

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΥΑΔΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ»**



Φοιτητής: Κουλίδης Τραϊανός

Επιβλέπων: Σταμάτης Αναστάσιος, Επ. Καθηγητής Π.Θ.

Βόλος, Οκτώβριος 2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8999/1
Ημερ. Εισ.: 21-10-2010
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΚΟΥ

«Διάλεξε μια δουλειά που σ' αρέσει
και δε θα χρειαστεί να δουλέψεις ούτε μια μέρα στη ζωή σου.»

Κομφούκιος , 550 π.Χ. – 479 π.Χ

I. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη γεωθερμικής εγκατάστασης δυαδικού κύκλου για ηλεκτροπαραγωγή και για άμεσες χρήσεις θερμότητας. Μελετάται η θερμοδυναμική και οικονομική συμπεριφορά της εγκατάστασης ενώ γίνεται εξεργειακή βελτιστοποίηση του συστήματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια της γεωθερμίας και των γεωθερμικών συστημάτων, αποσαφηνίζεται για πιο λόγο και υπό ποιες προϋποθέσεις θεωρείται αιεφόρος και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και αναφέρεται η διείσδυση της τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Τέλος γίνεται αναφορά των άμεσων γεωθερμικών εφαρμογών

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση των δυαδικών κύκλων και στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμία. Περιγράφονται επίσης οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εφαρμογών αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί έναν οδηγό εισαγωγής στο σχεδιασμό συστημάτων και στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, το Aspen Plus®, καθώς κατά τη συγγραφή της εργασίας αυτής παρατηρήθηκε κενό στην ελληνική βιβλιογραφία.

Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη θερμοδυναμική ανάλυση του προτεινόμενου μοντέλου, τόσο από ενεργειακής όσο και από εξεργειακής πλευράς. Η βελτιστοποίηση του κύκλου γίνεται με βάση τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται η ανάλυση ευαισθησίας των επιλεγμένων μεταβλητών σχεδίασης.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από την οικονομική ανάλυση του μοντέλου που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το συνολικό κόστος της γεωθερμικής εγκατάστασης διαχωρίζεται στο συνολικό κόστος κύριας επένδυσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Στην τελευταία παράγραφο παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας κόστους της εγκατάστασης.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εξεργοοικονομική ανάλυση της μελετώμενης μονάδας, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που υπολογίστηκαν στα κεφάλαια 4 και 5.

Στο έβδομο κεφάλαιο διατίθενται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας ενώ προτείνονται ενέργειες για την εξεργοοικονομική βελτίωση της εγκατάστασης.

II. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων έχει σημειωθεί παγκοσμίως μια ραγδαία αύξηση του ενδιαφέροντος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, τόσο επιστημονικά όσο και ερευνητικά. Η παραγωγή ισχύος από γεωθερμικούς πόρους ακολουθεί μια σταθερή και διακριτική αύξηση τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, παρ' όλα αυτά η συνεισφορά της στην παγκόσμια παραγωγή παραμένει εξαιρετικά χαμηλή. Πιστεύεται ότι η γεωθερμική ενέργεια, ως μια από τις πιο αξιόπιστες και φθηνές πηγές «πράσινης» ενέργειας θα παίξει καθοριστικό ρόλο στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και θα βοηθήσει στην εκπλήρωση των στόχων μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Από τη στιγμή που η θερμοκρασία των περισσότερων επιβεβαιωμένων γεωθερμικών πόρων στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο δεν είναι υπερβολικά υψηλή, η ηλεκτροπαραγωγή από τους πόρους αυτούς εστιάζεται σχεδόν αποκλειστικά στις εγκαταστάσεις ισχύος δυαδικού κύκλου. Ακόμα μία παράμετρος είναι και η εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας με πολύ σημαντικά αποτελέσματα στην ενεργειακή εξοικονόμηση λόγω των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών και του κόστους της ενέργειας στη σημερινή κοινωνία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν και συνέβαλαν ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία και μαζί της μια από τις ωραιότερες περιόδους της ζωής μου.

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Σταμάτη Αναστάσιο για τον χρόνο και τις γνώσεις που διέθεσε. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον κ. Ανδρίτσο Νικόλαο, οι διαλέξεις του οποίου αποτέλεσαν το κίνητρο ενασχόλησης μου με την εργασία αυτή, για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους και συμφοιτητές που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα σε όλη αυτή την πορεία και ιδιαίτερα τον Τζιουρτζιούμη Δημήτρη, για την απλόχερη και ανιδιοτελή βοήθεια του όποτε τους τη ζήτησα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, την αδερφή μου και την Αντιγόνη Β. χωρίς την στήριξη, την εμπύχωση και την εμπιστοσύνη των οποίων δε θα είχα φτάσει στο σημείο που είμαι τώρα.

III. Περιεχόμενα

I. ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
II. ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	II
III. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	III
1. ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	1
1.1 Γεωθερμία - Θερμική Βαθμίδα	1
1.2 Γεωθερμικά Συστήματα και πόροι.....	2
1.2.1 Γεωθερμικοί πόροι – Ταξινόμηση.....	2
1.2.2 Γεωθερμικά Συστήματα-Ταξινόμηση.....	3
1.3 Αειφορία και Βιωσιμότητα.....	6
1.3.1 Αειφόρος και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.....	6
1.3.2 Πλεονεκτήματα.....	7
1.4 Γεωθερμία σε Διεθνές επίπεδο.....	7
1.5 Γεωθερμία σε Εθνικό επίπεδο.....	9
1.5.1 Γεωθερμικά πεδία και ανάπτυξη.....	9
1.5.2 Νομοθετικό πλαίσιο.....	11
1.6 Άμεσες Εφαρμογές της Γεωθερμικής Ενέργειας.....	14
1.6.1 Άμεση θέρμανση χώρων.....	14
1.6.2 Αγροτικές εφαρμογές Θερμοκήπια.....	15
1.6.3 Υδατοκαλλιέργειες.....	16
1.6.4 Βιομηχανικές Εφαρμογές.....	16
1.6.5 Λουτροθεραπεία και ιατρικές εφαρμογές.....	17
2. ΔΥΑΔΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	18
2.1 Κύκλοι Ισχύος.....	18
2.1.1Κύκλος Rankine.....	18
2.1.2Οργανικός κύκλος Rankine (ORC).....	19
2.1.3 Κύκλος Kalina.....	21
2.2 Ρευστά λειτουργίας	24
2.2.1Καθαρές Ουσίες.....	25
2.2.2Μείγματα	27

2.3 Βαθμοί απόδοσης – αποδοτικότητα.....	30
2.3.1 Βαθμός απόδοσης σύμφωνα με τον πρώτο νόμο.....	30
2.3.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης.....	31
2.3.3 Βαθμός απόδοσης σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.....	32
2.3.4 Ιδανικός Βαθμός Απόδοσης.....	33
2.4 Γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ισχύος.....	34
2.4.1 Γεωθερμικές μονάδες ξηρού ή άμεσου ατμού.....	35
2.4.2 Στιγμαϊάς ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου.....	36
2.4.3 Δυαδικού Κύκλου	37
2.4.4 Εγκαταστάσεις Κύκλου Kalina.....	38
2.4.5 Υβριδικές εγκαταστάσεις.....	40
2.5 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Γεωθερμικών Μονάδων.....	42
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΟ ASPEN Plus®.....	48
3.1 Σχεδιασμός ενός θερμικού συστήματος.....	49
3.1.1 Απαιτήσεις και Χαρακτηριστικά.....	49
3.1.2 Ανάγκη και Δυνατότητα.....	49
3.2 Εισαγωγή στο ASPEN Plus®.....	51
3.3 Διεπαφή χρήστη (user interface).....	52
3.4 Εισαγωγή δεδομένων - εκτίμηση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων	54
3.5 Καταστατικές Εξισώσεις και μέθοδοι προσέγγισης των ιδιοτήτων.....	55
3.5.1 Ιδανική προσέγγιση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.....	55
3.5.2 Καταστατική εξίσωση Peng-Robinson (PR).....	55
3.5.3 Καταστατική εξίσωση Soave-Redlich-Kwong (SRK).....	57
3.6 Σύνοψη των διαθέσιμων συσκευών φυσικών και χημικών διεργασιών.....	58
3.7 Εργαλεία Ανάλυσης Σχεδιασμού.....	61
3.7.1 Σχεδιασμός Χαρακτηριστικών.....	61
3.7.2 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	62
3.7.3 Βελτιστοποίηση.....	64
3.8 Διαχείριση Αποτελεσμάτων.....	65
4. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	66
4.1 Σχεδιασμός της εγκατάστασης.....	66
4.1.1 Παρουσίαση του μοντέλου.....	66

4.1.2	Μεταβλητές Σχεδιασμού-Παράμετροι-Παραδοχές.....	68
4.1.3	Εξοπλισμός.....	70
4.2	Ενεργειακή Ανάλυση.....	71
4.3	Εξεργειακή Ανάλυση.....	77
4.3.1	Ορισμοί.....	77
4.3.2	Ανάλυση.....	78
4.3.3	Καταστροφή και απώλεια Εξέργειας.....	80
4.4	Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης.....	82
4.5	Ανάλυση Ευαισθησίας και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	84
5.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	92
5.1	Εισαγωγή.....	92
5.2	Η σύνθεση των παραγόντων που επηρεάζουν την επένδυση.....	92
5.3	Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας.....	93
5.3.1	Η μέθοδος της λογαριθμικής μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς.....	94
5.3.2	Η μέθοδος της αποτελεσματικότητας μεταφοράς θερμότητας.....	94
5.3.3	Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας – U.....	95
5.4	Εκτίμηση του κόστους του απαιτούμενου εξοπλισμού.....	96
5.5	Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης.....	99
5.5.1	Συνολικό κεφάλαιο επένδυσης.....	100
5.5.2	Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης.....	104
5.5.3	Κόστος Γεωθερμικού Νερού.....	105
5.6	Μηχανισμοί χρηματοδότησης.....	108
5.7	Αποτελέσματα Οικονομικής Ανάλυσης.....	109
6.	ΕΞΕΡΓΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	114
6.1	Θεμελιώδεις αρχές εξεργοοικονομίας.....	114
6.1.1	Κοστολόγηση με βάση την εξέργεια.....	114
6.1.2	Ισοζύγιο κόστους σε κάθε συσκευή.....	115
6.1.3	Κόστος καταστροφής και απώλειας εξέργειας.....	117
6.1.4	Μοναδιαίο Κόστος Εξέργειας.....	119
6.2	Εξεργοοικονομική Ανάλυση.....	121
6.2.1	Εξεργειακός Βαθμός απόδοσης.....	121
6.2.2	Λόγοι Καταστροφής και απώλειας εξέργειας.....	122

6.2.3 Σχετική διαφορά κόστους.....	123
6.2.4 Εξεργοοικονομικός Συντελεστής.....	124
6.3 Διαδικασίες Βελτίωσης.....	125
7. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	127
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - Γεωθερμία και Εφαρμογές

1.1 Γεωθερμία

Γεωθερμική ισχύς είναι η θερμική (αρχικά) και η ηλεκτρική (σε δεύτερο στάδιο) ισχύς που παράγεται από την περιεχόμενη στη Γη θερμική ενέργεια (γεωθερμική ενέργεια). Η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας από θερμοδυναμικής πλευράς βασίζεται στη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ μιας μάζας υπόγειου πετρώματος και νερού και μιας μάζας νερού ή αέρα στην επιφάνεια της γης. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας επιτρέπει την παραγωγή θερμικής ενέργειας που μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα είτε να μετατραπεί σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά, οι θερμοκρασίες στη Γη αυξάνονται ανάλογα με το βάθος, σε 200-1000°C στη βάση του φλοιού και πιθανώς μέχρι 3500-4500°C στο κέντρο της. Η θερμότητα που παράγει γεωθερμικές βαθμίδες προέρχεται από δύο πηγές, τη ροή θερμότητας από τον κατώτερο φλοιό και το μανδύα, και τη θερμική ενέργεια που παράγεται στον άνω φλοιό από τη ραδιενεργό διάσπαση ισοτόπων του ουρανίου, θορίου και καλίου. Εντούτοις, μερικά γρανιτικά πετρώματα στον άνω φλοιό έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο (U^{238} και U^{235}) και θόριο (Th^{232}), παράγοντας έτσι αφύσικα μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας και αυξημένη ροή θερμότητας προς την επιφάνεια της γης.[1]

Θερμική Βαθμίδα

Οι θερμικές βαθμίδες υπολογίζονται θεωρώντας ότι η θερμότητα κινείται προς την επιφάνεια της Γης μόνο με τη θερμική αγωγή μέσω στερεών πετρωμάτων. Εντούτοις, η θερμική ενέργεια μεταδίδεται επίσης προς την επιφάνεια με μετακίνηση τεττηγμένων πετρωμάτων (μάγμα) και με την κυκλοφορία νερού μέσω επικοινωνούντων πόρων και ρωγμών. Αυτές οι διαδικασίες συντελούνται στις περιφερειακές βαθμίδες όπου επικρατεί η αγωγή και προκαλούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες κοντά στην επιφάνεια της Γης. Οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες είναι βασικοί υποψήφιοι για γεωθερμική διερεύνηση και ανάπτυξη.

1.2 Γεωθερμικά Συστήματα και πόροι

1.2.1 Γεωθερμικοί πόροι

Ένας γεωθερμικός πόρος (geothermal resource) μπορεί να οριστεί απλά ως μια δεξαμενή στο εσωτερικό της Γης από την οποία είναι οικονομικά συμφέρον να εξαχθεί (με κόστος συγκριτικά χαμηλότερο από άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας όπως η υδροηλεκτρική ή τα ορυκτά καύσιμα) και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ή οποιασδήποτε άλλης βιομηχανικής, γεωργικής ή οικιακής εφαρμογής. Ένας γεωθερμικός πόρος μπορεί να περιέχει θερμότητα τόσο στα στερεά πετρώματα, όσο και στα ρευστά που γεμίζουν τα κενά και του πόρους ανάμεσα στα πετρώματα αυτά. Ένας γεωθερμικός πόρος διαφέρει από ένα γεωθερμικό απόθεμα (ή ωφέλιμο προσβάσιμο πόρο) στο γεγονός ότι αναφέρεται στο τμήμα του πόρου που είναι οικονομικά δυνατό να εξαχθεί με τις παρούσες τιμές. Τα αποθέματα είναι διασφαλισμένα με βάση λεπτομερείς βάσεις δεδομένων οι οποίες λαμβάνονται από βαθιές γεωτρήσεις σε περιοχές εν δυνάμει γεωθερμικών πόρων. Επομένως, οι κύριοι παράγοντες στην εκτίμηση γεωθερμικών πόρων είναι το κόστος των γεωτρήσεων και η ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων των σχηματισμών των υπόγειων πετρωμάτων.[2]

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. Οι γεωθερμικοί πόροι διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης και υψηλής ενθαλπίας (ή θερμοκρασίας), σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις πιθανές μορφές αξιοποίησής τους. Επειδή δεν υπάρχει συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος διαχωρισμού των παραπάνω κατηγοριών, στον Πίνακα 1.1 αναφέρονται οι προτάσεις ταξινόμησης τους, από διάφορους συγγραφείς.[3]

Πίνακας 1.1 – Ταξινόμηση των γεωθερμικών πόρων

Είδος Γεωθερμικού Πόρου	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Χαμηλής Ενθαλπίας	<90	<125	<100	≤100	≤190
Μέσης Ενθαλπίας	90-150	125-225	100-200	-	-
Υψηλής Ενθαλπίας	>150	>225	>200	>150	>190

(1) Muffler and Cataldi (1978)

(2) Hochstein (1990)

(3) Benderitter (1990)

(4) Nicholson (1993)

(5) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

1.2.2 Γεωθερμικά συστήματα

Ως γεωθερμικό σύστημα ορίζεται ένας γεωλογικός σχηματισμός με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μέσα στον οποίο είναι αποθηκευμένη η γεωθερμική ενέργεια. Τα γεωθερμικά συστήματα εντοπίζονται σε 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 καλύψουν ένα ευρύ φάσμα, από σχετικά χαμηλές τιμές μέχρι και μεγαλύτερες από 400°C. Συνεπώς, όλα τα γεωθερμικά συστήματα διαφέρουν μεταξύ τους αλλά έχοντας συγκεκριμένα κοινά χαρακτηριστικά χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες: α) συστήματα στα οποία κυριαρχεί ο ατμός, β) θερμού νερού, γ) γεωπεπιεσμένα, δ) θερμών ξηρών πετρωμάτων (HDR) και ε) μάγματος.

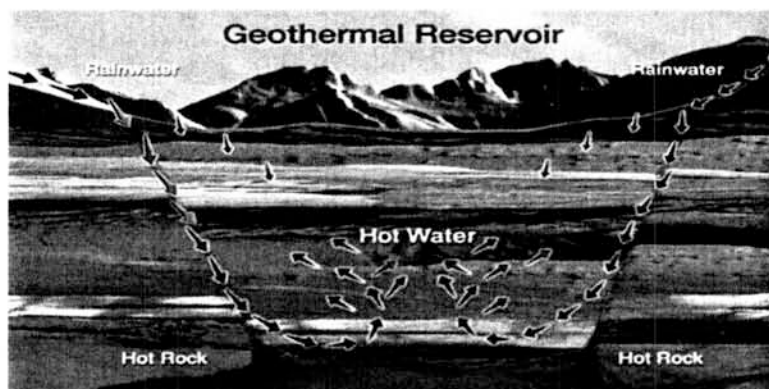
Παρακάτω γίνεται συνοπτική περιγραφή των κατηγοριών αυτών:

α) Γεωθερμικά συστήματα στα οποία κυριαρχεί ο ατμός

Τα περισσότερα από τα παρόντα εκμεταλλευόμενα γεωθερμικά πεδία εμπεριέχουν νερό σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 100°C. Όταν αυτό το νερό μεταφέρεται στην επιφάνεια της Γης, η πίεση μειώνεται σημαντικά, παράγοντας μεγάλες ποσότητες ατμού και κορεσμένου μείγματος ατμού-νερού. Η αναλογία ατμού-νερού διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Κάποια από τα πιο γνωστά γεωθερμικά συστήματα αυτού του τύπου είναι το Cierro Prieto (Μεξικό), το Wairakei (Νέα Ζηλανδία), το Ρέυκιαβικ (Ισλανδία), το Salton Sea (Η.Π.Α) κ.ά. Από τη στιγμή που ο ατμός σχετίζεται με νερό τα πεδία αυτά ονομάζονται υγρού ατμού (wet steam). Υπάρχουν λίγες περιπτώσεις όπου παράγεται υπέρθερμος ατμός χωρίς να σχετίζεται με ρευστά (Larderello, The Geysers). Πεδία τέτοιου τύπου ονομάζονται ξηρού ατμού (dry steam).

β) Γεωθερμικά συστήματα θερμού νερού

Στα γεωθερμικά συστήματα θερμού νερού, ρεύματα νερού μεταφέρουν τη θερμότητα μέσω συναγωγής από το βάθος της πηγής στον ταμιευτήρα. Ο πάτος του ταμιευτήρα μπορεί να θερμανθεί μέσω συναγωγής από τα θερμά πετρώματα. Τυπικά, η θερμοκρασία σε ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα θερμού νερού ποικίλει από 60 ως 100 °C και συναντάται σε βάθη που κυμαίνονται από 1500 μέχρι 3000 μέτρα. Το Σχήμα 1.1 αποτελεί τη σχηματική αναπαράσταση ενός γεωθερμικού συστήματος θερμού νερού



Σχήμα 1.1 – Ιδανικό γεωθερμικό σύστημα θερμού νερού

γ) Γεωπεπιεσμένα Γεωθερμικά συστήματα

Ο τύπος του υδροθερμικού περιβάλλοντος του οποίου το θερμό νερό είναι απόλυτα σφραγισμένο από κάθε επαφή με τα περιβάλλοντα πετρώματα καλείται γεωπεπιεσμένο σύστημα (Jones, 1970). Τα συστήματα αυτά στην ουσία διαμορφώνουν μια λεκάνη στην οποία λαμβάνει χώρα μια πολύ γρήγορη επίστρωση με επικαθίσεις οδηγώντας το υδροθερμικό νερό σε υψηλότερη από τη φυσιολογική πίεση. Τα πρώτα γεωπεπιεσμένα συστήματα εντοπίστηκαν κάτω από τον κόλπο του Μεξικό σε βάθη μεταξύ 6 και 8 χιλιομέτρων, σε πιέσεις μεγαλύτερες των 150 MPa και θερμοκρασίες από 150 ως 180°C. Στους πεπιεσμένους ταμιευτήρες η ενέργεια δεν είναι μόνο θερμική, αλλά περιλαμβάνει ένα ίσο ποσό ενέργειας λόγω του διαλυμένου στο νερό μεθανίου (χημική ενέργεια) συν ένα ποσό μηχανικής/υδραυλικής ενέργειας λόγω των υψηλών πιέσεων των ρευστών.

δ) Θερμά ξηρά πετρώματα

Υπάρχει μια ακόμα κατηγορία γεωθερμικού συστήματος στην οποία η γεωθερμική θερμότητα αποθηκεύεται σε θερμά, πορώδη, διαπερατά πετρώματα σε μικρά βάθη στον φλοιό της Γης χωρίς την παρουσία ρευστού για αποθήκευση ή μεταφορά θερμότητας. Τα πετρώματα αυτά ονομάζονται θερμά ξηρά (HDR). Για την εκμετάλλευση αυτού του πόρου το νερό αντλείται προς τα κάτω με μια γεώτρηση για να προκληθεί υδραυλική ρωγμή και να σχηματιστεί ταμιευτήρας. Έπειτα το νερό κυκλοφορεί υπό πίεση μέσα στις ρωγμές απορροφώντας θερμότητα πριν επανέλθει στην επιφάνεια μέσω ενός ή περισσότερων φρεατίων παραγωγής. Η πηγή αυτή είναι πρακτικά απεριόριστη και πιο προσιτή από τις υδροθερμικές πηγές.

ε) Μάγμα

Το μάγμα είναι το φυσικά λειωμένο πετρώδες υλικό το οποίο διατηρεί τη ρευστότητα του μέχρι τη στερεοποίηση. Μπορεί να περιέχει αέρια και στερεά υλικά σωματίδια όπως κρύσταλλα ή κομμάτια από βράχους. Το μάγμα είναι η μεγαλύτερη γεωθερμική πηγή και σε πολλές ηφαιστειακές περιοχές συναντάται μέσα στα πρώτα 5

χιλιόμετρα του φλοιού. Η θερμοκρασία του κυμαίνεται από 700 έως 1200°C αλλά η πηγή αυτή δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα καθώς τα βάθη δεν είναι προσπελάσιμα και η οποιαδήποτε επένδυση δε θεωρείται συμφέρουσα.[1]

1.3 Αειφορία και Βιωσιμότητα - Πλεονεκτήματα Γεωθερμικής Ενέργειας

1.3.1 Αειφόρος και Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια περιγράφεται ως ανανεώσιμη και αειφόρα πηγή ενέργειας. Ο όρος ανανεώσιμη περιγράφει μια ιδιότητα του ενεργειακού πόρου, ενώ η αειφορία τον τρόπο με τον οποίο αυτός αξιοποιείται. Το πιο σημαντικό κριτήριο για την κατάταξη της γεωθερμικής ενέργειας στις ανανεώσιμες πηγές είναι ο ρυθμός επαναφόρτισης του ενεργειακού συστήματος. Κατά την εκμετάλλευση λοιπόν ενός γεωθερμικού πόρου, η επαναφόρτίσή του επιτυγχάνεται με την αναπλήρωση του γεωθερμικού μέσου στον ταμιευτήρα στο ίδιο χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η παραγωγή των θερμών ρευστών από τα αντίστοιχα φρεάτια παραγωγής. Αυτή ακριβώς η διαδικασία δικαιολογεί την ταξινόμηση της γεωθερμίας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η αειφορία που αφορά την κατανάλωση ενός ενεργειακού πόρου εξαρτάται από το αρχικό του μέγεθος, το ρυθμό εκμετάλλευσης (παραγωγής ρευστών) και το ρυθμό κατανάλωσης. Η κατανάλωση μπορεί προφανώς να διατηρηθεί σταθερή για τη χρονική περίοδο κατά την οποία η επαναφόρτίσή της πηγής είναι ταχύτερη ή ίση με την αποφόρτιση. Ο όρος "αειφόρος ανάπτυξη" χρησιμοποιείται από την Παγκόσμια Επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης για να περιγράψει την ανάπτυξη η οποία ανταποκρίνεται στις ανάγκες της σημερινής εποχής, χωρίς όμως να θέτει σε κίνδυνο την κάλυψη των αναγκών των μελλοντικών γενεών. Σε αυτό το πλαίσιο η αειφόρος ανάπτυξη δεν υποδηλώνει ότι κάθε δεδομένη πηγή ενέργειας πρέπει να αξιοποιείται με έναν εξολοκλήρου αειφόρο τρόπο, αλλά ότι θα πρέπει να βρεθεί ένα σχέδιο αντικατάστασης του πόρου που υφίσταται εκμετάλλευση, έτσι ώστε οι επόμενες γενιές να μπορούν να εξασφαλίσουν κατάλληλους ενεργειακούς πόρους, ανεξάρτητα με το αν ο συγκεκριμένος θα έχει εξαντληθεί. Συνήθως μια γεωθερμική μονάδα μπορεί να λειτουργήσει περίπου πενήντα χρόνια σε μια τοποθεσία, εξ' αιτίας της πτώσης του

θερμικού περιεχομένου του γεωθερμικού ταμιευτήρα, ο οποίος χρειάζεται αρκετές δεκαετίες για να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Οι μελέτες που αφορούν την αιφόρα ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου γεωθερμικού πεδίου θα πρέπει να προσανατολίζονται στην εξεύρεση τρόπων διατήρησης ενός σταθερού επιπέδου παραγωγής γεωθερμικής ισχύος σε εθνικό ή περιφερειακό πλαίσιο.

1.3.2 Πλεονεκτήματα Γεωθερμικής Ενέργειας

Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται εμπορικά σε μία κλίμακα εκατοντάδων MW για περισσότερο από τρεις δεκαετίες δεδομένου ότι διαθέτει διάφορα θετικά γνωρίσματα που την καθιστούν ανταγωνιστική προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας και μερικές άλλες ΑΠΕ. Ειδικότερα:

- Αποτελεί έναν τοπικό ενεργειακό πόρο που μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.
- Έχει σημαντική θετική επίδραση στο περιβάλλον με την αντικατάσταση της καύσης των ορυκτών καυσίμων.
- Είναι αποδοτική και ανταγωνιστική με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Οι γεωθερμικοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, χωρίς εμπόδια που επιβάλλονται από τις καιρικές συνθήκες, αντίθετα από άλλες ΑΠΕ.
- Διαθέτει εγγενή ικανότητα αποθήκευσης και είναι καταλληλότερη για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου βάσης.
- Είναι μία αξιόπιστη και ασφαλής ενεργειακή πηγή που δεν απαιτεί αποθήκευση ή μεταφορά των καυσίμων. [1]

1.4 Γεωθερμία σε Διεθνές επίπεδο

Στο πρώτο εξάμηνο του 2008, σε ολόκληρο τον κόσμο η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τη γεωθερμία ξεπέρασε τα 10.000 MWe (Πίνακας 1.2) ποσότητα που ικανοποιεί τις ανάγκες 60 εκατομμυρίων ανθρώπων, αριθμός που κατά προσέγγιση ισοδυναμεί με τον πληθυσμό της Βρετανίας. Για το 2010, η ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγεται από τη γεωθερμία θα μπορούσε να αυξηθεί στα 13.500 MWe σε 46 χώρες,

που αντιστοιχεί με την παραγωγή 27 εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν με ρυπογόνο λιθάνθρακα.

Πίνακας 1.2 – Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από γεωθερμικούς πόρους

ΧΩΡΑ	1990 [MWe]	1995 [MWe]	2000 [MWe]	2005 [MWe]	2010 [MWe]
Αργεντινή	0,67	0,67	—	—	—
Αυστραλία	—	0,17	0,17	0,2	1,1
Αυστρία	—	—	—	1,2	1,4
Αιθιοπία	—	—	8,52	7	7,3
Γαλλία	4,2	4,2	4,2	14,7	16
Γερμανία	—	—	—	0,2	6,6
Γουατεμάλα	—	33,4	33,4	33	52
Ελ Σαλβαδόρ	95	105	161	151	204
Η.Π.Α.	2.774,6	2.816,7	2.228	2.544	3.903
Ιαπωνία	214,6	413,7	546,9	536	536
Ινδονησία	144,75	309,75	589,5	797	1.197
Ιταλία	545	631,7	785	790	843
Ισλανδία	44,6	50	170	322	575
Κένυα	45	45	45	127	167
Κόστα Ρίκα	—	55	142,5	163	166
Κίνα	19,2	28,78	29,17	28	24
Μεξικό	700	753	755	953	958
Νέα Ζηλανδία	283,2	286	437	435	628
Νικαράγουα	35	70	70	77	88
Παπούα-Ν.Γουινέα	—	—	—	39	56
Πορτογαλία	3	5	16	16	29
Ρωσία	11	11	23	79	82
Ταϊλάνδη	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Τουρκία	20,6	20,4	20,4	20,4	82
Φιλιππίνες	891	1.227	1.909	1.931	1.904
Σύνολο	5.831,52	6.866,77	7.974,06	9.064	10.715

Οι ΗΠΑ βρίσκονται στο υψηλότερο βάθρο σε ότι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη θερμότητα της Γης. Την εικοσαετία 1990-2010, η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη γεωθερμία στις ΗΠΑ έφτασε σχεδόν τα 1130 MWe με κύρια συνεισφορά επτά πολιτειών (Αλάσκα, Καλιφόρνια, Χαβάη, Αίνταχο, Νεβάδα, Νέο Μεξικό και Γιούτα). Η Καλιφόρνια, με 2555 MWe, παράγει σχεδόν το 5% της ηλεκτρικής της ενέργειας από γεωθερμία. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η Ισλανδία και η Ιταλία έχουν τα πρωτεία στην ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμία το 2010 με 575 και 843 MWe αντίστοιχα. Η Ιταλία αναμένεται να διπλασιάσει την παραγωγή της μέχρι το 2020, ενώ η Ισλανδία, με το 27% των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτεται από την εκμετάλλευση της θερμότητας της Γης, είναι πρώτη στον κόσμο σε ότι αφορά το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη γεωθερμία. [1]

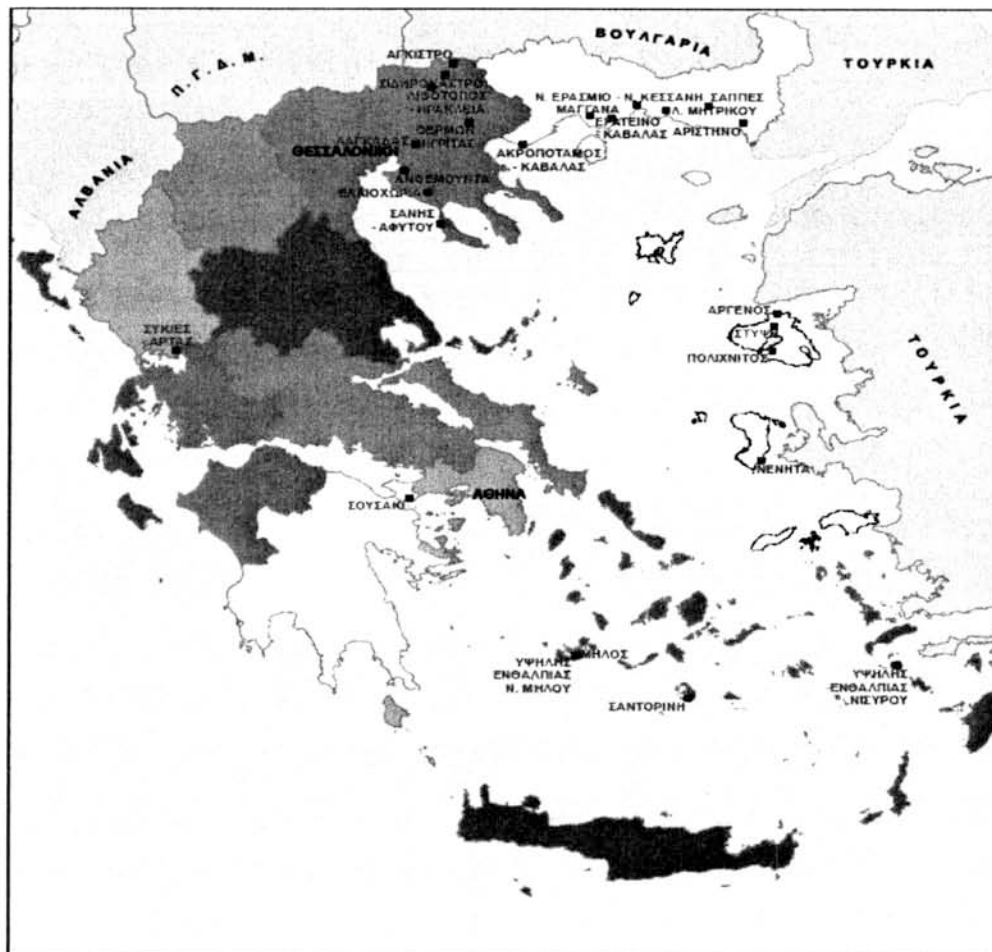
1.5 Διεξόρυξη της γεωθερμικής ενέργειας σε εθνικό επίπεδο

1.5.1 Γεωθερμικά Πεδία και ανάπτυξη

Η Ελλάδα λόγω των ειδικών γεωλογικών συνθηκών της είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα κυρίως χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικά πεδία που είναι διάσπαρτα σε όλη τη χώρα και εντοπίζονται κυρίως σε αγροτικές περιοχές. Αντίθετα, γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας έχουν εντοπιστεί μόνο κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου νοτίου Αιγαίου και πιο συγκεκριμένα, στη Μήλο και τη Νίσυρο. Η γεωθερμική ενέργεια και τα θερμά νερά ήταν γνωστά και στην αρχαία Ελλάδα. Οι θερμές πηγές θεωρούνταν στην αρχαιότητα ότι είχαν θεραπευτικές ιδιότητες και γι' αυτό τα Ασκληπιεία και άλλοι ιεροί χώροι (π.χ. ναοί) βρίσκονταν κοντά σ' αυτές.

Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) τα γνωστά σήμερα αποθέματα γεωθερμικής ενέργειας, χαμηλής θερμοκρασίας, ανέρχονται σε 200.000 Τόνους Ισοδύναμου Πετρελαίου (Τ.Ι.Π.) ανά έτος. Το απολήψιμο δυναμικό των δύο γνωστών πεδίων υψηλής θερμοκρασίας, σε περίπτωση αξιοποίησης στην ηλεκτροπαραγωγή, ανέρχεται σε 170 MWe ενώ το πιθανό δυναμικό όλης της χώρας υπερβαίνει τα 500 MWe.

Τα γεωθερμικά πεδία υψηλής θερμοκρασίας ($>130^{\circ}\text{C}$) εντοπίζονται στο ηφαιστειακό τόξο του Νότιου Αιγαίου που εκτείνεται από τη νήσο Νίσυρο μέχρι το Σουσάκι - Αγ. Θεοδώρους. Σημαντικότερα απ' αυτά είναι το πεδίο της νήσου Μήλου με απολήψιμο δυναμικό 120 MWe και της Νισύρου με 50 MWe. Τα δύο αυτά πεδία δεν αξιοποιούνται σήμερα στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω αντίθεσης των κατοίκων των νησιών. Πολύ ελπιδοφόρες περιοχές για τον εντοπισμό και άλλων πεδίων υψηλής θερμοκρασίας είναι η ν. Κίμωλος, ν. Κως, ν. Γυαλί, ν. Λέσβος, Β. Εύβοια, ν. Σαμοθράκη, κ.ά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ν. Λέσβος, όπου από τις μέχρι σήμερα ερευνητικές εργασίες, εντοπίστηκαν σε μικρά βάθη γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασίες γύρω στους 90°C τα οποία μπορούν να τύχουν αξιοποίησης σε γεωργικές, κτηνοτροφικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι περιοχές που έχουν εντοπιστεί γεωθερμικά πεδία στον Ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 1.2 Επιβεβαιωμένα ελληνικά γεωθερμικά πεδία

Η κατάσταση είναι αρκετά δυσοίωνα, παρά το μεγάλο δυναμικό που υπάρχει στη χώρα. Μετά την επί πολλά χρόνια απραξία στο θέμα αυτό, το 2005 ολοκληρώθηκαν οι διαδικασίες υπογραφής της Σύμβασης Μίσθωσης του Γεωθερμικού Πεδίου της Λέσβου στη ΔΕΗ Α.Ε. και άρχισε η ανόρυξη της πρώτης βαθιάς ερευνητικής γεώτρησης. Η άδεια παραγωγής (χωρίς την άδεια εγκατάστασης) που έχει η ΔΕΗ για το έργο αυτό είναι ισχύος 8 MW.

Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλά γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας, όπου είναι έτοιμες πολλές δεκάδες γεωτρήσεων παραγωγής, με εξαιρετικά μεγάλο δυναμικό. Από αυτό το δυναμικό, μικρό μόνο μέρος (περίπου τα 3/20) χρησιμοποιείται σήμερα για θέρμανση χώρων, λουτροθεραπεία, θέρμανση θερμοκηπίων και ιχθυοκαλλιέργειες. Η εγκατεστημένη θερμική ισχύς της χώρας το 2005 ανήλθε σε 74,8 MWth με κυριότερη εγκατάσταση τα λουτρά της Τραϊανούπολης στο Νομό Έβρου (1,2 MWth). [5]

1.5.2 Νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στη χώρα μας διέπεται από τον νόμο 3175/2003 «Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις» (ΦΕΚ Α' 207/29.08.2003).

Σκοπός του νόμου αυτού είναι η δημιουργία των προϋποθέσεων για την ορθολογική αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού της χώρας. Η αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, ως ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη και εξυπηρετεί το γενικό συμφέρον. Ο Υπουργός Ανάπτυξης, με απόφασή του, μπορεί να ορίζει ότι το δικαίωμα διαχείρισης του γεωθερμικού δυναμικού κατισχύει του δικαιώματος εκμετάλλευσης άλλων μεταλλευτικών ή λατομικών ορυκτών, εφόσον κατά την κρίση του η συγκεκριμένη εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού είναι μεγαλύτερης σημασίας για την εθνική οικονομία (άρθρο 1).

Οι διατάξεις του Μεταλλευτικού Κώδικα και γενικότερα της μεταλλευτικής νομοθεσίας εφαρμόζονται και για το γεωθερμικό δυναμικό, εφόσον δεν γίνεται διαφορετική ρύθμιση με τις διατάξεις του νόμου αυτού. Το δικαίωμα του Δημοσίου για έρευνα και διαχείριση γεωθερμικού δυναμικού εκμισθώνεται ύστερα από πλειοδοτικό διαγωνισμό με γραπτές σφραγισμένες προσφορές. Η διάρκεια της μίσθωσης του

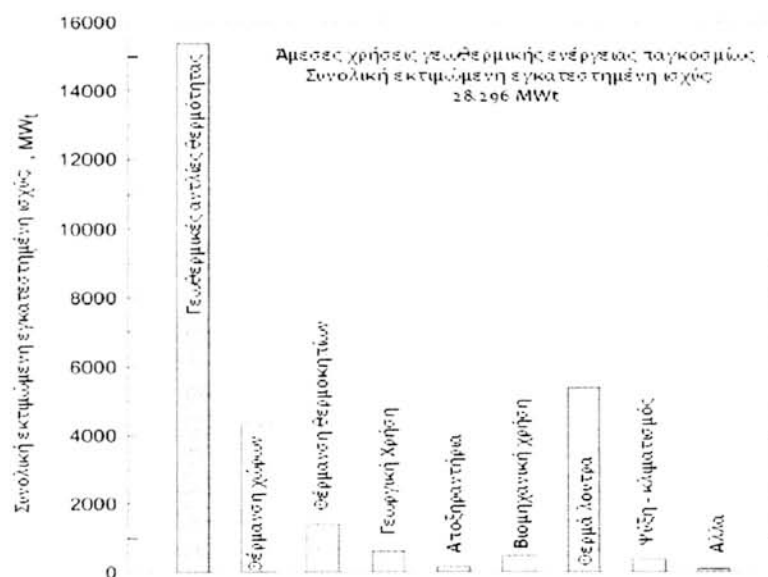
δικαιώματος έρευνας ορίζεται μέχρι πέντε έτη, με δικαίωμα μονομερούς παράτασης από το μισθωτή για δύο επιπλέον έτη. Για χώρους που δεν έχουν ερευνηθεί ή για πιθανά γεωθερμικά πεδία εκμισθώνεται το δικαίωμα έρευνας. Εφόσον μετά τη λήξη της ερευνητικής περιόδου πιστοποιηθεί βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο και υποβληθεί από το μισθωτή ακριβής, επαρκής και συμφέρουσα κατά την κρίση του εκμισθωτή οικονομοτεχνική μελέτη διαχείρισης του πεδίου, παρέχεται στο μισθωτή και το δικαίωμα διαχείρισης.

Στην περίπτωση βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων εκμισθώνεται το δικαίωμα διαχείρισης. Η διαχείριση του γεωθερμικού πεδίου περιλαμβάνει το σύνολο των δραστηριοτήτων, χρήσεων και εφαρμογών που απαιτεί η ολοκληρωμένη ορθολογική αξιοποίηση του για γεωργική, οικιστική, βιοτεχνική, βιομηχανική και ηλεκτροπαραγωγική εκμετάλλευση. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης ρυθμίζονται οι ειδικότεροι όροι και η διαδικασία εκμίσθωσης του δικαιώματος έρευνας και της εν γένει διαχείρισης των γεωθερμικών πεδίων της χώρας. Η εκμίσθωση και διαχείριση των πιθανών και βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων χαμηλής θερμοκρασίας διενεργείται από το Γενικό Γραμματέα Περιφέρειας ενώ η εκμίσθωση και διαχείριση μη ερευνημένων χώρων και των γεωθερμικών πεδίων υψηλής θερμοκρασίας διενεργείται από τον Υπουργό Ανάπτυξης. Ο μισθωτής κάθε γεωθερμικού πεδίου έχει την υποχρέωση μεταξύ άλλων κατάθεσης εγγυητικών επιστολών εκπλήρωσης των όρων της σύμβασης καθώς και την υποχρέωση εκτέλεσης και πιστής εφαρμογής των ερευνητικών προγραμμάτων και οικονομοτεχνικών μελετών, άλλως κηρύσσεται έκπτωτος. Ως προς τα δικαιώματα του, δικαιούται μεταξύ άλλων να διαχειρίζεται στο πλαίσιο της εγκεκριμένης μελέτης και να διαθέτει τα προϊόντα, παραπροϊόντα και υποπροϊόντα του πεδίου. Με απόφαση του Υπουργού Ανάπτυξης θεσπίζεται Κανονισμός Γεωθερμικών Εργασιών, που θα ρυθμίζει τους όρους και τον τρόπο διενέργειας γεωθερμικών εργασιών. Όποιος ερευνά ή διαχειρίζεται ή εκμεταλλεύεται γεωθερμικά πεδία χωρίς να έχει αποκτήσει σχετικό δικαίωμα, τιμωρείται ποινικώς με φυλάκιση τουλάχιστον τριών (3) μηνών και διοικητικούς με πρόστιμο από χίλια ευρώ έως εκατό χιλιάδες ευρώ, ανάλογα με τη βαρύτητα και τη συχνότητα της παραβάσεως. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία και η χορήγηση της σχετικής άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπεται μόνον εφόσον ο υποψήφιος έχει επιτύχει σε διαγωνισμό που διενεργείται

για το σκοπό αυτόν. Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) καταρτίζει κάθε δύο (2) έτη και δημοσιοποιεί κατάλογο υποψηφίων περιοχών που διαθέτουν βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο, οι οποίες κρίνονται κατάλληλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία. Ο Υπουργός Ανάπτυξης, μετά από εισήγηση της Ρ.Α.Ε., εκδίδει προκήρυξη στην οποία περιγράφονται οι όροι και η διαδικασία του διαγωνισμού, οι όροι και οι προϋποθέσεις συμμετοχής, καθώς και τα κριτήρια που θα ισχύουν για την επιλογή των υποψηφίων. Η Ρ.Α.Ε. αξιολογεί τις προτάσεις που θα υποβληθούν και γνωμοδοτεί στον Υπουργό Ανάπτυξης, ο οποίος και εκδίδει τη σχετική άδεια παραγωγής (άρθρο 10). Για τη χορήγηση οποιασδήποτε άδειας ή έγκρισης ή δικαιώματος που προβλέπονται με τις διατάξεις του νόμου αυτού απαιτείται η καταβολή παραβόλου, το ύψος του οποίου καθορίζεται με κοινές αποφάσεις των Υπουργών Οικονομίας και Οικονομικών και Ανάπτυξης. Για την εγκατάσταση, διαχείριση και εκμετάλλευση δικτύου διανομής θερμικής ενέργειας σε τρίτους απαιτείται Άδεια Διανομής Θερμικής Ενέργειας, η οποία χορηγείται από τον Υπουργό Ανάπτυξης μετά από γνώμη της Ρ.Α.Ε.. Η Άδεια Διανομής Θερμικής Ενέργειας χορηγείται μόνο σε νομικά πρόσωπα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής και για συγκεκριμένες θερμικές χρήσεις της θερμικής ενέργειας από τους καταναλωτές. Τα πρόσωπα στα οποία χορηγείται άδεια Διανομής Θερμικής Ενέργειας υποχρεούνται να σχεδιάζουν, να διασφαλίζουν τη χρηματοδότηση, να κατασκευάζουν, να λειτουργούν, να διαχειρίζονται και να συντηρούν το δίκτυο διανομής θερμικής ενέργειας και όλες τις σχετικές εγκαταστάσεις και να παρέχουν τις σχετικές υπηρεσίες. Οι ειδικότεροι όροι της Άδειας Διανομής Θερμικής Ενέργειας πρέπει να διασφαλίζουν ιδίως την εξυπηρέτηση του δημόσιου συμφέροντος και την παροχή υπηρεσιών υψηλών προδιαγραφών στους καταναλωτές. Αν μετά από πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος, που δημοσιοποιεί ο Υπουργός Ανάπτυξης μετά από γνώμη της Ρ.Α.Ε., διαπιστώνεται ότι ενδιαφέρονται για τη λήψη Άδειας Διανομής Θερμικής Ενέργειας περισσότερα πρόσωπα για την ίδια περιοχή, ο Υπουργός Ανάπτυξης μπορεί μετά από γνώμη της Ρ.Α.Ε. να προκηρύσσει διαγωνισμό για τη χορήγηση της άδειας αυτής με σκοπό την πιο συμφέρουσα εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Η Ρ.Α.Ε. αξιολογεί τις προτάσεις που θα υποβληθούν και γνωμοδοτεί στον Υπουργό Ανάπτυξης, ο οποίος και εκδίδει τη σχετική άδεια [6].

