. Η εσωτερική ισχύς του στροβίλου θα είναι:

$$P_{turbine} = \eta_{th} * P_i = 0,3 * 3,62 = 1,086 \text{ [MWatt]}$$

Η ισχύς στον άξονα του στροβίλου θα είναι:

$$P_m = P_{turbine} * \eta_m = 1,086 * 0,95 = 1,032 \text{ [MWatt]}$$

Η ισχύς της γεννήτριας θα είναι:

$$P_{GEN} = P_m * \eta_{GEN} = 1,032 * 0,97 = 1 \text{ [MWatt]}$$

Εφόσον είναι πλέον γνωστά οι θερμοκρασίες των ρευστών σε κάθε σημείο του κύκλου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητά τους σε συνάρτηση με τη διάμετρο της σωλήνωσης:

$$\dot{V} = \frac{\pi * d^2}{4} * v$$

- Όπου \dot{V} η παροχή του ρευστού σε [m^3/sec]
 d η διάμετρος της σωλήνωσης μέσα στην οποία ρέει το ρευστό σε [m]
 v η ταχύτητα του ρευστού σε μονάδες [m/sec]

Νερό:

Από πίνακες βρίσκουμε την πυκνότητα του νερού για θερμοκρασία $T_{1,i} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ που είναι ίση με $\rho_1=965,3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. [14]

Έστω $d_1 = 0,15 \text{ [m]}$

Τότε

$$v_1 = \frac{4 * \dot{V}_1}{\pi * d_1^2} = 3,14 \text{ [m/sec]}$$

Ισοβουτάνιο:

Από το διάγραμμα του θερμοκρασίας εντροπίας του ισοβουτανίου, για θερμοκρασία $T_{2,o} = 67,5 \text{ }^\circ\text{C}$ βρίσκουμε την πυκνότητά του $\rho_2=166 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. [17]

Οπότε

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{m}_2}{\rho_2} = \frac{38,13}{166} = 0,23 \text{ [m}^3\text{/sec]}$$

Έστω $d_2 = 0,2 \text{ [m]}$

Τότε

$$v_2 = \frac{4 * \dot{V}_2}{\pi * d_2^2} = 7,31 \text{ [m/sec]}$$

Τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 17:

1° ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ (T _{1i} =85 °C)	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ		
	ε=0,7	ε=0,6	ε=0,5
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρυστού	T _{1,i} = 85 °C	T _{1,i} = 85 °C	T _{1,i} = 85 °C
Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου	η _m =0,95	η _m =0,95	η _m =0,95
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	η _{GEN} =0,97	η _{GEN} =0,97	η _{GEN} =0,97
Ισεντροπικός Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	η _{th} =0,3	η _{th} =0,3	η _{th} =0,3
Παροχή Γ/Θ ρυστού	Ḃ ₁ = 200 [m ³ /h]	Ḃ ₁ = 200 [m ³ /h]	Ḃ ₁ = 200 [m ³ /h]
Πυκνότητα Γ/Θ ρυστού	ρ=968,1 [kg/m ³]	ρ=968,1 [kg/m ³]	ρ=968,1 [kg/m ³]
Θερμοκρασία εισόδου C ₄ H ₁₀ στον εναλλάκτη	T _{2,i} = 15 °C	T _{2,i} = 15 °C	T _{2,i} = 15 °C
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρυστού από εναλλάκτη	T _{1,o} = 36,48 °C	T _{1,o} = 43,51 °C	T _{1,o} = 53,78 °C
Μέση θερμοκρασία Γ/Θ ρυστού	T ₁ = 60,74 °C	T ₁ = 64,2 °C	T ₁ = 67,67 °C
Ειδική θερμότητα Γ/Θ ρυστού	c _{p1} = 4185,29 [J/kg * K]	c _{p1} = 4188,63 [J/kg * K]	c _{p1} = 4190,85 [J/kg * K]
Συνολική θερμороή εναλλάκτη	Q = 10.920.655,48 [Watt]	Q = 9.638.016,15 [Watt]	Q = 7.810.817,71 [Watt]

Θερμοκρασία εξόδου C_4H_{10}	$T_{2,0} = 64 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,0} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,0} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
Πίεση C_4H_{10}	$P = 1\text{MPascal}$	$P = 0,85\text{MPascal}$	$P = 0,7\text{MPascal}$
Ενθαλπία C_4H_{10} στην είσοδο του στροβίλου	$h_3 = 675 \text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 660 \text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 645 \text{ [KJ/kg]}$
Ενθαλπία C_4H_{10} στην έξοδο του στροβίλου	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$
Ισεντροπική εκτόνωση C_4H_{10}	$\Delta h = h_3 - h_4 = 95 \text{ [KJ/kg]}$	$\Delta h = h_3 - h_4 = 72,5 \text{ [KJ/kg]}$	$\Delta h = h_3 - h_4 = 57,5 \text{ [KJ/kg]}$
Μέση θερμοκρασία C_4H_{10}	$T_2 = 39,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδική θερμότητα C_4H_{10}	$c_{p2} = 5844,54 \text{ [J/kg * K]}$	$c_{p2} = 5812,58 \text{ [J/kg * K]}$	$c_{p2} = 5753,29 \text{ [J/kg * K]}$
Παροχή C_4H_{10}	$\dot{m}_2 = 38,13 \text{ [kg /sec]}$	$\dot{m}_2 = 38,37 \text{ [kg /sec]}$	$\dot{m}_2 = 38,79 \text{ [kg/sec]}$
Πυκνότητα C_4H_{10}	$\rho = 166 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho = 125 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\rho = 111 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Έργο ισεντροπικής εκτόνωσης	$P_i = 3,62 \text{ [MWatt]}$	$P_i = 2,78 \text{ [MWatt]}$	$P_i = 2,23 \text{ [MWatt]}$
Εσωτερική ισχύς στροβίλου	$P_{\text{turbine}} = 1,086 \text{ [MWatt]}$	$P_{\text{turbine}} = 0,83 \text{ [MWatt]}$	$P_{\text{turbine}} = 0,66 \text{ [MWatt]}$
Ισχύς στον άξονα του στροβίλου(έξοδος)	$P_m = 1,032 \text{ [MWatt]}$	$P_m = 0,79 \text{ [MWatt]}$	$P_m = 0,63 \text{ [MWatt]}$
Ισχύς της γεννήτριας	$P_{GEN} = 1 \text{ [MWatt]}$	$P_{GEN} = 0,76 \text{ [MWatt]}$	$P_{GEN} = 0,61 \text{ [MWatt]}$
Διάμετρος σωλήνα γ/θ ρευστού	$d_1 = 0,15 \text{ [m]}$	$d_1 = 0,15 \text{ [m]}$	$d_1 = 0,15 \text{ [m]}$
Ταχύτητα Γ/Θ/ ρευστού	$v_1 = 3,14 \text{ [m/sec]}$	$v_1 = 3,14 \text{ [m/sec]}$	$v_1 = 3,14 \text{ [m/sec]}$
Διάμετρος σωλήνα ισοβουτανίου	$d_2 = 0.2 \text{ [m]}$	$d_2 = 0.2 \text{ [m]}$	$d_2 = 0.2 \text{ [m]}$

Ταχύτητα ισοβουτανίου	$v_2 = 7,31$ [m/sec]	$v_2 = 9,77$ [m/sec]	$v_2 = 11,12$ [m/sec]
-----------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------

Πίνακας 17 Αποτελέσματα 1^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου

5.2.2.2. 2^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο

Στο δεύτερο θερμοδυναμικό σενάριο η θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στον εναλλάκτη είναι $T_{1i}=75$ °C , η αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας στις τρεις υποπεριπτώσεις είναι $\epsilon_1=0,7$, $\epsilon_2=0,6$, $\epsilon_3=0,5$. Και η θερμοκρασία εισόδου στον κύκλο του δευτερεύοντος ρευστού(ισοβουτάνιο)είναι $T_{2i}=15$ °C. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

2 ^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}	$T_{1i}=75$ °C
Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας T_{2i}	$T_{2i}=15$ °C
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200$ m ³ /h
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας,	$\epsilon_1=0,7$ $\epsilon_2=0,6$ $\epsilon_3=0,5$

Πίνακας 18 Δεδομένα 2^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου

2 ^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ($T_{1i}=75\text{ }^{\circ}\text{C}$)	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ		
	$\epsilon=0,7$	$\epsilon=0,6$	$\epsilon=0,5$
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού	$T_{1,i} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,i} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,i} = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$
Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου	$\eta_m = 0,95$	$\eta_m = 0,95$	$\eta_m = 0,95$
Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{GEN} = 0,97$	$\eta_{GEN} = 0,97$	$\eta_{GEN} = 0,97$
Ισεντροπικός Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th} = 0,3$	$\eta_{th} = 0,3$	$\eta_{th} = 0,3$
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200\text{ [m}^3/\text{h]}$	$\dot{V}_1 = 200\text{ [m}^3/\text{h]}$	$\dot{V}_1 = 200\text{ [m}^3/\text{h]}$
Πυκνότητα Γ/Θ ρευστού	$\rho=974,7\text{ [kg/m}^3]$	$\rho=974,7\text{ [kg/m}^3]$	$\rho=974,7\text{ [kg/m}^3]$
Θερμοκρασία εισόδου C_4H_{10} στον εναλλάκτη	$T_{2,i} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{2,i} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{2,i} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρευστού από εναλλάκτη	$T_{1,o} = 33,41\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,o} = 39,35\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,o} = 45,29\text{ }^{\circ}\text{C}$
Μέση θερμοκρασία Γ/Θ ρευστού	$T_1 = 54,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1 = 57,17\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_1 = 60,14\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ειδική θερμότητα Γ/Θ ρευστού	$c_{p1} = 4182,68$ [J/kg * K]	$c_{p1} = 4183,87$ [J/kg * K]	$c_{p1} = 4185,05$ [J/kg * K]
Συνολική θερμороή εναλλάκτη	$Q = 9.418.497,42$ [Watt]	$Q = 8.075.285,83$ [Watt]	$Q = 6.731.315,85$ [Watt]
Θερμοκρασία εξόδου C_4H_{10}	$T_{2,o} = 57\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{2,o} = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{2,o} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ενθαλπία C_4H_{10} στην είσοδο του στροβίλου	$h_3 = 660\text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 645\text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 638\text{ [KJ/kg]}$
Ενθαλπία C_4H_{10} στην έξοδο του στροβίλου	$h_4 = 580\text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580\text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580\text{ [KJ/kg]}$

