



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική εργασία

Σύγκριση κύκλων Kalina και ORC για γεωθερμικές
πηγές ενέργειας

Δαμιανίδης Χαράλαμπος

Επιβλέπων

Εμμανουήλ Κακαράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
Εισαγωγή.....	4
1. Γεωθερμία.....	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Ιστορικό της γεωθερμίας.....	7
1.3 Εφαρμογές της γεωθερμίας.....	10
1.4 Φυσικοί γεωθερμικοί πόροι.....	13
1.5 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων.....	14
1.6 Η Γεωθερμία στην Ελλάδα.....	15
1.7 Θερμά ξηρά πετρώματα(hot dry rock).....	18
1.8 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.....	22
1.8.1 Εισαγωγή-Ορισμός.....	22
1.8.2 ΓΑΘ συνδεδεμένες με το υπέδαφος.....	23
1.8.3 ΓΑΘ που λειτουργούν με υπόγεια νερά.....	25
1.9 Εναλλάκτες θερμότητας.....	26
1.9.1 Απλός εναλλάκτης θερμότητας παράλληλης ροής.....	29
1.9.2 Απλός εναλλάκτης θερμότητας κατά αντιρροή.....	30
1.9.3 Εναλλάκτες θερμότητας σε γεωθερμικές εφαρμογές.....	32
1.9.4 Εναλλάκτες πλακών.....	34
1.10 Το κόστος της γεωθερμίας.....	60
2. Kalina cycle.....	62
2.1 Εισαγωγή.....	62
2.2 Πλεονεκτήματα μίγματος αμμωνίας-νερού.....	62
2.3 Πλεονεκτήματα Kalina.....	63
2.4 Απόδοση του κύκλου Kalina για χαμηλής θερμοκρασίας πηγές θερμότητας.....	64
2.5 Kalina + αποβαλλόμενη θερμότητα (waste heat recovery).....	72
2.5.1 Εισαγωγή.....	72
2.5.2 Εργοστάσιο συμπαραγωγής στο Industrie-park Hoechst.....	73
2.5.3 Η διαδικασία του κύκλου Kalina.....	73
2.6 Kalina + Husavik της Ισλανδίας.....	79
2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός κύκλου Kalina.....	83
2.8 Κόστος Kalina.....	84
3. Οργανικός κύκλος Rankine.....	85
3.1 Εισαγωγή.....	85
3.2 Αρχές λειτουργίας του ORC.....	86

3.3	Εργαζόμενα μέσα	88
3.4	Πλεονεκτήματα ORC.....	92
3.5	Σύστημα εκτόνωσης - στρόβιλος.....	93
3.6	Εφαρμογές ORC.....	95
3.6.1	Καύση βιομάζας	95
3.6.2	Εφαρμογές ORC με γεωθερμία	96
3.6.3	Ηλιακή ενέργεια με οργανικό κύκλο Rankine.....	97
4.	Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας.....	99
4.1	Εισαγωγή	99
4.2	Περιγραφή του κύκλου.	100
4.3	Επίδραση της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου.....	110
5.	Υπολογιστικό μέρος.....	112
5.1	Γενικά.....	112
5.2	Προσομοίωση με το IPSEpro	113
5.3	Έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου	114
5.4	Αποτελέσματα υπολογισμών για κύκλο Kalina.....	117
5.5	Αποτελέσματα υπολογισμών για οργανικό κύκλο Rankine (O.R.C)	143
5.6	Σύγκριση βαθμού απόδοσης και ισχύος Kalina και ORC	163
6.	Συμπεράσματα	164
	Βιβλιογραφία	166
	Πηγές από σχήματα	167

Εισαγωγή

Η ανθρωπότητα έχει φτάσει σε ένα σημείο δίχως γυρισμό. Η ανάγκη για αλλαγή πολιτικής στον ενεργειακό τομέα φαντάζει επιτακτική όσο ποτέ άλλοτε. Πλέον οι ενεργειακές ανάγκες των ανθρώπων ξεπερνούν κατά πολύ αυτό που μπορεί να μας προσφέρει η μητέρα φύση γι' αυτό και περιβαλλοντικοί οργανισμοί ξεκαθαρίζουν ότι είτε θα αλλάξει πορεία η κοινωνία είτε η ίδια η φύση θα αλλάξει την κοινωνία. Τα επίπεδα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι τα μεγαλύτερα για τα τελευταία 650.000 χρόνια, τα 6 από τα τελευταία 8 χρόνια έχουν καταγραφεί τα θερμότερα όποτε οι κλιματικές αλλαγές λόγω της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας είναι γεγονός.

Οι ανάγκες του σύγχρονου ανθρώπου για ηλεκτρική ενέργεια και συνάμα οι καταστροφικές συνέπειες που έχει για το περιβάλλον η αλόγιστη χρήση ορυκτών καυσίμων και αερίων με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη αυτών των αναγκών έχουν στρέψει το ενδιαφέρον όλης της επιστημονικής κοινότητας αλλά και του απλού πολίτη σε αναζήτηση κάθε είδους ενέργειας η οποία θα είναι φιλική προς το περιβάλλον. Επομένως από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα έχει ήδη αρχίσει η ανάπτυξη διάφορων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου στις μέρες μας συνδράμουν σε ένα σημαντικό ποσοστό στην κάλυψη της ενέργειας για διάφορες χώρες στην Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο αποκτώντας αυτάρκεια στην ενεργειακή ζήτησή τους και συμβάλλοντας παράλληλα στην μείωση των αερίων ρύπων που είναι υπεύθυνοι για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και κατ' ακολουθία στην αντιμετώπιση της ραγδαίας τα τελευταία χρόνια αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας η οποία προέρχεται από διάφορες φυσικές διεργασίες όπως ο άνεμος(αιολική ενέργεια), ο ήλιος(ηλιακή ενέργεια), η γεωθερμία(γεωθερμική ενέργεια), η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με την γεωθερμική ενέργεια και τις εφαρμογές της.

Επίσης σαν συνέπεια της συνεχούς αύξησης του κόστους του πετρελαίου και της παραγόμενης ενέργειας η χρησιμοποίηση δεύτερης διαλογής πηγών θερμότητας όπως είναι οι χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικές πηγές ή οι πηγές αποβαλλόμενης θερμότητας, αποκτά συνεχώς όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Με την αύξηση της τεχνολογίας υπάρχει η τάση για σχεδιασμό πιο αποδοτικών, αξιόπιστων και χαμηλού κόστους συστημάτων παραγωγής ενέργειας τα οποία δίνουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας που σε διαφορετική περίπτωση δεν θα ήταν εκμεταλλεύσιμες. Αρκεί οι περιοχές των πηγών αυτών να διαθέτουν αξιόλογες ποσότητες ρευστών σε μικρά σχετικά βάθη, μέχρι 3000 m. Το βάθος αυτό θεωρείται γενικά ως το μέγιστο βάθος των γεωτρήσεων Γεωθερμίας με τα σημερινά τεχνολογικά και οικονομικά δεδομένα.

Μια από τις κύριες εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία επιτυγχάνεται αν χρησιμοποιήσουμε σαν πηγή θερμότητας την γεωθερμία και κατέπεκταση το ζεστό ρεύμα ρευστού(νερού) που προέρχεται από το εσωτερικό της γης, σε συνδυασμό με διάφορων ειδών θερμοδυναμικούς κύκλους. Ο θερμοδυναμικός κύκλος Kalina ο οποίος πήρε το όνομά του από τον Ρώσο μηχανικό Alexander Kalina στον οποίο ανήκει η εφεύρεση καθώς και ο οργανικός κύκλος του Rankine (ORC-Organic Rankine Cycle) έχουν την δυνατότητα να ανακτούν με αποδοτικό τρόπο ενέργεια από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές θερμότητας. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει τον οργανικό κύκλο του Rankine χρησιμοποιώντας για εργαζόμενο μέσο κάποιο οργανικό ρευστό αντί για νερό με αποτέλεσμα να υπάρχουν αρκετές πρακτικές εφαρμογές ανάκτησης γεωθερμικής ενέργειας και ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο Kalina πρότεινε μια νέα οικογένεια στους θερμοδυναμικούς κύκλους χρησιμοποιώντας σαν εργαζόμενο μέσο ένα μίγμα αμμωνίας-νερού. Οι κύκλοι αυτοί χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από προωθητικούς κύκλους για στροβίλους αερίων για παραγωγή έργου μέχρι και χαμηλής θερμοκρασίας πηγές αποβαλλόμενης θερμότητας.

Σε αυτήν την μελέτη θα εξετάσουμε διεξοδικά την απόδοση των κύκλων Kalina και ORC χρησιμοποιώντας για πηγή θερμότητας γεωθερμικό δυναμικό.

Θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή Εμμανουήλ Κακαρά για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ εις βάθος με το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας . Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον Σωτήριο Καρέλλα για την άψογη συνεργασία που είχαμε στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

1. Γεωθερμία

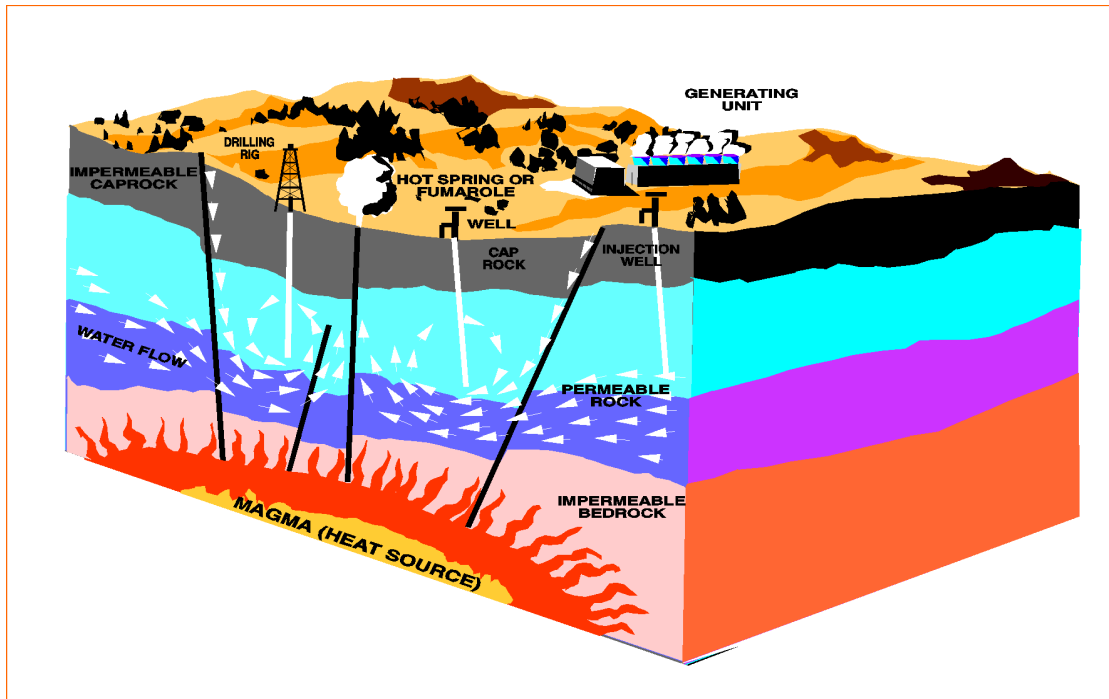
1.1 Εισαγωγή

Γεωθερμία (Geothermics) ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική ενέργεια της γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια όπου γίνεται αντιληπτή σε περιοχές υψηλής γεωθερμικής δραστηριότητας με ηφαιστειακές εκρήξεις, αναθυμιάσεις, θερμοπίδακες, θερμές πηγές κ.α.. Στην πραγματικότητα η κύρια θερμότητα που απελευθερώνεται δεν προέρχεται από τη καρδιά της γης η οποία σιγά -σιγά ψυχραίνεται, αλλά από την ραδιενέργεια ή την πυρηνική ενέργεια που παράγεται από τη διάσπαση του ουρανίου, του θορίου ή του καλίου και δημιουργεί τη βασική θερμική ροή. Η ιδέα της εκμετάλλευσης της μεγάλης θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό της Γης προήλθε από την ανάβλυση μεγάλης ποσότητας θερμού νερού και ατμών ή απλώς, θερμού αέρα (τα ονομαζόμενα γεωθερμικά ρευστά) σε πολλές περιοχές της Γης. Σε άλλες πάλι περιοχές, που δεν έχουν αυτό το προνόμιο, γίνονται γεωτρήσεις σε μεγάλα βάθη, για να βρεθούν τα γεωθερμικά αυτά ρευστά. Βεβαίως, το γεγονός ότι τα γεωθερμικά ρευστά δεν μεταφέρονται μακριά από τον τόπο παραγωγής τους αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα και συντελεί στην αποθάρρυνση των ανεπτυγμένων χωρών να επενδύσουν σε αυτό το χώρο, επειδή τα γεωθερμικά ρευστά πρέπει να αξιοποιηθούν επί τόπου στις περιοχές και στις χώρες που τα διαθέτουν.

Ο όρος Γεωθερμία περιλαμβάνει όλο το φάσμα της έρευνας, από τη μελέτη της ροής θερμότητας, τις συνθήκες κατανομής των θερμοκρασιών στο υπέδαφος, το μηχανισμό κυκλοφορίας των υπόγειων θερμών ρευστών μέχρι τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των γεωθερμικών πεδίων με κατάλληλες παραγωγικές γεωτρήσεις.

Η γεωθερμία είναι μια φυσική, ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή, που μπορεί, με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες, να καλύψει ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης, αλλά και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε ορισμένες περιπτώσεις ανάλογα με την θερμοκρασία των εξερχόμενων από την γη γεωθερμικών ρευστών.

Σημαντικό πλεονέκτημα της γεωθερμίας έναντι των λοιπών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η 'μόνιμη παροχή' ενέργειας καθ' όλο το έτος χωρίς διακυμάνσεις και με μικρό λειτουργικό κόστος.



Σχήμα 1 Το εσωτερικό της γης σε διάφορα στρώματα.

1.2 Ιστορικό της γεωθερμίας

Η παρουσία ηφαιστείων, θερμών πηγών και άλλων επιφανειακών εκδηλώσεων θερμότητας είναι αυτή που οδήγησε τους προγόνους μας στο συμπέρασμα ότι το εσωτερικό της γης είναι ζεστό. Όμως, μόνο κατά την περίοδο μεταξύ του 16ου και 17ου αιώνα, όταν δηλαδή κατασκευάστηκαν τα πρώτα μεταλλεία που ανορύχθηκαν σε βάθος μερικών εκατοντάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, οι άνθρωποι, με τη βοήθεια κάποιων απλών φυσικών παρατηρήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος.

Σήμερα η μέτρηση της θερμοκρασίας της γης γίνεται κυρίως μέσα από γεωτρήσεις και ισχύει ότι η θερμοκρασία αυξάνεται με το βάθος, με μέσο ρυθμό 1°C για κάθε 30 m. Ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης με το βάθος καλείται γεωθερμική βαθμίδα η οποία δεν παραμένει σταθερή αλλά εξαρτάται από διάφορους γεολογικούς παράγοντες.

Οι πρώτες μετρήσεις με θερμόμετρο έγιναν κατά πάσα πιθανότητα το 1740, σε ένα ορυχείο κοντά στο Belfort της Γαλλίας [1]. Ήδη από το 1870, για τη μελέτη της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης χρησιμοποιούνταν κάποιες προχωρημένες για την εποχή επιστημονικές μέθοδοι, ενώ η θερμική κατάσταση που διέπει τη γη, η θερμική ισορροπία και εξέλιξή της κατανοήθηκαν καλύτερα τον 20ο αιώνα, με την ανακάλυψη του ρόλου της «ραδιενεργής θερμότητας». Πράγματι, σε όλα τα σύγχρονα πρότυπα (μοντέλα) της θερμικής κατάστασης του εσωτερικού της γης πρέπει να συμπεριλαμβάνεται η θερμότητα που συνεχώς παράγεται από τη

διάσπαση των μακράς διάρκειας ζωής ραδιενεργών ισοτόπων του ουρανίου (^{238}U , ^{235}U), του θορίου (^{232}Th) και του καλίου (^{40}K), τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της γης [2]. Ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων αυτών, η συγκέντρωσή τους στα πετρώματα του μανδύα και το δυναμικό παραγωγής θερμότητας δίδονται στον παρακάτω Πίνακα 1.

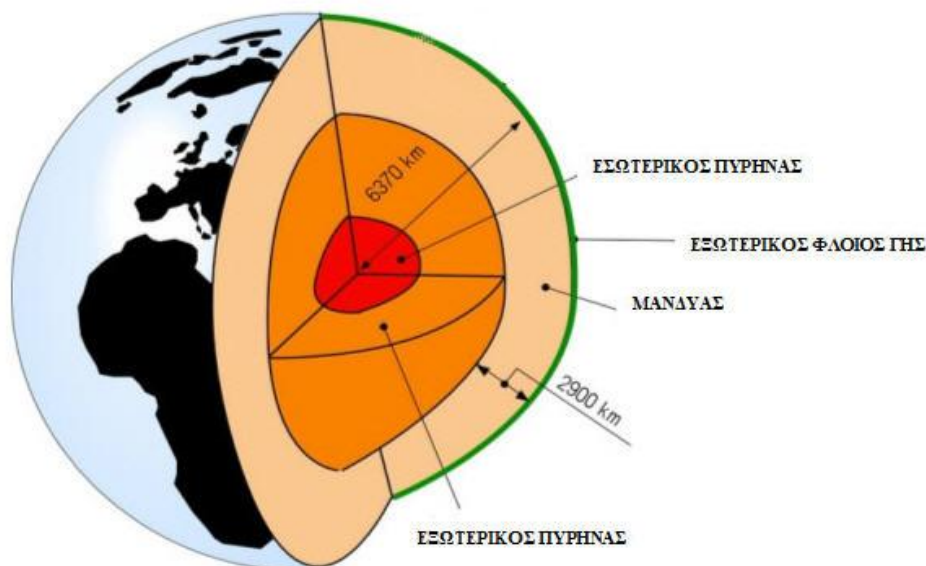
Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά των ραδιοϊσοτόπων που συνεισφέρουν στην παραγωγή θερμότητας της γης. (Turcotte and Schubert, 1982)

Ραδιοϊσότοπο	Χρόνος ημιζωής, 10^9 έτη	Συγκέντρωση $\text{Kg/kg} \times 10^{-9}$	Δυναμικό παραγόμενης θερμότητας, $\text{W/kg} \times 10^{-5}$
^{238}U	4,47	25,5	9,37
^{235}U	0,704	0,185	56,9
^{232}Th	14,0	103	2,69
^{40}K	1,25	32,9	279

Εκτός από τη ραδιενεργό θερμότητα, δρουν αθροιστικά, σε απροσδιόριστες όμως ποσότητες, και άλλες δυναμικές πηγές θερμότητας, όπως είναι η «αρχέγονη ενέργεια» από την εποχή δημιουργίας και μεγέθυνσης του πλανήτη. Μέχρι τη δεκαετία του 1980 τα μοντέλα αυτά δεν βασιζόνταν σε κάποιες ρεαλιστικές θεωρίες. Τότε όμως αποδείχθηκε ότι αφενός δεν υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ της ραδιενεργής θερμότητας που δημιουργείται στο εσωτερικό της γης και της θερμότητας που διαφεύγει από τη γη προς στο διάστημα, και αφετέρου ότι ο πλανήτης μας ψύχεται με αργό ρυθμό και στο εσωτερικό του.

Ως μια γενική ιδέα της φύσης και της κλίμακας του εμπλεκόμενου φαινομένου, μπορεί να αναφερθεί η λεγόμενη «θερμική ισορροπία», όπως διατυπώθηκε από τους Stacey and Loper (1988)[3]. Σύμφωνα με αυτήν, η ολική ροή θερμότητας από τη γη (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία) εκτιμάται ότι ανέρχεται στα 42×10^{12} W. Από αυτά, 8×10^{12} W προέρχονται από το φλοιό, που αντιπροσωπεύει μόνο το 2% του συνολικού όγκου της γης αλλά είναι πλούσιος σε ραδιενεργά ισότοπα, $32,3 \times 10^{12}$ W προέρχονται από το μανδύα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 82% του συνολικού όγκου της γης, και $1,7 \times 10^{12}$ W προέρχονται από τον πυρήνα, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 16% του συνολικού όγκου της γης και δεν περιέχει ραδιενεργά ισότοπα (βλέπε Σχήμα 2, ένα σχήμα της εσωτερικής δομής της γης). Αφού η ραδιενεργή θερμότητα του μανδύα εκτιμάται σε 22×10^{12} W, η μείωση της θερμότητας στο συγκεκριμένο τμήμα της γης είναι $10,3 \times 10^{12}$ W. Σύμφωνα με πιο πρόσφατες εκτιμήσεις και υπολογισμούς, που βασίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων, η ολική θερμική ροή της γης είναι περίπου 6% υψηλότερη από τις τιμές που χρησιμοποίησαν οι Stacey and Loper το 1988. Ούτως ή άλλως όμως, η διαδικασία δροσίσιμου παραμένει αργή. Η θερμοκρασία του μανδύα δεν έχει μειωθεί περισσότερο από 300-350 °C τα τελευταία 3 δισεκατομμύρια χρόνια, παραμένοντας περίπου στους 4000 °C στη βάση του. Έχει υπολογιστεί ότι το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της γης (για θερμοκρασίες πάνω από τη μέση

επιφανειακή των 15°C) είναι της τάξης των 12,6x10²⁴ MJ και του φλοιού 5,4x10²¹ MJ [4].



Σχήμα 2 Ο φλοιός, ο μανδύας και ο πυρήνας της γης

Οι θερμές πηγές έχουν χρησιμοποιηθεί στο μακρινό παρελθόν για λουτροθεραπευτικούς σκοπούς αλλά και για πλούσιμο και μαγείρεμα τουλάχιστον από τους παλαιολιθικούς χρόνους. Το παλαιότερο γνωστό σπα είναι μια λίμνη πετρών στο βουνό Lisan το οποίο χτίστηκε τον 3^ο αιώνα π.Χ την εποχή της δυναστείας των Qin στο ίδιο σημείο όπου χτίστηκε αργότερα το παλάτι Huaqing Chi. Τον 1^ο αιώνα μ.Χ οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν τα θερμά λουτρά για την τροφοδότηση των δημοσίων λουτρών και για την θέρμανση υπόγειων κατοικιών. Οι αμοιβές που δέχτηκαν για αυτά τα λουτρά αντιπροσωπεύουν πιθανώς την πρώτη εμπορική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας. Το παλαιότερο στον κόσμο σύστημα θέρμανσης βρίσκεται στην περιοχή Chaudes-Aigues στην Γαλλία το οποίο λειτουργεί από τον 14^ο αιώνα ενώ η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμίας άρχισε το 1827 με την εξαγωγή βορικού οξέως από την ηφαιστειακή λάσπη στο Larderello της Ιταλίας. Η συστηματική θέρμανση χώρων με την γεωθερμία άρχισε να υλοποιείται μερικές δεκαετίες αργότερα στην Ισλανδία.

Ο 20^{ος} αιώνας είδε να συμβαίνει μεγάλη άνοδος στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αυτομάτως η γεωθερμική ενέργεια φάνηκε σαν μια πιθανή ενεργειακή πηγή ιδίως στις αρχές του 1970 όταν η πρώτη ενεργειακή κρίση αναζωογόνησε το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο πρίγκιπας Piero Ginori Conti εξέτασε την πρώτη γεωθερμική ηλεκτρική γεννήτρια στις 4 Ιουλίου 1904, στο ίδιο γεωδυναμικό πεδίο ξηρού ατμού στο Larderello εκεί που είχε αρχίσει η εξαγωγή των οξέων. Ήταν μια μικρή γεννήτρια που άναψε τέσσερις λάμπες φωτός[5]. Αργότερα το 1911, χτίστηκαν οι πρώτες εγκαταστάσεις στον

κόσμο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με γεωθερμία όπου μέχρι το 1958 παρέμεινε ο μόνος βιομηχανικός παραγωγός γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην εποχή μας, η τεχνολογία αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας είναι αρκούτως ώριμη, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρισμού όσο και για άμεσες χρήσεις της θερμότητας. Η γεωθερμική ενέργεια καλύπτει σήμερα περίπου το 0,5% των αναγκών της ανθρωπότητας σε ενέργεια.

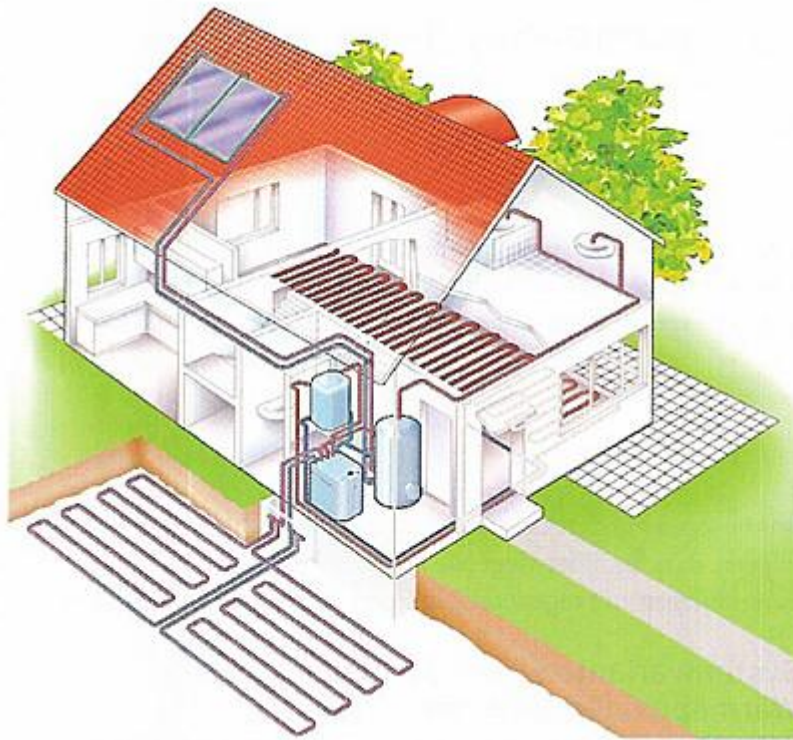


Σχήμα 3 Ο πρώτος στον κόσμο σταθμός παραγωγής γεωθερμικής ηλεκτρικής ενέργειας στο Larderello.

1.3 Εφαρμογές της γεωθερμίας

Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας είναι εφικτή μόνο υπό την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες σε συνδυασμό με το θερμικό φορτίο εξασφαλίζουν ένα συγκριτικό οικονομικό αποτέλεσμα. Γεωθερμική ενέργεια περιέχεται και σε ξηρά-θερμά πετρώματα σε μεγάλα βάθη, σε γεωπεπλεγμένους σχηματισμούς και σε λιωμένα πετρώματα, αλλά είναι δύσκολη η αξιοποίηση αυτής της ενέργειας με τα σημερινά τεχνολογικά και οικονομικά δεδομένα. Αντίθετα, αναπτύσσεται συνεχώς η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας, από ρηχά ρευστά ή πετρώματα, έστω και αν έχουν μικρή θερμοκρασία.

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση. Το 1988, η εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο ήταν 5, 15 GW, ενώ η εγκατεστημένη θερμική ισχύς ήταν 7 GW. Οι πιο σημαντικές θερμικές εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας είναι η θέρμανση κτιρίων και θερμοκηπίων. Πολλοί επιστήμονες συζητούν την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας και στο βιομηχανικό τομέα. Ο B. Lindal προτείνει τη χρήση της στη διαδικασία παραγωγής χαρτιού στο Kawerau στη Ν. Ζηλανδία καθώς και στην αποξήρανση της γης διατομών σε λίμνη της Ισλανδίας. Οι κλάδοι της βιομηχανίας στους οποίους η γεωθερμία έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία είναι η βιομηχανία τροφίμων και οι ιχθυοκαλλιέργειες. Παρόλο που είναι κοινός τόπος ότι οι βιομηχανικές εφαρμογές αποτελούν το πεδίο μελλοντικής ανάπτυξης της γεωθερμίας, τα βήματα παραμένουν πολύ αργά, ενώ παρατηρείται σημαντική αύξηση στις εφαρμογές που αφορούν τη θέρμανση οικιών, δημόσιων και εμπορικών κτιρίων.



Σχήμα 4 Εφαρμογή της γεωθερμίας για οικιακή θέρμανση.

Στη δεκαετία του 1970, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης, δόθηκε σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη της γεωθερμίας, ακόμα και σε περιοχές με σχετικά χαμηλή γεωθερμική βαθμίδα, όπως είναι η λεκάνη του Παρισιού. Η παρουσία θερμού νερού στους γεωλογικούς σχηματισμούς της λεκάνης του Παρισιού είχε ανακαλυφθεί ήδη από τη δεκαετία του 1950 ενώ διεξάγονταν έρευνες για πετρέλαιο, αλλά η πρώτη γεωθερμική γεώτρηση έγινε μόλις το 1962 στο Carrières-sur-seine. Το πρόβλημα που ανέκυψε και έπρεπε να λυθεί ήταν αυτό της διάθεσης του γεωθερμικού ρευστού μετά τη χρήση του λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε άλατα. Αυτό αντιμετωπίστηκε με τη διάνοιξη και δεύτερης γεώτρησης. Το νερό εξέρχεται από τη μια γεώτρηση (production well) και, αφού αφαιρεθεί από αυτό η περιεχόμενη θερμότητα, επιστρέφει στο έδαφος μέσω της άλλης γεώτρησης (injection well). Αφού λύθηκε το πρόβλημα, ο δρόμος ήταν ανοικτός για την αξιοποίηση της λεκάνης του Παρισιού. Σημαντική ανάπτυξη σημειώθηκε στα επόμενα χρόνια, με αποτέλεσμα σε 200.000 κατοικίες που καλύπτουν τις θερμικές τους ανάγκες από τη γεωθερμική ενέργεια να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 200.000 τόνων ισοδύναμου πετρελαίου ετησίως. Το 1986, με την πτώση της τιμής του πετρελαίου, μειώθηκαν και οι ρυθμοί ανάπτυξης της γεωθερμίας.

Ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, για τηλεθέρμανση κτιρίων. Η παραγωγή ζεστού νερού για θέρμανση κατοικιών με την εκμετάλλευση της κανονικής γεωθερμικής βαθμίδας (70 °C στα 2.000 μέτρα) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στο Παρίσι. Στην Ισλανδία το 50% των κτιρίων θερμαίνεται με τη χρήση ζεστού νερού.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούμε να έχουμε αν μεταδώσουμε ένα μέρος της θερμότητας των ρευστών, που έχουν μικρή σχετικά ενθαλπία, σε ειδικά υγρά με πολύ χαμηλό σημείο βρασμού, όπως είναι πχ το φρέον, το ισοβουτάνιο, το προπάνιο και το χλωριούχο αιθύλιο. Στη Ρωσία λειτουργεί πειραματικός σταθμός 680 KW με φρέον και στις ΗΠΑ σταθμός με ισοβουτάνιο, που θερμαίνεται με νερό θερμοκρασίας 81,5 °C. Οι δυνατότητες που προσφέρει ο τρόπος αυτός της εκμετάλλευσης είναι τεράστιες και οι προοπτικές για το μέλλον θα είναι ακόμη μεγαλύτερες με την ανάπτυξη της σχετικής τεχνολογίας.

Η εκμεταλλευσιμότητα ενός γεωθερμικού πεδίου δεν εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, αλλά και από την οικονομικότητα της επένδυσης που πρέπει να γίνει. Η οικονομικότητα αυτή σχετίζεται με το "περιβάλλον" μέσα στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η επένδυση. Για παράδειγμα, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων καθώς και οι δυσμενείς επιπτώσεις που έχουν αυτά τα καύσιμα στο περιβάλλον καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την οικονομικότητα μιας τέτοιας επένδυσης. Η αξιοποίηση ενός γεωθερμικού πεδίου που σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή θεωρείται αντικοινωνική, ενδέχεται στο μέλλον να αποδειχθεί συμφέρουσα. Ένας παράγοντας που ενισχύει αυτή την άποψη είναι το γεγονός ότι η γεωθερμία έχει το πλεονέκτημα ότι δεν μολύνει το περιβάλλον και δεν συμμετέχει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Άρα, όταν κάποτε το κοινωνικό κόστος της μόλυνσης του περιβάλλοντος ενσωματωθεί στο κόστος των ορυκτών καυσίμων, θα δοθεί σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη της γεωθερμίας, ακόμα και σε περιοχές με **μέση γεωθερμική βαθμίδα 30° C/km**.

Το πρόβλημα επάρκειας νερού για οικιακή, γεωργική και βιομηχανική χρήση γίνεται καθημερινά οξύτερο. Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν οικονομικά να συμβάλλουν στη λύση του προβλήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου άλλες λύσεις είτε είναι ουσιαστικά ανεφάρμοστες, είτε υπερβολικά δαπανηρές. Η αφαλάτωση μπορεί να γίνει με συμπύκνωση του παραγόμενου ρευστού (ζερού ή υγρού ατμού) ή χρησιμοποιώντας την ενέργεια για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού.

Τα γεωθερμικά πεδία περιέχουν μερικές φορές, χρήσιμα άλατα, ή αέρια. Μεταξύ των πρώτων σημειώνουμε τη χρησιμοποίηση των αλάτων του Καλίου και Μαγνησίου όπου παράγονται από γεωθερμικές ενέργειες. Παρόμοια ρευστά, πολύ πλούσια σε θειικό κάλιο βρέθηκαν τελευταία στο καινούργιο γεωθερμικό πεδίο Cesano Ιταλίας.

Ένα αέριο που έχει τεράστια σημασία για τα θερμοκήπια είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) που παράγεται συνήθως σε αφθονία στα γεωθερμικά πεδία. Είναι γνωστό ότι με τη θερμότητα καλυτερεύουμε την απόδοση στις καλλιέργειες, γι' αυτό κατασκευάζουμε τα θερμοκήπια. Είναι επίσης γνωστό ότι το (CO₂) έχει ζωτική

σημασία στη δημιουργία των οργανικών ουσιών και επομένως στην ανάπτυξη των φυτών. Λίγοι όμως γνωρίζουν ότι η τεχνητή αύξηση της περιεκτικότητας σε CO₂ σε κλειστούς χώρους, όπως τα θερμοκήπια, αποτελεί το καλύτερο χημικό λίπασμα και μπορεί ακόμα να διπλασιάσει την παραγωγή.