1.6 Άμεσες Εφαρμογές της Γεωθερμικής Ενέργειας

Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα οικονομικών δραστηριοτήτων και εφαρμογών ανάλογα με τη θερμοκρασία και την ποιότητα των ρευστών. Μάλιστα μπορούν να διακριθούν σε ηλεκτρικές και άμεσες χρήσεις. Στις άμεσες χρήσεις γίνεται απευθείας εκμετάλλευση της θερμότητας των ρευστών (χωρίς να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια). Σε αυτό το σημείο παραλείπεται η ανάλυση των έμμεσων εφαρμογών (ηλεκτροπαραγωγή) καθώς γίνεται εκτενής αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο. Συνεπώς κάποιες από τις άμεσες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας είναι οι εξής (Σχήμα 1.3):



Σχήμα 1.3 Άμεσες Χρήσεις της Γεωθερμικής Ενέργειας

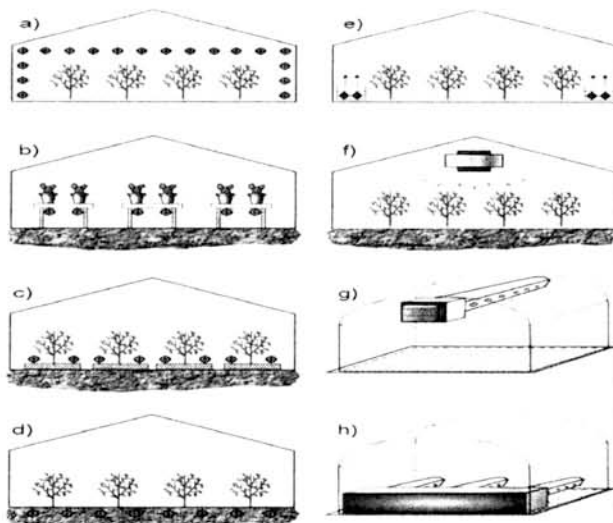
1.6.1 Άμεση Θέρμανση Χώρων

Η άμεση θέρμανση χώρων είναι η παλαιότερη μορφή χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας και η πλέον διαδεδομένη στην Ευρώπη. Περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή ζεστού νερού για οικιακές χρήσεις. Η τεχνολογία που υιοθετείται είναι απλή. Το γεωθερμικό ρευστό από μία ή δύο γεωτρήσεις αποδίδει θερμότητα στο σύστημα θέρμανσης του ενεργειακού χρήστη, είτε άμεσα, είτε μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Γι' αυτή την εφαρμογή απαιτούνται γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 45°C.

Η θέρμανση χώρων από τη γεωθερμία είναι πολύ ανταγωνιστική σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, με κόστος κεφαλαίου 200-1.400 € ανά εγκατεστημένο kW_{th} , ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας 2-3% του κόστους κεφαλαίου, και κόστος παραγόμενης ενέργειας 0,005-0,035 € / kWh_{th} συμπεριλαμβανομένων των αποσβέσεων των κεφαλαίων και του κόστους χρήματος.

1.6.2 Αγροτικές Εφαρμογές - Θερμοκήπια

Τα θερμαινόμενα θερμοκήπια και εδάφη χρησιμοποιούνται για την αύξηση της παραγωγής και την ωρίμανση καλλιεργειών. Οι απαιτούμενες ποσότητες ενέργειας όμως, είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα η γεωθερμία να αποτελεί την ιδανική μορφή ενέργειας για αγροτικές εφαρμογές, λόγω του μικρού κόστους της. Τα θερμοκήπια και η θέρμανση εδαφών απαιτούν την παρουσία γεωθερμικών ρευστών σε θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 30°C. Ο χώρος ενός θερμοκηπίου μπορεί να θερμανθεί με οχτώ τρόπους (Σχήμα 1.4) : α) με εναέριους, επιτοίχιους σωλήνες (Σχήμα 1.5) β) μέσω θερμαντικών πάγκων, γ) βλαστική θέρμανση, δ) με σωλήνες τοποθετημένους μέσα στο χώμα (σε βάθος 5-20 cm), ε) με τοποθέτηση θερμαντικών σωμάτων στα πλευρικά τοιχώματα του θερμοκηπίου, στ) με ψεκασμό της οροφής του θερμοκηπίου με γεωθερμικό υγρό, ζ) με εναλλάκτη αέρα – γεωθερμικού νερού ή νερού λειτουργίας, η) χαμηλά τοποθετημένα αερόθερμα.



Σχήμα 1.4 – Θέρμανση θερμοκηπίου με γεωθερμία



Σχήμα 1.5 – Εναέριοι σωλήνες θέρμανσης θερμοκηπίου

Η θέρμανση θερμοκηπίων από τη γεωθερμία στην Ευρώπη αντιστοιχεί σε 1.072,9 MW_{th}, πάνω από το 75% του συνόλου παγκοσμίως. Η πλειοψηφία των εφαρμογών βρίσκεται στην Ουγγαρία (196,7 MW_{th}), την Τουρκία (192 MW_{th}), τη Γεωργία (165,7 MW_{th}) και τη Ρωσία (160 MW_{th}). Η Ελλάδα βρίσκεται στη 10η θέση των κρατών της Ευρώπης με εγκατεστημένη ισχύ 22,2 MW_{th}. Συνολικά καλλιεργούνται περίπου 230 στρέμματα με κηπευτικά και ανθοκομικά προϊόντα μέσα σε θερμοκήπια, τα οποία είναι καλυμμένα είτε με πλαστικό, είτε με γυαλί.

1.6.3 Υδατοκαλλιέργειες

Η γεωθερμία μπορεί να προσφέρει με οικονομικό τρόπο στη θέρμανση του νερού σε υδατοκαλλιέργειες ψαριών (χέλια, λαβράκια, τσιπούρες, πέστροφες, σολομούς, γατόψαρα κ.α.), θαλάσσιων μαλακόστρακων (π.χ. γαρίδας). Η θέρμανση πραγματοποιείται είτε άμεσα, με την απευθείας εισαγωγή του γεωθερμικού νερού στις δεξαμενές ή λιμνούλες ανάπτυξης, είτε έμμεσα, ύστερα από τη θέρμανση γλυκού ή θαλασσινού νερού. Για την άμεση χρήση του γεωθερμικού νερού απαιτείται να μην υπάρχουν τοξικά συστατικά στο νερό (π.χ. βαρέα μέταλλα, υδρόθειο, αρσενικό κλπ.). Οι υδατοκαλλιέργειες απαιτούν την παρουσία γεωθερμικού ρευστού σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 20°C.

Η εγκατεστημένη ισχύς για υδατοκαλλιέργειες στην Ευρώπη κατά το 2005 ανήλθε σε 230 MW_{th}. Πρώτη σε εγκατεστημένη ισχύ έρχεται η Ιταλία με 91,6 MW_{th} και ακολουθεί η Ισλανδία με 65 MW_{th}. Με διαφορά από τις δύο προηγούμενες έπονται η Γεωργία με ισχύ 25,1 MW_{th}, η Γαλλία με 20,8 MW_{th}, η Ελλάδα με 8,9 MW_{th} (5η στην κατάταξη), η Σερβία με 6,4 MW_{th}, η Σλοβακία με 4,6 MW_{th}, η Ρωσία με 4 MW_{th} και η Ρουμανία με εγκατεστημένη ισχύ 3,1 MW_{th}. Στην Ελλάδα μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας βρίσκονται στο Πόρτο Λάγος και στο Ν. Εράσμιο – Μάγγανα Ξάνθης.

1.6.4 Βιομηχανικές εφαρμογές

Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να είναι οικονομικώς αποδοτική και αξιόπιστη στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες όπως η προπαρασκευή κονσερβοποιημένων τροφών, η

εμφιάλωση ποτών, η λεύκανση λαχανικών, η ξήρανση αγροτικών προϊόντων, τροφίμων, δερμάτων, εξαγωγή CO₂ κλπ. Στις περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι μικρότερη από την απαιτούμενη, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση ρευστών σε διαδικασίες προθέρμανσης ή η ανύψωση της θερμοκρασίας τους με τη χρήση αντλιών θερμότητας ή με συμπληρωματική θέρμανση (με συμβατικά καύσιμα). Απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση των γεωθερμικών ρευστών από υφιστάμενη βιομηχανική μονάδα είναι η γειτνίαση της τελευταίας με το γεωθερμικό πεδίο.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές από τη γεωθερμία στην Ευρώπη αντιστοιχούν σε 120,3 MW_{th}, περίπου το 25% του συνόλου παγκοσμίως. Η πλειοψηφία των εφαρμογών βρίσκεται στην Ισλανδία (60 MW_{th}), τη Ρωσία (25 MW_{th}), τη Ρουμανία (14,1 MW_{th}), την Ιταλία (10,2 MW_{th}) και τη Γεωργία (7,1 MW_{th}). Η Ελλάδα βρίσκεται στη 10^η θέση των κρατών της Ευρώπης, με εγκατεστημένη ισχύ μόλις 0,2 MW_{th}. Πρόκειται για μία μονάδα αφυδάτωσης ντομάτας στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης, η οποία μάλιστα ήταν η πρώτη τέτοια μονάδα στον κόσμο.

1.6.5 Λουτροθεραπεία και ιατρικές εφαρμογές

Μία από τις πλέον δημοφιλείς χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο είναι η λουτροθεραπεία και οι ιατρικές εφαρμογές. Σήμερα, υπάρχει μία πληθώρα από λουτροπόλεις που χρησιμοποιούν το γεωθερμικό νερό είτε για θεραπεία είτε για αναζωογόνηση. Σε ότι αφορά τις θεραπευτικές εφαρμογές, οι δράσεις των γεωθερμικών νερών στον ανθρώπινο οργανισμό διαφέρουν ανάλογα με τη σύσταση τους (θερμοκρασία, μεταλλικά στοιχεία) αλλά και με τον τρόπο χρήσης τους. Οι κυριότερες εφαρμογές είναι: λουτροθεραπεία, ποσιθεραπεία, εισπνοθεραπεία και λασποθεραπεία. Σε ότι αφορά τις εφαρμογές αναζωογόνησης, πρόκειται για λουτροπόλεις με κέντρα υγείας και ομορφιάς, κύριος στόχος των οποίων είναι η ξεκούραση και η ανανέωση του ανθρώπινου οργανισμού.[4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - Δυαδικοί Κύκλοι και Εγκαταστάσεις Παραγωγής Ισχύος

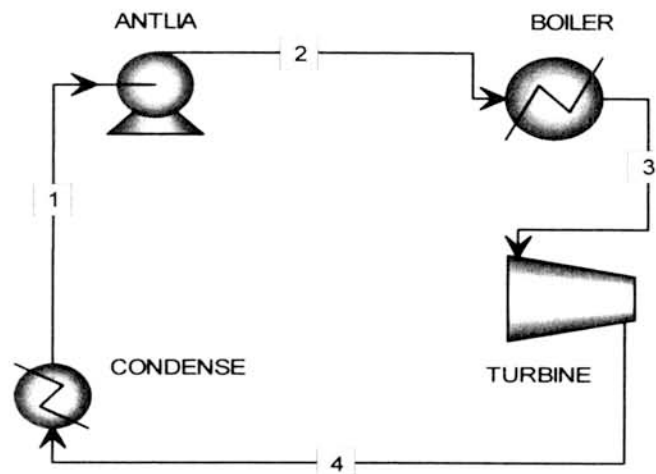
2.1 Θερμικοί Κύκλοι Ισχύος

Οι συσκευές ή τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για να παράγουν μια καθαρή ποσότητα ισχύος συνήθως ονομάζονται μηχανές και οι θερμοδυναμικοί κύκλοι σύμφωνα με τους οποίους αυτές λειτουργούν ονομάζονται κύκλοι παραγωγής ισχύος. Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το ρευστό λειτουργίας (της ουσίας που κυκλοφορεί διαμέσου της κυκλικής συσκευής) που χρησιμοποιείται, σε κύκλους αερίου ή κύκλους ατμού. Στους κύκλους ατμού, το αέριο το οποίο περιστρέφει το στρόβιλο προέρχεται από την ατμοποίηση ενός υγρού. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου κύκλου είναι ο κλασικός κύκλος Rankine και οι παραλλαγές του όπως αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.[7]

2.1.1 Κύκλος Rankine

Ο πιο κοινός κύκλος ισχύος με ατμό είναι ο κύκλος Rankine. Παρόλο που η ανάλυση του μπορεί να βρεθεί σε οποιοδήποτε εγχειρίδιο θερμοδυναμικής, γίνεται μια σύντομη αναφορά. Ο απλός κύκλος Rankine (Σχήμα 2.1) αποτελείται από 4 στάδια. Στο πρώτο στάδιο (κατάσταση 1) το ρευστό λειτουργίας αντλείται σε υψηλή πίεση και εισάγεται στο ατμοποιητή (κατάσταση 2). Στη συνέχεια το ρευστό θερμαίνεται ισοβαρώς μέχρις ότου αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία (κατάσταση 3). Ο ατμός που παράγεται, εκτονώνεται σε στρόβιλο, λαμβάνοντας έργο από αυτόν (κατάσταση 4). Ο εξερχόμενος ατμός συμπυκνώνεται σε συμπυκνωτή (αποβάλλοντας θερμότητα σε ένα ψυκτικό ρευστό) και επιστρέφει στην αρχική κατάσταση (κατάσταση 1). Έχουν εφαρμοσθεί πολλές παραλλαγές του κύκλου Rankine με σκοπό την επίτευξη καλύτερου βαθμού απόδοσης, όπως είναι κύκλοι Rankine με υπερθέρμανση, αναθέρμανση ή συμπαραγωγή. Ο ατμός είναι το συνηθέστερο μέσο λειτουργίας, καθώς λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων, έχει μεγάλη θερμοχωρητικότητα, είναι σταθερό ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον. Οι ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατμού συμπεριλαμβάνουν

ορυκτούς πυρηνικούς πόρους. Ένα μικρό ποσοστό των εγκαταστάσεων παραγωγής ισχύος χρησιμοποιούν γεωθερμικούς και ηλιακούς πόρους.[7]



Σχήμα 2.1 – Απλός κύκλος Rankine

Για το λόγο αυτό έχουν μελετηθεί μετατροπές του συμβατικού κύκλου Rankine έτσι ώστε να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Οι μετατροπές αυτές όπως επίσης και η διαδικασία της επιλογής του κατάλληλου ρευστού λειτουργίας αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

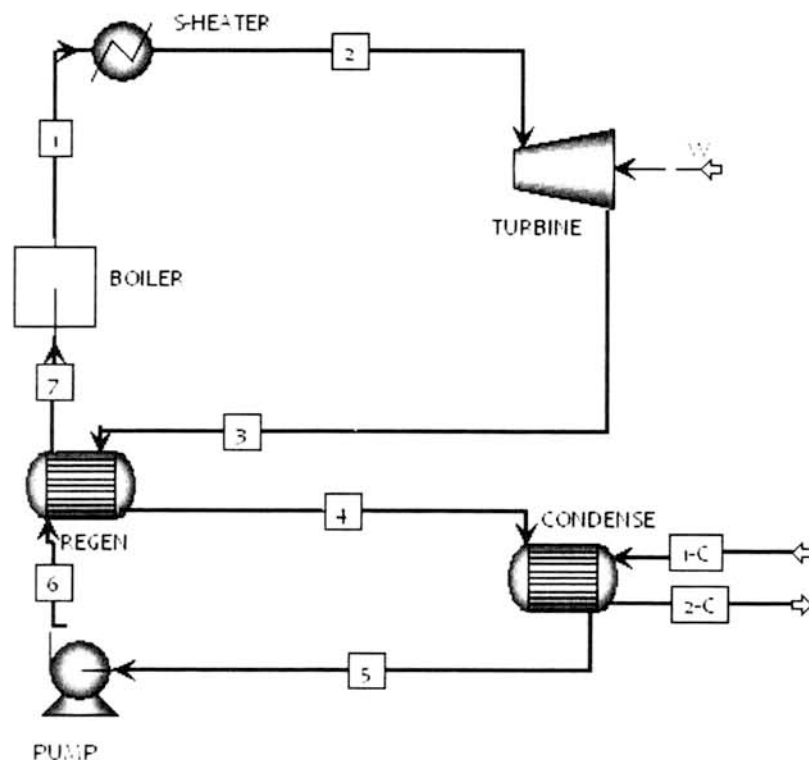
2.1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine

Από τη στιγμή που εγκαταστάθηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής ενέργειας γίνονται συνεχείς προσπάθειες για τη βελτίωση τους σε όλους τους τομείς, αλλά το ρευστό λειτουργίας παρέμενε πάντα το νερό. Ο οργανικός κύκλος Rankine σε αντίθεση με το συμβατικό κύκλο χρησιμοποιεί ως μέσο λειτουργίας οργανικά, υψηλού μοριακού βάρους ρευστά λειτουργώντας σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Όπως αναλύεται στην προηγούμενη παράγραφο το μέσο αυτό επιτρέπει την ανάκτηση θερμότητας από πηγές χαμηλότερης θερμοκρασίας (αποβαλλόμενη θερμότητα, γεωθερμία, ηλιακούς συλλέκτες κτλ). Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρισμό.

Οι οργανικοί κύκλοι Rankine λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών έχουν προταθεί για πληθώρα εφαρμογών όπως:

- Γεωθερμικές μονάδες διαδικού κύκλου
- Ηλιακή θερμότητα
- Εφαρμογές κύκλων χαμηλών θερμοκρασιών (Bottoming cycle applications)

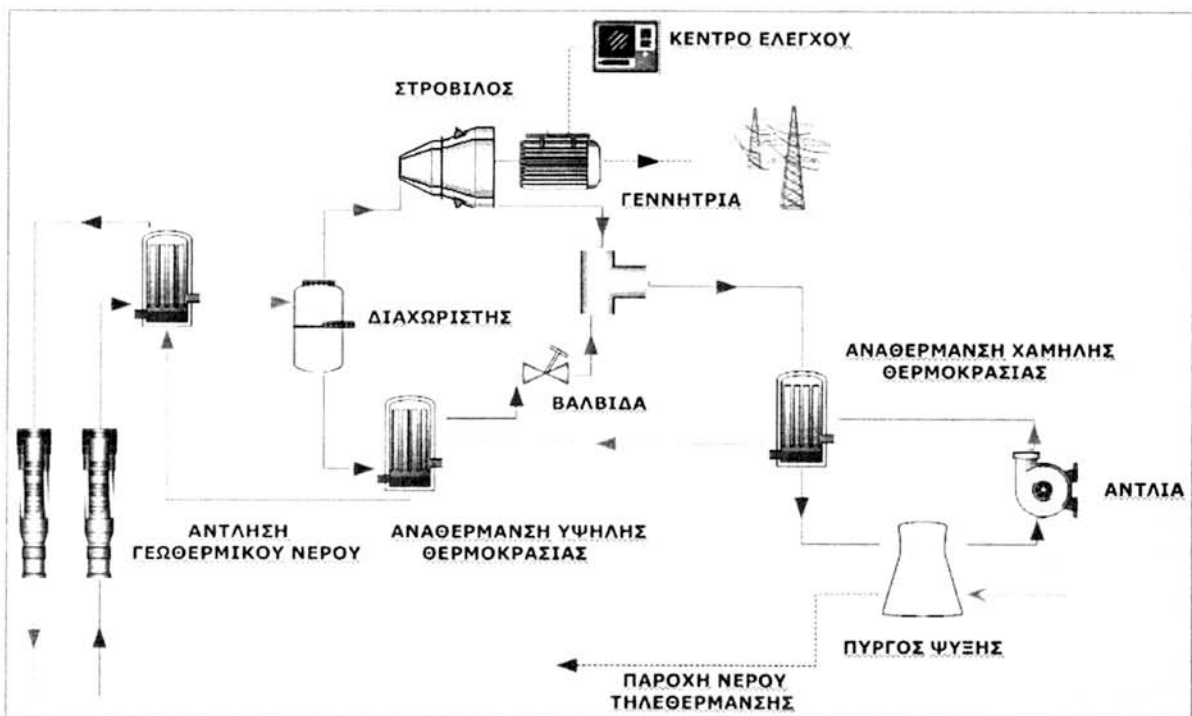
Βελτίωση του οργανικού κύκλου Rankine (όπως και στο συμβατικό κύκλο) επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ή περισσότερων εναλλακτών αναθέρμανσης. Η θερμοκρασία του ρευστού λειτουργίας μετά την εκτόνωση του είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία συμπυκνώσεως για τη δεδομένη πίεση. Η «περιττή» αυτή θερμότητα στο ρευστό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για να προθερμάνει το υγρό πριν την είσοδο στον ατμοποιητή. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας μετά το στρόβιλο και πριν το συμπυκνωτή. Για επιπλέον αύξηση της αποδοτικότητας του κύκλου προτείνεται η τοποθέτηση υπερθερμαντήρα (superheater) μετά τον ατμοποιητή και πριν την είσοδο του ρευστού στο στρόβιλο (Σχήμα 2.2). [7]



Σχήμα 2.2 – Βελτιωμένος Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) με προθέρμανση και υπερθέρμανση

2.1.3 Κύκλος Kalina

Ένας πρόσφατος και ιδιαίτερα ενδιαφέρων διαδικός κύκλος είναι ο κύκλος Kalina. Ο πρώτος κύκλος Kalina, που αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '70 με αρχές του '80 από τον Ρώσο μηχανικό Alexander Kalina, είναι επί της ουσίας ένας «μεταλλαγμένος» κύκλος Rankine που χρησιμοποιεί ως ρευστό λειτουργίας το διαδικό μείγμα αμμωνίας - νερού και μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ισχύ. Τα μείγματα αμμωνίας - νερού εφαρμόζονται μακροχρόνια σε συστήματα ψύξης με απορρόφηση, αλλά ήταν μια καινοτομία του Α. Kalina να το χρησιμοποιήσει σε κύκλους παραγωγής ενέργειας. Ο λόγος των δύο συστατικών ποικίλει για κάθε κομμάτι του κύκλου με σκοπό την επίτευξη καλύτερης αποδοτικότητας. Ένας τυπικός κύκλος Kalina παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 - Κύκλος Kalina

Τα χαρακτηριστικά που κάνουν τον κύκλο αυτόν να ξεχωρίζει συγκριτικά με άλλους διαδικούς κύκλους παραγωγής ισχύος είναι τα εξής:

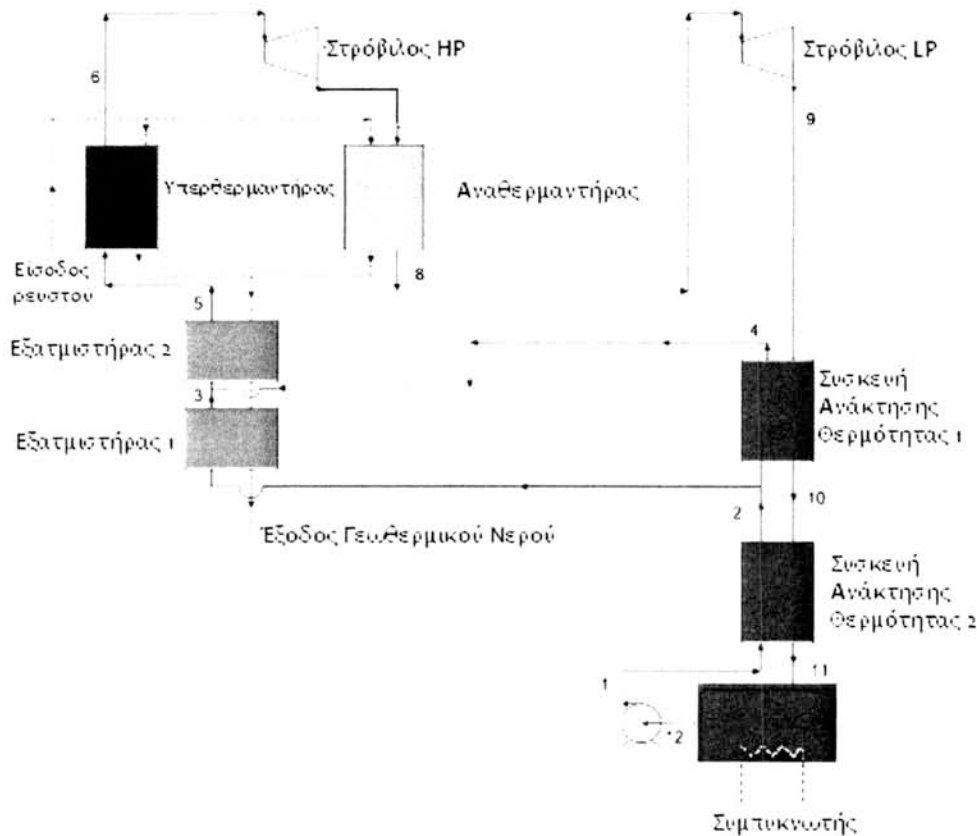
1. Το ρευστό λειτουργίας είναι ένα δυαδικό μείγμα νερού - αμμωνίας
2. Εξάτμιση και συμπύκνωση συμβαίνουν σε ποικίλες θερμοκρασίες
3. Ο κύκλος ενσωματώνει τη δυνατότητα για ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια του στροβίλου
4. Η σύσταση του μείγματος είναι δυνατό να ποικίλει κατά τη διάρκεια του κύκλου.
5. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικοί ατμοστρόβιλοι λόγω του παρόμοιου μοριακού βάρους νερού και αμμωνίας.
6. Αρχικό κόστος κατασκευής μικρότερο σε σχέση με τον κύκλο Rankine. [8-11]

Αρκετές μελέτες παρουσιάζουν ότι ο κύκλος Kalina δείχνει βελτιωμένη θερμοδυναμική συμπεριφορά σε σχέση με τον κύκλο Rankine κυρίως όσον αφορά τους εναλλάκτες θερμότητας μειώνοντας τις μη αντιστρεπτές διεργασίες που συντελούνται [8,10]. Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε τα ρεύματα εξόδου (γεωθερμικού ρευστού - ρευστού λειτουργίας) να έχουν την καλύτερη δυνατή αντιστοιχία με άμεση συνέπεια τη διατήρηση επιπλέον εξέργειας [12]. Σύμφωνα με τους El Sayed και Tribus [10] φαίνεται ότι ο κύκλος Kalina έχει κατά 10-20 % αυξημένο βαθμό απόδοσης σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο σε σχέση με τον απλό κύκλο Rankine όταν λειτουργούν σε ίδιες θερμικές οριακές συνθήκες. Σύμφωνα με τον Marston [13], ο οποίος χρησιμοποίησε κάποια από τα αποτελέσματα των El Sayed, Tribus και Kalina μέσα σε μια παραμετρική ανάλυση, οι βασικές παράμετροι βελτιστοποίησης της απόδοσης ενός κύκλου Kalina είναι η θερμοκρασία στον διαχωριστή και η σύνθεση του μείγματος στην είσοδο του στροβίλου.

Έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές του κύκλου Kalina, βελτιστοποιώντας κάθε φορά διαφορετικές διεργασίες. Ο Kalina Cycle System 12 (KCS-12), που φαίνεται στο Σχήμα 2.4, είναι μια έκδοση του κύκλου Kalina που έχει προταθεί για γεωθερμικές εφαρμογές [14]. Η έκδοση αυτή δεν έχει την καθιερωμένη αποστακτική διάταξη αλλά αντί αυτής συμπεριλαμβάνει ένα πιο πολύπλοκο δίκτυο εναλλακτών ανάκτησης θερμότητας με σκοπό την αύξηση της απόδοσης.

Ο Bliem [15] μελέτησε την εφαρμογή του κύκλου Kalina για μετατροπή ενέργειας σε υδροθερμικά συστήματα. Η τεχνολογία του υπερκρίσιμου κύκλου Rankine με

ανάκτηση θερμότητας μελετήθηκε ότι έχει οριακά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης δευτέρου νόμου σε σχέση με το KCS12.



Σχήμα 2.4 – Το σύστημα κύκλου Kalina 12 (KCS12)

Ο κύκλος Kalina έχει δεχθεί έντονη κριτική για το γεγονός ότι για να προσδώσει το αναμενόμενο από τους υπολογισμούς έργο προϋποθέτει 100% εξάτμιση του ρευστού λειτουργίας σε έναν εναλλάκτη αντιρροής μονού περάσματος. Οι επιφάνειες του εναλλάκτη θα στεγνώσουν σε υψηλά ποσοστά ατμού, οδηγώντας έτσι σε συνολικά χαμηλότερους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και σε μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλαγής.

Η διάταξη του κύκλου

Η βασική έκδοση του κύκλου Kalina (KCS11) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Ο κύκλος είναι κορεσμένος επειδή δεν υπάρχει υπέρθερμος ατμός. Η σύσταση του ρευστού λειτουργίας στον ατμοποιητή είναι διαφορετική από αυτή στο στρόβιλο. Αυτό

επιτυγχάνεται μέσω μια διάταξης απόσταξης η οποία αναφέρεται σε ορισμένες εργασίες και ως θερμική συμπίεση (thermal compression).

Το μείγμα, το οποίο δεν έχει περιέλθει εξ' ολοκλήρου σε αέρια μορφή κατά την έξοδο από τον εναλλάκτη, εισέρχεται σε διαχωριστή φάσεων. Το ρεύμα του αέριου μείγματος (πλούσιο σε αμμωνία) κατά την έξοδο του από το διαχωριστή εισάγεται σε στρόβιλο και εκτονώνεται στην πίεση του συμπυκνωτή παράγοντας ωφέλιμο έργο. Το υγρό μείγμα αμμωνίας – νερού, με τη σειρά του, αμέσως μετά την έξοδο του από το διαχωριστή, εισέρχεται σε συσκευή αναγέννησης θερμότητας υψηλής πίεσης και στη συνέχεια σε βαλβίδα στραγγαλισμού για να επανέλθει η πίεση του στην τιμή της πίεσης του συμπυκνωτή.

Τα δύο ρεύματα αναμειγνύονται σε μείκτη και με την αρχική συγκέντρωση αμμωνίας το νέο μείγμα εισάγεται στη συσκευή αναγέννησης θερμότητας χαμηλής πίεσης πριν εισέλθει στο συμπυκνωτή. Εξ' αιτίας της μείωσης της θερμοκρασίας του μείγματος, μια διεργασία απορρόφησης λαμβάνει χώρα, στην οποία ο πλούσιος σε αμμωνία ατμός απορροφάται απ' το φτωχότερο σε αμμωνία υγρό, λειτουργώντας συμπληρωματικά στη συμπύκνωση. Η κινητική της διεργασίας απορρόφησης καθορίζει το ρυθμό της απορρόφησης, ενώ ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας ελέγχει τη συμπύκνωση.

Τελικά το μείγμα εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού από τον συμπυκνωτή και εισέρχεται σε κυκλοφορητή – αντλία, ο οποίος επαναφέρει την πίεση του ρευστού λειτουργίας στο υψηλό επίπεδο πίεσης του συστήματος. Στη συνέχεια το μείγμα σε υψηλή πλέον πίεση, προθερμαίνεται στις συσκευές αναγέννησης θερμότητας χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας, διαδοχικά. Ο συμπυκνωτής που χρησιμοποιείται είναι συνδεδεμένος με πύργο ψύξης, ο οποίος είναι στις περισσότερες περιπτώσεις υδρόψυκτος.

2.2 Ρευστά λειτουργίας οργανικών και δυαδικών κύκλων

Οι διατάξεις που λειτουργούν σε κύκλο περιέχουν συνήθως ένα ρευστό προς και από το οποίο μεταφέρεται η θερμότητα κατά τη διάρκεια των διεργασιών. Το ρευστό αυτό ονομάζεται ρευστό ή μέσο λειτουργίας (working fluid). Το ρευστό με την πιο εκτεταμένη εφαρμογή σε κύκλους ισχύος είναι το νερό. Το νερό είναι το καλύτερο μέσο λειτουργίας χωρίς όμως να είναι το ιδανικότερο.

Μερικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει το υποψήφιο ρευστό λειτουργίας:

1. Υψηλή τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας και μια ασφαλής μέγιστη πίεση.
2. Χαμηλή θερμοκρασία τριπλού σημείου
3. Επιθυμητές ιδιότητες: μη διαβρωτικό, μη τοξικό, Φτηνό, διαθέσιμο, αδρανές, μη εύφλεκτο
4. Υψηλή ενθαλπία εξάτμισης
5. Όχι πολύ χαμηλή πίεση συμπύκνωσης.

Η σταθερότητα του ρευστού λειτουργίας στις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης εδώ και πολλά χρόνια είναι μια παράμετρος κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία και βιωσιμότητα της. Οι ιδιότητες που αναφέρονται στην τρίτη προϋπόθεση αποτελούν καταλυτικοί παράγοντες για την απλοποίηση του σχεδιασμού και την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και εγκατάστασης.

Δυστυχώς όμως, δεν έχει βρεθεί ακόμα ρευστό που να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις. Το νερό μπορεί να προσεγγίζει το ιδανικό αυτό ρευστό αλλά έχει σοβαρά μειονεκτήματα κυρίως στα τμήματα του κύκλου που αφορούν υψηλές θερμοκρασίες.[7]

2.2.1 Καθαρές Ουσίες ως ρευστά λειτουργίας

Μια ουσία της οποίας η σύσταση παραμένει σταθερή σε όλη της την έκταση ονομάζεται καθαρή. Μια καθαρή ουσία δεν είναι υποχρεωτικό να είναι ένα μεμονωμένο χημικό στοιχείο ή μια χημική ένωση. Είναι δυνατόν ένα μείγμα χημικών στοιχείων ή χημικών ενώσεων όπως και ένα μείγμα δύο ή περισσότερων φάσεων μιας καθαρής ουσίας να είναι επίσης καθαρή ουσία, με την προϋπόθεση ότι όλες οι φάσεις του θα έχουν την ίδια χημική σύσταση.

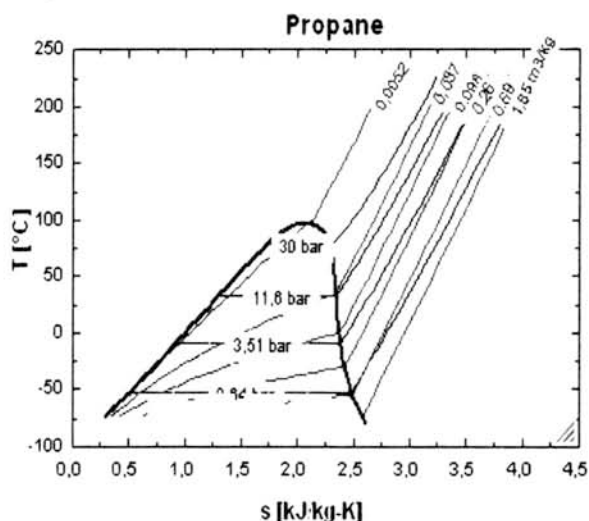
Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται μια λίστα με κάποια από τα υποψήφια ρευστά λειτουργίας και τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες συμπεριλαμβανομένων κορεσμένων υδρογονανθράκων όπως το προπάνιο, το βουτάνιο, το πεντάνιο ή άλλων ουσιών όπως η αμμωνία και το νερό.[9]

Πίνακας 2.1 – Θερμοδυναμικές ιδιότητες ορισμένων υποψήφιων ρευστών λειτουργίας
δυναμικών κύκλων

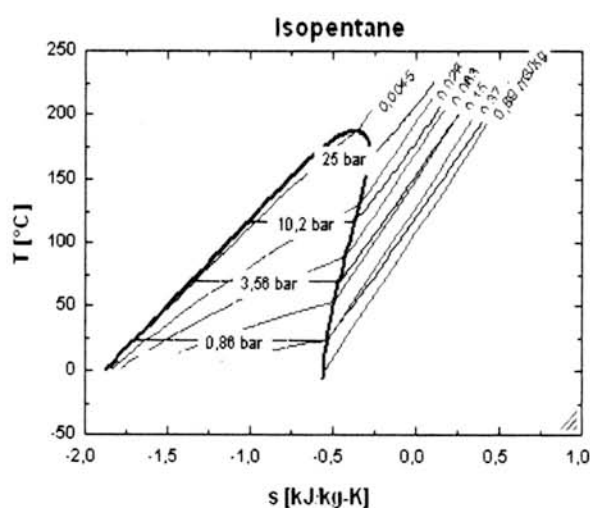
Fluid	Formula	T_c °C	T_c °F	P_c MPa	P_c lbf/in ²	$P_{c@}$ 300 K MPa	$P_{c@}$ 400 K MPa
Propane	C ₃ H ₈	96.95	206.5	4.236	614.4	0.9935	n.a.
i-Butane	i-C ₄ H ₁₀	135.92	276.7	3.685	534.4	0.3727	3.204
n-Butane	C ₄ H ₁₀	150.8	303.4	3.718	539.2	0.2559	2.488
i-Pentane	i-C ₅ H ₁₂	187.8	370.1	3.409	494.4	0.09759	1.238
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	193.9	380.9	3.240	469.9	0.07376	1.036
Ammonia	NH ₃	133.65	272.57	11.627	1686.3	1.061	10.3
Water	H ₂ O	374.14	705.45	22.089	3203.6	0.003536	0.24559

T_c, P_c = κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση

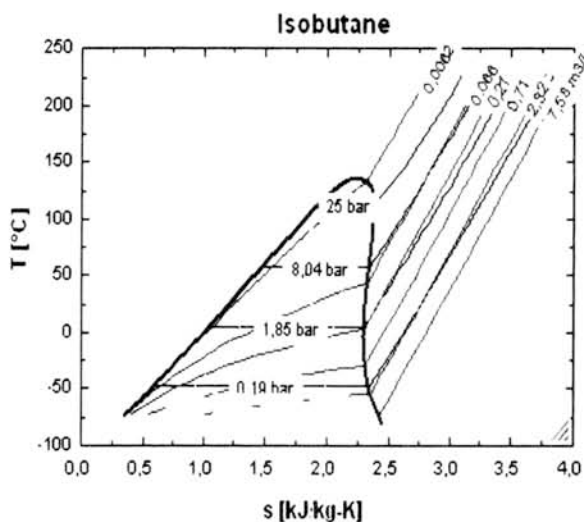
$P_{s@}$ = πίεση κορεσμού για συγκεκριμένη θερμοκρασία



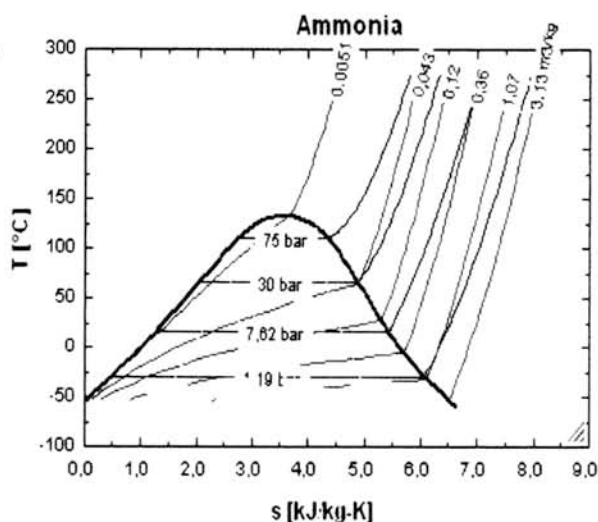
Σχήμα 2.5 – Διάγραμμα T-s προπανίου



Σχήμα 2.6 – Διάγραμμα T-s ισοπεντανίου



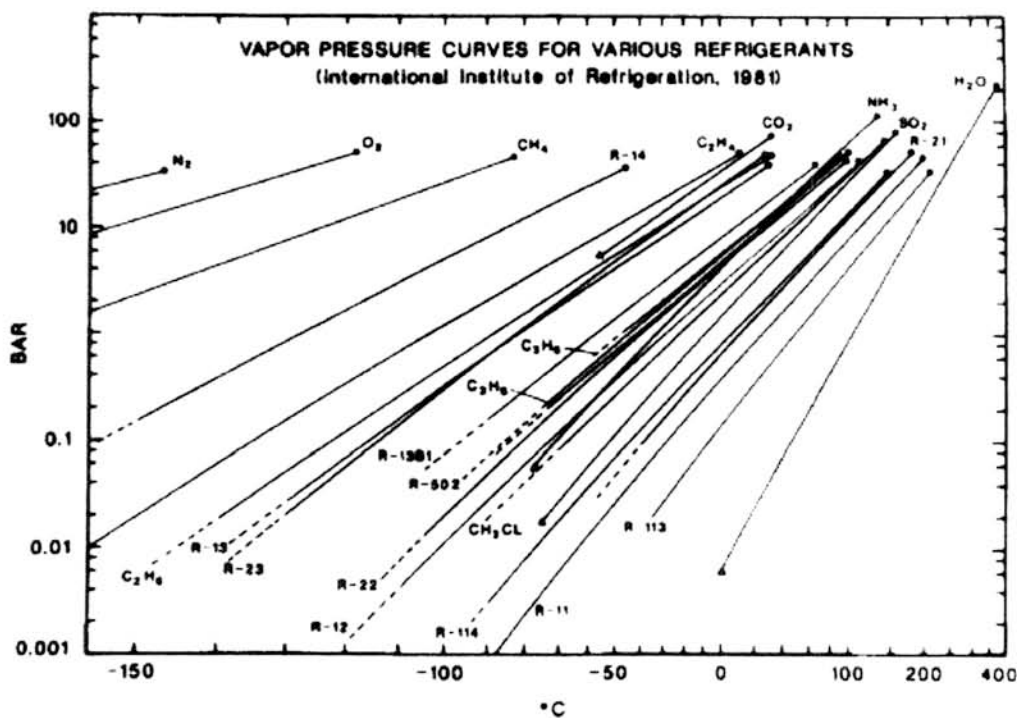
Σχήμα 2.7 – Διάγραμμα T-s ισοβουτανίου



Σχήμα 2.8 – Διάγραμμα T-s Αμμωνιάς

Στα Σχήματα 2.5-2.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) για τέσσερα υποψήφια ρευστά λειτουργίας ενός δυαδικού κύκλου, το προπάνιο, το ισοβουτάνιο, το ισοπεντάνιο και την αμμωνία.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η μελέτη των ιδιοτήτων κάθε προτεινόμενης ουσίας αποτελεί μια διαδικασία ιδιαίτερα σημαντική για την επιλογή του καταλληλότερου ρευστού λειτουργίας σε μια σχεδιαζόμενη εγκατάσταση δυαδικού κύκλου. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζονται οι καμπύλες πίεσης ατμοποίησης για κάποια ψυκτικά ρευστά λειτουργίας.



Σχήμα 2.9 – Καμπύλες πίεσης ατμοποίησης ψυκτικών συστατικών

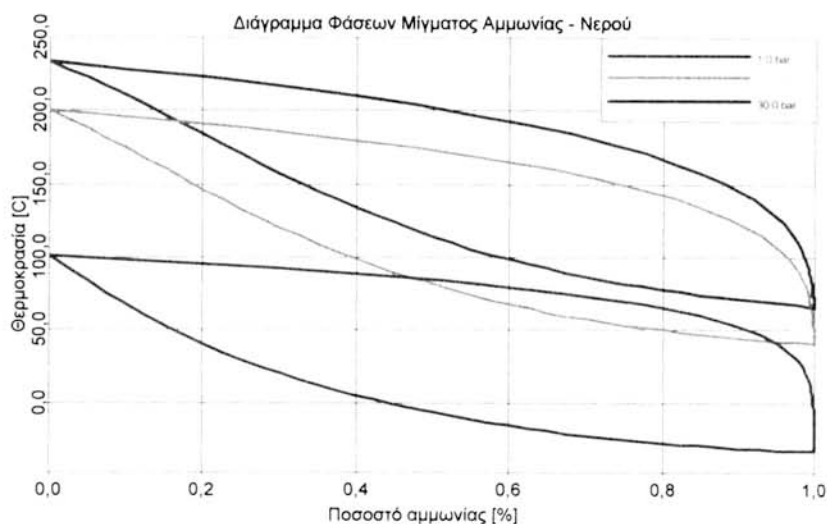
2.2.2 Μείγματα ως ρευστά λειτουργίας

Σε έναν οργανικό κύκλο Rankine με ρευστό λειτουργίας καθαρή ουσία, ο βρασμός λαμβάνει χώρα στην αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού, ανάλογα με την πίεση. Το αποτέλεσμα είναι μια αναντιστοιχία των θερμοκρασιακών μεταβολών στον εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ του ρεύματος θερμού ρευστού και του ρεύματος του μέσου λειτουργίας. Αυτό έχει ως συνέπεια τη καταστροφή ενός σημαντικού ποσού εξέργειας κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής. Τρόποι αντιμετώπισης του

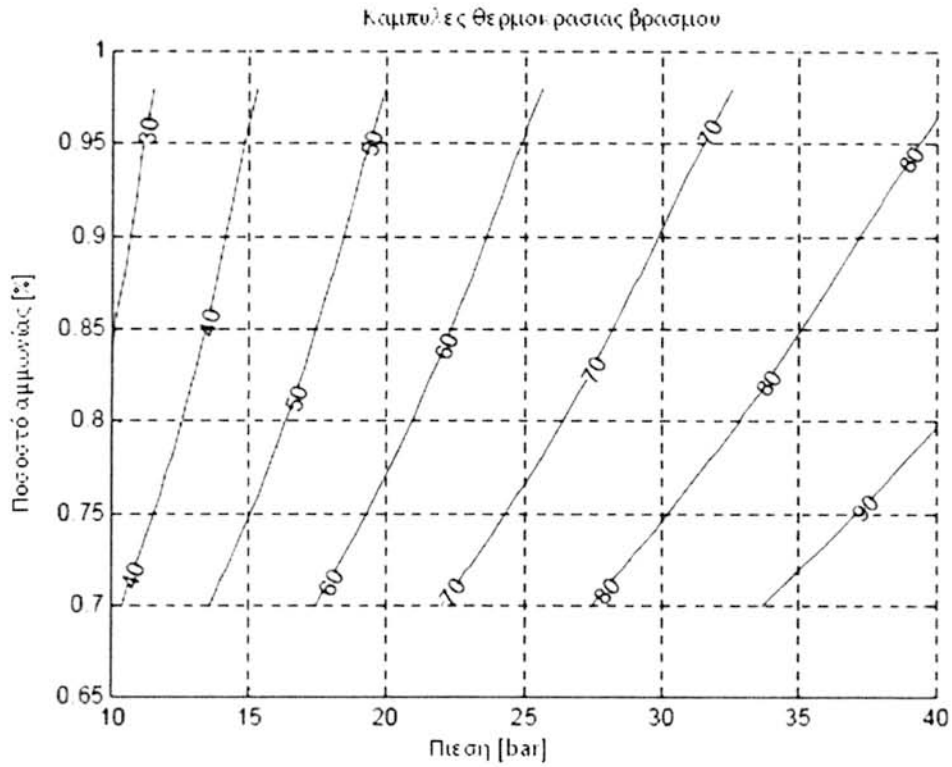
συγκεκριμένου προβλήματος είναι: α) η διαδικασία του βρασμού να γίνεται σε διαφορετικές πιέσεις και β) χρησιμοποίηση μείγματος ως ρευστό λειτουργίας. Καθώς το μείγμα φτάνει σε θερμοκρασία βρασμού, η μεταβαλλόμενη σύσταση της υγρής φάσης το οδηγεί σε εξάτμιση. Εξάτμιση και συμπύκνωση συμβαίνουν ταυτόχρονα ισοβαρώς αλλά σε μεταβαλλόμενη θερμοκρασία. Το εύρος των θερμοκρασιών εξαρτάται από τη σύσταση του ρευστού. Για παράδειγμα, στο μείγμα αμμωνίας-νερού σε υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας οι θερμοκρασίες είναι γενικά χαμηλότερες (Σχήμα 2.10). Η χρησιμοποίηση μείγματος ως ρευστού λειτουργίας προσθέτει έναν ακόμα βαθμό ελευθερίας, το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο της πίεσης αλλάζοντας τη σύνθεση του μείγματος. Παραδείγματος χάριν, για δεδομένες συνθήκες συμπύκνωσης, η πίεση στο συμπυκνωτή είναι δυνατό να μειωθεί αυξάνοντας τη συγκέντρωση της αμμωνίας οδηγώντας όμως το βραστήρα να λειτουργήσει σε υψηλότερη πίεση.