Ισεντροπική εκτόνωση C ₄ H ₁₀	$\Delta h = h_3 - h_4 = 72,5$ [KJ/kg]	$\Delta h = h_3 - h_4 = 57,5$ [KJ/kg]	$\Delta h = h_3 - h_4 = 50,5$ [KJ/kg]
Μέση θερμοκρασία C ₄ H ₁₀	T ₂ = 36 °C	T ₂ = 33 °C	T ₂ = 30 °C
Πίεση C ₄ H ₁₀	P = 0,85MPascal	P = 0,72MPascal	P = 0,62MPascal
Ειδική θερμότητα C ₄ H ₁₀	c _{p2} = 5789,05 [J/kg * K]	c _{p2} = 5741,48 [J/kg * K]	c _{p2} = 5693,92 [J/kg * K]
Παροχή C ₄ H ₁₀	m ₂ = 38,74 [kg/sec]	m ₂ = 39,07 [kg/sec]	m ₂ = 39,41 [kg/sec]
Πυκνότητα C ₄ H ₁₀	ρ=125 [kg/m ³]	ρ=110 [kg/m ³]	ρ=100 [kg/m ³]
Έργο ισεντροπικής εκτόνωσης	P _i = 2,8 [MWatt]	P _i = 2,24[MWatt]	P _i = 1,99 [MWatt]
Εσωτερική ισχύς στροβίλου	P _{turbine} = 0,84 [MWatt]	P _{turbine} = 0,67 [MWatt]	P _{turbine} = 0,59 [MWatt]
Ισχύς στον άξονα του στροβίλου(έξοδος)	P _m = 0,8 [MWatt]	P _m = 0,64[MWatt]	P _m = 0,56[MWatt]
Ισχύς της γεννήτριας	P _{GEN} = 0,77 [MWatt]	P _{GEN} = 0,62[MWatt]	P _{GEN} = 0,55[MWatt]
Διάμετρος σωλήνα γ/θ ρευστού	d ₁ =0,15 [m]	d ₁ =0,15 [m]	d ₁ =0,15 [m]
Ταχύτητα Γ/Θ/ ρευστού	v ₁ =3,14 [m/sec]	v ₁ =3,14 [m/sec]	v ₁ =3,14 [m/sec]
Διάμετρος σωλήνα ισοβουτανίου	d ₂ =0.2 [m]	d ₂ =0.2 [m]	d ₂ =0.2 [m]
Ταχύτητα ισοβουτανίου	v ₂ =9,86 [m/sec]	v ₂ =11,31 [m/sec]	v ₂ =12,54 [m/sec]

Πίνακας 19 Αποτελέσματα 2^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου

5.2.2.3. 3^ο Θερμοδυναμικό Σενάριο

Στο τρίτο θερμοδυναμικό σενάριο η θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού ρευστού στον εναλλάκτη είναι $T_{1i}=65\text{ }^{\circ}\text{C}$, η αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας στις τρεις υποπεριπτώσεις είναι $\varepsilon_1=0,7$, $\varepsilon_2=0,6$, $\varepsilon_3=0,5$. Και η θερμοκρασία εισόδου στον κύκλο του δευτερεύοντος ρευστού(ισοβουτάνιο)είναι $T_{2i}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

3^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας T_{1i}	$T_{1i}=65\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας T_{2i}	$T_{2i}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200\text{ [m}^3\text{/h]}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας,	$\varepsilon_1=0,7$ $\varepsilon_2=0,6$ $\varepsilon_3=0,5$

Πίνακας 20 Δεδομένα 3^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου

Οι υπολογισμοί γίνονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που έγιναν και για το πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα:

3^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ($T_{1i}=65\text{ }^{\circ}\text{C}$)	ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ		
	$\varepsilon=0,7$	$\varepsilon=0,6$	$\varepsilon=0,5$
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού	$T_{1,i} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,i} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{1,i} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$
Βαθμός απόδοσης ατμοστροβίλου	$\eta_m = 0,95$	$\eta_m = 0,95$	$\eta_m = 0,95$

Βαθμός απόδοσης γεννήτριας	$\eta_{GEN} = 0,97$	$\eta_{GEN} = 0,97$	$\eta_{GEN} = 0,97$
Ισεντροπικός Θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th} = 0,3$	$\eta_{th} = 0,3$	$\eta_{th} = 0,3$
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\dot{V}_1 = 200 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$\dot{V}_1 = 200 \text{ [m}^3/\text{h]}$
Πυκνότητα Γ/Θ ρευστού	$\rho = 980,4 \text{ [kg/m}^3]$	$\rho = 980,4 \text{ [kg/m}^3]$	$\rho = 980,4 \text{ [kg/m}^3]$
Θερμοκρασία εισόδου C ₄ H ₁₀ στον εναλλάκτη	$T_{2,i} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,i} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,i} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρευστού από εναλλάκτη	$T_{1,o} = 30,34 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{1,o} = 35,29 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{1,o} = 40,24 \text{ }^\circ\text{C}$
Μέση θερμοκρασία Γ/Θ ρευστού	$T_1 = 47,67 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 50,14 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 52,62 \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδική θερμότητα Γ/Θ ρευστού	$c_{p1} = 4180,06$ [J/kg * K]	$c_{p1} = 4181,01$ [J/kg * K]	$c_{p1} = 4182,049$ [J/kg * K]
Συνολική θερμοροή εναλλάκτη	$Q = 7.889.708,37$ [Watt]	$Q = 6.764.208,98$ [Watt]	$Q = 5.638.175,65$ [Watt]
Θερμοκρασία εξόδου C ₄ H ₁₀	$T_{2,o} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,o} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{2,o} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Ενθαλπία C ₄ H ₁₀ στην είσοδο του στροβίλου	$h_3 = 645 \text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 638 \text{ [KJ/kg]}$	$h_3 = 625 \text{ [KJ/kg]}$
Ενθαλπία C ₄ H ₁₀ στην έξοδο του στροβίλου	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$	$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$
Ισεντροπική εκτόνωση C ₄ H ₁₀	$\Delta h = h_3 - h_4 = 57,5$ [KJ/kg]	$\Delta h = h_3 - h_4 = 50,5$ [KJ/kg]	$\Delta h = h_3 - h_4 = 37,5$ [KJ/kg]
Μέση θερμοκρασία C ₄ H ₁₀	$T_2 = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_2 = 27,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Πίεση C ₄ H ₁₀	$P = 0,7 \text{ MPascal}$	$P = 0,62 \text{ MPascal}$	$P = 0,55 \text{ MPascal}$
Ειδική θερμότητα C ₄ H ₁₀	$c_{p2} = 5733,56$ [J/kg * K]	$c_{p2} = 5693,92$ [J/kg * K]	$c_{p2} = 5654,28$ [J/kg * K]

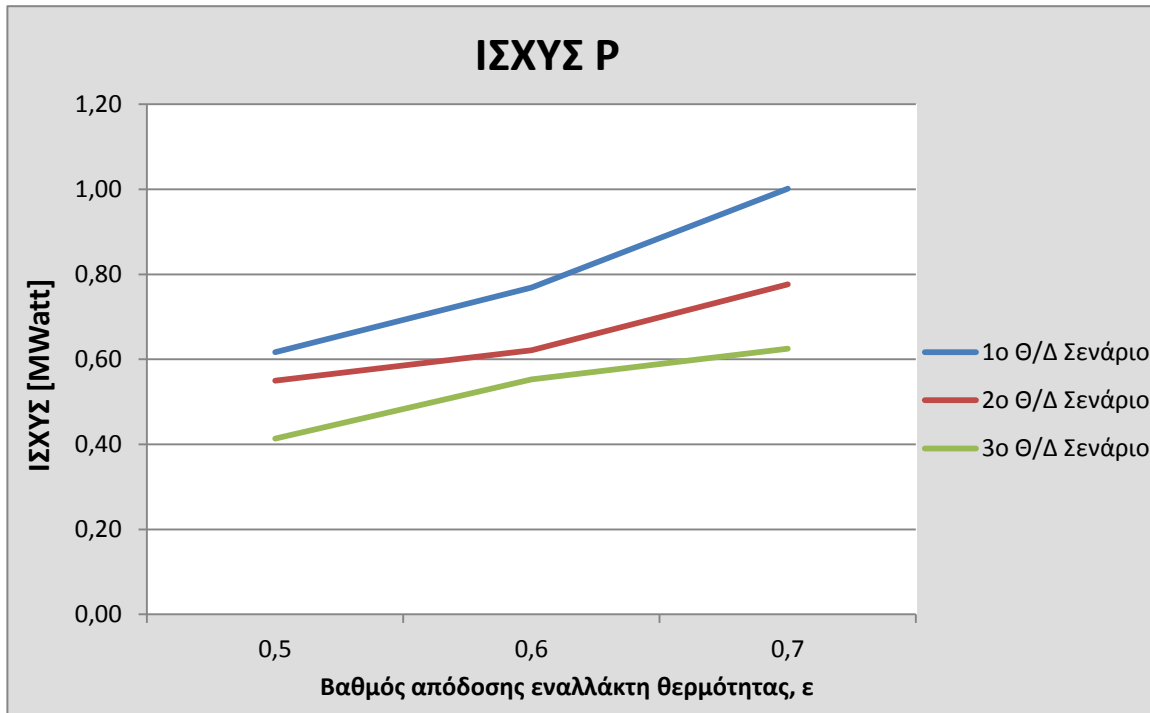
Παροχή C ₄ H ₁₀	$\dot{m}_2 = 39,32$ [kg/sec]	$\dot{m}_2 = 39,60$ [kg/sec]	$\dot{m}_2 = 39,89$ [kg/sec]
Πυκνότητα C ₄ H ₁₀	$\rho=111$ kg/m ³	$\rho=110$ kg/m ³	$\rho=100$ kg/m ³
Έργο ισεντροπικής εκτόνωσης	$P_i = 2,26$ [MWatt]	$P_i = 1,99$ [MWatt]	$P_i = 1,49$ [MWatt]
Εσωτερική ισχύς στροβίλου	$P_{\text{turbine}} = 0,67$ [MWatt]	$P_{\text{turbine}} = 0,59$ [MWatt]	$P_{\text{turbine}} = 0,44$ [MWatt]
Ισχύς στον άξονα του στροβίλου(έξοδος)	$P_m = 0,64$ [MWatt]	$P_m = 0,56$ [MWatt]	$P_m = 0,42$ [MWatt]
Ισχύς της γεννήτριας	$P_{GEN} = 0,62$ [MWatt]	$P_{GEN} = 0,55$ [MWatt]	$P_{GEN} = 0,41$ [MWatt]
Διάμετρος σωλήνα γ/θ ρευστού	$d_1 = 0,15$ [m]	$d_1 = 0,15$ [m]	$d_1 = 0,15$ [m]
Ταχύτητα Γ/Θ/ ρευστού	$v_1 = 3,14$ [m/sec]	$v_1 = 3,14$ [m/sec]	$v_1 = 3,14$ [m/sec]
Διάμετρος σωλήνα ισοβουτανίου	$d_2 = 0,2$ [m]	$d_2 = 0,2$ [m]	$d_2 = 0,2$ [m]
Ταχύτητα ισοβουτανίου	$v_2 = 11,28$ [m/sec]	$v_2 = 11,46$ [m/sec]	$v_2 = 12$ [m/sec]