Σε μερικές περιπτώσεις τα γεωθερμικά ρευστά περιέχουν σε ελάχιστες ποσότητες, πολύτιμα ορυκτά που μπορούν να αξιοποιηθούν σαν υποπροϊόντα της όλης εκμετάλλευσης [6].

1.4 Φυσικοί γεωθερμικοί πόροι

Ως γεωθερμικοί πόροι (geothermal resources) ορίζονται οι ποσότητες της θερμικής ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και σε κάποιο προσβάσιμο βάθος και μπορεί να ανακτηθεί με ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας. Το γεωθερμικό δυναμικό αποτελείται από το σύνολο των φυσικών ατμών και θερμών νερών (επιφανειακών ή υπογείων) και της θερμότητας των γεολογικών σχηματισμών, των οποίων η θερμοκρασία υπερβαίνει τη μέση ετήσια θερμοκρασία της κάθε περιοχής.

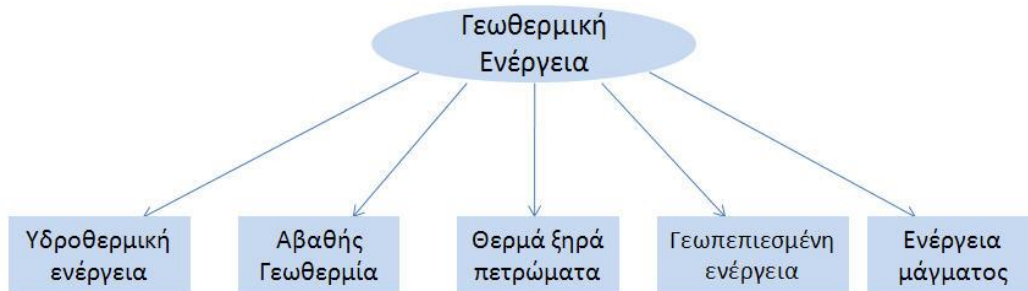
Η εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού είναι πολύ πιθανή σε εκείνες τις περιοχές της γης όπου μάζες ρευστών(νερό, ατμός και διάφορα άλλα αέρια) ανεβαίνουν προς την επιφάνεια μέσα από ρήγματα ή ρωγμές. Τέτοιες περιοχές συνδέονται πολύ συχνά με γεολογικά πολύ πρόσφατη, ενεργό ηφαιστειότητα και ενεργό τεκτονική.

Δεν αρκεί όμως μόνον η θερμική ανωμαλία για τη δημιουργία γεωθερμικών συστημάτων. Χρειάζονται και άλλες ευνοϊκές γεωλογικές συνθήκες, ώστε να έχουμε γεωθερμικά ρευστά σε όχι πολύ μεγάλα βάθη, με ικανοποιητική θερμοκρασία, με αποδεκτά φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά και οπωσδήποτε σε αξιόλογες ποσότητες. Η θερμική ενέργεια των ρευστών εξαρτάται ως γνωστόν από την ποσότητα και την θερμοκρασία τους ενώ η οικονομικότητα της είναι συνάρτηση των φυσικο-χημικών χαρακτηριστικών των ρευστών και του βάθους αφού οι γεωτρήσεις ανόρυξης των ρευστών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές και το κόστος τους ανεβαίνει σχεδόν γεωμετρικά με το βάθος.

Όταν μιλάμε για γεωθερμικούς πόρους συνήθως αναφερόμαστε στους προσβάσιμους πόρους(accessible resources), δηλαδή στους πόρους που μπορούν να ανακτηθούν σήμερα με οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο και στους πόρους που σήμερα δεν είναι οικονομικοί αλλά θα μπορούσαν να γίνουν κάποια στιγμή στο μέλλον. Σχεδόν κάθε χρόνο ανακαλύπτονται και ταυτοποιούνται νέοι γεωθερμικοί πόροι σε όλο τον κόσμο και την Ελλάδα[7].

1.5 Ταξινόμηση γεωθερμικών συστημάτων

Τα γεωθερμικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το είδος των γεωθερμικών πόρων , ο τύπος και η θερμοκρασία των ρευστών, ο τύπος του πετρώματος που φιλοξενεί τα ρευστά, το είδος της εστίας θερμότητας κ.α. Σε σχέση με το είδος των γεωθερμικών πόρων διακρίνονται πέντε κατηγορίες συστημάτων.



Σχήμα 5 Μορφές γεωθερμικής ενέργειας κατά σειρά ενδιαφέροντος χρήσεων σήμερα και προοπτικής στο εγγύς μέλλον.

α) Τα **υδροθερμικά συστήματα ή πόροι** (hydrothermal systems or resources) δηλαδή τα φυσικά υπόγεια θερμά ρευστά τα οποία βρίσκονται σε έναν ή περισσότερους ταμιευτήρες, θερμαίνονται από μια εστία θερμότητας και συχνά εμφανίζονται στην επιφάνεια της γης με την μορφή θερμών εκδηλώσεων.

β) Μια άλλη κατηγορία είναι η **αβαθής γεωθερμία** (earth energy) κατά την οποία λαμβάνονται ποσότητες ενέργειας από μικρά βάθη με την ανακυκλοφορία νερού σε κλειστές υδροφόρες ή ξηρές γεωτρήσεις ή σε ρηχές επιφάνειες εδάφους.

γ) Τα **γεωπεπιεσμένα συστήματα** (geopressured systems) , τα οποία αποτελούνται από ρευστά εγκλεισμένα σε μεγάλο βάθος , βρίσκονται περιορισμένα από μη περατά πετρώματα και η πίεση τους υπερβαίνει την υδροστατική. Συγκαταλέγονται στα στατικά συστήματα και συνυπάρχουν με υδρογονάνθρακες.

δ) Τα συστήματα βαθιών **θερμών-ξηρών πετρωμάτων** (hot dry rock systems) δηλαδή τα θερμά πετρώματα σε βάθος από 3 μέχρι 10 km χωρίς φυσική κυκλοφορία ρευστών από τα οποία μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια χρησιμοποιώντας νερό που διοχετεύεται από την επιφάνεια μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων και ανακτάται θερμότερο με τη μορφή νερού ή ατμού μέσω άλλων γεωτρήσεων.

ε) Τα **μαγματικά συστήματα** (magma systems) αναφέρονται στην απόληψη θερμότητας με κατάλληλες γεωτρήσεις σε μαγματικές διεισδύσεις [7].

Το συνηθέστερο κριτήριο για την ταξινόμηση των υδροθερμικών συστημάτων νερού βασίζεται στην ενθαλπία των γεωθερμικών ρευστών, τα οποία είναι και οι φορείς της θερμότητας στην επιφάνεια της γης από τα θερμά βαθιά πετρώματα. Η ενθαλπία των ρευστών (ΔH) ή οποία μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της θερμοκρασίας τους, χρησιμοποιείται για να εκφράσει το θερμικό περιεχόμενο τους. Ανάλογα λοιπόν με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις :

Η **Υψηλής Ενθαλπίας** (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ισχύς τέτοιων εγκαταστάσεων το 1979 ήταν 1.916 MW με παραγόμενη ενέργεια 12×10^6 kWh/yr.

Η **Μέσης Ενθαλπίας** (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).

Η **Χαμηλής Ενθαλπίας** (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού[8].

Ο λόγος αυτής της ταξινόμησης είναι ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος δεν είναι πάντα οικονομικά αποδεκτή για θερμοκρασίες ρευστών μικρότερες των 150° C.

1.6 Η Γεωθερμία στην Ελλάδα

Η γεωθερμία είναι ένας ενεργειακός πόρος ο οποίος στην Ελλάδα ,μέχρι την παρούσα χρονική περίοδο, δεν έχει προσελκύσει το επενδυτικό ενδιαφέρον. Λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500μ). Σε μερικές περιπτώσεις τα βάθη των γεωθερμικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρά, κάνοντας ιδιαίτερα ελκυστική, από οικονομική άποψη, τη γεωθερμική εκμετάλλευση.

Η έρευνα για την αναζήτηση γεωθερμικής ενέργειας άρχισε ουσιαστικά το 1971 με βασικό φορέα το ΙΓΜΕ και μέχρι το 1979 (πριν από τη δεύτερη ενεργειακή κρίση) αφορούσε μόνο τις περιοχές υψηλής ενθαλπίας. Κατά την εξέλιξη των εργασιών η ΔΕΗ, σαν άμεσα ενδιαφερόμενη για την ηλεκτροπαραγωγή, ανέλαβε τις παραγωγικές γεωτρήσεις υψηλής ενθαλπίας και την ανάπτυξη των πεδίων, χρηματοδοτώντας επιπλέον τις έρευνες στις πιθανές για τέτοια ρευστά γεωθερμικές περιοχές. Συντάχθηκε ο προκαταρκτικός χάρτης γεωθερμικής ροής του ελληνικού χώρου, όπου φάνηκε ότι η γεωθερμική ροή στην Ελλάδα είναι σε πολλές περιοχές εντονότερη από τη μέση γήινη. Από το 1971 ερευνήθηκαν οι περιοχές: Μήλος, Νίσυρος, Λέσβος, Μέθανα, Σουσάκι Κορινθίας, Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες, Υπάτη, Αιδηψός, Κίμωλος, Πολύαιγος, Σαντορίνη, Κως, Νότια Θεσσαλία, Αλμωπία, περιοχή Στρυμόνα, περιοχή Ξάνθης, Σαμοθράκη και άλλες.

Η αυξημένη ροή θερμότητας, λόγω της έντονης τεκτονικής και μαγματικής δραστηριότητας, δημιούργησε εκτεταμένες θερμικές ανωμαλίες, με μέγιστες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας που πολλές φορές ξεπερνούν του 100°C/km. Σε κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες, η ενέργεια αυτή θερμαίνει «ρήχους» υπόγειους ταμιευτήρες ρευστών σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C. Τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι διάσπαρτα στη νησιωτική και ηπειρωτική Ελλάδα. Η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική, καθόσον αποτελούν ενεργειακό πόρο φιλικό στο περιβάλλον, κοινωνικά αποδεκτό και παρουσιάζουν σημαντικό οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον.

Στα βόρεια της Κόνιτσας κοντά στο Χωριό Αμάραντος υπάρχουν θερμές πηγές. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στην οροσειρά της Πίνδου. Η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδό του μετρήθηκε σε 32 °C ενώ η θερμοκρασία στο σημείο εξόδου είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 6 Πηγές Αμάραντου.

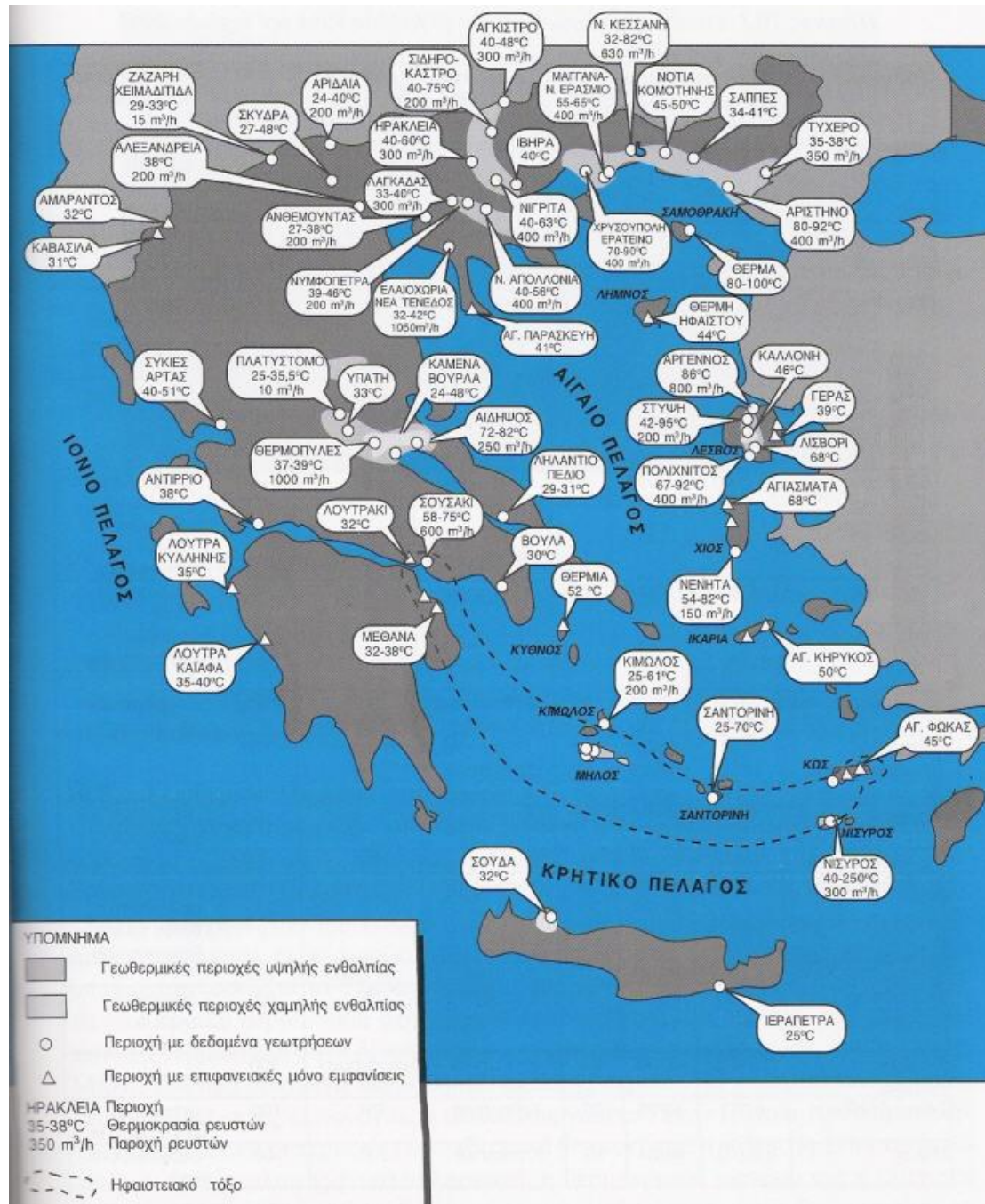
Στην Μήλο και Νίσυρο έχουν ανακαλυφθεί σπουδαία γεωθερμικά πεδία και έχουν γίνει γεωτρήσεις παραγωγής (5 και 2 αντίστοιχα). Στην Μήλο μετρήθηκαν θερμοκρασίες μέχρι 325°C σε βάθος 1000 m. και στην Νίσυρο 350°C σε βάθος 1500 m. Οι γεωτρήσεις αυτές θα μπορούσαν να στηρίξουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 20 και 5 MWe, ενώ το πιθανό συνολικό δυναμικό υπολογίζεται να είναι την τάξης των 200 και 50 MWe αντίστοιχα.

Στην Βόρεια Ελλάδα η γεωθερμία προσφέρεται για θέρμανση, θερμοκήπια, ιχθυοκαλλιέργειες κ.λ.π. Στην λεκάνη του Στρυμόνα έχουν εντοπισθεί τα πολύ σημαντικά πεδία Θερμών-Νιγρίτας, Λιθότροπου-Ηράκλειας, Θερμοπηγής-Σιδηρόκαστρου και Αγγίστρου. Πολλές γεωτρήσεις παράγουν νερά μέχρι 75°C, συνήθως αρτεσιανά και πολύς καλής ποιότητας και παροχής. Μεγάλα και μικρότερα γεωθερμικά θερμοκήπια λειτουργούν στην Νιγρίτα και το Σιδηρόκαστρο.

Στην πεδινή περιοχή του Δέλτα Νέστου έχουν εντοπισθεί δύο πολύ σημαντικά γεωθερμικά πεδία, στο Ερατεινό Χρυσούπολης και στο Ν. Εράσμιο Μαγγάνων Ξάνθης. Νερά άριστης ποιότητας μέχρι 70°C και σε πολύ οικονομικά βάθη παράγονται από γεωτρήσεις στις εύφορες αυτές πεδινές περιοχές. Στην Ν. Κεσσάνη και στο Πόρτο Λάγος Ξάνθης, σε μεγάλης έκτασης γεωθερμικά πεδία, παράγονται νερά μέχρι 82°C.

Στην λεκάνη των λιμνών Βόλβης και Λαγκαδά έχουν εντοπισθεί τρία πολύ ρηχά πεδία με θερμοκρασίες μέχρι 56°C. Στην Σαμοθράκη υπάρχουν ενθαρρυντικά

στοιχεία καθώς γεωτρήσεις βάθους μέχρι 100 m. συνάντησαν νερά της τάξης των 100°C.

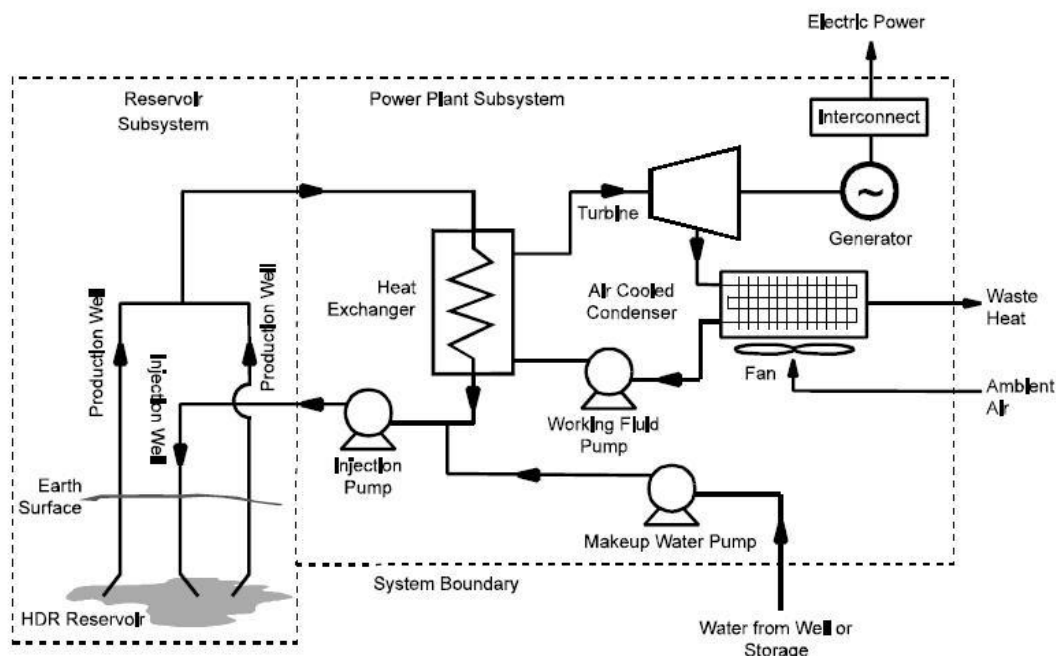


Σχήμα 7 Χάρτης γεωθερμικών περιοχών της Ελλάδας (Τροποποίηση χάρτη του ΙΓΜΕ).

1.7 Θερμά ξηρά πετρώματα(hot dry rock)

Η κλασική τεχνολογία γεωθερμικών συστημάτων συνεπάγεται την παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας από φυσικές πηγές ατμού ή ακόμα συνηθέστερα από ζεστό νερό. Αυτές οι υδροθερμικές πηγές βρίσκονται σε μεγάλο αριθμό σε περιοχές ανά τον κόσμο, αλλά αποτελούν την εξαίρεση και όχι τον κανόνα. Στα περισσότερα μέρη το έδαφος γίνεται θερμότερο αυξανόμενου του βάθους αλλά είναι εμφανής η απουσία υπόγειων ρευμάτων. Η συντριπτική πλειοψηφία της αξιοποιήσιμης γεωθερμικής ενέργειας παγκοσμίως βρίσκεται στα λεγόμενα θερμά ξηρά πετρώματα. Η συνολική ποσότητα θερμότητας η οποία περιέχεται στα HDR σε προσβάσιμα βάθη έχει εκτιμηθεί περίπου στο 1 δισεκατομμύριο quad (1 quad είναι η ισοδύναμη ενέργεια που προσδίδουν 180 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου). Αυτή η ενέργεια είναι περίπου 800 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που εκτιμάται ότι περιέχεται στις υδροθερμικές πηγές και 300 φορές μεγαλύτερη από τις πηγές συμβατικών καυσίμων όπου περιλαμβάνεται το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας. Τα θερμά ξηρά πετρώματα αποτελούν μια καθαρή πηγή ενέργειας ειδικότερα όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες είναι μηδενικές.

Τα θερμά ξηρά πετρώματα (HDR) χρησιμοποιούν θερμότητα η οποία ανακτάται από τα πετρώματα του υπεδάφους με απώτερο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα που προτείνεται για την εξαγωγή της θερμότητας από τον βράχο και την μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελείται από δύο ευδιάκριτα υποσυστήματα. Τα δύο υποσυστήματα είναι οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής(στην επιφάνεια) και το σύστημα HDR(κάτω από την επιφάνεια) τα οποία συνδέονται με βαθιές γεωτρήσεις.



Σχήμα 8 Σύστημα παραγωγής ενέργειας με HDR.

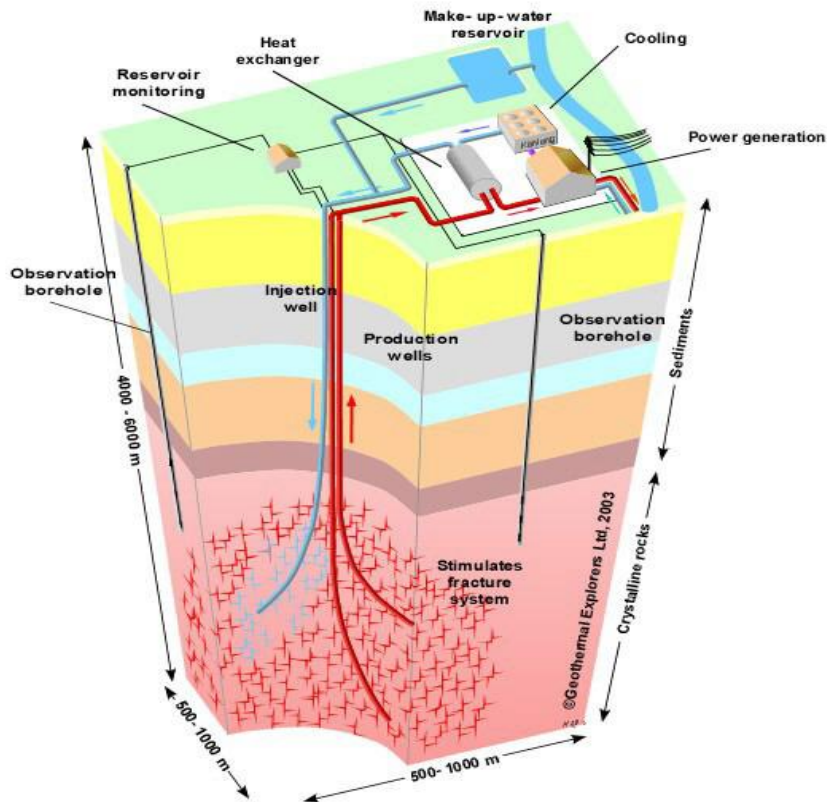
Είναι ένας θερμαινόμενος γεωλογικός σχηματισμός που δημιουργείται με τον ίδιο τρόπο όπως οι υδροθερμικές πηγές , αλλά δεν περιέχει νερό αφού δεν υπάρχουν οι υδροφόροι ορίζοντες ή οι ρωγμές που απαιτούνται για να οδηγήσουν το νερό στην επιφάνεια. Σε πολλές περιοχές της γης δεν υπάρχει ικανοποιητική υδροπερατότητα των διάφορων πετρωμάτων όπως είναι για παράδειγμα η περίπτωση των μεγάλων γρανιτικών σωμάτων, τα οποία μπορεί να είναι γεμάτα από διακλάσεις , έχουν όμως σχεδόν μηδενικό πορώδες και υδροπερατότητα , με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συγκρατήσουν ποσότητες νερού. Τα πετρώματα αυτά λοιπόν είναι ξηρά και συγχρόνως θερμά.

Περιοχές που έχουν στο υπέδαφος μεγάλους γεωλογικούς σχηματισμούς από πετρώματα σχετικά πλούσια σε ραδιενεργά ορυκτά , έχουν αξιόλογη θερμική ροή, πολύ μεγαλύτερη της μέσης γήινης. Υψηλή θερμική ροή, εξαιτίας τέτοιων ξηρών πετρωμάτων μπορεί να συνδυάζεται και με σημαντική υποκείμενη και πολύ βαθιά θερμή υδροφορία. Σε πολλές περιοχές της γης μπορεί να έχουμε αξιόλογες θερμοκρασίες μέχρι και 350° C σε βάθη 1500-5000 m , αλλά συνήθως ελάχιστη κυκλοφορία ρευστών μέσα στα πετρώματα του υπεδάφους.

Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε τεχνητή διάνοιξη-ενεργοποίηση της περατότητας των παλιών διακλαδώσεων οι οποίες είναι ουσιαστικά εντελώς κλειστές σε σχηματισμούς κάποιας ηλικίας που επιπλέον βρίσκονται σε σχετικά αδρανείς τεκτονικά περιοχές. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να εισάγονται νερά από την επιφάνεια του εδάφους δια μέσου κατάλληλων γεωτρήσεων , αυτά να κινούνται και να κυκλοφορούν μέσω των τεχνητά ανοιγμένων διακλαδώσεων και να έρχονται σε επαφή με τις τεράστιες σε συνολική έκταση θερμές επιφάνειες των πετρωμάτων. Μετά την θέρμανση τους τα νερά ανέρχονται από άλλες γεωτρήσεις με την μορφή υπέρθερμων νερών στην επιφάνεια του εδάφους, έτοιμα για εκμετάλλευση. Έτσι θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε τεράστιες ποσότητες θερμικής ενέργειας που βρίσκονται σήμερα αποθηκευμένες στα πετρώματα του υπεδάφους πολλών περιοχών της γης[7].

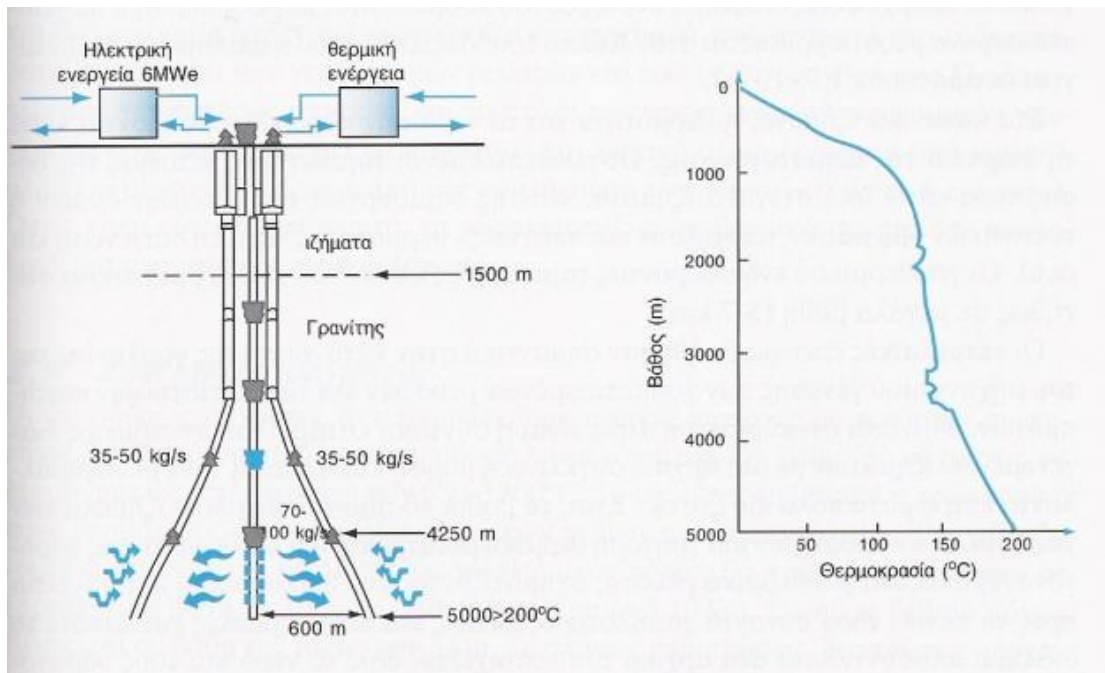
Έτσι το συγκεκριμένο γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από (i) την γεώτρηση που χρησιμοποιείται για την υδραυλική διάρρηξη , μέσω της οποίας εισέρχεται με πίεση νερό χαμηλής θερμοκρασίας, (ii) τεχνητό ταμιευτήρα και (iii) από την γεώτρηση άντλησης του θερμού νερού. Όλο αυτό το σύστημα μαζί με τις εγκαταστάσεις στην επιφάνεια σχηματίζουν ένα κλειστό κύκλωμα.

Οι πρώτες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Νέο Μεξικό των Η.Π.Α. με υπόγειες πυρηνικές εκρήξεις, στα πλαίσια ενός πρωτοποριακού προγράμματος στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Αντίστοιχο πρόγραμμα ξεκίνησε το 1977 στην Κορνουάλη της Μεγάλης Βρετανίας σε γρανιτικό σχηματισμό. Τα συμπαγή πετρώματα από παλαιούς γρανίτες υπέστησαν τεντικό υδραυλικό κατακερματισμό μέσω τεσσάρων αρχικά γεωτρήσεων, βάθους 250-300 m.



Σχήμα 9 Σχηματική παρουσίαση της αξιοποίησης των θερμών ξηρών πετρωμάτων με γεώτρηση τροφοδοσίας και 2 παραγωγικές γεωτρήσεις.

Μια άλλη ευρωπαϊκή προσπάθεια άρχισε να υλοποιείται το 1987 στο Soultz-sous-Forets, βόρεια του Στρασβούργου. Εκεί έγιναν τρεις γεωτρήσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 10 με υψηλές προδιαγραφές για τεχνητή κυκλοφορία. Από μια κατακόρυφη γεώτρηση θα διοχετευθούν 250-360 m³/h νερού και θα παράγονται από καθεμιά από τις δύο κεκλιμένες γεωτρήσεις 126-180 m³/h θερμών ρευστών, που ισοδυναμούν συνολικά σε 50 MWt. Το έργο εφάρμοσε νέες τεχνικές υδραυλικής διέγερσης και κυκλοφορίας σε μια περιοχή όπου υπάρχουν κατάλληλα πετρώματα και υψηλή θερμοκρασία (>200° C στα 5000m), με βαθμίδα μεγαλύτερη των 38° C/km.



Σχήμα 10 Σχηματική παράσταση του συστήματος θερμών ξηρών πετρωμάτων στο [Soultz-sous-Forets].

Ένα άλλο πρόγραμμα στο Urach της Γερμανίας περιλαμβάνει τρεις γεωτρήσεις σε βάθος 4400 m περίπου , όπου μετρήθηκαν θερμοκρασίες 175° C. Το κόστος παραγωγής της γεωθερμικής ενέργειας από θερμά ξηρά πετρώματα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη της μεθόδου. Εκτιμήθηκε στα 0,07-0,09 €/kWh για μονάδα δυαδικού κύκλου 4,5 MWe και για λειτουργία της μονάδας για 7500-8000 ώρες το χρόνο(μέσος συντελεστής φορτίου 88%). Η απόσβεση των επενδύσεων προβλέπεται να γίνει σε 15-25 χρόνια και θα υπάρχει συνδυασμένη χρήση τηλεθέρμανσης οικισμών.

1.8 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

1.8.1 Εισαγωγή-Ορισμός

Γενικά, η **αντλία θερμότητας** (heat pump) είναι μια συσκευή που έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα από ένα μέσο με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα άλλο μέσο με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό πραγματοποιείται με απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή χαμηλής σχετικά θερμοκρασίας (όπως είναι το υπόγειο ή το επιφανειακό νερό, ο εξωτερικός αέρας κτλ.) και τη μεταφορά της θερμότητας αυτής σε ένα θερμότερο μέσο, όπως είναι το νερό ή ο αέρας, το οποίο και χρησιμοποιείται για παράδειγμα για την θέρμανση μιας οικίας ή ενός θερμοκηπίου. Τα βασικά εξαρτήματα μιας αντλίας θερμότητας περιλαμβάνουν το συμπιεστή. Το συμπυκνωτή, τον εξαμιστή, τη βαλβίδα εκτόνωσης και βέβαια την πηγή ενέργειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αντλία θερμότητας είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να αντιστρέφει την ψυκτική και θερμαντική λειτουργία, επιτρέποντας τη χρήση της ίδιας συσκευής τόσο για ψύξη όσο και για θέρμανση.

Στην αντλία θερμότητας, θερμότητα από το ψυχρό μέσο μεταφέρεται σε χαμηλή θερμοκρασία T_0 . Μηχανικό έργο, W_{net} , προσφέρεται για τη μεταφορά της θερμότητας σε υψηλότερη θερμοκρασία T_H . Ισχύει λοιπόν η σχέση

$$Q_H = Q_L + W_{net}$$

Η σωστή λειτουργία της αντλίας θερμότητας (στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει η θερμική ικανότητα της συσκευής) εκφράζεται από το συντελεστή απόδοσης ή επιτευξιμότητας (COP, coefficient of performance), ο οποίος ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$COP = \frac{\text{Επιθυμητή έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη είσοδος}} = \frac{\text{Θερμό αποτέλεσμα}}{\text{Έργο εισόδου}} = \frac{Q_H}{W_{net}}$$

Στις αντλίες θερμότητας ο συντελεστής COP κυμαίνεται από 1,5 μέχρι και περισσότερο από 6 και, προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο περισσότερο οικονομική γίνεται η χρήση της αντλίας. Η πιο συνηθισμένη πηγή ενέργειας για τις αντλίες θερμότητας είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας (συστήματα αέρα-αέρα, τα κοινά κλιματιστικά), με σοβαρό μειονέκτημα όμως ότι δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε θερμοκρασίες μικρότερες των 5 °C. Τα τελευταία 30 χρόνια βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές οι αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούν για πηγή θερμότητας το έδαφος και το νερό και ονομάζονται γεωθερμικές αντλίες θερμότητας(ΓΑΘ). Οι ΓΑΘ δεν παρουσιάζουν προβλήματα, ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Τα υπόγεια νερά και το έδαφος, ως πηγές θερμότητας, υπερτερούν σημαντικά σε σχέση με τον αέρα, επειδή έχουν καθόλη σχεδόν τη διάρκεια του έτους σταθερή θερμοκρασία. Μειονέκτημα των νερών είναι ότι η διαθεσιμότητά τους είναι συνήθως περιορισμένη.