Σε πλούσια μείγματα αμμωνίας, το σύστημα δείχνει να έχει μεγάλη ευαισθησία ανάμεσα στην πίεση και τη σύσταση του μείγματος, δηλαδή μικρές αλλαγές της συγκέντρωσης δημιουργούν απότομες αυξήσεις στην πίεση. Η απαίτηση για μείγματα πλούσια σε αμμωνία κατά την εξάτμιση και εκτόνωση και χαμηλής συγκέντρωσης σε αμμωνία κατά τη συμπύκνωση ικανοποιείται απόλυτα από τις διεργασίες του διαχωρισμού και της μείξης.[16]

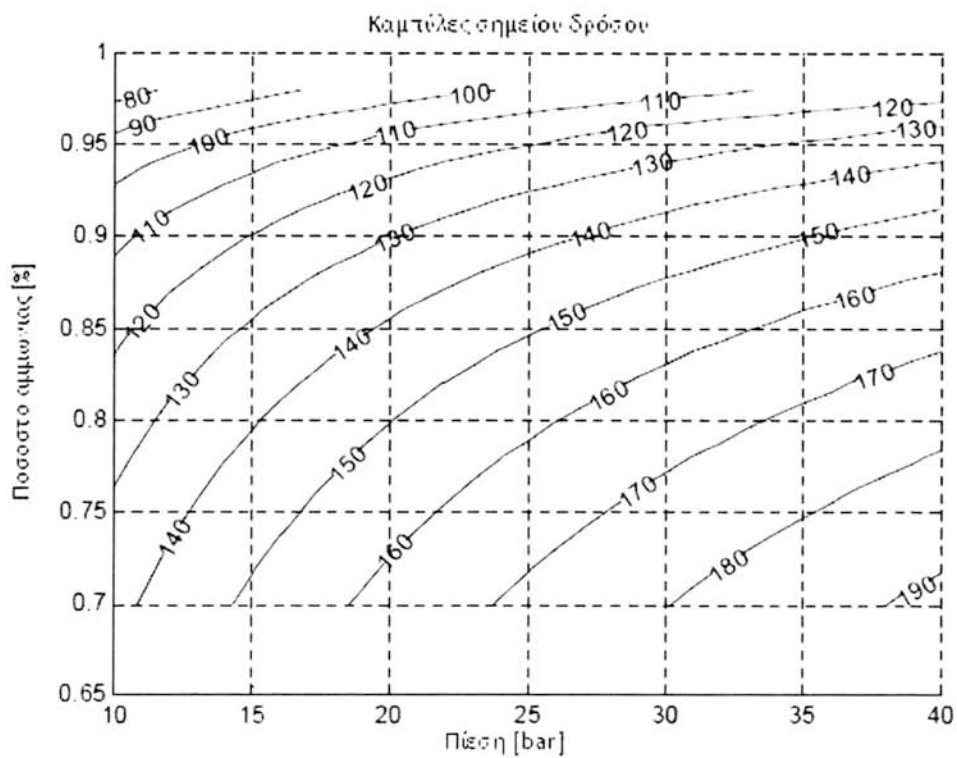
Στα Σχήματα 2.11 και 2.12 παρουσιάζονται οι καμπύλες σημείου φουσαλίδας και σημείου δρόσου για το δυαδικό μείγμα αμμωνίας - νερού για τις υπό μελέτη περιεκτικότητες όπως υπολογίστηκαν από τον Valdimarsson.[17]



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα φάσεων μίγματος αμμωνίας ατμού



Σχήμα 2.11 – Καμπύλες σημείου φυσαλίδας για το μίγμα αμμωνίας- νερού



Σχήμα 2.12 – Καμπύλες σημείου δρόσου για το μίγμα αμμωνίας- νερού

2.3 Βαθμοί απόδοσης και αποδοτικότητα

Η απόδοση (efficiency) είναι ο λόγος της εισόδου προς την έξοδο, και επί της ουσίας μια μέτρηση της επίδοσης μιας διεργασίας. Υπάρχουν πολλές δυνατότητες ορισμού της εισόδου και της εξόδου, αλλά ο συνηθέστερος ορισμός είναι αυτός της θερμικής απόδοσης της μονάδας (thermal efficiency). Η αποτελεσματικότητα (effectiveness) είναι ο λόγος της μεταφερόμενης θερμότητας στην εγκατάσταση προς τη διαθέσιμη θερμότητα που λαμβάνει η εγκατάσταση από το γεωθερμικό πεδίο.[7]

2.3.1 Βαθμός απόδοσης σύμφωνα με τον πρώτο νόμο (θερμική απόδοση μονάδας)

Το μέτρο του βαθμού απόδοσης είναι απλά ο λόγος της ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας προς την προσφερόμενη ενέργεια.

$$\eta_I = \frac{W_{net}}{Q_h} \quad (2.1)$$

όπου W_{net} ορίζεται η καθαρή παραγόμενη ισχύς του κύκλου και Q_h η προδιδόμενη θερμότητα στον κύκλο

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος ασχολείται με την ποσότητα της ενέργειας και υποστηρίζει ότι η ενέργεια ούτε δημιουργείται, ούτε καταστρέφεται. Ο βαθμός αυτός είναι ένα αναγκαίο εργαλείο για τον υπολογισμό των ενεργειακών ισοζυγίων. [1]

Οι Rosen και Le [18] μελέτησαν τις εκφράσεις απόδοσης σε διεργασίες συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος και προτείνουν τη χρήση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης καθώς ο πρώτος νόμος αποτυγχάνει να εκτιμήσει την ποιότητα της ενέργειας και αυτό συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης του πρώτου νόμου δεν περιλαμβάνει τις απώλειες από τη μη αντιστρεπτότητα των μεταβολών του συστήματος.

2.3.2 Εξεργειακός βαθμός απόδοσης

Σε αυτό το σημείο έρχεται να προστεθεί η έννοια της εξέργειας (ή διαθεσιμότητας), η οποία αποτελεί το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα για δεδομένες συνθήκες αναφοράς. Δημιουργείται αυτομάτως η ανάγκη κατασκευής ενός εργαλείου μέτρησης του ποσοστού της εισερχόμενης στο σύστημα εξέργειας που εξέρχεται από το σύστημα ως ωφέλιμο έργο, καθώς η εναπομένουσα εξέργεια χάνεται λόγω της αναντιστρεπτότητας των διεργασιών. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται εξεργειακός βαθμός απόδοσης και ισούται με:

$$\eta_{exergy} = \frac{\sum E_{out}}{\sum E_{in}} \quad (2.2)$$

Όπου $\sum E_{out}$ και $\sum E_{in}$ είναι το αθροίσματα της εξερχόμενης και εισερχόμενης εξέργειας, αντίστοιχα, στο σύστημα.

Αναφερόμενοι σε δυαδικό κύκλο γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ισχύος, ο παραπάνω ορισμός δεν είναι ο καταλληλότερος για τη σωστή περιγραφή των απωλειών, καθώς το γεωθερμικό νερό (brine) επιστρέφει στην υπόγεια δεξαμενή μεταφέροντας εξέργεια που δεν έχει εκμεταλλευτεί από την εγκατάσταση. Συνεπώς, ένας ακριβέστερος ορισμός του εξεργειακού βαθμού απόδοσης θα ήταν:

$$\eta_{exergy_{II}} = \frac{\sum E_{out}}{\sum E_{hs}} \quad (2.3)$$

όπου E_{hs} η εξέργεια της πηγής θερμότητας (εισερχόμενο ρεύμα γεωθερμικού ρευστού)

2.4.3 Βαθμός απόδοσης σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο

Η σύγχρονη προσέγγιση στη μέτρηση της απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων είναι η εφαρμογή του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου ως βάση αξιολόγησης. Για το σκοπό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως η έννοια του διαθέσιμου έργου ή ενέργειας. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν ένα άριστο παράδειγμα εφαρμογής της αποδοτικότητας αξιοποίησης του 2^{ου} νόμου. Δεδομένου ότι οι

γεωθερμικοί σταθμοί δεν λειτουργούν υπό έναν κύκλο αλλά ως μια σειρά διεργασιών, δεν εφαρμόζεται η θερμική απόδοση του κύκλου η , των συμβατικών εγκαταστάσεων. Η μόνη περίπτωση όπου έχει νόημα η εφαρμογή της θερμικής απόδοσης του κύκλου η , στις γεωθερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής είναι οι διαδικοί σταθμοί. Όμως, και τότε η θερμική απόδοση πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την αξιολόγηση του κλειστού κύκλου που περιλαμβάνει το δευτερεύων ρευστό, και όχι της συνολικής λειτουργίας που περιλαμβάνει τη ροή του γεωθερμικού ρευστού από τα φρέατα παραγωγής μέσα από την εγκατάσταση και, τελικά, πίσω στο σύστημα απόρριψης.

Ο βαθμός απόδοσης σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο ορίζεται ως ο λόγος της απόδοσης του κύκλου προς το βαθμό απόδοσης του αντιστρεπτού κύκλου ανάμεσα σε ίδιες θερμοδυναμικές συνθήκες

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} \quad (2.4)$$

Η αποτελεσματικότητα παίζει καθοριστικό ρόλο στο πιθανό μέγεθος της εγκατάστασης.

Ο βαθμός απόδοσης του αντιστρεπτού κύκλου είναι ο βαθμός απόδοσης σύμφωνα με τον πρώτο νόμο, ενώ ο αντιστρεπτός κύκλος για τις μελετώμενες συνθήκες θεωρείται ο κύκλος Carnot. Παρατηρείται συχνά το ερώτημα αν ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης και ο βαθμός απόδοσης σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο είναι σε κάθε περίπτωση πανομοιότυποι ή ακόμα και ταυτόσημοι. Δίνεται ένα παράδειγμα για να αποσαφηνιστεί το γεγονός ότι παρόλο που πολλές φορές οι δυο αυτοί βαθμοί ταυτίζονται, δεν αποτελεί γενικό κανόνα. Σε ένα γεωθερμικό σύστημα :

$$\eta_{exergy} = \frac{W_{net}}{Q_h \left(1 - \frac{T_0}{T_h}\right)} \quad \eta_{II} = \frac{W_{net}}{Q_h \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (2.5), (2.6)$$

όπου:

T_0 είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ή η σταθερή θερμοκρασία εδάφους και

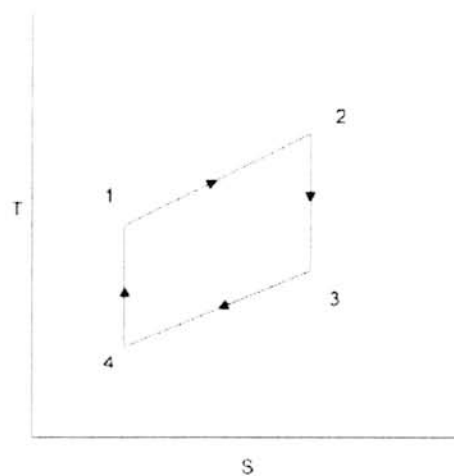
T_c η θερμοκρασία της 'κρύας' δεξαμενής επιστροφής του γεωθερμικού νερού.

Είναι προφανές όμως ότι στην ειδική περίπτωση που T_0 και T_c συμπίπτουν τότε μόνον οι δυο βαθμοί απόδοσης ταυτίζονται.

2.3.4 Ιδανικός Βαθμός Απόδοσης

Σε αντίθεση με τον κύκλο Carnot, ο κύκλος Lorenz είναι ο κατάλληλος «αντιστρεπτός» κύκλος για χρήση σε μεταβλητή είσοδο θερμοκρασίας και επανέγχυση. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα T-s του κύκλου ο οποίος αποτελείται από τέσσερις διεργασίες όπως ο κύκλος Carnot, που για θερμική μηχανή είναι: ισεντροπική συμπίεση, θέρμανση με σταθερή θερμοχωρητικότητα αναφορικά με την πηγή θερμότητας, ισεντροπική εκτόνωση και ψύξη σε σταθερή θερμοχωρητικότητα. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου δίνεται από την εξίσωση (2.7):

$$\eta_{\text{Lorenz}} = 1 - \frac{Q_{34}}{Q_{12}} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.12 - Διάγραμμα T-s του κύκλου Lorenz

Διατυπώνοντας την παραπάνω εξίσωση με όρους πηγής θερμότητας και απόρριψης θερμότητας η απόδοση μπορεί να δοθεί ως:

$$\eta_{\text{Lorenz}} = 1 - \frac{m_{hr} \cdot (h_{hr,out} - h_{hr,in})}{m_{hs} \cdot (h_{hs,in} - h_{hs,out})} \quad (2.8)$$

Γνωρίζοντας ότι οι διεργασίες 4-1 και 2-3 είναι ισεντροπικές η παραπάνω εξίσωση διατυπώνεται σε όρους ειδικών εντροπιών της θερμικής πηγής και της απόρριψης θερμότητας και ανάγεται στην εξίσωση (2.9):

$$\eta_{\text{Lorenz}} = 1 - \frac{m_{hr} \cdot (h_{hr,out} - h_{hr,in}) / (s_{hr,out} - s_{hr,in})}{(h_{hs,in} - h_{hs,out}) / (s_{hs,in} - s_{hs,out})} \quad (2.9)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να οριστεί η έννοια της εντροπικής μέσης θερμοκρασίας με τη μορφή της εξίσωσης (2.10):

$$\bar{T}_s = \frac{(h_2 - h_1)}{(s_2 - s_1)} = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (2.10)$$

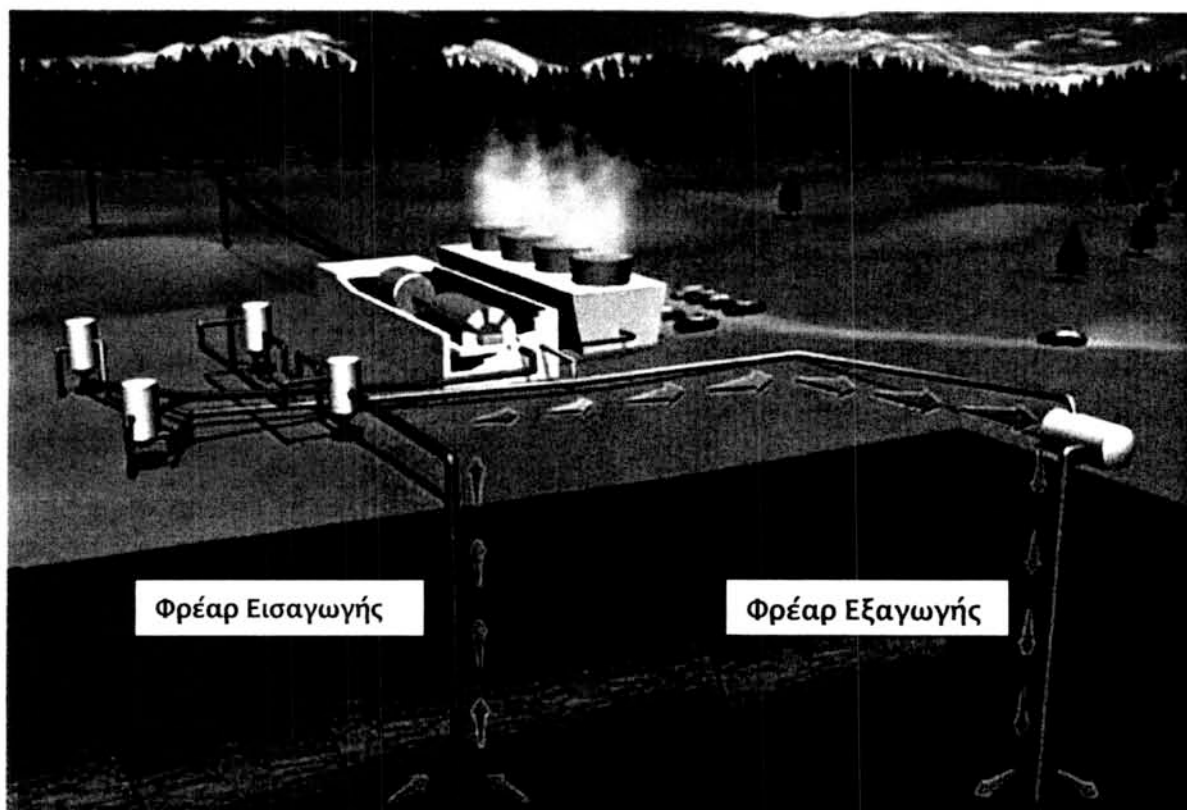
Συνεπώς για ρευστά με σταθερή ειδική θερμότητα ο βαθμός απόδοσης Lorentz γράφεται ως:

$$\eta_{\text{Lorenz}} = 1 - \frac{(T_{hr,out} - T_{hr,in}) / \ln(T_{hr,out} / T_{hr,in})}{(T_{hs,in} - T_{hs,out}) / \ln(T_{hs,in} / T_{hs,out})} \quad (2.11)$$

Εύκολα παρατηρείται από την εξίσωση (2.11) ότι σε περίπτωση που η διεργασία μεταφοράς θερμότητας ήταν ισοθερμική, όπως στον κύκλο Carnot, οι εντροπικές μέσες θερμοκρασίες θα αναχθούν στη θερμοκρασία του γεωθερμικού ταμιευτήρα, καταλήγοντας εν τέλει στην απόδοση του κύκλου Carnot.

2.4 Γεωθερμικές μονάδες παραγωγής ισχύος

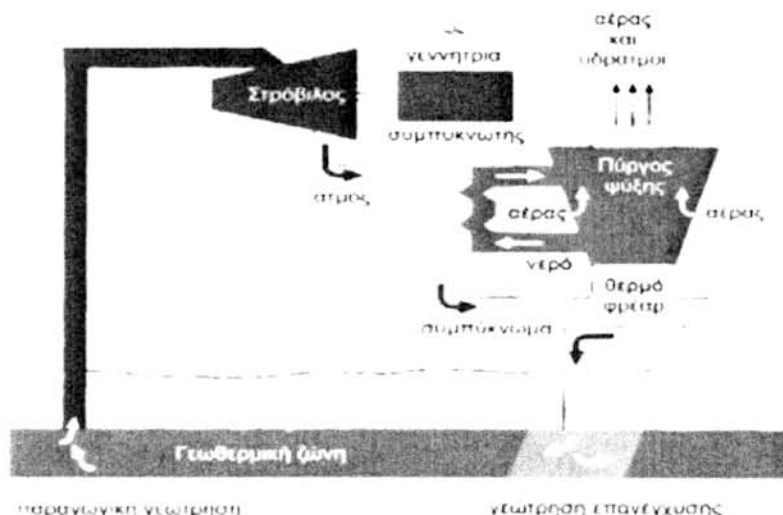
Οι γεωθερμικές μονάδες ισχύος (Σχήμα 2.13) χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: στις μονάδες ξηρού (ή άμεσου) ατμού, στις μονάδες στιγμιαίου ρεύματος ατμού, στις μονάδες δυαδικού κύκλου και στις υβριδικές μονάδες. Όπως αναλύεται παρακάτω, το κυριότερο κριτήριο διαχωρισμού είναι το διαθέσιμο γεωθερμικό πεδίο. Οι κύκλοι ξηρού και στιγμιαίου ρεύματος ατμού χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις ύπαρξης γεωθερμικών ρευστών υψηλής ενθαλπίας και οι δυαδικοί κύκλοι για χαμηλής. Σε περιπτώσεις που οι συνθήκες το απαιτούν εγκαθίστανται υβριδικές μονάδες οι οποίες μελετούνται παρακάτω.



Σχήμα 2.13 – Γεωθερμική μονάδα παραγωγής ισχύος

2.4.1 Γεωθερμικές μονάδες ξηρού ή άμεσου ατμού (Dry steam Geothermal plants)

Αυτός ήταν ο πρώτος τύπος γεωθερμικής εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής (Larderello - Ιταλία, 1904). Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν τον ατμό όπως φθάνει από τις υδροθερμικές γεωτρήσεις παραγωγής (χωρίς την ανάγκη οποιουδήποτε εξοπλισμού διαχωρισμού και έγχυσης του γεωθερμικού ρευστού), τον οποίο κατευθύνουν στη μονάδα στροβίλου/γεννήτριας για να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς. Ο ατμός έπειτα συμπυκνώνεται και επιστρέφει στο γεωθερμικό ταμειυτήρα μέσω ενός φρέατος επανέγχυσης (Σχήμα 2.14). Δυστυχώς, οι πηγές ατμού είναι οι σπανιότερες απ' όλες τις γεωθερμικές πηγές και υπάρχουν μόνο σε λίγες περιοχές στον κόσμο. Προφανώς, οι σταθμοί άμεσου ατμού δεν είναι εφαρμόσιμοι σε πηγές χαμηλής θερμοκρασίας.[1, 3]



Σχήμα 2.14 – Γεωθερμική μονάδα ξηρού ατμού

2.4.2 Γεωθερμικές μονάδες στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου (Flash Steam Geothermal Plants)

Οι γεωθερμικές μονάδες παραγωγής στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ενιαίου ρεύματος ατμού (Simple Flash Steam)
- Διπλού ρεύματος ατμού (Dual Flash Steam)

Οι γεωθερμικές μονάδες στιγμιαίας ατμοποίησης εργαζόμενου μέσου αποτέλεσαν το στυλοβάτη της βιομηχανίας παραγωγής ισχύος από γεωθερμία για πολλά χρόνια. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι άνω των 175°C και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για παραγωγή ενέργειας. Σε αυτές τις θερμοκρασίες το ρευστό αποτελείται από ένα μείγμα ατμού και υγρού. Ο ατμός χωρίζεται από το υπόλοιπο ρευστό και οδηγείται σε στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το μείγμα χωρίζεται σε διαχωριστή φάσεων με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στον κύκλο Kalina με τη διαφορά ότι το μείγμα δεν αποτελείται από δύο συστατικά, αλλά από δύο φάσεις του ίδιου συστατικού.

Οι γεωθερμικές μονάδες ισχύος διπλού ρεύματος ατμού αποτελούν μια βελτίωση των αντίστοιχων μονάδων ενιαίου ρεύματος στο γεγονός ότι μπορούν να παράγουν 15-25% περισσότερη ισχύ για τις ίδιες συνθήκες του γεωθερμικού ρευστού. Από την άλλη πλευρά, η εγκατάσταση είναι πιο περίπλοκη, πιο δαπανηρή και προϋποθέτει

περισσότερη συντήρηση. Πολλά από τα χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών είναι κοινά. Η ριζοσπαστική αλλαγή οφείλεται στην προσθήκη δεύτερου ρεύματος που εξέρχεται από το διαχωριστή με σκοπό τη δημιουργία επιπλέον ατμού σε χαμηλότερη πίεση απ αυτόν που δημιουργήθηκε κατά την πρώτη φάση.[9,1,3]

2.4.3 Γεωθερμικές μονάδες δυαδικού κύκλου (Binary cycle geothermal plants)

Οι γεωθερμικές μονάδες δυαδικού κύκλου (Σχήμα 2.15) αποτελούν, από θερμοδυναμικής άποψης, την πλησιέστερη εφαρμογή στις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας διότι το ρευστό λειτουργίας κυκλοφορεί σε ένα κλειστό κύκλο. Όπως αναφέρθηκε και στις παραπάνω παραγράφους το ρευστό λειτουργίας που έχει επιλεχθεί για τις κατάλληλες θερμοδυναμικές του ιδιότητες, παραλαμβάνει θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό, εξατμίζεται, εκτονώνεται, συμπυκνώνεται και ολοκληρώνει τον κύκλο με τη βοήθεια αντλίας.

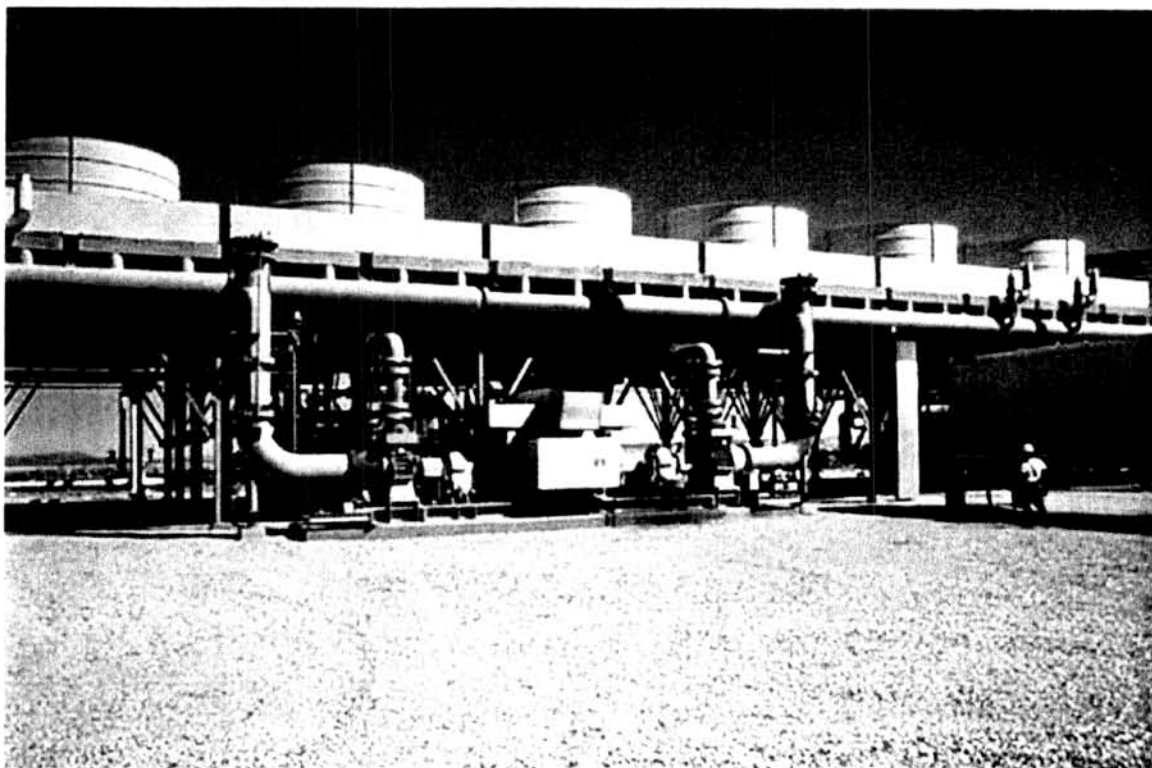
Αρχικά αυτό το είδος γεωθερμικών μονάδων δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένο, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό σε σχέση με τις προαναφερθείσες κατηγορίες, αλλά με την πάροδο των χρόνων έχει κερδίσει έδαφος. Ενδεικτικά, σε 162 μονάδες σε λειτουργία το 2007, παράχθηκαν 373 MW ισχύος αποτελώντας το 32% της ολικής παραγωγής ενέργειας από γεωθερμικές εγκαταστάσεις, αλλά μόλις το 4% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των δυαδικών γεωθερμικών εγκαταστάσεων σε σχέση με τις άλλες γεωθερμικές εγκαταστάσεις είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν γεωθερμικά πεδία χαμηλής και μέσης ενθαλπίας (έως 150 °C).

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.3, η επιλογή του κατάλληλου ρευστού λειτουργίας είναι ένα θέμα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής από το σχεδιαστή της εκάστοτε μονάδας δυαδικού - οργανικού κύκλου. Παλαιότερα, τα ρευστά ισχύος στις γεωθερμικές μονάδες δυαδικού κύκλου ήταν ψυκτικά ρευστά CFC. Στις σύγχρονες μονάδες χρησιμοποιούνται ψυκτικά ρευστά τύπου HFC (υδρογονάνθρακες - ισοβουτάνιο, πεντάνιο, κλπ.), όπου το συγκεκριμένο ρευστό επιλέγεται ώστε να είναι συμβατό με τη θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής. Οι σταθμοί δυαδικού κύκλου είναι οι πλέον κατάλληλοι για τις γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας.

Τελευταία, διατίθεται στο εμπόριο ετοιμοπαράδοτος εξοπλισμός δυαδικού κύκλου σε μονάδες από 200 έως 1.000 kW

Όπως και στην περίπτωση όπου το ρευστό λειτουργίας είναι καθαρή ουσία, η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού και του ταμιευτήρα επιστροφής καθορίζουν το άνω και κάτω θερμικό όριο της διεργασίας, αντίστοιχα.[9,1]



Σχήμα 2.15 - Γεωθερμικές μονάδες δυαδικού κύκλου

2.4.4 Εγκαταστάσεις κύκλου Kalina

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, ο κύκλος Kalina τράβηξε την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας των μηχανικών, αλλά όλη αυτή η έρευνα είχε ως αντίκτυπο να κατασκευαστούν πολύ λίγες εγκαταστάσεις. Η πρώτη επίδειξη του κύκλου σε μια εγκατάσταση έγινε στο Κέντρο Ενεργειακής Τεχνολογίας και Μηχανικής της Καλιφόρνια όπου κατασκευάστηκε μια εγκατάσταση επίδειξης ισχύος 3 MW. Η λειτουργία της ξεκίνησε το 1992 ενώ δοκιμές λάμβαναν χώρα μέχρι και το τέλος του 1996.

Πίνακας 2.2 – Εφαρμογές κύκλου Kalina Παγκοσμίως

Όνομα Εγκατάστασης	Χώρα	Θερμική Πηγή	Ηλεκτρική Ισχύς	Έτος εκκίνησης λειτουργίας
Canoga Park	ΗΠΑ	515°C Αποβαλλόμενη Θερμότητα - Ηλιακή	3 + 6,5MW	1992-1996
Fukuoka City	Ιαπωνία	Αποβαλλόμενη Θερμότητα	5 MW	1999
Husavik	Ισλανδία	Γεωθερμία (124°C)	2 MW	2000
Unterhaching	Γερμανία	Γεωθερμία	3,4 MW	2007
Kashima Steel Works	Ιαπωνία	98°C Αποβαλλόμενη Θερμότητα	3,1 MW	1999

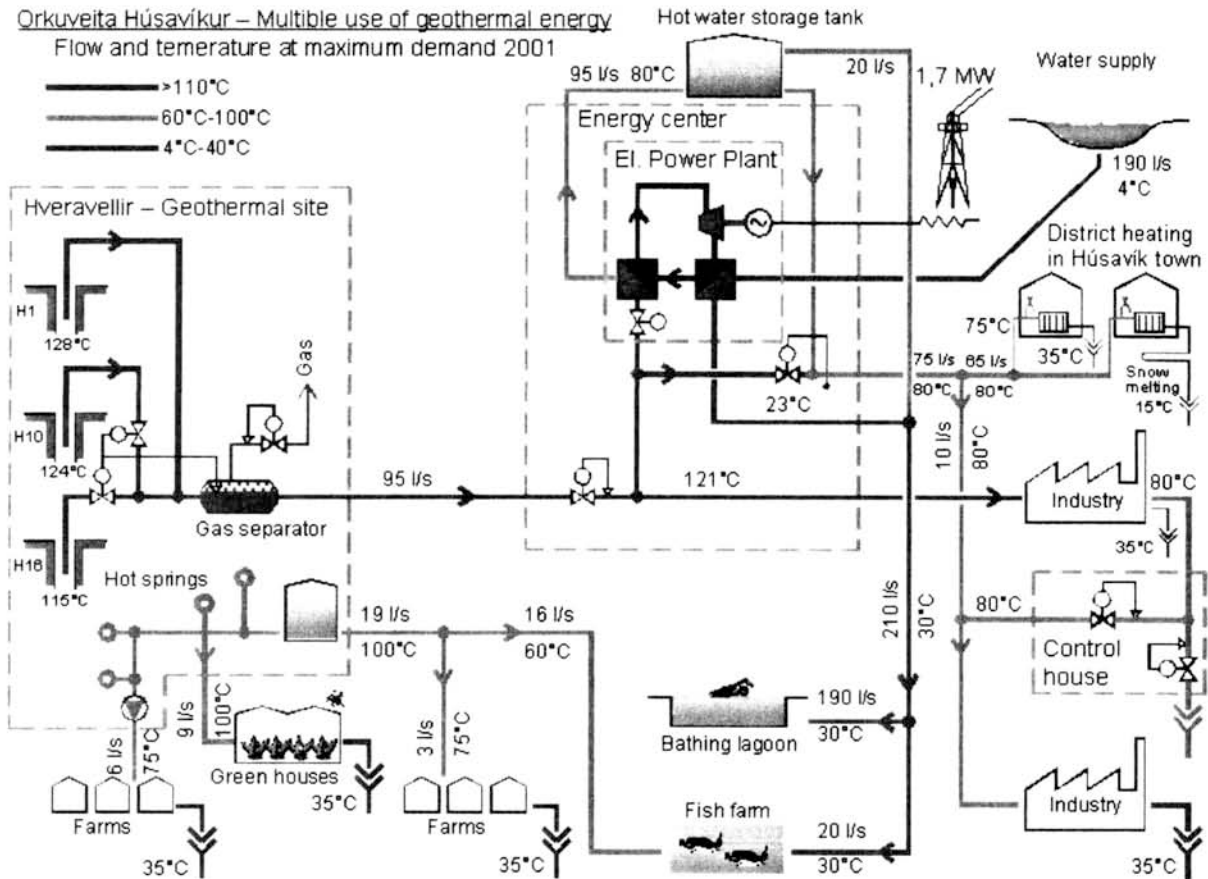
Γεωθερμική Εγκατάσταση Ισχύος στο Husavik

Η πρώτη γεωθερμική εγκατάσταση κύκλου Kalina χτίστηκε στο Husavik της Ισλανδίας αλλά δε χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση του συστήματος KCS12 ,αντιθέτως, ατμοποιείται περίπου το 70% της ροής και το εναπομείναν υγρό στραγγαλίζεται και συνδέεται μέσα από μια σειρά εναλλακτών ανάκτησης θερμότητας.

Το γεωθερμικό πεδίο (geothermal site) τοποθετείται στο Hvellavelir, 20 km νότια της πόλης του Husavik με θερμοκρασίες από 120 ως 130 °C. Το γεωθερμικό νερό αντλείται από πηγάδια παραγωγής βάθους 400 με 1000 μέτρων και σε θερμοκρασία 124 °C μεταφέρεται υπό πίεση στο Κέντρο Ενέργειας (Energy Center) που βρίσκεται στην πόλη. Ένα νέο θερμικά μονωμένο δίκτυο ατσάλινων σωληνώσεων είναι θαμμένο παράλληλα με τις παλιές σωληνώσεις. Οι θερμοκρασιακές απώλειες στη διαδρομή υπολογίζονται περίπου 3°C.

Το κτήριο του Κέντρου Ενέργειας φιλοξενεί την εγκατάσταση ισχύος κύκλου Kalina (Σχήμα 2.16). Επίσης στο κτήριο αυτό βρίσκεται πλήθος εναλλακτών θερμότητας όπως επίσης και εξοπλισμός ελέγχου. Η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι 1,6 MWe, ποσό το οποίο αρκεί για να ικανοποιήσει τα 3/4 της ηλεκτρικής ζήτησης της πόλης. Από το Κέντρο Ενέργειας , νερό σε θερμοκρασία πάνω από 120°C και σε κατάλληλη ποσότητα διοχετεύεται για να καλύψει τις βιομηχανικές ανάγκες του Husavik όπως επίσης και το κεντρικό σύστημα θέρμανσης της πόλης.

Ιχθυοκαλλιέργειες πέστροφας και σολομού βρίσκονται κοντά στην πόλη απαιτώντας θερμό νερό για τη ρύθμιση της κατάλληλης θερμοκρασίας για την ανάπτυξη των ψαριών. Επιπλέον, υπάρχει εγκατάσταση αποξήρανσης ψαριών στο Husavik που χρησιμοποιεί γεωθερμικό νερό.[19]



Σχήμα 2.16 – Διάγραμμα ροής γεωθερμικής εγκατάστασης στο Husavik

2.4.5 Υβριδικές μονάδες παραγωγής ενέργειας

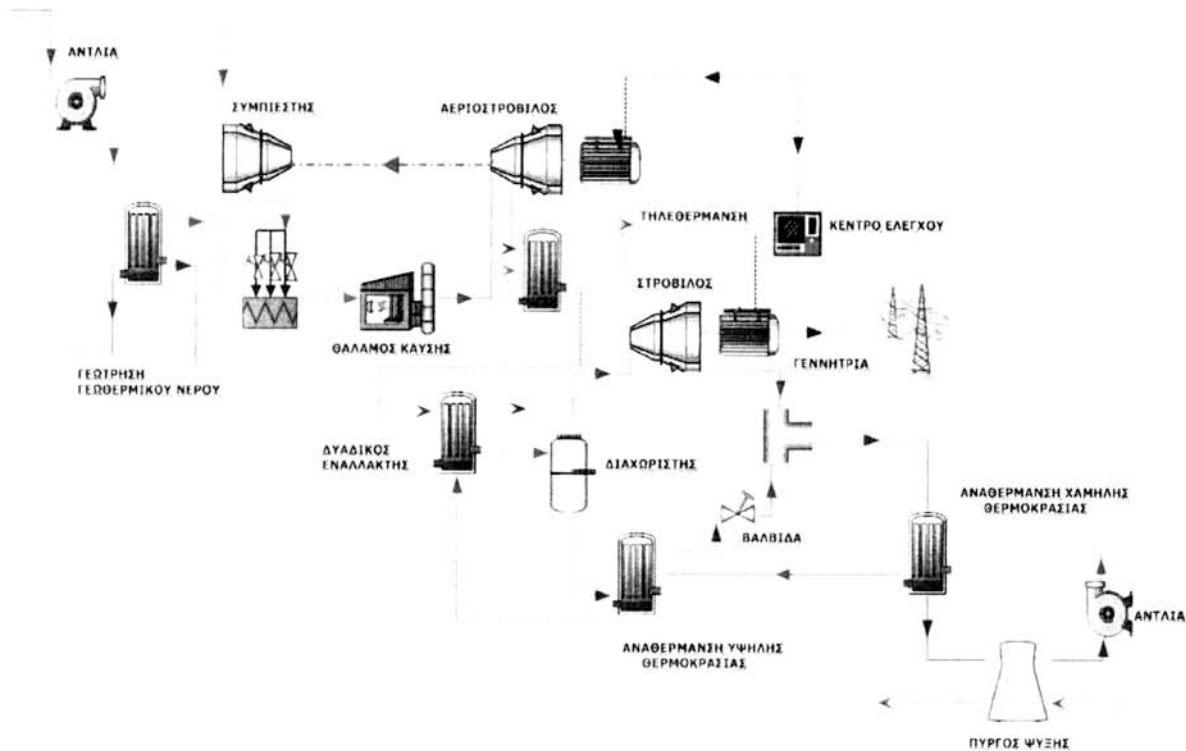
Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες αναζητούνται προηγμένα συστήματα μετατροπής ενέργειας είτε λόγω των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων, είτε για οικονομικούς λόγους. Οι υβριδικές γεωθερμικές εγκαταστάσεις συνδυάζουν δύο διαφορετικές πηγές ενέργειας σε μια εγκατάσταση. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα είναι ο συνδυασμός διαφορετικών κατηγοριών γεωθερμικών εγκαταστάσεων ή συνδυασμός γεωθερμικής ενέργειας και ενέργειας προερχόμενης από ορυκτά καύσιμα σε μία εγκατάσταση. πρέπει να γίνει έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία μονάδα με καλύτερη απόδοση συγκριτικά με τις αυτόνομες μονάδες από τις οποίες προήλθε. Μερικές προτάσεις που αξίζει να μελετηθούν είναι:

- Συνδυασμένες μονάδες στιγμιαίας ατμοποίησης απλού και διπλού ρεύματος
- Υβριδικές μονάδες δυαδικού κύκλου με άλλες ΑΠΕ
- Υβριδικά συστήματα ορυκτών καυσίμων – γεωθερμίας

Τα τελευταία χρόνια κάποια υβριδικά συστήματα θερμοδυναμικών κύκλων χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες παραβολικού τύπου για να παράγουν κεκορεσμένο ατμό θερμοκρασίας 250° C και σε συνδυασμό με έναν καυστήρα αερίου ο οποίος υπερθερμαίνει τον ατμό σε θερμοκρασία 1300°C προτείνονται για να βελτιώσουν το θερμικό βαθμό απόδοσης συμβατικών θερμικών σταθμών. Ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια του καυσίμου που καταναλώθηκε κυμαίνεται από 75% - 95% ενώ ο βαθμός απόδοσης του συστήματος ηλιακής ενέργειας είναι 45% - 60%.

Η φιλοσοφία ενός υβριδικού συστήματος ορυκτών καυσίμων – γεωθερμίας είναι η χρήση του γεωθερμικού ρευστού είτε για προθέρμανση του καυσίμου (Σχήμα 2.17), είτε η χρήση της ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα για υπερθέρμανση του ρευστού λειτουργίας μιας αμιγώς γεωθερμικής εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλότερες συνολικές αποδοτικότητες αξιοποίησης, καθώς ο συμβατικός αμοστρόβιλος είναι πιο αποδοτικός στην παραγωγή από υψηλής θερμοκρασίας ατμό και ο δυαδικός κύκλος από το μικρότερης θερμοκρασίας διαχωρισμένο νερό. Επίσης, αντικαθιστώντας το σύστημα συμπυκνωτή - πύργου ψύξης ενός συμβατικού σταθμού με μία δυαδική μονάδα, η διαθέσιμη θερμότητα από τη συμπύκνωση του εξερχόμενου από τον αμοστρόβιλο ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω παραγωγή ισχύος.

Τέτοιες μονάδες έχουν κατασκευαστεί στις ΗΠΑ, τις Φιλιππίνες και τη Νέα Ζηλανδία, με μεγέθη από 10 έως πάνω από 100 MW_e. Οι αποδοτικότητες των μονάδων αυτών, από την άποψη της παραγόμενης ισχύος για τη συνολική ροή ρευστού (ατμού και νερού) των φρεάτων, είναι αρκετά υψηλότερες από των συμβατικών, λόγω κυρίως της πρόσθετης ισχύος που παράγεται με την αξιοποίηση της θερμότητας του χρησιμοποιημένου γεωθερμικού ρευστού.[1]



Σχήμα 2.17 - Υβριδική μονάδα παραγωγής ενέργειας γεωθερμίας - ορυκτού καυσίμου

2.5 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Γεωθερμικών Μονάδων

Η γεωθερμία παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Συγκρινόμενη ακόμη και με άλλες μορφές ΑΠΕ, η γεωθερμία δεν υστερεί σε περιβαλλοντικά οφέλη. Παρ' όλα αυτά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευσή της δεν είναι πάντα αμελητέες, όμως όλες τεχνολογικά αντιμετωπίσιμες.

Όλα αυτά τα προβλήματα έχουν άμεση σχέση με τη χημική σύσταση των περισσότερων γεωθερμικών ρευστών. Τα γεωθερμικά ρευστά λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της μακράς παραμονής τους σε επαφή με διάφορα πετρώματα, περιέχουν κατά κανόνα σημαντικές ποσότητες διαλυμένων αλάτων και αερίων. Η αλλαγή των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών των ρευστών στο στάδιο της εκμετάλλευσης μπορεί να δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για την απόθεση ορισμένων διαλυμένων ή αιωρούμενων στερεών και την απελευθέρωση στο περιβάλλον επιβλαβών ουσιών.

Στα κύρια προβλήματα κατά την παραγωγή γεωθερμικής ισχύος περιλαμβάνονται οι αποθέσεις μετάλλων, οι μεταβολές στις υδρολογικές συνθήκες και η διάβρωση του εξοπλισμού. Προβλήματα ρύπανσης προκύπτουν κατά το χειρισμό των γεωθερμικών αποβλήτων, τόσο του νερού όσο και του ατμού.[20, 5]

Περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τη γεωθερμική ενέργεια:

Ρυπαντές – Αποθέσεις μετάλλων

Η γεωθερμική ενέργεια παράγει μη-συμπυκνώσιμους αέριους ρυπαντές (<5% κ.β.), κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, SO_x και μεθάνιο. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα φυσικό συστατικό που βρίσκεται στα χρησιμοποιούμενα γεωθερμικά ρευστά. Παρ' όλα αυτά το επίπεδο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από αυτές τις μονάδες είναι αισθητά χαμηλότερο από τις αντίστοιχες συμβατικές μονάδες. Το συμπυκνωμένο γεωθερμικό ρευστό μπορεί να περιέχει διαλυμένο πυρίτιο, βαρέα μέταλλα, χλωριούχο κάλιο και νάτριο. Από τα διάφορα μεταλλικά στοιχεία που εκπέμπονται, το αρσενικό είναι διαβρωτικό στο δέρμα και καρκινογόνο, το βόριο ερεθίζει το δέρμα και τους βλεννογόνους υμένες και η εισπνοή ή η κατάποση του υδραργύρου μπορεί να προκαλέσει νευρολογικές διαταραχές. Όμως, αυτά τα μέταλλα εκπέμπονται γενικά σε τόσο χαμηλές ποσότητες με αποτέλεσμα να μη θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Τα μέταλλα μπορούν επίσης να αποτεθούν στο έδαφος και, εάν διηθούνται εκεί, μπορούν να συμβάλουν στη μόλυνση των υπόγειων νερών. Το βόριο είναι επίσης τοξικό στα φυτά σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Όμως σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου των εκπομπών και τεχνικές διαχείρισης της απόβλητων νερών έχουν μειώσει τις επιπτώσεις αυτές στο ελάχιστο. Η γεωθερμική ενέργεια έχει πλέον καθαρά θετική επίπτωση στο περιβάλλον, καθώς ρυπαίνει λιγότερο από κάθε μορφή συμβατικής ενέργειας.

Μορφή ενέργειας	CO ₂	NO _x	SO _x
Ανθρακας	1042	4,4	11,8
Πετρέλαιο	839	12,4	1,6
Φυσικό αέριο	453	1,4	0,0
Γεωθερμική ενέργεια*	95	0,3	0,1
Φωτοβολταικά**	135	0,3	0,4
Βιομάζα	20	1,8	0,5

* μέση τιμή – οι μονάδες δυαδικού κύκλου έχουν μηδενικές εκπομπές

** περιλαμβάνει τις εκπομπές από τον κύκλο ζωής της τεχνολογίας

Σχήμα 2.18 – Εκπομπές αέριων ρυπαντών για διάφορες μορφές ενέργειας

Αποβαλλόμενα νερά

Η αποβολή του περιττού νερού είναι επίσης μια εν δυνάμει πηγή χημικής ρύπανσης. Χρησιμοποιημένα γεωθερμικά ρευστά με υψηλή συγκέντρωση σε χημικά όπως βόριο, φθόριο ή αρσενικό πρέπει είτε να επεξεργάζονται πριν αποτεθούν στο περιβάλλον, είτε να επανεισάγονται στη γεωθερμικό ταμειυτήρα. Ιδιαίτερα προβλήματα διαρροών μπορεί να υπάρξουν κυρίως στα αρχικά στάδια αξιοποίησης του πεδίου (από τα ρευστά που εκρέουν κατά την ανόρυξη των γεωτρήσεων), σε περίπτωση ατυχήματος ή διάρρηξης των σωληνώσεων (παραγωγής και επανεισαγωγής) και από τις μη αποτελεσματικά στεγανοποιημένες λίμνες των γεωθερμικών ρευστών. Θα πρέπει να αναφερθεί όμως, ότι τα γεωθερμικά ρευστά χαμηλής και μέσης ενθαλπίας που είναι και τα πλέον διαδεδομένα περιέχουν χαμηλά ποσοστά χημικών και συνεπώς η αποβολή τους σπάνια αποτελεί πρόβλημα.