Πίνακας 21 Αποτελέσματα 3^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου

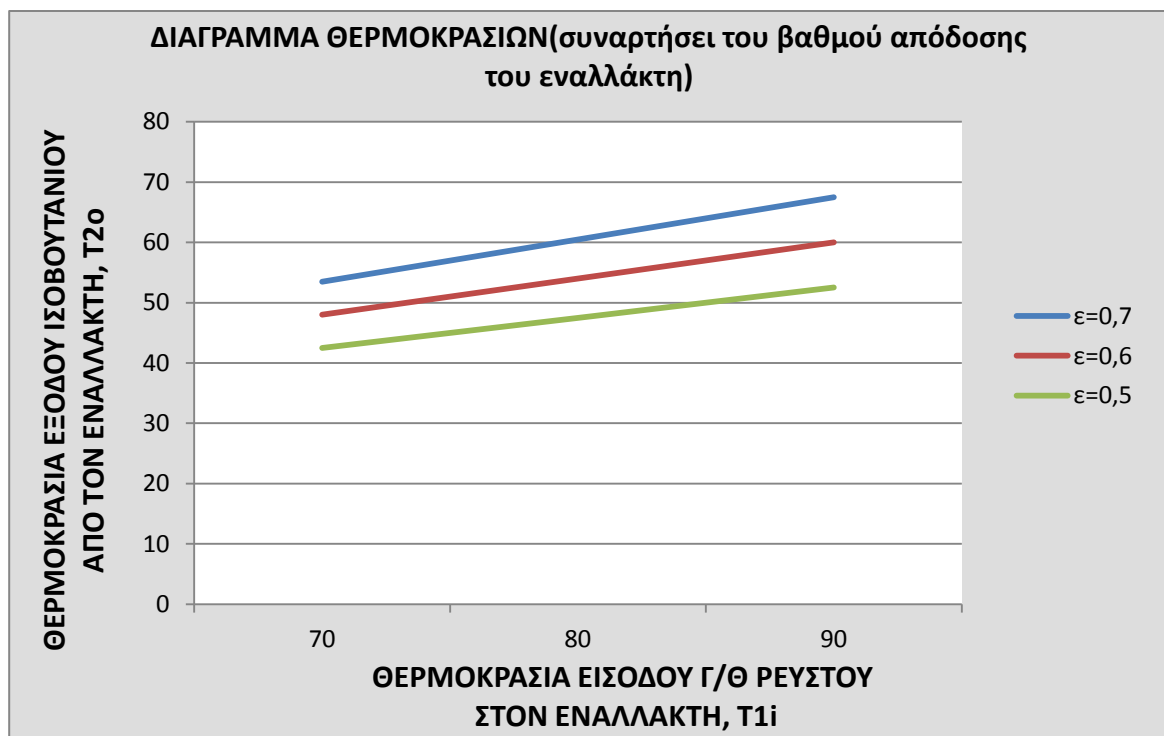
5.3. Αποτελέσματα-Επιλογή βέλτιστου θερμοδυναμικού σεναρίου

Συγκρίνοντας τα παραπάνω θερμοδυναμικά σενάρια, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη ισχύς παράγεται που παράγεται επιτυγχάνεται με το πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο, όπως ήταν και αναμενόμενο, δεδομένου ότι πρόκειται για τη μεγαλύτερη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού, άρα και του ισοβουτανίου και για το βέλτιστο βαθμό απόδοσης του εναλλάκτη θερμότητας.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συγκριτικό διάγραμμα της θερμοκρασίας εξόδου του ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας και της ισχύος που παράγεται σε κάθε θερμοδυναμικό σενάριο:



Σχήμα 41. Παραγόμενη Ισχύς P στα τρία θερμοδυναμικά σενάρια, [MWatt]



Σχήμα 42. Διάγραμμα θερμοκρασιών ρευστών στα τρία θερμοδυναμικά σενάρια

Εφόσον το πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο είναι το βέλτιστο (και ταυτοχρόνως εφικτό), προτείνονται τρόποι βελτίωσης της απόδοσής της και αύξησης της παραγόμενης ισχύος και επιχειρείται παρακάτω διαστασιολόγηση του απαιτούμενου εξοπλισμού της γεωθερμικής μονάδας.

5.3.1 Προτάσεις-βελτιώσεις πρώτου θερμοδυναμικού σεναρίου

Από τα τρία παραπάνω σενάρια με τα υποσενάρια τους, το βέλτιστο είναι το πρώτο σενάριο με τα εξής χαρακτηριστικά:

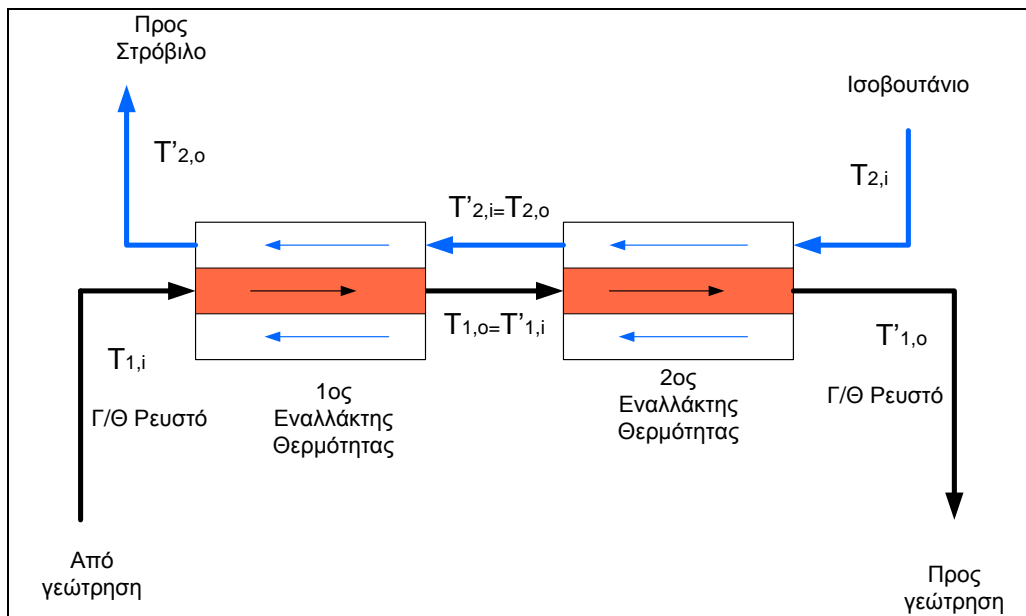
1^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας	$T_{1i}=85\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρευστού από τον εναλλάκτη θερμότητας	$T_{1f}=36,48\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στον εναλλάκτη θερμότητας	$T_{2i}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας	$T_{2o}=64\text{ }^{\circ}\text{C}$
Παροχή Γ/Θ ρευστού	$\dot{V}_1 = 200\text{ m}^3/\text{h}$
Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας,	$\varepsilon_1=0,7$

Πίνακας 22 Αποτελέσματα 1^{ου} θ/δ σεναρίου

Για να βελτιώσουμε το πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο, μπορούμε να προσθέσουμε έναν ακόμη εναλλάκτη θερμότητας σε σειρά με τον υπάρχοντα εναλλάκτη, ώστε να εκμεταλλευτούμε όσο το δυνατόν περισσότερο τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, που όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα είναι αξιοποιήσιμη ($T_{1f}=36,48\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Αρχικά, το γεωθερμικό ρευστό θα περάσει από τον πρώτο εναλλάκτη θερμότητας απουσία ισοβουτανίου και θα εισέλθει στο δεύτερο εναλλάκτη περίπου με τη θερμοκρασία που εξέρχεται από τη γεώτρηση. Το ισοβουτάνιο, εισερχόμενο στο δεύτερο εναλλάκτη, θα απορροφήσει μέρος της θερμότητας του γεωθερμικού ρευστού, και θα εισέλθει στον πρώτο εναλλάκτη με θερμοκρασία σίγουρα μικρότερη από αυτήν του γεωθερμικού ρευστού που ρέει ήδη στον πρώτο εναλλάκτη, αφού ο βαθμός απόδοσης του εναλλάκτη είναι ίσος με 0,7. Έτσι θα γίνει πάλι μεταφορά θερμότητας από το θερμότερο ρευστό προς το ψυχρότερο, οπότε το ισοβουτάνιο θα αποκτήσει ακόμη υψηλότερη θερμοκρασία, ενώ η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι μειωμένη κατά την έξοδό του από τον πρώτο εναλλάκτη (Σχήμα 43).

Αυτή η ροή θερμότητας θα συνεχιστεί, η θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού από τον πρώτο εναλλάκτη θα μειώνεται, μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα των εναλλακτών σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των δύο ρευστών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 23.