Οι αντλίες θερμότητας γνωρίζουν πραγματική άνθηση τα τελευταία χρόνια, σημειώνοντας ετήσια αύξηση σχεδόν μεγαλύτερη του 10%. Η μεγαλύτερη ανάπτυξη των ΓΑΘ σημειώθηκε στις Η.Π.Α. και τη δυτική Ευρώπη, στην οποία έχουν εγκατασταθεί περισσότερες από 360.000 μονάδες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 3280 MWt. Τα κύρια σχήματα με τα οποία λειτουργούν οι ΓΑΘ είναι οι αντλίες που λειτουργούν με υπόγεια νερά (ground water open loop), σχετικά ψυχρά (10-15°C), ή και κάπως θερμότερα (20-35°C), οι αντλίες που λειτουργούν με επιφανειακά νερά και οι αντλίες που είναι συνδεδεμένες με το υπέδαφος.

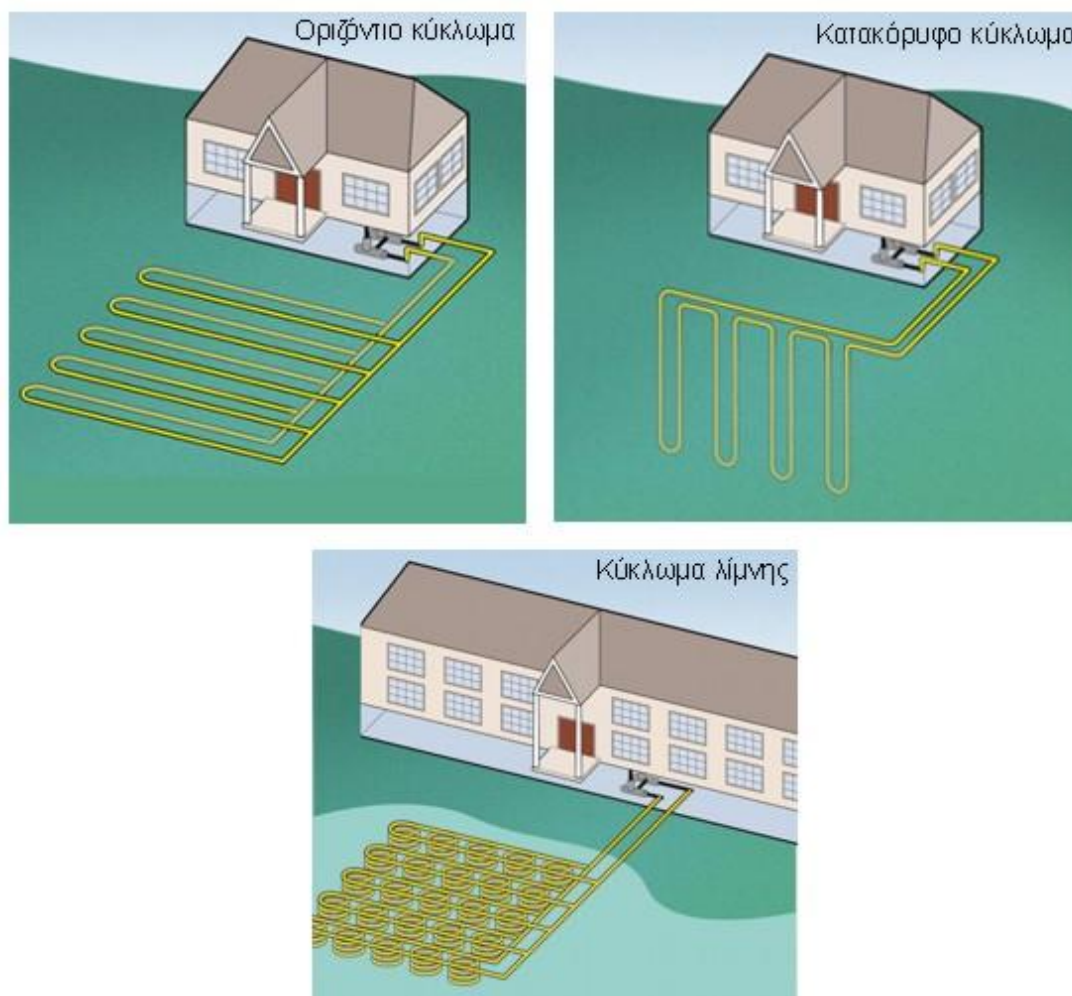
Η επιλογή του ψυκτικού μέσου στις ΓΑΘ εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας της συσκευής. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του ψυκτικού μέσου είναι : να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό ή εύφλεκτο υγρό, να είναι συαθερό στις θερμοκρασίες εφαρμογής και να διατίθεται σε χαμηλό κόστος. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα πληρούσαν ιδανικά οι χλωροφθοράνθρακες, των οποίων όμως η χρήση έχει απαγορευτεί με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ. Ψυκτικά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το R17a, R134a, R407c, R410 κ.α.

1.8.2 ΓΑΘ συνδεδεμένες με το υπέδαφος

Τα συστήματα αυτά συχνά καλούνται ΓΑΘ κλειστού κυκλώματος και αποτελούνται ουσιαστικά από σύστημα κύκλου συμπίεσης ατμών, το οποίο είναι συνδεδεμένο με υπεδάφιο εναλλάκτη (έδαφους-νερού) που βρίσκεται θαμμένος στο έδαφος. Η θερμοκρασία του εδάφους μένει σχεδόν αμετάβλητη σε βάθος μεγαλύτερο από 5 m, προσεγγίζοντας τη μέση ετήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, ενώ ακόμη και σε βάθος 2m η θερμοκρασία του εδάφους αποκρίνεται στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις με καθυστέρηση ορισμένης χρονικής περιόδου. Η θερμότητα σε βάθη μεγαλύτερα από 15 m προέρχεται από την γεωθερμία. Το πλέον χρησιμοποιούμενο σύστημα είναι μια αντλία θερμότητας νερού-αέρα στον εξατμιστή της οποίας κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα νερό ή νερό με αντιψυκτικό διάλυμα.

Τα συστήματα ΓΑΘ κλειστού κυκλώματος διαχωρίζονται περαιτέρω σε κάθετα και οριζόντια ανάλογα με την γεωμετρία του υπόγειου εναλλάκτη. Τα κάθετα συστήματα αποτελούνται συνήθως από ένα ζεύγος σωληνώσεων μικρής διαμέτρου (20-40mm) από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), που τοποθετείται συνήθως σε μια ή περισσότερες κατακόρυφες γεωτρήσεις, το εσωτερικό των οποίων γεμίζεται εν συνέχεια από στερεό υλικό. Το ζεύγος των σωληνώσεων είναι συνδεδεμένο με θερμοκόλληση στο κάτω άκρο σχηματίζοντας αγωγό σχήματος U. Εκτός από αυτό το σχήμα έχουν εφαρμοστεί και άλλες γεωμετρίες, με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας του υπόγειου εναλλάκτη, όπως τα διπλά ζεύγη σωληνώσεων και η σπειροειδής τοποθέτηση του πλαστικού αγωγού. Το βάθος των γεωτρήσεων ποικίλλει από 15 μέχρι και 200 m, ανάλογα με τις συνθήκες, το κόστος διάτρησης και τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου. Οι πιο πάνω παράμετροι ρυθμίζουν και τον αριθμό των γεωτρήσεων. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι μικρή, επειδή η επίδραση της μια γεώτρησης στην άλλη είναι ελάχιστη. Έτσι, μπορούμε να έχουμε μεγάλη πυκνωση θερμότητας σε μικρό χώρο. Η παροχή θερμότητας στον υπόγειο εναλλάκτη προέρχεται από διάφορες πηγές, από

τη γεωθερμική ροή θερμότητας, από αγωγή σε οριζόντιο επίπεδο και από την ανοδική πορεία του υπόγειου νερού αν υπάρχει [7].

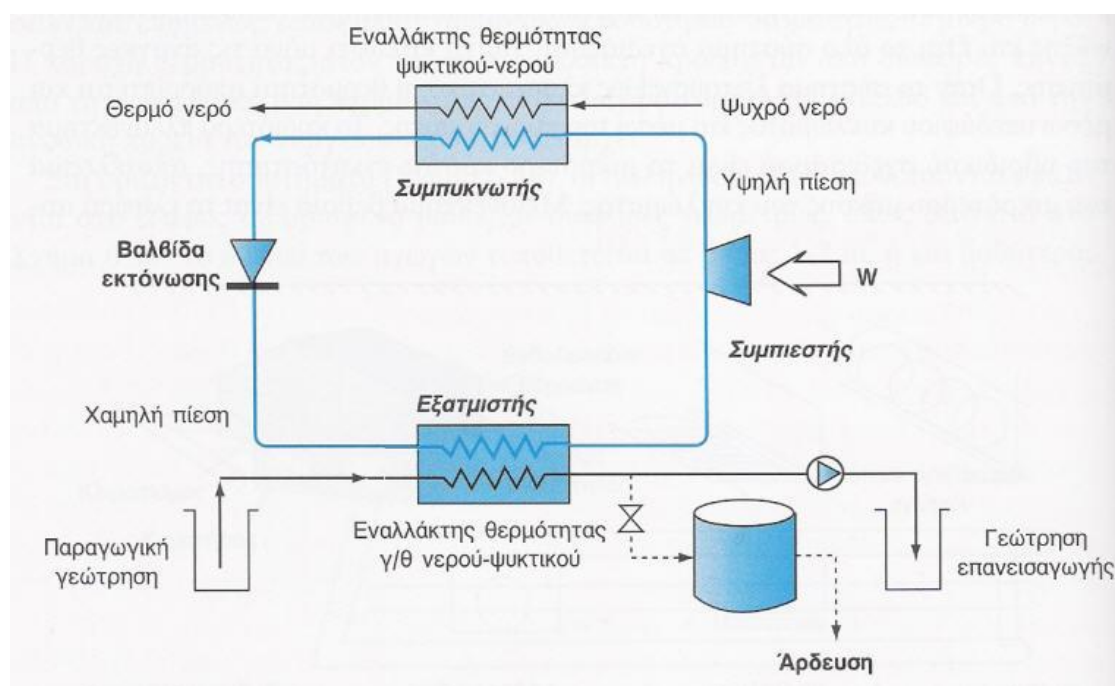


Σχήμα 11 Σχηματική παράσταση διάφορων ειδών γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, οι αντλίες θερμότητας αφαιρούν θερμότητα από το έδαφος, την οποία προσθέτουν στο σύστημα θέρμανσης του κτιρίου. Η διαδικασία αυτή αναστρέφεται το καλοκαίρι, έτσι ώστε η αντλία θερμότητας να παρέχει κλιματισμό (ψύξη) στο κτίριο. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας συνδυάζονται με σύστημα θέρμανσης-κλιματισμού του κτιρίου χαμηλής θερμοκρασίας, δηλαδή είτε με ενδοδαπέδιο, είτε με ενδοτοιχίο, είτε με αερόθερμα (fan coil), είτε με παροχή αέρα μέσω αεραγωγών, κλπ. Παράλληλα, δύνανται να παρέχουν ζεστό νερό χρήσης ανά πάσα στιγμή (χειμώνα-καλοκαίρι, μέρα-νύχτα). Επειδή η θερμοκρασία του εδάφους σε μερικά μέτρα βάθος παραμένει σχεδόν σταθερή καθόλη την διάρκεια του έτους (στην Κεντρική Ελλάδα 14-16°C), ανεξάρτητα από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, τα πιο πάνω γεωθερμικά συστήματα θέρμανσης-κλιματισμού καταναλώνουν 40-60% λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από τα κλιματιστικά τελευταίας τεχνολογίας, με αποτέλεσμα να παρέχουν αποδοτική θέρμανση, κλιματισμό και ζεστό νερό χρήσης στα κτίρια, με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.

Το κόστος εγκατάστασης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ανέρχεται σε 600-1100 €/kW(th) για μονάδες που χρησιμοποιούν νερό από υδρογεώτρηση και σε 1000-1600 €/kW(th) (τιμές 2006) για μονάδες που χρησιμοποιούν γήινους εναλλάκτες θερμότητας. Το αντίστοιχο κόστος ανά μονάδα παρεχόμενης θερμικής ενέργειας ανέρχεται σε 0,012-0,029 €/kWh χωρίς αποσβέσεις, και σε 0,037-0,049 €/kWh λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου και το κόστος χρήματος[9].

1.8.3 ΓΑΘ που λειτουργούν με υπόγεια νερά



Σχήμα 12 Σχηματικό διάγραμμα γεωθερμικής αντλίας θερμότητας νερού-νερού για θέρμανση θερμοκηπίου.

Στα συστήματα αυτά (που καλούνται και συστήματα ανοικτού κυκλώματος), η συλλογή και η απόρριψη της θερμότητας επιτυγχάνεται με τη διέλευση υπόγειου νερού μέσω ενός εναλλάκτη. Το υπόγειο νερό μπορεί να προέρχεται από γεωτρήσεις ή και από πηγάδια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση γεωθερμικού νερού χαμηλής θερμοκρασίας (<math><35^{\circ}\text{C}</math>), το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άμεσες χρήσεις, παρά μόνο σε θέρμανση εδάφους και σε υδατοκαλλιέργειες. Οι αντλίες θερμότητας νερού-νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα θέρμανσης, όταν στην μονάδα του εξατμιστή εισέρχεται νερό προερχόμενο από γεωθερμική γεώτρηση. Λόγω του υψηλότερου κόστους εγκατάστασης μίας ΓΑΘ σε σχέση με τα ανταγωνιστικά συστήματα, δε συνιστάται η κάλυψη του συνολικού θερμικού φορτίου κάποιας εφαρμογής με αντλίες θερμότητας, αλλά μόνο μέρος των αναγκών. Έτσι το σύστημα θέρμανσης χώρων θα πρέπει να αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους υποσυστήματα: το υποσύστημα με την αντλία θερμότητας και το υποσύστημα με μονάδα παραγωγής θερμικής ενέργειας με τη χρήση λέβητα πετρελαίου, φυσικού αερίου, υγραερίου ή βιομάζας.

1.9 Εναλλάκτες θερμότητας

Εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας. Οι εναλλάκτες, ανάλογα με τη διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας, μπορούν να διακριθούν σε άμεσης και έμμεσης επαφής. Στους άμεσης επαφής εναλλάκτες δύο διαφορετικής φάσης ρευστά έρχονται σε άμεση επαφή, ανταλλάσσουν θερμότητα και διαχωρίζονται πάλι. Στους έμμεσης επαφής, τα δύο ρευστά παραμένουν χωρισμένα και η θερμότητα μεταφέρεται μέσω μιας διαχωριστικής επιφάνειας. Στην περίπτωση που η επιφάνεια θερμοεναλλαγής έχει αρκετά μεγάλη θερμοχωρητικότητα ώστε να παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της μεταφοράς, οι έμμεσης επαφής εναλλάκτες ονομάζονται και «αναγεννητές» (regenerators).

Στους εναλλάκτες θερμότητας δεν καταναλώνεται άμεσα καύσιμο, η βέλτιστη όμως χρήση τους και η καλή λειτουργία τους επηρεάζει άμεσα την συνολική κατανάλωση του καυσίμου σε μια βιομηχανία.

Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν τις βασικότερες συνιστώσες των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας. Ανάλογα με το **μηχανισμό μεταφοράς** της θερμότητας οι εναλλάκτες διακρίνονται σε:

- α) συναγωγής μιας φάσης και από τις δύο πλευρές
- β) συναγωγής μιας φάσης από τη μια πλευρά και συναγωγής δύο φάσεων από την άλλη
- γ) συναγωγής δύο φάσεων και από τις δύο πλευρές και
- δ) συνδυασμένης συναγωγής και μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία

Ανάλογα με την **κατασκευή** τους οι εναλλάκτες διακρίνονται σε:

- α) Ομοκεντρικούς κυκλικής διατομής
- β) Εναλλάκτες κελύφους
- γ) Πλακοειδείς
- δ) Προεκτεταμένης επιφάνειας με πτερύγια. Τα πτερύγια αυξάνουν την επιφάνεια συναλλαγής από την πλευρά του αέρα και, επομένως, το συντελεστή συναγωγής.
- ε) Εναλλάκτες αναγέννησης (αναγεννητές).

Τέλος, ανάλογα με το **είδος της ροής** μέσα στους εναλλάκτες, αυτοί διακρίνονται σε:

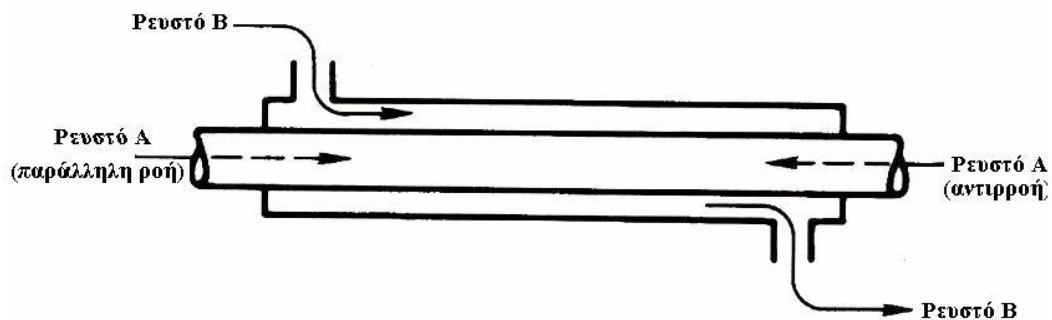
- α) Ομορροής
- β) Αντιρροής
- γ) Σταυρορροής
- δ) Σύνθετους [10]



Σχήμα 13 Εναλλάκτες νερού - νερού εγκατεστημένοι σε βιομηχανία.

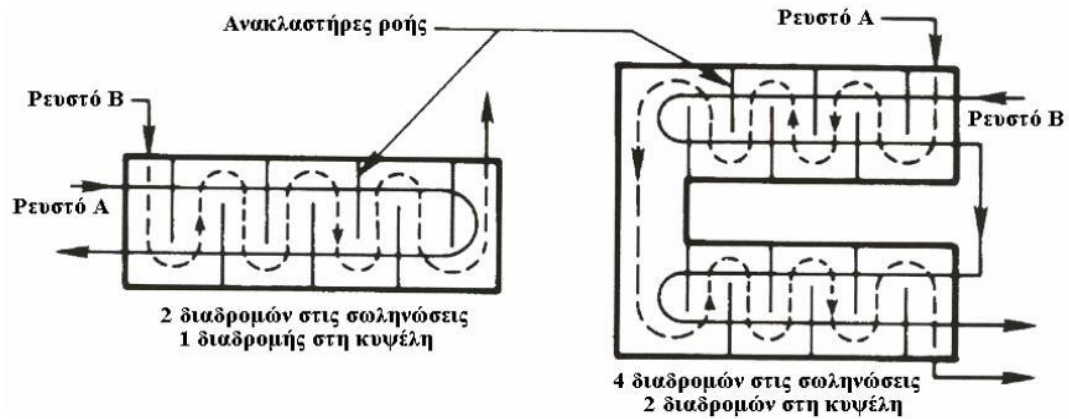
Εδώ θα περιοριστούμε στη μελέτη εναλλακτών θερμότητας με διαχωριστικό τοίχωμα ανάμεσα στα δύο ρευστά, οι οποίοι αποτελούν την πλειοψηφία των εμπορικών συσκευών εναλλαγής θερμότητας. Αυτού του είδους οι εναλλάκτες θερμότητας διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους:

α) Απλοί εναλλάκτες θερμότητας παράλληλης ροής ή κατά αντιρροή (Parallel flow or counterflow heat exchangers).



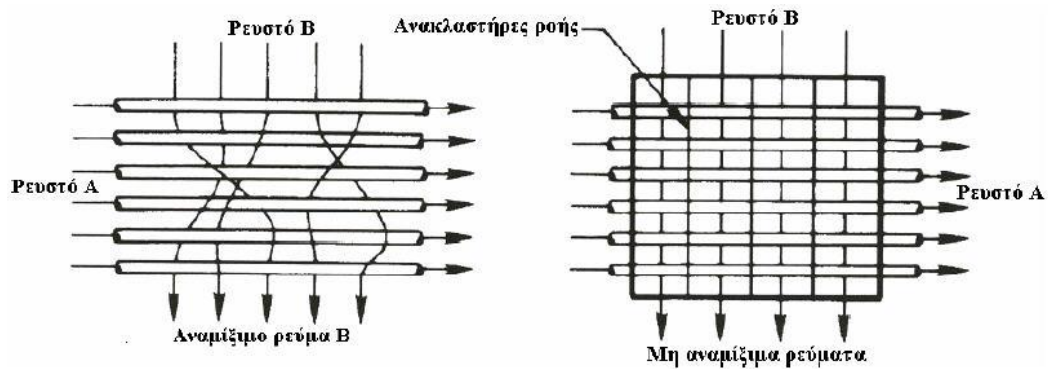
Σχήμα 14 Διατάξεις απλών εναλλακτών θερμότητας.

β) Εναλλάκτες θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις (Shell-and-tube heat exchangers).



Σχήμα 15 Διατάξεις εναλλακτών θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις.

γ) Εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής (Cross-flow heat exchangers).

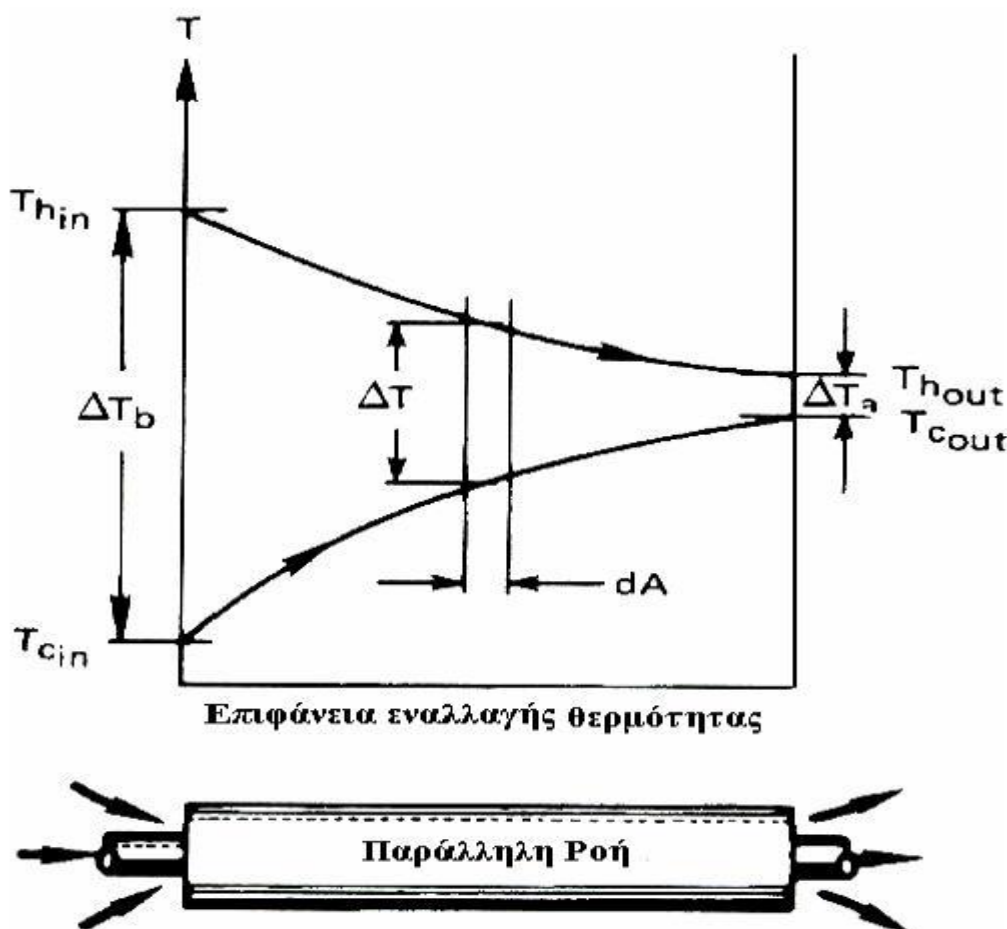


Σχήμα 16 Διατάξεις εναλλακτών θερμότητας εγκάρσιας ροής.

Οι περισσότεροι μεγάλης κλίμακας βιομηχανικοί εναλλάκτες θερμότητας ανήκουν στη κατηγορία των εναλλακτών θερμότητας με κυψέλη και σωληνώσεις επειδή εξαιτίας του ιδιαίτερου σχεδιασμού τους (ροή ρευστού Β εγκάρσια προς τις σωληνώσεις) εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση εναλλαγής θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρευστά.

1.9.1 Απλός εναλλάκτης θερμότητας παράλληλης ροής

Ο απλός εναλλάκτης θερμότητας παράλληλης ροής αποτελείται συνήθως από δύο ομόκεντρους κυλινδρικούς αγωγούς όπου στον εσωτερικό αγωγό ρέει το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας (θερμό ρεύμα) και στον εξωτερικό αγωγό ρέει το ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας (ψυχρό ρεύμα). Καθώς τα δύο ρευστά ρέουν μέσα στη συσκευή προς την ίδια κατεύθυνση (παράλληλη ροή) μεταφέρεται ενέργεια από το θερμό προς το ψυχρό ρεύμα με συνέπεια να αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυχρού ρεύματος (T_c) και να μειώνεται η θερμοκρασία του θερμού (T_h). Τονίζεται ότι σε αυτούς τους εναλλάκτες θερμότητας δεν είναι δυνατό να λάβει χώρα αλλαγή της φυσικής κατάστασης των δύο ρευστών (υγροποίηση ή εξάτμιση) πράγμα που σημαίνει ότι όλο το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται για τη μεταβολή της θερμοκρασίας των δύο ρευστών.



Σχήμα 17 Θερμοκρασιακή κατανομή στα ρευστά απλού εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής.

Ο κύριος στόχος στην θερμική ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας είναι ο υπολογισμός της επιφάνειας που χρειάζεται για την μετάδοση θερμότητας με δεδομένο ρυθμό και για δεδομένες θερμοκρασίες και παροχές ρευστών. Αυτό

επιτυγχάνεται με την χρήση του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας (overall heat-transfer coefficient) U , που βρίσκεται στην θεμελιώδη σχέση για τον υπολογισμό του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας, q

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\log}$$

όπου ΔT_{\log} η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά για όλο τον εναλλάκτη και A η επιφάνεια συναλλαγής. Οπότε έχουμε:

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \right)$$

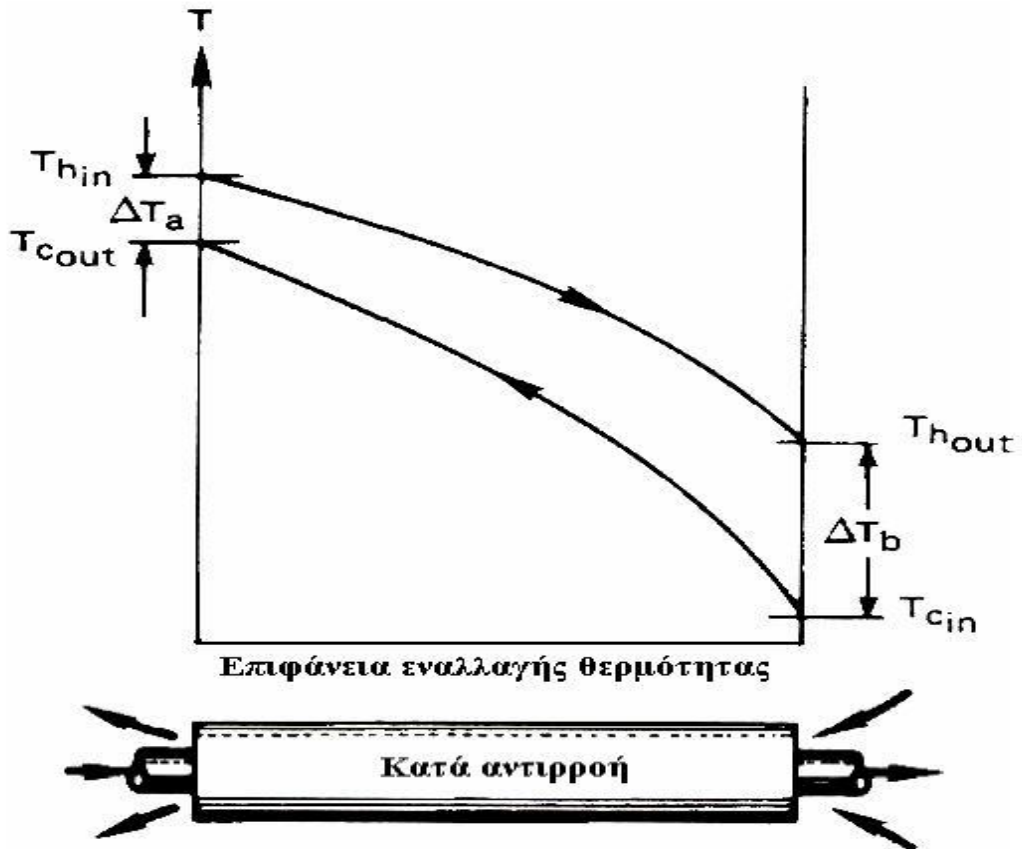
όπου τα ΔT_a και ΔT_b φαίνονται στο παραπάνω Σχήμα 17.

Για σχετικά καθαρά γεωθερμικά νερά ο συντελεστής U κυμαίνεται από 4500 μέχρι 7000 W/m^2K .

1.9.2 Απλός εναλλάκτης θερμότητας κατά αντιρροή

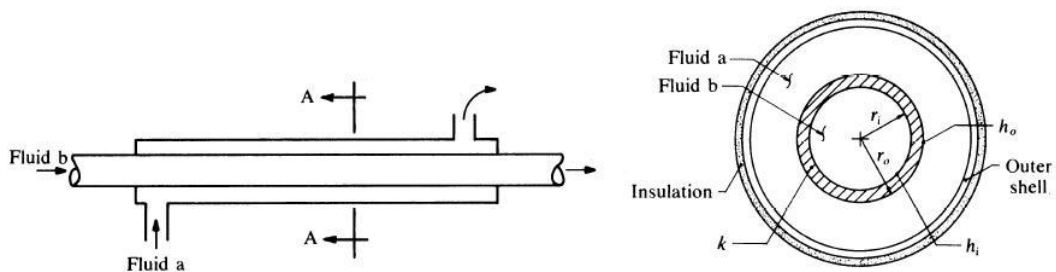
Η διαφορά του εναλλάκτη θερμότητας κατά αντιρροή από τον εναλλάκτη θερμότητας παράλληλης ροής έγκειται στην αντίθετη κατεύθυνση ροής των δύο ρευστών . Η διάταξη αυτού του είδους έχει ως συνέπεια την αποτελεσματικότερη εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο θερμό και το ψυχρό ρευστό έχοντας εν γένει μεγαλύτερο μήκος από τους αντίστοιχους εναλλάκτες παράλληλης ροής.

Η ανάλυση των εναλλακτών θερμότητας κατά αντιρροή ακολουθεί την ίδια λογική με αυτή των εναλλακτών θερμότητας παράλληλης ροής. Καταλήγει στην ίδια εξίσωση ορισμού της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς μόνο που τα μεγέθη ΔT_a και ΔT_b που φαίνονται στο σχήμα ορίζονται με διαφορετικό τρόπο .



Σχήμα 18 Θερμοκρασιακή κατανομή στα ρευστά απλού εναλλάκτη θερμότητας κατά αντιστροφή.

Τυπικοί εναλλάκτες θερμότητας είναι οι πλακοειδείς (plate & frame), αυλών-κελύφους (shell & tube) και οι εναλλάκτες σταυρωτής ροής (crossflow). Την πιο απλή μορφή εναλλάκτη αυλών-κελύφους αποτελεί ο απεικονιζόμενος στο Σχήμα 19 εναλλάκτης διπλού σωλήνα.



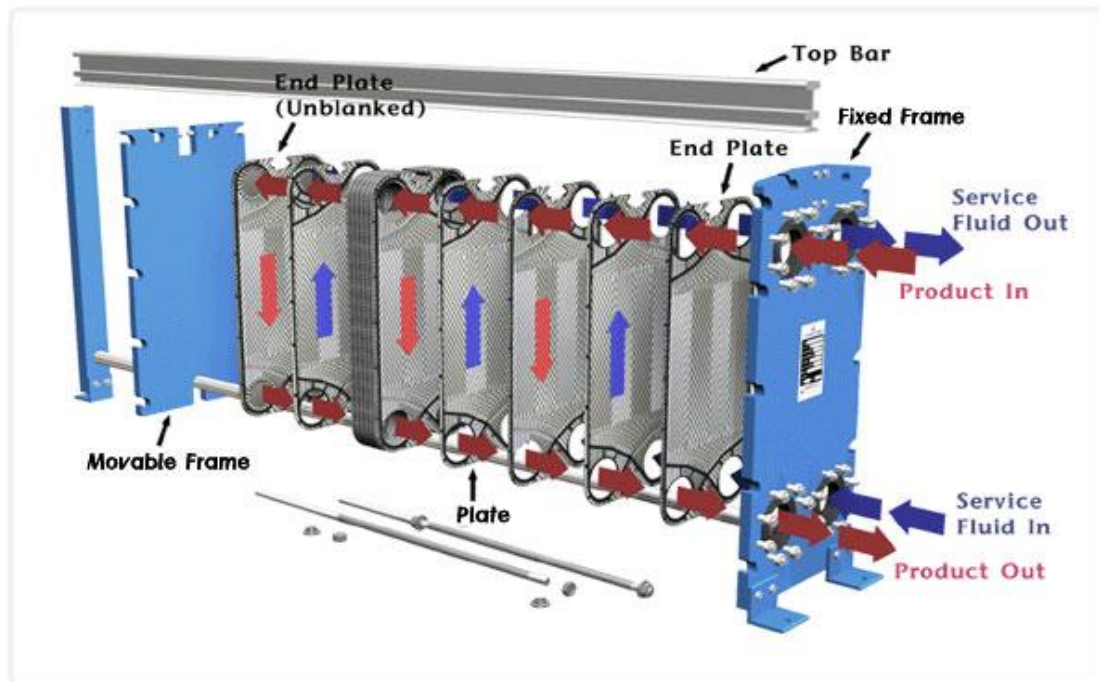
Σχήμα 19 Πλάγια όψη και τομή ενός εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

1.9.3 Εναλλάκτες θερμότητας σε γεωθερμικές εφαρμογές

Στις περισσότερες γεωθερμικές εφαρμογές απαιτείται η μεταφορά της θερμότητας των γεωθερμικών ρευστών σε ένα ρευστό λειτουργίας (κυρίως γλυκό νερό) μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας. Βεβαίως , το ρευστό λειτουργίας μπορεί να είναι ο αέρας, όπως στα αερόθερμα. Σε κάθε σύστημα εναλλαγής θερμότητας επιλέγονται ο τύπος του εναλλάκτη , οι συνθήκες λειτουργίας του (θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου, πτώση πίεσης) , η επιφάνεια του , το υλικό κατασκευής και οι μέθοδοι για τον έλεγχο της διάβρωσης και των επικαθίσεων. Οι εναλλάκτες θερμότητας αποτελούν το σπουδαιότερο τμήμα μιας μονάδας χαμηλής ενθαλπίας μετά την γεώτρηση.