Το νερό ψύχεται και αραιώνεται συνήθως σε ειδικές δεξαμενές για να αποφευχθεί η διατάραξη του παρακείμενου οικοσυστήματος καθώς μεγάλοι όγκοι απορριπτόμενης ζεστής άλμης παράγονται στα υδροθερμικά πεδία ενώ από τους πύργους ψύξης των σταθμών, παράγεται μια ροή συμπυκνώματος που περιέχει ποικίλες συγκεντρώσεις αμμωνίας, θειούχων ενώσεων, ανθρακικών αλάτων, και βορίου. Η αραιώση των συμπυκνωμάτων αυτών πριν την εναπόθεση τους στο περιβάλλον γίνεται τουλάχιστον κατά 100:1.

Υποχώρηση του εδάφους

Η εξαγωγή μεγάλων ποσοτήτων ρευστού από έναν υπόγειο γεωθερμικό ταμειυτήρα μπορεί να οδηγήσει σε υποχώρηση του εδάφους. Η υποχώρηση αυτή πρέπει να ελέγχεται συστηματικά, καθώς είναι δυνατό να καταστρέψει τη γεωθερμική εγκατάσταση και τον περιβάλλοντα χώρο. Η ελάττωση της πίεσης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να προκαλέσει βρασμό στο νερό των πετρωμάτων (που οδηγεί σε μεταβολές των χαρακτηριστικών του ρευστού της γεώτρησης), τη διείσδυση κρύου νερού από τις παρυφές του πεδίου, ή μεταβολές στη χημεία του νερού λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων των αερίων. Μετά από την παρατεταμένη άντληση ζεστού νερού από πετρώματα μικρής αντοχής μπορεί να συμβεί τοπική γαιόχωση (μέχρι μερικά μέτρα) και να μειωθεί σε ένταση η αρχική φυσική θερμική δραστηριότητα. Κάποιες μεταβολές συμβαίνουν σε όλους τους τομείς και απαιτείται η καλή κατανόηση της γεωλογίας και της υδρολογίας ενός συστήματος προκειμένου να μπορέσει να συνταιριαστεί ο ρυθμός άντλησης της γεώτρησης με τη μακροπρόθεσμη δυνατότητα αυτής να παρέχει ρευστό.

Το πρόβλημα της επιφανειακής διάθεσης μπορεί να αποφευχθεί με την επανέγχυση των απορριπτόμενων νερών ή συμπυκνωμάτων πίσω στα έγκατα μέσω φρεάτων απόρριψης. Η επανέγχυση του συμπυκνώματος ατμού εμφανίζει λίγα προβλήματα και εφαρμόζεται στην Ιταλία και τις ΗΠΑ. Μια πιο δύσκολη περίπτωση επανέγχυσης συνιστούν οι πολύ μεγαλύτεροι όγκοι του διαχωριζόμενου απόβλητου ζεστού νερού (περίπου 50 μετρικοί τόνοι ανά MW) στα πεδία υπερίσχυσης νερού.

Η απόθεση πυριτίου και ανθρακικών αλάτων μπορεί να προκαλέσει αποφράξεις στις σχισμές των πετρωμάτων, εάν δεν ικανοποιούνται οι κατάλληλες θερμοκρασιακές, χημικές και υδρολογικές συνθήκες στο βάθος απόρριψης. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι απαραίτητη πριν την επανέγχυση η χημική επεξεργασία της άλμης. Η επιλεκτική επανεισαγωγή του νερού στο θερμικό σύστημα μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση των πιέσεων του υδροφόρου ορίζοντα και στην απόληψη περισσότερης θερμότητας από το πέτρωμα.

Ηχορρύπανση

Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις παράγουν ηχορρύπανση κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους μέχρι και 120 dB π.χ. λόγω γεωτρήσεων και της διαφυγής ατμού υψηλής πίεσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Στις εγκαταστάσεις παραγωγής θερμού νερού ο θόρυβος συνήθως είναι αμελητέος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, όμως οι ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις παράγουν κάποιο θόρυβο από τη λειτουργία των πύργων ψύξης και του στροβίλου. Παρατίθενται ενδεικτικά επίπεδα θορύβου κατά την αρχική φάση:

- Ανόρυξη γεωτρήσεων με αέρα (Air drilling): 120 dB
- Ανόρυξη γεωτρήσεων με κυκλοφορία λάσπης (Mud drilling): 80 dB
- Καθαρισμός της γεώτρησης μετά τη διάτρηση: έως 120 dB
- Δοκιμές γεωτρήσεων: 70-120 dB (ελεύθερη εκροή από γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας: μέγιστο 120 dB, το οποίο μειώνεται στα 85 dB με χρήση σιγαστήρα)
- Μηχανές ντίζελ (π.χ. συμπιεστές): 45-60 dB
- Εκσκαφείς, φορτηγά, τρακτέρ κτλ.: 55-75 dB

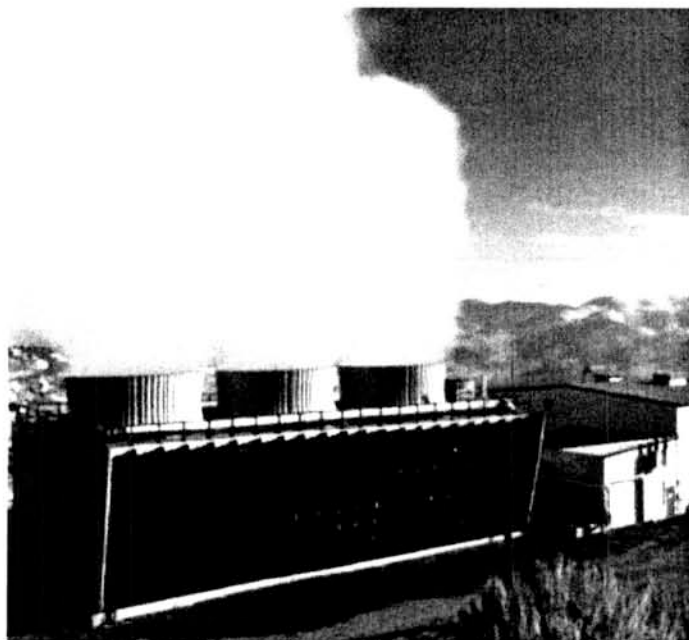
Σεισμικότητα

Η λήψη μεγάλων ποσοτήτων γεωθερμικού ρευστού μπορεί να αποτελέσει το έναυσμα ή ακόμα και να αυξήσει τη συχνότητα σεισμικών φαινομένων στη συγκεκριμένη περιοχή. Όμως, αυτά τα μικρο-σεισμικά φαινόμενα γίνονται αντιληπτά μόνο μέσω του κατάλληλου εξοπλισμού. Είναι ιδιαίτερα απίθανο η εκμετάλλευση γεωθερμικών πηγών να οδηγήσει σε σεισμικά φαινόμενα μεγάλης κλίμακας.

Οπτικές επιπτώσεις:

Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις είναι συχνά τοποθετημένες σε περιοχές υψηλής αισθητικής και περιβαλλοντικής σημασίας όπου η εμφάνιση της μονάδας έχει ιδιαίτερη σημασία. Ευτυχώς, οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος καλύπτουν μικρή

επιφάνεια και με προσεκτικό σχεδιασμό είναι δυνατό να αφομοιωθούν με το περιβάλλον. Το κυριότερο ορατό τμήμα μίας μονάδας είναι ο πύργος ψύξης καθώς είναι ογκώδεις (ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης) ενώ παράγουν ατμό τον οποίο κάποιος θεωρούν αντιαισθητικό. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αερόψυκτοι συμπυκνωτές.



Σχήμα 2.19 – Αποβαλλόμενος ατμός πύργου ψύξης γεωθερμικής εγκατάστασης

Διάβρωση

Τα γεωθερμικά νερά προκαλούν την ταχεία διάβρωση των περισσότερων κραμάτων μετάλλων, αλλά αυτό δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα κατά τη χρήση τους εκτός από τις περιοχές όπου αντλούνται υψηλής θερμοκρασίας όξινα ύδατα (πολύ σπάνια), για παράδειγμα σε ενεργές ηφαιστειακές ζώνες. Το σύνηθες βαθύ γεωθερμικό νερό έχει σχεδόν ουδέτερο pH. Οι κυριότερες επιπτώσεις διάβρωσης μετάλλων που πρέπει να αποφεύγονται είναι η διάβρωση με στίγματα θειούχων και χλωριούχων ενώσεων ορισμένων ανοξειδωτών και υψηλής αντοχής χαλύβων και η ταχεία διάβρωση των κραμάτων χαλκού. Το υδρόθειο, ή τα προϊόντα οξείδωσης του, προκαλεί επίσης την πιο ταχεία από την κανονική υποβάθμιση των οικοδομικών υλικών, π.χ. του σκυροδέματος, των πλαστικών, και των βαφών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Σχεδιασμός στο Aspen Plus[®]

3.1 Σχεδιασμός ενός θερμικού συστήματος

Ο σχεδιασμός είναι ένα απαραίτητο θεωρητικό και πρακτικό εργαλείο για το σύγχρονο μηχανικό. Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων εξ' αιτίας του αυξανόμενου ανταγωνισμού σε παγκόσμιο επίπεδο και της ανάπτυξης νέων τεχνικών και τεχνολογιών. Έχει γίνει κατανοητό ότι δεν είναι πλέον αρκετή η ανάπτυξη ενός συστήματος που απλά να εκτελεί ένα έργο για να ικανοποιήσει μια ανάγκη της κοινωνίας, αλλά είναι πολύ σημαντικό να βελτιστοποιείται η διεργασία, έτσι ώστε μια επιλεγμένη ποσότητα, γνωστή και ως αντικειμενική συνάρτηση να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται. Έτσι, για ένα δοσμένο σύστημα, η απόδοση, το κέρδος, η παραγωγικότητα κ.ά. μπορούν να αυξάνονται ενώ το κόστος, η προδιδόμενη ενέργεια κ.α. να ελαχιστοποιείται.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στο σχεδιασμό, όπως και σε άλλες δραστηριότητες του μηχανικού, είναι η διατύπωση του προβλήματος. Είναι υποχρεωτικό να καθοριστούν οι απαιτήσεις του συστήματος, τα δεδομένα και οι σταθερές όπως επίσης και οι μεταβλητές που μπορούν να αλλαχθούν για να επιτευχθεί πιο ικανοποιητικά ο σχεδιασμός. Ο τελικός σχεδιασμός είναι απαραίτητο να πληροί όλες τις απαιτήσεις, ενώ ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που αφορούν περιβαλλοντικές, οικονομικές υλικές και άλλες εκτιμήσεις. Η διαδικασία του σχεδιασμού εξαρτάται από την τοποθέτηση του προβλήματος καθώς επιτρέπεται στο σχεδιαστή να επικεντρώσει την προσοχή του στις ποσότητες και τις παραμέτρους του συστήματος που μπορεί να μεταβάλλει. Δίνεται συνεπώς μια πρώτη προσέγγιση της φιλοσοφίας του σχεδιασμού από των απλούστερων μέχρι και των πιο πολύπλοκων συστημάτων πολλών μεταβλητών. [21]

3.1.1 Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά

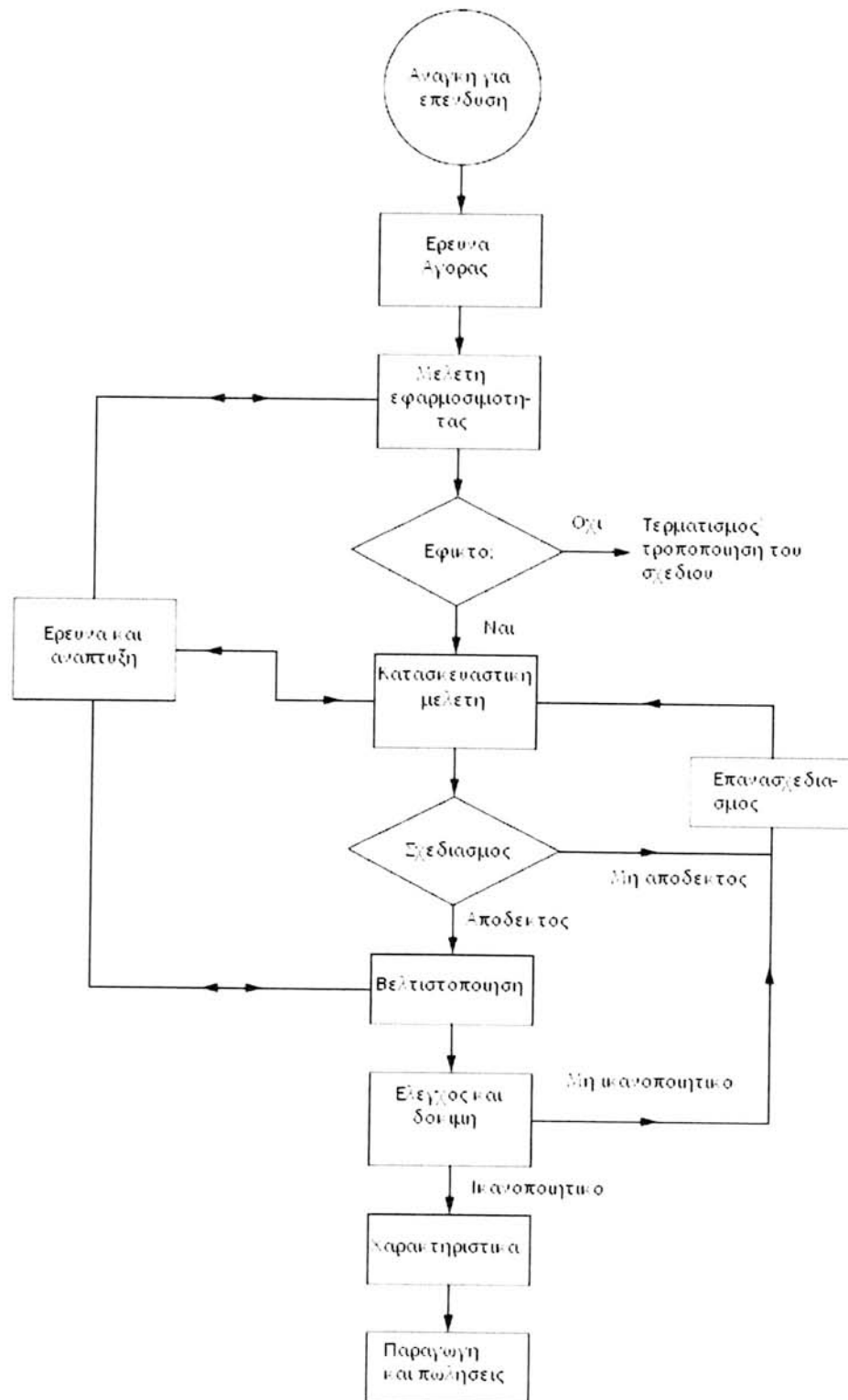
Ο πιο σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε κάθε σχεδιασμό συστήματος είναι η αποσαφήνιση της επιθυμητής λειτουργίας ή του σκοπού που εκτελεί το σύστημα αυτό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μορφή απαιτήσεων που πρέπει να ικανοποιούνται από το σύστημα. Ένας επιτυχημένος, εφαρμόσιμος και αποδεκτός σχεδιασμός πρέπει να ικανοποιεί αυτό το κριτήριο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να εκφραστούν οι περιορισμοί ποσοτικά και να καθοριστούν οι επιτρεπόμενες ανοχές στους υπολογισμούς. Στο σχεδιασμό θερμικών συστημάτων εμφανίζονται απαιτήσεις που αφορούν θερμοκρασιακά επίπεδα και χρονικές μεταβολές, ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας και μαζικές παροχές. Συνολική αύξηση πίεσης, παραγόμενη ισχύς, μεταφορά ενέργειας κ.ά. μπορούν να είναι επιθυμητές έξοδοι ενός υποψήφιου προς μελέτη θερμικού συστήματος

Το σύστημα σχεδιάζεται με βάση τις δεδομένες απαιτήσεις που περιγράφονται από τους όρους των κύριων χαρακτηριστικών. Αυτές ορίζουν τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Τα τελικά χαρακτηριστικά του συστήματος μπορεί να περιλαμβάνουν

3.1.2 Ανάγκη και Δυνατότητα

Η ανάγκη είναι πάντα το πρώτο βήμα σε ένα νέο εγχείρημα επειδή προσδίδει την ώθηση για ανάπτυξη ενός προϊόντος ή ενός συστήματος. Η ανάγκη αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη απαίτηση και συνεπάγεται ότι το κατάλληλο αντικείμενο δεν είναι διαθέσιμο και πρέπει να αναπτυχθεί για ένα επιθυμητό σκοπό. Η ανάγκη αυτή μπορεί να αφορά είτε ανάπτυξη ενός εξ' ολοκλήρου νέου συστήματος είτε τροποποίηση και βελτίωση ενός υπάρχοντος. Η δυνατότητα ή ευκαιρία, είναι η αναγνώριση της πιθανότητας ανάπτυξης ενός νέου προϊόντος ή συστήματος που να είναι καλύτερο ή τουλάχιστο πιο οικονομικό από τα υφιστάμενα. Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάγκη της σύγχρονης κοινωνίας για ενέργεια (ηλεκτρική και θερμική) από νέες φιλικότερες προς το περιβάλλον πηγές. Η μελέτη αυτή επιτυγχάνεται αναλύοντας ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις σε διεθνές επίπεδο και ερευνώντας την πιθανή εφαρμογή

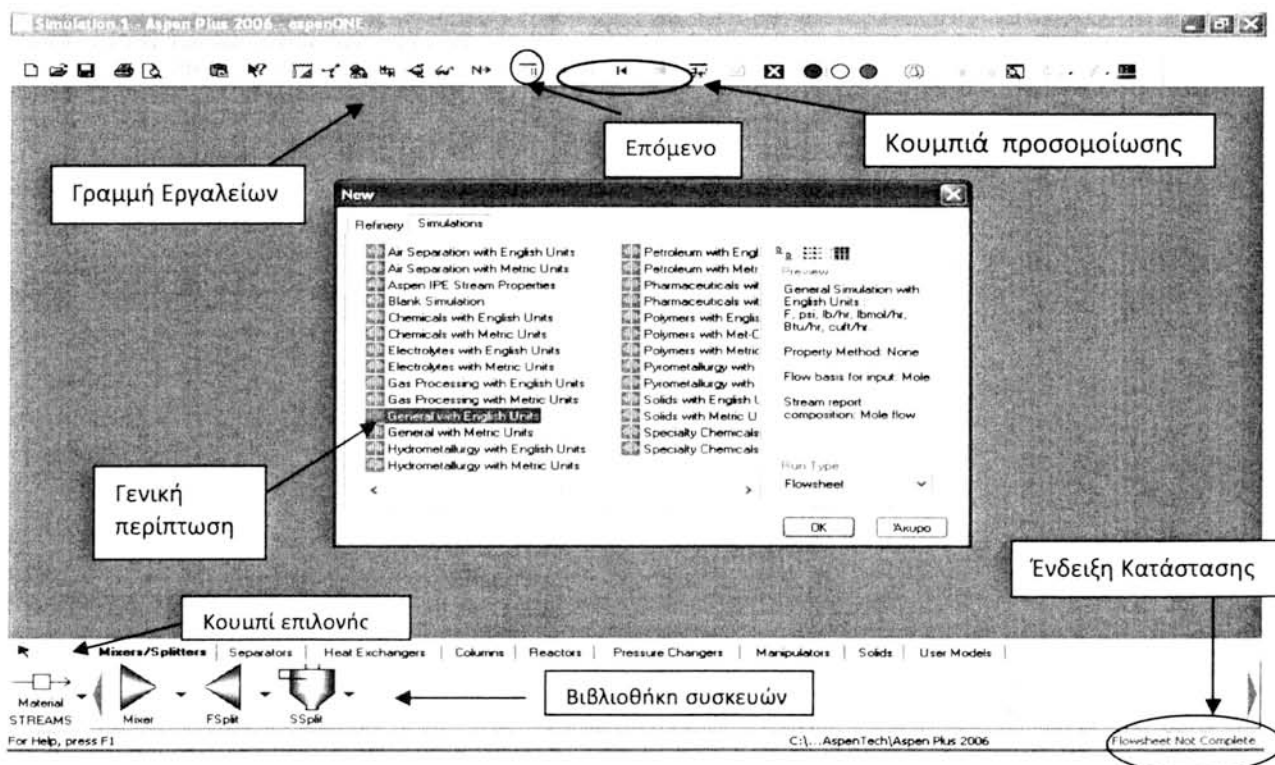
τους στην Ελλάδα. Συνεπώς το κίνητρο και η ανάγκη υπάρχει, το ζητούμενο είναι αν η τεχνολογία αυτή είναι εφαρμόσιμη και αποδεκτή.[21]



Σχήμα 3.1 – Διάγραμμα αποφάσεων σχεδιασμού ενός μοντέλου

3.2 Εισαγωγή στο Aspen Plus

Τα σύγχρονα και περίπλοκα βιομηχανικά προβλήματα δεν επιλύονται συνήθως αναλυτικά, είτε γιατί εκ των πραγμάτων είναι αδύνατον (χρονικοί περιορισμοί, μη γραμμικότητα, κόστος), είτε για να αποφευχθεί το ανθρώπινο λάθος. Γι' αυτό το λόγο, είναι επιβεβλημένη η χρήση λογισμικών προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, τα οποία επιτρέπουν στο σχεδιαστή να διενεργεί γρήγορες δοκιμές για τις εκάστοτε συνθήκες, ενώ μπορούν να αναλύσουν από ένα μεμονωμένο στοιχείο μέχρι και ολόκληρη τη μελετώμενη εγκατάσταση. Υπάρχει πληθώρα λογισμικών στο εμπόριο ανάλογα με τις ανάγκες, τη χρήση και τις απαιτήσεις του χρήστη. Ένα τέτοιο λογισμικό προσομοίωσης είναι το **Aspen Plus®** το οποίο ανταποκρίνεται ακόμα και σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες. Το περιβάλλον αυτό διαχειρίζεται μονάδες φυσικών διεργασιών (unit operations) όπως ανάμειξη, διαχωρισμό, θέρμανση-ψύξη, μετατροπή συστατικών του συστήματος καθώς και χημικών διεργασιών (process operations) π.χ. καύση, απόσταξη, απορρόφηση κ.ά.










Σχήμα 3.2 - Επιλογή κατηγορίας προσομοίωσης

Όπως και σε κάθε περιβάλλον προσομοίωσης, έτσι και στο Aspen Plus®, το στάδιο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου προσομοίωσης ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο το πραγματικό πρόβλημα. Εκκινώντας το πρόγραμμα και αφού επιλεγεί η δημιουργία νέας προσομοίωσης, εμφανίζεται παράθυρο στο οποίο παραθέτονται ενδεικτικές κατηγορίες προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.[22]

3.3 Διεπαφή χρήστη (User Interface)

Η διεπαφή του χρήστη (user interface) είναι το αρχικό παράθυρο στο οποίο ο χρήστης δημιουργεί και προσομοιώνει το μοντέλο. Όσο ο χρήστης δεν προσθέτει κάποιο χαρακτηριστικό του προβλήματος ή τα προσδιδόμενα στοιχεία είναι ανεπαρκή, η ένδειξη κατάστασης (βλέπε σχήμα 3.2) αναφέρει σε κόκκινο χρώμα ότι το διάγραμμα ροής δεν έχει ολοκληρωθεί (flowsheet not complete) ή ότι τα απαιτούμενα δεδομένα δεν έχουν ολοκληρωθεί (Required input incomplete). Μόνο στην περίπτωση που η ένδειξη κατάστασης γίνει γαλάζια και αναφέρει ότι τα δεδομένα έχουν δοθεί (Required input complete) είναι δυνατόν να εκκινήσει η προσομοίωση του προβλήματος. Στη συνέχεια, αν οι υπολογισμοί του λογισμικού έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία εμφανίζεται η ένδειξη ότι τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα (Results Available). Σε αντίθετη περίπτωση, εμφανίζεται μήνυμα αναφέροντας ότι οι υπολογισμοί ολοκληρώθηκαν με σφάλματα (Results Available with Errors).

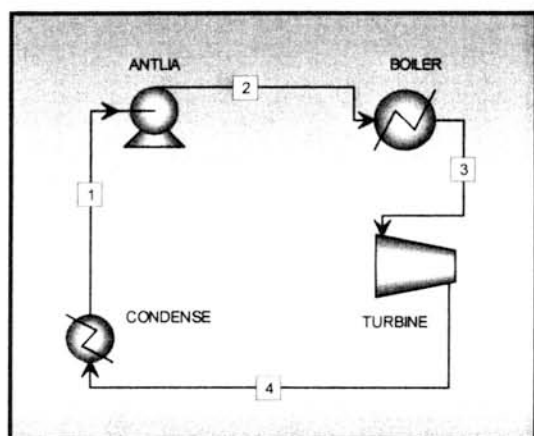
Πίνακας 3.1 Ενδείξεις κατάστασης Διεπαφής

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
	Είσοδος δεδομένων μη ολοκληρωμένη
	Είσοδος δεδομένων ολοκληρωμένη
	Δεν υπάρχει είσοδος δεδομένων
	Αποτελέσματα διαθέσιμα
	Αποτελέσματα διαθέσιμα με υπολογιστικά λάθη
	Αποτελέσματα διαθέσιμα με προειδοποιήσεις
	Αποτελέσματα διαθέσιμα με μεταβλημένη εισαγωγή δεδομένων

Τέλος, ύστερα από την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης, αν ο χρήστης μεταβάλλει τα αρχικά δεδομένα, παρατηρείται στην ένδειξη κατάστασης η αναφορά σε κίτρινο χρώμα «τα αρχικά δεδομένα άλλαξαν» (input changed).

Εκτός από την ένδειξη κατάστασης οι παραπάνω πληροφορίες εμφανίζονται δίπλα σε κάθε δεδομένο με ειδικά σύμβολα τα οποία επεξηγούνται στον πίνακα 3.1. Η λειτουργία αυτή του Aspen Plus είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να ελέγξει ένα προς ένα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα, διακρίνοντας τα σφάλματα και διευκολύνοντας την επίλυση τους.

Στο κεντρικό παράθυρο της διεπαφής βρίσκεται η επιφάνεια εργασίας (worksop), όπου γίνεται η γραφική αναπαράσταση του διαγράμματος ροής. Στο Σχήμα 3.3








παρουσιάζεται ένα παράδειγμα γραφικής αναπαράστασης διαγράμματος ροής απλού κύκλου Rankine. Διευκρινίζεται ότι με την αρίθμηση 1-4 χαρακτηρίζονται τα ρεύματα του κύκλου, ενώ οι συσκευές ANTLIA, BOILER, TURBINE, CONDENSE λαμβάνονται από τη βιβλιοθήκη του ASPEN και συμβολίζουν στο συγκεκριμένο παράδειγμα μία αντλία, ένα βραστήρα, έναν ατμοστρόβιλο και ένα

Σχήμα 3.3

συμπυκνωτή, αντίστοιχα. Σε επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται συνοπτικά οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τις απαιτήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας και περιγράφονται οι λειτουργίες τους. Κατά την κατάστρωση του διαγράμματος ροής επιλέγονται ρεύματα μάζας, έργου ή θερμότητας για τη σύνδεση των συσκευών ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Πίνακας 3.2 Σύμβολα κουμπιών προσομοίωσης

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
	Εκκινεί ή συνεχίζει τους υπολογισμούς
	Εκτελεί βηματικά κάθε διαδοχική συσκευή του διαγράμματος ροής
	Σταματά τους υπολογισμούς
	Σβήνει τα αποτελέσματα της προσομίωσης
	Ελέγχει τα αποτελέσματα

Στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3.2) παρουσιάζονται τα κουμπιά του πίνακα ελέγχου της προσομοίωσης τα οποία σε συνδυασμό με την ένδειξη κατάστασης που περιγράφηκε στην αρχή της παραγράφου και το παράθυρο που δείχνει την πρόοδο των υπολογισμών κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, αποτελούν τον πίνακα ελέγχου της διεπαφής του χρήστη (*control panel user's interface*).

3.4 Εισαγωγή δεδομένων – εκτίμηση θερμοδυναμικών ιδιοτήτων

Τα ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου (εκτός από τη γραφική αναπαράσταση του διαγράμματος ροής) για να «τρέξει» η προσομοίωση είναι:

- Εγκατάσταση (*Setup*)
- Συστατικά (*Components*)
- Ιδιότητες (*Properties*)
- Ρεύματα (*Streams*)
- Συσκευές (*Blocks*)

Όλα τα παραπάνω δεδομένα εισαγωγής βρίσκονται στην επιλογή των δεδομένων περιήγησης (*Data Browser*).

Στη φόρμα της εγκατάστασης εισάγονται χαρακτηριστικά όπως: ο τίτλος του διαγράμματος ροής, ο τύπος της προσομοίωσης, οι μονάδες των δεδομένων εισαγωγής και των αποτελεσμάτων, οι ισχύουσες φάσεις των συστατικών, οι συνθήκες περιβάλλοντος (ή αναφοράς) κ.ά.

Στη φόρμα των συστατικών καθορίζονται τα απαιτούμενα συστατικά της προσομοίωσης και τα χαρακτηριστικά αυτών. Εάν τα συστατικά είναι συμβατικά, οι παράμετροι των ιδιοτήτων λαμβάνονται από τις βάσεις δεδομένων του λογισμικού.

Στη φόρμα των ιδιοτήτων χαρακτηρίζεται η μέθοδος φυσικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση. Με τον όρο μέθοδος φυσικών ιδιοτήτων ορίζεται το σύνολο των μοντέλων και μεθόδων που εφαρμόζονται για να περιγραφούν συμπεριφορές καθαρών ουσιών και μειγμάτων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την σωστή προσέγγιση του μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες.[22]

3.5 Καταστατικές Εξισώσεις και μέθοδοι προσέγγισης των ιδιοτήτων

Κάθε εξίσωση που συνδέει τη θερμοκρασία την πίεση και τον ειδικό όγκο μιας ουσίας ονομάζεται καταστατική εξίσωση. Η απλούστερη και πιο γνωστή είναι η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων. Οι καταστατικές εξισώσεις Peng-Robinson (PR) και Soave-Redlich-Kwong (SRK) είναι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι πιο διαδεδομένες κυβικές καταστατικές εξισώσεις για εγκαταστάσεις αερίου καθώς έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά στην πρόβλεψη του ισοζυγίου ατμού - υγρού σε συστήματα που περιέχουν πολικά μόρια (πχ. αμμωνία, νερό).

3.5.1 Ιδανική προσέγγιση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων

Η ιδανική προσέγγιση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων γίνεται μέσω του νόμου των ιδανικών αερίων (καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων) συνδυάζει τους νόμους των Boyle και Gay-Lussac. Προσομοιώνει τον ατμό ως ένα σύνολο σημειακών μαζών χωρίς καμία αλληλεπίδραση. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις αερίων μιγμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η εξίσωση είναι :

$$p = \frac{RT}{V} \quad (3.1)$$

3.5.2 Καταστατική εξίσωση Peng-Robinson

Η Εξίσωση αυτή (Εξίσωση 3.2) αναπτύχθηκε έτσι ώστε να ικανοποιεί τους εξής στόχους:

1. Οι κανόνες μείξης δεν πρέπει να εμπλέκουν παραπάνω από μια παράμετρο αλληλεπίδρασης απλού δυαδικού μείγματος, η οποία να είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας, της πίεσης και της σύνθεσης.
2. Η καταστατική εξίσωση πρέπει να είναι εφαρμόσιμη σε όλους τους υπολογισμούς ιδιοτήτων ρευστών σε διεργασίες φυσικών αερίων.
3. Η μέθοδος αυτή πρέπει να αποδίδει αξιόλογη ακρίβεια σε περιοχές κοντά στο κρίσιμο σημείο.

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (3.2)$$

όπου:

$$a = \frac{0,45724R^2T_c^2}{p_c}$$

$$\alpha = (1 + (0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2)(1 - T_r^{0,5}))^2$$

$$b = \frac{0,0778RT_c}{p_c}$$

$$\omega = -\log_{10}(p_r^{sat}) - 1$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}, \quad p_r^{sat} = \frac{p}{p_c}$$

Αντίστοιχα, η Εξίσωση 3.2 εκφράζεται σε πολυωνυμική μορφή ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a\alpha p}{R^2T^2} \\ B &= \frac{bp}{RT} \end{aligned} \right\} \rightarrow Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (3.3)$$

1. όπου ω είναι ο άκεντρος παράγοντας. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται για να εκφράσει τον παράγοντα συμπίεστούτητας.
2. Παράγοντας συμπίεστούτητας (Z) είναι ένα χρήσιμο θερμοδυναμικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο το ιδανικό ,στο πραγματικό ρευστό
3. Τ_r ή ανηγμένη θερμοκρασία (reduced temperature) ενός ρευστού ορίζεται ο λόγος της πραγματικής θερμοκρασίας προς την κρίσιμη θερμοκρασία
4. P_r ή ανηγμένη πίεση (reduced pressure) ενός ρευστού ορίζεται ο λόγος της πραγματικής πίεσης προς την κρίσιμη πίεση.

Σημειώνεται ότι το κρίσιμο σημείο είναι εκείνο στο οποίο οι καταστάσεις (θερμοκρασία, πίεση, σύνθεση) του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού γίνονται ίδιες μεταξύ τους.

3.5.3 Καταστατική εξίσωση Soave-Redlich-Kwong

Η καταστατική εξίσωση των Redlich-Kwong (Εξίσωση 3.4) εισήχθη το 1949 συνιστώντας μια αξιοσημείωτη καινοτομία για εκείνη την εποχή. Έχει χαμηλή απόδοση στην υγρή φάση και γι αυτό το λόγο δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια για τον υπολογισμό του ισοζυγίου υγρής- αέριας φάσης. Το 1972 ο Soave πέτυχε τη βελτίωση της υπάρχουσας καταστατικής εξίσωσης εμπλέκοντας σε αυτήν την θερμοκρασία και τον άκεντρο παράγοντα (acentric factor). Η νέα εξίσωση ονομάστηκε Soave-Redlich-Kwong (SRK) και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m(V_m + b)} \quad (3.4)$$

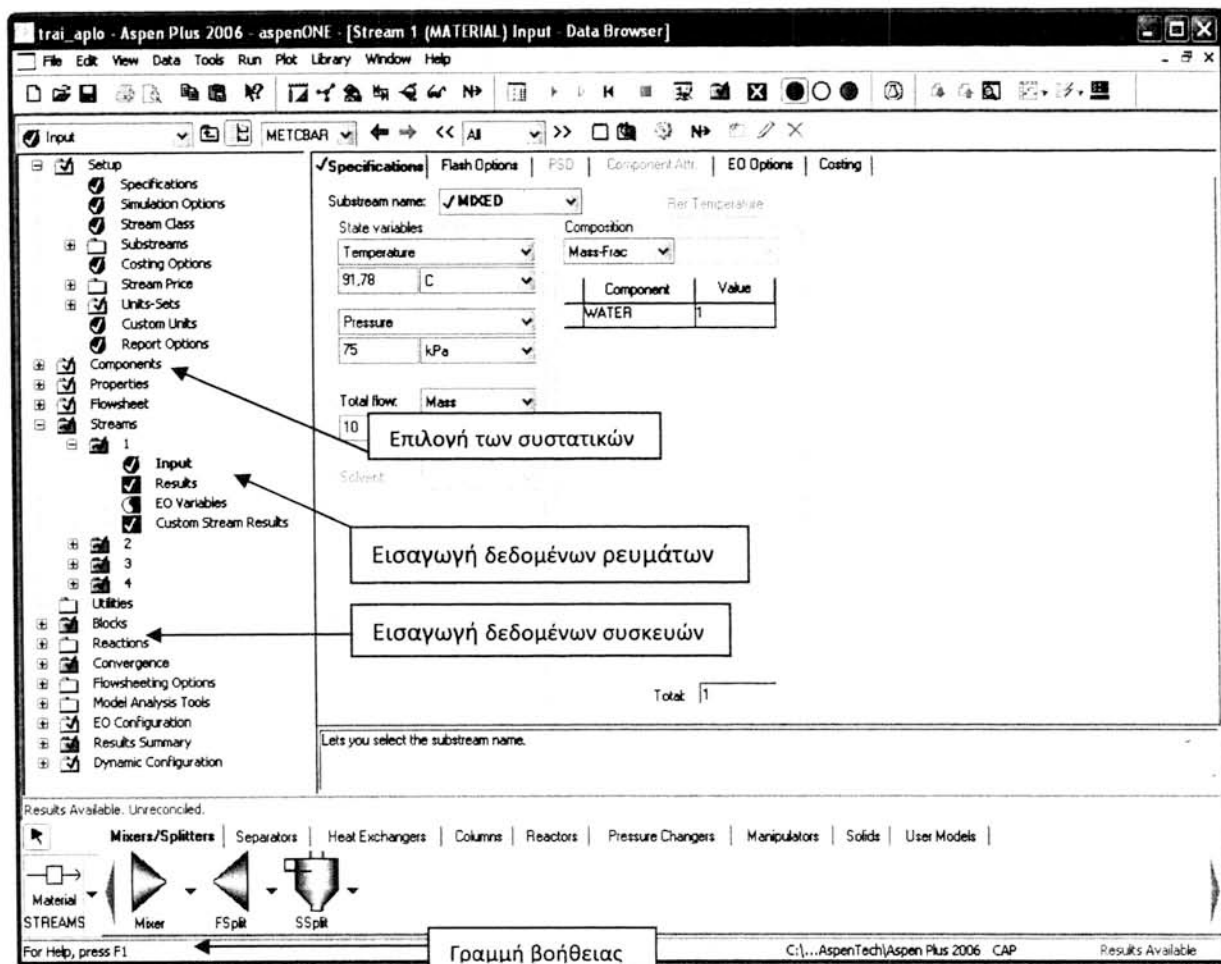
όπου:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{0,42747R^2T_c^2}{P_c} \\ b &= \frac{0,08664RT_c}{P_c} \end{aligned} \right\} \rightarrow \alpha = (1 + (0,48508 + 1,55171\omega - 0,17613\omega^2)(1 - T_r^{0,5}))$$

Τα παραπάνω σύμβολα αναφέρονται στα αντίστοιχα μεγέθη με αυτά της PR.

Στη φόρμα δεδομένων εισόδου των ρευμάτων, στην αριστερή στήλη δεδομένων όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.4) καθορίζονται οι συνθήκες και η σύνθεση των συστατικών στο εκάστοτε ρεύμα. Ο πλήρης καθορισμός ενός ρεύματος απαιτεί την εισαγωγή δύο εκ των τεσσάρων ακόλουθων παραμέτρων:

1. Θερμοκρασία
2. Πίεση
3. Ποσοστό υδρατμού
4. Σύσταση του ρεύματος



Σχήμα 3.4 - Φόρμα εισόδου δεδομένων

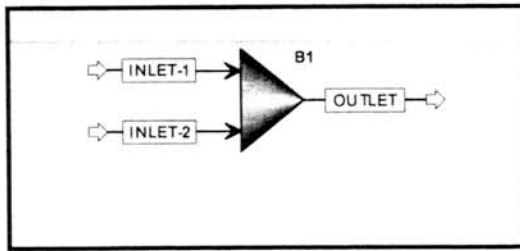
Συνοψίζοντας, για κάθε συσκευή φυσικών και χημικών διεργασιών απαιτούνται διαφορετικές εισοδοι, χαρακτηριστικά και συνθήκες λειτουργίας. Επίσης υπάρχουν συσκευές που έχουν λειτουργίες κατ' επιλογή του χρήστη.

Τέλος ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει δικές του συσκευές που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της FORTRAN.

3.6 Σύνοψη των διαθέσιμων συσκευών φυσικών και χημικών διεργασιών

Στην παράγραφο αυτή γίνεται συνοπτική περιγραφή των συσκευών φυσικών και χημικών διεργασιών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

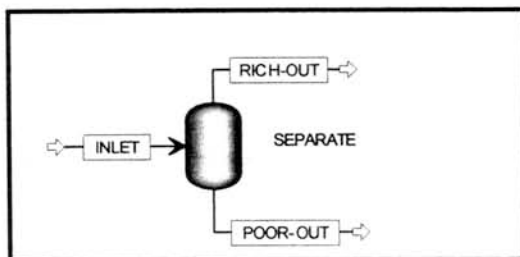
1. Μίκτης (Mixer)



Σχήμα 3.5

Η συσκευή **Mixer** (B1) συνδυάζει ένα πλήθος εισερχόμενων ρευμάτων (inlet-1, inlet-2,... κοκ) σε ένα εξερχόμενο ρεύμα (outlet). Χρησιμοποιείται είτε σε μαζικά ρεύματα, είτε σε ρεύματα ισχύος.

2. Διαχωριστής (Separator)

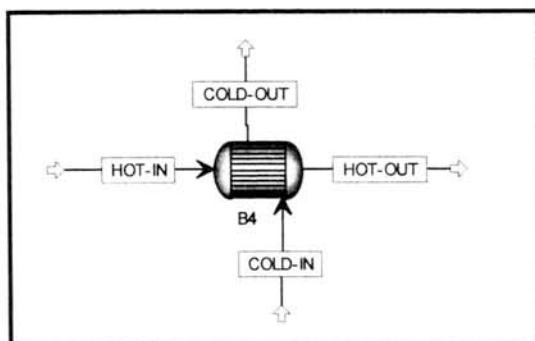


Σχήμα 3.6

Η συσκευή **Flash2** (SEPARATE) χρησιμοποιείται για να καθορίσει και να διαχωρίσει σε δύο ρεύματα (rich-out, poor-out) διαφορετικές θερμικές ή φασικές συνθήκες του ρεύματος εισόδου (inlet), (Σχήμα 3.6). Στα μοντέλα που προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία

χρησιμοποιήθηκε για το διαχωρισμό των δύο φάσεων (αέριας, υγρής) κορεσμένου δυαδικού ρευστού λειτουργίας. Ως παράμετροι πρέπει να καθοριστούν δύο εκ των πίεσης, θερμοκρασίας και θερμικού καθήκοντος της συσκευής.

3. Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger)

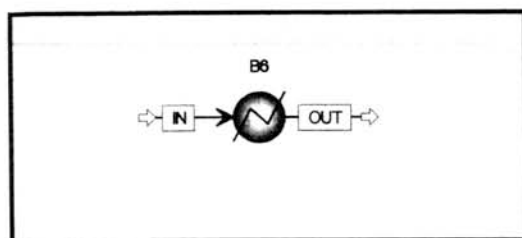


Σχήμα 3.7

Η συσκευή **HeatX** (B4) είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας αυλών-κελύφους 2 ρευμάτων ο οποίος χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα, εξυπηρετώντας ανάγκες αναθέρμανσης, προθέρμανσης, συμπύκνωσης, ψύξης κ.ά. (Σχήμα 3.7). Οι γεωμετρικές διαστάσεις και η ανταλλασσόμενη θερμική ροή μεταξύ των

δύο ρευστών του εναλλάκτη υπολογίζονται από το λογισμικό για δεδομένες απαιτήσεις του χρήστη.

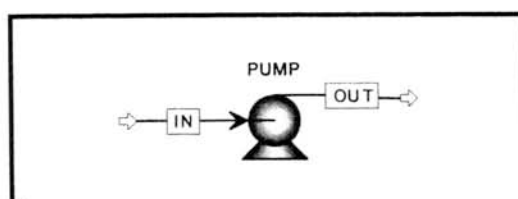
4. Θερμαντήρας - Βραστήρας - Συμπυκνωτής (Heater - Boiler - Condenser)



Σχήμα 3.8

Η συσκευή **Heater** (B6) έχει πολλαπλή χρησιμότητα, καθώς εκτελεί ρόλο θερμαντήρα - βραστήρα, ψύκτη - συμπυκνωτή ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη (Σχήμα 3.8). Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ως συσκευή μεταβολής πίεσης όταν αποτελέσματα σχετικά με το έργο λειτουργίας δεν είναι απαιτούμενα.

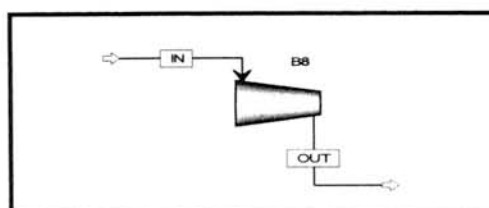
5. Αντλία (Pump)



Σχήμα 3.9

Ο ρόλος της συσκευής **Pump** (B7) είναι προφανής, εφόσον χρησιμοποιείται για μεταβολές πίεσης σε περιπτώσεις που τα αποτελέσματα σχετικά με το έργο και την ισχύ είναι απαιτούμενα (Σχήμα 3.9).

6. Στροβίλος - Συμπιεστής (Turbine - Compressor)

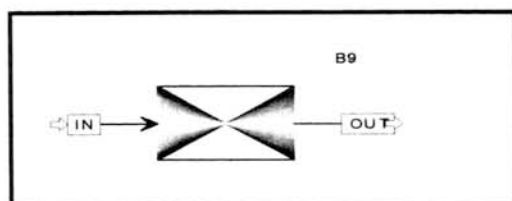


Σχήμα 3.10

τους λόγους πίεσης.

Η συσκευή **Compr** (B8) συμβολίζει ισεντροπικούς ή πολυτροπικούς στροβίλους και συμπιεστές (Σχήμα 3.10). Η παραγόμενη/καταναλισκόμενη ισχύς δίνεται ως δεδομένο ή υπολογίζεται από το Aspen. Το ίδιο ισχύει και με

7. Βαλβίδα εκτόνωσης (Valve)



Σχήμα 3.11

Η βαλβίδα εκτόνωσης **Valve** (B9) χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση των πιέσεων στο σύστημα (Σχήμα 3.11). Ιδιαίτερα χρήσιμη σε κυκλώματα μειγμάτων πολλαπλών φάσεων (κύκλος Kalina).

3.7 Εργαλεία Ανάλυσης Σχεδιασμού

3.7.1 Σχεδιασμός Χαρακτηριστικών

Ο σχεδιασμός χαρακτηριστικών (Design Specification) αποτελεί μια εντολή του Aspen Plus με την οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει το εύρος των τιμών το οποίο ενδέχεται να πάρει μια μεταβλητή (sample variable) με σκοπό τον καθορισμό των απαιτήσεων της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα,

- Επιτρέπει στο χρήστη να θέσει σε μια συγκεκριμένη τιμή μια υπολογιζόμενη ποσότητα του διαγράμματος ροής (sample variable).
- Ο στόχος επιτυγχάνεται αυξομειώνοντας μια μεταβλητή εισόδου (manipulated variable)
- Η εντολή του σχεδιασμού χαρακτηριστικών δε συνδέεται άμεσα με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης

Τα βήματα που ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό χαρακτηριστικών είναι τα εξής:

1. Αναγνώριση των ανεξάρτητων μεταβλητών
2. Προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και του στόχου
3. Ορισμός της ανοχής της αντικειμενικής συνάρτησης.
4. Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών
5. Καθορισμός του εύρους στο οποίο κυμαίνονται οι εξαρτημένες μεταβλητές.