Σχήμα 43. Δύο εναλλάκτες θερμότητας αντιροής σε σειρά

ΒΕΛΤΙΩΣΗ 1 ^{ΟΥ} ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	
Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στον 1 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T_{1,i} = 85 \text{ } ^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρευστού από τον 1 ^ο εναλλάκτη θερμότητας = Θερμοκρασία εισόδου Γ/Θ ρευστού στο 2 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T_{1,o} = T'_{1,i} = 56,72 \text{ } ^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου Γ/Θ ρευστού από το 2 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T'_{1,o} = 27,8 \text{ } ^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στο 2 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T_{2,i} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου ισοβουτανίου από το 2 ^ο εναλλάκτη θερμότητας = Θερμοκρασία εισόδου ισοβουτανίου στον 1 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T_{2,o} = T'_{2,i} = 44,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία εξόδου ισοβουτανίου από τον 1 ^ο εναλλάκτη θερμότητας	$T'_{2,o} = 72,76 \text{ } ^\circ\text{C}$

Πίνακας 23 Θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου ρευστών από τους δύο εναλλάκτες θερμότητας στην κατάσταση ισορροπίας του συστήματος

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας και ταυτόχρονα η θερμοκρασία εισόδου του στον αμοστρόβιλο, είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση αυτή που χρησιμοποιούνται δύο εναλλάκτες θερμότητας παρά ένας, όπως αναλύθηκε στο πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο. Επομένως, η ενθαλπία του ρευστού στην είσοδο του στροβίλου είναι επίσης μεγαλύτερη, άρα και η διαφορά ενθαλπίας του ρευστού μεταξύ εισόδου και εξόδου του ρευστού από το στρόβιλο, άρα και το έργο που παράγεται στο στρόβιλο είναι μεγαλύτερο και τελικά η παραγόμενη ισχύς της μονάδας θα είναι μεγαλύτερη. Τα στοιχεία αυτά παραθέτονται συγκριτικά στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:

	1^ο Θ/Δ Σενάριο-ένας εναλλάκτης θερμότητας	Βελτιωμένο 1^ο Θ/Δ Σενάριο- δύο εναλλάκτες θερμότητας
Θερμοκρασία εξόδου ισοβουτανίου από τον εναλλάκτη θερμότητας	$T_{2,o} = 64 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{2,o} = 72,76 \text{ } ^\circ\text{C}$
Ενθαλπία C_4H_{10} στην είσοδο του στροβίλου	$h_4 = 675 \text{ [kJ/kg]}$	$h_4 = 690 \text{ [kJ/kg]}$
Ισεντροπική εκτόνωση C_4H_{10}	$h_4 - h_3 = 95 \text{ [kJ/kg]}$	$h_4 - h_3 = 110 \text{ [kJ/kg]}$
Έργο ισεντροπικής εκτόνωσης	$P_i = 2,8 \text{ [MWatt]}$	$P_i = 3,99 \text{ [MWatt]}$
Τελική παραγόμενη ισχύς	$P = 1 \text{ [MWatt]}$	$P = 1,19 \text{ [MWatt]}$

Πίνακας 24 Σύγκριση 1^{ου} απλού και βελτιωμένου θ/δ σεναρίου

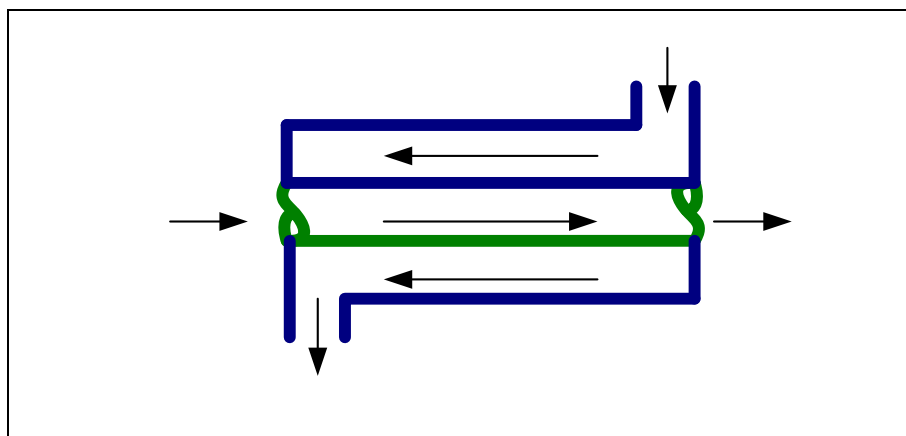
5.4. Διαστασιολόγηση εξοπλισμού-Παραδοχές

Η διαστασιολόγηση μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη, του αμοστροβίλου, της γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, του συμπιεστή, των σωληνώσεων μεταφοράς των ρευστών. Οι κυριότεροι λόγοι που χρειάζονται υπολογισμοί για την διαστασιολόγηση εξοπλισμού με σκοπό την ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει

την λειτουργία μιας γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ενέργειας με δυαδικό ρευστό είναι: (α) να παρέχουμε έναν καθολικό σχεδιασμό της μονάδας συμπεριλαμβανομένων όλων των λεπτομερειών που αφορούν τις παραμέτρους του εξοπλισμού και των συνθηκών λειτουργίας, και (β) να έχουμε ικανή πληροφορία ώστε να γίνει πρόβλεψη κόστους. Το επίπεδο των υπολογισμών σχεδιασμού ποικίλουν ανάλογα την μονάδα, των λεπτομερειών που χρειάζονται για τις παραμέτρους του εξοπλισμού και τις συνθήκες λειτουργίας. Τις συνθήκες λειτουργίας τις λαμβάνουμε από τον θερμοδυναμικό κύκλο του δευτερεύοντος ρευστού (ισο-βουτάνιο) που χρησιμοποιείται στον δυαδικό κύκλο.

5.4.1. Διαστασιολόγηση εναλλάκτη θερμότητας

Για τη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη θερμότητας απαιτείται πρώτα η επιλογή του τύπου του εναλλάκτη που θα χρησιμοποιηθεί. Δεδομένου ότι, για ίδιες θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου η μέση λογαριθμική διαφορά σε εναλλάκτη αντιρροής είναι μεγαλύτερη από ότι σε εναλλάκτη ομορροής, το οποίο σημαίνει ότι για ίδια θερμορροή, η απαραίτητη επιφάνεια συναλλαγής είναι μικρότερη στον εναλλάκτη αντιρροής από ότι στον ομορροής (υποθέτοντας φυσικά ίδια τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας k), επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε εναλλάκτη αντιρροής. [14]



Σχήμα 44. Εναλλάκτης αντιρροής

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η θερμορροή που μεταφέρεται σε έναν εναλλάκτη από το θερμό (γεωθερμικό ρευστό) στο ψυχρό(δευτερεύον) ρευστό υπολογίζεται από την εξίσωση:

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

Όπου $A = \pi d_2 L$ η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη

d_2 η διάμετρος του σωλήνα μέσα στον οποίο ρέει το δευτερεύον ρευστό

ΔT_m η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευστών

Η μέση λογαριθμική διαφορά ΔT_{lm} είναι:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Για εναλλάκτη αντιρροής, οι θερμοκρασιακές διαφορές ΔT_1 και ΔT_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Delta T_1 = T_{1,i} - T_{2,o}$$

$$\Delta T_2 = T_{1,o} - T_{2,i}$$

Για το πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο και την πρώτη υποκατηγορία αυτού, οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των δύο ρευστών από τον εναλλάκτη θερμότητας δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

1 ^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
$T_{1,i}$	85 °C
$T_{1,o}$	36,48 °C
$T_{2,i}$	15 °C
$T_{2,o}$	64 °C

Πίνακας 25 Συγκεντρωτικός πίνακας θερμοκρασιών ρευστών 1^ο θ/δ σεναρίου

Οπότε:

$$\Delta T_1 = 90 - 67,5 = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 38 - 15 = 21,48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Και

$$\Delta T_{lm} = \frac{22,5 - 23}{\ln\left(\frac{22,5}{23}\right)} = 21,24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση, η οποία για αμελητέα θερμική αντίσταση του διαχωριστικού τοιχώματος και καθαρές επιφάνειες γράφεται [14]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Για τον υπολογισμό του k επομένως απαιτούνται οι συντελεστές συναγωγής του γ/θ ρευστού και του ισοβουτανίου [14]:

$$h = NU_D \frac{\lambda}{d} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

- Όπου
- λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας [W/m*K]
 - d η διάμετρος του σωλήνα μέσα στον οποίο ρέει το ρευστό
 - NU_D ο αδιάστατος αριθμός Nuselt

Ο αδιάστατος αριθμός Nusselt, για τυρβώδη ροή, δίνεται από τον τύπο [14]:

$$NU_D = 0,023 * Re_D^{4/5} Pr^n$$

$n=0,4$ για θέρμανση του ρευστού

$n=0,3$ για θέρμανση του ρευστού

και Pr ο αριθμός Prandtl

Όπου Re_D ο αδιάστατος αριθμός Reynolds που δίνεται από τον τύπο:

$$Re_D = \frac{4 * \dot{m}}{\pi d \mu}$$

Και μ το ιξώδες του ρευστού σε μονάδες [kg/m*sec]

Γ/Θ ρευστό

Από πίνακες [14] και για μέση θερμοκρασία γ/θ ρευστού $T_1 = 60,74 \text{ } ^\circ\text{C}$, βρίσκουμε τα εξής:

1 ^ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	
μ	$0,467 * 10^{-3}$ [kg/m * sec]
Pr	2,99
Re_D	978.069,96
NU_D	1980,27
h_1	8.501,97 [W/m ² K]

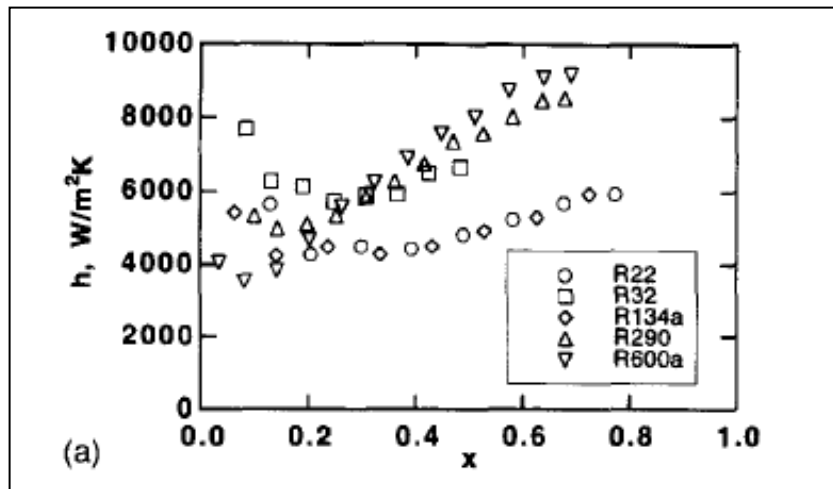
Πίνακας 26 Υπολογισμός συντελεστή συναγωγής γ/θ ρευστού

Ισοβουτάνιο

Για το συντελεστή θερμοπερατότητας h_2 του ισοβουτανίου, βρέθηκαν τιμές από διάφορες πηγές :