Οι κυριότεροι τύποι εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στα γεωθερμικά συστήματα είναι : ο εναλλάκτης πλακών, ο εναλλάκτης αυλών και κελύφους, ο εναλλάκτης ρευστοστερεάς κλίνης και ο υπόγειος εναλλάκτης.

α) Ο **εναλλάκτης πλακών** (plate heat exchanger) αποτελείται ουσιαστικά από μια σειρά μεταλλικών πλακών , οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους είτε με μπουλόνια και τη μεσολάβηση φλαντζών είτε με συγκόλληση.



Σχήμα 20 Σχηματική απεικόνιση εναλλάκτη πλακών.

Στο **Σχήμα 20** απεικονίζεται σχηματικά ένας φλαντζωτός εναλλάκτης πλακών, καθώς και η ροή του ψυχρού και του θερμού ρεύματος σε αντιρροή στις δύο πλευρές κάθε πλάκας. Οι φλάντζες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επιτρέπεται η ανάμιξη των δύο ρευστών σε περίπτωση αστοχίας της σύνδεσης.

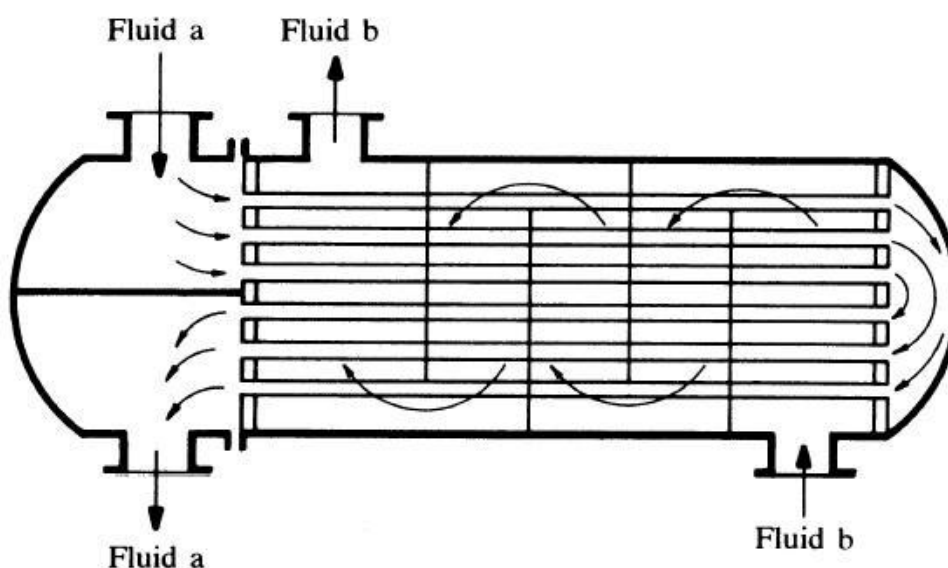
Οι περισσότεροι εναλλάκτες πλακών είναι συσκευές που λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (μικρότερες των 150° C) και πιέσεις (μικρότερες συνήθως από 10 bar) από

ότι οι εναλλάκτες αυλών και κελύφους. Από την άλλη μεριά, λόγω του έντονου τυρβώδους πεδίου που αναπτύσσεται μέσα στους εναλλάκτες πλακών και της μεγάλης επιφάνειας τους, οι εναλλάκτες αυτοί επιτυγχάνουν καλύτερη διαφορά θερμοκρασιών ανάμεσα στα δύο ρεύματα (θερμοκρασία προσέγγισης μέχρι και 2° C) και υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο όγκο αν και παρουσιάζουν αυξημένη πτώση πίεσης. Άλλα συγκριτικά πλεονεκτήματα τους είναι η δυνατότητα επέκτασης, με την προσθήκη επιπλέον πλακών και η δυνατότητα να ανοιχτούν εύκολα και να καθαριστούν ή να γίνει αντικατάσταση φθαρμένων πλακών ή φλαντζών.

Η επιλογή των υλικών σε έναν εναλλάκτη πλακών επικεντρώνεται στην επιλογή του υλικού των πλακών και του υλικού των φλαντζών. Η δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υλικών για τις πλάκες με μεγάλη αντοχή στη διάβρωση, αποτελεί σημαντικό προσόν των εναλλακτών πλακών. Τα υλικά πλακών που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι: ανοξείδωτοι χάλυβες 304, 316 και 317, τιτάνιο, ταντάλιο, Incoloy, Monel, κ.α. Οι περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ως βασικό υλικό τους ανοξείδωτους χάλυβες 304 και 316. Το τιτάνιο χρησιμοποιείται με άριστα αποτελέσματα σε ρευστά υψηλής αλατότητας ή όταν θερμαίνονται νερά από πισίνες που περιέχουν ελεύθερο χλώριο με κόστος όμως 2 ή 3 φορές περισσότερο από τον ανοξείδωτο χάλυβα.

Οι συγκολλημένοι εναλλάκτες πλακών εξαλείφουν την παρουσία των φλαντζών και των μπουλονιών, έχουν απλούστερο σχεδιασμό και μικρότερο κόστος. Από την άλλη μεριά δεν μπορούν να επεκταθούν και δεν μπορούν να ανοιχτούν για καθαρισμό.

β) Ο εναλλάκτης αυλών και κελύφους (shell-and-tube heat exchanger) είναι ο πλέον συνηθισμένος τύπος εναλλάκτη στη χημική βιομηχανία. Δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος στις γεωθερμικές εφαρμογές χαμηλής ενθαλπίας, αν και συχνά χρησιμοποιείται ως συμπυκνωτής στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εναλλάκτης αυτός αποτελείται ουσιαστικά από σειρά παράλληλων αγωγών (αυλών) στους οποίους κυκλοφορεί το ένα ρευστό (το γεωθερμικό συνήθως) σε μονή ή διπλή διαδρομή. Οι αυλοί περικλείονται από ένα μεταλλικό κέλυφος, στο οποίο κυκλοφορεί το άλλο ρευστό. Το πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις [7].



Σχήμα 21 Σχηματική απεικόνιση εναλλάκτη αυλών και κελύφους.

γ) Ο εναλλάκτης ρευστοστερεάς κλίνης (fluidized-bed heat exchanger) έχει χρησιμοποιηθεί σε πιλοτικό στάδιο στην Ισλανδία και αλλού, επειδή αποτρέπει τη δημιουργία επικαθίσεων. Είναι ουσιαστικά κατακόρυφος εναλλάκτης αυλών και κελύφους στον οποίο σωματίδια σχηματίζουν μια ρευστοστερεά κλίνη μέσα στους αυλούς από τους οποίους διέρχεται το γεωθερμικό νερό. Τα σωματίδια ανακυκλοφορούν στον εναλλάκτη και αφαιρούν τις επικαθίσεις με την προσκρούσή τους στα τοιχώματα.

δ) τέλος οι υπόγειοι εναλλάκτες (downhole heat exchanger) τοποθετούνται κατευθείαν μέσα στην οπή της γεώτρησης χωρίς να χρειασθεί άντληση των ρευστών στην επιφάνεια. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η περιορισμένη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται βασικά από την υδροπερατότητα των γεολογικών σχηματισμών και το συνολικό πάχος τους στην τομή της γεώτρησης. Στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται το μικρό κόστος συντήρησης και λειτουργίας της μονάδας και το περιβαλλοντικό όφελος[7].

1.9.4 Εναλλάκτες πλακών

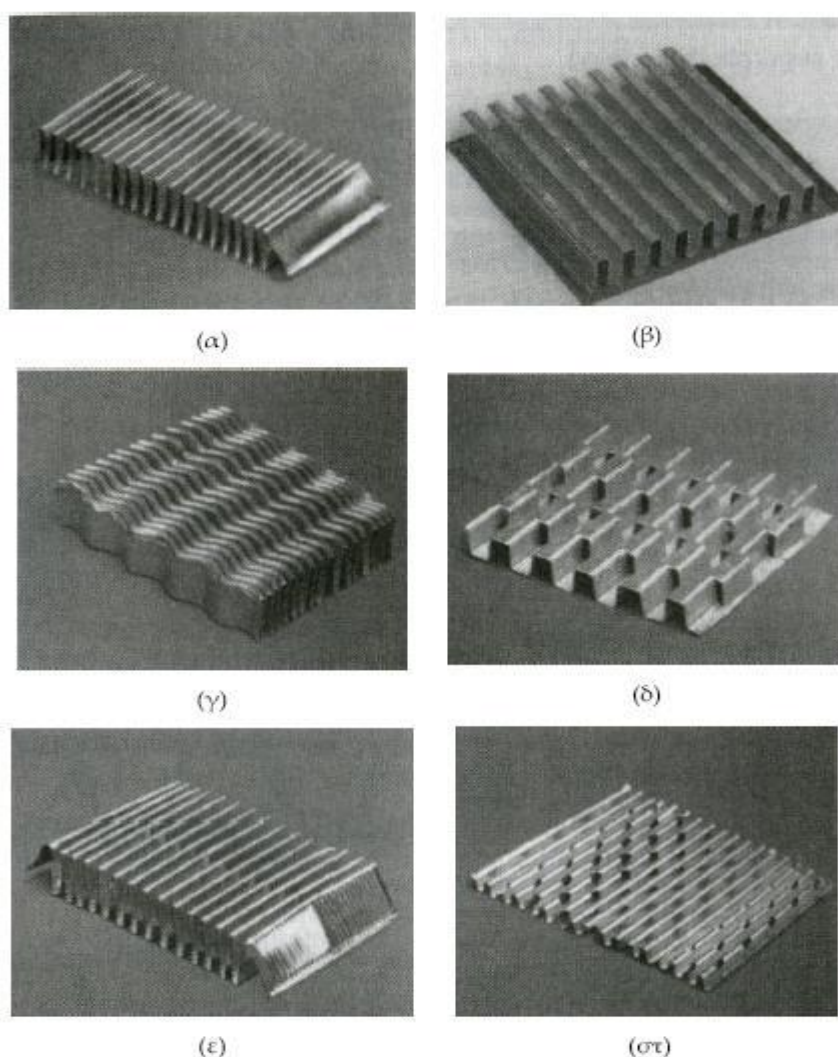
Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας έχει γίνει μεγαλύτερη καθώς το ενδιαφέρον στρέφεται στην προσπάθεια εξοικονόμησης αλλά και καλύτερης εκμετάλλευσης και διαχείρισης της ενέργειας. Σε αυτόν τον δρόμο οδηγεί η γενικότερη στροφή της βιομηχανίας προς την εφαρμογή τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον, η οποία κάνει επιτακτική την ανάγκη σχεδιασμού αποδοτικότερων εναλλακτών θερμότητας.

Ένας εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από στοιχεία μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή τμήματα θερμικά αγωγικού υλικού τα οποία συνδυασμένα δημιουργούν την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, καθώς και από στοιχεία διανομής της ροής. Κλασικό είδος εναλλάκτη θερμότητας είναι οι εναλλάκτες κελύφους-αυλών (shell-and-tube). Με βάση την πυκνότητα επιφάνειας εναλλαγής οι εναλλάκτες θερμότητας κατατάσσονται πιο ειδικά σε συμπαγείς (compact) ή μη. Ένας εναλλάκτης χαρακτηρίζεται ως συμπαγής όταν η πυκνότητα επιφάνειας εναλλαγής ξεπερνά τα $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Shah & Sekulic, 2003). Μια χαρακτηριστική κατηγορία συμπαγών εναλλακτών θερμότητας, η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη, είναι οι εναλλάκτες πλακών (plate heat exchangers, PHE). Οι εναλλάκτες πλακών, συγκρινόμενοι με τους συμβατικούς εναλλάκτες κελύφους-αυλών, χαρακτηρίζονται από μειωμένο μέγεθος και βάρος, μικρή ανάγκη για στήριξη κατά την εγκατάστασή τους, ενώ με κατάλληλη διεύθυνση της ροής μπορούν να επιτύχουν πολύ μικρή θερμοκρασιακή προσέγγιση μεταξύ των ρευμάτων. Επίσης έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια και γενικότερα χαμηλότερο κόστος για το ίδιο καθήκον (Shah & Sekulic, 2003). Η αύξηση της πυκνότητας επιφάνειας επιτυγχάνεται με την διαμόρφωση της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας. Η διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή μικρών πτερυγίων (fins) με διάφορα σχήματα (π.χ. κυλινδρικά, ορθογωνικά κ.α.), κυματισμών (undulations) ή πτυχώσεων (corrugations). Επίσης οι τεχνικές διαμόρφωσης περιλαμβάνουν την δημιουργία ραβδώσεων (ribs) ή πτυχώσεων διαφόρων σχημάτων, πτερυγίων τύπου ακίδας (pin-fins), εξογκωμάτων (dimples) και γενικότερα παραγόντων που συμβάλλουν στην αυξημένη παραγωγή τύρβης (turbulence promoters). Τυπικές διαμορφώσεις των επιφανειών εναλλακτών θερμότητας με πλάκες παρατίθενται στο

Σχήμα 22 . Χάρη στην προσθήκη της διαμόρφωσης, οι εναλλάκτες πλακών έχουν τουλάχιστον διπλάσιο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τους αντίστοιχους εναλλάκτες κελύφους-αυλών (Shah & Sekulic, 2003).

Πολλές μελέτες γίνονται με στόχο την κατά το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των φαινομένων μεταφοράς που διέπουν την ροή ενός ρευστού σε έναν εναλλάκτη πλακών με διαμορφωμένη επιφάνεια και την διατύπωση ενός αξιόπιστου μοντέλου σχεδιασμού αυτού του είδους των συσκευών. Για την διαμόρφωση του μοντέλου σχεδιασμού χρησιμοποιούνται τεχνικές στατιστικής ανάλυσης ευρέως διαδεδομένες στον τομέα της βελτιστοποίησης.

Οι πλακοειδής εναλλάκτες χρησιμοποιούνται ευρέως για θέρμανση, ψύξη και οποιουδήποτε άλλου είδους εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας στη χημική βιομηχανία, στη βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων. Μερικές ακόμα εφαρμογές του είναι σε ηλιακά συστήματα, στην τηλεθέρμανση και σε συστήματα αντλιών θερμότητας [11].



Σχήμα 22 Διαμορφώσεις επιφάνειας σε πλάκες εναλλακτών: πτυχώσεις α)τυπικές τριγωνικές β) τυπικές ορθογώνιες γ) κυματοειδείς δ)ορθογωνικές με διαδοχική μετατόπιση ε) τύπου πτερυγίων πολλαπλών σχισμών στ) τύπου διάτρητων πτερυγίων (Hesselgraves, 2001)

Ένας πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας είναι ένας τύπος εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος χρησιμοποιεί σε σειρά μεταλλικά πλακίδια με αυλακώσεις για την μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών. Μεταξύ των πλακών, υπάρχουν δύο κανάλια με κρύο και θερμό μέσο. Αυτά διατρέχουν κάθε πλευρά των πλακών και με αντίθετη κίνηση μεταξύ τους. Αυτός έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα απέναντι σε έναν συμβατικό εναλλάκτη θερμότητας δεδομένου ότι τα ρευστά εκτίθενται μεταξύ τους σε μια πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και αυτό διότι με την κατάλληλη μορφή των πλακιδίων καταφέρνουν να δεισδύσουν σε όλη την περιοχή τους. Έτσι διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας και αυξάνεται κατά πολύ η χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι εναλλάκτες πλακών έχουν ευρεία χρήση και μάλιστα οι εναλλάκτες συγκολλητού τύπου μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε ποικίλες εφαρμογές ζεστού νερού λέβητα. Η υψηλή αποδοτικότητα μεταφοράς θερμότητας για ένα τέτοιο μικρό μέγεθος εναλλάκτη έχει προκαλέσει αύξηση στον ρυθμό ροής του οικιακού ζεστού νερού για διάφορων ειδών λέβητες. Ο πλακοειδής εναλλάκτης εξαιτίας του μικρού μεγέθους του έχει μεγάλο αντίκτυπο στην οικιακή θέρμανση και στα συστήματα ζεστού νερού. Οι μεγαλύτερου μεγέθους εναλλάκτες πλακών που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο είναι κυρίως φλατζωτοί. Οι φλαντζωτοί πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών, είναι σφραγισμένοι με λαστιχένιες φλάντζες. Οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας με συγκόλληση αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών.

Αυτό που είναι σημαντικό σε έναν εναλλάκτη θερμότητας είναι η χρήση των σωλήνων ή των άλλων χαρακτηριστικών διατάξεων για θέρμανση ή ψύξη ενός υγρού μεταφέροντας την θερμότητα μεταξύ αυτού και του άλλου ρευστού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο εναλλάκτης αποτελείται από σωλήνες σε σπειροειδή μορφή οι οποίοι περιέχουν το ένα ρευστό το οποίο περνά διαμέσου ενός θαλάμου κάυσεως ο οποίος περιέχει το δεύτερο ρευστό. Τα τοιχώματα των σωλήνων αποτελούνται συνήθως από μέταλλο ή άλλο υλικό το οποίο να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να διευκολύνεται η ανταλλαγή θερμότητας ενώ το εξωτερικό περίβλημα του μεγαλύτερου χώρου στο εναλλάκτη αποτελείται από υλικό χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας ή ντύνεται με θερμική μόνωση για να αποθαρρύνει την θερμότητα να διαφύγει από τον εναλλάκτη προς το περιβάλλον.

Ο πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας εφευρέθηκε από τον Δρ Richard Seligman το 1923 και έφερε την επανάσταση στις μεθόδους έμμεσης θέρμανσης και ψύξης των ρευστών. Ο Δρ Richard Seligman ίδρυσε το 1910 την APV (Aluminium Plant & Vessel Company Limited), ένας ειδικός κατασκευαστής που παρέχει συγκολλημένα δοχεία σε εμπόρια ζυθοποιείων και φυτικού ελαίου.

Ο πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας είναι κατάλληλος για την μεταφορά θερμότητας μεταξύ μέσης και χαμηλής πίεσης υγρών. Οι συγκολλημένοι, ημι-συγκολλημένοι εναλλάκτες και οι συγκολλητού τύπου χρησιμοποιούνται για μεταφορά θερμότητας μεταξύ ρευστών υψηλής πίεσης ή σε εφαρμογές όπου απαιτούνται πιο συμπαγή προϊόντα. Στην θέση του σωλήνα όπου περνά μέσα από έναν μεγαλύτερο αγωγό ή από ένα θάλαμο καύσης έχουμε αντ' αυτού δύο εναλλασσόμενους αγωγούς συνήθως λεπτοί σε βάθος, που χωρίζονται στην μεγαλύτερη επιφάνεια τους από ένα ζαρωμένο μεταλλικό πιάτο. Οι πλάκες που χρησιμοποιούνται στους εναλλάκτες λαμβάνονται ένα ένα τα κομμάτια πρεσαρισμένα σε έναν συμπίεστη. Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ένα συνήθως χρησιμοποιούμενο μέταλλο για τις πλάκες επειδή έχει την ικανότητα να αντέχει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και δυνάμεις όπως επίσης και στην πιθανότητα διάβρωσης του. Οι πλάκες είναι συχνά χωρισμένες μεταξύ τους από τις λαστιχένιες φλάντζες οι οποίες εφαρμόζονται στο τμήμα γύρω από την άκρη των πλακών. Οι πλάκες πιέζονται στα ειδικά καλούπια που τους δίνουν την επιθυμητή μορφή και την σωστή γωνία κατά την κατεύθυνση της ροής του υγρού το οποίο κινείται στο κύκλωμα του εναλλάκτη θερμότητας. Αυτές οι αυλακώσεις πάνω στις

πλάκες σχεδιάζονται έτσι ώστε να εφαρμόζει ή μια πλάκα με την άλλη εκεί όπου υπάρχει κενή απόσταση μεταξύ τους 1,3-1,5 mm.

Οι πλάκες προσδίδουν μία εκπληκτικά μεγάλη περιοχή-επιφάνεια επαφής αν αναλογιστεί κανείς το μικρό μέγεθος του εναλλάκτη το οποίο επιτρέπει την ταχύτερη μεταφορά θερμότητας. Φτιάχνοντας κάθε χώρο του εναλλάκτη ώστε να είναι αρκετά λεπτός αυτό μας εξασφαλίζει ότι η πλειοψηφία του όγκου του υγρού θα έρθει σε επαφή με τις πλάκες και κατ'επέκταση την αποδοτική εναλλαγή θερμότητας. Οι σχηματισμοί πάνω στις πλάκες δημιουργούν και διατηρούν συνθήκες τυρβώδους ροής των ρευστών μεγιστοποιώντας την εναλλαγή θερμότητας. Η τυρβώδης ροή μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό και για χαμηλές ταχύτητες ροής με υψηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας.

Ένας πλακοειδής εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από μια σειρά λεπτών, κυματοειδών πλακών όπως αναφέραμε παραπάνω. Ανάλογα με την εφαρμογή που προορίζονται μπορεί να είναι συγκολλητού τύπου ή ημι-συγκολλημένοι κλπ. Οι πλάκες συμπιέζονται μαζί σε ένα άκαμπτο πλαίσιο για να διαμορφώσουν την ακολουθία των παραλληλών ροών των καναλιών που θα εναλλάσουν ψυχρό και θερμό ρεύμα.



Σχήμα 23 Εναλλάκτης πλακών σε εφαρμογή ανάκτησης θερμότητας από υγρά απόβλητα.

Ο εικονιζόμενος εναλλάκτης έχει επιφάνεια εναλλαγής 90 m^2 , διάκενο μεταξύ των πλακών 12mm, 5 περάσματα ανά πλάκα, free flow και με πτώση πίεσης 3,5m σε παροχή $90 \text{ m}^3/\text{h}$.

Σε σύγκριση με τους εναλλάκτες κελύφους(shell) και αυλών(tubes) στους εναλλάκτες πλακών μπορούμε να επιτύχουμε θερμοκρασιακή διαφορά μέχρι και 1°C όταν το όριο στους άλλους εναλλάκτες είναι οι 5°C ή περισσότερο. Για το ίδιο ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται, ο εναλλάκτης πλακών είναι μικρότερος λόγω της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής του μέσα από τις πλάκες. Επίσης στους πλακοειδής εναλλάκτες έχουμε την δυνατότητα επέκτασης ή μείωσης της διαχειριζόμενης επιφάνειας επαφής.

Αξιολόγηση των πλακοειδών εναλλακτών θερμότητας

Όλοι οι εναλλάκτες πλακών μοιάζουν ίδιοι στο εξωτερικό τους. Οι διαφορές εστιάζονται στο εσωτερικό τους, στις λεπτομέρειες του σχεδίου των πλακών και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για το αποτύπωμα κάθε πλάκας. Ως εκ τούτου, όταν αξιολογείς έναν πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας είναι πολύ σημαντικό όχι μόνο να ερευνηθούν οι λεπτομέρειες του προϊόντος που παρέχεται αλλά να αναλυθεί το επίπεδο έρευνας και ανάπτυξης που έχει διεξαχθεί από τον κατασκευαστή, οι υπηρεσίες μετά την αγορά και τέλος η διαθεσιμότητα και το κόστος των ανταλλακτικών.

Πλεονεκτήματα

- **Συμπαγές** . Οι μονάδες σε έναν πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας καταλαμβάνουν πολύ μικρό χώρο έχοντας μεγάλη επιφάνεια επαφής η οποία διαμορφώνεται σε ένα πολύ μικρό όγκο. Αυτό μας εξασφαλίζει έναν υψηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας λόγω της μεταφοράς θερμότητας που συνδέεται με τις στενές διόδους που περνά το ρευστό και το σχήμα των αυλακώσεων στην επιφάνεια των πλακών.
- **Ευελιξία** . Οι αλλαγές μπορούν να γίνουν στην απόδοση του εναλλάκτη θερμότητας με την χρησιμοποίηση διάφορων ειδών ρευστών και διάφορων συνθηκών όπου μπορούν να τροποποιηθούν για να προσαρμοστούν στις προδιαγραφές κάθε εφαρμογής. Αυτές οι προδιαγραφές μπορούν να αντιστοιχηθούν σε διάφορων ειδών αυλακώσεις.
- **Χαμηλό κόστος κατασκευής**. Οι συγκολλημένες πλάκες είναι σχετικά ακριβότερες από τις πεπεσμένες πλάκες. Οι εναλλάκτες πλακών χρησιμοποιούν πεπεσμένες πλάκες διάφορων μορφών οι οποίες επιτρέπουν την μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση και στις χημικές αντιδράσεις.
- **Εύκολη συντήρηση** . Ο πλακοειδής εναλλάκτης μπορεί να αποσυναρμολογηθεί πολύ εύκολα για επιθεώρηση και συντήρηση. Είναι επίσης εύκολη η αναπλήρωση και η αντικατάσταση κάποιας προβληματικής πλάκας .
- **Μικρές απώλειες** λόγω ακτινοβολίας, και μπορεί να φτάσει σε πίεση έως 30 bar και θερμοκρασία έως 230 °C .

Έλεγχος θερμοκρασίας . Ο πλακοειδής εναλλάκτης μπορεί να λειτουργήσει με σχετικά μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα όταν πρέπει να αποφευχθούν οι υψηλές θερμοκρασίες. Οι τοπικές υπερθερμάνσεις και η πιθανότητα των στάσιμων ζωνών μπορούν επίσης να μειωθούν από την μορφή της μετάβασης της ροής.

Μειονεκτήματα

- Η κύρια αδυναμία του εναλλάκτη πλακών είναι η ανάγκη τοποθέτησης των φλατζωτών μερών ανάμεσα στις πλάκες για την συγκράτησή τους. Παρ' όλ' αυτά οι εναλλάκτες πλακών έχουν καταφέρει και λειτουργούν επιτυχώς σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις.
- Υπάρχει η πιθανότητα διαρροής. Οι διαρροές που εμφανίζονται στέλνονται στο περιβάλλον και όχι μεταξύ των ρευμάτων διαδικασίας.

- Η πτώση πίεσης που εμφανίζεται στον εναλλάκτη είναι σχετικά υψηλή και επομένως πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αρχικά και λειτουργικά κόστη των συστημάτων των αντλιών.
- Όταν εμφανίζεται απώλεια συγκράτησης ή απώλεια πίεσης, μπορεί να πάρει αρκετό χρονικό διάστημα για να συντηρηθεί και να επανεκκινήσει αυτός ο τύπος εναλλάκτη δεδομένου ότι εκατοντάδες πλάκες είναι κοινές στις μεγάλες κατασκευές [12].

Οι εναλλάκτες θερμότητας επιλέγονται έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση συγκεκριμένης ποσότητας θερμότητας. Η γενική σχέση, βάσει της οποίας γίνεται ο υπολογισμός της επιφάνειας του εναλλάκτη, είναι: $Q = U \times A \times \Delta T_{ln} \times c_f$ Όπου q είναι το ποσό θερμότητας (σε W) που εναλλάσσεται μεταξύ των δύο ρευμάτων (το θερμικό καθήκον), U ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (W/m^2K), A η επιφάνεια εναλλαγής (m^2), ΔT_{ln} η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασιών (K) και c_f ο συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος εισάγεται επειδή τα δύο ρεύματα στον εναλλάκτη δεν είναι απόλυτα κατ' αντιρροή. Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασιών υπολογίζεται από την σχέση:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_i - t_o) - (T_o - t_i)}{\ln [(T_i - t_o)/(T_o - t_i)]}$$

Όπου T_i και T_o είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του γεωθερμικού νερού και t_i και t_o οι αντίστοιχες θερμοκρασίες του νερού λειτουργίας.

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα των ρευμάτων μέσα στον εναλλάκτη και η παρουσία επικαθίσεων. Η αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων αυξάνει το συντελεστή, αυξάνει όμως και την πτώση πίεσης στον εναλλάκτη. Για σχετικά καθαρά γεωθερμικά νερά, ο συντελεστής U κυμαίνεται από 4500 μέχρι 7000 W/m^2K , με μέση τιμή τα 5500 W/m^2K [7].

Γενικά

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, υπάρχουν μερικά βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα συμπαγή εναλλάκτη θερμότητας. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η υδραυλική διάμετρος, D_h , η οποία εκφράζει το πόσο συμπαγής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας βάσει της γεωμετρίας του. Η D_h ορίζεται ως:

$$D_h = \frac{4A_f}{P}$$

Όπου A_f είναι η μέση τιμή της επιφάνειας της διατομής ενός καναλιού του εναλλάκτη θερμότητας και P η μέση περιβρεχόμενη περίμετρος του.

Η A_f μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$A_f = \frac{V_s}{L}$$

Όπου V_s ο εμπεριεχόμενος όγκος ενός καναλιού και L το μήκος του.

Η P μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$P = \frac{A_s}{L}$$

Όπου A_s είναι η εσωτερική επιφάνεια του καναλιού του εναλλάκτη. Συχνά για λόγους ευκολίας από ορισμένους ερευνητές, στους εναλλάκτες πλακών με πτυχώσεις χρησιμοποιείται η προβολή της επιφάνειας της πλάκας του εναλλάκτη στο επίπεδο, A_e , αντί της πραγματικής επιφάνειας A_f . Σε αυτήν την περίπτωση ορίζεται η ισοδύναμη διάμετρος, D_e .

$$D_e = \frac{4V_s}{A_e}$$

Η ισοδύναμη διάμετρος μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχη της υδραυλικής όταν θεωρείται αμελητέα η αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής εξαιτίας της διαμόρφωσης που έχει η επιφάνεια.

Η βασική εξίσωση υπολογισμού ενός εναλλάκτη είναι:

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD$$

όπου Q ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, U ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, A η επιφάνεια εναλλαγής και $LMTD$ η λογαριθμική μέση διαφορά θερμοκρασιών.

Η $LMTD$ ορίζεται, στην περίπτωση της αντιρροής:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

ενώ για την περίπτωση της ομορροής:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}}$$

όπου T_{hi} , T_{ci} , T_{ho} , T_{co} , οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του θερμού και ψυχρού ρεύματος αντίστοιχα.

Ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για την περίπτωση ενός απλού εναλλάκτη πλακών με ένα κανάλι για κάθε ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_s} + \frac{\Delta x}{\lambda_s} + \frac{1}{h_h}$$

όπου h ο μερικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (h_c για το ψυχρό και h_h για το θερμό ρεύμα), Δx το πάχος της πλάκας ενδιάμεσα στα δύο κανάλια και λ_s η θερμική αγωγιμότητα του υλικού της πλάκας.

Οι πιο χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς ενός εναλλάκτη θερμότητας είναι:

- Ο αριθμός *Nusselt*, Nu , ο οποίος ορίζεται ως:

$$Nu = \frac{hD_h}{\lambda}$$

όπου λ είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού. Ο αριθμός Nu εκφράζει το λόγο της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής ως προς την μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγής (Bird et al., 1960).

- Ο συντελεστής τριβής (friction factor), f :

$$f = \frac{\Delta P}{L} \frac{D_h}{1/2 \rho u^2}$$

όπου ΔP η πτώση πίεσης στο κανάλι του εναλλάκτη και u η μέση ταχύτητα του ρευστού στο κανάλι. Οι αντιστάσεις στη ροή μέσα στο κανάλι του εναλλάκτη οφείλονται τόσο στην

τριβή (friction) του ρευστού στα τοιχώματα του καναλιού όσο και στην οπισθέλκουσα σχήματος (form drag) λόγω των πτυχώσεων. Δεδομένου ότι ο συντελεστής τριβής για την ροή σε κανάλι και ο συντελεστής οπισθέλκουσας (drag coefficient) ορίζονται με τον ίδιο γενικό τύπο.

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς ορίζεται ο παράγοντας Colburn για τη μεταφορά θερμότητας, j :

$$j = \frac{Nu}{RePr^{\frac{1}{3}}}$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{uD_h\rho}{\mu}$$

όπου u η μέση ταχύτητα του ρευστού στο κανάλι, ρ και μ η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες αντίστοιχα. Ο αριθμός Re εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις δυνάμεις λόγω ιξώδους.

Ο περιεχόμενος(ή περιβρεχόμενος όγκος) όγκος, V_s , του καναλιού ενός εναλλάκτη είναι συνάρτηση του παράγοντα Colburn και του συντελεστή τριβής και εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_s = D_h \left(\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}} \right)^{-\frac{3}{2}} \frac{\dot{m}Pr(NTU)^{\frac{3}{2}}}{8(2\rho\Delta P)^{\frac{1}{2}}}$$

όπου \dot{m} η μαζική παροχή και NTU ο αριθμός των θερμικών μονάδων (*Number of Thermal*

Units). Ο λόγος $\left(\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}} \right)$ εκφράζει την αναλογία μεταξύ της θερμικής απόδοσης ενός εναλλάκτη προς το λειτουργικό κόστος του και αποτελεί ένα ακόμα μέγεθος που χαρακτηρίζει έναν συμπαγή εναλλάκτη θερμότητας. Ο λόγος των δύο χαρακτηριστικών

μεγεθών, της D_h και της $\left(\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}} \right)$, χρησιμοποιείται από διάφορους ερευνητές για την

αξιολόγηση της απόδοσης εναλλακτών, με πιο χαρακτηριστικό το δείκτη χωρικής απόδοσης ο οποίος ορίζεται ως :

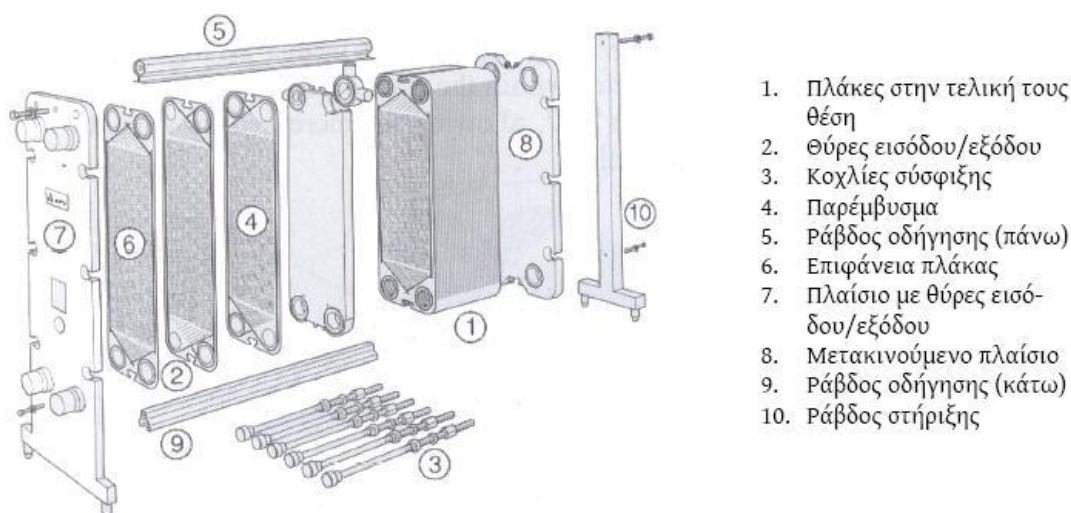
$$VPI = \frac{\left(\frac{j}{f^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{3}{2}}}{D_h Pr}$$

Όσο υψηλότερη η τιμή του δείκτη, τόσο μεγαλύτερη η απόδοση του υπό εξέταση εναλλάκτη ανά μονάδα περιεχόμενου όγκου.