Οι υπολογισμοί που διεξάγονται για το σχεδιασμό χαρακτηριστικών είναι επαναληπτικοί. Για το λόγο αυτό ο καθορισμός της κατάλληλης αρχικής τιμής στη μεταβλητή εισόδου είναι ένας κρίσιμος παράγοντας έτσι ώστε το μοντέλο να συγκλίνει σε λιγότερες επαναλήψεις,

Πριν γίνει η ανάλυση ευστάθειας συνίσταται ο έλεγχος μέσω της λειτουργίας του σχεδιασμού χαρακτηριστικών.

3.7.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο του ASPEN Plus είναι η ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis), μέσω της οποίας μελετώνται οι σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές του προβλήματος. Αυτό συνεπάγεται ότι ο χρήστης έχει τη δυνατότητα για:

- Μελέτη της επίδρασης των αλλαγών των εισαγόμενων μεταβλητών στα αποτελέσματα
- Γραφική αναπαράσταση των επιδράσεων αυτών
- Ελεγχόμενη βελτιστοποίηση
- Πιστοποίηση ότι η λύση με βάση το σχεδιασμό ενός χαρακτηριστικού είναι εφικτή

Αν για παράδειγμα στον απλό κύκλο Rankine που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 εφαρμοσθεί η ανάλυση ευαισθησίας για να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής της πίεσης εξόδου από το στρόβιλο στην παραγόμενη ισχύ θα προκύψει η καμπύλη του Σχήματος 3.11.

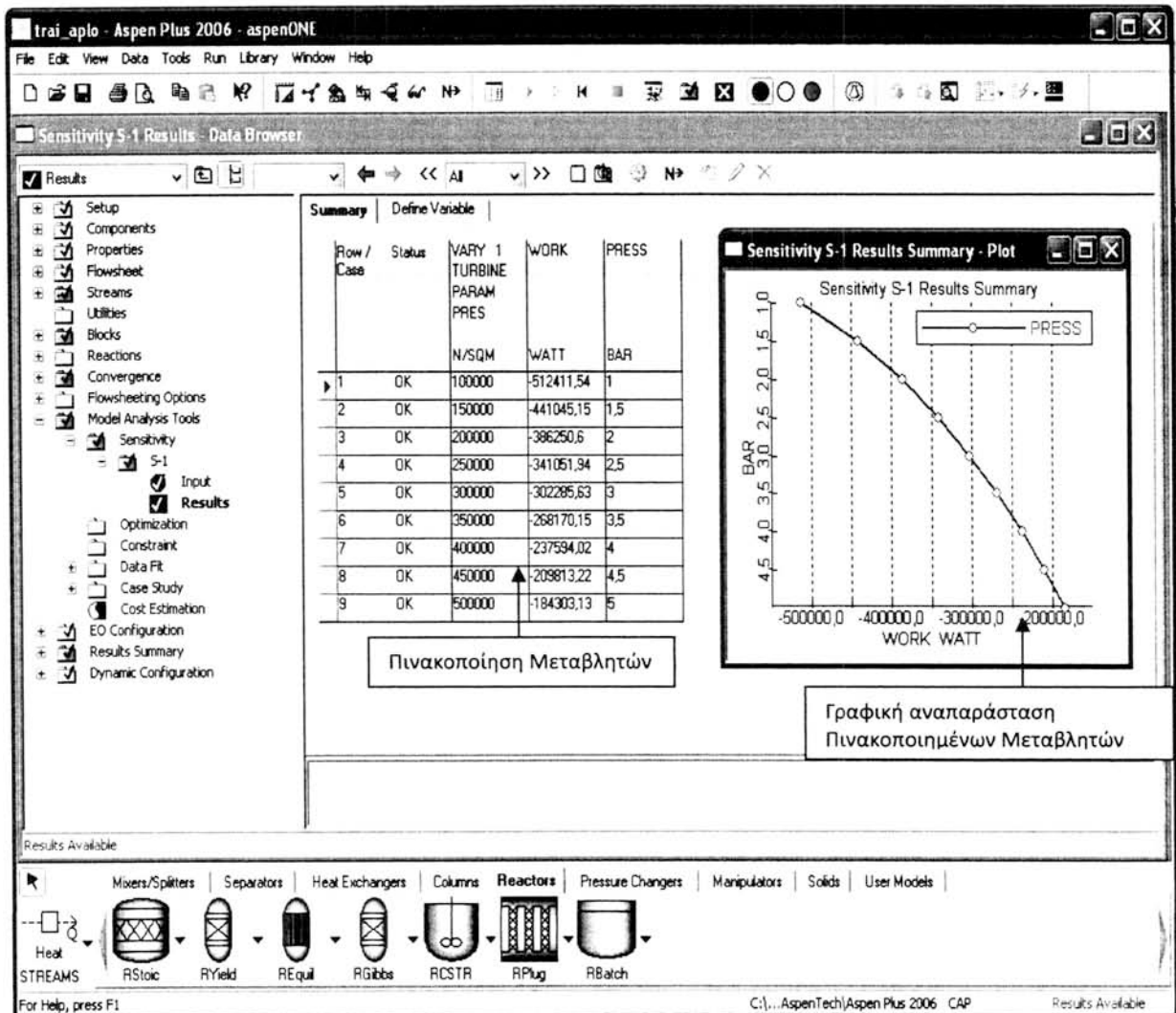
Βήματα Ανάλυσης ευαισθησίας

1. Καθορισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών. Είναι οι ποσότητες που υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. (*Sensitivity Input Sheet*)
2. Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών. Είναι οι μεταβλητές του διαγράμματος ροής που ο χρήστης αυξομειώνει. (*Sensitivity input varied sheet*).
3. Καθορισμός του εύρους της αυξομείωσης της εκάστοτε εξαρτημένης μεταβλητής.
4. Καθορισμός των ποσοτήτων που υπολογίζονται και πινακοποιούνται. (οποιαδήποτε έκφραση γραμμένη σε Fortran η οποία περιέχει οποιοσδήποτε μεταβλητές ορισμένες στο πρώτο βήμα.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι μόνο μεταβλητές που έχουν οριστεί από το διάγραμμα ροής ή οποιοσδήποτε συνδυασμός τους μπορούν να θεωρηθούν ως εξαρτημένες μεταβλητές και επομένως να αυξομειωθούν.

Γραφική αναπαράσταση

1. Γίνεται επιλογή των δεδομένων του άξονα των X και Y και επιλογή της εντολής εμφάνιση σχεδίου (Display Plot) από το μενού του σχεδιασμού (Plot Menu). Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να προσθέσει καμπύλη σε ένα ήδη υπάρχον γράφημα, επιλέγει τα δεδομένα που βρίσκονται σε πινακοποιημένη μορφή και στη συνέχεια διαλέγει την επιλογή «Προσθήκη νέας καμπύλης» (Add new curve).
2. Αν ο χρήστης θέλει να αναπαραστήσει παραμετρική μεταβλητή, η οποία έχει ήδη πινακοποιηθεί (βήμα 4) επιλέγει την εντολή Parametric Variable από το Plot Menu.



Σχήμα 3.12 – Ανάλυση Ευαισθησίας

3.7.3 Βελτιστοποίηση

Η λειτουργία της βελτιστοποίησης (Optimization) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου:

- Απαιτείται μεγιστοποίηση/ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εκφράζεται είτε ως μεμονωμένη μεταβλητή του διαγράμματος ροής, είτε ως συνδυασμός τους.
- Η βελτιστοποίηση είναι δυνατόν να έχει από καμία και περισσότερους περιορισμούς, οι οποίοι είναι ανισότητες ή ισότητες.

Βήματα καθοδήγησης για τη βελτιστοποίηση:

1. Αναγνώριση των ανεξάρτητων μεταβλητών. Όπως αναφέρθηκε και κατά την ανάλυση ευαισθησίας, οι ανεξάρτητες μεταβλητές καθορίζονται αρχικά και χρησιμεύουν στο υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.
2. Καθορισμός της ίδιας της αντικειμενικής συνάρτησης μέσω Fortran ή αλγεβρικής έκφρασης.
3. Επιλογή του αντικειμενικού σκοπού της βελτιστοποίησης, αν αφορά δηλαδή μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης
4. Καθορισμός των περιορισμών
5. Καθορισμός των εξαρτημένων μεταβλητών
6. Καθορισμός του εύρους στο οποίο κυμαίνονται οι εξαρτημένες μεταβλητές.

Επισημαίνεται ότι η σύγκλιση των υπολογισμών της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις αρχικές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών που ορίζει ο χρήστης.

Οι περιορισμοί ισότητας σε μια βελτιστοποίηση είναι παρόμοιοι με το σχεδιασμό χαρακτηριστικών που περιγράφηκε στην αρχή της παραγράφου.

3.8 Διαχείριση Αποτελεσμάτων

Η διαχείριση των αποτελεσμάτων του Aspen Plus αφορά τις εξής περιπτώσεις:

- Αντιγραφή της προσομοίωσης γραφικής αναπαράστασης σε φύλλα εργασίας και αναφορές.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης, όπως στήλες και αποτελέσματα ρευμάτων και συσκευών αντιγράφονται σε:

- Φύλλα εργασίας για περαιτέρω ανάλυση (Ms Excel, Grapher, κ.ά.)
- Σχεδιαστικά προγράμματα (Auto Cad, Pro Engineer κ.ά.)
- Σε βάσεις δεδομένων για αποθήκευση και μελλοντική διαχείριση
- Σε λογισμικά επεξεργασίας κειμένου για επεξεργασία και αρχειοθέτηση (Ms Word κ.ά.).
- Αντιγραφή των σχεδίων (plots) και των γραφικών αναπαραστάσεων σε αναφορές.
 - Σε επεξεργαστές κειμένου
 - Σε προγράμματα δημιουργίας διαφανειών για παρουσιάσεις (Ms Power Point)

Τα πλεονεκτήματα στο χρήστη του λογισμικού είναι εμφανή. Η γρήγορη και αλάνθαστη μεταφορά δεδομένων των αποτελεσμάτων

4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Σχεδιασμός της εγκατάστασης

4.1.1 Η διάταξη του κύκλου

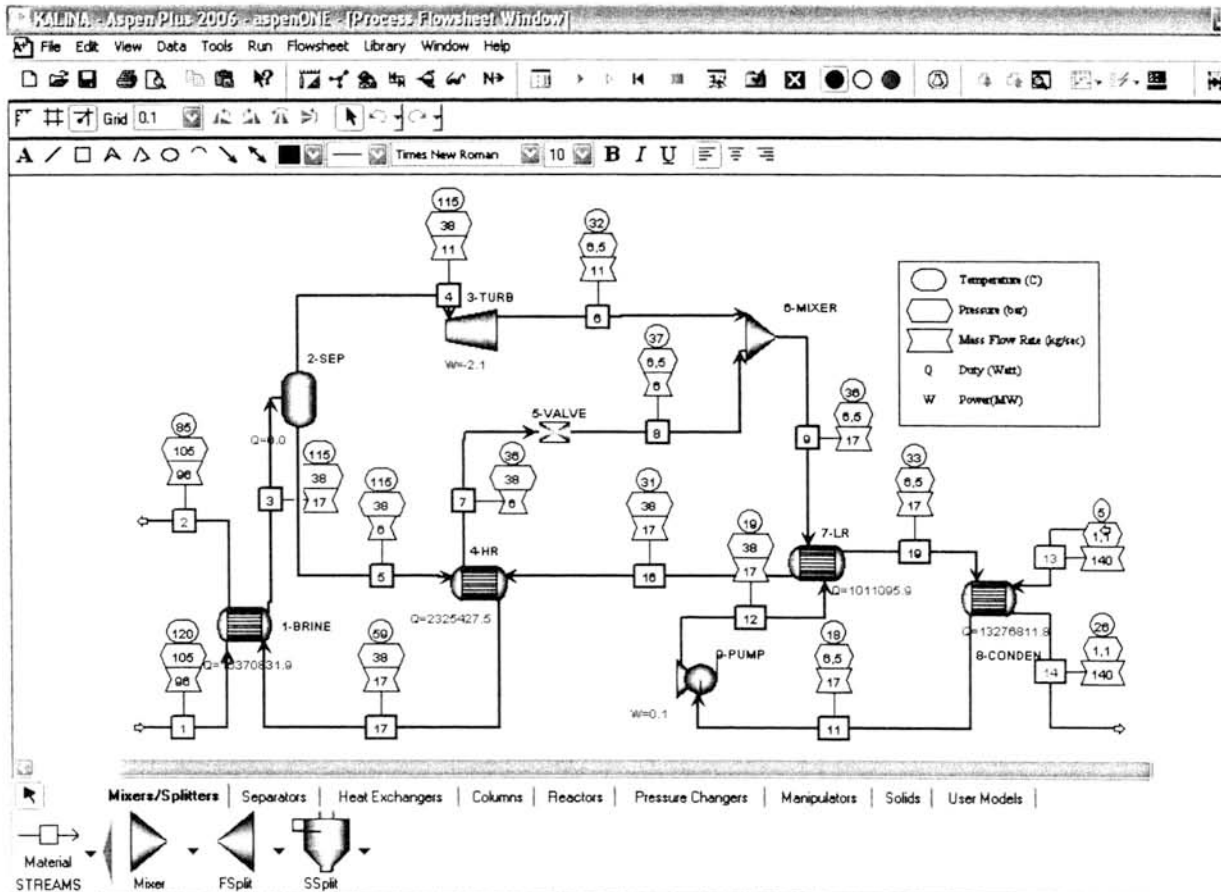
Το μοντέλο ονομάζεται Kalina-TK και αφορά γεωθερμική μονάδα παραγωγής ισχύος (θερμικής και ηλεκτρικής), η οποία εκμεταλλεύεται γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας (<150°C). Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο το κυριότερο χαρακτηριστικό του κύκλου Kalina είναι χρησιμοποίηση της επιπλέον θερμότητας για ηλεκτροπαραγωγή όταν η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού είναι πάνω από 80°C. Σύμφωνα με τον Valdimarsson [17] θερμοκρασίες κοντά στους 80°C είναι ιδανικές για εφαρμογές άμεσης θερμότητας. Ο κύκλος Kalina-TK που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 είναι βασισμένος στο κύκλο Kalina 34 (KCS34), ο οποίος εφαρμόζεται για γεωθερμικές εγκαταστάσεις χαμηλής θερμοκρασίας. Μια πολύ γνωστή εμπορική εφαρμογή του κύκλου αυτού πάνω στην οποία βασίστηκε η μελέτη του Kalina-TK, είναι η γεωθερμική μονάδα παραγωγής ισχύος στο Husavik της Ισλανδίας πληροφορίες για το οποίο έχουν δοθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ενεργειακή, εξεργειακή και θερμοοικονομική ανάλυση έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Aspen Plus και της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN ενώ μέρος των θερμοδυναμικών και οικονομικών αποτελεσμάτων επεξεργάστηκε μέσω του Microsoft Excel. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ρευστών (γεωθερμικό ρευστό, μείγμα αμμωνίας-νερού και ψυκτικού νερό) διεξήχθησαν μέσω των ενσωματωμένων βιβλιοθηκών του Aspen Plus.

Το γεωθερμικό ρευστό (*brine*) αντλείται μέσω γεώτρησης από υπόγεια γεωθερμική δεξαμενή. Το μέγεθος της αντλίας είναι εξαρτώμενο από τη γεωθερμική δεξαμενή και την επιθυμητή παροχή. Φίλτρα καθαρισμού για την άμμο και τα ογκώδη υλικά είναι αναγκαία προκειμένου να προστατευθεί ο εξοπλισμός και το δίκτυο σωληνώσεων από διάβρωση και φθορές.

Στη συνέχεια το ρεύμα του γεωθερμικού ρευστού, σε υψηλή πίεση και απαλλαγμένο πλέον από περιττά συστατικά (ρεύμα 1), εισέρχεται σε γεωεναλλάκτη (ατμοποιητή) αυλών – κελύφους 2 ρευμάτων (1-BRINE) με σκοπό τη θέρμανση του

ρευστού λειτουργίας. Στην πραγματικότητα υπάρχουν τρία στάδια για τη θέρμανση του ρευστού λειτουργίας, καθώς αρχικά το μείγμα αμμωνίας - νερού (ρεύμα 12) εισέρχεται στις συσκευές ανάκτησης θερμότητας χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας 7-LR κα 4-HR (ρεύματα 12 και 16) και προθερμαίνεται πριν εισέλθει στη συσκευή 1-BRINE (ρεύμα 17) όπου και εξατμίζεται μερικώς.



4.1 Διάγραμμα ροής της μονάδας Kalina-TK στο Aspen Plus

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η διαδικασία αυτή πλεονεκτεί σε σχέση με τη διεργασία της κοινής εξάτμισης ενός σταδίου (π.χ. συμβατικός κύκλος Rankine) στο γεγονός ότι μειώνει τις μη αντιστρεπτές μεταβολές με συνέπεια την διατήρηση επιπλέον εξέργειας. Το γεωθερμικό ρευστό μέσω του ρεύματος 2 είτε χρησιμοποιείται περεταίρω σε εφαρμογές άμεσης θέρμανσης όπως αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, είτε επιστρέφει στη υπόγεια δεξαμενή. Στο πρώτο κεφάλαιο επίσης αναλύθηκαν οι λόγοι για τους οποίους είναι πολύ χρήσιμο να επιστρέφει το γεωθερμικό νερό πίσω στον ταμιευτήρα.

Ο κορεσμένος ατμός του μείγματος αμμωνίας-νερού εισάγεται σε διαχωριστή (2-SEP) με σκοπό τον διαχωρισμό της αέριας και υγρής φάσης του. Το αέριο ρεύμα (ρεύμα 4) -πλούσιο σε αμμωνία και ενεργειακό περιεχόμενο- εισέρχεται στο στρόβιλο (3-TURB). Ταυτόχρονα το κορεσμένο υγρό (ρεύμα 5) συνεισφέρει στην προθέρμανση του μείγματος πριν την είσοδο του στο γεωεναλλάκτη. Στη συνέχεια τα δύο ρεύματα ενώνονται στον μείκτη (6-MIXER) και το ενιαίο ρεύμα (ρεύμα 9) εισέρχεται στη συσκευή ανάκτησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (7-HP). Από εκεί με τη σειρά του το ρεύμα 19 συμπυκνώνεται (8-CONDEN) και συμπιέζεται (9-PUMP) και στη συνέχεια προθερμαίνεται στις δύο συσκευές ανάκτησης θερμότητας πριν εισαχθεί εκ νέου στον ατμοποιητή.

Επισημαίνεται ότι το γεωθερμικό ρευστό καθ' όλη τη διάρκεια των διεργασιών πρέπει να διατηρείται σε τέτοια θερμοκρασία ώστε να αποφευχθεί η αντίδραση των μη – συμπυκνώσιμων αερίων που βρίσκονται μέσα στο γεωθερμικό νερό. Πρόκειται για αέρια τα οποία συμπυκνώνονται δύσκολα μέσω ψύξης και αποτελούνται κυρίως από άζωτο, ελαφρούς υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα κ.ά.

4.1.2 Μεταβλητές Σχεδιασμού - Παράμετροι - Παραδοχές

Η ανάλυση του Kalina-TK βασίστηκε αρχικά στα αποτελέσματα της αντίστοιχης γεωθερμικής εγκατάστασης στο Husavik της Ισλανδίας (Σχήμα 2.16). Από την βιβλιογραφία αλιεύτηκαν τα παρακάτω στοιχεία [26]:

Ανεξάρτητες Μεταβλητές:

- Θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού νερού: 124°C
- Η χαμηλή πίεση του συστήματος στην έξοδο του στρόβιλου: 6 bar
- Η υψηλή πίεση του συστήματος στην έξοδο από την αντλία: 32,3 bar
- Η σύνθεση του μείγματος αμμωνίας-νερού: 82%
- Θερμοκρασία νερού ψύξης: 5°C
- Παροχή γεωθερμικού ρευστού: 90 kg/s

Αποτελέσματα:

- Παραγόμενη ισχύς στο στρόβιλο: 1,8 MW
- Παροχή ρευστού λειτουργίας 16,8 kg/s

Με τη βοήθεια του Aspen Plus επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση της μονάδος στο Husavik ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Ο πίνακας 4.1 δείχνει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης Kalina-TK ενώ ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει το εύρος τιμών των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος κατά τη βελτιστοποίηση ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης.

Πίνακας 4.1 – Παράμετροι της εγκατάστασης Kalina-TK

Παράμετρος	Μονάδα	Ορισμός
$x_{NH_3} = 83$	[%]	Το ποσοστό της αμμωνίας στο μείγμα αμμωνίας νερού
$T_{geo} = 120$	[°C]	Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού
$\Delta T_{1.in-out} = 5$	[°C]	Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ γεωθερμικού ρευστού και υψηλότερης θερμοκρασίας συστήματος
$\eta_{tur} = 85$	[%]	ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου
$\eta_{pump} = 70$	[%]	ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας
$T_{cool} = 5$	[°C]	Η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού νερού
$P_{cool} = 1$	[bar]	Η πίεση εισόδου του ψυκτικού νερού
$\Delta T_{2.in-out} = 5$	[°C]	Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου κρύου ρεύματος και εξόδου θερμού στον εναλλάκτη LR
$\Delta T_{3.in-out} = 5$	[°C]	Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου θερμού ρεύματος και εξόδου κρύου στον εναλλάκτη HR

Πίνακας 4.2 – Εύρος μεταβλητών βελτιστοποίησης Kalina-TK

Παράμετρος	Μονάδα	Ορισμός	Εύρος
P_{tur}	[bar]	Η χαμηλή πίεση του συστήματος	$6,6 < P_{tur} < 10$
P_{pump}	[bar]	Η υψηλή πίεση του συστήματος	$25 < P_{pump} < 40$
\dot{m}_{geo}	[kg/s]	Μαζική παροχή γεωθερμικού ρευστού	$60 < \dot{m}_{geo} < 120$
P_{geo}	[bar]	Πίεση του γεωθερμικού ρευστού	$10 < P_{geo} < 15$

Παρακάτω παραθέτονται οι παραδοχές που λήφθηκαν κατά το σχεδιασμό του Kalina-TK:

- Οι φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες του γεωθερμικού ρευστού προσομοιώνονται με αυτές του νερού ($C_p=4,19 \text{ kJ/kgK}$, $\rho=1 \text{ kg/m}^3$)
- Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των συστατικών χρησιμοποιήθηκε η καταστατική εξίσωση Peng-Robinson
- Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά εναλλακτών θερμότητας: 5°C
- Η πτώσεις πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας θεωρούνται αμελητέες

4.1.3 Εξοπλισμός

Σύμφωνα με τον DiPirro [9] ο απαραίτητος εξοπλισμός της προτεινόμενης γεωθερμικής εγκατάστασης αποτελείται από:

- Για την άντληση του γεωθερμικού ρευστού χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες φυγοκεντρικές αντλίες.
- Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση φίλτρων για την άμμο και τα ογκώδη στερεά αντικείμενα που τυχόν αντλούνται από την υπόγεια γεωθερμική δεξαμενή
- Προθερμαντήρες (4-HR, 7-LR): πρόκειται για οριζόντιους, κυλινδρικούς εναλλάκτες αυλών – κελύφους δύο ρευμάτων (μείγματα αμμωνίας σε διαφορετικές συγκεντρώσεις
- Γεωεναλλάκτη (BRINE) και συμπυκνωτή (CONDENSER): πρόκειται για οριζόντιο, κυλινδρικό εναλλάκτη αυλών – κελύφους δύο ρευμάτων (γεωθερμικό νερό – υγρό μείγμα αμμωνίας – νερού και μείγματος αμμωνίας – νερού ψυκτικού νερού αντίστοιχα)
- Στρόβιλο (TURBINE): πρόκειται για αξονικό ή ακτινικό στρόβιλο συνδεδεμένο με γεννήτρια
- Αντλία τροφοδοσίας συστήματος(PUMP): Αντλίες συμπυκνώματος ή Booster αν είναι απαραίτητο
- Σύστημα αποθήκευσης: Δεξαμενή και συλλέκτης αρκετά μεγάλοι ώστε να είναι σε θέση να αποθηκεύσουν όλη τη ποσότητα του μείγματος καθώς και αντλίες κενού για την απομάκρυνση του κατά τη διάρκεια συντήρησης.
- Σύστημα επανέγχυσης: Αντλίες και σωληνώσεις

4.2 Ενεργειακή Ανάλυση

Το ποσοστό και η μαζική παροχή του μείγματος αμμωνίας – νερού μπορεί να αποτελούν μεταβλητές σχεδιασμού. Αυτές μπορούν να βρεθούν από τα μαζικά και θερμικά ισοζύγια του μείγματος:

$$\dot{m}_1(h_1 - h_2) = \dot{m}_3(h_3 - h_{17}) \quad (4.1)$$

$$\dot{m}_3x_3 = \dot{m}_4x_4 + \dot{m}_5x_5 \quad (4.2)$$

Από το θερμοδυναμικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1 προκύπτει το ενεργειακό ισοζύγιο για τον κύκλο Kalina-TK εάν δεν υπολογιστούν οι μεταφορές θερμότητας προς το περιβάλλον:

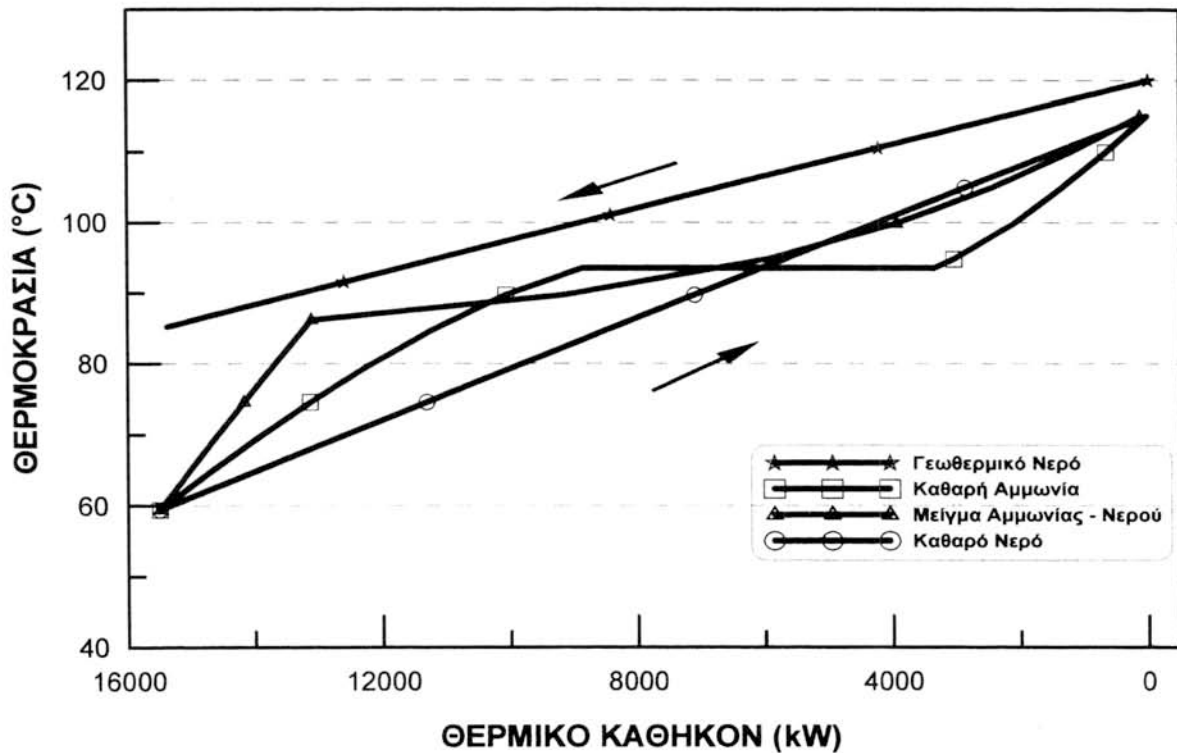
Πίνακας 4.3 – Παροχή, πίεση και θερμοκρασία στα ρεύματα του κύκλου Kalina-TK

ΡΕΥΜΑ	ΦΑΣΗ	ΠΑΡΟΧΗ [kg/s]	ΠΙΕΣΗ [bar]	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ [°C]
1	υγρό	96	10,5	120,00
2	υγρό	96	10,5	85,24
3	2 φάσεις	17	38,0	115,00
4	κορεσμένος ατμός	11	38,0	115,00
5	κορεσμένο υγρό	6,03	38,0	115,00
6	ατμός	10,97	6,6	31,68
7	υγρό	6	38,0	36,46
8	υγρό	6	6,6	37,10
9	2 φάσεις	17	6,6	36,46
11	υγρό	17	6,6	18,02
12	υγρό	17	38,0	18,86
13	υγρό	140	1,0	5,00
14	υγρό	140	1,0	25,93
16	υγρό	17	38,0	31,47
17	υγρό	17	38,0	59,41
19	2 φάσεις	17	38,0	33,00

Τα αποτελέσματα του κύκλου Kalina-TK για το κάθε ρεύμα παρουσιάζονται τόσο στον Πίνακα 4.3, όσο και στο διάγραμμα ροής της εγκατάστασης (Σχήμα 4.1). Το διάγραμμα εμπεριέχει περισσότερα υπολογιστικά αποτελέσματα όπως π.χ. την ισχύ

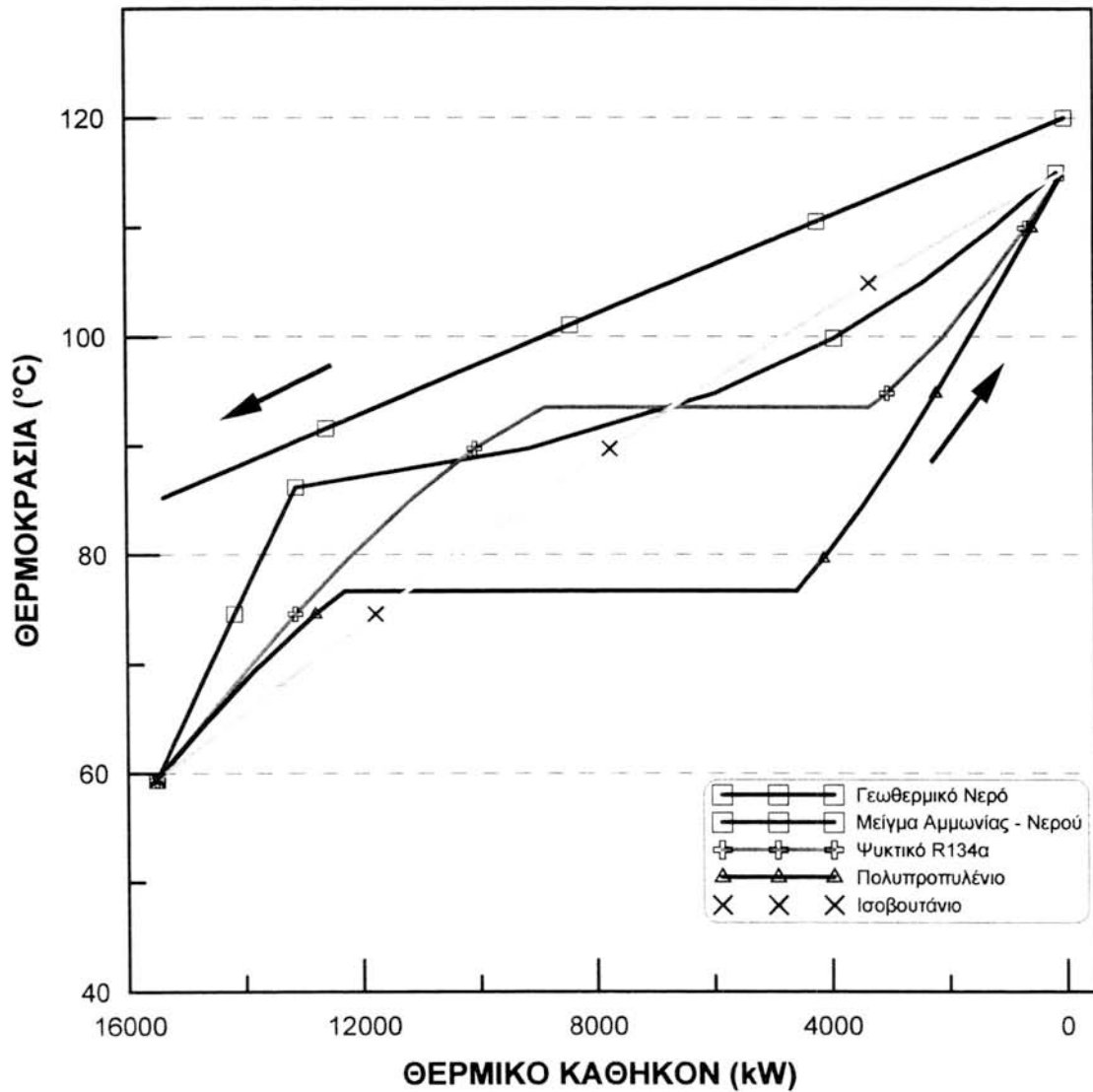
του στροβίλου και της αντλίας και τις θερμότητες εναλλαγής στους τέσσερις εναλλάκτες του συστήματος (μπλε τιμές δίπλα στη συσκευή).

Τα Σχήματα 4.3 – 4.7 αποτελούν τα διαγράμματα θερμοκρασίας - θερμορροής $[T-\dot{Q}]$ και δείχνουν τα θερμοκρασιακά προφίλ των διεργασιών ατμοποίησης, συμπύκνωσης και προσθήκης θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας. Η καμπύλη βρασμού του μείγματος αμμωνίας - νερού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4 όπου ατμοποιείται περίπου το 65% από αυτό στον γεωεναλλάκτη. Η μερική εξάτμιση βοηθάει στο γεγονός ότι μειώνεται η περιοχή ανάμεσα στις δυο καμπύλες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Το θερμοκρασιακό προφίλ στο Σχήμα 4.7 δείχνει ότι το μείγμα αμμωνίας- νερού συμπυκνώνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών. Η θερμοκρασία εξόδου από το συμπυκνωτή είναι χαμηλότερη από αυτή της εξόδου του ψυκτικού νερού. Στον κύκλο Kalina, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας προθεμαίνουν το μείγμα πριν εισέλθει στον ατμοποιητή κάνοντας δυνατό τον υψηλότερο βαθμό μετατροπής ισχύος αλλά και μια υψηλότερη θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού νερού για πιθανή εκμετάλλευσή του.



Σχήμα 4.2 – Σύγκριση μείγματος καθαρών ουσιών στον γεωεναλλάκτη

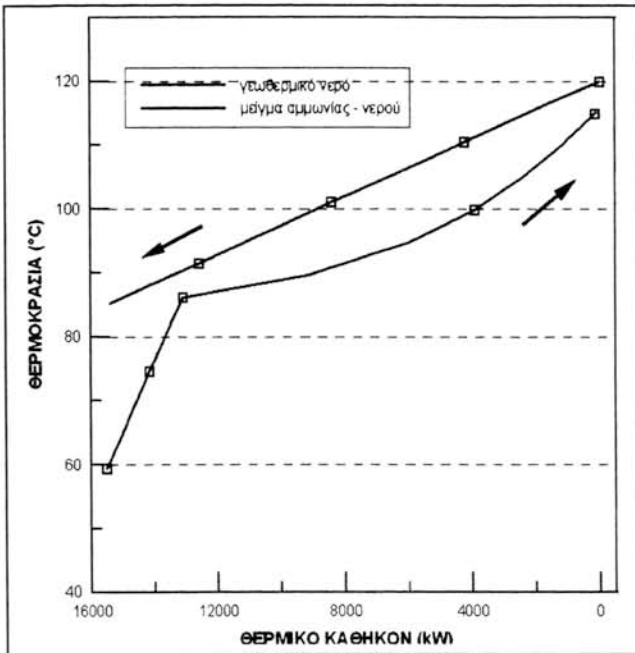
Στο Σχήμα 4.2 γίνεται αντιληπτό το συγκριτικό πλεονέκτημα του μείγματος αμμωνίας - νερού σε σχέση με τις αντίστοιχες καθαρές ουσίες από τις οποίες προήλθε. Όσο μικρότερο είναι το εμβαδό ανάμεσα στις δύο καμπύλες (θερμό και ψυχρό ρεύμα) σε έναν εναλλάκτη, τόσο μειώνονται οι θερμικές απώλειες κατά την εναλλαγή.



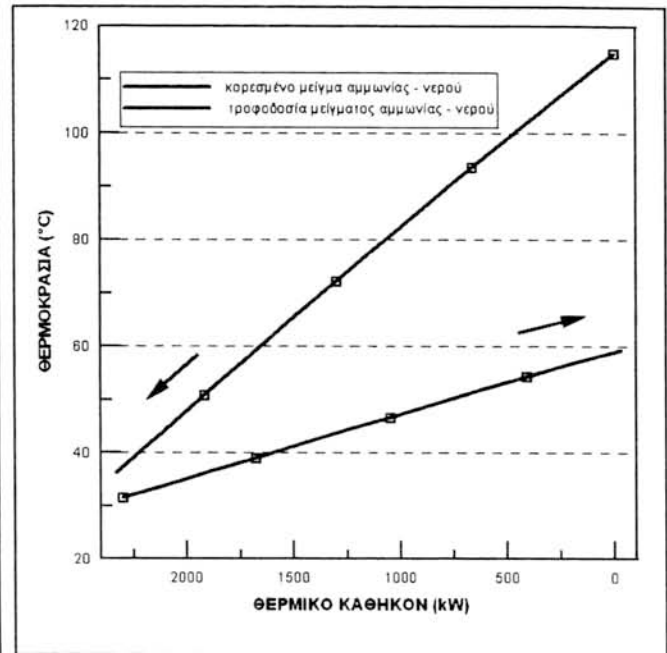
Σχήμα 4.3 Σύγκριση ρευστών λειτουργίας στον γεωεναλλάκτη

Στο σχήμα 4.3 παρατηρείται ότι για τις δεδομένες συνθήκες του προβλήματος σχεδιασμού - βελτιστοποίησης κανένα από τα υποψήφια ρευστά λειτουργίας δεν θα μπορούσε να δώσει καλύτερη απόδοση στον γεωεναλλάκτη, αποτέλεσμα το οποίο είναι αναμενόμενο. Η επιλογή του κύκλου Kalina θεωρείται η καταλληλότερη σε σχέση

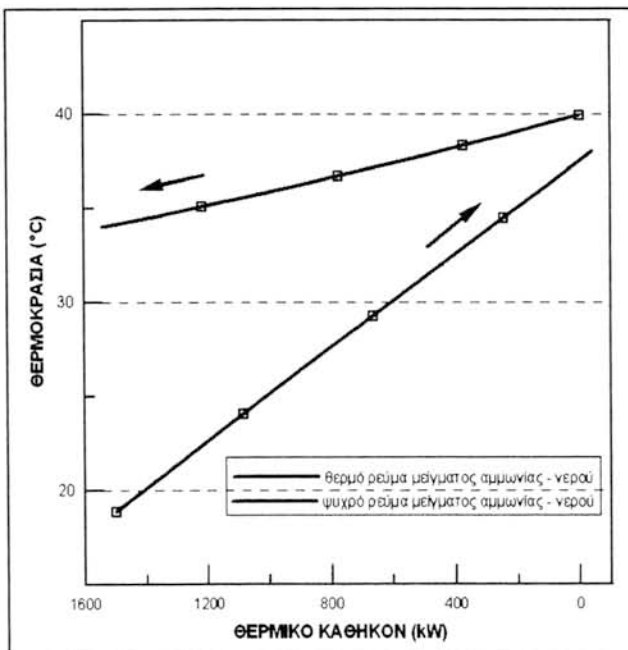
με τους προτεινόμενους οργανικούς κύκλους Rankine κυρίως λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του γεωθερμικού νερού.



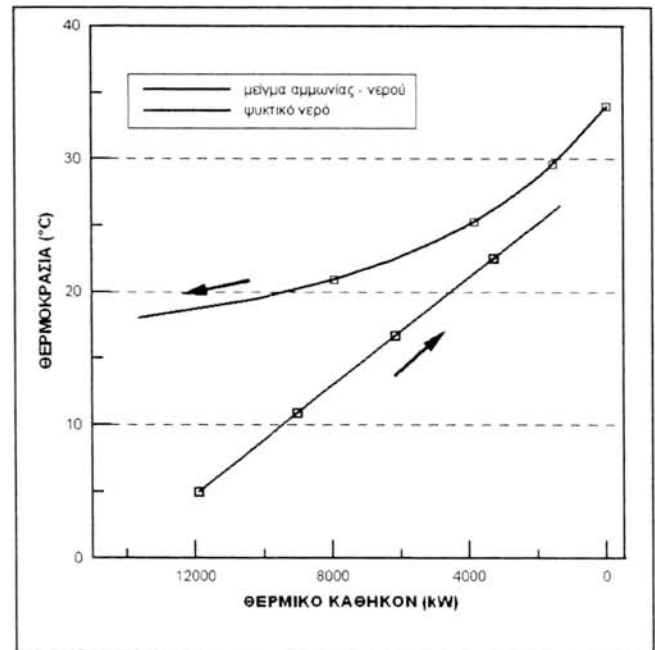
Σχήμα 4.4 – Διάγραμμα T-Q για τον γεωεναλλάκτη



Σχήμα 4.5 – Διάγραμμα T-Q για τη συσκευή ανάκτησης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας



Σχήμα 4.6 – Διάγραμμα T-Q για τη συσκευή ανάκτησης θερμότητας χαμηλής

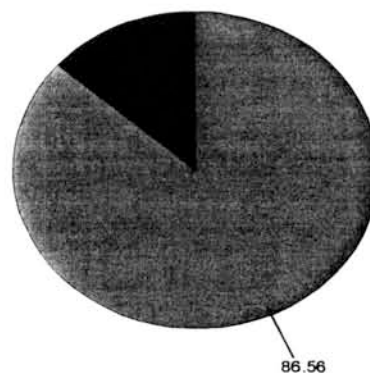


Σχήμα 4.7 – Διάγραμμα T-Q για το συμπυκνωτή

Πίνακας 4.3 – Εκμετάλλευση ενέργειας στον Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΑ	ΠΟΣΟΣΤΟ
			[%]
Γεωεναλλάκτης	15,37083	MWt	100,0
Συμπυκνωτής	13,2768118	MWt	86,56
LR Εναλλάκτης	1,01109591	MWt	6,5780
HR Εναλλάκτης	2,32543	MWt	15,1288
Στρόβιλος	2,20849	MWe	14,3680
Αντλία	0,08900	MWe	0,5790
Καθαρή Ισχύς	2,14223	MWe	13,44

13.44



86.56

Σχήμα 4.9 - Κατανομή εκμετάλλευσης Ενέργειας

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 δημιουργήθηκαν από την προσομοίωση του θερμοδυναμικού μοντέλου στο λογισμικό Aspen Plus βάσει των δεδομένων του Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.5 – Πίνακας θερμοδυναμικών μεγεθών στον Kalina-TK

ΡΕΥΜΑ	ΕΝΘΑΛΠΙΑ [Kj/Kg]	ΘΕΡΜΟΡΟΗ [kW]	ΕΝΤΡΟΠΙΑ [kJ/kgK]	ΕΞΕΡΓΕΙΑ [kj/kg]	ΡΟΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ [kW]
1	547,467	52557	1,6568	67,784	6507,3
2	387,354	37186	1,2305	31,776	3050,5
3	1190,67	20241	3,407	201,55	3426,3
4	1500,53	16459	4,3558	252,27	2767,2
5	549,085	3311,5	1,6861	58,261	351,38
6	1299,19	14251	4,5234	2,1622	23,717
7	163,507	986,11	0,5784	-4,877	-29,42
8	163,507	986,11	0,5933	-9,199	-55,48
9	923,964	15707	3,1279	16,098	273,67
11	83,4992	1419,5	0,296	0	0
12	90,2384	1534,1	0,3015	5,1251	87,126
13	22,698	3177,7	0,0823	-1,3458	-188,41
14	117,532	16455	0,4111	0,4871	68,195
16	149,709	2545	0,5009	6,5591	111,5
17	286,499	4870,5	0,9304	18,334	311,68
19	864,494	14696	2,9347	47,033	218,64

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε ανάλυση των βαθμών απόδοσης μιας εγκατάστασης. Η απόδοση της εγκατάστασης Kalina-TK με βάση τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο είναι:

$$\eta_I = \frac{W_{net}}{Q_h} = \frac{P_{turb}}{Q_{IN}} = 13,44 \% \quad (4.3)$$

Ενώ ο υψηλότερος βαθμός μετατροπής ενέργειας (βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot) είναι:

$$\eta_{carnot} = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right) \cdot 100 = 28,96 \% \quad (4.4)$$

Όπως όμως έχει ήδη αναφερθεί ο κύκλος Carnot δε θα έπρεπε να χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς σε μια γεωθερμική εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Μέγιστος ιδανικός βαθμός απόδοσης (βαθμός απόδοσης κύκλου Lorenz):

$$\eta_{Lorenz} = 1 - \frac{(T_{hr,out} - T_{hr,in}) / \ln(T_{hr,out} / T_{hr,in})}{(T_{hs,in} - T_{hs,out}) / \ln(T_{hs,in} / T_{hs,out})} = 20,76\% \quad (4.5)$$

Για να οριστεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός αξιοποίησης της ενέργειας στην μελετώμενη εγκατάσταση θα πρέπει πρώτα να γίνει η εξεργειακή ανάλυση του συστήματος που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3 Εξεργειακή Ανάλυση

4.3.1 Ορισμός της εξέργειας

Με τον όρο εξέργεια ή διαθεσιμότητα [Etot] εννοούμε το μέγιστο θεωρητικά διαθέσιμο έργο, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί καθώς ένα σύστημα αντιδρά με το άμεσο περιβάλλον μέχρις ότου να επέλθει ισορροπία και μπορεί να έχει πολλές συνιστώσες όπως: χημική [Ech], φυσική [Eph] κινητική και δυναμική. Η συνολική εξέργεια είναι το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών. Η εξέργεια μπορεί να μεταφερθεί με τρεις τρόπους: α) μέσω έργου, β) μέσω μεταφοράς θερμότητας και γ) μέσω έργου ροής. τη συνέχεια της εξεργειακής μελέτης για την εγκατάσταση Kalina-TK η χημική, η δυναμική και η κινητική εξέργεια θεωρούνται αμελητέες.

$$EX_{tot} = EX^{PH} + EX^{KN} + EX^{PT} + EX^{CH}$$

(4.6)

Η θερμότητα που μεταφέρεται από ένα ανοιχτό σύστημα σε ένα μέσο ισούται με την ειδική φυσική εξέργεια εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και την πίεση του μέσου αυτού (Bejan et al, 1996). Συνεπώς για τη συνολική εξέργεια ισχύει:

$$EX_{tot} = EX^{PH} = m \left[\bar{h} - \bar{h}_0 + T_0 \left(\bar{s} - \bar{s}_0 \right) \right]$$

(4.7)

Όπου ο δείκτης μηδέν αναφέρεται στην κατάσταση περιβάλλοντος της διεργασίας.