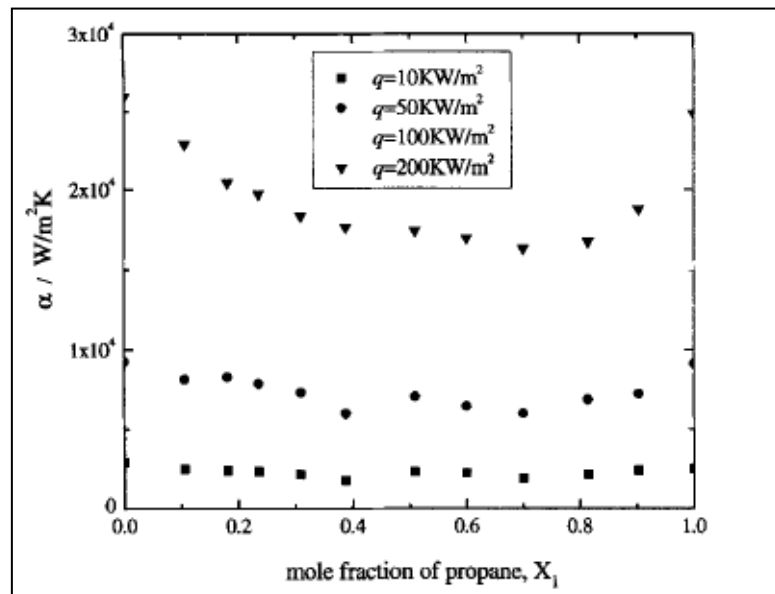
Για θερμοκρασία

$$T_2 = 12 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow h_2 = 9.000 \text{ [W/m}^2 \text{ K]} \text{ [27]}$$



Σχήμα 45. Συντελεστής συναγωγής ψυκτικών μέσων. [27]

Για κλάσμα προπανίου/ισοβουτανίου (στην περίπτωση μας $x=0$), ο συντελεστής συναγωγής είναι της τάξης του 10^4 , όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 46. Συντελεστής συναγωγής κλάσματος προπανίου- ισοβουτανίου x . [28]

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω τιμές και λαμβάνοντας υπόψη τη μέση θερμοκρασία του ισοβουτανίου στο πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο:

$$T_2 = 39,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

μια τιμή:

$$h_2 = 15.000 [W/m^2 K]$$

θα ήταν αποδεκτή.

Επομένως, ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του θα είναι ίσος με:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{\frac{1}{7.869,45} + \frac{1}{12.000}} = 5.426,34 [W/m^2 K]$$

Και η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη ίση με:

$$Q = kA\Delta T_{lm} \Rightarrow$$

$$A = \frac{Q}{k\Delta T_{lm}} [m^2]$$

Όπου (όπως έχει υπολογιστεί παραπάνω):

$$Q = 10.920.665,48 [Watt]$$

$$k = 5.426,34 [W/m^2 K]$$

$$\Delta T_{lm} = 21,24 \text{ } ^\circ C$$

Οπότε:

$$A = \frac{10.920.665,48}{5.426,34 * 21,24} = 94,74 [m^2]$$

$$A = \pi d_2 L \Rightarrow$$

$$L = \frac{A}{\pi d_2} = 150,87 [m]$$

Και αν θεωρήσουμε ότι οι σωληνώσεις του εναλλάκτη δεν είναι μια ευθεία γραμμή αλλά σχηματίζουν μαιάνδρους, έστω 12 επιπέδων:

$$L' = \frac{L}{12} = \frac{150,87}{12} = 12,57 [m]$$

Οπότε το ύψος του εναλλάκτη θα είναι:

$$H = 12 * d_2 = 12 * 0,2 = 2,4 [m]$$

5.4.2. Διαστασιολόγηση Ατμοστροβίλου

Ο στρόβιλος που επιλέχτηκε είναι αξονικής ροής και σύμφωνα με τους τύπους βασισμένους στη συγκεκριμένη διάμετρο D_{sp} και τη συγκεκριμένη ταχύτητα N_{sp} [3]:

$$D_{sp} = \frac{15 * V_t}{C_o N_{sp}}$$

$$N_{sp} = \frac{N_t * q^{0.5}}{(778 \Delta h_i)^{0.75}}$$

Όπου	V_t	η ταχύτητα των άκρων του στροβίλου
	C_o	η ταχύτητα του εκτοξευόμενου ρευστού
	Δh_i	η ισεντροπική συγκεκριμένη πτώση ενθαλπίας
	q	ο ογκομετρικός ρυθμός ροής του ρευστού
	N_t	η γωνιακή ταχύτητα στροβίλων (δηλ., περιστροφή/λεπτό)

Η περιοχή υψηλής αποδοτικότητας για τους αξονικούς στροβίλους εμφανίζεται στη σειρά των συγκεκριμένων ταχυτήτων από 80 rpm έως 120 rpm, όπου η ακόλουθη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$\ln\left(\frac{V_t}{C_o}\right) = 0,198 \ln(N_{sp}) - 1,271$$

Κατά συνέπεια, εεπιλέγεται μια τιμή N_{sp} , χρησιμοποιείται η παραπάνω εξίσωση για να υπολογίσει το λόγο $\frac{V_t}{C_o}$, και έπειτα υπολογίζεται το D_{sp} . Η διάμετρος στροβίλων D_t , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$D_t = \frac{D_{sp} q^{0.5}}{(778\Delta h_i)^{0.25}}$$

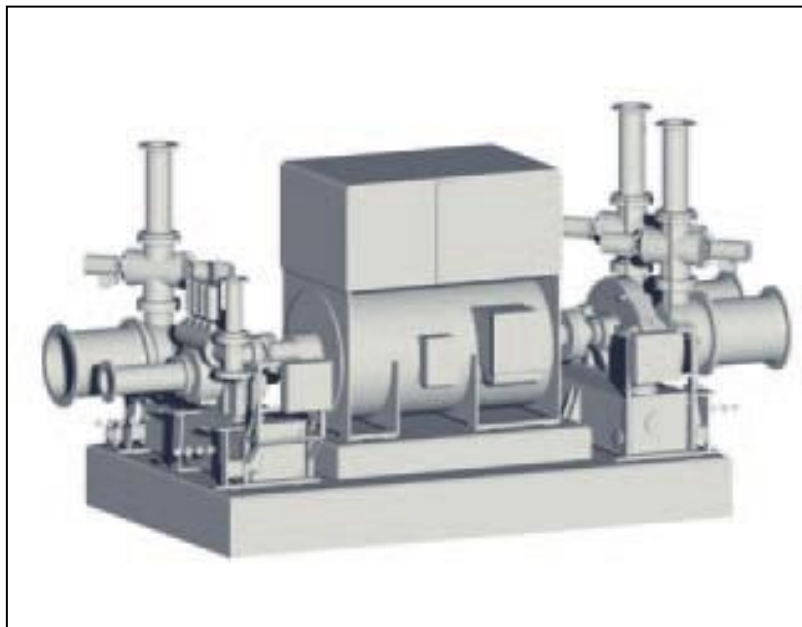
Τυπικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά συνθηκών λειτουργίας στροβίλων ισχύος έως 6 MWatt δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

P ≤6 MWatt	
Μήκος	L=1,5 m
Πλάτος	W=2,5 m
Ύψος	H=2,5m
Πίεση εισόδου	P=131 [bar(a)] /1,900 [psi]
Μέγιστη θερμοκρασία ατμού	530 °C /985 °F

Πίνακας 27 Διαστάσεις στροβίλου τύπου SST-060 [29]



Σχήμα 47. Ατμοστρόβιλος τύπου SST-060 [29]



Σχήμα 48. Ατμοστρόβιλος τύπου SST-060 [29]

5.4.3. Διαστασιολόγηση γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Για να διαστασιολογηθεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρειάζεται η τάξη μεγέθους της ισχύος που θα κληθεί να παράξει η εν λόγω γεννήτρια και το συντελεστή απόδοσής της. Για τη δεδομένη γεωθερμική μονάδα του Ακροποτάμου που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ισχύς αυτή έχει υπολογιστεί και είναι ίση με 1 MWatt, ενώ ο

συντελεστής απόδοσης της γεννήτριας θεωρήθηκε εξ αρχής ίσος με 0,97 που είναι ένας αρκετά συνηθισμένος και ταυτόχρονα καλός βαθμός απόδοσης για μια γεννήτρια. [22]

Η απόδοση μιας σύγχρονης γεννήτριας και γενικότερα μιας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως προαναφέρθηκε, δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\%$$

Για τη μελετούμενη γεωθερμική μονάδα βρέθηκε (1^ο Θερμοδυναμικό σενάριο) :

$$P_{in} = P_m = 1.03 [MWatt]$$

Και

$$\eta = 0,97 \text{ ή } 97\%$$

Οπότε:

$$P_{out} = \eta * P_m = 1 [MWatt]$$

Οι περισσότεροι κατασκευαστές γεννητριών, κατατάσσουν τις γεννήτριες σε κατηγορίες με βάση τη φαινόμενη ισχύ S , που παράγουν και όχι την πραγματική, P . [22] Οπότε:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} [VA]$$