Οι εναλλάκτες πλακών με πτυχώσεις αποτελούν το τυπικότερο είδος συμπαγών εναλλακτών θερμότητας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως κοινοί εναλλάκτες υγρής ή αέριας φάσης είτε ως συμπυκνωτές. Ωστόσο, παρά την ευρεία διάδοσή τους, δεν υπάρχει μια γενική μέθοδος σχεδιασμού. Οι υπάρχοντες συσχετισμοί περιορίζονται σε εμπειρικές εξισώσεις που περιγράφουν την επίδραση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ενός εναλλάκτη πλακών στην απόδοση του (π.χ. επίδραση της γωνίας των πτυχώσεων). Ακόμα περισσότερο, η πολιτική των εταιρειών σχεδιασμού και κατασκευής αυτού του τύπου εναλλακτών θερμότητας, για λόγους ανταγωνισμού, περιορίζει την δημοσίευση των

εξισώσεων σχεδιασμού των εναλλακτών στην ελεύθερη βιβλιογραφία, ακόμα και όταν αυτές είναι διαθέσιμες.

Οι εναλλάκτες πλακών και πλαισίου (plate-and-frame heat exchangers) ή στεγανοποιημένοι (gasketed) εναλλάκτες αποτελούνται από πολλές λεπτές μεταλλικές πλάκες ορθογώνιου σχήματος, μονωμένες στην εξωτερική τους περίμετρο με χρήση ελαστικού παρεμβύσματος (φλάντζα, gasket), οι οποίες συγκρατούνται μέσα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Η μια από τις δύο πλάκες του πλαισίου διαθέτει κατάλληλες υποδοχές με θύρες σύνδεσης για τα ρεύματα ροής, ενώ η άλλη είναι μετακινούμενη και τοποθετείται ανάλογα με τον αριθμό πλακών του εναλλάκτη. Το πλαίσιο διαθέτει ράβδους οδήγησης οι οποίες επιτρέπουν τη σωστή και ευθυγραμμισμένη τοποθέτηση των πλακών. Για το σκοπό αυτό, οι πλάκες του εναλλάκτη διαθέτουν μια εγκοπή στο μέσο κάθε πλευράς τους ώστε να προσαρμόζονται στις ράβδους οδήγησης. Το σύνολο των πλακών και του πλαισίου συσφίγγεται με χρήση κοχλιών μεγάλου μήκους, επιτρέποντας την καλύτερη απομόνωση των σχηματιζόμενων καναλιών του εναλλάκτη. Όπως είναι προφανές, το μήκος των ράβδων οδήγησης είναι μεγαλύτερο από το πάχος της συμπαγούς συστοιχίας και την τμηματική απομάκρυνση των πλακών του εναλλάκτη προς επίβλεψη και καθαρισμό. Μια αναπαράσταση ενός τυπικού εναλλάκτη πλακών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 24 .



Σχήμα 24 Τυπικός εναλλάκτης πλακών

Ο Πίνακας 2 αναφέρει τυπικές διαστάσεις ενός εναλλάκτη θερμότητας πλακών. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά που μπορούν να υποστούν επεξεργασία εν ψυχρώ (cold-worked metals). Τα πλέον συνηθέστερα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας (AISI 304 ή 306) και το τιτάνιο. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κράματα ενώ σε περιπτώσεις διαβρωτικών ρευστών προτιμώνται πλάκες από γραφίτη ή πολυμερικά υλικά.

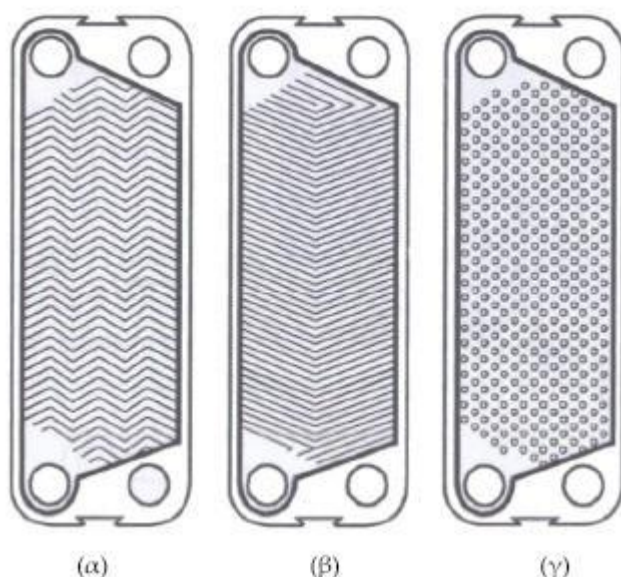
Όπως αναφέρθηκε, κάθε πλάκα του εναλλάκτη κατασκευάζεται με την αποτύπωση ενός πρότυπου πτυχώσεων (*corrugated pattern*) ή κυματισμών (*wavy or undulated pattern*). Στην περίπτωση των πτυχώσεων στην πλάκα του εναλλάκτη, κατασκευάζονται συνήθως υπό γωνία ως προς την φορά της ροής και μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα, π.χ. τετραγωνικές, τριγωνικές, τραπεζοειδείς, ημιτονοειδείς κλπ. Στην μια πλευρά κάθε πλάκας, ειδικά πλευρικά κανάλια (*side channels*) κατασκευάζονται κατά μήκος της περιφέρειας και των θυρών ροής της πλάκας, στα οποία τοποθετείται το παρέμβυσμα το οποίο

χρησιμοποιείται για την σταγανοποίηση των καναλιών του εναλλάκτη αλλά και το καθορισμό του προτύπου ροής μέσα στο κανάλι.

Πίνακας 2 . Τυπικές διαστάσεις εναλλάκτη πλακών

Μέγιστη επιφάνεια εναλλαγής:	2500 m ²
Αριθμός πλακών	3 ως 700
Τυπική πίεση	0.1 ως 3.0 MPa
Τυπική θερμοκρασία	-40 ως 260 °C
Τυπική παροχή ανά κανάλι εναλλάκτη	0.05 ως 12.5 m ³ /h
Πάχος πλακών	0.5 ως 1.2 mm
Επιφάνεια	0.03 ως 3.6 m ²
Απόσταση μεταξύ πλακών	1.5 ως 7 mm
Πλάτος πλάκας	0.07 ως 1.2 m
Μήκος πλάκας	0.4 ως 5 m

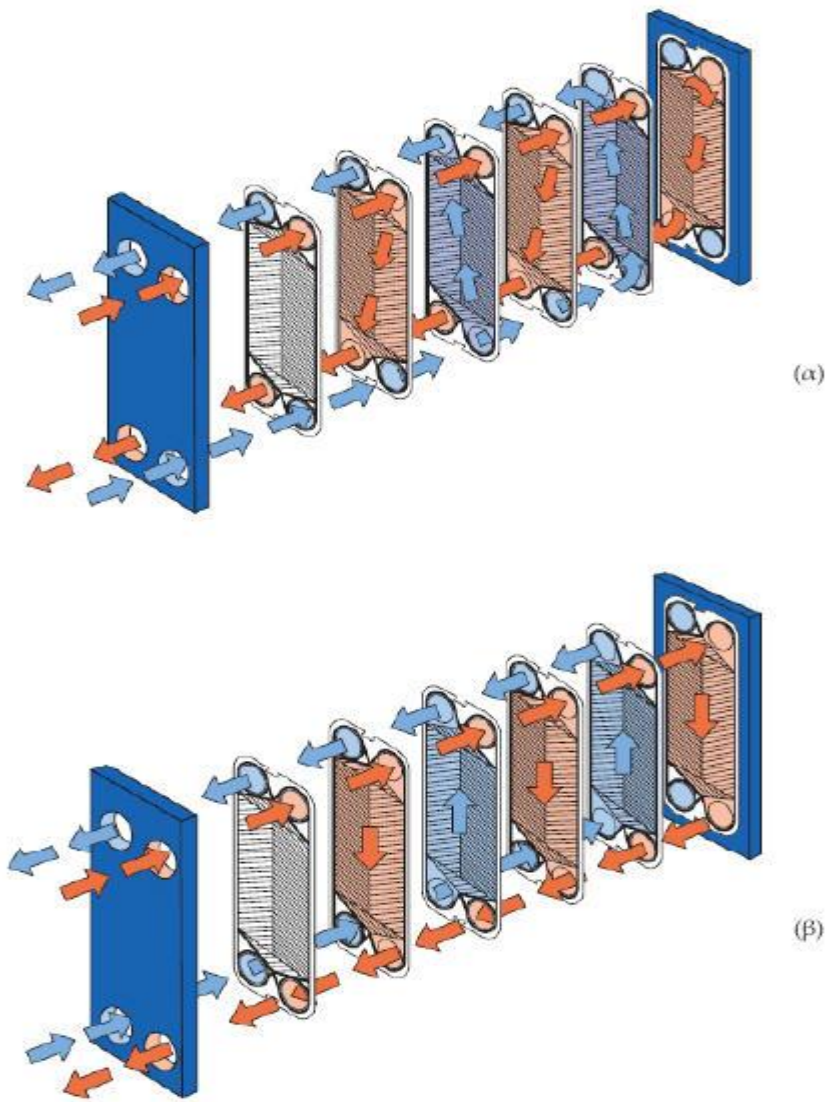
Τα παρεμβύσματα είναι ελαστομερή, συνήθως πάχους 5mm και τυπικά μπορούν να συμπιεστούν κατά 25%. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου οι συνθήκες το απαιτούν, χρησιμοποιούνται είτε διπλά παρεμβύσματα για εφεδρικούς λόγους ώστε να αποφεύγεται διαρροή, είτε οι πλάκες του εναλλάκτη συγκολλούνται όταν πρέπει να ενισχυθεί μηχανικά η σταθερότητα του εναλλάκτη, ειδικά σε περιπτώσεις ροής σε υψηλή πίεση, ή όταν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελαστομερές παρέμβυσμα λόγω υψηλών θερμοκρασιών ή λόγω χρήσης διαβρωτικών ρευστών. Είναι προφανές ωστόσο ότι σε αυτές τις περιπτώσεις η αποσυναρμολόγηση του εναλλάκτη (με σκοπό πχ τον καθαρισμό ή την προσθήκη επιπλέον πλακών) είναι αδύνατη.



Σχήμα 25 Τυπικές πλάκες εναλλάκτη με α) Πτυχώσεις zig-zag, β) Πτυχώσεις τύπου ψαροκόκαλου, γ) Κουλότητες

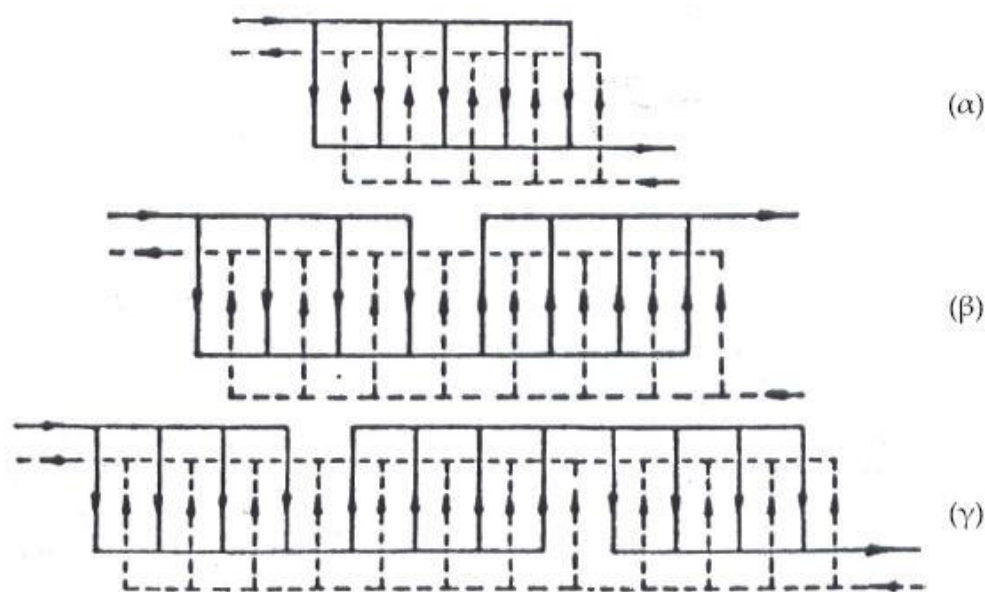
Κάθε πλάκα έχει τέσσερις θύρες ροής, μία σε κάθε γωνία. Κατά την συναρμολόγηση του εναλλάκτη επιλέγεται το κατάλληλο ζεύγος θυρών το οποίο και καθορίζει το πρότυπο ροής και οι θύρες ευθυγραμμίζονται δημιουργώντας δύο δευτερεύοντα κανάλια διανομής της ροής στα επιμέρους κανάλια του εναλλάκτη. Μια τυπική διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 26.

Κάθε κανάλι διανομής συνδέεται με την αντίστοιχη θύρα εισόδου ή εξόδου του ρευστού που βρίσκεται στο πλαίσιο του εναλλάκτη. Κάθε ένα από τα ρευστά εισέρχεται από το αντίστοιχο ακροφύσιο της εισόδου του εναλλάκτη και περνάει είτε παράλληλα είτε σε σειρά από μια ομάδα καναλιών. Ο ρόλος του παρεμβύσματος δεν περιορίζεται στην αποφυγή διαρροών μεταξύ των ρευστών αλλά καθορίζει την σχετική κατεύθυνση ροής των ρευστών στα κανάλια όπως φαίνεται στο σχημα 2 . Τα κανάλια κατηγοριοποιούνται εναλλάξ σε δύο ομάδες, μία για κάθε ρευστό. Στην πρώτη ομάδα καναλιών, τοποθετείται κατάλληλο παρέμβυσμα στις πλάκες που τα συγκροτούν ώστε να επιτρέπει την ροή μόνο μεταξύ δύο συγκεκριμένων θυρών της πλάκας, ενώ στη δεύτερη ομάδα καναλιών επιλέγεται το άλλο ζεύγος θυρών.



Σχήμα 26 Τυπική διάταξη συναρμολόγησης εναλλάκτη πλακών της Alfa-Laval και αναπαράσταση της ροής α) διαγώνια , β) παράλληλη ροή.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, το δευτερεύον κανάλι διανομής επιτρέπει το συνδυασμό της παράλληλης και της σε σειρά διανομής της ροής. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρευστό συγκεντρώνεται και αναδιανέμεται μετά από συγκεκριμένο αριθμό καναλιών του εναλλάκτη, αλλάζοντας φορά διέλευσης. Η χρήση αναδιανομών εκφράζεται με τον αριθμό των διελεύσεων. Για έναν εναλλάκτη δύο ρευστών m - n διελεύσεων, το ρευστό 1 διανέμεται m φορές στα κανάλια του εναλλάκτη ενώ το ρευστό 2 διανέμεται n φορές. Η πιο τυπική επιλογή προτύπου διέλευσης που χρησιμοποιείται είναι η αμφότερη μοναδιαία διέλευση κατ'αντιροή. Η χρήση πολλαπλών διελεύσεων γίνεται όταν οι παροχές των ρευστών διαφέρουν σημαντικά. Τυπικές επιλογές διελεύσεων της ροής παρουσιάζονται στο σχήμα 27.



Σχήμα 27 Τυπικές επιλογές διελεύσεων ροής

Για τον υπολογισμό των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και τριβής ενός εναλλάκτη πλακών έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα δύο τρόποι προσέγγισης.

- Εμπειρικοί συσχετισμοί, οι οποίοι βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα από υπάρχοντες εμπορικούς εναλλάκτες πλακών. Οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με περιορισμένη ακρίβεια και μόνο για εναλλάκτες με διαμόρφωση παρόμοιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- Χρήση κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (*computational fluid dynamics, CFD*) για την προσομείωση των χαρακτηριστικών της ροής μέσα στα κανάλια του εναλλάκτη.

Στην περίπτωση των εμπειρικών συσχετισμών, το εύρος εφαρμογής των προτεινόμενων συσχετισμών είναι περιορισμένο, καθώς η επίδραση των χαρακτηριστικών της διαμόρφωσης σε έναν εναλλάκτη πλακών είναι αρκετά σημαντική και οι εμπειρικές συσχετίσεις που προκύπτουν δεν έχουν γενικευμένη ισχύ. Επομένως η χρήση κώδικα CFD αποτελεί μια λύση για την μελέτη αυτού του είδους των συσκευών, καθώς επιτρέπει τη μελέτη πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων χωρίς την ανάγκη κατασκευής αντίστοιχου αριθμού πειραματικών διατάξεων.

Μελέτες που έχουν προηγηθεί.

Η δημιουργία πτυχώσεων σε πλάκες εναλλάκτη θεωρείται από τις δημοφιλέστερες τεχνικές αύξησης της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό από ερευνητικές ομάδες. Χάρη στην πολυετή εφαρμογή των εναλλακτών πλακών υπάρχει σήμερα μεγάλη ποικιλία κατασκευαστικών προτύπων για τη διαμόρφωση της επιφάνειας της συσκευής.

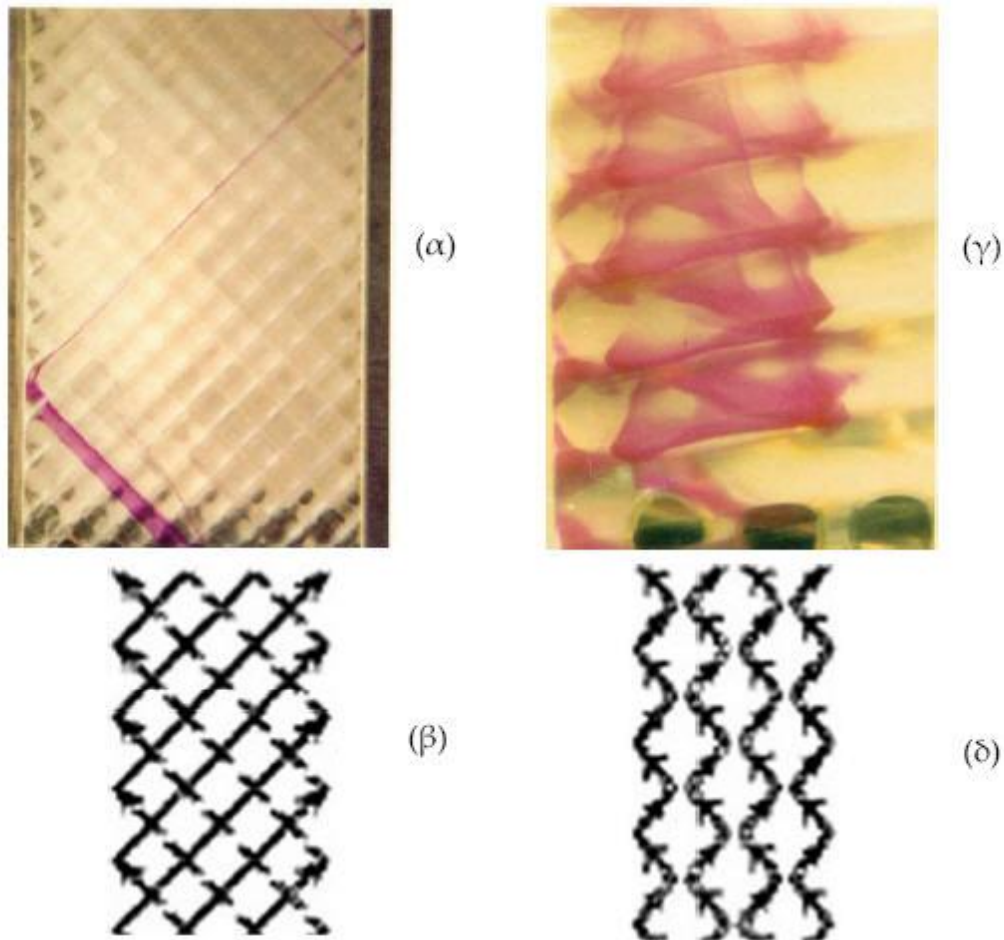
Η μελέτη των εναλλακτών θερμότητας ξεκινά χρονικά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο. Τα συγγράμματα των Kern(1972) και Kays & London (1984) θεωρούνται ακόμα και σήμερα σημαντικά εργαλεία στον τομέα ανάλυσης και σχεδιασμού εναλλακτών θερμότητας.

Ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει επικεντρωθεί στην πειραματική μελέτη της ροής και της μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας αυτού του είδους. Οι μελέτες αφορούν τόσο μονοφασική ροή, όσο και διφασική ροή υγρού-αερίου, και εξετάζουν το πρότυπο ροής μέσα στα στενά κανάλια, καθώς οι τοπικές δομές της ροής επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες μεταφοράς θερμότητας και ορμής. Σε αυτήν την κατεύθυνση, η οπτικοποίηση της ροής μπορεί να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για το πεδίο ταχύτητας και την ύπαρξη ζωνών ανακυκλοφορίας.

Οι συμβατικές μέθοδοι οπτικοποίησης της ροής προκαλούν αναπόφευκτη διαταραχή του ροϊκού πεδίου, ειδικά στα ευαίσθητα τοπικά πρότυπα ροής και επομένως δεν είναι ασφαλής η χρήση τους. Στη γενικότερη έρευνα σχετικά με τα πρότυπα ροής στα κανάλια ενός εναλλάκτη πλακών, οι Focke & Knibbe (1986) διεξήγαγαν πειράματα οπτικοποίησης της ροής μέσα σε πρότυπους εναλλάκτες θερμότητας με χρήση δείκτη αλλαγής του pH και έδειξαν τα είδη της ροής μέσα σε έναν εναλλάκτη πλακών με πτυχώσεις αποδεικνύοντας την ισχυρή επίδραση της γωνίας των πτυχώσεων στο πρότυπο ροής. Η μέθοδος βασίστηκε στη χρήση ηλεκτροδίων τα οποία, με διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, προκαλούν έκλυση υδρογόνου και τροποποιούν την τιμή του pH με αποτέλεσμα την αλλαγή του χρώματος του δείκτη. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε πρότυπο κανάλι εναλλάκτη με πλάκες από ακρυλικό υλικό στο οποίο έχουν κατασκευαστεί πτυχώσεις ημιτονοειδούς σχήματος. Οι Focke & Knibbe παρατήρησαν για πρώτη φορά ότι, ανάλογα με την γωνία των πτυχώσεων, η ροή άλλοτε ακολουθεί τα στενά κανάλια που δημιουργούν οι πτυχώσεις(διασταυρούμενη ροή) και άλλοτε μεταπηδά από κανάλι σε κανάλι ακολουθώντας ένα ελικοειδές πρότυπο (τύπου zig-zag) πάνω από τις πτυχώσεις κατά μήκος της πλάκας. Στον πυθμένα των στενών περασμάτων εμφανίζονται δευτερεύουσες ροές που προκαλούνται από τις πτυχώσεις. Αυτές οι δευτερεύουσες ροές ονομάζονται δίνες Goertler, είναι χαρακτηριστικές σε αυτού του είδους τις γεωμετρίες και παίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα που επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας, καθώς λεπταίνουν το οριακό στρώμα στο χαμηλότερο σημείο των πτυχώσεων.

Το είδος της ροής στα κανάλια του εναλλάκτη αποτελεί ένα σημαντικό θέμα που απασχολεί τους ερευνητές στην περιοχή των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Οι παρατηρήσεις των Shah & Wanniarachchi (1991) για $Re = 100-1500$ οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ροή στους εναλλάκτες πλακών παρουσιάζει χαρακτηριστικά τυρβώδους ροής. Οι ερευνητές αυτοί παρατηρούν επίσης ότι το τυρβώδες γίνεται εντονότερο όταν αυξάνεται η γωνία των πτυχώσεων και αυτό οδηγεί αναπόφευκτα στην αύξηση της πτώσης πίεσης κατά μήκος της πλάκας. Σε παρεμφερή συμπεράσματα καταλήγουν και οι Heggs et al.(1997), καθώς παρατηρούν ότι όσο πλησιέστερα βρίσκεται η γωνία των πτυχώσεων στις 90° , η μετάβαση στη τυρβώδη ροή πλησιάζει στον αριθμό $Re=800$, ενώ παράλληλα συμπαιρνούν ότι η ροή δεν είναι καθαρά στρωτή στο εύρος των τιμών του αριθμού Re που εξέτασαν, το οποίο στηρίζουν στην μέτρηση των τοπικών συντελεστών μεταφοράς. Συγκεκριμένα μετρώντας τον τοπικό συντελεστή μεταφοράς μάζας παρατηρούν ότι η

αύξηση της διατμητικής τάσης στα σημεία επαφής των πλακών οδηγούν στη δημιουργία δευτερευουσών ροών και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι, για τον ίδιο αριθμό Re , η διατμητική τάση επηρεάζεται σημαντικά από την γωνία επαφής των πλακών με πτυχώσεις. Ο Hesselgraves (2001) παρατηρεί επίσης ότι σε κανάλια με διαμόρφωση πολυγωνικών εμποδίων η ροή τείνει να μεταβαίνει αρκετά απότομα από τη στρωτή στη τυρβώδη περιοχή.



Σχήμα 28 Πρότυπο ροής μέσα σε στενό κανάλι με πτυχώσεις: διασταυρούμενη ροή α)πειραματική παρατήρηση β) σχηματική αναπαράσταση και ελικοειδής ροή: γ)πειραματική παρατήρηση δ)σχηματική αναπαράσταση (Focke & Knibbe (1986))

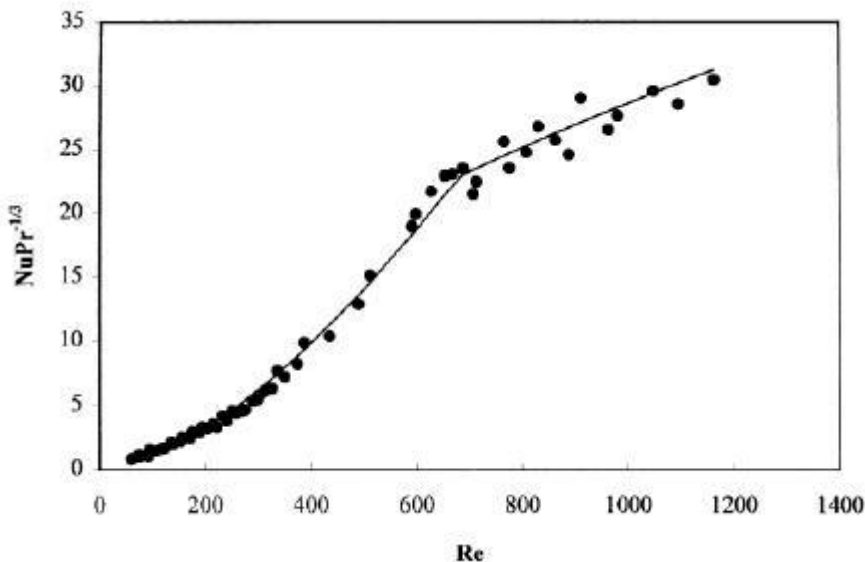
Οι Ciofalo et al.(1998), σε ένα εκτενές άρθρο ανασκόπησης , δηλώνουν ότι στην περιοχή τιμών $Re= 1500-3000$ η ροή αναμένεται να βρίσκεται στη μεταβατική περιοχή, ένα είδος ροής που είναι δύσκολο να προσομοιωθεί με συμβατικά υπολογιστικά μοντέλα τύρβης. Αναφέρεται συγκεκριμένα ότι το κλασικό μοντέλο $k-\epsilon$ παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα για αριθμούς $Re < 2000$, ενώ δεν μπορεί να προσομοιώσει σωστά τις επιδράσεις των άκρων πχ στην είσοδο του καναλιού. Οι συγγραφείς προτείνουν σχέσεις για τον μέσο Nu και τον f :

$$Nu = 7 \left(\frac{Re}{1000} \right)^{\frac{2}{3}} \exp \frac{2\theta - 30^\circ}{45^\circ}$$

$$f = 0.1 \left(\frac{Re}{1000} \right)^{-0.55} \exp \frac{2\theta - 30^\circ}{20^\circ}$$

τις οποίες όμως, παρόλο που επιβεβαιώνονται από τα πειραματικά τους δεδομένα και τις προσομοιώσεις τους, δεν προτείνονται για τον γενικό σχεδιασμό οποιουδήποτε εναλλάκτη.

Οι Vlasogiannis et al. (2002) εξέτασαν έναν εναλλάκτη πλακών με πτυχώσεις της εταιρείας Alfa-Laval, τόσο σε μονοφασική όσο και σε διφασική ροή, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η ροή είναι τυρβώδης για $Re > 650$. Το συμπέρασμα αυτό στηρίζεται από την αλλαγή κλίσης στην καμπύλη συσχέτισης του $NuPr^{-1/3}$ με τον Re .



Σχήμα 29 Πειραματικά δεδομένα και συσχέτιση για μονοφασική ροή στον εναλλάκτη A-01 της Alfa-Laval. (Vlasogiannis et al. (2002))

Παράλληλα με τις πειραματικές προσεγγίσεις, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλος αριθμός μελετών που χρησιμοποιούν καθαρά υπολογιστικές μεθόδους για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής. Η άνθιση του χώρου των αριθμητικών προσομοιώσεων για την μελέτη των καναλιών με διαμορφωμένη επιφάνεια ήρθε ως αποτέλεσμα της ολοένα και αυξανόμενης υπολογιστικής ισχύος η οποία είναι διαθέσιμη στους ερευνητές με πολύ μικρό κόστος. Η ροή μέσα στα στενά διαμορφωμένα κανάλια παρουσιάζει έντονη πολυπλοκότητα και επομένως η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης είναι σημαντική. Οι περισσότερες μελέτες που έγιναν μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιούν το μοντέλο προσομοίωσης $k-\epsilon$, το οποίο βασίζεται στις εξισώσεις υπολογισμού της τυρβώδους ενέργειας (*turbulence energy, k*) και του ρυθμού σκέδαδής της (*dissipation rate, \epsilon*).

Υπάρχουν δύο βασικές τάσεις σχετικά με την προσομοίωση της ροής: η προσομοίωση ενός επαναλαμβανόμενου μοναδιαίου τμήματος ενός καναλιού, ή η πλήρης προσομοίωση της διάταξης ροής. Η προσέγγιση του επαναλαμβανόμενου μοναδιαίου τμήματος προτιμάται καθώς οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο υπολογισμών είναι πολύ χαμηλότερες σε σχέση με μια πλήρη προσομοίωση. Μια κοινή πρακτική είναι η προσομοίωση "αντιπροσωπευτικών στοιχειωδών μονάδων", όπως για παράδειγμα η ροή μέσα σε ένα κελί όπως αυτό δημιουργείται μεταξύ τεσσάρων σημείων επαφών ενός καναλιού εναλλάκτη με τις δύο πλάκες του σε επαφή μεταξύ τους.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για το μοναδιαίο κελί ανάγονται για όλο το κανάλι. Ωστόσο η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων δεν είναι γενικά αποδεκτή. Η άλλη μέθοδος, δηλαδή η χρήση ολόκληρου του καναλιού με διαμορφωμένη επιφάνεια ως πεδίο επίλυσης με κώδικα CFD απαιτεί υπολογιστική ισχύ, μνήμη και χρόνο επίλυσης.

CFD ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε σημαντική συνεισφορά στη μελέτη των εναλλακτών πλακών με διαμορφωμένη επιφάνεια έχει γίνει από ερευνητικές ομάδες οι οποίες προσεγγίζουν μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων τη ροή μέσα στα κανάλια με χρήση κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής CFD. Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια μελέτη ενός πλήρους καναλιού ενός εναλλάκτη με χρήση κώδικα CFD.