Επιπλέον, η εξέργεια σε ένα ρεύμα ισούται με την ειδική εξέργεια του ρεύματος αυτού πολλαπλασιασμένη με τη μαζική παροχή του.

$$EX_i = \dot{m}_i \cdot e_i$$

(4.8)

Όπου ο δείκτης i προσδιορίζει το εκάστοτε ρεύμα.[22]

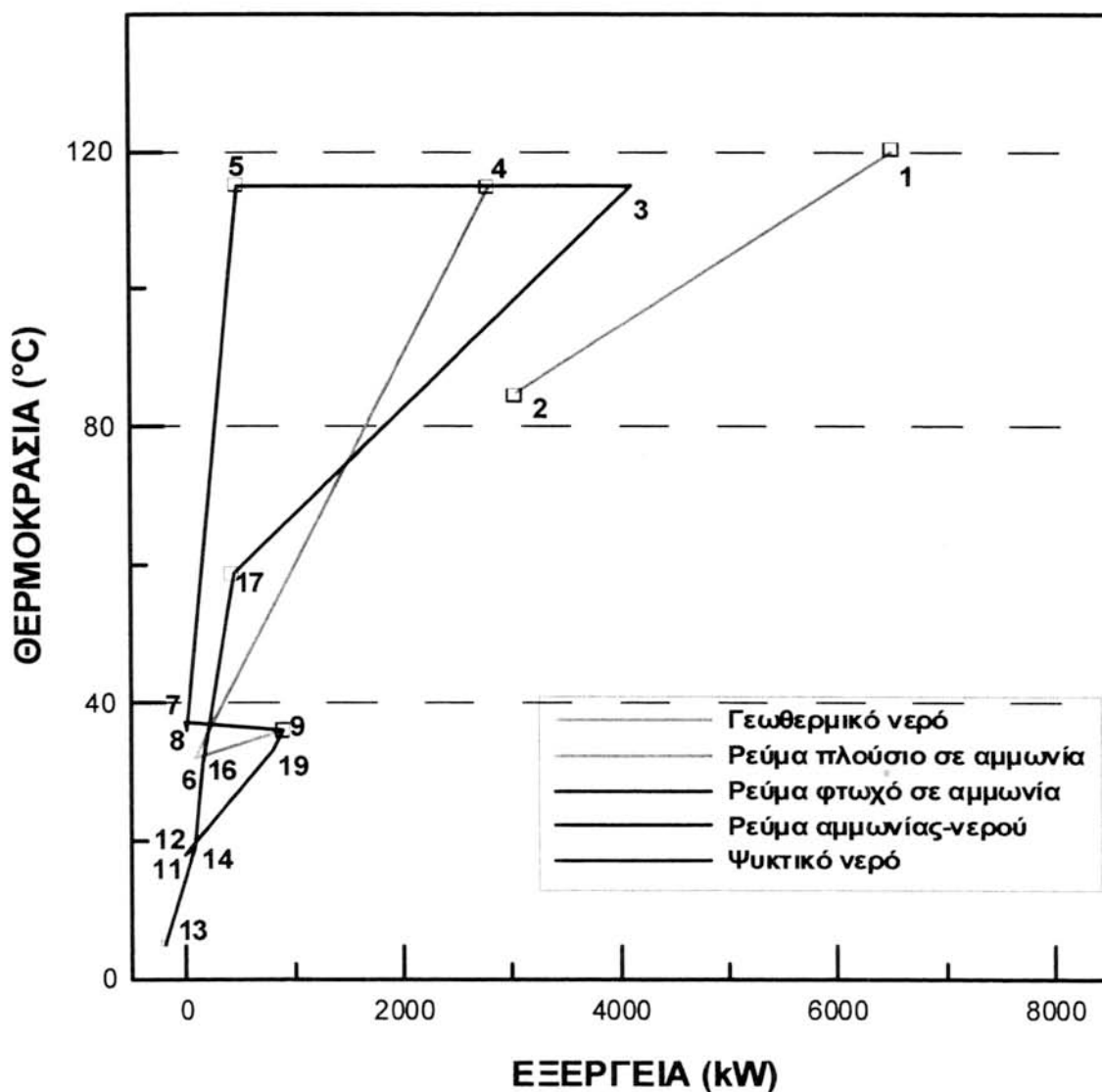
4.3.2 Ανάλυση

Η μέθοδος της εξεργειακής ανάλυσης ή ανάλυσης διαθεσιμότητας (availability analysis) επιτρέπει τον καθορισμό της θέσης, της αιτίας και του πραγματικού μεγέθους της ενέργειας που σπαταλιέται ή χάνεται σε ένα θερμικό σύστημα. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό νέων, ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων και για τη βελτίωση των υπαρχόντων. Για παράδειγμα, σε μια ανάλυση με βάση τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, ο συμπυκνωτής μιας εγκατάστασης ισχύος είναι πιθανό να θεωρηθεί λανθασμένα ως η συσκευή με την μεγαλύτερη υπαιτιότητα για το διαφαινόμενο χαμηλό βαθμό απόδοσης. Μια εξεργειακή ανάλυση αποκαλύπτει όχι μόνο ότι η συμβολή του συμπυκνωτή είναι σχετικά ασήμαντη, αλλά και ότι ο ατμοποιητής είναι αυτός που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη μειωμένη απόδοση και τις αναντιστρεπτότητες.

Εξ' αιτίας της καταστροφής εξέργειας από τις θερμικές διεργασίες, το παραγόμενο έργο είναι πάντα μικρότερο από το μέγιστο δυνατό. Για το λόγο αυτό, με την ανάλυση της απώλειας έργου στην εγκατάσταση είναι δυνατό να εντοπιστούν (ποσοτικά και

ποιοτικά) ελαττώματα και να προταθούν βελτιωτικές κινήσεις. Επίσης διαφορετικά είδη ενέργειας συγκρίνονται με όρους εξέργειας.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της Γης είναι συνήθως ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μια τυπική θερμοκρασία στα μελετώμενα βάθη είναι 18°C. Για το λόγο αυτό, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη εξεργειακή ανάλυση θεωρείται 18°. Επίσης η πίεση αναφοράς στο δίκτυο του Kalina-TK είναι 6,5 bar αφού είναι ένα κλειστό σύστημα ανεξάρτητο από την ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 4.10 – Διάγραμμα T-Ex της εγκατάστασης Kalina-TK

Το σχήμα 4.10 δείχνει τη ροή εξέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου Kalina-TK σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Παρατηρείται αύξηση της εξεργειακής ροής κατά τη μείξη των δυο κορεσμένων ρευμάτων αμμωνίας-νερού. Μια πιθανή εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι η χρήση όμοιων συνθηκών περιβάλλοντος για τις διαφορετικές συστάσεις των ρευμάτων. Μια αναλυτικότερη προσέγγιση θα μπορούσε να λύσει το πρόβλημα αυτό.

4.3.3 Καταστροφή και απώλεια εξέργειας

Η φύση της εξέργειας διαφέρει από τη φύση της εντροπίας στο ότι η εξέργεια μπορεί να καταστραφεί, όχι όμως να παραχθεί. Ως εκ τούτου, η μεταβολή της εξέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μια διεργασίας είναι μικρότερη από την εξέργεια που μεταφέρεται κατά ένα ποσό ίσο με την εξέργεια που καταστρέφεται κατά τη διεργασία μέσα στα όρια του συστήματος. Η αρχή μείωσης της εξέργειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής [7]:

$$Ex_{IN} - Ex_{OUT} - Ex_D = \Delta Ex \quad (4.9)$$

Όπου ΔEx ορίζεται η μεταβολή της εξέργειας του συστήματος και Ex_D η καταστροφή της εξέργειας.

Για μια αντιστρεπτή διεργασία ο όρος καταστροφής της εξέργειας Ex_D εξαφανίζεται. Αν θεωρηθεί θετική η μεταφορά θερμότητας προς το σύστημα και η μεταφορά έργου από το σύστημα, η σχέση του γενικού ισοζυγίου ενέργειας (εξίσωση 4.) γράφεται:

$$0 = \sum_i \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right) Q_i - W_{net} + \sum Ex_{in} - \sum Ex_{out} - Ex_D \quad (4.10)$$

Σύμφωνα με τον Bejan (1996), σε μια σταθερή κατάσταση, ο ρυθμός της εξέργειας σε ένα ρεύμα ορίζεται ως χρονικός ρυθμός μεταφοράς της εξέργειας στην είσοδο και στην έξοδο του ρεύματος αυτού και ισούται με το άθροισμα του επιθυμητού προϊόντος και της απώλειας και καταστροφής εξέργειας του.

$$Ex_{F,i} = Ex_{D,i} + Ex_{L,i} + Ex_{P,i} \quad (4.11)$$

η καταστροφή εξέργειας, $Ex_{D,i}$ στην εγκατάσταση Kalina-TK λαμβάνει χώρα μέσω της μεταφοράς θερμότητας και τριβής. Η απώλεια εξέργειας $Ex_{L,i}$ συμβαίνει όταν ρεύματα ρέουν από την εγκατάσταση προς τα έξω και δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάποια άλλη διεργασία. Για κάθε ρεύμα του Kalina-TK το μέγεθος της καταστροφής της εξέργειας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 4.15. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην μελετώμενη εγκατάσταση δύο είναι τα ρεύματα στα οποία παρατηρείται απώλεια εξέργειας (γεωθερμικό και ψυκτικό νερό). Οι τιμές της ειδικής εξέργειας όπως και της ροής εξέργειας για κάθε ρεύμα του Kalina-TK παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6

Πίνακας 4.6 – Καταστροφή και απώλεια εξέργειας στον κύκλο Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	$Ex_{D,i}$ [kW]	$Ex_{L,i}$ [kW]
Γεωεναλλάκτης	342,07	3.050,52
Διαχωριστής	307,79	
Στρόβιλος	601,23	
Βαλβίδα	26,07	
HR Εναλλάκτης	30,64	
LR Εναλλάκτης	180,62	
Συμπυκνωτής	338,86	68,19
Αντλία	27,44	
Σύνολο	1.854,73	3.118,72

Οι τιμές της ροής της καταστροφής εξέργειας (πίνακας 4.6) αποδίδουν θερμοδυναμικές μετρήσεις για τις απώλειες απόδοσης της εγκατάστασης. Ένα σχετικό μέγεθος είναι και ο λόγος καταστροφής εξέργειας είτε με βάση τη προδιδόμενη εξέργεια από το γεωθερμικό νερό ($y_{D,geo}$), είτε με βάση τη συνολική καταστροφή εξέργειας ($y_{D,Total}$). Ομοίως ορίζεται ο λόγος απώλειας εξέργειας, συγκρίνοντας την απολεσθείσα εξέργεια αρχικά με την εξέργεια του γεωθερμικού νερού ($y_{L,geo}$), όπως και με τη συνολική απώλεια εξέργειας ($y_{L,Total}$). Τα αποτελέσματα αυτά διατίθενται στον Πίνακα 6.6.

4.4 Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης

Η έννοια του εξεργειακού βαθμού απόδοσης αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο και αποτελεί επί της ουσίας το λόγο μεταξύ προϊόντος και καυσίμου και δίνεται από τη σχέση (Bejan et al, 2006):

$$\eta_{EX} = \frac{P_{net}}{EX_{brine} - EX_{Lo} - EX_{cond,Lo}} = 59,84 \quad (4.12)$$

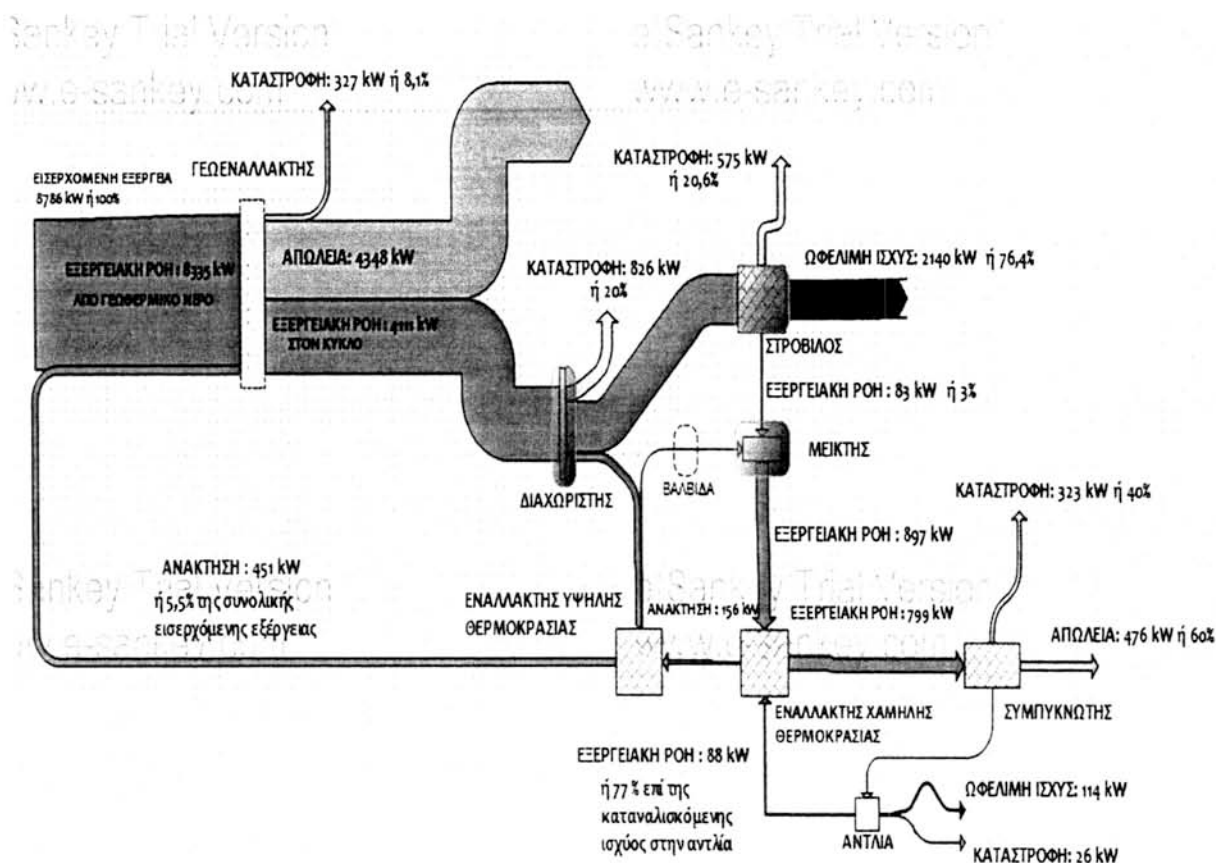
Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για τη μελετώμενη μονάδα υπολογίστηκε θεωρώντας ως καύσιμο το γεωθερμικό νερό και προϊόν την παραγόμενη ισχύ.

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων που παραθέτονται στο Παράρτημα ενώ τα αποτελέσματα για τις κύριες συσκευές του κύκλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4.6 – Εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης συσκευών Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	ε_{ex} [%]
Γεωεναλλάκτης	90,1
Συμπυκνωτής	55
LR Εναλλάκτης	52,57
HR Εναλλάκτης	44,31
Στρόβιλος	78,08
Διαχωριστής	91,02
Αντλία	76,5
Εγκατάσταση	23,57

Οι εξεργειακές αποδόσεις της κάθε συσκευής ‘προδίδουν’ ποιοτικά και ποσοτικά τα σημεία εκείνα στα οποία πρέπει ο σχεδιαστής να βελτιώσει. Για το λόγο αυτό στην επόμενη παράγραφο γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του κύκλου Kalina-TK πάνω σε μια ποικιλία μεταβλητών με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά του.

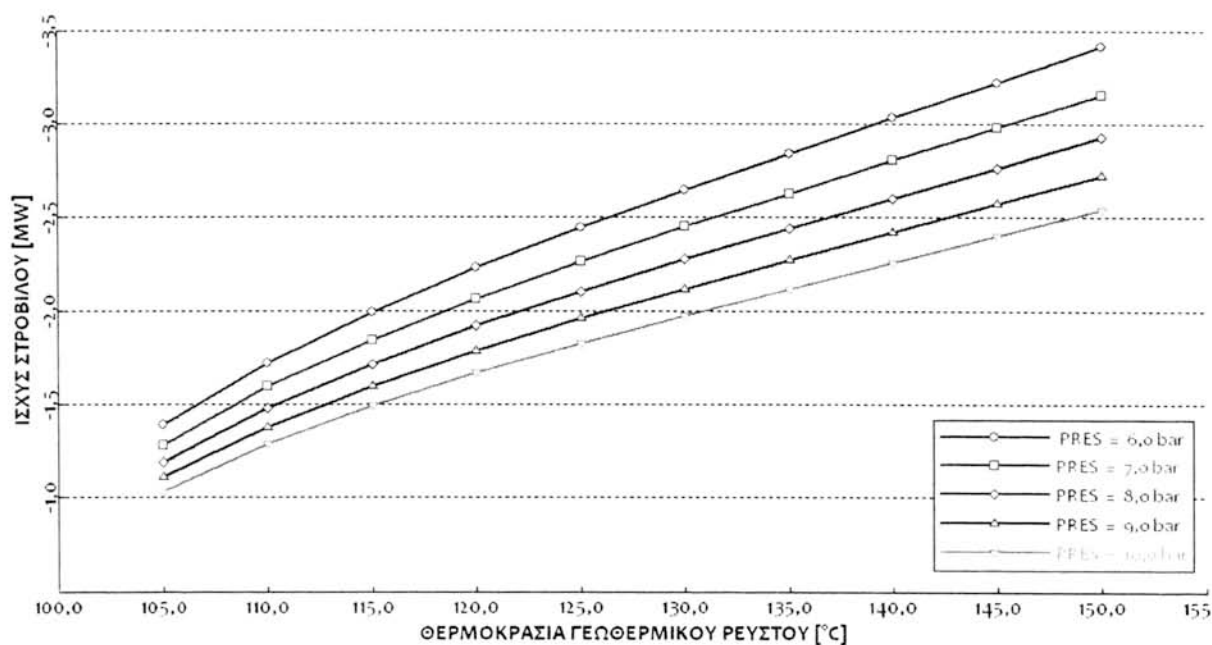


Σχήμα 4.11 – Διάγραμμα Grassmann της εγκατάστασης Kalina-TK

Το διάγραμμα Grassmann είναι μια γραφική μέθοδος περιγραφής των εξεργειακών ροών και των μεγεθών καταστροφής και απώλειας τους στην εγκατάσταση. Το Σχήμα 4.11 δείχνει το διάγραμμα Grassmann της εγκατάστασης Kalina-TK και έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τα δεδομένα των Πινάκων 4.1 - 4.6. Με μωβ χρώμα συμβολίζονται οι ροές απώλειας εξέργειας, με κίτρινο οι ροές καταστροφής, με κόκκινο η ωφέλιμη ισχύς ενώ με πράσινο οι εξεργειακές ροές σε κάθε ρεύμα. Στο διάγραμμα το πάχος κάθε ροής είναι απόλυτα ανάλογο με το μέγεθος της εξέργειας του κάθε ρεύματος. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της εξεργειακής ροής. Αρχικά, ο κύκλος ξεκινάει με τη ροή του μείγματος να θερμαίνεται καθώς ρέει ως ψυχρό ρεύμα μέσω του γεωεναλλάκτη στον διαχωριστή. Το γεωθερμικό νερό εισάγεται ως θερμό ρεύμα στον γεωεναλλάκτη και μεταφέρει μια συγκεκριμένη ποσότητα εξέργειας στον κύκλο Kalina-TK για ηλεκτροπαραγωγή. Η υπόλοιπη εξέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές άμεσης θερμότητας είτε να επιστρέψει στον γεωθερμικό ταμιευτήρα.

4.5 Ανάλυση ευαισθησίας και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

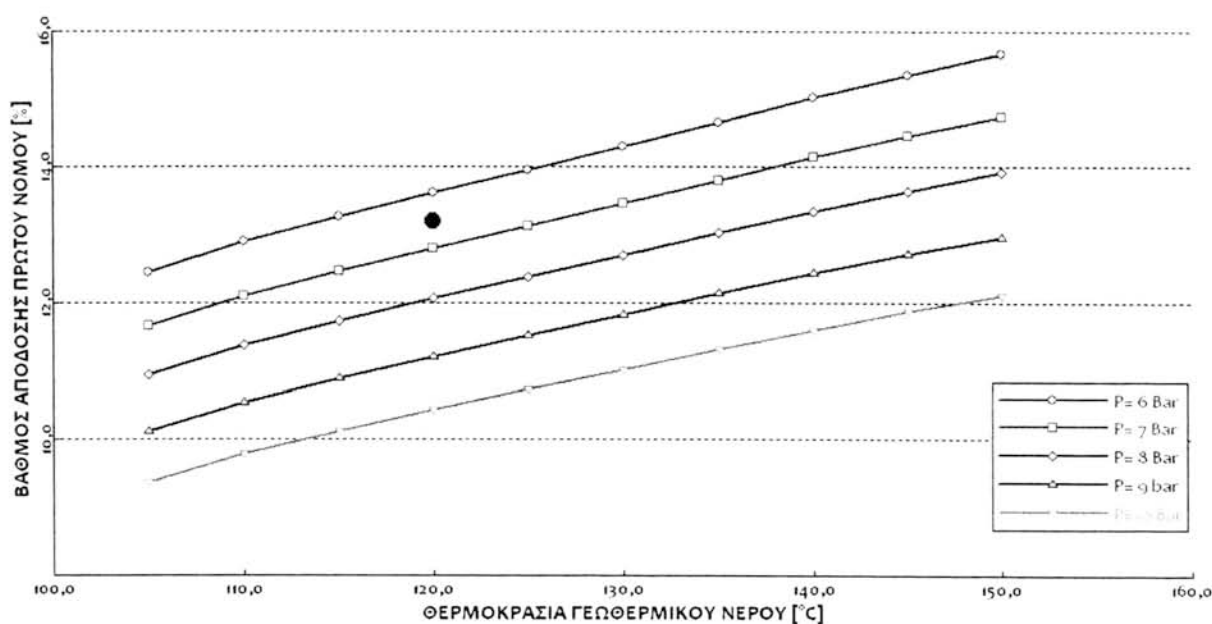
Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η θερμοδυναμική ανάλυση έγινε σε γεωθερμική εγκατάσταση παραγωγής ισχύος κύκλου Kalina θεωρώντας ορισμένες παραδοχές, και επιλέγοντας το εύρος τιμών των μεταβλητών σχεδίασης από τη βιβλιογραφία. Για την προσομοίωση του μοντέλου αυτού διατηρήθηκε σταθερή η σύσταση του μείγματος αμμωνίας – νερού αφήνοντας ως υπολογιζόμενες μεταβλητές τόσο τη θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού νερού από τον εναλλάκτη, όσο και την παροχή του ρευστού λειτουργίας. Αντικείμενο ενδιαφέροντος αποτελεί η συνολική θερμοδυναμική συμπεριφορά του συστήματος στις μεταβολές των συνθηκών που έχουν τεθεί, καθώς και η διερεύνηση της βέλτιστης επιλογής δεδομένων. Τα παραπάνω μπορούν να απαντηθούν με τη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας των μεταβλητών σχεδίασης.



Σχήμα 4.12 - Μεταβολή της ισχύος του στρόβιλου σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές χαμηλές πιέσεις συστήματος

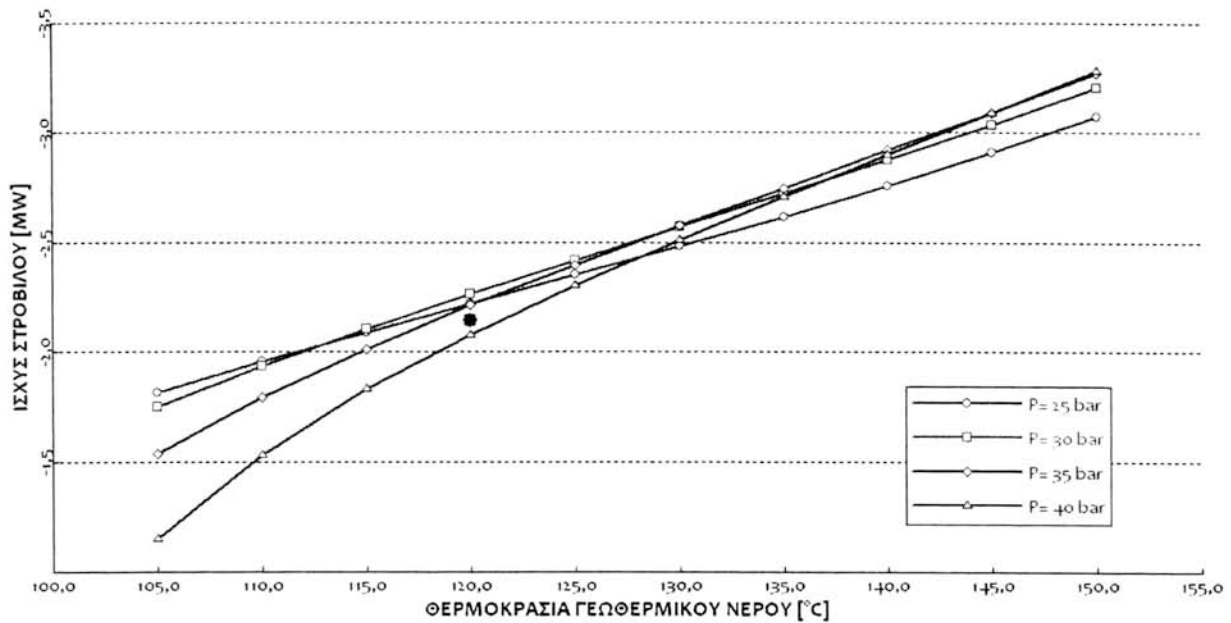
Αρχικά, το Σχήμα 4.12 αποτυπώνει τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος στο στρόβιλο καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού νερού για ένα εύρος πιέσεων εξόδου από το στρόβιλο (χαμηλή πίεση συστήματος). Θα πρέπει να

σημειωθεί ότι το εύρος της θερμοκρασιών της πηγής περιορίζεται από το υπάρχον γεωθερμικό πεδίο. Στην περίπτωση του Kalina-TK μελετώνται γεωθερμικά πεδία χαμηλής και μέσης ενθαλπίας, για το λόγο αυτό η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει τους 150 °C. Όπως είναι αναμενόμενο για σταθερή παροχή στα 17 kg/s όσο αυξάνει η θερμοκρασία της πηγής και μειώνεται η πίεση εξόδου από το στρόβιλο η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται. Το ίδιο συμβαίνει και με το βαθμό απόδοσης σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο (Σχήμα 4.13) όπου έχει όμοια συμπεριφορά με την ισχύ του στρόβιλου. Με την κόκκινη βούλα συμβολίζονται τα αποτελέσματα της βασικής ανάλυσης.



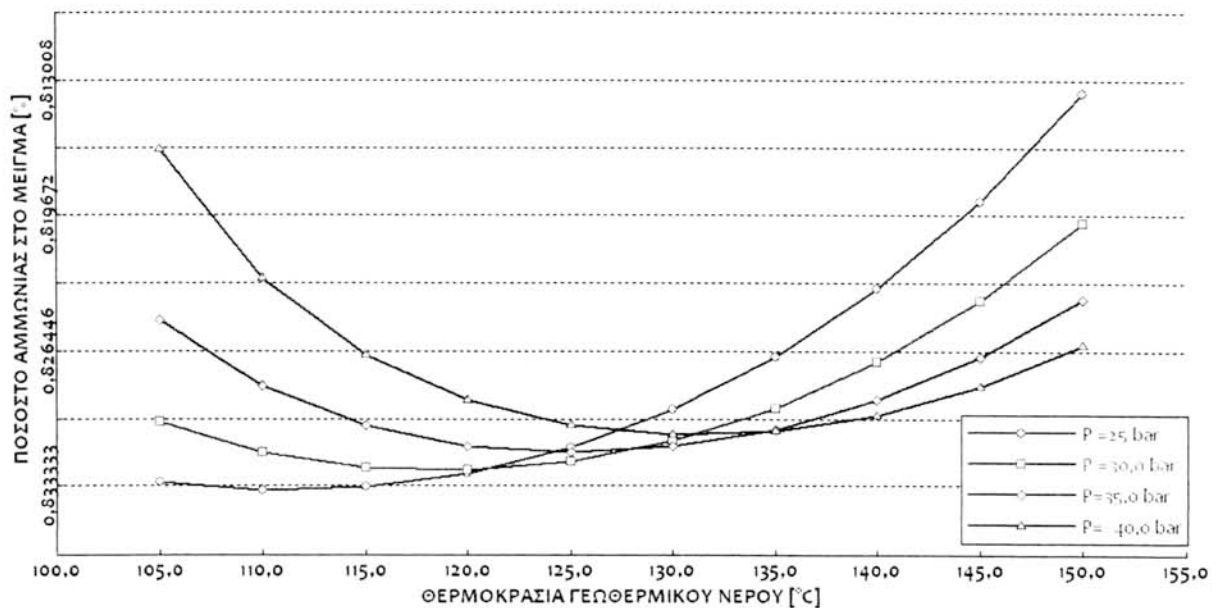
Σχήμα 4.13 - Βαθμός απόδοσης πρώτου νόμου σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές χαμηλές πιέσεις συστήματος

Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται η μεταβολή της ισχύος του στρόβιλου σε σχέση με την πίεση στην έξοδο της αντλίας (υψηλή πίεση συστήματος). Από την απεικόνιση αυτή φαίνεται ότι για χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου χαμηλές πιέσεις στην έξοδο της αντλίας οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές παραγόμενης ισχύος, ενώ όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής πρέπει να αυξηθεί και η πίεση της αντλίας για τη διατήρηση της ισχύος του στρόβιλου.



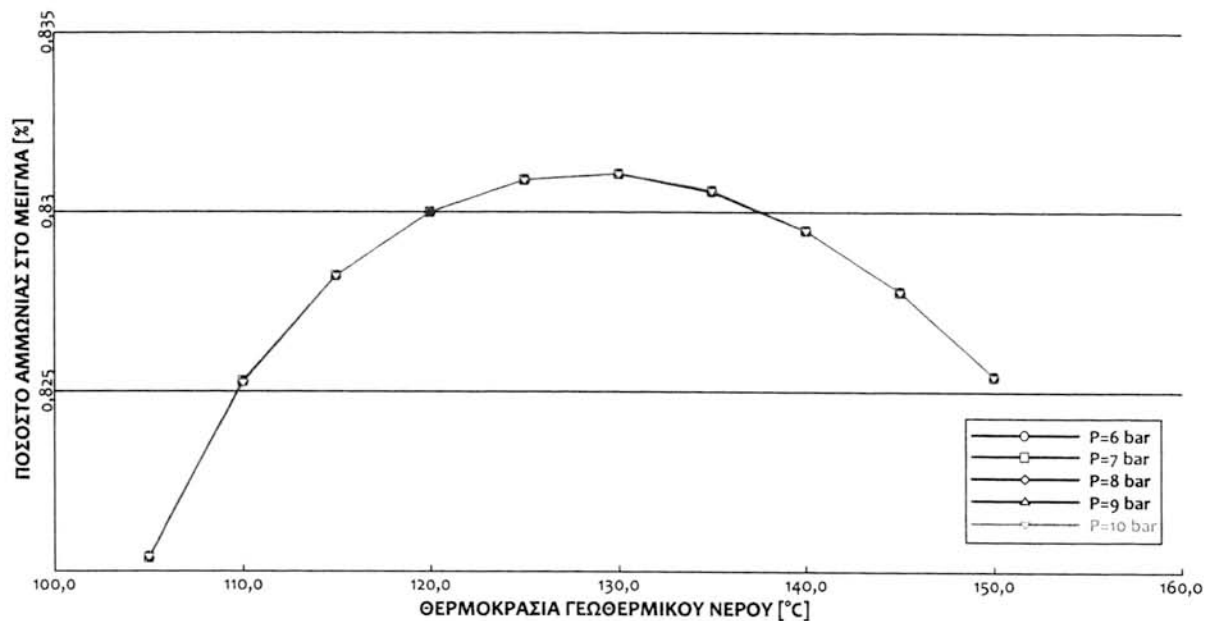
Σχήμα 4.14 - Μεταβολή της ισχύος του στρόβιλου σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές υψηλές πιέσεις συστήματος

Η σύνθεση του μείγματος στον κύκλο Kalina μια μεταβλητή που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και μπορεί να επηρεάσει το συνολικό βαθμό απόδοσης του κύκλου. Από το Σχήμα 4.15 γίνεται αντιληπτό ότι για σταθερή πίεση εξόδου από το στρόβιλο στα 6,6 bar και χαμηλές θερμοκρασίες γεωθερμικού νερού, μεγάλες τιμές της υψηλής πίεσης του συστήματος οδηγούν σε μείγματα με μικρότερης περιεκτικότητας σε αμμωνία.

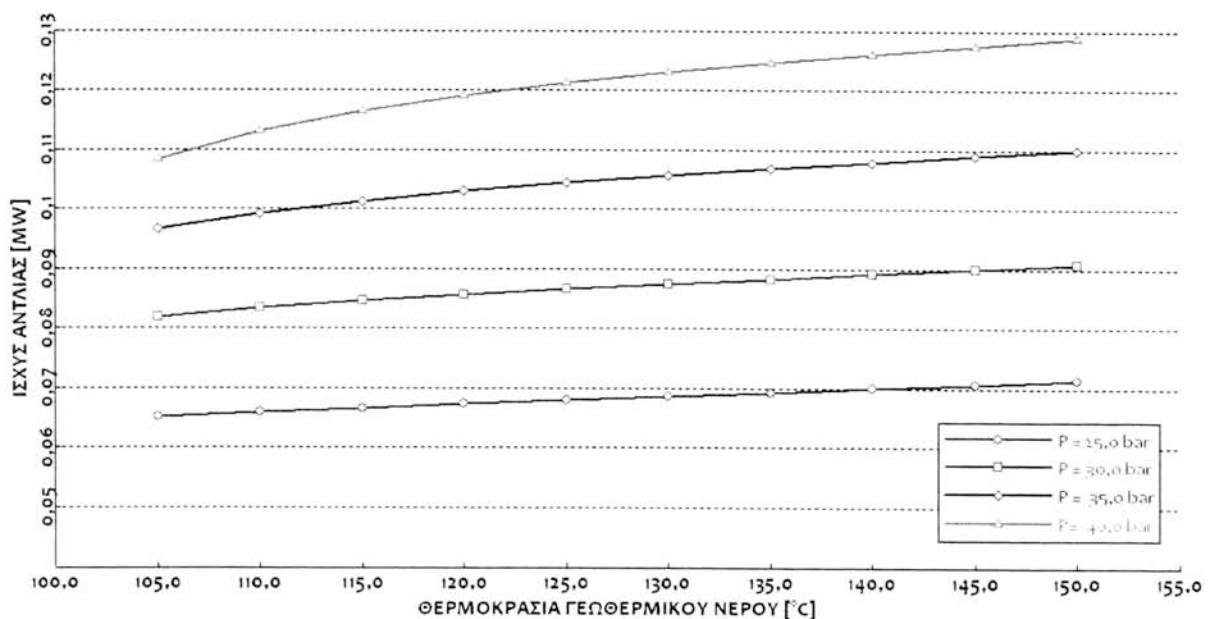


Σχήμα 4.15 - Μεταβολή της σύνθεσης του μείγματος σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές υψηλές πιέσεις συστήματος

Αντίθετα με την υψηλή πίεση του συστήματος, το ποσοστό αμμωνίας δεν επηρεάζεται από την πίεση στην έξοδο του στροβίλου, ενώ η καμπύλη φτάνει στο μέγιστο κοντά στους 130 °C (Σχήμα 4.16).



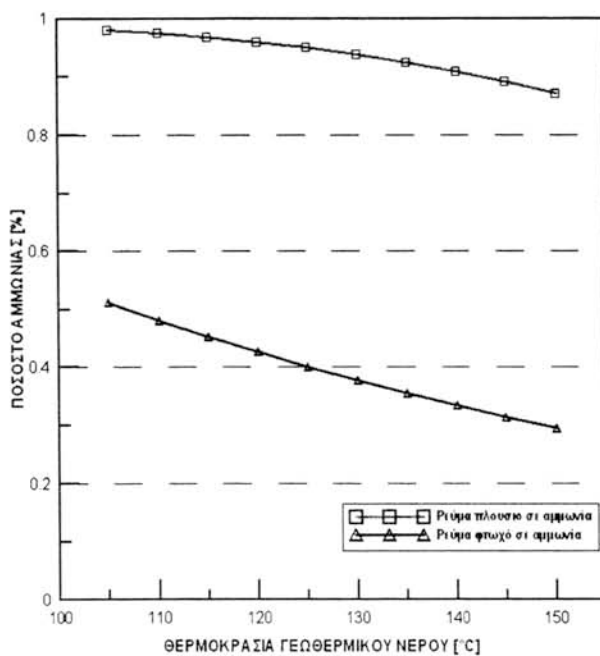
Σχήμα 4.16 - Μεταβολή της σύνθεσης του μείγματος σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές χαμηλές πιέσεις συστήματος



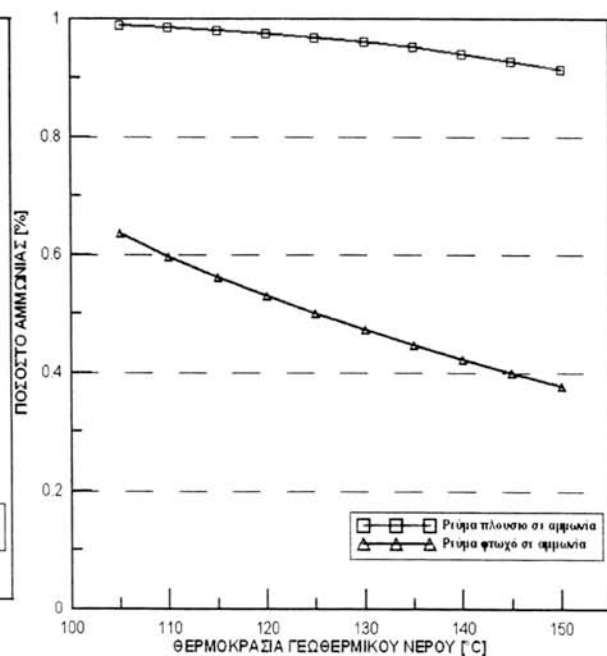
Σχήμα 4.17 Μεταβολή της ισχύος της αντλίας σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού για διαφορετικές υψηλές πιέσεις συστήματος

Η ισχύς της αντλίας δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την αύξηση της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού, αλλά όπως είναι προφανές, από τη μεταβολή της πίεσης στην έξοδο της (Σχήμα 4.17)

Τα δεδομένα του ρεύματος εισόδου στον στρόβιλο (ρεύμα 4) καθορίζουν την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται στο σύστημα. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να εξεταστούν τα ρεύματα εξόδου από το διαχωριστή, δηλαδή τα ρεύματα κορεσμένου ατμού και υγρού όπου στα Σχήματα 4.18 και 4.19 αναλύονται για 25 και 35 bar αντίστοιχα.



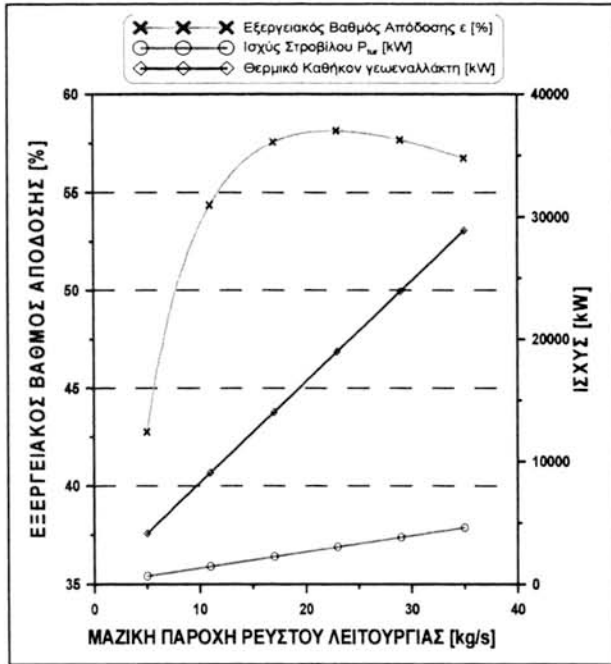
Σχήμα 4.18 – Μεταβολή της παροχής των κορεσμένων ρευμάτων για 25 bar



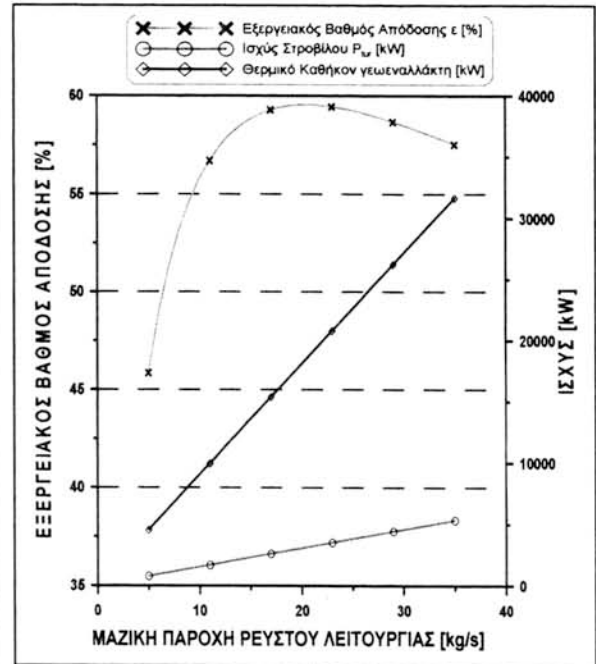
Σχήμα 4.19 – Μεταβολή της παροχής των κορεσμένων ρευμάτων για 35 bar

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός μείωσης του ποσοστού αμμωνίας στο ρεύμα του φτωχού σε αμμωνία μείγματος (ρεύμα 5) απ' ό,τι στο πλούσιο (ρεύμα 4). Με την αύξηση της πίεσης στην έξοδο της αντλίας υπάρχει μια αύξηση του ποσοστού της αμμωνίας και στα δύο ρεύματα, γεγονός που παραπέμπει στα αποτελέσματα του Σχήματος 4.15. Σε περιπτώσεις χαμηλών θερμοκρασιών, το μειονέκτημα που δημιουργείται ισοσκελίζεται με την αύξηση του ποσοστού της αμμωνίας στο ρεύμα του κορεσμένου ατμού.

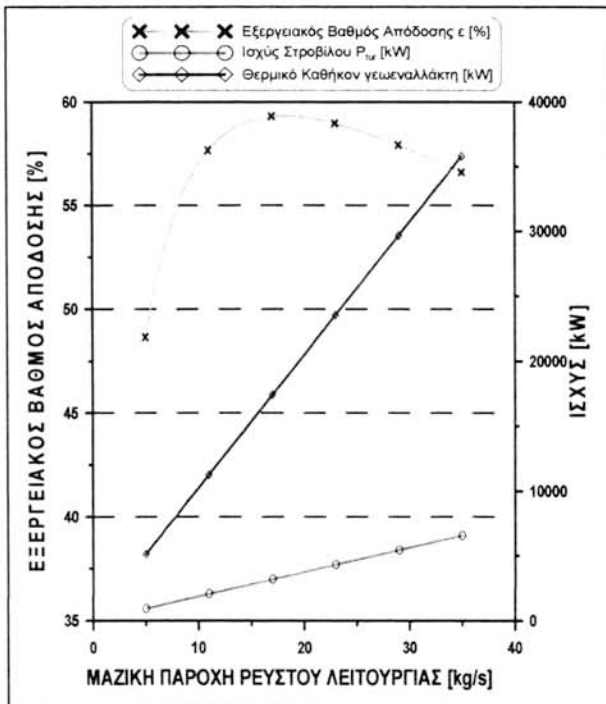
Καμπύλες μεταβολής εξεργειακού βαθμού απόδοσης, παραγόμενης ισχύος στο στρόβιλο και θερμικού καθήκοντος γεωεναλλάκτη σε σχέση με τη μεταβολή της παροχής μάζας του μείγματος αμμωνίας – νερού παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.20-4.23.



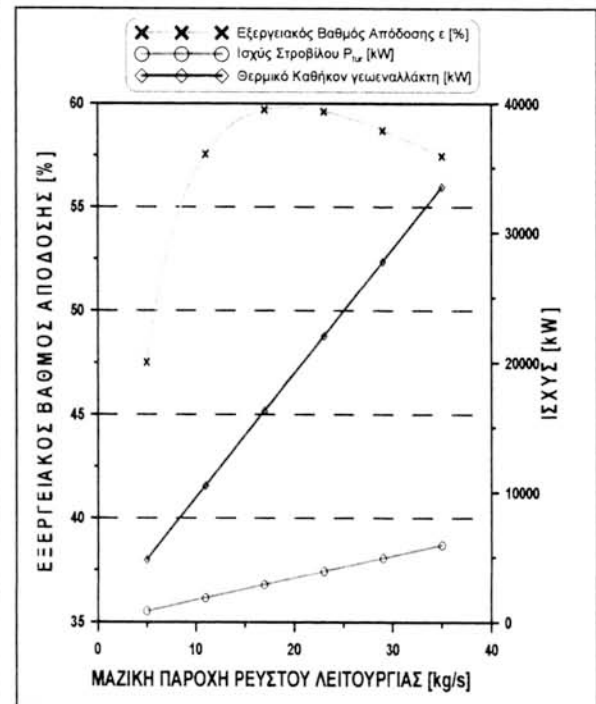
Σχήμα 4.20 – Για θερμοκρασία Γεωθερμικού Νερού 120 °C



Σχήμα 4.21 – Για θερμοκρασία Γεωθερμικού Νερού 130 °C

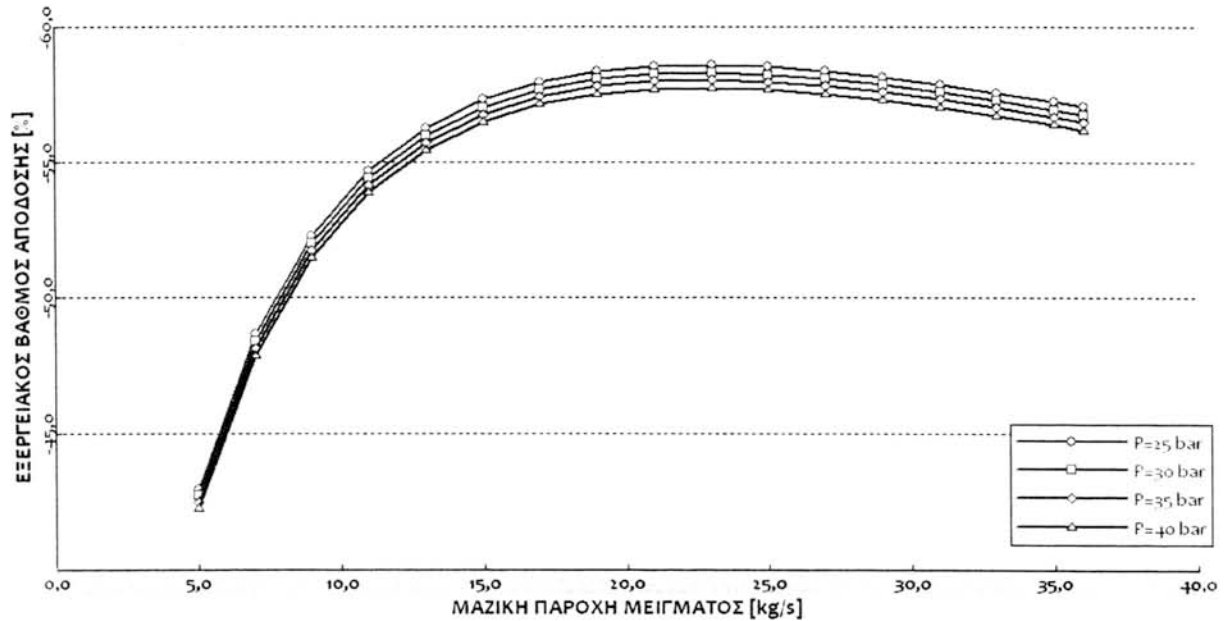


Σχήμα 4.22 – Για θερμοκρασία Γεωθερμικού Νερού 140 °C

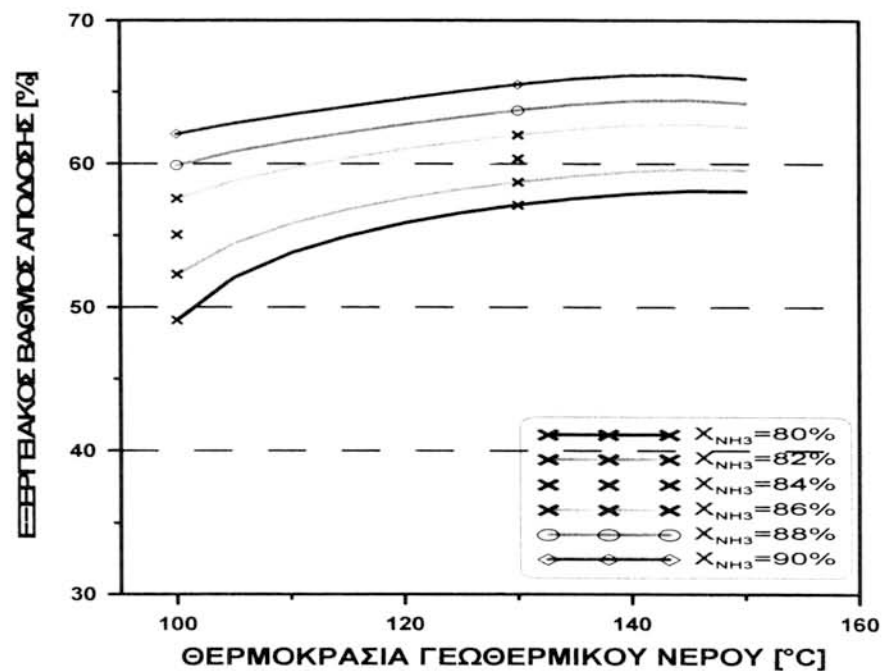


Σχήμα 4.23 – Για θερμοκρασία Γεωθερμικού Νερού 150 °C

Από τα παραπάνω διαγράμματα απαντάται το ερώτημα γιατί ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ακολουθεί αυτή την πορεία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της μαζικής παροχής ο ρυθμός μεταβολής της παραγόμενης ισχύος είναι μικρότερος από το ρυθμό αύξησης της καταστροφής εξέργειας στον γεωεναλλάκτη .