Όπου P η πραγματική ισχύς της γεννήτριας

$\cos\varphi$ ο συντελεστής απόδοσης της γεννήτριας, δηλαδή το η

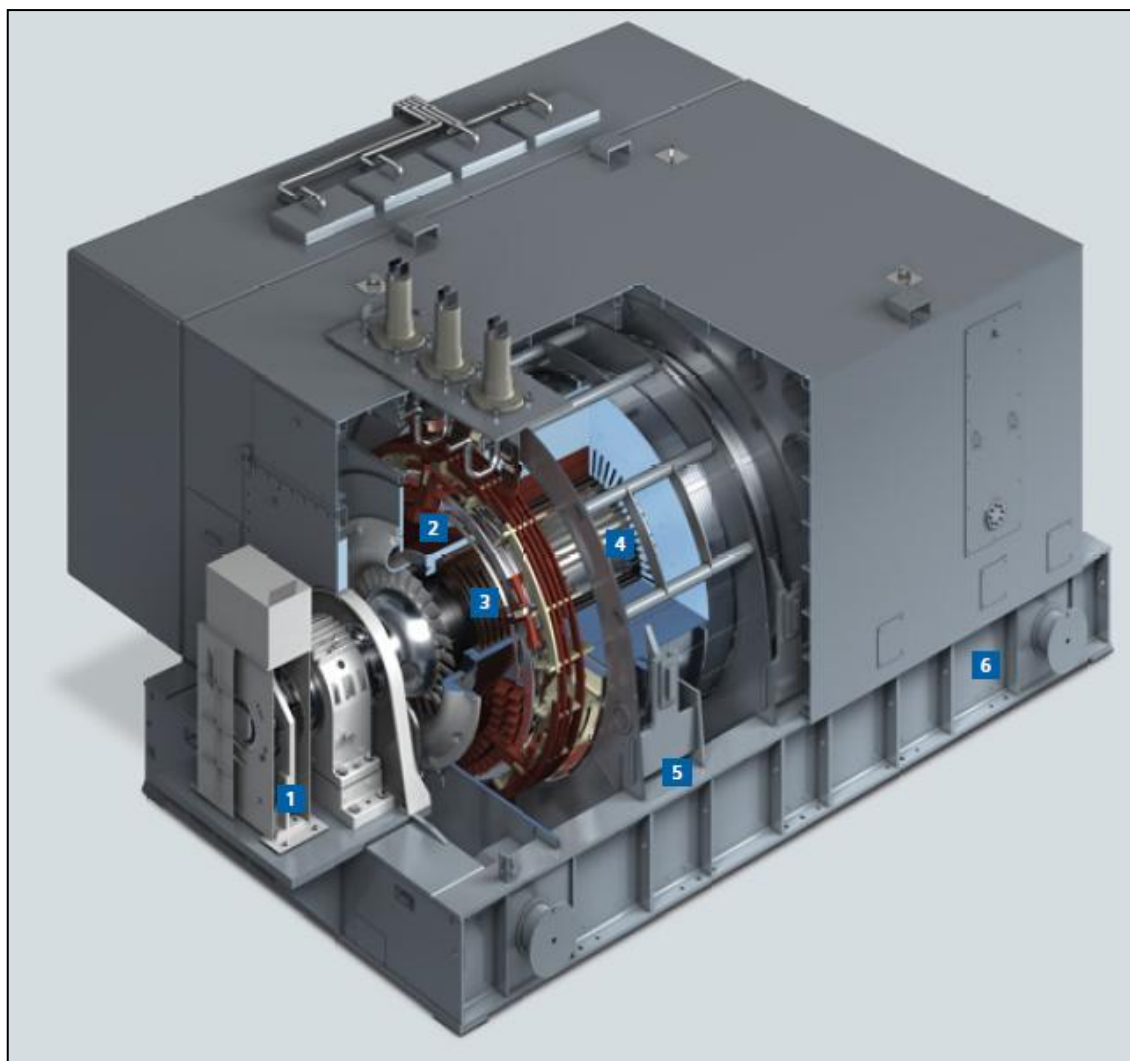
Άρα

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{1}{0,97} = 1.03 [kVA]$$

Χαρακτηριστικά λειτουργίας και η δομή μιας τυπικής γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος της τάξης των MVA δίνονται στον πίνακα και το σχήμα που ακολουθούν:

SGen5-100A-2P	
Συχνότητα λειτουργίας	50 Hz
Ισχύς	25 MVA έως 300 MVA
Βαθμός απόδοσης	98.7 %

Πίνακας 28 Χαρακτηριστικά λειτουργίας γεννήτριας μοντέλου SGen5-100A-2P [34]

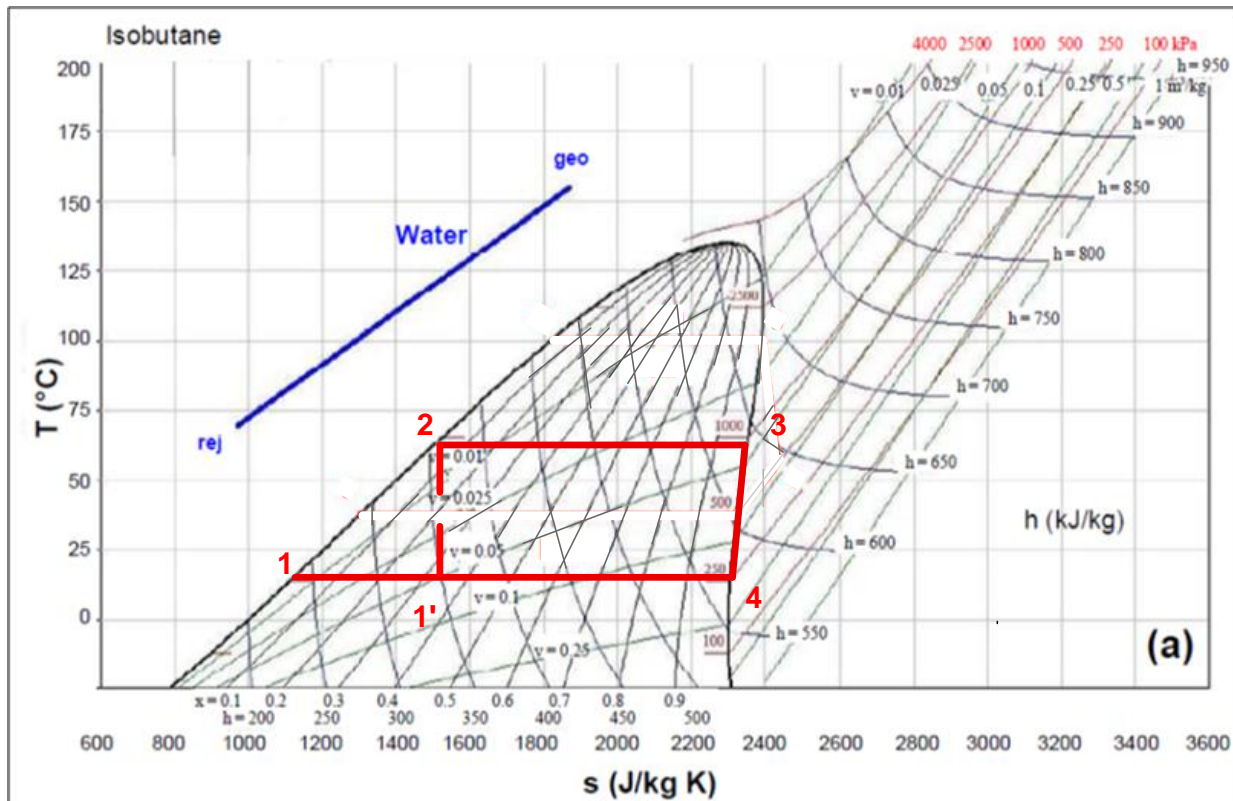


Σχήμα 49. Δομή γεννήτριας Siemens SGen-100A-2P Series, 1-Διέγερση, 2-Στάτης, 3&4-Δρομέας, 5&6-Πλαίσιο [34]

5.4.4. Διαστασιολόγηση συμπιεστή-πύργου ψύξης

Συμπιεστής

Το έργο του συμπιεστή [30] προκύπτει από το διάγραμμα θερμοκρασίας-ενθαλπίας του ισοβουτανίου:



Σχήμα 50. Διάγραμμα θερμοκρασίας-ενθαλπίας ισοβουτανίου [17]

Συγκεκριμένα, το έργο του συμπιεστή είναι το γινόμενο της παροχής του ρευστού λειτουργίας επί τη διαφορά ενθαλπίας αυτού μεταξύ του σημείου 4, που αντιστοιχεί στην κατάσταση εξόδου του ρευστού από το στρόβιλο και του σημείου 1, που αντιστοιχεί στην κατάσταση εισόδου του ρευστού στον εναλλάκτη θερμότητας ώστε να επανακυκλοφορήσει. [30]

$$Q = \dot{m}_2 * \Delta h = \dot{m}_2 * (h_4 - h_1) [Watt]$$

Από το διάγραμμα προκύπτει:

$$h_4 = 580 \text{ [KJ/kg]}$$

$$h_1 = 225 \text{ [KJ/kg]}$$

Και όπως έχει υπολογιστεί στο παραπάνω υποκεφάλαιο:

$$\dot{m}_2 = 38,13 \text{ [kg/sec]}$$

Οπότε

$$Q = \dot{m}_2 * (h_4 - h_1) = 38,13 * 335 = 13,53 \text{ [kWatt]}$$

Η απόδοση του συμπιεστή δίνεται από τον τύπο [30]:

$$\eta = \frac{h_{1'} - h_1}{h_4 - h_1} = \frac{400 - 225}{580 - 225} = \frac{175}{335} = 0,52 \text{ ή } 52\%$$

Πύργος ψύξης

Θεωρούμε τον πύργο σαν όγκο ελέγχου σε σταθερή κατάσταση (Σχήμα 51).

- | | | |
|---------------------|---|--|
| Δείκτες (Σχήμα 51): | 1 | θερμό νερό που εισέρχεται στον πύργο ψύξης |
| | 2 | ψυχρό νερό που εξέρχεται από τον πύργο ψύξης |
| | 3 | συμπληρωματικό νερό στον πύργο ψύξης |
| | 4 | είσοδος ψυχρού αέρα στον πύργο ψύξης |
| | 5 | έξοδος θερμού αέρα από τον πύργο ψύξης |

Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον θεωρούνται πρακτικά αμελητέες. Επειδή στο κύκλωμα προστίθεται νερό για να αναπληρωθούν οι απώλειες, θεωρούμε ότι η παροχή \dot{m} του

ψυχρού νερού που εξέρχεται από τον πύργο είναι ίση με την παροχή \dot{m} του θερμού νερού που εισέρχεται σε αυτόν. [12]

Είναι δηλαδή:

$$\dot{m}_{w1} = \dot{m}_{w2}$$

Η παροχή μάζας ξηρού αέρα \dot{m} είναι προφανώς ίδια στην είσοδο (4) και στην έξοδο (5) του πύργου (Σχήμα 51), οπότε:

$$\dot{m}_{\alpha 4} = \dot{m}_{\alpha 5} = \dot{m}_{\alpha}$$

Το ισοζύγιο μάζας νερού είναι:

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w3} + \dot{m}_{w4} = \dot{m}_{w2} + \dot{m}_{w5}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση, το ισοζύγιο γράφεται:

$$\dot{m}_{w3} = \dot{m}_{w2} - \dot{m}_{w1}$$

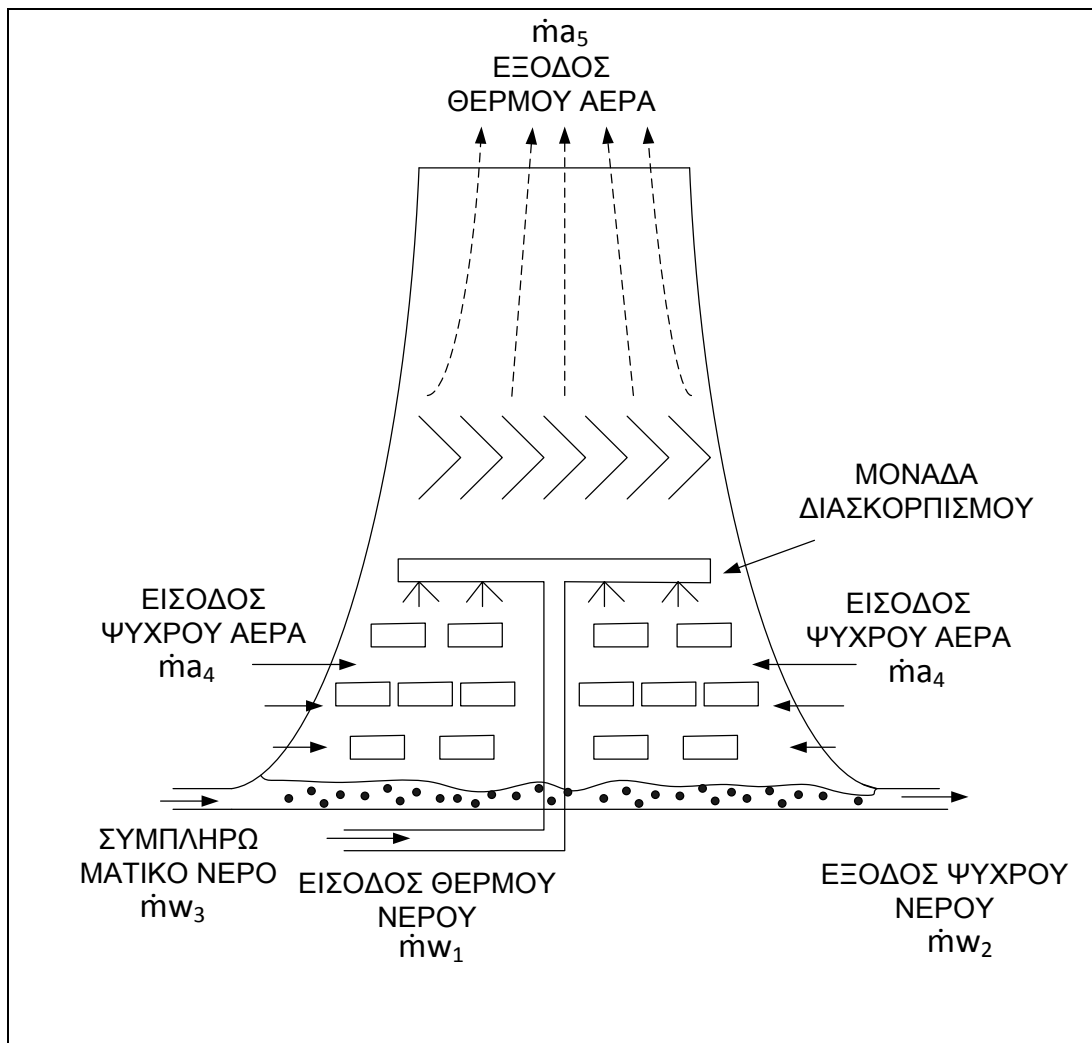
Ή χρησιμοποιώντας τις ειδικές υγρασίες:

$$\dot{m}_{w3} = \dot{m}_{\alpha}(\gamma_2 - \gamma_1)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο στον πύργο είναι [12]:

$$\dot{m}_{\alpha} h_4^* + \dot{m}_{w1} h_{w1} + \dot{m}_{w3} h_{w3} = \dot{m}_{\alpha} h_5^* + \dot{m}_{w2} h_{w2}$$

Όπου h η ενθαλπία του αντίστοιχου ρευστού ή αερίου.



Σχήμα 51. Πύργος ψύξης

6. Προσέγγιση κόστους γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ακροποτάμου

Η τεχνολογική εξέλιξη στο χώρο των ενεργειακών συστημάτων, σε συνδυασμό με τις θεσμικές αλλαγές σε ευρωπαϊκό και προσφάτως σε εθνικό επίπεδο, καθώς και με τη δεδομένη διάρθρωση του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας, δημιουργεί το περιβάλλον δραστηριοποίησης επιχειρηματικών πρωτοβουλιών στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Η αξιολόγηση των δυνατοτήτων αυτών πρέπει να γίνεται τόσο από την άποψη του υποψήφιου

ιδιώτη επενδυτή, όσο και από την άποψη της εθνικής οικονομίας, αφού αυτή καθορίζει και το συνολικό περιβάλλον. Η καλή ενεργειακή απόδοση, που μπορεί να έχει ένα σύστημα παραγωγής ή εξοικονόμησης ενέργειας, είναι μία μόνο παράμετρος στην ανάλυση σκοπιμότητας της επένδυσης. Απαιτείται η γνώση και η εφαρμογή μεθόδων της ανάλυσης και αξιολόγησης επενδύσεων, που παρουσιάζονται περιληπτικά σ' αυτό το κεφάλαιο. Απαιτείται, επίσης, η γνώση του θερμικού πλαισίου και η αντίληψη των παραμέτρων που συνθέτουν αυτό που ονομάζεται «επιχειρηματικό περιβάλλον».

Η μέθοδος εκτίμησης δαπανών που χρησιμοποιείται από τον προσομοιωτή είναι βασισμένος πρώτιστα στη μέθοδο που χρησιμοποιείται από Milora και Testor [35]. Αυτή η μέθοδος απαιτεί τον προσδιορισμό του παραδοθέντος κόστους εξοπλισμού και το κόστος διάτρησης της γεωθερμικής πηγής. Τα άλλα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο συνολικό άμεσο κόστος εγκαταστάσεων υπολογίζονται έπειτα ως ποσοστά του παραδοθέντος εξοπλισμού και των δαπανών γεωτρήσεων. Τα πρόσθετα συστατικά των επενδύσεων κεφαλαίου είναι βασισμένα στα μέσα ποσοστά του συνολικού άμεσου κόστους εγκαταστάσεων, των συνολικών άμεσων και έμμεσων δαπανών εγκαταστάσεων, ή των συνολικών επενδύσεων κεφαλαίου. Αυτό μπορεί να συνοψιστεί στην ακόλουθη εξίσωση δαπανών:

$$C_n = \left(\sum_i C_{E_i} \right) \left[1 + \sum_i f_i \right] + (n_w C_w) [1 + f_w] (1 + f_I^*)$$

Όπου	C_n	οι καθαρές επενδύσεις κεφαλαίου
	$\sum_i C_{E_i}$	το σύνολο του σημαντικού εξοπλισμού, δηλ., εναλλάκτες θερμότητας, συμπυκνωτές, στρόβιλος και κόστος αντλιών
	$\sum_i f_i$	παράγοντες για διοχέτευση με σωλήνες, κτήρια και δομές, οργάνωση, εγκατάσταση εξοπλισμού, κ.λπ.
	f_i	παράγοντες έμμεσων δαπανών, π.χ., αμοιβές εφαρμοσμένης μηχανικής, πιθανότητα και σχετικές δαπάνες,

C_w	κόστος γεωθερμικών άντλησης και επανεισαγωγής στη γεώτρηση
n_w	αριθμός γεωθερμικών γεωτρήσεων που απαιτείται για τις ιδιαίτερες ανάγκες του μεγέθους της εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας
f_w	μέρος του C_w που αφορά υπολογισμούς για τη διοχέτευση με σωλήνες από την γεώτρηση στην εγκατάσταση
f_I^*	παράγοντες έμμεσων δαπανών, π.χ., δαπάνες συνδεδεμένες με την ανακάλυψη του γεωθερμικού τομέα όπως απόκτηση εδάφους, τρυπώντας με τρυπάνι διερευνητικές τρύπες, και απρόβλεπτα έξοδα

Προκειμένου να υπολογιστεί το συνολικό κόστος μιας ολοκληρωμένης γεωθερμικής εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας, οι ετήσιες δαπάνες που συνδέονται με τις επενδύσεις κεφαλαίου για την κατασκευή εγκαταστάσεων (π.χ., τόκος που χρεώνεται στα δανεισμένους χρήματα, τους φόρους, την υποτίμηση, την επιστροφή στην ασφάλεια, κ.λπ.) πρέπει να αξιολογηθούν. Ετήσια λειτουργία, συντήρηση και επισκευή, και γενικά έξοδα (διοικητικά και έρευνα, κ.λπ.), και ηλεκτρικές δαπάνες μετάδοσης (από το σημείο τροφοδότησης εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας στο περιφερειακό δίκτυο διανομής), πρέπει να προστεθούν στις συνολικές επενδύσεις κεφαλαίου για να υπολογιστεί το κόστος ανά κιλοβατώρα.[35]

6.1. Ολοκληρωμένες γεωθερμικές δαπάνες της γεώτρησης

Το κόστος της γεώτρησης εξαρτάται ουσιαστικά από το βάθος και τη διάμετρο της και τον τύπο του βράχου. Στη συνέχεια το βάθος της εξαρτάται από το θερμικό προφίλ (πόδια $^{\circ}\text{F}/1000$) της γεωθερμικής περιοχής. Μια πλήρης περιγραφή της γεώτρησης κόστους προτύπου έχει παρασχεθεί από Tester και Milora [35]. Η ακόλουθη εξίσωση είναι μια γραμμική προσέγγιση του συσχετισμού:

$$\ln(\$/ft) = 1,1867 * 10^{-4}W_D + 3,0277$$

Όπου W_D είναι το βάθος της γεώτρησης σε πόδια.