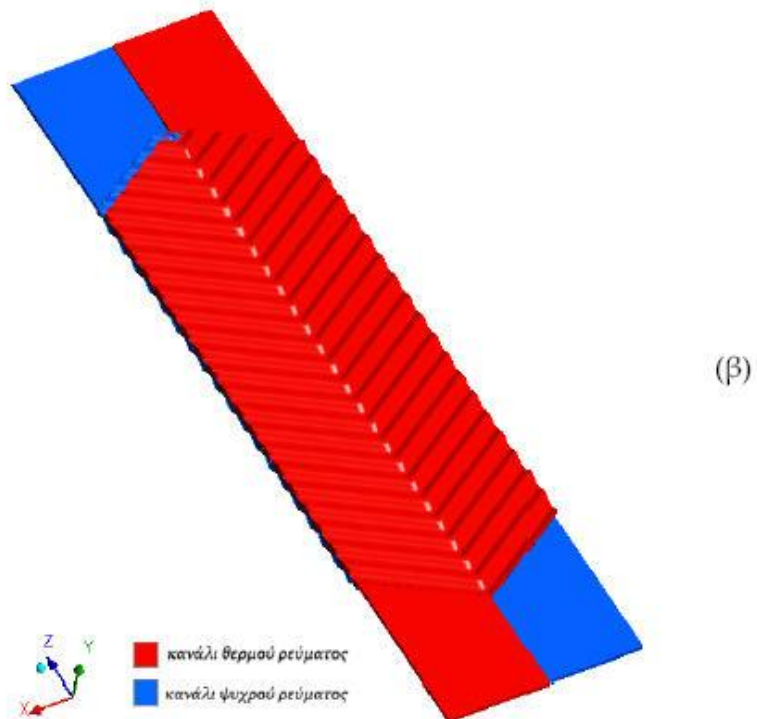
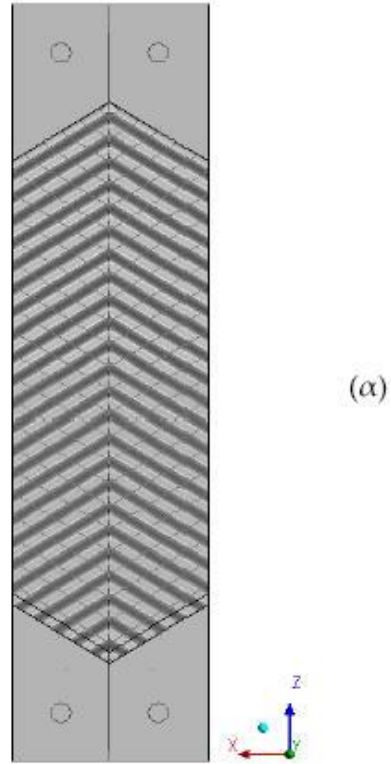
Για τον ορισμό του αριθμού Re πρέπει να υπολογιστεί η υδραυλική διάμετρος, D_h η οποία είναι:

$$D_h = \frac{2\omega b_c}{\omega + b_c} \cong 2b_c$$

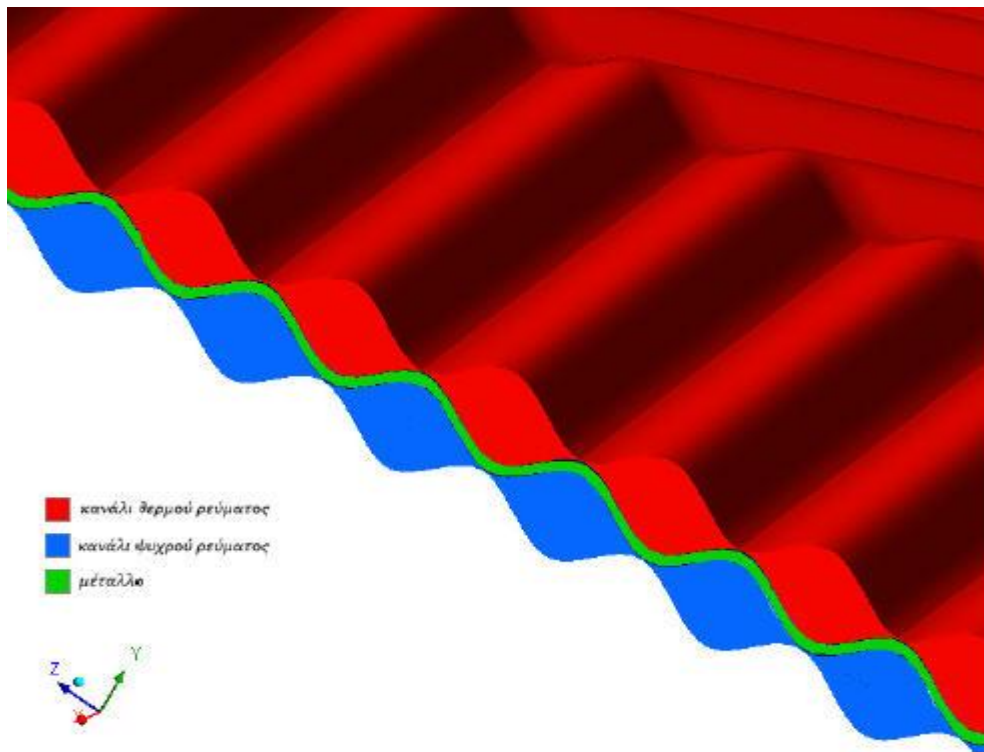
όπου ω είναι το πλάτος του καναλιού και b_c το μέσο ύψος του καναλιού (το οποίο ταυτίζεται με το ύψος μιας πτύχωσης). Καθώς το b_c είναι πολύ μικρότερο σε αυτήν την συγκεκριμένη εφαρμογή, η σχέση απλοποιείται και η υδραυλική διάμετρος μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με το διπλάσιο του ύψους της πτύχωσης.

Το πείραμα διεξήχθη για τιμές του Re στην περιοχή 1000-2300 και με χρήση νερού του δικτύου ύδρευσης. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής αριθμών Re γίνεται ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία του επιλεγμένου μοντέλου τύρβης σε μια περιοχή ροής που θεωρείται ότι προκαλείται μετάβαση από την στρωτή στην τυρβώδη ροή. Στην είσοδο της διάταξης τροφοδοτείται θερμό νερό σταθερής θερμοκρασίας 40 °C, ενώ για το ψυχρό ρεύμα χρησιμοποιήθηκε νερό το οποίο μετρήθηκε ότι βρισκόταν σε θερμοκρασία 18 °C. Προκειμένου να ληφθούν εικόνες της εκτεθειμένης μεταλλικής πλάκας χρησιμοποιείται θερμογραφική κάμερα.

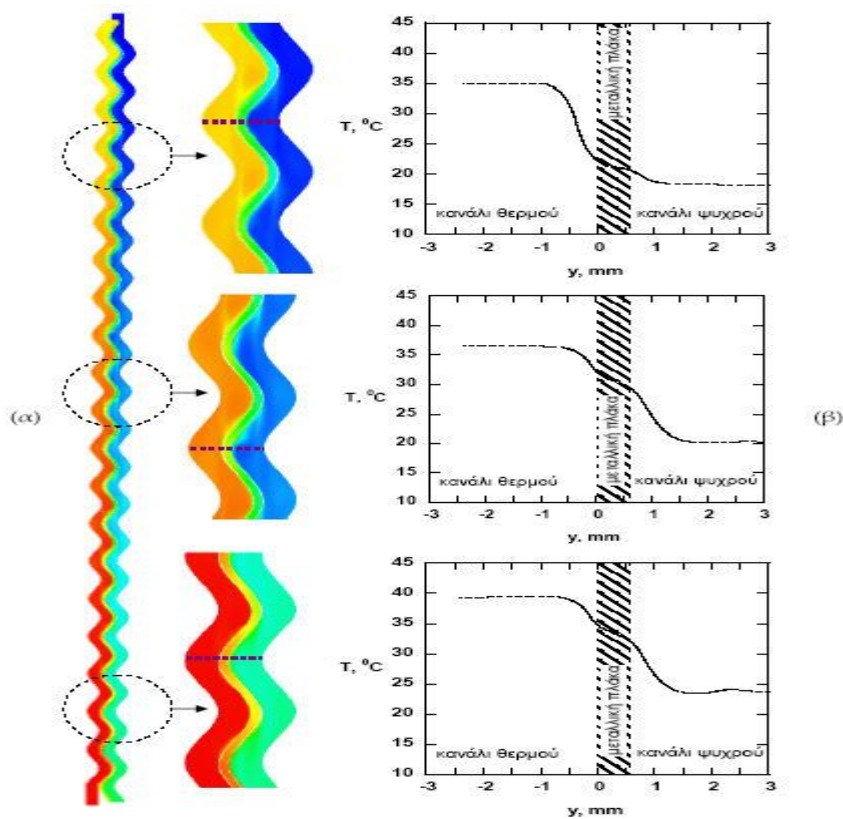
Για την υπολογιστική προσομείωση του διπλού καναλιού κατασκευάστηκαν τρία πλέγματα τα οποία αναπαριστούν τα δύο κανάλια ροής και την αναμεταξύ τους μεταλλική πλάκα. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στα κανάλια ροής στην περίπτωση των τραπεζοειδών πτυχώσεων είναι μη-δομημένο τετραεδρικό, ενώ κοντά στα τοιχώματα έχουν προστεθεί μια σειρά πρισματικών στοιχείων για την καλύτερη προσομείωση του οριακού στρώματος. Αντίστοιχα, για την περίπτωση των ημιτονοειδών πτυχώσεων και της μεταλλικής πλάκας χρησιμοποιήθηκε δομημένο εξαεδρικό πλέγμα. Σε κάθε περίπτωση εξετάστηκε επισταμένα η επίδραση της πυκνότητας του πλέγματος στην τελική λύση, ελέγχοντας τις θερμοκρασίες εξόδου των ρευμάτων και την ταχύτητα σε κάποια σημεία της γεωμετρίας. Τα δύο απομονωμένα κανάλια ροής ορίστηκαν ότι ακολουθούν αντιρροή διαγώνιας διευθέτησης (*counter-current diagonal flow*). Οι θερμοκρασίες εισόδου και η παροχή κάθε ρεύματος τέθηκαν ως οριακές συνθήκες, ενώ η έξοδος κάθε καναλιού θεωρείται ότι βρίσκεται σε ατμοσφαιρική πίεση.



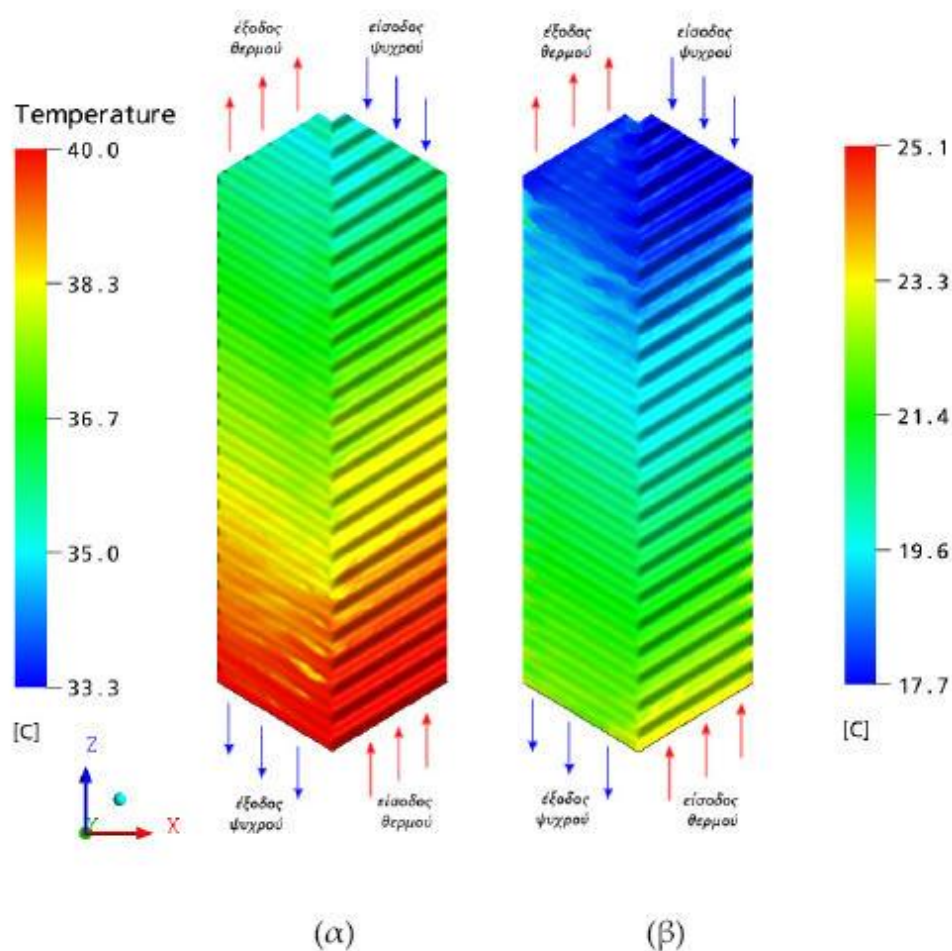
Σχήμα 30 Υπολογιστικό μοντέλο που αντιστοιχεί στη διάταξη διπλού καναλιού εναλλάκτη
 α) προβολή από πάνω β) προβολή από πλάγια



Σχήμα 31 Προβολή τμήματος του υπολογιστικού μοντέλου υπό γωνία

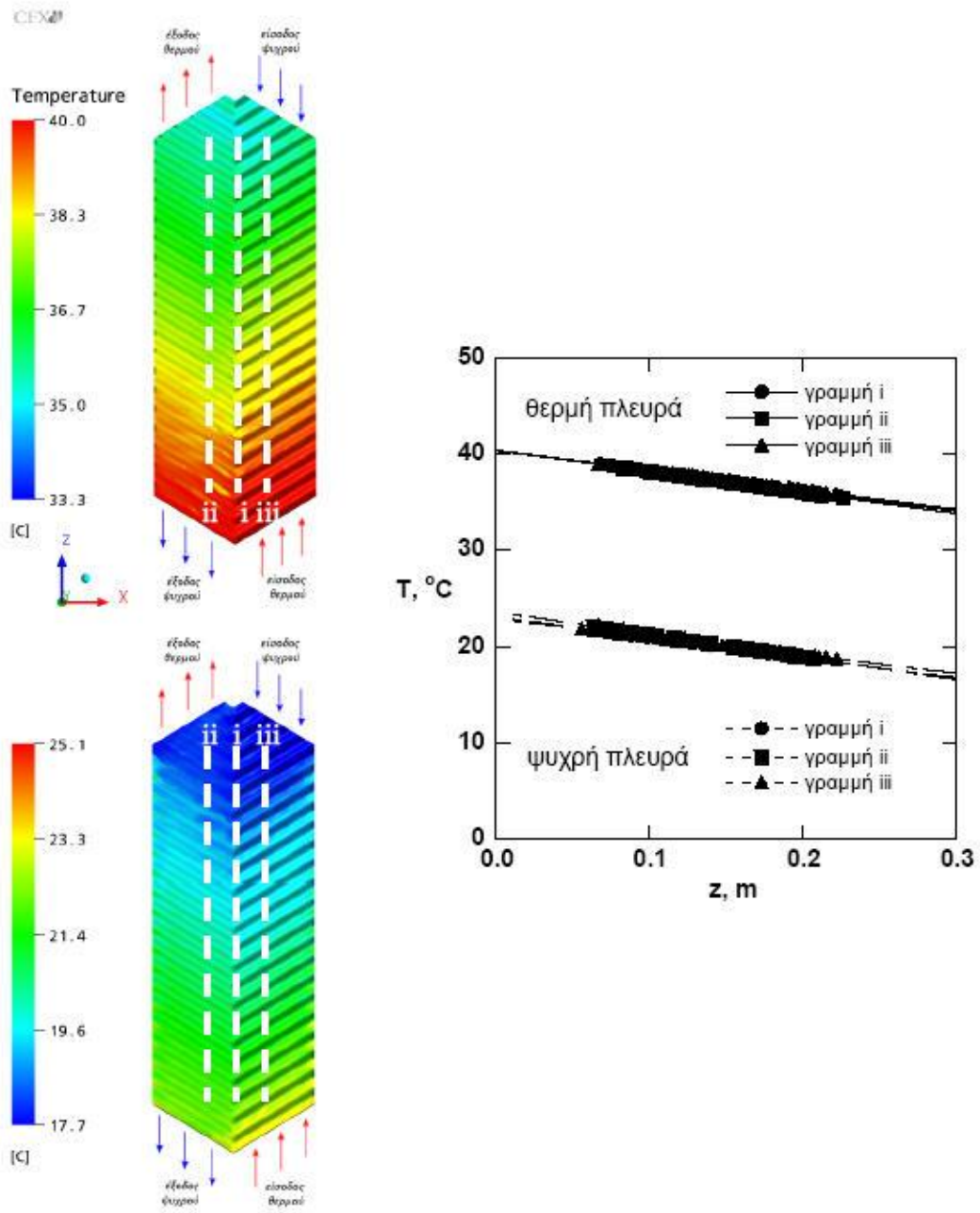


Σχήμα 32 Τυπικές κατανομές θερμοκρασίας α)επίπεδο xz β) κατά μήκος του άξονα y σε διάφορες θέσεις του επιπέδου xz



Σχήμα 33 Τυπικές κατανομές θερμοκρασιών από τα αποτελέσματα του κώδικα CFD: εξωτερική πλευρά καναλιού α) θερμού ρεύματος, $Re = 1500$ β) ψυχρού ρεύματος, $Re = 1000$

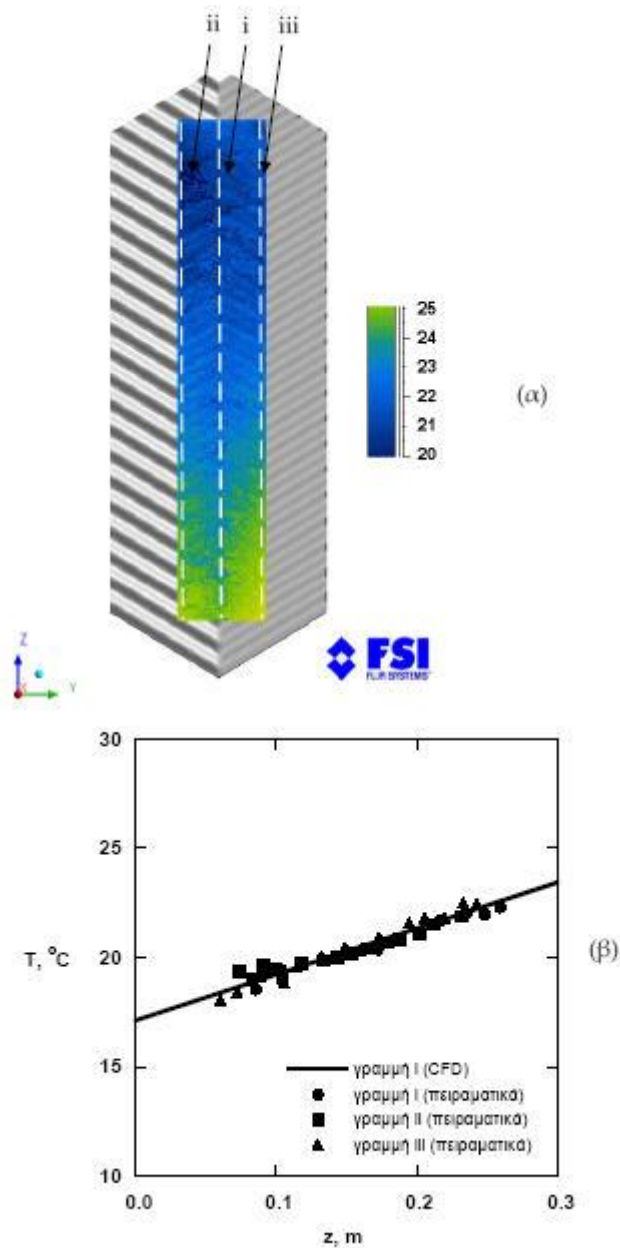
Στο παραπάνω σχήμα 33 παρουσιάζονται τυπικές κατανομές θερμοκρασίας πάνω στην εξωτερική επιφάνεια κάθε καναλιού τα οποία λαμβάνονται μέσω του κώδικα CFD. Παρατηρείται ότι κατά μήκος του άξονα x , οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι πολύ μικρές. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται στο παρακάτω σχήμα 34 στο οποίο παρουσιάζονται οι θερμοκρασιακές κατανομές κατά μήκος τριών παράλληλων γραμμών στη διεύθυνση z τόσο για το κανάλι θερμού ρεύματος όσο και για το κανάλι ψυχρού ρεύματος. Καθώς οι θερμοκρασιακές κατανομές για τις τρεις γραμμές πρακτικά ταυτίζονται, αποδεικνύεται ότι η θερμοκρασία αλλάζει ομοιόμορφα, χωρίς την δημιουργία θερμότερων ή ψυχρότερων περιοχών σε περιοχές της πλάκας. Η ομοιομορφία αυτή οφείλεται στη χρήση διαγώνιας ροής εντός του καναλιού, αλλά και στην αποτελεσματική διανομή της ροής μέσα στο στενό κανάλι χάρη στην ύπαρξη των πτυχώσεων.



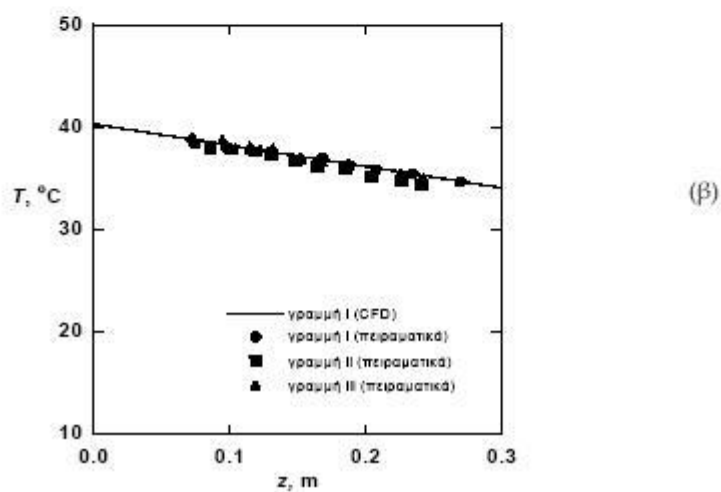
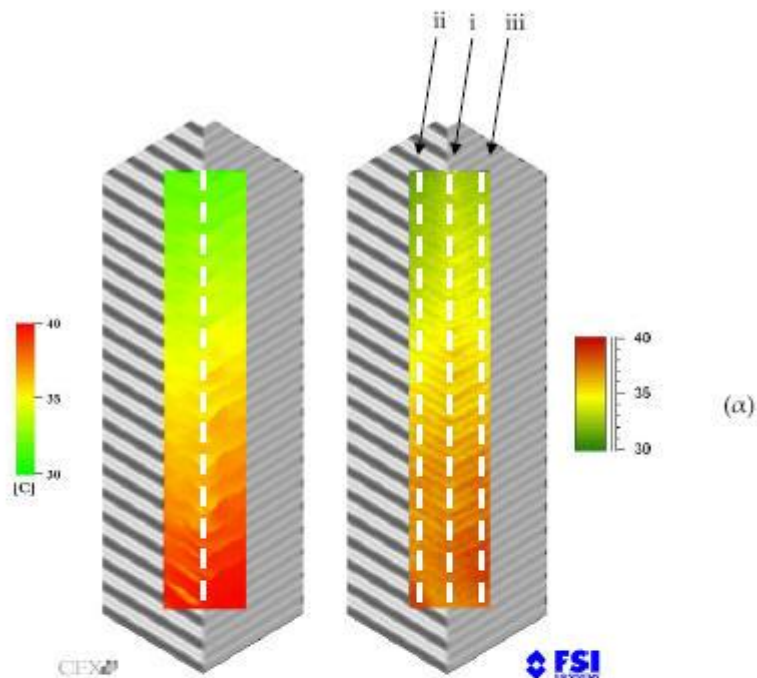
Σχήμα 34 Θερμοκρασιακές κατανομές κατά μήκος τριών παράλληλων γραμμών κατά την z-διεύθυνση.

Τα αποτελέσματα του κώδικα CFD συγκρίνονται με τις μετρήσεις της θερμογραφικής κάμερας και αποδεικνύεται ότι η θερμοκρασιακή κατανομή μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια από τον κώδικα.

Στο σχήμα 35 παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή κατανομή μέσα από ένα “παράθυρο” που έχει δημιουργηθεί καθώς το περίβλημα του εναλλάκτη είναι θερμικά μονωμένο.

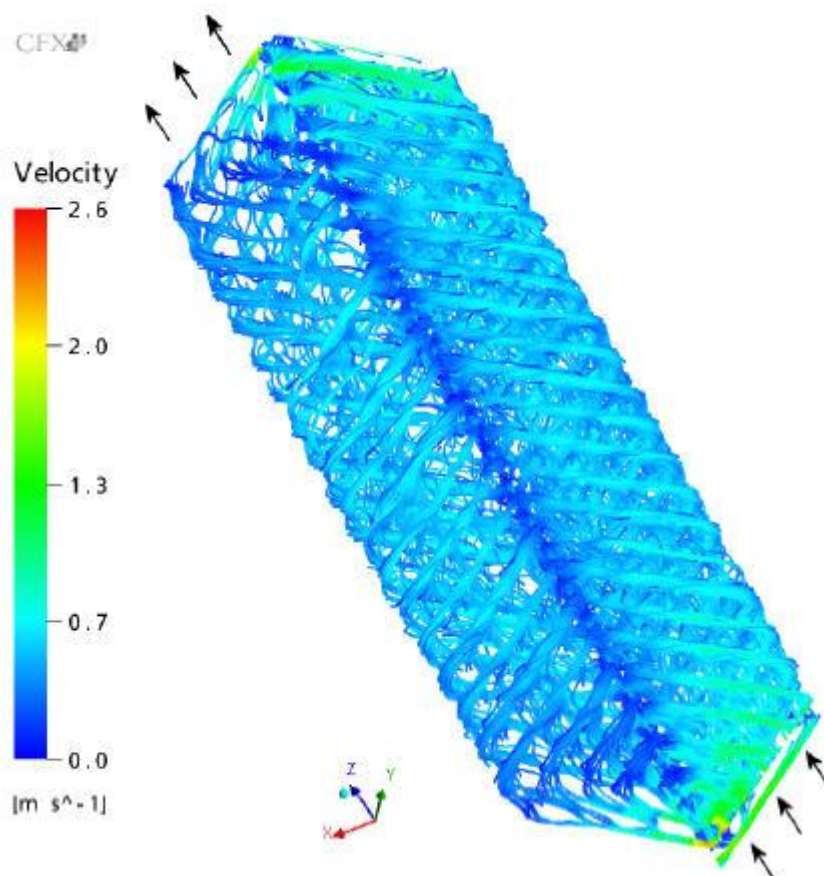


Σχήμα 35 Θερμοκρασιακή μεταβολή κατά μήκος της πλάκας για $Re_c=1000$ και $Re_h = 1500$
 α) τυπικό θερμογράφημα για το ψυχρό ρεύμα β) κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος παράλληλων γραμμών στην διεύθυνσή z



Σχήμα 36 Θερμοκρασιακή μεταβολή κατά μήκος της πλάκας για $Re_c=1000$ και $Re_h = 1500$ με χρήση CFD και θερμογραφίας α) τυπικό θερμογράφημα για το θερμό ρεύμα β) κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος παράλληλων γραμμών στην διεύθυνσή z

Στο σχήμα 37 παρουσιάζεται ένα τυπικό γράφημα ροϊκών γραμμών μέσα σε ένα κανάλι ροής, όπως υπολογίζεται από τον κώδικα CFD για $Re=1000$. Παρατηρείται ότι η ροή ακολουθεί κατά μεγάλο μέρος της τα στενά κανάλια που δημιουργούνται μεταξύ των πτυχώσεων κατά το πρότυπο της διασταυρούμενης ροής ενώ ένα μικρό μέρος της ακολουθεί την κατά μήκος ελικοειδή ροή. Αυτό οφείλεται στην γωνία των πτυχώσεων.



Σχήμα 37 Τυπικές ροϊκές γραμμές εντός ενός καναλιού ροής. $Re=1000$

Έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφία ότι το σχήμα των πτυχώσεων σε έναν εναλλάκτη πλακών με πτυχώσεις επιδρά στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και στον συντελεστή τριβής. Οι Sparrow & Hossfeld επίσης σημειώνουν ότι ακόμα και μικρές αλλαγές στην αμβλύτητα των πτυχώσεων μπορούν να επιφέρουν αλλαγές στο αριθμό Nu ως και 18%.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η απόδοση του εναλλάκτη πλακών:

- Μεγιστοποιείται όταν οι πλάκες του εναλλάκτη βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους και για μεγάλο λόγο ύψους προς πλάτος πτύχωσης, ενώ επίσης
- Βελτιώνεται για χαμηλές τιμές του λόγου διαστάσεων του καναλιού και για υψηλότερες τιμές της γωνίας των πτυχώσεων, όταν αυξάνεται ο αριθμός Re .

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός εναλλάκτη πλακών επιτυγχάνεται όταν ενισχύεται η δημιουργία δευτερεύουσας ροής στο κανάλι του εναλλάκτη[11].

Έρευνα για την μεταφορά θερμότητας και την πτώση πίεσης στους εναλλάκτες πλακών έχοντας διαφορετικά προφίλ επιφανειών.

Μια σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση του εναλλάκτη θερμότητας είναι οι μορφές των αυλακώσεων πάνω στην επιφάνεια του. Η ενεργειακή ανάλυση και η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελούν πολύ σημαντικές παραμέτρους στον σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας. Παρακάτω μελετώνται πειραματικά και συγκρίνονται οι επιδράσεις διάφορων τύπων επιφανειακών γεωμετριών στους πλακοειδείς εναλλάκτες στην μεταφορά θερμότητας, στο φαινόμενο τύρβης και στις ενεργειακές απώλειες. Εκτός από την πλέον διαδεδομένη επιφάνεια όπου οι αυλακώσεις σχηματίζουν σχήμα 'V' έχουμε άλλους δύο τύπους, τις οριζόντιες αυλακώσεις και τους αστερίσκους όπως φαίνονται στο σχήμα. Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε για συνθήκες στρωτής ροής με τον αριθμό Reynolds να βρίσκεται στα όρια $50 < Re < 1000$ και τον αριθμό Prandtl για $3 < Pr < 7$. Οι πλάκες κατασκευάστηκαν πρεσσάροντας ανοξείδωτο χάλυβα με ειδικές φόρμες οι οποίες φτιάχτηκαν σε CNC.

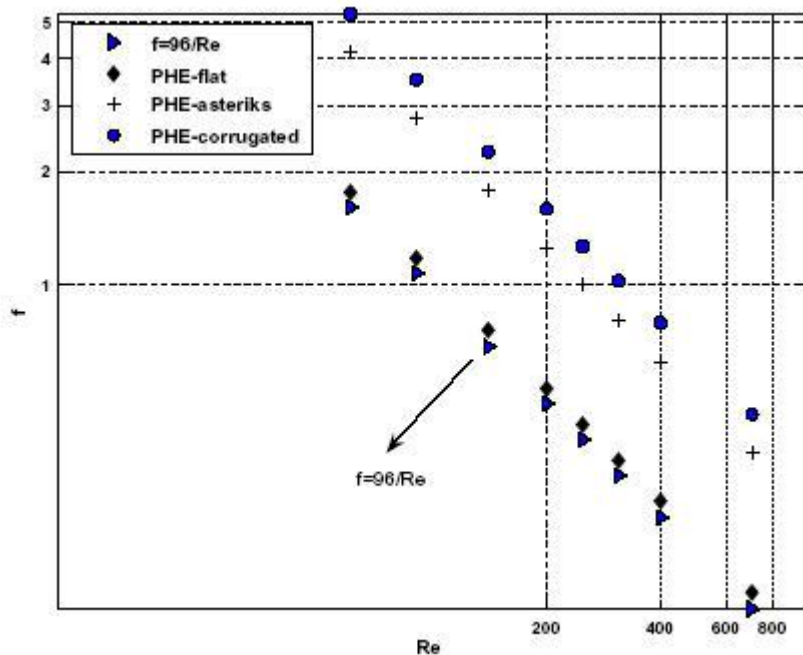
Το θερμικό φορτίο αν δεν ληφθούν υπόψη απώλειες θερμότητας θεωρώντας ότι τα ρευστά που μελετούμαι δεν αλλάζουν φάση και είναι σε σταθερή πίεση τότε :

$$Q = (\dot{m}C_p)_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = (\dot{m}C_p)_c (T_{c,i} - T_{c,o})$$



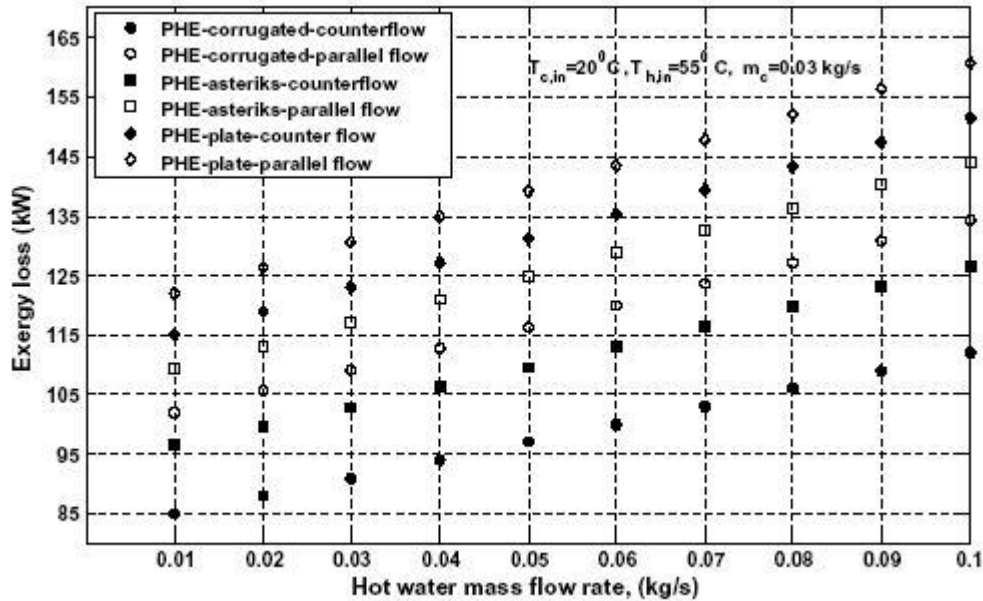
Σχήμα 38 Πλάκες εναλλάκτη θερμότητας με αστερίσκους και οριζόντιες αυλακώσεις .

Τα αποτελέσματα του πειράματος μας δείχνουν ότι ο εναλλάκτης θερμότητας με αστερίσκους παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλεονέκτημα όσον αφορά την μεταφορά θερμότητας.



Σχήμα 39 Πτώση πίεσης σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds για διάφορα προφίλ επιφανειών.

Όπως παρατηρούμε και στο παραπάνω σχήμα η πτώση πίεσης στους τύπους των οριζόντιων αυλακώσεων και του αστερίσκου είναι μεγαλύτερες 2,5 με 3,5 φορές από αυτήν στους εναλλάκτες με 'V' αυλακώσεις. Επίσης υπάρχουν τριών ειδών ενεργειακές απώλειες στο εναλλάκτη: απώλειες λόγω ανταλλαγής θερμότητας πέρα από μια πεπερασμένη διαφορά θερμοκρασίας, την τριβή των ρευστών και την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον την οποία όμως αμελούμε συνήθως γιατί η εξωτερική επιφάνεια των εναλλακτών είναι καλά μονωμένη. Οι ενεργειακές απώλειες έχουν σημαντική επίδραση στην αποδοτικότητα της μεταφοράς θερμότητας και από το πείραμα φαίνεται ότι οι ενεργειακές απώλειες στον οριζόντιου τύπου αυλακώσεων είναι πολύ μικρότερες από ότι στους άλλους τύπους.