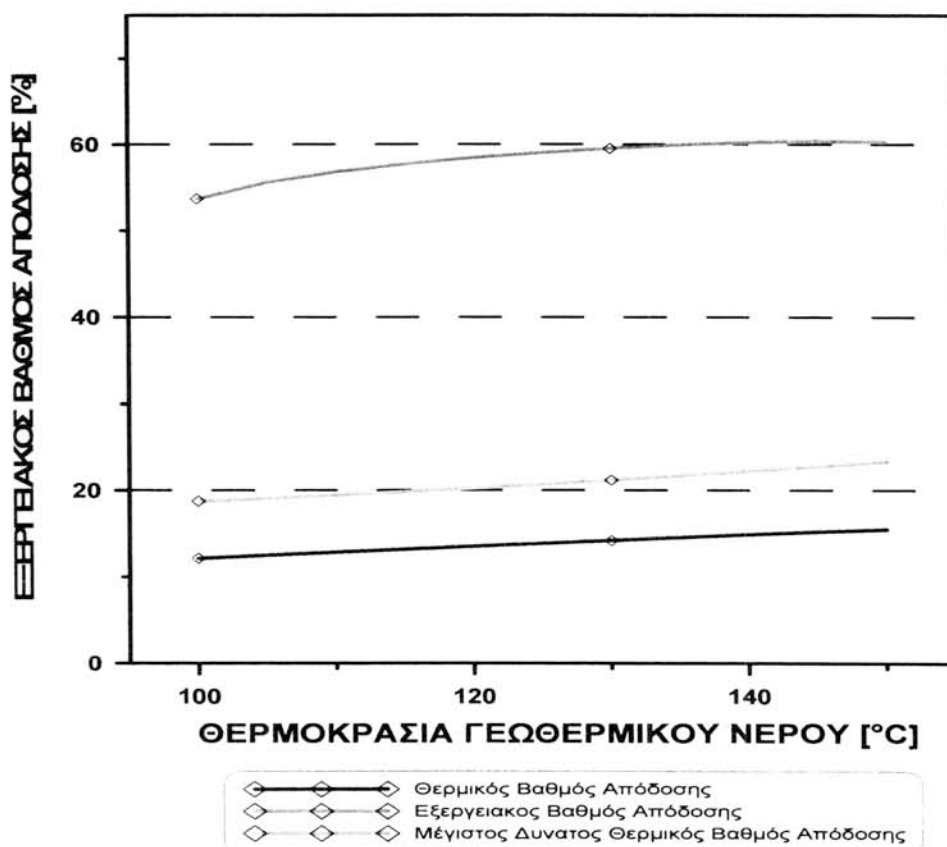
Σχήμα 4.24 – Εξεργειακός βαθμός απόδοσης του Kalina-TK για διαφορετικές υψηλές πιέσεις συστήματος.



Σχήμα 4.25 – Εξεργειακός Βαθμός απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία γεωθερμικού νερού για διαφορετικά ποσοστά αμμωνίας.

Στο Σχήμα 4.24 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης σε σχέση με την παροχή μάζας του μείγματος αμμωνίας - νερού για τις μελετώμενες υψηλές πιέσεις συστήματος. Η μεταβλητή αυτή δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης. Όσο μεγαλώνει η πίεση στην έξοδο της αντλίας, τόσο μειώνεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης.

Όπως έχει αναφερθεί, η σύσταση του ρευστού λειτουργίας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του κύκλου Kalina. Η γραφική αναπαράσταση του Σχήματος 4.25 αποδεικνύει ότι για συστάσεις από 80 ως 90%, όταν αυξάνεται το ποσοστό της αμμωνίας, αυξάνεται και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης.



Σχήμα 4.26 Σύγκριση Βαθμών Απόδοσης στον Kalina-TK

Τέλος, στο Σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η μεταβολή του εξεργειακού του θερμικού και του μέγιστου θερμικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού. Αύξηση της θερμοκρασίας διατηρώντας σταθερή την παροχή τόσο του μείγματος όσο και του γεωθερμικού νερού οδηγεί στα παραπάνω αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Οικονομική Ανάλυση του Μοντέλου

5.1 Εισαγωγή

Ένας καθοριστικός παράγοντας λήψης απόφασης για έναν επενδυτή προκειμένου να προβεί στην εκμετάλλευση ενός συγκεκριμένου γεωθερμικού πόρου για κάλυψη συγκεκριμένων ενεργειακών αναγκών είναι το οικονομικό αποτέλεσμα που μπορεί να προσδώσει το εγχείρημα αυτό. Εντούτοις, η τωρινή κατάσταση στον κλάδο της παραγωγής και παροχής ενέργειας κάνει τη διαδικασία λήψης απόφασης για επένδυση ιδιαίτερα πολύπλοκη λόγω πολιτικών και περιβαλλοντικών συνθηκών καθώς απαιτούν την έγκριση μιας μακροσκελούς λίστας παραγόντων. Επιπλέον, πολλοί από αυτούς τους παράγοντες δεν είναι σταθεροί, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα εφικτή η πρόβλεψη τους σε βάθος χρόνου.

5.2 Η σύνθεση των παραγόντων που επηρεάζουν την επένδυση

Τα οικονομικά μια γεωθερμικής μονάδας εξαρτώνται κυρίως από την επένδυση, τη διαχείριση – συντήρηση και τα κόστη ανάπτυξης. Τα παραπάνω μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Κόστη εξερεύνησης
- Κόστη γεώτρησης
- Κόστη κάλυψης ρίσκου
- Κόστη κεφαλαίου
- Επενδύσεις πάνω στο σχεδιασμό του μοντέλου και την επίτευξη του
- Επενδύσεις στις εγκαταστάσεις μεταφοράς και διαχείρισης θερμότητας
- Επενδύσεις στην παροχή θερμότητας και έλεγχο του συστήματος
- Κόστη παραχώρησης δικαιωμάτων
- Επενδύσεις για την προστασία του περιβάλλοντος
- Κόστη διαχείρισης και συντήρησης
- Επενδύσεις για περαιτέρω ανάπτυξη

Τα περισσότερα από τα παραπάνω στοιχεία δε μεταβάλλονται με το χρόνο, όμως κάποια από αυτά είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν π.χ. τα κόστη εξερεύνησης, κόστη προστασίας του περιβάλλοντος κτλ. Επιπλέον, είναι προφανές ότι ο επενδυτικός κίνδυνος όπως επίσης και οι υφιστάμενες νομοθετικές διατάξεις μπορούν να αποτελέσουν αστάθμητους παράγοντες στην τελική οικονομική ανάλυση.

Ο πολύπλοκος χαρακτήρας της οικονομικής ανάλυσης γίνεται άμεσα αντιληπτός καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι ενώ οι περισσότεροι παράγοντες είναι υπό το μερικό ή ολικό έλεγχο του εκάστοτε μελετητή υπάρχουν πολλοί ακόμα που είναι ανεξάρτητοι.

Η σωστή εκτίμηση του κόστους αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά την ολοκλήρωση μιας θερμικής μελέτης. Εκτιμήσεις κόστους πρέπει να γίνονται σε όλα τα στάδια της σχεδίασης ώστε σε καθένα από αυτά να υπάρχει το απαραίτητο υπόβαθρο για την λήψη αποφάσεων. Το κόστος του βασικού προϊόντος υπολογίζεται ακολουθώντας τα παρακάτω στάδια:

- Εκτίμηση του συνολικού κεφαλαίου επένδυσης
- Προσδιορισμός των οικονομικών, χρηματοδοτικών και λειτουργικών παραμέτρων, καθώς και των παραμέτρων της αγοράς για το λεπτομερή υπολογισμό του κόστους.
- Υπολογισμός των συνολικών απαιτήσεων σε έσοδα
- Υπολογισμός του ισοδύναμου ετήσιου κόστους του προϊόντος.[20]

5.3 Διαστασιολόγηση εναλλάκτη θερμότητας

Το μέγεθος των βασικών συσκευών της εγκατάστασης (εναλλάκτες θερμότητας, στρόβιλος, αντλία) εκτιμώνται για το θερμοδυναμικό μοντέλο του Kalina-TK στο προηγούμενο κεφάλαιο. Κατ' αρχάς, το μέγεθος ενός εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δυο διαφορετικές μεθόδους, είτε αυτή του λογαριθμικού μέσου, είτε αυτή της αποτελεσματικότητας. [25]

Παραδοχές με τις οποίες θεωρούνται αμελητέες:

- Όλες οι πτώσεις πίεσης
- Όλες οι απώλειες θερμότητας
- Η ισχύς του βοηθητικού εξοπλισμού

5.3.1 Μέθοδος της λογαριθμικής μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς:

Για έναν εναλλάκτη θερμότητας, ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα χρόνου (q) εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q = UA\Delta T_m = UA \left[\frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln [(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \right] \quad (5.1)$$

Όπου U είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, A είναι η επιφάνεια εναλλαγής από την οποία εξαρτάται και ο U και ΔT_m είναι η κατάλληλη θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη. Οι παράμετροι T_{h1} και T_{h2} είναι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του θερμού ρεύματος αντίστοιχα. Οι άλλες παράμετροι T_{c1} και T_{c2} είναι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του ψυχρού. Ρεύματος.

Το σύνολο των όρων που βρίσκονται μέσα στις αγκύλες της εξίσωσης ονομάζεται μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά (LMTD), ή με άλλα λόγια, η κατάλληλη μέση θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη θερμότητας. Το μέγεθος του εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να καθοριστεί από την σχέση στην Εξίσωση 5.1.

5.3.2 Η μέθοδος της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς θερμότητας:

Μια άλλη μέθοδος υπολογισμού των διαστάσεων βασικών συσκευών είναι η αυτή της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς θερμότητας-NTU η οποία απλοποιεί κατά πολύ την ανάλυση του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτή η νέα μέθοδος βασίζεται σε μια αδιάστατη παράμετρο που ονομάζεται αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας, ε , που ορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{\text{Πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}}{\text{Μέγιστος δυνατός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}} \quad (5.2)$$

Ο προσδιορισμός του μέγιστου δυνατού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας προϋποθέτει την παραδοχή ότι η μέγιστη θερμοκρασιακή

διαφορά σε έναν εναλλάκτη θερμότητας αποτελεί τη διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών εισόδου των ζεστών και ψυχρών ρευστών.

$$\Delta T_{\max} = T_{h,\min} - T_{c,\min} \quad (5.3)$$

Στην περίπτωση του ατμοποιητή (συσκευή BRINE), ο πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας για έναν εναλλάκτη αντιροής είναι:

$$\dot{Q}_{IN} = \dot{m}_w (h_{1w} - h_{2w}) = \dot{m}_{mix} (h_2 - h_1)$$

Παρόμοιες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πραγματικής και της μέγιστης μεταφοράς θερμότητας στον συμπυκνωτή.

Οι σχέσεις αποτελεσματικότητας της μεταφοράς θερμότητας των εναλλακτών θερμότητας συνήθως περιλαμβάνουν την αδιάστατη ομάδα UA/C_{\min} . Αυτή η ποσότητα ονομάζεται αριθμός μονάδων μεταφοράς NTU και εκφράζεται για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν ως εξής:

$$NTU = \frac{1}{(C - 1)} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C - 1} \right) \quad (5.4)$$

Όπου το C , αντιστοιχεί σε $C_{\min}/C_{\max} = (\dot{m}C_p)_{\min}/(\dot{m}C_p)_{\max}$ και C_{\max} είναι η θερμοχωρητικότητα του ψυχρού ρευστού και C_{\min} θερμοχωρητικότητα του θερμού ρευστού.

5.3.3 Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας – U

Ο καθορισμός του συντελεστή U είναι συνήθως μια απαιτητική διαδικασία και προϋποθέτει δεδομένα που δεν αναλύονται περαιτέρω στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ως εκ τούτου, λαμβάνονται τυπικές τιμές του U για τον γρήγορο υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας εναλλαγής. Η τιμή του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιείται για τους αναθερμαντήρες χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας είναι $1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ενώ για τον ατμοποιητή και τον συμπυκνωτή $0,9$ και $1,1 \text{ kW/m}^2\text{K}$ αντίστοιχα. Η τιμή του συντελεστή U στον ατμοποιητή είναι η χαμηλότερη καθώς υπολογίστηκε για εξωτερικό ρεύμα ατμού και εσωτερικό

ρεύμα στους αυλούς υγρό. Η τιμή στο συμπυκνωτή βασίζεται στην εκτίμηση ότι το μείγμα αμμωνίας-νερού ρέει εξωτερικά (κέλυφος) ενώ το ψυκτικό νερό στους αυλούς. Οι υπολογισμένες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας στους εναλλάκτες του Kalina-TK βρίσκονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 - Εκτιμώμενα μεγέθη των εναλλακτών

Συσκευή	Μέγεθος, m ²
Συμπυκνωτής CONDEN	1604
Αναθερμαντήρας HR	135
Αναθερμαντήρας LR	103
Γεωεναλλάκτης BRINE	1426
Σύνολο	3477

5.4 Εκτίμηση του κόστους του απαιτούμενου εξοπλισμού

Η εκτίμηση του κόστους του απαιτούμενου εξοπλισμού αποτελεί το πρώτο βήμα για κάθε λεπτομερή εκτίμηση κόστους. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία αυτή. Η πρώτη αφορά την εκτίμηση του κόστους εξοπλισμού απ' ευθείας μέσω προσφορών από τους αντίστοιχους προμηθευτές. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τιμές κόστους από παλαιότερες αγορές και προσφορές από έμπειρους επαγγελματίες εκτιμητές.

Σε ένα τυπικό διάγραμμα εκτίμησης κόστους εξοπλισμού, όταν όλα τα δεδομένα κόστους παρουσιάζονται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα συναρτήσεως του μεγέθους του εξοπλισμού, ακολουθούν συνήθως μια ευθεία γραμμή. Η κλίση της γραμμής αυτής, α , αποτελεί μια σημαντική παράμετρο εκτίμησης κόστους (εκθέτης κλίμακας μεγέθους).

Για τους τέσσερις εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται στον Kalina-TK γίνεται εκτίμηση του κόστους αγοράς με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Πρώτη προσέγγιση

Χρησιμοποιείται ως βασικό κόστος $C_0=450$ € για κάθε τετραγωνικό μέτρο εναλλαγής θερμότητας. Οπότε,

$$C_{\text{εξοπλισμού}} = C_0 \cdot (\text{μέγεθος της συσκευής})^{\alpha} \quad (5.5)$$

Όπου α είναι ο εκθέτης κλίμακας μεγέθους όπου στην περίπτωση μας λαμβάνεται 0,6 για τους δυο αναθερμαντήρες (υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας) και 0,8 για το συμπυκνωτή και τον ατμοποιητή (Σχήμα 5.2). Το μέγεθος της συσκευής για έναν εναλλάκτη θερμότητας είναι η επιφάνεια εναλλαγής, A , και οι τιμές για κάθε εναλλάκτη διατίθενται στον Πίνακα 5.1. Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή α για διάφορα αντικείμενα εξοπλισμού παραθέτονται στον Πίνακα 5.4. Συνεπώς, από τα παραπάνω προκύπτει το κόστος κτήσης για κάθε εναλλάκτη της εγκατάστασης ισχύος που μελετάται και παρατίθενται στον Πίνακα 5.2.

Δεύτερη Προσέγγιση

Σύμφωνα με τον Couper et al. το κόστος κτήσης ενός εναλλάκτη θερμότητας σε ένα σύστημα αμμωνίας νερού υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.6.

$$PEC_{\text{αναθερμαντήρων}} = e^{[8,821-0,30863(\ln A)+0,0681(\ln A)^2]} \quad (5.6)$$

$$14 < A < 1110 \quad \text{m}^2$$

Για μεγαλύτερους εναλλάκτες χρησιμοποιείται η Εξίσωση 5.5. Συνεπώς τα εκτιμώμενα κόστη των εναλλακτών θερμότητας σύμφωνα με τις δύο προσεγγίσεις υπολογίζονται και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενα κόστη των εναλλακτών

Συσκευή	Κόστος C_{ci} €	
	1 ^η Προσέγγιση	2 ^η Προσέγγιση
Συμπυκνωτής CONDEN	177.754,3	177.754,3
Αναθερμαντήρας HR	8.539	7631
Αναθερμαντήρας LR	7.259,63	6998
Εξατμιστήρας BRINE	150.144,1	150.144,1
Σύνολο	349.904,9	342.525

Ομοίως υπολογίζεται και το κόστος των άλλων βασικών συσκευών (στρόβιλος, αντλία) με τις δύο προσεγγίσεις. Για την πρώτη προσέγγιση, σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιείται η ισχύς της κάθε συσκευής αντί της επιφάνειας εναλλαγής.

$$C_{\text{εξοπλισμού}} = C_0 \cdot (\text{Power})^{\alpha} \quad (5.6)$$

Όπου το βασικό κόστος, C_0 , για την αντλία είναι 1200 €/kW και αυτό του στροβίλου 4000 €/kW, ενώ ο εκθέτης κλίμακας μεγέθους, α , είναι 0,80 και 0,70 αντίστοιχα. Οι εκτιμώμενες τιμές κτήσης του στροβίλου και της αντλίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Για τη δεύτερη προσέγγιση ισχύει σύμφωνα με τον Bejan:

$$PEC = \left(\frac{C_{31} \dot{m}}{C_{32} - \eta_T} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \left[1 + e^{(C_{11} T - C_{12})} \right] \quad PEC = \left(\frac{C_{11} \dot{m}}{C_{12} - \eta_p} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

για στρόβιλο και αντλία αντίστοιχα, όταν $C_{11}=50$ €/(kg/s), $C_{12}=0,9$, $C_{31}=5000$ €/(kg/s), $C_{32}=0,92$, $C_{33}=0,05$ K⁻¹, $C_{34}=50$. Συνεπώς τα εκτιμώμενα κόστη των συσκευών μεταβολής πίεσης του Kalina-TK για τις δύο προσεγγίσεις υπολογίζονται και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Εκτιμώμενα κόστη των στροβίλου και αντλίας

Συσκευή	Κόστος C_{ci} , €	
	1 ^η Προσέγγιση	2 ^η Προσέγγιση
Στρόβιλος TURB	1.615.842,63	1.310.790,18
Αντλία PUMP	43.076	50.132
Σύνολο	1.658.918	1.360.922

Συνεπώς, το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού για την μελετώμενη εγκατάσταση ισχύος κύκλου Kalina είναι **2.008.000€** ή **1.703.447€** ανάλογα με την προσέγγιση που θα επιλεγεί.

Πίνακας 5.4 – Ενδεικτικές τιμές εκθέτη κλίμακας α για διάφορα αντικείμενα εξοπλισμού.

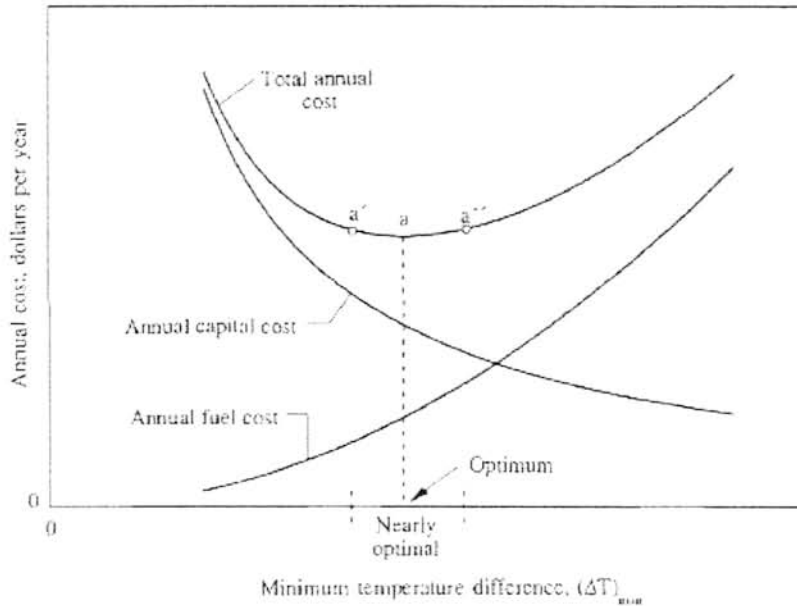
Εξοπλισμός	Μεταβλητή X	Εύρος Μεγέθους	Εκθέτης α
Εναλλάκτης θερμότητας	Επιφάνεια		
Διπλού σωλήνα		0,2–6 m ²	0,16
Επίπεδου δίσκου		15–1500 m ²	0,40
Κελύφους και σωληνώσεων		15–100 m ²	0,66
Σπειροειδούς δίσκου		2–200 m ²	0,43
Χοάνη (βιομηχανική)	Χωρητικότητα	2–20 m ³	0,60
Μηχανές εσωτερικής καύσης	Ισχύς	25–2000 m ³	0,68
Σωληνώσεις	Διάμετρος Σωλήνα	0,007–10 MW	0,81
Δοχεία διεργασιών	Ύψος δέσμης δοχείων	5–75 cm	0,95
Αντλία (παλινδρόμησης, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	1–120 m	0,97
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	0,02–0,3 kW	0,25
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	0,3–20 kW	0,45
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	20–200 kW	0,84
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	0,02–0,3 kW	0,23
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	0,3–20 kW	0,37
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Ισχύς	20–200 kW	0,48
Αντλία (κεντρόφυνος, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα)	Δυναμικότητα κυκλοφορίας	0,06–20 m ³ /s	0,76
Αντλία με τουρμπινα	Ισχύς	0,5–300 kW	0,45
Αντιδραστήρας	Όγκος	0,2–4 m ³	0,55
Διαχωριστήρας (κεντρόφυνος)	Χωρητικότητα	1,4–7 m ³	0,49
Φουνάρο	Ύψος	10–150 m	1,20
Τουρμπινα ατμού	Ισχύς		
Μη συμπικνωσίμου		0,1–15 MW	0,50
Συμπικνωσίμου		50–600 MW	0,90
Δοχείο Αποθήκευσης	Όγκος	0,07–150 m ³	0,30
Δοχείο Αποθήκευσης	Όγκος	150–19 × 10 ³ m ³	0,65
Δεξαμενή (επίπεδη)	Όγκος	0,4–40 m ³	0,57
Δεξαμενή (με νυάλινη επένδυση)	Όγκος	0,4–4 m ³	0,49
Μετασχηματιστής / Μετατροπέας	Χωρητικότητα	0,2–50 MVA	0,39

5.5 Συνολικό Κόστος Εγκατάστασης

Το αρχικό κόστος επένδυσης μιας γεωθερμικής μονάδας εφαρμογής είναι συνήθως μεγαλύτερο, και σε κάποιες περιπτώσεις πολύ ανώτερο, από αυτό που απαιτείται για τη λειτουργία μιας αντίστοιχης μονάδας συμβατικών καυσίμων. Αντίθετα, η ενέργεια που καταναλώνεται σε μια γεωθερμική εγκατάσταση κοστίζει πολύ λιγότερο από τα συμβατικά καύσιμα και αντιστοιχεί συνήθως στο κόστος συντήρησης των διαφόρων επιμέρους τμημάτων της (σωληνώσεις, βαλβίδες, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας κλπ.).

Έτσι λοιπόν, οι υψηλότερες αρχικές δαπάνες, λογικά, αντισταθμίζονται από την εξοικονόμηση που γίνεται στην κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, το συνολικό σύστημα γεωθερμικού πόρου - εγκαταστάσεων θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να βρίσκεται σε λειτουργία για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, ικανό για να γίνει απόσβεση της αρχικής επένδυσης όσο το δυνατόν συντομότερα.

Τα κόστη παραγωγής εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων, αλλά κυρίως από τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, η οποία επηρεάζει το μέγεθος του στροβίλου, των εναλλακτών θερμότητας και του συστήματος ψύξης. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η εξάρτηση του συνολικού ετήσιου κόστους με τα ετήσια κόστη καυσίμου και κεφαλαίου επένδυσης.



Σχήμα 5.1 – Καμπύλες κόστους της εγκατάστασης

5.5.1 Κόστος Συνολικού Κεφαλαίου επένδυσης (TCI)

Σε αντίθεση με τα έξοδα των καυσίμων και τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης τα οποία από τη φύση τους είναι μόνιμα ή επαναλαμβανόμενα, το κόστος επένδυσης καταβάλλεται εφ' άπαξ. Ωστόσο, σε μια οικονομική ανάλυση το κόστος επένδυσης εξετάζεται με διαφορετικό τρόπο από ότι οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης ή τα έξοδα καυσίμων.

Το απαιτούμενο κεφάλαιο για την αγορά του οικοπέδου, την ανοικοδόμηση των απαραίτητων κτηριακών υποδομών και την αγορά και εγκατάσταση του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού ονομάζεται σταθερό κεφάλαιο επένδυσης (FCI). Το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης αντιπροσωπεύει το ολικό κόστος του συστήματος υποθέτοντας το σχεδιασμό και την υλοποίησή του σε μηδενικό χρόνο. Το απαιτούμενο κεφάλαιο επένδυσης είναι το άθροισμα του σταθερού κεφαλαίου επένδυσης και άλλων δαπανών.

Η εκτίμηση του κόστους για το σταθερό κεφάλαιο επένδυσης συνίσταται από δύο σημαντικές δαπάνες: τις άμεσες και τις έμμεσες δαπάνες. Άμεσες δαπάνες είναι εκείνες που αφορούν το μόνιμο εξοπλισμό, τα υλικά κατασκευής, τα εργατικά, και άλλες δαπάνες σχετικές με την κατασκευή, και ανέγερση των μόνιμων κτιριακών υποδομών. Οι έμμεσες δαπάνες δεν αποτελούν τμήμα των δαπανών για υποδομές αλλά απαιτούνται για την ολοκλήρωση του έργου. Άλλες δαπάνες είναι τα έξοδα εκκίνησης, το κεφάλαιο κίνησης, οι δαπάνες για την απόκτηση άδειας λειτουργίας, οι δαπάνες για την έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και τα ομόλογα που εκδίδονται για την προσέλκυση κεφαλαίων απαραίτητων για την κατασκευή της εγκατάστασης.

Το συνολικό κεφάλαιο της επένδυσης του γεωθερμικού σταθμού εκτιμάται μέσω παραδοχών και υπολογισμών που αναλύονται παρακάτω ενώ στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση εξάρτησης των κοστών της εγκατάστασης.

- Στην προηγούμενη παράγραφο υπολογίστηκε το κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού.
- Το κόστος των σωληνώσεων όπως και το κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού υποθέτεται ότι καλύπτει το 10% κόστους αγοράς εξοπλισμού
- Το κόστος αγοράς γης εκτιμάται ότι είναι το 1% του κόστους αγοράς εξοπλισμού
- Τα έμμεσα κόστη αποτελούν το 5% των άμεσων
- Το κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης (LRD) καθορίζεται από την εξίσωση:

$$LRD = 150 \cdot P_{\text{turb}} \quad (5.7)$$

Όπου P_{turb} η παραγόμενη ισχύς του στροβίλου.

- Φοροαπαλλαγή για κεφάλαια που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής (AFUDC) είναι:

$$AFUDC = 0,15 \cdot FCI - LRD \quad (5.8)$$

- Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (CRF):

$$a_c = \frac{i_{eff}(1-i_{eff})^N}{(1-i_{eff})^N - 1} \quad (5.9)$$

Όπου $N_p = 20$ χρόνια και ο πραγματικός βαθμός απόδοσης, i_{eff} , καθορίζεται από την Εξίσωση 5.11.

$$i_{eff} = \left(1 + \frac{i}{p}\right)^p - 1 \quad (5.10)$$

Ενώ i είναι το ετήσιο ή ονομαστικό επιτόκιο και p η συχνότητα ανατοκισμού σε έναν χρόνο.

- Τα κόστη εκκίνησης περιλαμβάνουν το κόστος εργασίας, των υλικών, του εξοπλισμού, τις λειτουργικές δαπάνες και επιπλέον το κόστος απώλειας εσόδων ενόσω το σύστημα δεν λειτουργεί ή λειτουργεί σε μέρος της δυναμικότητας του, κατά την διάρκεια της εκκίνησης. Ανάλογα με την φορολογική κατηγορία στην οποία εντάσσεται η επιχείρηση, το κόστος εκκίνησης παρουσιάζεται, είτε ως μέρος της συνολικής επένδυσης κεφαλαίου, είτε ως εφάπαξ δαπάνη κατά το πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος. Τα κόστη έναρξης λειτουργίας (SUC) της εγκατάσταση καθορίζονται από τα εξής κόστη: α) ένα μήνα σταθερών κοστών Λειτουργίας και Συντήρησης ($C_{F, O \& M}$), β) ένα μήνα μεταβλητών λειτουργικών κοστών υπολογιζόμενων σε πλήρες φορτίο ($C_{V, O \& M}$), γ) μια εβδομάδα πλήρους φορτίου γεωθερμικού νερού (C_{GEO}) και δ) 2% της επένδυσης της εγκατάστασης [24]. Συνεπώς:

$$SUC = \left[\frac{C_{F, O \& M}}{12} + \frac{C_{V, O \& M}}{12} + \frac{C_{GEO}}{52} \right] + 0,02 \cdot (FCI - C_{land}) \quad (5.11)$$

Για λόγους απλοποίησης όμως θεωρείται:

$$SUC = 0,1 \cdot FCI \quad (5.12)$$

- Ομοίως το κόστος του κεφαλαίου κίνησης (WC) είναι το άθροισμα των μη κλιμακούμενων εξόδων που αφορούν το κόστος 2 μηνών γεωθερμικού ρευστού σε πλήρες φορτίο και τρεις μήνες εργατικών κοστών συν 25% του παραπάνω αθροίσματος.

$$WC = \left[\frac{C_{geo, 2}}{6} + \frac{C_{lab, 3}}{4} \right] \cdot 1,25 \quad (5.13)$$

Για λόγους απλοποίησης όμως θεωρείται:

$$WC = 0,15 \cdot TCI \quad (5.14)$$

- Η συνολική επένδυση σε κεφάλαιο ισούται με το άθροισμα της επένδυσης σταθερού κεφαλαίου (άμεσο + έμμεσο κόστος) συν άλλες δαπάνες.[24]

$$TCI=DC+IC+SUC+WC+LRD+AFUDC \quad (5.15)$$

Πίνακας 5.4 : Εκτίμηση του συνολικού κόστους κεφαλαίου

I Σταθερό Κεφάλαιο Επένδυσης (FCI)	2005 (€)	2010 (€)
A. Άμεσα Κόστη (DC)		
1. Κόστη εντός της εγκατάστασης		
Κόστος αγοράς εξοπλισμού		
- Εναλλακτών θερμότητας	342.525.....	441.312
- Στροβίλου.....	1.310.790.....	1.753.531
- Αντλίας.....	50.132.....	67.088
- Σωληνώσεις.....	170.344.....	226.193
- Ηλεκτρικός εξοπλισμός.....	34.745.....	46.496
- Κόστος Εγκατάστασης εξοπλισμού.....	173.819.....	232.610
2. Κόστη εντός της εγκατάστασης		
- Γη.....	17.034.....	22.795
Σύνολο άμεσων κοστών.....	2.100.000.....	2.515.572
B. Έμμεσα Κόστη		
- Απρόοπτα.....	105.000.....	125.778
Σύνολο Σταθερού Κεφαλαίου Επένδυσης (FCI).....	2.205.000.....	2.638.350
II Άλλες Δαπάνες		
A. Κόστη Έναρξης λειτουργίας.....	220.500.....	294.346
B. Κεφάλαιο Κίνησης.....	426.600.....	570.887
Γ. Κόστος αδειοδότησης, έρευνας και ανάπτυξης.....	321.000.....	430.000
Δ. Φοροαπαλλαγή για κεφάλαια που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής.....	97.500.....	130.476
Σύνολο Άλλων Δαπανών.....	1.065.600.....	1.425.709
Συνολικό Κεφάλαιο Επένδυσης (TCI).....	3.270.600.....	4.064.060

5.5.2 Κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M Costs)

Τα κόστη Λειτουργίας και Συντήρησης είναι ένα σημαντικό μέρος του κόστους παραγωγής ενέργειας για μια γεωθερμική εγκατάσταση. Εξ' αιτίας της ιδιαιτερότητας ενός γεωθερμικού σταθμού, τα κόστη αυτά είναι πολύ διαφορετικά σε σχέση με τα αντίστοιχα των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

Τα κόστη λειτουργίας συνήθως συνδέονται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις διάφορες αντλίες. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στη βελτιστοποίηση του τρέχοντος κόστους των αντλιών σε διεργασίες άμεσης χρήσης του θερμού νερού, όπου πολύ σπάνια συναντάται παρατεταμένη λειτουργία σε πλήρη ισχύ.

Τα κόστη συντήρησης σχετίζονται με τον εξοπλισμό και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα προβλήματα του δικτύου σωληνώσεων λόγω διάβρωσης, απολέπισης κτλ, υπό φυσιολογικές συνθήκες, είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά των συστημάτων ορυκτών καυσίμων.

Η συντήρηση μιας γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγικής εγκατάστασης χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει εργασίες, όπως η επιθεώρηση και επιδιόρθωση μηχανημάτων και η επισκευή οδικών και κτηριακών υποδομών. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τις δαπάνες διάνοιξης γεωτρήσεων συντήρησης, οι οποίες έχουν ως στόχο να αντισταθμίσουν τη φυσική μείωση της παραγωγικότητας των αρχικών φρεατίων παραγωγής.

Τα κόστη O&M μπορούν να χωριστούν σε σταθερά και μεταβλητά. Τα σταθερά αφορούν εργατικά κόστη λειτουργίας και συντήρησης, συντήρηση υλικών, διαχείριση και υποστήριξη, διανομή και μάρκετινγκ, έρευνα και ανάπτυξη κ.ά. Τα μεταβλητά κόστη λειτουργίας αποτελούνται από κόστη λειτουργικών προμηθειών εκτός από το κόστος καυσίμων (γεωθερμικό νερό).

Το εξισορροπημένο ετήσιο κόστος O&M ($C_{L,O&M}$) υπολογίζεται από την εξίσωση 5.16:

$$C_{L,O&M} = C_{F,O&M} \cdot CELF \quad (5.16)$$

$$\text{Όπου} \quad CELF = \frac{k(1-k^{N_y})}{1-k} \cdot a_c \quad \text{και} \quad k = \frac{1-r_{\pi}}{1-i_{eff}} \quad (5.17, 5.18)$$

r_x ο πληθωρισμός, ο ετήσιος ονομαστικός ρυθμός κλιμάκωσης 6%

$$\text{Συντελεστής χωρητικότητας} = \frac{\text{Παραγόμενες } MWh \cdot 100}{\text{Εγκατεστημένη ισχύς } (MWe) \cdot t_{op}} \quad (5.19)$$

Σύμφωνα με τη Διεθνή Γεωθερμική Ένωση (International Geothermal Association), ο παράγοντας χωρητικότητας για μια γεωθερμική μονάδα δυαδικού κύκλου κυμαίνεται σε 85%-90%. Λαμβάνοντας έναν μέσο παράγοντα χωρητικότητας 87,5% υπολογίζεται ότι η εγκατάσταση θα λειτουργεί σε πλήρες φορτίο 7665 ώρες από ένα σύνολο 8760 ωρών το χρόνο. Υπολογίζονται 5 θέσεις εργασίας και οι ώρες εργασίας που αντιστοιχούν για κάθε θέση είναι 2.080 ώρες το χρόνο. Με ένα μέσο αμοιβή 5€/ώρα υπολογίζονται τα άμεσα εργατικά κόστη και μαζί με τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

5.5.3 Κόστος γεωθερμικού νερού

Το γεωθερμικό νερό (brine) παίζει το ρόλο του καυσίμου. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες στις οποίες βασίζεται το κόστος του. Την εξερεύνηση γεωθερμικών πεδίων και τις γεωτρήσεις.

Εξερεύνηση Γεωθερμικού Πεδίου

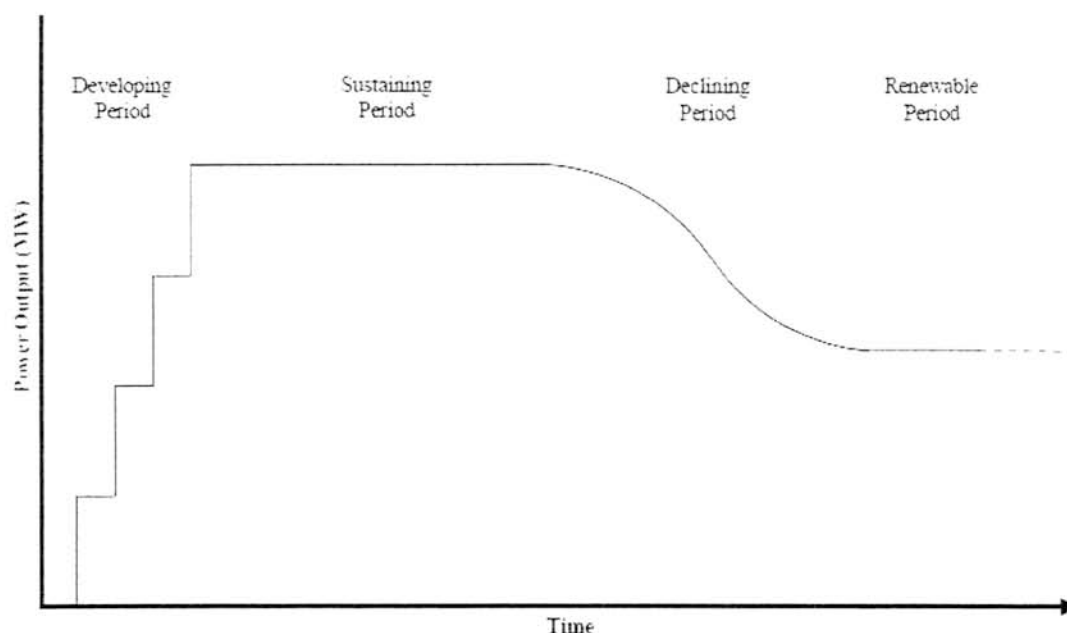
Με την προϋπόθεση ότι έχει εξασφαλιστεί η πρόσβαση και όλες οι νομοθετικοί περιορισμοί έχουν εγκριθεί, η εξερεύνηση μπορεί να ξεκινήσει ύστερα από εξελιγμένες γεωλογικές και γεωχημικές έρευνες και αναλύσεις σε περιοχές όπου υπάρχει υποψία γεωθερμικής δραστηριότητας. Οι έρευνες αυτές αφορούν βιβλιογραφικές αναφορές, μέτρηση της θερμοκρασιακής βαθμίδας σε υπάρχοντα πηγάδια και πηγές, αεροφωτογραφίες κ.ά. Οι τεχνικές αυτές οδηγούν σε μία ή και περισσότερες εξερευνητικές γεωτρήσεις προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητα του γεωθερμικού ταμιευτήρα. Όταν η περιοχή του αρχικού ενδιαφέροντος έχει αποφασιστεί, το εξερευνητικό πρόγραμμα γίνεται περισσότερο εντατικό διεξάγοντας δοκιμαστικές γεωτρήσεις μεγαλύτερης παροχής και πηγάδια επανέγχυσης.

Το συνολικό κόστος της εξερεύνησης μπορεί να κυμανθεί από 105 ως 225€ ανά εγκατεστημένο kW και αποτελεί περίπου το 5% του συνολικού κόστους της κύριας επένδυσης και το 25% του συνολικού κόστους γεωθερμικού νερού. Δεδομένου ότι ο τύπος των δραστηριοτήτων που απαιτούνται για τον εντοπισμό μιας νέας γεωθερμικής πηγής είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του έργου, ισχύουν σημαντικές οικονομίες κλίμακας όταν οι δαπάνες εξερεύνησης προσαρμόζονται σε ένα μεγαλύτερο έργο.

Γεωτρήσεις

Η ολοκλήρωση των διαδικασιών εξερεύνησης συνεπάγεται τη διεξαγωγή πλήθους γεωτρήσεων (διερευνητικών, παραγωγικών). Τα γεωθερμικά φρέατα, είτε είναι διερευνητικά είτε παραγωγικά, διανοίγονται με τη χρήση τεχνολογιών περιστροφικής γεώτρησης που έχουν υιοθετηθεί κατά μεγάλο μέρος από τη βιομηχανία πετρελαίου, και σε μικρότερη κλίμακα από τις έρευνες για νερό και ορυκτά. Οι τεχνολογίες αυτές τροποποιούνται ώστε να αντεπεξέρχονται στις σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών πετρωμάτων που απαντώνται.

Το κόστος αυτό ποικίλλει από μερικές χιλιάδες ευρώ για εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας μέχρι εκατομμύρια ευρώ για περιπτώσεις που είναι απαραίτητο να βρεθούν πηγές σε υψηλές θερμοκρασίες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ποσοστά επιτυχίας των εξερευνητικών γεωτρήσεων κυμαίνονται από 20% ως 60%. Το κόστος γεώτρησης διαμορφώνεται από δύο κύριους παράγοντες: (α) το κόστος γεώτρησης ενός μεμονωμένου φρεατίου και, (β) τον αριθμό των φρεατίων που θα διανοιχθούν. Ο αριθμός των γεωτρήσεων καθορίζεται από τη μέση παραγωγική ικανότητα των φρεατίων και το μέγεθος της μονάδας. Η παραγωγική ικανότητα των φρεατίων εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και τη πίεση της πηγής, καθώς επίσης και από τη διαπερατότητα του πετρώματος. Το κόστος των γεωτρήσεων είναι συνήθως μεταξύ του 30% και 50% του συνολικού κόστους ανάπτυξης μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράγοντες της αγοράς και προβλήματα στις εξερευνητικές γεωτρήσεις μπορούν να αυξήσουν το κόστος κατά 25%.



Σχήμα 5.2 – Κύκλος ζωής γεωθερμικού πεδίου [28]

Η στρατηγική των διερευνητικών γεωτρήσεων περιλαμβάνει τη διάνοιξη τριών έως πέντε φρεάτων, ανάλογα με το μέγεθος του προγραμματισμένου έργου. Τα συνήθη κόστη των φρεάτων "λεπτής οπής" κυμαίνονται από \$250 έως \$1000 ανά μέτρο βάθους, δηλαδή απαιτείται ποσό \$450.000 έως \$1.000.000 για ένα φρέαρ με βάθος 1500m. Στα μεγαλύτερα έργα τα φρέατα διανοίγονται κάθετα ή με εκτροπή της κατεύθυνσης από επιμέρους εξέδρες γεώτρησης, ενώ τα μικρότερα έργα μπορεί να χρησιμοποιούν μία εξέδρα γεώτρησης και φρέατα με εκτροπή της κατεύθυνσης

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η επένδυση που αφορά τη φάση της ανάπτυξης δεν είναι σίγουρο ότι θα επιστραφεί από τη μετέπειτα χρήση του ενεργειακού πόρου.

Από τα παραπάνω εκτιμάται κόστος 150€/kW για εξερεύνηση και 750€/kW για τις γεωτρήσεις και την ανάπτυξη του πεδίου. Προκύπτει κόστος 900 €/kW το οποίο στην μελετώμενη μονάδα αντιστοιχεί σε $C_{g\#0} = 1.926.000$ €.

$$C_{F,sp,L} = \frac{C_{g\#0} \cdot CRF}{\dot{m}_w \cdot t_{op}} \quad (5.20)$$

CRF είναι ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου και t_{op} είναι ο χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης.

$$\text{Άρα } C_{F,sp,L} = \frac{1.926.000 \times 0,12}{96 \times 7665 \times 3600} = 8,724 \text{ euroscents/τόνο}$$

$$\text{Παροχή: } 96 \text{ kg/s} \times (7665 \times 3600) \text{ sec/yr} \times 0,0000872 \text{ €/kg} = 231.120 \text{ €/yr}$$

Πίνακας 5.5: Σύνοψη του ετήσιου σταθερού και μεταβλητού κόστους Ο&Μ

	Αντικείμενο	ΤΙΜΗ	Μονάδα
1	Χρόνος Λειτουργίας	7665	h
2	Θέσεις εργασίας	5	
3	Μέση τιμή εργασίας	5	€/h
4	Ώρες εργασίας	2.080	h
5	Άμεσο εργατικό κόστος	52.000	€/έτος
6	σταθερό κόστος Λ&Σ	104.000	€/έτος
7	μεταβλητό κόστος Λ&Σ	10.000	€/έτος
8	Κόστος καυσίμου	231.120	€/yr

5.6 Μηχανισμοί χρηματοδότησης

Το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο εν τέλει είναι το «προϊόν» της οικονομικής ανάλυσης, επηρεάζει όχι μόνο την επένδυση κεφαλαίου, αλλά και την προέλευση των χρηματικών πόρων. Το κόστος δανεισμού χρήματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της επένδυσης, την κατάσταση των χρηματοπιστωτικών αγορών και άλλων συνθηκών.