Στην περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου του Ακροποτάμου, το συνολικό βάθος της γεώτρησης είναι:

$$W_D = 275m = 902.23 ft$$

Επομένως:

$$\ln(\$/ft) = 1,1867 * 10^{-4} * 902.23 + 3,0277 = 3,13$$

Οπότε:

$$Total\ cost = W_D * e^{3,13} = 902.23 * 3,13 = 2.823,97\$ \Rightarrow \frac{2.823,97}{1,31} = 2.155,70\ €$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο στο μαλακότερο βράχο (υγρά ή/και καυτά ξηρά συστήματα βράχου). Η απόδοση και η διάρκεια ζωής μιας φυσικά ή τεχνητά υποκινημένης δεξαμενής είναι ίσως η δυσκολότερη πτυχή ενός γεωθερμικού συστήματος πρόβλεψης, δεδομένου ότι ο λεπτομερής χαρακτήρας του υδροφόρου στρώματος είναι συνήθως άγνωστος. Η διάρκεια ζωής μιας γεώτρησης 20 ετών ή περισσότεροι έχει υποτεθεί για τον υπολογισμό παραδείγματος εν τω παρόντι. Για τα υδροφόρα στρώματα τα ποσοστά ροής γεωτρήσεων κυμαίνονται από 60 έως 110 lb/s. Ένας ίσος αριθμός γεωτρήσεων παραγωγής και επανεισαγωγής έχει ληφθεί υπόψη.[35]

6.2. Κόστος των εναλλακτών θερμότητας και των συμπυκνωτών

Οι δαπάνες εναλλακτών θερμότητας και συμπυκνωτών μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις [35]:

- Για πίεση σωλήνα = 200-300 psia

$$\ln(\$/ft^2) = 0,4383 \ln(P_{shell}) - 0,1297$$

Όπου P_{shell} η πίεση στον εναλλάκτη [psia]

- Για πίεση σωλήνα = 1000 psia

$$\ln(\$/ft^2) = 0,4092 \ln(P_{shell}) + 0,3744$$

- Για σωλήνα με δευτερεύουσα πίεση = 2000 psia

$$n(\$/ft^2) = 0,3461 \ln(P_{shell}) + 1,046$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν μόνο για το ανθρακοχάλυβα ως υλικό της κατασκευής και για τους σωλήνες και για τους εναλλάκτες. Τα εφαρμόσιμα μεγέθη εναλλακτών θερμότητας κυμαίνονται από 20.000 ft² ως 35.000.[35]

6.3. Κόστος στροβίλου

Ο προϋπολογισμός δαπανών στροβίλων είναι βασισμένος σε ένα πρότυπο που αναπτύσσεται από την Barber-Nichols Company

$$C_T = (1.04N_e - 0.04N_e^2)f_p(2485.8 n_s f_u D_T^{2.1} + 474.94 D_T^3 + 1924.8 D_T^2)$$

Όπου N_e = ο αριθμός ακρών εξάτμισης,

N_s = αριθμός εσωτερικών σταδίων (Pr/stage - 0.7),

D_T = διάμετρος,

f_u = κόστος του πολλαπλασιαστή

V_T ταχύτητα ακρών (ft/sec)

F_p = κόστος του πολλαπλασιαστή της πίεσης.

Ο παράγοντας F_p διορθώνει τα αποτελέσματα πίεσης.

Ο πολλαπλασιαστής F_p δαπανών που διορθώνει για τα αποτελέσματα πίεσης κολπίσκων μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση,

$$f_p = 6.2857 \times 10^{-5} P_{\max} + 0.9707$$

$$f_u = -2.469 + 0.0090V_T - 7.991 \times 10^{-6} V_T^2 + 2.446 \times 10^{-9} V_T^3$$

όπου P_{\max} = μέγιστη πίεση στροβίλων (psia).

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κανένα αποτέλεσμα θερμοκρασίας κάτω από 800°F.

Ο παράγοντας που διορθώνει για την ταχύτητα ακρών λεπίδων.[35]

6.4. Κόστος γεννητριών

Το κόστος γεννητριών υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, όπου MW= καθαρή ηλεκτρική παραγωγή της μονάδας στα μεγαβάτ.

$$C_G = 225000 \left(\frac{MWe}{10} \right)^{0.7}$$

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η γεωθερμία είναι μια φυσική, ήπια και σε σημαντικό βαθμό ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Είναι σημαντικό ότι η γεωθερμία δεν παρουσιάζει τον διαλείποντα χαρακτήρα άλλων

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ηλιακή, αιολική) και είναι σε θέση να προσφέρει ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση. Η εκμετάλλευσή της είναι εφικτή μόνο με την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες, σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο εξασφαλίζουν ένα οικονομικό αποτέλεσμα.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας, μπορούμε να έχουμε αν μεταδώσουμε ένα μέρος της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών, που έχουν μικρή σχετικά ενθαλπία, σε ειδικά υγρά με πολύ χαμηλό σημείο βρασμού, όπως είναι π.χ. το φρέον, το ισοβουτάνιο, το προπάνιο και το χλωριούχο αιθύλιο.

Η περίπτωση του γεωθερμικού πεδίου του Ακροποτάμου, αποτελεί ένα παράδειγμα της δυνατότητας εκμετάλλευσης της γήινης θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό πεδίο αυτό, αν και χαρακτηρίζεται ως μέσης ενθαλπίας, έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος έως και 1MWatt. Σε αυτό συμβάλει η ικανοποιητική παροχή γεωθερμικού ρευστού του πεδίου ($200\text{m}^3/\text{h}$), αλλά και η επιλογή του κατάλληλου δευτερεύοντος ρευστού. Το δευτερεύον αυτό 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. Από τα ρευστά αυτά, επιλέχτηκε ως καταλληλότερο το ισοβουτάνιο.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του δευτερεύοντος ρευστού είναι πολύ σημαντικές γιατί καθορίζουν τις συνθήκες λειτουργίας της γεωθερμικής μονάδας, τον τεχνολογικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, αλλά και το συνολικό κόστος.

Συμπερασματικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμικά ρευστά, μπορεί να είναι εφικτή και μπορεί να επιφέρει οφέλη, όταν το θερμικό φορτίο του γεωθερμικού πεδίου

είναι μεγάλο και ταυτόχρονα εύκολα προσβάσιμο. Ακόμα όμως και με μικρότερο θερμικό φορτίο, όπως στην περίπτωση του Ακροποτάμου Καβάλας, είναι εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και οι προοπτικές για το μέλλον θα είναι ακόμη μεγαλύτερες με την ανάπτυξη της σχετική τεχνογνωσίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Η Γεωθερμική Έρευνα στη Νήσο Μήλο – Αξιολόγηση Γεωθερμικών Δεδομένων-Καμακάρης Βασίλειος
- [2] WIKIPEDIA, <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%AF%CE%B1>
- [3] Γεωθερμική Ενέργεια Μέσης Ενθαλπίας, Παναγιώτου Γεώργιος, Μηχανολόγος Μηχανικός, Ιούνιος 2009
- [4] International Geothermal Association, <http://www.geothermal-energy.org>
- [5] Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, Yunus A.Cengel, Michael A. Boles
- [6] Energaia Boudouri, Ολοκληρωμένα συστήματα Γεωθερμίας, Θέρμανση, Δροσισμός, Γεωτρήσεις <http://www.boudouri.gr/xriseis.php>
- [7] <http://imarinakiss.webs.com/geothermal.pdf>
- [8] Γεωθερμικός Κλιματισμός, Κυριακόπουλος Παναγιώτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009-2010
- [9] Διπλωματική εργασία: «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση γεωθερμίας για την παραγωγή ηλεκτρισμού». Δημήτριος-Γεράσιμος Κουρούκλης
- [10] Geothermal Energy-An alternative resource for the 21st century, Harsh Gupta, Sukanta Roy
- [11] Τα γεωθερμικά πεδία της χώρας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών ΙΓΜΕ, Τομέας Υδάτινων πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων
- [12] Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [13] Λειτουργία αεριοστρόβιλων και ατμοστρόβιλων, Κ. Μαθιουδάκης
- [14] Μετάδοση θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο, Θεσσαλονίκη 2004-2005

- [15] Jurnal Mekanikal, December 2005, No. 20, 68 – 77, SOLAR THERMAL ORGANIC RANKINE CYCLE AS ARENEWABLE ENERGY OPTION, Cheng Eng Cong¹, Sanjayan Velautham, Amer Nordin Darius, Department of Thermo-Fluids, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia
- [16] Thermodynamic studies on an alternate binary working fluid combinations and configurations for a combined and cooling cycle, by SANJAY VIJAYARAGHAVAN, 2003
- [17] Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, mediumtemperature geothermal fields, Alessandro Franco, Marco Villani, Dipartimento di Energetica “L. Poggi”, Università di Pisa, Largo Lucio Lazzarino – 56126 Pisa, Italy
- [18] <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=38>
- [19] ΔΕΛΤΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ, Τόμος XLIII, No 5
- [20] <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C75285&Mask=1>
- [21] Ανάκτηση θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εγκατάσταση αποτέφρωσης επικίνδυνων ιατρικών αποβλήτων του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α, ΔΗΜΗΣΡΙΟΣ Α. ΦΑΦΑΛΗΣ, ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ & ΑΕΡΟΝΑΤΠΗΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ
- [22] Ηλεκτρικές Μηχανές , Stephen J. Charpman, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [23] <http://www.tic.toshiba.com.au>
- [24] <http://el.wikipedia.org>
- [25] <http://boiler-review.com/2011/01/17/boiler-steam-turbine-2>
- [26] <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C75285&Mask=1>
- [27] Experimental study on forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants mixtures in horizontal tube, Jee Young Shin, Min Soo Kim* and Sung Tack Ro, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea, *Received 15 January 1996; revised 10 December 1996; accepted 19 December 1996*
- [28] Nucleate Pool Boiling Heat Transfer of Pure Refrigerants and Binary Mixtures, Zhaofu SUN 1'2 Maoqiong GONG 1 Yanfeng QI 1'2 Zhijian LI 1'z Jianfeng WU 1, 1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China, 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China

- [29] Pre-designed Steam Turbines, The comprehensive product range up to 10 megawatts, Siemens
- [30] Υπολογισμός ψυκτικών μονάδων, εφαρμογές και συμπιεστές ψύξης, Σπυρίδωνος Π.Αναστασιάδη, Αθήνα 2001
- [31] <http://www.staklenik.rs/g>
- [32] Οδηγός Συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητα, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.)
- [33] AMS Synchronous generators, 4 and 6 pole, 3-70 MVA, 3-15 Kv, ABB
- [34] Siemens Air-Cooled Generators, SGen-100A-2P Series
- [35] Geothermal energy as a source of electric power : thermodynamic and economic design criteria, Stanley L. Milora and Jefferson W. Tester
- [36] http://cienbas.galeon.com/02one_component.htm
- [37] DiPippo, 2002
- [38] Γεωθερμία, Φυτίκας Μ., Ανδρίτσος Ν.