Σχήμα 40 Ενεργειακές απώλειες για διάφορους τύπους πλακών.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι εναλλάκτες θερμότητας με οριζόντιου τύπου αυλακώσεις επιτυγχάνουν καλή μεταφορά θερμότητας αλλά και μεγάλη πτώση πίεσης. Η πτώση πίεσης έχει σημαντική επίδραση στο αρχικό κόστος του εναλλάκτη. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να προβλεφθεί μια βέλτιστη θερμοδυναμικά λύση η οποία βρίσκεται κάπου στην μέση μεταφοράς θερμότητας- πτώσης πίεσης και βλέπουμε ότι προτιμάται κατα κύριο λόγο ο εναλλάκτης με αυλακώσεις σε σχήμα 'V' στους πλακοειδείς εναλλάκτες. Πρέπει τέλος να πούμε ότι η πτώση πίεσης δεν έχει την ίδια σημαντικότητα με την αποδοτικότητα του εναλλάκτη και αυτό γιατί με αυξανόμενη την αποδοτικότητα του εναλλάκτη μειώνονται οι διαστάσεις του με αποτέλεσμα να μειωθεί το κόστος κατασκευής σημαντικά σε σχέση με το κόστος που προβλέπεται για την αύξηση της πτώσης πίεσης [13].

Ένα μονοδιάστατο μοντέλο υπολογισμού της μεταφοράς θερμότητας σε έναν πλακοειδή εναλλάκτη χρησιμοποιώντας κατάλληλες συσχετίσεις για τον αριθμό Nusselt και τον συντελεστή τριβής χρησιμοποιήθηκε για να απεικονίσει την επίδραση της διάχυσης και της εξάρτησης του ιξώδους του ρευστού από την θερμοκρασία στα προφίλ θερμοκρασιών των ρευστών και στην αποτελεσματικότητα του εναλλάκτη πλακών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτές οι επιδράσεις μπορούν να παραμεληθούν αν το ιξώδες και των δύο ρευστών του εναλλάκτη είναι χαμηλό όπως είναι του νερού για παράδειγμα. Αντιθέτως, αν ένα από τα δύο ρευστά είναι παχύρευστο (π.χ γλυκερόλη) τότε το να αμελήσουμε τον όρο της διάχυσης θα μας οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα [14].

1.10 Το κόστος της γεωθερμίας

Για κάθε γεωθερμική εφαρμογή είναι σημαντικό να προσδιοριστεί πόση ενέργεια μπορεί να παραχθεί και ποιο θα είναι το κόστος αυτής της ενέργειας. Το κόστος της παραγόμενης ενέργειας είναι τις περισσότερες φορές ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή ή όχι μιας τεχνολογίας και για την υλοποίηση ή όχι μιας γεωθερμικής εφαρμογής. Επομένως η αξιόπιστη κοστολόγηση ενός γεωθερμικού σχεδίου είναι απαραίτητη προϋπόθεση και κρίσιμο σημείο στην απόφαση για την υλοποίηση του. Παρόλα αυτά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η οικονομικότητα μιας τεχνολογίας δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας υιοθέτησής της, δεδομένου ότι υπεισέρχονται και άλλες σημαντικές συνιστώσες όπως εθνικές, αναπτυξιακές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές ενός ενεργειακού σχεδίου που θα μπορούσαν να αντιστρέψουν μια απόφαση βασισμένη σε αυστηρά οικονομικά κριτήρια.

Ο ευκολότερος τρόπος για να εκφραστεί το κόστος ενός γεωθερμικού σχεδίου είναι η τιμή της παραγόμενης θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας ανά κιλοβατώρα (€/kWh). Άλλη έκφραση είναι το κόστος σε ευρώ ανά kW εγκατεστημένου ισχύος και η περίοδος αποπληρωμής, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Για πολλές ενεργειακές επενδύσεις η περίοδος αποπληρωμής συνιστά ένα ικανοποιητικό κριτήριο, στο οποίο μπορεί να βασιστεί μια οικονομική απόφαση. Για παράδειγμα έχουμε μια γεωθερμική μονάδα ισχύος 200 kW για την παραγωγή θερμικής ενέργειας (θέρμανση θερμοκηπίου). Αν το συνολικό πάγιο κόστος (δηλαδή το κόστος για την έρευνα και την άδεια εκμετάλλευσης, τη γεώτρηση, τη μεταφορά των ρευστών, την εναλλαγή θερμότητας, τη διάθεση ρευστών κτλ.) για τη μονάδα ανέρχεται σε 150000 €, το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας είναι 3000 €, η μονάδα λειτουργεί έξι μήνες τον χρόνο και η διάρκεια ζωής της είναι 10 χρόνια τότε το κόστος της θερμικής κιλοβατώρας είναι:

$$\text{Ετήσιο κόστος} = 150.000/10 + 3000 = 18.000 \text{ €}$$

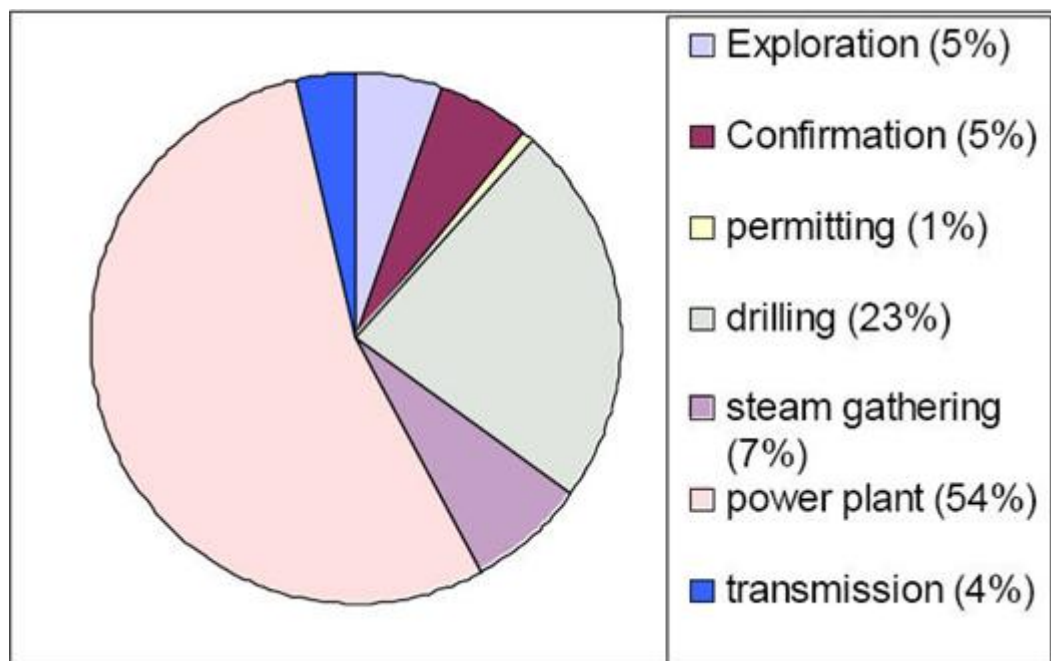
$$\text{Παραγόμενη ενέργεια} = 200 \text{ kW} \times 6 \times 30 \times 24 = 864.000 \text{ kWh}$$

$$\text{Κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα} = 18.000/864.000 = 2,1 \text{ λεπτά/kWh}$$

Οι δαπάνες μπορούν να διαχωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Το κόστος αγοράς της γης και προετοιμασίας του οικοπέδου
- Το κόστος της διάτρησης και κατασκευής της γεώτρησης, από την επιφάνεια μέχρι τον ταμιευτήρα. Αποτελεί το κυριότερο κόστος ενός γεωθερμικού σχεδίου.
- Το κόστος κατασκευής της μονάδας παραγωγής της ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, το μέγεθος της μονάδας, τον σχεδιασμό της, τον συντελεστή λειτουργίας κτλ. Το κόστος αυτό αναφέρεται στους εναλλάκτες θερμότητας, στους αγωγούς μεταφοράς των ρευστών.

- Το κόστος που αφορά στη διάθεση των ρευστών [7].



Σχήμα 41 . Τυπικό κόστος των επιμέρους λειτουργιών.

Κόστος γεώτρησης

Το κόστος γεώτρησης σύμφωνα με μια έρευνα [15] δίδεται από τον τύπο:

Κόστος γεώτρησης = $240,785 + 210 \times (\text{βάθος σε πόδια(feet)}) + 0.019069 \times (\text{βάθος σε πόδια})$.

Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες και τη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, το κόστος γεωθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ποικίλει μεταξύ 1000 και 2000 € / kW(e), με τυπικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας γύρω στο 2-3%. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία ανέρχεται σε 0,038-0,092 €/kWh(e), συμπεριλαμβανομένων των αποσβέσεων των κεφαλαίων και του κόστους χρήματος. Βλέπουμε ότι η γεωθερμία ανταγωνίζεται επιτυχώς την παραγωγή ηλεκτρισμού από την καύση πετρελαίου ντίζελ.

2. Kalina cycle

2.1 Εισαγωγή

Ο κύκλος Kalina ονομάστηκε έτσι από τον άνθρωπο που τον εφηύρε το 1983, Alexander Kalina. Είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος ο οποίος μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια και βελτιστοποιείται όταν γίνεται χρήση πηγών θερμότητας με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Ο κύκλος χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο ένα μίγμα δύο συστατικών (κυρίως αμμωνίας-νερού) και ο λόγος των δύο συστατικών ποικίλει για κάθε κομμάτι του κύκλου με σκοπο να επιτύχει την καλύτερη αποδοτικότητα του κύκλου.

2.2 Πλεονεκτήματα μίγματος αμμωνίας-νερού

- Η χρησιμοποίηση σαν εργαζόμενο μέσο την αμμωνία η οποία έχει χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης σε σχέση με το νερό (αμμωνία:-33°C, νερό:100°C) επιτρέπει την εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας για παραγωγή ατμού ή οποία σε άλλη περίπτωση δεν θα ήταν εκμεταλεύσιμη.
- Για εργαζόμενα μέσα με χαμηλό σημείο βρασμού η πίεση εισόδου στον στρόβιλο μπορεί να είναι υψηλότερη και η παροχή μάζας μικρότερη γεγονός που επηρεάζει θετικά στην μείωση του κόστους.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμβατικοί στρόβιλοι ατμού.
- Η αμμωνία είναι εύκολα διαθέσιμη και φθηνή.
- Δεν αφαιρεί όζον από την ατμόσφαιρα και συνεπώς δεν συνεισφέρει στην παγκόσμια αύξηση του πλανήτη.

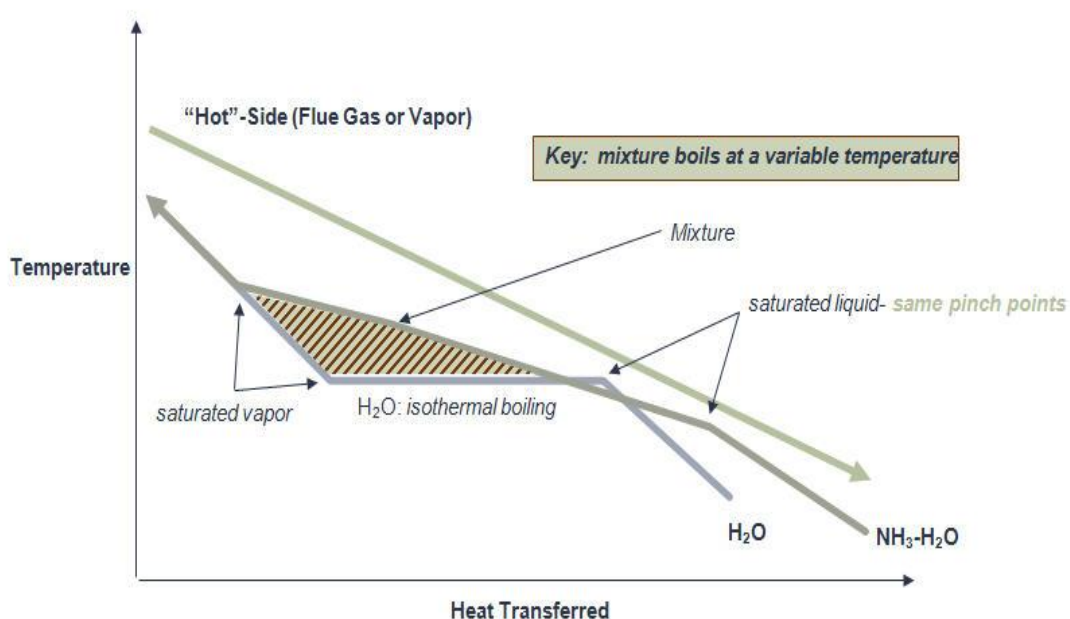
Για τον σχεδιασμό του κύκλου Kalina πρέπει να βρεθεί μια βέλτιστη τομή ανάμεσα στην επιφάνεια των εναλλακτών και στην παραγόμενη ενέργεια. Αυτή θα επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους όπως το επίπεδο της θερμοκρασίας στον συμπυκνωτή, το περιεχόμενο της αμμωνίας στο διφασικό μίγμα, η πίεση εισόδου στον στρόβιλο και η θερμοκρασία της πηγής. Η θερμοκρασία του νερού ψύξης αλλάζει κατά την διάρκεια του χρόνου. Δεν είναι πρακτικό να αλλάζουμε το ποσοστό αμμωνίας-νερού στο μίγμα για κάθε διαφορετική θερμοκρασία του νερού ψύξης. Για τον σχεδιασμό του κύκλου ένας σταθερός λόγος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σημείο εκκίνησης και κατά την λειτουργία ο λόγος του μίγματος μπορεί να κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών για την βελτιστοποίηση του κύκλου.

2.3 Πλεονεκτήματα Kalina

Ο κύκλος Kalina αποτελεί μια επαναστατική τεχνολογία η οποία παρέχει υψηλότερα επίπεδα απόδοσης τα οποία είναι αδύνατο να φθάσουν οι υπάρχοντες συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ατμού και τα πλεονεκτήματά του είναι τα εξής:

- Μειώνει το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας αυξάνοντας την απόδοση των συστημάτων.
- Μειώνει κατά πολύ τις εκπομπές ρύπων
- Έχει κάνει την γεωθερμική ενέργεια πιο ανταγωνιστική από ποτέ απέναντι σε άλλες τεχνολογίες συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Χαμηλό κόστος παραγωγής, χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- Δεν απαιτείται βελτίωση των τεχνολογιών του συστήματος (στρόβιλοι, εναλλάκτες, κλπ)
- Ελευθερία προσαρμογής σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας αλλάζοντας την σύσταση του μίγματος αμμωνίας-νερού και συνεπώς όλων των συνιστωσών του κύκλου.
- Αρχικό κόστος κατασκευής μικρότερο από αυτό του κύκλου Rankine

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα του κύκλου Kalina έναντι του κύκλου Rankine βρίσκεται στο γεγονός ότι η ατμοποίηση του μίγματος δεν γίνεται με σταθερή θερμοκρασία αλλά με μεταβλητή. Παρακάτω φαίνεται το προφίλ θερμοκρασιών ξεχωριστά για το νερό (H_2O) και για το μίγμα αμμωνίας-νερού (NH_3-H_2O) κατά την παραλαβή θερμότητας από θερμότερο μέσο. Βλέπουμε ότι χρησιμοποιώντας μίγμα αυξάνεται η αποδοτικότητα του κύκλου.



Σχήμα 42 . Προφίλ θερμοκρασιών για το νερό και το μίγμα αμμωνίας-νερού.

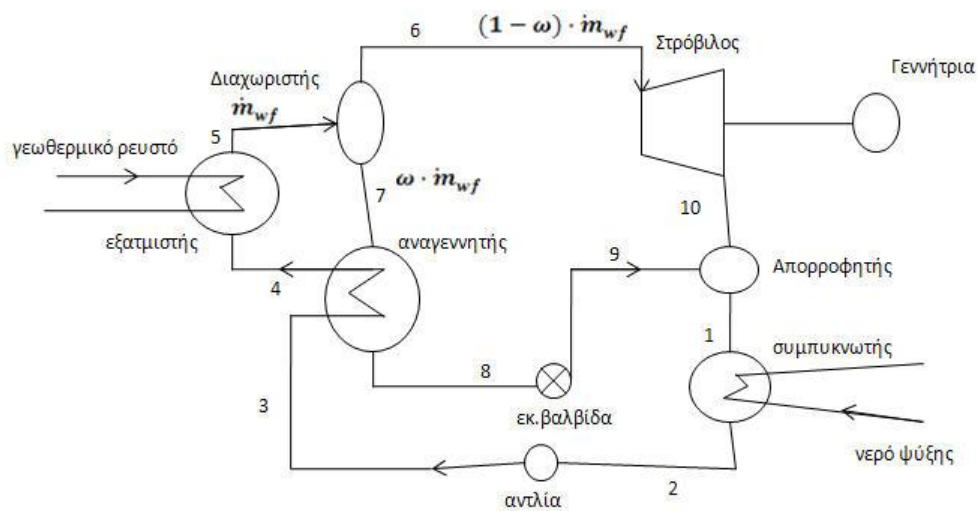
2.4 Απόδοση του κύκλου Kalina για χαμηλής θερμοκρασίας πηγές θερμότητας.

Σαν συνέπεια του υψηλού κόστους της παραγόμενης ενέργειας η χρησιμοποίηση χαμηλής θερμοκρασίας πηγές θερμότητας όπως είναι οι γεωθερμικές πηγές ή η αποβαλλόμενη θερμότητα από διάφορες μονάδες έχει λάβει την απαραίτητη προσοχή. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας υπάρχει η τάση για σχεδιασμό συστημάτων τα οποία θα είναι πιο αποδοτικά, αξιόπιστα και με καλύτερη σχέση κόστους-παραγόμενης ενέργειας στα οποία θα υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης πηγών θερμότητας με χαμηλές θερμοκρασίες οι οποίες ειδάλλως θα έμεναν ανεκμετάλλευτες.

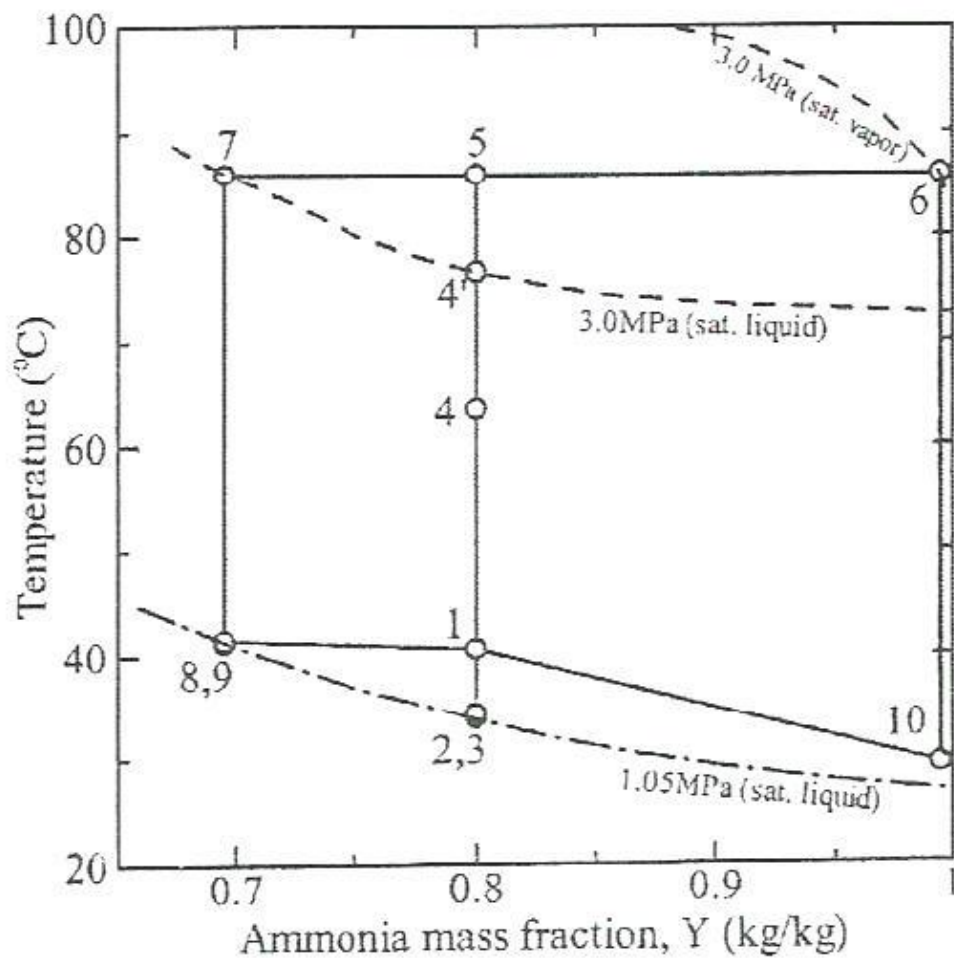
Ο κύκλος Kalina καθώς και ο οργανικός κύκλος του Rankine έχουν την ικανότητα να ανακτούν με αποδοτικό τρόπο την ενέργεια από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές. Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει οργανικούς κύκλους Rankine χρησιμοποιώντας ως μέσο ένα οργανικό υγρό αντί για νερό οι οποίοι κύκλοι έχουν βρεί εφαρμογή στην πράξη. Στην δεκαετία του 80' ο Alexander Kalina, Ρώσος επιστήμονας πρότεινε μια νέα οικογένεια θερμοδυναμικών κύκλων οι οποίοι χρησιμοποιούν σαν εργαζόμενο μέσο μίγμα αμμωνίας-νερού και έχουν εφαρμογές σήμερα στην παραγωγή ενέργειας με γεωθερμία, αποβαλλόμενη θερμότητα κλπ.

Το σχήμα 43 παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα του κύκλου Kalina το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάκτηση ενέργειας από χαμηλής θερμοκρασίας πηγή θερμότητας ενώ στο σχήμα 44 παρίσταται το διφασικό διάγραμμα θερμοκρασίας-σύστασης.

Κάθε σύστημα Kalina έχει κάποια εφαρμογή. Το συγκεκριμένο το οποίο ονομάστηκε KCS11 (Kalina cycle system 11) το οποίο βλέπουμε στα σχήματα είναι σχεδιασμένο να μετατρέπει ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στον KCS11 το φτωχό σε αμμωνία μίγμα που εξέρχεται από τον διαχωριστή αφού προσδώσει ένα μέρος της θερμότητας του στον εναλλάκτη που ακολουθεί αναμειγνύεται με το υπόλοιπο μίγμα που εξέρχεται από τον στρόβιλο και έχοντας χαμηλή πίεση εισέρχεται στον συμπυκνωτή, σημείο 1 (σε άλλες εφαρμογές προηγείται και εδώ ένας ακόμα εναλλάκτης). Το νερό ψύξης το οποίο μπορεί να είναι νερό από θάλασσα ή ποτάμι αν υπάρχει κάτι τέτοιο κοντά στον σταθμό, ή νερό του δικτύου, είναι ένα σημαντικό στοιχείο που ενισχύει την αποδοτικότητα του συστήματος αν βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Στις σκανδιναβικές χώρες έχει θερμοκρασία 5°C και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και τους 0°C. Αντίθετα στην Ελλάδα κυμαίνεται σε ένα μέσο όρο περίπου στους 12-18°C. Αφού ψυχθεί το εργαζόμενο μέσο περνά μέσα από την αντλία όπου και αυξάνεται η πίεση του (σημείο 3) και στη συνέχεια εισέρχεται στο εναλλάκτη θερμότητας του αναγεννητή (regenerator). Οι μεταβολές σε στρόβιλο και αντλία στο παράδειγμα μας θεωρούνται ισεντροπικές για την καλύτερη αποτύπωση των στοιχειωδών εξισώσεων που διέπουν τον κύκλο. Στην πραγματικότητα όμως και όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο οι μεταβολές δεν είναι ισεντροπικές και μάλιστα ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου είναι περίπου 0,9.



Σχήμα 43 . Σχηματικό διάγραμμα κύκλου Kalina



Σχήμα 44. Διάγραμμα θερμοκρασίας-σύνστασης αμμωνίας στο μίγμα για τον κύκλο Kalina (για την περίπτωση $Y_5=0.8$ και $P_6=3\text{MPa}$).

Στο σημείο 4 βρισκόμαστε στην είσοδο του εναλλάκτη ο οποίος θα μεταφέρει την θερμότητα από τα γεωθερμικά νερά στο εργαζόμενο μέσο. Στο διαχωριστή (separator) έχουμε μίγμα σε ατμώδη κατάσταση όπου και διαχωρίζεται σε ένα πλούσιο σε αμμωνία μίγμα όπου κατευθύνεται στον στρόβιλο και σε ένα φτωχό σε αμμωνία μίγμα όπου επιστρέφει στο κύκλωμα του κύκλου.

Από τον ισολογισμό ενέργειας στον εξατμιστή (evaporator) και στον συμπυκνωτή (condenser) έχουμε:

$$Q_E = (UA\Delta T_m)_E = \dot{m}_{WF} (h_5 - h_4) = \dot{m}_{HW} c_{HW} (T_{HI} - T_{HO})$$

$$Q_C = (UA\Delta T_m)_C = \dot{m}_{WF} (1 - \omega)(h_1 - h_2) = \dot{m}_{CW} c_{CW} (T_{CI} - T_{CO})$$

Η μέση λογαριθμική διαφορά για τον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή είναι :

$$(\Delta T_m)_E = \frac{(T_{HI} - T_5) - (T_{HO} - T_{4'})}{\ln [(T_{HI} - T_5)/(T_{HO} - T_{4'})]}$$

$$(\Delta T_m)_C = \frac{(T_1 - T_{CI}) - (T_2 - T_{CO})}{\ln [(T_1 - T_{CI})/(T_2 - T_{CO})]}$$

Ο ισολογισμός ενέργειας στον διαχωριστή και στον απορροφητή είναι:

$$(h_5 - h_6) = \omega(h_7 - h_6)$$

$$(h_1 - h_{10}) = \omega(h_9 - h_{10})$$

Ο ισολογισμός ενέργειας στον εναλλάκτη-αναγεννητή (regenerator) είναι :

$$Q_{RG} = (UA\Delta T_m)_{RG} = \dot{m}_{WF} (h_4 - h_3) = \omega \cdot \dot{m}_{WF} (h_7 - h_8)$$

Όπως επίσης και η μέση λογαριθμική διαφορά για τον αναγεννητή:

$$(\Delta T_m)_{RG} = \frac{(T_7 - T_4) - (T_8 - T_3)}{\ln [(T_7 - T_4)/(T_8 - T_3)]}$$

Το ωφέλιμο έργο του κύκλου είναι :

$$W_N = \dot{m}_{WF} (1 - \omega)(h_6 - h_{10}) - \dot{m}_{CW} \cdot (h_3 - h_2)$$

Οι περισσότεροι κύκλοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας. Όταν η ενέργεια ανακτάται από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές υπάρχει η ανάγκη για σχετικά μεγάλες επιφάνειες εναλλακτών στον εξατμιστή και στον συμπυκνωτή των οποίων το κόστος επιδρά σημαντικά στο συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Για τον λόγο αυτό πρέπει να βρίσκεται μια βέλτιστη λύση ως προς το κόστος-αποδοτικότητα για να είναι οικονομικά βιώσιμη η εφαρμογή το οποίο αποτελεί πρωταρχικό σκοπό.

Ορίζονται κάποιοι παράμετροι οι οποίοι προσδιορίζονται για την μελέτη της απόδοσης του κύκλου Kalina και την επίδραση τους στο κόστος και στο συνολικό έργο του κύκλου. Η αποδοτικότητα του κύκλου Kalina δίδεται από τον τύπο:

$$\eta_K = \frac{W_N}{Q_E}$$

Το καθαρό έργο που παράγεται ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου:

$$\beta_{WF} = \frac{W_N}{\dot{m}_{WF}}$$

Το καθαρό έργο που παράγεται ανά μονάδα μάζας ρευστού από την πηγή θερμότητας:

$$\beta_{HW} = \frac{W_N}{\dot{m}_{HW}}$$

Το καθαρό έργο που παράγεται ανά μονάδα μάζας του νερού ψύξης :

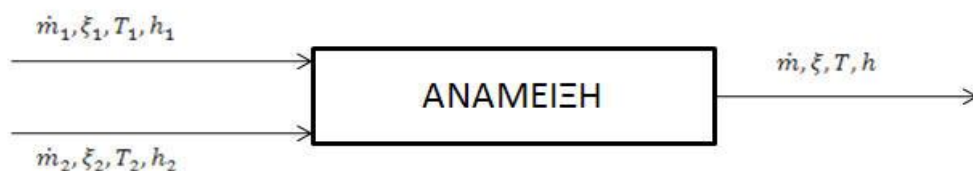
$$\beta_{CW} = \frac{W_N}{\dot{m}_{CW}}$$

Και τέλος ο λόγος της συνολικής επιφάνειας των εναλλακτών προς την καθαρή ισχύ που παράγεται είναι:

$$\gamma = \frac{A_E + A_C + A_{RG}}{W_N}$$

Η θερμοκρασία εισόδου του στρόβιλου T_6 και η θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή T_2 αν υποτεθούν τότε γνωρίζοντας την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνθήκες στα σημεία 5,6 και 7 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των γραμμομοριακών συστάσεων του μίγματος και τις εξισώσεις ενέργειας στον διαχωριστή. Η μελέτη της απόδοσης του κύκλου Kalina αξιολογείται για διάφορες συστάσεις του κλάσματος αμμωνίας στο μίγμα και πιέσεις εισόδου στον στρόβιλο και ακολούθως η απόδοση του κύκλου συγκρίνεται με αυτήν του κύκλου Rankine χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενα μέσα στον κύκλο του Rankine αμμωνία και ισοβουτάνιο για τις ίδιες συνθήκες.

Κατά την ανάμιξη δύο μιγμάτων (στην δική μας περίπτωση είναι αμμωνία-νερό, $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) ισχύουν οι εξής εξισώσεις:



Η ανάμιξη γίνεται αδιαβατικά χωρίς την συναλλαγή μηχανικού έργου. Από τον ισολογισμό μάζας έχουμε: $\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$ και $\dot{m} \cdot \xi = \dot{m}_1 \cdot \xi_1 + \dot{m}_2 \cdot \xi_2$

Από τον ισολογισμό ενέργειας στο χώρο όπου γίνεται η ανάμειξη έχω:

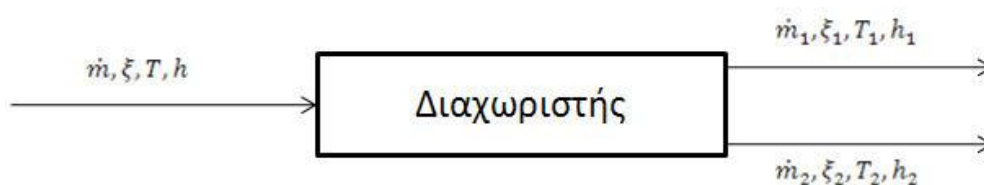
$$\dot{m} \cdot h = \dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2$$

Επίσης για διμέρες μίγμα αμμωνίας-νερού η γραμμομοριακή σύσταση κάθε συνιστώσας προκύπτει από την κατά μάζα σύσταση από την εξής σχέση:

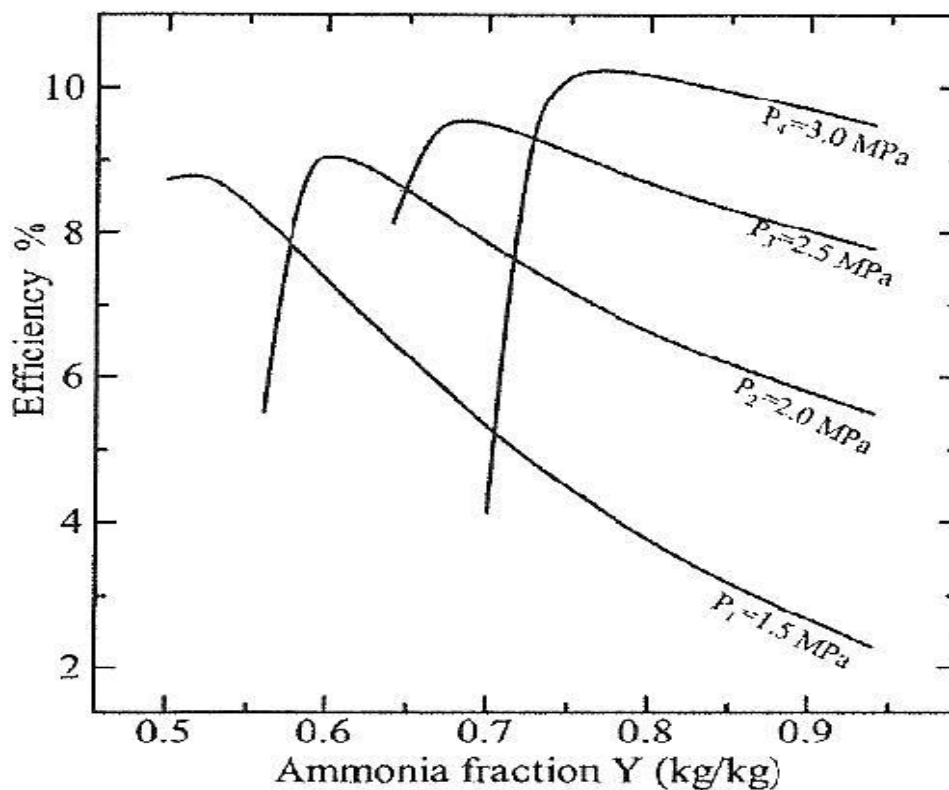
$$y_2 = \frac{\xi_{d2}}{0.94533 + 0.05467 \cdot \xi_{d2}}$$

Όπου y_2 η γραμμομοριακή σύσταση και ξ_{d2} η κατά μάζα σύσταση. Το μοριακό βάρος της αμμωνίας είναι 17,030 και του νερού 18,015.