Η πλειοψηφία των επενδύσεων, χρηματοδοτείται από δύο πηγές: δανεισμό και ίδια κεφάλαια. Το κόστος δανεισμού είναι μικρότερο, όμως στην περίπτωση αποτυχίας της επένδυσης, ο δανειστής είναι συνήθως ο πρώτος που πρέπει να αποπληρωθεί. Επιπλέον, συχνά η τράπεζα ζητά εγγυήσεις για το δάνειο μέσω των ιδίων κεφαλαίων. Το τελευταίο, όμως, είναι πιο ακριβό. Σύμφωνα με την Εταιρία Γεωθερμικής Ενέργειας (Geothermal Energy Association), στις γεωθερμικές επενδύσεις συνήθως το 30% της χρηματοδότησης καλύπτεται από ίδια κεφάλαια και το υπόλοιπο 70% από δανεισμό. Τυπικά επιτόκια για την γεωθερμική βιομηχανία είναι 6-8% για το χρέος και 17% για τα ίδια κεφάλαια. Οι παραπάνω δυο κατηγορίες επιτοκίων επηρεάζονται σε υψηλό βαθμό από τον κίνδυνο αποτυχίας της επένδυσης. Οι επενδυτές συνήθως εξισορροπούν το αυξημένο αυτό ρίσκο αυξάνοντας τα επιτόκια. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις, εξ' αιτίας της αβεβαιότητας της παραγωγικότητας των παραγωγικών γεωτρήσεων και της χημικής σύστασης του γεωθερμικού ρευστού, θεωρούνται πιο επικίνδυνες επενδύσεις από αντίστοιχες μονάδες εκμετάλλευσης αποβαλλόμενης θερμότητας. Σύμφωνα με

την Εταιρία Γεωθερμικής Ενέργειας το πραγματικό επιτόκιο για μία γεωθερμική εγκατάσταση αντιστοιχεί σε 10%.

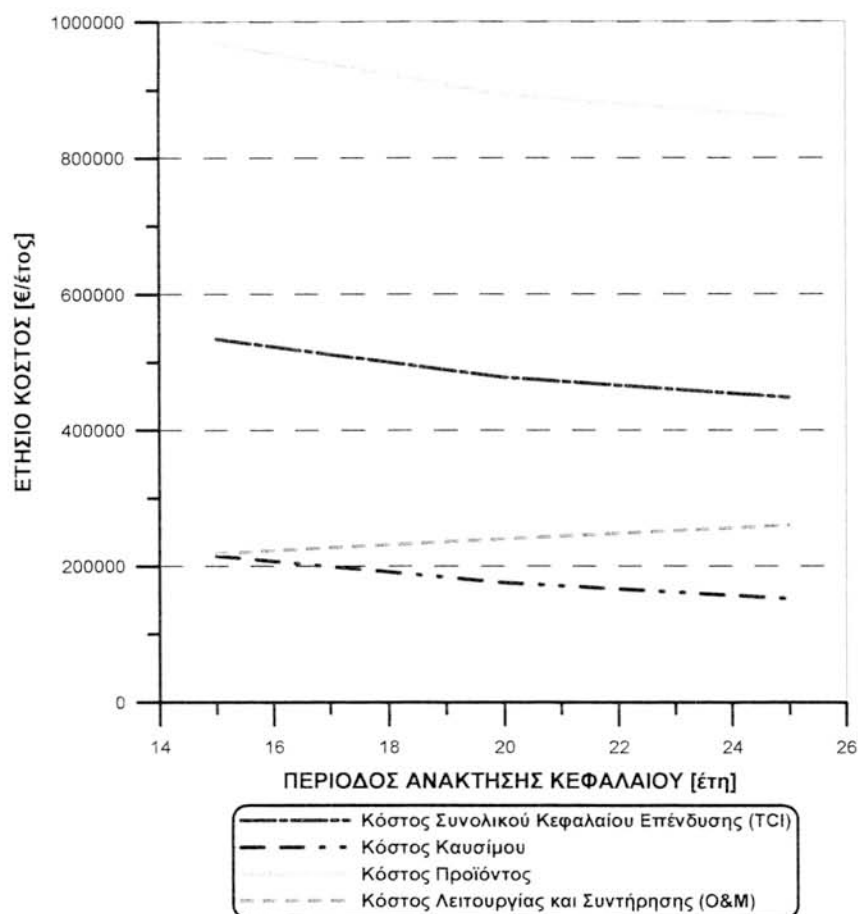
Ο χρόνος ζωής μιας γεωθερμικής εγκατάστασης δυαδικού κύκλου είναι σχετικά υψηλός. Σε πολλές περιπτώσεις εκτιμάται ότι ανέρχεται σε περίπου 30 με 35 χρόνια. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να διαχωριστεί αυτός ο πραγματικός χρόνος ζωής της εγκατάστασης από το χρόνο ανάκτησης κεφαλαίου, ο οποίος είναι αρκετά μικρότερος. Ο χρόνος ανάκτησης κεφαλαίου, κατά πολλούς επενδυτές, διαφέρει ανάλογα με το είδος της επένδυσης και οφείλεται στη διαφορετική φύση των εκάστοτε επενδυτών. Παραδείγματος χάριν, μεγάλοι οργανισμοί που επενδύουν σε μια γεωθερμική εγκατάσταση και χρησιμοποιούν την παραγόμενη ενέργεια συνήθως δεν επιζητούν γρήγορη ανάκτηση του κεφαλαίου επένδυσης. Συνεπώς ο χρόνος ανάκτησης κεφαλαίου θεωρείται 20 χρόνια.

5.7 Αποτελέσματα της Οικονομικής Ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης του βασικού μοντέλου μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6 για τιμές εξισορροπημένες στο τέλος του 2010. Γίνεται αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο μερίδιο στα ετήσια έξοδα κατέχει το κόστος επένδυσης κεφαλαίου για τις λειτουργίες εντός της εγκατάστασης.

Πίνακας 5.6 Εξισορροπημένα α Ετήσια Κόστη (τιμές τέλους 2010)

Ετήσιο Κόστος	[€/έτος]	[€/έτος]	[€/έτος]
	$N_y=15$	$N_y=20$	$N_y=25$
Συνολικό Κόστος Επένδυσης	534.309	477.355	447.723
Κόστος Καυσίμου	215.246	175.347	151.944
Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	218.627	239.767	259.520
Κόστος Προϊόντος	968.182	892.469	859.187



Σχήμα 5.3 – Ετήσια Εξισορροπημένα κόστη εγκατάστασης σε σχέση με την περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου

Με την αύξηση της περιόδου ανάκτησης κεφαλαίου, N_y , τα ετήσια κόστη επένδυσης κεφαλαίου και καυσίμων μειώνονται, σε αντίθεση με το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το οποίο αυξάνει. Παρά το γεγονός αυτό, το συνολικό ετήσιο κόστος προϊόντος μειώνεται με την αύξηση του N_y .

Πίνακας 5.7 – Εξισορροπημένα μοναδιαίο κόστος παραγόμενης ισχύος για νέες γεωτρήσεις

Μοναδιαίο Κόστος Παραγόμενης Ισχύος	[eurocent/kWh]	[eurocent/kWh]	[eurocent/kWh]
	$N_y=15$	$N_y=20$	$N_y=25$
Συνολικό Κόστος Επένδυσης	3,26	2,91	2,73
Κόστος Καυσίμου	1,31	1,07	0,93
Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	1,33	1,46	1,58
Κόστος Προϊόντος	5,90	5,44	5,24

Σε περίπτωση που γίνει εκμετάλλευση σε ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις σε ένα γεωθερμικό πεδίο προκύπτουν ετήσια κόστη καυσίμου μειωμένα κατά 85% καθώς όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο το κόστος έρευνας και γεώτρησης παίζει έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στη διαμόρφωση του κόστους προϊόντος το οποίο εμφανίζεται μειωμένο κατά 81%.

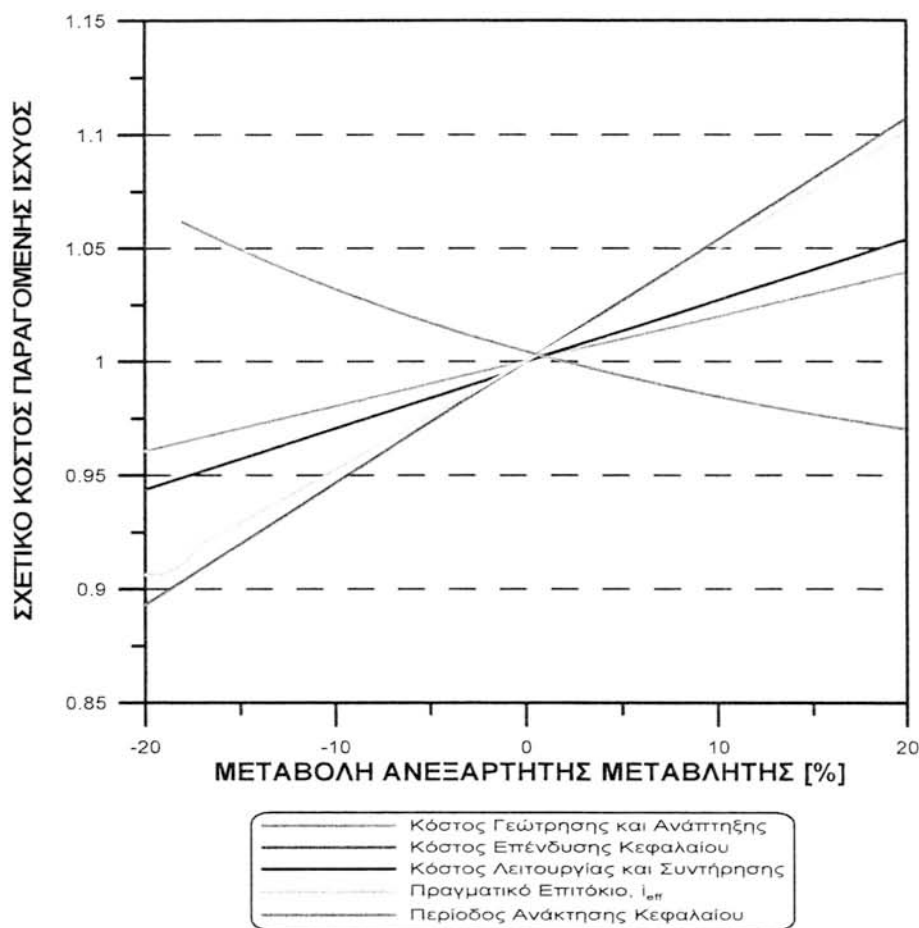
Πίνακας 5.8 – Εξισορροπημένο μοναδιαίο κόστος παραγόμενης ισχύος για υπάρχουσες γεωτρήσεις

Μοναδιαίο Κόστος Παραγόμενης Ισχύος	[eurocent/kWh]	[eurocent/kWh]	[eurocent/kWh]
	N _y =15	N _y =20	N _y =25
Συνολικό Κόστος Επένδυσης	3,26	2,91	2,73
Κόστος Καυσίμου	0,1965	0,16	0,14
Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης	1,33	1,46	1,58
Κόστος Προϊόντος	4,7865	4,53	4,45

Το Σχήμα 5.4 δείχνει το σχετικό κόστος της παραγόμενης ισχύος σε σχέση με τη ποσοστιαία απόκλιση μιας ανεξάρτητης μεταβλητής. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης, τόσο μεγαλύτερη ευαισθησία παρουσιάζει το κόστος προϊόντος στη μεταβολή αυτή.

Το σχετικό εξισορροπημένο κόστος προϊόντος χρησιμοποιείται σε αυτή τη περίπτωση αντί του κόστους σε eurocents/kWh για δύο λόγους: πρώτον γιατί επιτρέπει τη σύγκριση της ευαισθησίας διαφορετικών διεργασιών σε μια εγκατάσταση και δεύτερον, βοηθά στην εκτίμηση του κόστους περισσότερων από μία διαφορετικών μεταβλητών από τη βασική ανάλυση. Το τελευταίο επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τα σχετικά κόστη της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής με το σχετικό κόστος της βασικής ανάλυσης. Παρ' όλα αυτά, οι μεταβλητές αυτές δεν είναι πλήρως ανεξάρτητες, π.χ. η μεταβολή σε μία από αυτές επηρεάζει τη σημασία κάποιας άλλης. Έτσι, μια τέτοια εκτίμηση προδίδει μόνο ποιοτικά αποτελέσματα.

Το κόστος προϊόντος είναι αρκετά ευαίσθητο στη μεταβολή του πραγματικού επιτοκίου. Μια μεταβολή της τάξης του 20 % στο πραγματικό επιτόκιο, οδηγεί σε αύξηση σχεδόν 10% του σχετικού κόστους της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 5.4 – Ανάλυση ευαισθησίας σχετικού κόστους προϊόντος

Η ευαισθησία στη μεταβολή του κεφαλαίου επένδυσης, του κόστους γεώτρησης και ανάπτυξης και του κόστους λειτουργίας και Συντήρησης είναι εξαρτώμενη από το μερίδιο που κατέχουν τα κόστη αυτά στο συνολικά έξοδα. Έτσι, όπως θα ήταν αναμενόμενο, μια γεωθερμική εγκατάσταση είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις μεταβολές στα κόστη επένδυσης και γεώτρησης.

Η επιρροή της περιόδου ανάκτησης κεφαλαίου σε μια εγκατάσταση ισχύος δείχνει ξεκάθαρα το νόημα της αξίας του χρήματος: Η μείωση της οικονομικής ζωής, έχει ως αντίκτυπο μια πολύ αρνητική επίδραση στο σχετικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε αντίθεση με την επιμήκυνση της που προσφέρει πού μικρότερο όφελος.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι το σχετικό κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος εξαρτάται και από μη οικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι στην παραπάνω ανάλυση θεωρούνται σταθερές. Παρόλο που ο αριθμός αυτών των

παραμέτρων είναι υψηλός, μόνο λίγες από αυτές μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην συνολική συμπεριφορά της εγκατάστασης.

5.8 Μειονεκτήματα της Οικονομικής Ανάλυσης του Προβλήματος

Η ανάλυση που προηγήθηκε περιλαμβάνει πολλές υποθέσεις και απλοποιήσεις. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του Συνολικού Κεφαλαίου της Επένδυσης (TCI) είναι το μεγαλύτερο μειονέκτημα. Η μέθοδος που προτάθηκε από τον Bejan δίνει μόνο μια χονδρική εκτίμηση του αρχικού κόστους. Επίσης, το κεφάλαιο επένδυσης για εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο των συμβατικών ορυκτού καυσίμου. Λόγω της μικρής εξάπλωσης των δυαδικών συστημάτων, η βιβλιογραφία με εκτιμήσεις και αρχικά κόστη είναι ανεπαρκής.

Ένα ακόμα μειονέκτημα που παρουσιάζεται στο μοντέλο σχεδιασμού, είναι η έλλειψη σύνδεσης του γεωθερμικού ταμιευτήρα με την εγκατάσταση. Μια πιο ρεαλιστική ανάλυση της οικονομικής ζωής θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνει τις μεταβολές στην παραγωγικότητα των γεωτρήσεων και την πίεση άντλησης από το φρέαρ σε σχέση με το κόστος της παραγόμενης ισχύος.

Έχει αποδειχθεί, λόγω των διαφορετικών θερμοδυναμικών και χημικών χαρακτηριστικών των πηγών θερμότητας, ότι όμοιες εγκαταστάσεις σε όμοιες εφαρμογές μπορεί να έχουν διαφορετική οικονομική συμπεριφορά. Για όλους τους παραπάνω λόγους, τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης που προηγήθηκε θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ως προσεγγίσεις των πραγματικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Εξεργοοικονομική Ανάλυση και Αξιολόγηση

6.1 Θεμελιώδεις Αρχές Εξεργοοικονομίας

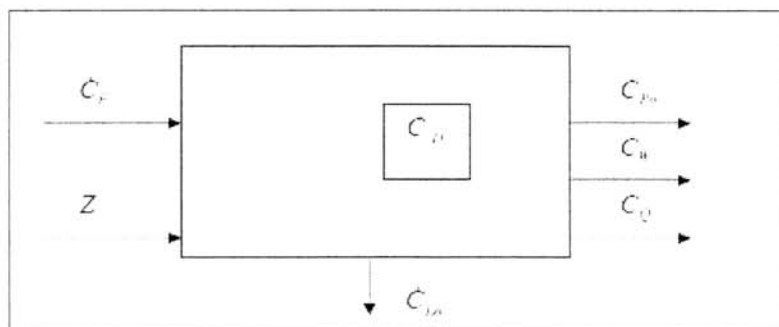
Όταν οι έννοιες της εξέργειας συνδυαστούν με αυτές των οικονομικών, το αποτέλεσμα είναι γνωστό ως θερμοοικονομία ή εξεργοοικονομία (thermoconomics - exergoeconomics). Η εξεργοοικονομική ανάλυση επιτρέπει τον προσδιορισμό των πραγματικών πηγών κόστους στο επίπεδο των επιμέρους συσκευών που αφορούν: α) Κόστη κεφαλαίου επένδυσης (CI), β) κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M) και γ) κόστη λόγω καταστροφής και απώλειας εξέργειας.

Μια εξεργοοικονομική ανάλυση πρέπει να συνοδεύεται από μια εξεργειακή και μια οικονομική ανάλυση ενός συστήματος. Εξ αιτίας της μεταβολής των κοστών χρόνο με το χρόνο, όταν αξιολογείται ο σχεδιασμό ενός θερμικού συστήματος από οικονομικής πλευράς πρέπει να χρησιμοποιείται η προσέγγιση μέσω της κλιμάκωσης.

6.1.1 Κοστολόγηση με βάση την εξέργεια

Στο μελετώμενο κύκλο Kalina-TK, σε λειτουργία σταθερής κατάστασης υπάρχει ένας αριθμός εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευμάτων μείγματος αμμωνίας – νερού όπως επίσης και θερμικές αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον. Η μεταφορά μάζας σε αυτά τα ρεύματα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μεταφορά ενέργειας και εξέργειας από και προς το καθένα από αυτά.

Από τη στιγμή που η εξέργεια μετρά την πραγματική θερμοδυναμική αξία ενός ρεύματος ή μιας διεργασίας έχει νόημα να χρησιμοποιηθεί ως βάση για οικονομική ανάλυση της.



Σχήμα 6.1 – Σχηματική αναπαράσταση ισοζυγίου κόστους

Όπου C_{po}, C_w, C_Q , αντιστοιχούν στα κόστη της παραγόμενης ισχύος, έργου και θερμότητας αντίστοιχα μετρούμενα σε €/s. Η μεταβλητή C_F συμβολίζει τη ροή του κόστους του γεωθερμικού νερού ενώ ο όρος Z αντιπροσωπεύει ροή του κόστους κεφαλαίου και αποτελεί το άθροισμα του κόστους επένδυσης (Z_{cl}) και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης ($Z_{O\&M}$). Με τους όρους C_D και C_{Lo} συμβολίζονται το κόστος της ροής καταστροφής και απώλειας εξέργειας αντίστοιχα.

Η εισερχόμενη ροή κόστους στην εγκατάσταση αποτελεί το άθροισμα του κόστους ροής του καυσίμου (γεωθερμικό νερό), C_F και του κόστους ροής κεφαλαίου (Z). Η εξερχόμενη ροή του κόστους από την εγκατάσταση είναι το άθροισμα του κόστους ροής των «προϊόντων» (C_p). Επειδή η μελετώμενη εγκατάσταση δεν είναι ιδανική, θα πρέπει να συμπεριληφθούν και τα κόστη καταστροφής και απώλειας εξεργειακής ροής. Συνεπώς το ισοζύγιο του κόστους για όλη την εγκατάσταση σε κατάσταση μόνιμης ροής εκφράζεται ως:

$$C_{p,n} = C_{F,n} - C_{Lo,n} + Z_n \quad (6.1)$$

ή με όρους μοναδιαίου εξεργειακού κόστους,

$$C_p EX_p = C_F EX_F - C_{Lo} EX_{Lo} + Z_{Cl} + Z_{O\&M} \quad (6.2)$$

Καθώς C_p, C_F, C_{Lo} , είναι τα μοναδιαία εξεργειακά κόστη

$$C_p = c_p \cdot EX_p, \quad C_F = c_F \cdot EX_F, \quad C_{Lo} = c_{Lo} \cdot EX_{Lo} \quad (6.3)$$

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι κανένα κόστος δε συνδέεται απ' ευθείας με την καταστροφή εξέργειας. Αυτό είναι ένα κρυμμένο αλλά πολύ σημαντικό κόστος που μπορεί να αποκαλυφθεί μόνο μέσα από τη θερμοοικονομική ανάλυση σε επόμενη παράγραφο.

6.1.2 Ισοζύγιο κόστους σε κάθε συσκευή

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (6.1), (6.2), (6.3), υπολογίζονται τα ισοζύγια κόστους για κάθε κύρια συσκευή της εγκατάστασης:

$$C_{p,n} = C_{F,n} - C_{Lo,n} + Z_n \quad (6.4)$$

$$c_{p,n} Ex_{p,n} = c_{F,n} Ex_{F,n} - c_{Lo,n} Ex_{Lo,n} + Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n} \quad (6.5)$$

Όπου ο δείκτης n αντιστοιχεί στο αριθμό της n -οστής κύριας συσκευής του Kalina-TK. Η τιμή του κόστους ροής του κεφαλαίου επένδυσης, Z_{ci} , υπολογίζεται ως εξής (Kotas, 1985) [26]:

$$Z_{ci,n} = \frac{CRF \cdot C_{L,n}}{t_{op}} \quad (6.6)$$

Το κόστος κτήσης εξοπλισμού C_n για κάθε συσκευή δίνεται στους πίνακες 5.1-5.2. Έτσι οι τιμές $Z_{ci,n}$ υπολογίζονται για εξισορροπημένες τιμές κόστους στο τέλος του 2010 και παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 – Ρυθμός κόστους κεφαλαίου κύριων συσκευών

ΣΥΣΚΕΥΗ	$Z_{ci,n} \times 10^{-3}, \text{€}/s$
Γεωεναλλάκτης	0,86
Συμπυκνωτής	0,94
Στρόβιλος	7,46
Εναλλάκτης LR	0,04
Εναλλάκτης HR	0,04
Αντλία	0,29

Ομοίως, ο ρυθμός κόστους λειτουργίας και συντήρησης για κάθε συσκευή υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Z_{O\&M,n} = \frac{CRF \cdot C_{L,O\&M}}{t_{op}} \cdot \frac{C_n}{PEC} \quad (6.7)$$

Και τα αποτελέσματα του κλιμακοποιημένου $Z_{O\&M,n}$ για κάθε συσκευή παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2

Πίνακας 6.2 – Κόστος Ο&Μ των κύριων συσκευών του Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	$Z_{O\&M,n} \times 10^{-3}, \text{ €}/s$
Γεωεναλλάκτης	0,07
Συμπυκνωτής	0,11
Στρόβιλος	1,04
Εναλλάκτης LR	0,0047
Εναλλάκτης HR	0,0055
Αντλία	0,01

6.1.3 Κόστος Καταστροφής και Απώλειας Εξέργειας

Στα ισοζύγια κόστους που διατυπώθηκαν για την εγκατάσταση (εξίσωση 6.2) και για τη συσκευή (εξίσωση 6.5) δεν υπήρχαν όροι άμεσα σχετιζόμενοι με την καταστροφή εξέργειας. Η επίδραση της καταστροφής εξέργειας επιδεικνύεται συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.10 και 6.5 :

(Απαλείφοντας την εξέργεια του καυσίμου)

$$c_{p,n} EX_{p,n} = c_{F,n} EX_{F,n} + (C_F EX_{Lo,n} - C_{Lo,n}) + (Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n}) + c_F EX_{D,n} \quad (6.8)$$

(Απαλείφοντας την εξέργεια του προϊόντος)

$$c_{p,n} EX_{p,n} = c_{F,n} EX_{F,n} + (C_P EX_{Lo,n} - C_{Lo,n}) + (Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n}) + c_P EX_{D,n} \quad (6.9)$$

Συνεπώς, στην κοστολόγηση της καταστροφής εξέργειας θεωρείται ότι το κόστος που σχετίζεται με την καταστροφή εξέργειας στη n-συσκευή ισούται με τη ροή καταστροφής εξέργειας στη συσκευή αυτή πολλαπλασιασμένη με το μοναδιαίο κόστος του προϊόντος ή του καυσίμου (στον Kalina-TK το γεωθερμικό νερό). Δηλαδή,

$$C_{D,n} = c_{F,n} \cdot EX_{D,n} \quad \text{ή} \quad C_{D,n} = c_{P,n} \cdot EX_{D,n} \quad (6.10)$$

Στην εγκατάσταση Kalina-TK προτιμάται το δεξί μέρος της εξίσωσης καθώς οι γεωθερμικοί πόροι είναι αυστηρώς ορισμένοι. Συνεπώς, το κόστος του ρυθμού

καταστροφής εξέργειας σε κάθε συσκευή υπολογίζεται και παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 – Κόστος της καταστροφής εξέργειας στις συσκευές του Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	$C_{D,n} \cdot 10^{-3}, \text{€}/s$
Γεωεναλλάκτης	1,43
Συμπυκνωτής	1,42
Στρόβιλος	5,51
Εναλλάκτης LR	2,33
Εναλλάκτης HR	0,45
Αντλία	0,48

Υπάρχουν δύο εξερχόμενα ρεύματα από τον Kalina-TK, του γεωεναλλάκτη και του συμπυκνωτή. Την απώλεια εξέργειας στο ρεύμα του συμπυκνωτή τη χρεώνεται το φυσικό περιβάλλον. Η απλούστερη προσέγγιση για την κοστολόγηση της απώλειας εξέργειας που σχετίζεται με το συμπυκνωτή είναι:

$$C_{Lo,cond} = 0 \quad (6.11)$$

Το άλλο ρεύμα απώλειας εξέργειας από τον γεωεναλλάκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για κάποια εφαρμογή άμεσης θερμότητας είτε απ' ευθείας για την επαναφόρτιση του γεωθερμικού ταμειυτήρα. Ως εκ τούτου, το κόστος του ρεύματος αυτού υπολογίζεται διαφορετικά από το προηγούμενο ως ακολούθως:

$$C_{Lo} = c_{geo,out} \cdot E_{Lo} \quad (6.12)$$

Όπου $c_{geo,out}$ είναι το κλιμακοποιημένο μοναδιαίο εξεργειακό κόστος που σχετίζεται με την απώλεια εξέργειας στον γεωεναλλάκτη και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε οποιαδήποτε μελέτη περεταίρω εκμετάλλευσης του γεωθερμικού νερού.

6.1.4 Μοναδιαίο Κόστος Εξέργειας

Το κλιμακοποιημένο μοναδιαίο εξεργειακό κόστος που σχετίζεται με το γεωθερμικό νερό πριν εισέλθει στο γεωεναλλάκτη υπολογίζεται ως εξής:

$$c_{E,geo,in} = \frac{c_{F,spec,L}}{e_1} = 2,34 \cdot 10^{-6} \text{ € / kJ}$$

Ομοίως το κλιμακοποιημένο μοναδιαίο εξεργειακό κόστος που σχετίζεται με το γεωθερμικό νερό αφού εξέλθει από το γεωεναλλάκτη υπολογίζεται ως εξής:

$$c_{E,geo,out} = \frac{c_{F,spec,L}}{e_2} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ € / kJ}$$

κλιμακοποιημένο μοναδιαίο εξεργειακό κόστος που σχετίζεται με την παραγωγή ισχύος στο στρόβιλο υπολογίζεται:

$$c_{E,turb} = 11,95 \cdot 10^{-6} \text{ € / kJ}$$

Οι ροές κόστους και τα μοναδιαία κόστη για κάθε ρεύμα του Kalina-TK υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις και παραθέτονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.4).

$$c_{E,brine} \cdot EX_3 - c_{E,LR} \cdot EX_{17} = c_{E,brine} \cdot (EX_3 - EX_{17}) + Z_{Cl,brine} + Z_{O\&M,brine} + C_{D,brine} \cdot EX_{D,brine} \quad (6.13)$$

$$c_{E,turb} = c_{E,brine} + \frac{Z_{Cl,turb} + Z_{O\&M,turb} \cdot EX_{D,turb}}{P_{turb}} \quad (6.14)$$

$$c_{E,LR} \cdot EX_{17} - c_{E,HR} \cdot EX_{16} = c_{E,brine} \cdot (EX_{17} - EX_{16}) + Z_{Cl,LR} + Z_{O\&M,LR} + C_{D,LR} \cdot EX_{D,LR} \quad (6.15)$$

$$c_{E,HR} \cdot EX_{16} - c_{E,pump} \cdot EX_{12} = c_{E,brine} \cdot (EX_{16} - EX_{12}) + Z_{Cl,HR} + Z_{O\&M,HR} + C_{D,HR} \cdot EX_{D,HR} \quad (6.16)$$

$$c_{E,pump} \cdot EX_{12} - c_{E,brine} \cdot EX_{11} = c_{E,turb} \cdot EX_{12} + Z_{Cl,pump} + Z_{O\&M,pump} + C_{D,pump} \cdot EX_{D,pump} \quad (6.17)$$

Πίνακας 6.4 – Κλιμακοποιημένα κόστη εξεργειακής ροής και μοναδιαία κόστη εξέργειας
για τον Kalina-TK

ΡΕΥΜΑ	ΡΟΗ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ E_x [kW]	ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ $C_x 10^{-3}$, €/s	ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΣ [€/Gj]
1	6507,3	36,5239	2,3455
2	3050,5	19,0549	4,4958
3	3426,3	18,0144	4,3818
4	2767,2	12,2827	4,3818
5	351,38	2,1167	4,3818
6	23,717	0,3658	4,3818
7	-29,42	0,0691	4,3818
8	-55,48	-0,0401	4,3818
9	273,67	3,9309	4,3818
11	0	0,0000	4,3818
12	87,126	1,6245	18,3876
13	-188,41	0,0000	0,0000
14	68,195	2,0847	0,0000
16	111,5	2,4265	15,4931
17	311,68	6,0918	13,4972
19	218,64	3,5035	4,3818

6.2 Εξεργοοικονομική Αξιολόγηση

Μια λεπτομερής θερμο-οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης Kalina-TK σύμφωνα με τους Moran και Tsatsaronis πρέπει να βασίζεται στις ακόλουθες μεταβλητές, υπολογισμένες για καθεμιά από τις βασικές συσκευές της εγκατάστασης είναι οι εξής:

- Εξεργειακή απόδοση, ϵ
- Λόγος Καταστροφής Εξέργειας
- Λόγος Απώλειας Εξέργειας
- Σχετική διαφορά κόστους
- Εξεργοοικονομικός συντελεστής

6.2.1 Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης

Η έννοια του εξεργειακού βαθμού απόδοσης αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο και αποτελεί επί της ουσίας το λόγο μεταξύ προϊόντος και καυσίμου και δίνεται από τη σχέση (Bejan et al, 2006):

$$\eta_{EX} = \frac{P_{net}}{EX_{brine} - EX_{Lo} - EX_{cond,Lo}} \quad (6.18)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για τη μελετώμενη μονάδα υπολογίστηκε θεωρώντας ως καύσιμο το γεωθερμικό νερό και προϊόν την παραγόμενη ισχύ.

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων που παραθέτονται στο Παράρτημα ενώ τα αποτελέσματα για τις κύριες συσκευές του κύκλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

Οι εξεργειακές αποδόσεις της κάθε συσκευής 'προδίδουν' ποιοτικά και ποσοτικά τα σημεία εκείνα στα οποία πρέπει ο σχεδιαστής να βελτιώσει. Για το λόγο αυτό στην επόμενη παράγραφο γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του κύκλου Kalina-TK πάνω σε μια ποικιλία μεταβλητών με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά του.

Πίνακας 6.5 – Εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης

ΣΥΣΚΕΥΗ	ϵ_{ex} [%]
Γεωεναλλάκτης	90,1
Συμπυκνωτής	59,5
LR Εναλλάκτης	63,07
HR Εναλλάκτης	70,0
Στρόβιλος	78,77
Διαχωριστής	79,9
Αντλία	77,5
Εγκατάσταση	23,57

6.2.2 Λόγοι καταστροφής και απώλειας εξέργειας

Οι τιμές των εξεργειακών ρών καταστροφής εξέργειας $Ex_{D,n}$ (πίνακας 4.5) δίνει θερμοδυναμικές μετρήσεις της αναποτελεσματικότητας της εγκατάστασης. Η ροή καταστροφής εξέργειας στην κάθε συσκευή μπορεί να συγκριθεί είτε με την εξέργεια που προσδίδει το γεωθερμικό νερό στην εγκατάσταση, $Y_{D,geo,n}$, είτε με τη συνολικά καταστροφή εξέργειας, $y_{D,total,n}$, δίνοντας το λόγο καταστροφής εξέργειας:

$$y_{D,geo,n} = \frac{Ex_{D,n}}{Ex_{geo,in}} \quad y_{D,total,n} = \frac{Ex_{D,n}}{Ex_{D,total}} \quad (4.19a, 4.19b)$$

Ομοίως υπολογίζεται ο λόγος απώλειας εξέργειας ως προς την προδιδόμενη εξέργεια από το γεωθερμικό νερό, $y_{Lo,geo,n}$, και ως προς το σύνολο της απώλειας εξέργειας της εγκατάστασης, $y_{Lo,total,n}$,

$$y_{Lo,geo,n} = \frac{Ex_{D,n}}{Ex_{geo,in}} \quad y_{Lo,total,n} = \frac{Ex_{D,n}}{Ex_{total,in}} \quad (4.20a, 4.20b)$$

Οι λόγοι καταστροφής και απώλειας εξέργειας των βασικών συσκευών της μονάδας Kalina-TK παρουσιάζονται μαζί τις αντίστοιχες εξεργειακές ροές στον συγκεντρωτικό Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6 – Λόγοι Καταστροφής και Απώλειας Εξέργειας της εγκατάστασης Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	$EX_{D,i}$ [kW]	$y_{D,geo}$ [%]	$y_{D,Total}$ [%]	$EX_{L,i}$ [kW]	$y_{L,geo}$ [%]	$y_{L,Total}$ [%]
Γεωεναλλάκτης	342,07	5,26	18,44	3.050,52	46,88	97,81
Διαχωριστής	307,79	4,73	16,59			
Στρόβιλος	601,23	9,24	32,42			
Βαλβίδα	26,07	0,40	1,41			
HR Εναλλάκτης	30,64	0,47	1,65			
LR Εναλλάκτης	180,62	2,78	9,74			
Συμπυκνωτής	338,86	5,21	18,27	68,19	1,05	2,19
Αντλία	27,44	0,42	1,48			
Σύνολο	1.854,73	28,50	100	3.118,72	47,93	100

Η συνολική μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης εξ' αιτίας της καταστροφής και της απώλειας εξέργειας υπολογίζεται ακολούθως:

$$\varepsilon_{tot} = 1 - \sum y_D - \sum y_{Lo} = 1 - 0,285 - 0,479 = 0,236 \quad \text{ή} \quad 23,6\%$$

6.2.3 Σχετική διαφορά κόστους

Η σχετική διαφορά κόστους αντιπροσωπεύει τη σχετική αύξηση του μέσου κόστους ανά μονάδα εξέργειας ανάμεσα στο καύσιμο και το προϊόν της συσκευής. Η σχετική διαφορά κόστους, r_n , για κάθε συσκευή ορίζεται ως εξής:

$$r_n = \frac{c_{F,n} \cdot (EX_{D,n} + EX_{Lo,n}) + (Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n})}{c_{F,n} EX_{p,n}} \quad (6.21)$$

Όλες οι παράμετροι της παραπάνω εξίσωσης έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενες παραγράφους. Έτσι υπολογίζεται η σχετική διαφορά κόστους για κάθε συσκευή του Kalina-TK και τα αποτελέσματα παραθέτονται στον πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7 – Σχετική διαφορά κόστους για κάθε συσκευή του Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	r_{π}
Γεωεναλλάκτης	2,56
Συμπυκνωτής	630
LR Εναλλάκτης	0,39
HR Εναλλάκτης	0,04
Στρόβιλος	1,13
Αντλία	0,65

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος μεγάλες τιμές της σχετικής διαφοράς κόστους πρέπει να αποφεύγονται. Η υπερβολικά μεγάλη σχετική διαφορά κόστους στον συμπυκνωτή είναι πλασματική και οφείλεται στις συνθήκες περιβάλλοντος που έχουν τεθεί κατά την εξεργειακή ανάλυση του μοντέλου.

6.2.4 Εξεργοοικονομικός Συντελεστής

Στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς μιας συσκευής, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει ο σχεδιαστής τη σχετική σημασία της κάθε κατηγορίας. Αυτό δίνεται από τον εξεργοοικονομικό συντελεστή f_n και ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f_n = \frac{(Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n})}{(Z_{Cl,n} + Z_{O\&M,n}) + c_{F,n} \cdot (EX_{D,n} + EX_{Lo,n})} \quad (6.22)$$

Ακολουθείται η παρόμοια διαδικασία με αυτή της προηγούμενης παραγράφου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8 - Εξεργοοικονομικός Συντελεστής των κύριων συσκευών του Kalina-TK

ΣΥΣΚΕΥΗ	f_n [%]
Γεωεναλλάκτης	9,76
Συμπυκνωτής	37,85
LR Εναλλάκτης	5,56
HR Εναλλάκτης	27,73
Στρόβιλος	77,08
Αντλία	54,50

Μικρή τιμή του Εξεργοοικονομικού συντελεστή μαρτυρά ότι έχουμε μεγάλη συνεισφορά από κόστος αναντιστρεψιμοτήτων και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καλύτερου εξεργειακού βαθμού απόδοσης συσκευή επιβαρύνοντας το κόστος επένδυσης. Αντίστοιχα μεγάλη τιμή συνιστά να προσανατολιστούμε σε φθηνότερη λύση υποβαθμίζοντας την ποιότητα της συσκευής.

6.3 Διαδικασίες Βελτίωσης

Η οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης βασίστηκε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες του κεφαλαίου αυτού, αλλά και των πινάκων 4.2 και 4.4. Η συνολικά υψηλότερη ροή κόστους αρχικής επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης και εξεργειακής καταστροφής ανήκει στο στρόβιλο. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η συσκευή αυτή έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες βελτίωσης και η βελτιστοποίηση πρέπει να ξεκινήσει από εκεί. Η υπολογιζόμενη εξεργειακή απόδοση του στρόβιλου είναι 78,7% τη στιγμή που η καταστροφή εξέργειας στη συσκευή αυτή αντιστοιχεί στο 9,24%. Η αξιολόγηση των κοστών επιβεβαιώνει την εξεργειακή ανάλυση. Από τη στιγμή που η σχετική διαφορά κόστους είναι υψηλή, θα πρέπει να προταθεί η χρήση ενός λιγότερο αποδοτικού αλλά φθηνότερου στρόβιλου για να μειωθεί το κόστος του τελικού προϊόντος. Αυτό γίνεται ακόμα πιο προφανές

παρατηρώντας την τιμή του εξεργοοικονομικού συντελεστή για τη συσκευή αυτή (77,08). Σύμφωνα με τον Bejan, η τιμή αυτή αν και αποδεκτή, θεωρείται αρκετά υψηλή.

Πίνακας 6.9 – Άθροισμα των εξισορροπημένων κοστών TCI, O&M και του κόστους καταστροφής εξέργειας (τιμές τέλους 2010)

ΣΥΣΚΕΥΗ	$C_{i,n} + Z_{D,n}, 10^{-3} \text{ €/s}$
Στρόβιλος	14,02
Συμπυκνωτής	2,46
LR Εναλλάκτης	2,38
Γεωεναλλάκτης	2,38
Αντλία	0,78
HR Εναλλάκτης	0,50

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.9 καταδεικνύουν τις συσκευές που χρήζουν βελτίωσης. Οι συσκευές με τη μεγαλύτερη τιμή αθροίσματος κόστους είναι αυτές που απέχουν περισσότερο από τις βέλτιστες επιλογές. Μετά το στρόβιλο, οι επόμενες συσκευές με μεγάλη επίδραση στο κόστος είναι ο συμπυκνωτής, ο γεωεναλλάκτης και ο εναλλάκτης αναθέρμανσης υψηλής θερμοκρασίας. Οι τιμές του εξεργοοικονομικού συντελεστή για τις παραπάνω συσκευές δεν είναι υψηλός ενώ με εξαίρεση το συμπυκνωτή, για τον οποίο δε μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, η σχετική διαφορά κόστους δεν είναι μεγάλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – Σύνοψη και Συμπεράσματα

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας διαπιστώθηκε ότι ο σχεδιασμός μια γεωθερμικής εγκατάστασης δυαδικού κύκλου είναι εφικτός. Η συμπεριφορά του συστήματος αφορά τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της γεωθερμικής πηγής που χρησιμοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό.

Η ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης Kalina-TK που μελετήθηκε ξεπερνά τα 2.1 MWe θεωρώντας ότι η παροχή του γεωθερμικού νερού φτάνει τα 96 kg/s και η θερμοκρασία του τους 120°C. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού μπορεί να φτάσει τα 59.000 GJ/έτος πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να ηλεκτροδοτήσει μια ελληνική πόλη των 2000 κατοίκων. Επίσης η θερμοκρασία των 85°C με την οποία αποχωρεί το γεωθερμικό νερό από την εγκατάσταση είναι ιδανική για περεταίρω εκμετάλλευση όπως τηλεθέρμανση, αγροτικές εργασίες κ.ά.

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου επένδυσης της εγκατάστασης ανέρχεται σε περίπου 4.000.000 ευρώ χωρίς τον υπολογισμό επιπλέον δικτύου σωληνώσεων για τη μεταφορά του γεωθερμικού νερού.

Οι βαθμοί απόδοσης πρώτου και δεύτερου νόμου για την εγκατάσταση Kalina-TK υπολογίστηκαν σε 13,44 και 59,84 τιμές που θεωρούνται ιδιαίτερα ανταγωνιστικές σε σχέση με συμβατικές εγκαταστάσεις ορυκτών πόρων.

Η σχεδιασμένη μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών και είναι δυνατό να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς σε σχετικά χαμηλό κόστος. Η οικονομική ανάλυση δείχνει ότι για την εγκατάσταση Kalina-TK το κόστος είναι περίπου 5,5 eurocents/kWh. Δυστυχώς, μια γεωθερμική εγκατάσταση είναι αρκετά ευαίσθητη στις ιδιότητες του γεωθερμικού πεδίου (θερμότητα, παροχή γεωθερμικού νερού) καθώς οποιαδήποτε αλλαγή μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα της.

Παρόλο που όπως αποδείχθηκε από το σχεδιασμό μιας γεωθερμικής εγκατάστασης δυαδικού κύκλου το κόστος ηλεκτροπαραγωγής είναι χαμηλό, η χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι ακόμα περιορισμένη. Αν οι εγκαταστάσεις αυτές συνεχίσουν την ανάπτυξη τους τόσο γρήγορα όσο τα τελευταία χρόνια, είναι αναμενόμενο ότι η αυξημένη ζήτηση της αγοράς θα οδηγήσει σε προτυποποίηση των μονάδων με άμεσο αποτέλεσμα την οικονομία κλίμακας και τη μείωση του κόστους κεφαλαίου επένδυσης.

Βιβλιογραφία

- [1] Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from Renewable Energy Sources – European Union/Leonardo da Vinci Program 1999.
- [2] Harsh Gupta and Sukanta Roy, 2007. Geothermal Energy, An Alternative Resource for the 21st Century.
- [3] Dickson H. Mary, Fanelli Mario, 2004 . What is Geothermal Energy?. Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy
- [4] Μ. Φυτίκας & Ν.Ανδρίτσος , 2004. Γεωθερμία, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] Πολύζου Ολυμπία, 2007. Γεωθερμία-Βιώσιμη Ανάπτυξη και Τοπικές κοινωνίες Διαδακτορική Διατριβή ΕΜΠ
- [6] <http://nomothesia.ependyseis.gr>
- [7] Y. Cengel, M. Boles, 1998. Thermodynamics, An Engineering Approach 3rd edition
- [8] Kalina, A. I., 1983, “Combined Cycle and Waste Heat Recovery Power Systems Based on a Novel Thermodynamic Energy Cycle Utilizing Low-Temperature Heat for Power Generation
- [9] Ronald DiPippo, 2007. Geothermal Power Plants. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, Second Edition
- [10] El-Sayed, Y. M., and Tribus, M., 1985, “Theoretical Comparison of the Rankine and Kalina Cycles”
- [11] Kalina, A. I., and Leibowitz, H. M., 1987, “Applying Kalina Technology to a Bottoming Cycle for Utility Combined Cycles”
- [12] Nag, P. K., and Gupta, A. V. S. S. K. S., 1998, “Exergy Analysis of the Kalina Cycle,” Applied Thermal Engineering
- [13] Marston, C. H., 1990, “Parametric Analysis of the Kalina Cycle,” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power
- [14] Kalina, A. I., and Leibowitz, H. M., 1989, “Application of the Kalina Cycle Technology to Geothermal Power Generation,” Transactions-Geothermal Resources Council
- [15] Bliem, C. J., 1989, “Aspects of the Kalina Technology Applied to Geothermal Power Production,” Report No. EGG-EP-8708, Idaho National Engineering Laboratory
- [16] Iqbal, K. Z., Fish, L. W., and Starling, K. E., 1976, “Advantages of Using Mixtures as Working Fluids in Geothermal Binary Cycles

- [17] Páll Valdimarsson. Factors influencing the economics of the Kalina power cycle and situations of superior performance
- [18] Rosen, M.A., and Le, M., 1995, "Efficiency Measures for Processes Integrating Combined Heat and Power and District Cooling," Thermodynamics and the Design, Analysis, and Improvement of Energy Systems,
- [19] H. Hjartarson, R. Maack, S. Jóhannesson, 2003. Húsavík energy Multiple use of geothermal energy, International Geothermal Congress 2003 - "Multiple Integrated Uses of Geothermal Resources" Reykjavik, Iceland
- [20] International Energy Agency, 2003. Renewables For Power Generation Status & Prospects
- [21] Yogesh Jaluria, 2007. Design and Optimization of Thermal Systems, CRC Press.
- [22] Aspen Plus Unit Operation Models, Reference Manual, Version 10.
- [24] Bejan, A., Tsatsaronis, G., and Moran, M., 1996. Thermal design and optimization. John Wiley & Sons, Inc. The United States of America
- [25] Yunus Cengel, .Μεταφορά θερμότητας, Μια Πρακτική Προσέγγιση. Εκδόσεις Τζιόλα
- [26] Kotas, T.J., 1985. The exergy method of thermal plant analysis. Anchor Brendon Ltd, Tiptree, Essex, Great Britain.
- [27] Subir K. Sanyal 2004. Cost of geothermal power and factors that affect it proceedings, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- [28] James Lovekin, 2000. The economics of sustainable geothermal development, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104083