Παρόμοια ισχύουν και για τον διαχωρισμό ενός μίγματος όπου έχουμε:



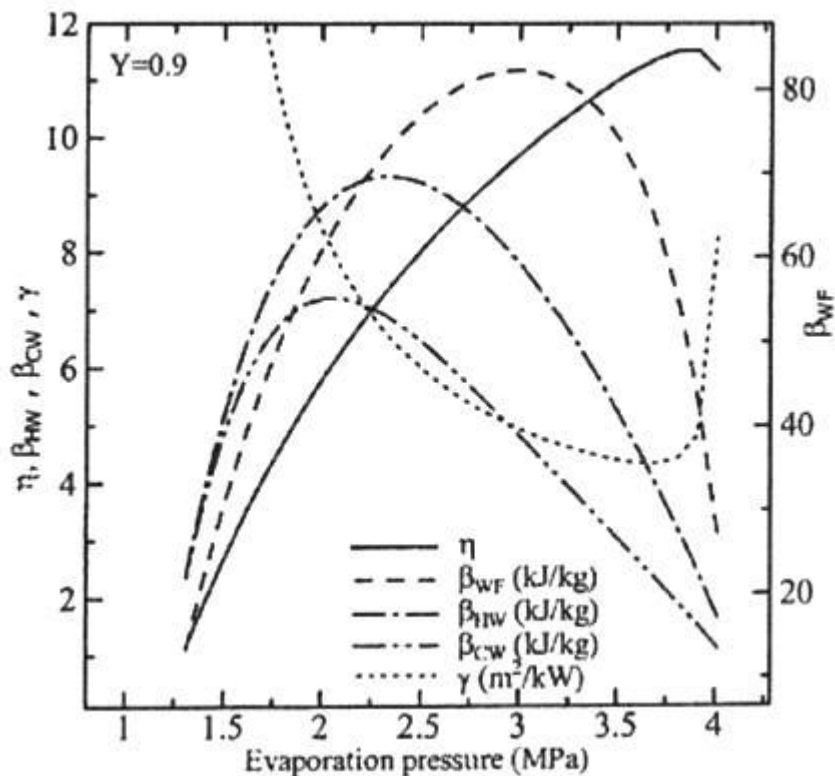
Στο σχήμα 45 φαίνεται η αποδοτικότητα του κύκλου σε σχέση με το κλάσμα της αμμωνίας και την πίεση εισόδου στον στρόβιλο.



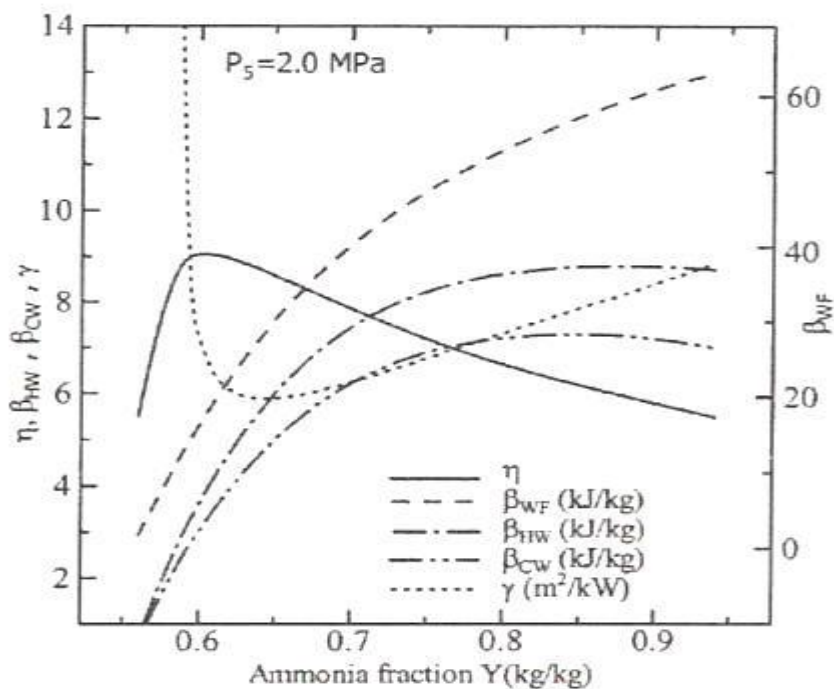
Σχήμα 45. Αποδοτικότητα ως προς τον λόγο αμμωνίας και την πίεση εισόδου στον στρόβιλο.

Για κάθε δεδομένη πίεση η αποδοτικότητα φτάνει σε ένα μέγιστο και στη συνέχεια ελαττώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό της αμμωνίας στο μίγμα. Επίσης με την αύξηση της πίεσης η μέγιστη αποδοτικότητα του κύκλου αυξάνεται όσο πιο πλούσιο είναι το μίγμα σε αμμωνία.

Στο σχήμα 46 φαίνεται η απόδοση των παραμέτρων σε σχέση με την πίεση στον ατμοποιητή με κλάσμα μίγματος αμμωνίας $Y=0.9$ kg/kg, όπου όλοι οι παράμετροι φτάνουν στην μέγιστη τιμή τους σε διαφορετικές πιέσεις. Για την πίεση που αντιστοιχεί στην μέγιστη αποδοτικότητα του κύκλου βλέπουμε ότι το καθαρό έργο ανά μονάδα μάζας εργαζόμενου μέσου β_{WF} , το καθαρό έργο ανά μονάδα μάζας ρευστού πηγής β_{HW} και το έργο ανά μονάδα μάζας νερού ψύξης β_{CW} μειώνονται απότομα μετά το βέλτιστο σημείο τους. Για ένα δεδομένο κλάσμα μίγματος υπάρχει ένα βέλτιστο εύρος λειτουργίας της πίεσης όπου όλοι οι παράμετροι απόδοσης του κύκλου να έχουν μια λογική τιμή.



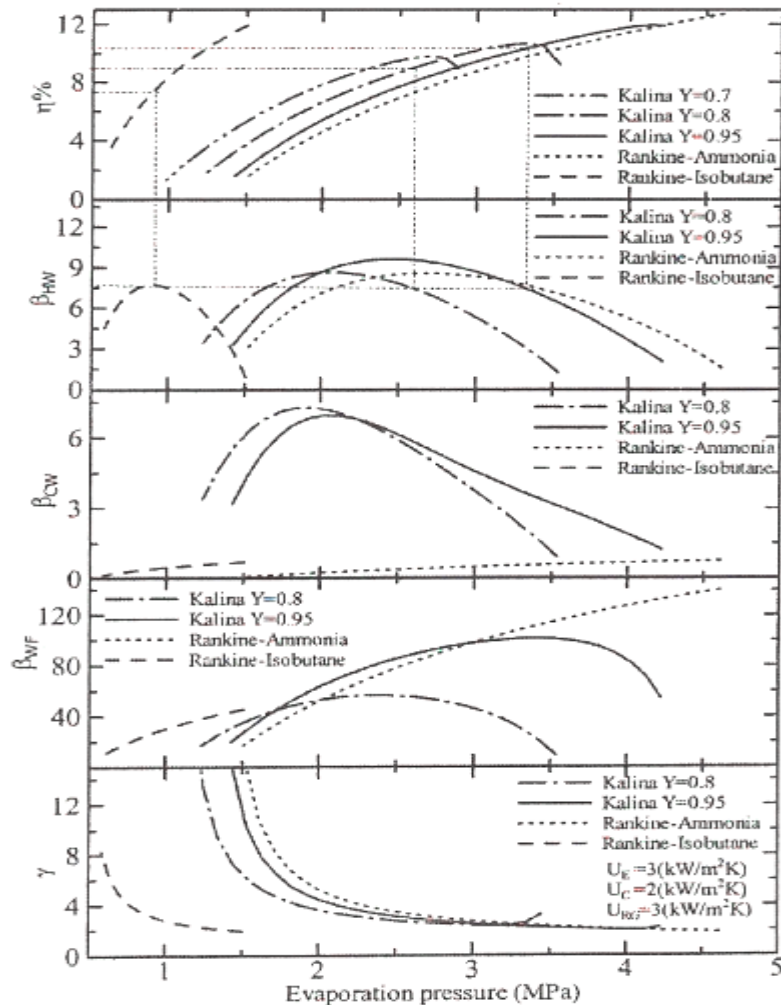
Σχήμα 46 . Απόδοση του κύκλου Kalina ως προς την πίεση εισόδου στον στρόβιλο.



Σχήμα 47. Απόδοση του κύκλου Kalina ως προς το κλάσμα της αμμωνίας στο μίγμα.

Το παραπάνω **σχήμα 47** παρουσιάζει τις αλλαγές των παραμέτρων ανάλογα με το κλάσμα αμμωνίας σε πίεση ατμοποίησης των 2MPa. Ο βαθμός απόδοσης φτάνει σε ένα μέγιστο όταν έχω $Y=0.6$ kg/kg και μειώνεται όσο μειώνεται και ο λόγος της αμμωνίας. Βλέπουμε επίσης ότι ο λόγος της συνολικής επιφάνειας των εναλλακτών προς την καθαρή ισχύ φτάνει σε ένα ελάχιστο όταν το κλάσμα είναι κοντά στον λόγο 0,65. Οι παράμετροι β_{WF} , β_{HW} , β_{CW} αυξάνονται όσο αυξάνεται το Y .

Το **σχήμα 48** δείχνει μια σύγκριση μεταξύ του κύκλου Kalina και του κύκλου Rankine με αμμωνία και με ισοβουτάνιο για τις ίδιες συνθήκες. Σύμφωνα με αυτό φαίνεται ότι η πίεση λειτουργίας επηρεάζει σαφώς την απόδοση του κύκλου. Ο κύκλος Rankine με ισοβουτάνιο λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερες πιέσεις σε σύγκριση με τον Kalina και με τον Rankine-NH₃.



Σχήμα 48. Σύγκριση απόδοσης και διάφορων παραμέτρων για τους κύκλους Kalina και Rankine.

Η παράμετρος β_{HW} είναι μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού συστημάτων Kalina χρησιμοποιώντας χαμηλής θερμοκρασίας πηγές ενέργειας. Η απόδοση του Kalina η οποία αντιστοιχεί στην βέλτιστη τιμή της παραμέτρου β_{HW} , είναι μεγαλύτερη από αυτήν του Rankine-NH₃. Επιπλέον φαίνεται ότι ο κύκλος Kalina ο οποίος έχει μέγιστη παράμετρο β_{HW} την ίδια με αυτήν του Rankine-isobutane μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Για την παράμετρο του νερού ψύξης β_{CW} βλέπουμε ότι επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές με τον Kalina το οποίο βοηθά και το ότι στον συμπυκνωτή του κύκλου η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν είναι σταθερή. Η παράμετρος γ συγκλίνει σε μια σταθερή τιμή με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας για όλους τους κύκλους.

Σύμφωνα με αυτήν την μελέτη λοιπόν εξετάστηκε η απόδοση του κύκλου Kalina KCS11 για χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικά ρευστά και συγκρίθηκε με την απόδοση ενός οργανικού κύκλου Rankine. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για δεδομένη πίεση εισόδου του στροβίλου μπορεί να προσδιοριστεί ένα βέλτιστο κλάσμα αμμωνίας που μεγιστοποιεί την απόδοση του κύκλου. Επίσης είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι λειτουργίας που καθορίζουν τον κύκλο. Ο κύκλος Kalina έχει καλύτερη απόδοση όταν λειτουργία σε λογικές τιμές της πίεσης από ότι ο κύκλος του Rankine[16].

2.5 Kalina + αποβαλλόμενη θερμότητα (waste heat recovery)

Παρουσιάζεται η ενσωμάτωση του κύκλου Kalina σε ένα συνδυασμένου κύκλου εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για να αυξηθεί η αποδοτικότητα του. Στα συνδυασμένου κύκλου συστήματα θερμότητας και ενέργειας η θερμότητα των καυσαερίων είναι συχνά διαθέσιμη σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτή η χαμηλού βαθμού θερμότητα που αποβάλλεται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ατμού και συνεπώς για ηλεκτροπαραγωγή από έναν συμβατικό κύκλο ατμού. Επιπλέον, η παροχή ατμού για τον σκοπό της θέρμανσης έχει ως επί των πλείστων εξαντληθεί και συνεπώς η θερμότητα αυτή σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν είναι χρήσιμη για θέρμανση. Αν κάποια άλλα μέτρα για να αυξηθεί η αποδοτικότητα της διαδικασίας του κύκλου ατμού, όπως ανατροφοδοσία ζεστού νερού ή θέρμανση του αέρα με καύση, έχουν εξαντληθεί, εναλλακτικοί τρόποι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως ο κύκλος Kalina προσφέρουν μια ενδιαφέρουσα επιλογή. Αυτή η διαδικασία μεγιστοποιεί την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια με ανάκτηση θερμότητας και χωρίς την απαίτηση πρόσθετων καυσίμων, με την ενσωμάτωσή της στα υπάρχοντα συστήματα. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η καθαρή απόδοση του ενσωματωμένου κύκλου Kalina είναι μεταξύ 12,3% και 17,1% ανάλογα με την θερμοκρασία του νερού ψύξης και το περιεχόμενο της αμμωνίας στο βασικό μείγμα. Η μεικτή ηλεκτρική ενέργεια είναι μεταξύ 320 και 440 kW για 2,3 MWth θερμότητα εισόδου στο σύστημα. Η μεικτή αποδοτικότητα είναι μεταξύ 13,5% και 18,8%.

2.5.1 Εισαγωγή

Το υπάρχων εργοστάσιο συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας στο Industrie-park Hoechst έχει σύστημα επεξεργασίας ξηρών καυσαερίων με θερμοκρασία εισόδου 130°C. Τα καυσαέρια πριν εισαχθούν στο σύστημα, ψύχονται από τους 150°C στους 130°C με έγχυση σταγονιδίων νερού. Ο πρώτος στόχος είναι να αυξηθεί η αποδοτικότητα της διαδικασίας ψύξης. Ο δεύτερος στόχος είναι να επιλεγεί μια τεχνολογία η οποία θα είναι ικανή να χρησιμοποιήσει την αποβαλλόμενη θερμότητα για παραγωγή επιπλέον έργου. Ο κύκλος Kalina ο οποίος είναι συγκρίσιμος με αυτόν του Rankine, δείχνει την δυνατότητα χρησιμοποίησης χαμηλής θερμοκρασίας θερμικά απόβλητα για ηλεκτροπαραγωγή.

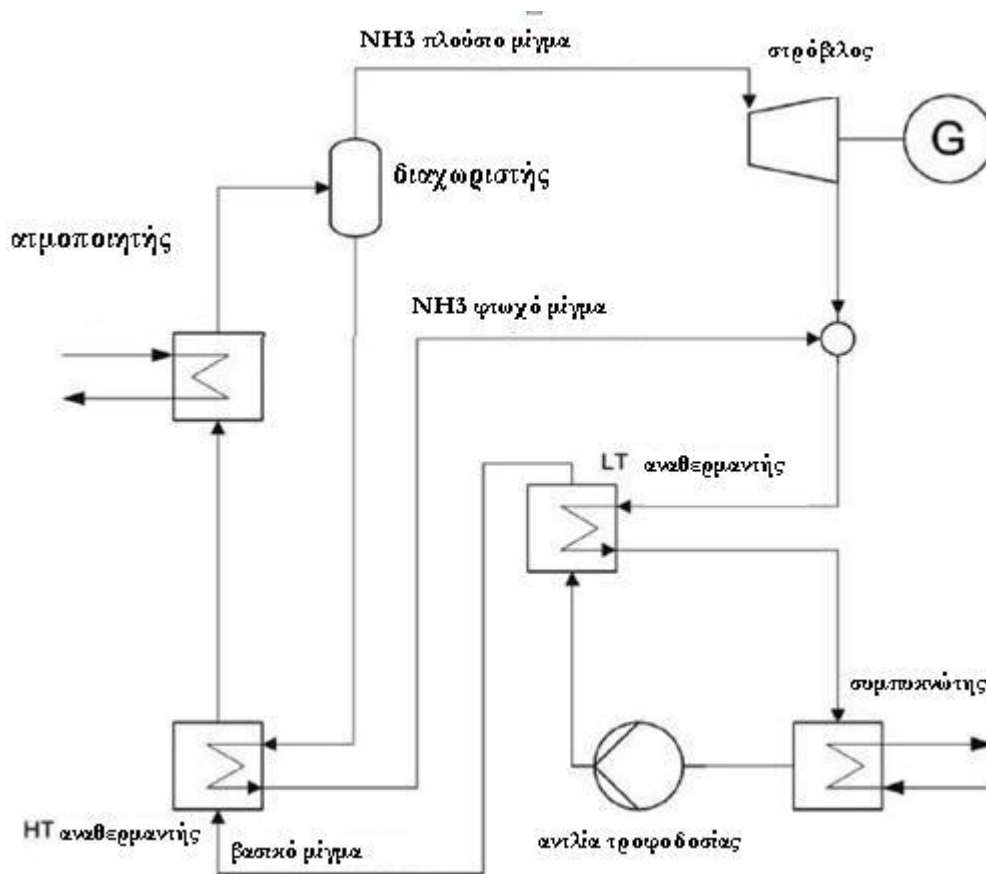
2.5.2 Εργοστάσιο συμπαραγωγής στο Industrie-park Hoechst

Στο Industrie-park Hoechst, Frankfurt της Γερμανίας έχει εγκατασταθεί ένα εργοστάσιο συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο ελέγχεται με βάση τις απαιτήσεις θερμότητας. Το εργοστάσιο αυτό παρέχει ενέργεια στην χημική, φαρμακευτική και κάθε είδους βιομηχανία. Αποτελείται από τέσσερις λέβητες με παροχή ατμού 830(t/h) τόννους την ώρα συνολικά. Οι δύο λέβητες είναι αποκλειστικά για καύση φυσικού αερίου ενώ οι άλλοι δύο χρησιμοποιούν ως καύσιμο λιθάνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Ως καύσιμο το πετρέλαιο χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις ανάγκης. Ένας από τους λέβητες αερίου είναι συνδεδεμένος με τα πλούσια σε οξυγόνο καυσαέρια ενός αεριοστροβίλου. Οι συνθήκες του παραγόμενου ατμού είναι 121 bar και 515°C. Οι δύο λέβητες άνθρακα χρησιμοποιούνται για το φορτίο βάσης ενώ αυτοί του αερίου χρησιμοποιούνται σε περιόδους με φορτίο αιχμής και όταν οι απαιτήσεις φτάνουν στο μέγιστο. Όλοι οι στρόβιλοι μαζί έχουν την δυνατότητα παραγωγής ισχύος έως και 160 MW. Ένα μικρό μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας του ίδιου του εργοστασίου(αντλίες ,ανεμιστήρες,μύλους κτλ.)

2.5.3 Η διαδικασία του κύκλου Kalina

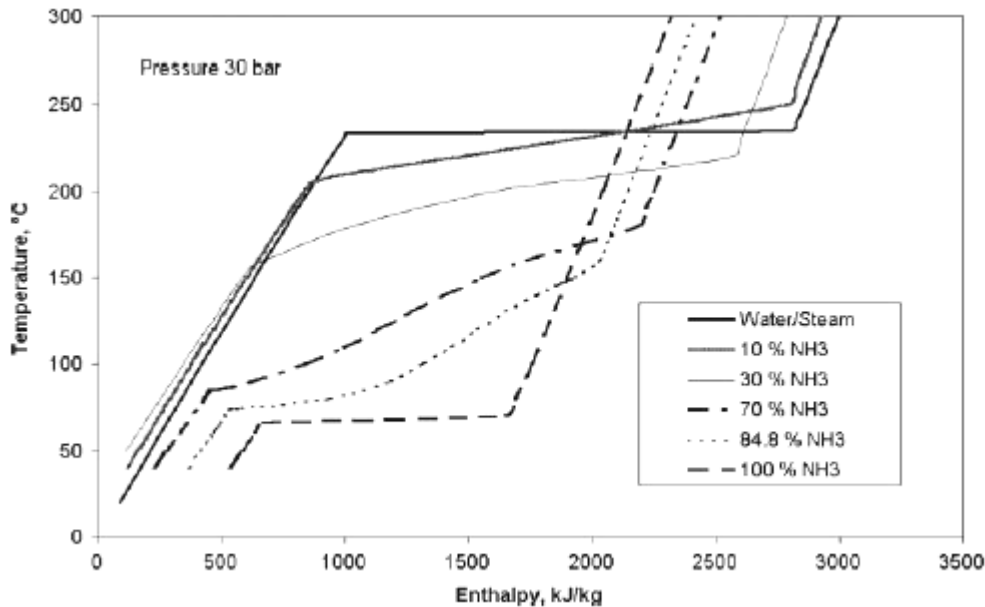
Στον κύκλο Kalina, θερμότητα σε χαμηλή θερμοκρασία μεταφέρεται έμμεσα στο εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Αυτό γίνεται με την χρήση εναλλακτών θερμότητας και συνήθως χρησιμοποιούνται για αυτές τις εφαρμογές εναλλάκτες πλακών αντιρροής με όλα τα χαρακτηριστικά τους όπως τα αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο **σχήμα 49** φαίνεται η ροή που ακολουθείται κατά την διάρκεια του κύκλου. Το εργαζόμενο μέσο είναι μίγμα αμμωνίας-νερού. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης και ατμοποίησης του μίγματος αμμωνίας-νερού ποικίλλει ανάλογα με την σύσταση του μίγματος.

Κατά την διάρκεια της εξάτμισης στον εναλλάκτη ο λόγος των συστατικών του διμερούς μίγματος-εργαζόμενου μέσου αλλάζει λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας βρασμού της αμμωνίας, η οποία εξατμίζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό , σε σχέση με αυτήν του νερού.



Σχήμα 49. Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας του κύκλου Kalina

Στο **σχήμα 50** διάφορες καμπύλες παρουσιάζουν διαφορετικές θερμοκρασίες ατμοποίησης σε σχέση με το ποσοστό της αμμωνίας στο μίγμα και σε σχέση με την ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση του νερού στην πίεση των 30 bar. Το μίγμα αμμωνίας-νερού ατμοποιείται σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με την σύσταση του. Οι διαδικασίες της εξάτμισης και της συμπύκνωσης δηλαδή δεν είναι ισοθερμοκρασιακές. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της αμμωνίας στο μίγμα τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία ατμοποίησης.



Σχήμα 50. Σύγκριση μεταξύ μιγμάτων και νερού στα 30 bar.

Πριν τον στρόβιλο ο πλούσιος σε αμμωνία ατμός διαχωρίζεται από το υπόλοιπο μίγμα στον διαχωριστή. Στην συνέχεια το πλούσιο σε αμμωνία μίγμα περνά μέσα από τον στρόβιλο όπου και εκτονώνεται παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια μιας γεννήτριας. Το μοριακό βάρος της αμμωνίας (NH_3) είναι 17 kg/kmol και είναι κοντά στο μοριακό βάρος του νερού (18 kg/kmol) και συνεπώς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στρόβιλοι χωρίς να έχουν κάποια ιδιαίτερη απαίτηση στο υλικό κατασκευής ως προς την αμμωνία.

Επιπλέον το φτωχό σε αμμωνία μείγμα το οποίο φεύγει από τον διαχωριστή χρησιμοποιείται για να θερμάνει μέσω εναλλακτών το βασικό μίγμα και έπειτα ενώνεται μαζί με τον ατμό που εξέρχεται από τον στρόβιλο για να εισέλθουν στην συνέχεια στον συμπυκνωτή όπου και θα συμπυκνωθούν. Επίσης για την άυξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου χρησιμοποιούνται εναλλάκτες σε διάφορες φάσεις του κύκλου όπως φαίνονται στο **σχήμα 49**.

Παρακάτω δίδεται ένας πίνακας με τα πιο γνωστά εργοστάσια που χρησιμοποιούν τον κύκλο Kalina. Για τον κύκλο Kalina μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας η γεωθερμία, η αποβαλλόμενη θερμότητα, η θερμότητα των καυσαερίων και τον τελευταίο καιρό εξελίσσονται τα πράγματα όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην ηλιακή ενέργεια όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Στο **Industrie-park Hoechst** χρησιμοποιείται χαμηλής θερμοκρασίας θερμότητα από τα καυσαέρια που προκύπτουν από την συμπαραγωγή του εργοστασίου. Τα καυσαέρια από τους καυστήρες λιθάνθρακα στην έξοδο τους έχουν μια θερμοκρασία περίπου 150°C. Το κατώτατο όριο απαγωγής θερμότητας και ψύξης των καυσαερίων καθορίζεται από την θερμοκρασία του όξινου σημείου δρόσου η οποία στο σύστημα αυτό έχει υπολογιστεί στους 123°C. Το καυσαέριο ψύχεται

λοιπόν από τους 150° C στους 130° C . Επομένως αντί να συμβαίνει αυτό μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αυτήν την διαθέσιμη θερμότητα για να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot για το σύστημα ανάκτησης της θερμότητας από τα καυσαέρια δίνεται από την σχέση:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $T_c=298,13$ K και η μέση λογαριθμική διαφορά των καυσαερίων με θερμοκρασίες 150 και 130° C είναι $T_h = 413,07$ K . Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης του Carnot είναι 27,8%. Τον χειμώνα ο βαθμός μπορεί να φτάσει και στο 32,7%. Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει την σύνθεση των καυσαερίων στους δύο λέβητες με λιθάνθρακα.

Πίνακας 3. Παράμετροι για το καυσαέριο στους λέβητες λιθάνθρακα.

Flue gas mass flow	112 kg/s
Flue gas evaporator inlet temperature	150 °C
Flue gas evaporator outlet temperature	130 °C
<i>Gas composition</i>	
N ₂	75.2 vol%
O ₂	5.0 vol%
Ar	0.9 vol%
H ₂ O	5.6 vol%
CO ₂	13.3 vol%
SO ₂	0.04 vol%

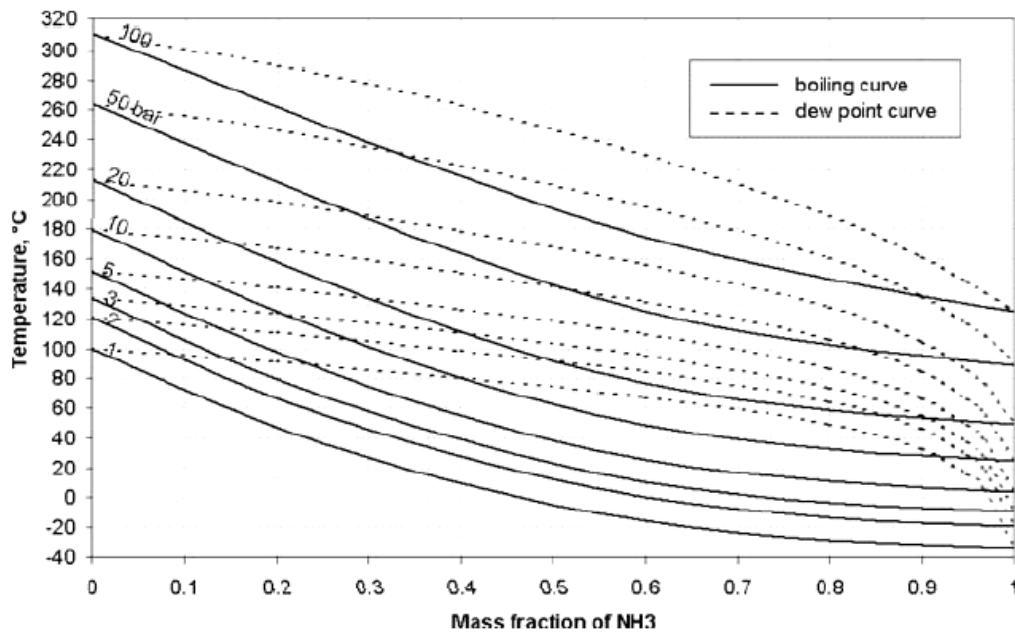
Στην μελέτη των στοιχείων του κύκλου χρησιμοποιούνται πέντε διαφορετικές περιπτώσεις όπου σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιείται διαφορετικό κλάσμα μάζας αμμωνίας στο μίγμα, διαφορετική θερμοκρασία του νερού ψύξης και διαφορετική πίεση εξόδου από τον στρόβιλο, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των συνθηκών για την μέγιστη αποδοτικότητα του κύκλου. Η περίπτωση 1 αντιστοιχεί στις συνθήκες του Husavik και η περίπτωση 2 έχει διαφορετική ποσότητα αμμωνίας.

Στο Industrie-park Hoechst χρησιμοποιείται νερό ψύξης από τον ποταμό Main όπου η μέση θερμοκρασία του το καλοκαίρι είναι στους 20°C σε αντίθεση με το Husavik όπου το νερό έχει θερμοκρασία 5°C. Στις περιπτώσεις 3 έως 5 το νερό ψύξης είναι 20°C και το περιεχόμενο της αμμωνίας μειώνεται.

Πίνακας 4 . Περιπτώσεις μέτρησης της αποδοτικότητας.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
NH ₃ content (-)	0.82	0.7	0.8	0.7	0.5
Cooling water temperature (°C)	5	5	20	20	20
Pressure after turbine (bar)	6.6	5.1	8.5	7.2	4.2

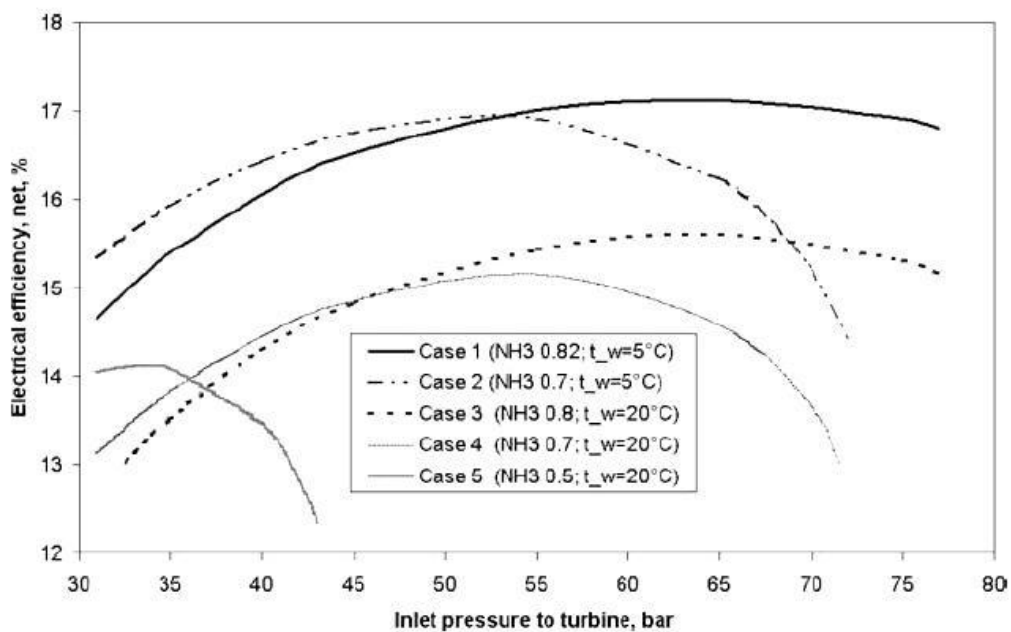
Οι καμπύλες ατμοποίησης και υγροποίησης για διαφορετικό περιεχόμενο αμμωνίας στο μίγμα και για διάφορες πιέσεις φαίνεται στο σχήμα.



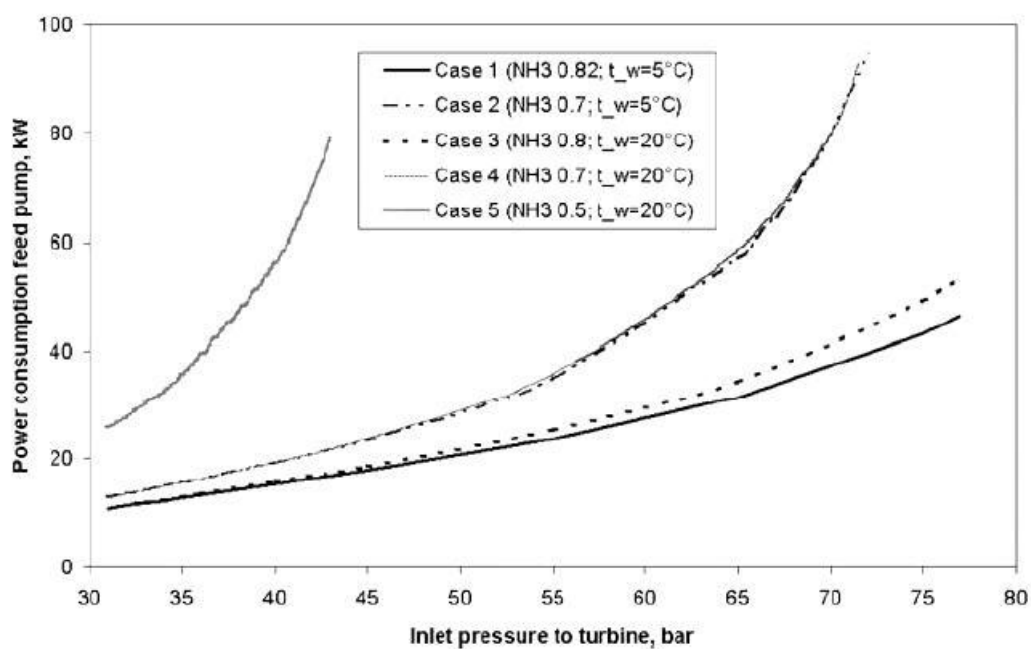
Σχήμα 51. Διάγραμμα φάσεων αμμωνίας-νερού (NH₃-H₂O)

Το **σχήμα 52** αποτυπώνει την καθαρή απόδοση σε σχέση με την πίεση εισόδου στον στρόβιλο. Οι πέντε περιπτώσεις δείχνουν μια ποικιλία στο ποσοστό αμμωνίας του μίγματος και διαφορετικές θερμοκρασίες νερού ψύξης στον συμπυκνωτή. Χαμηλές θερμοκρασίες ψύξης και ταυτόχρονα χαμηλές πιέσεις στον συμπυκνωτή οδηγούν σε υψηλή απόδοση ενέργειας (περίπτώσεις 1 και 2). Διατηρώντας την πίεση εξόδου του στρόβιλου σταθερή και αυξάνοντας την πίεση εισόδου αυξάνεται και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο στον κύκλο Kalina μεταξύ της παραγόμενης ενέργειας και του έργου που καταναλώνεται για την τροφοδοτική αντλία. Η παροχή μάζας βλέπουμε ότι αυξάνεται εκθετικά σε σχέση με την πίεση και αν αυξάνεται η παροχή μάζας αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία. Στο **σχήμα 52** φαίνεται επίσης ότι για πιέσεις μέχρι και 36 bar η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη όταν μειώνεται το ποσοστό της αμμωνίας στο μίγμα. Η κατανάλωση ενέργειας της αντλίας είναι μεγαλύτερη λόγω της μεγάλης παροχής στην περίπτωση 5 έχοντας φτωχό διάλυμα αμμωνίας.

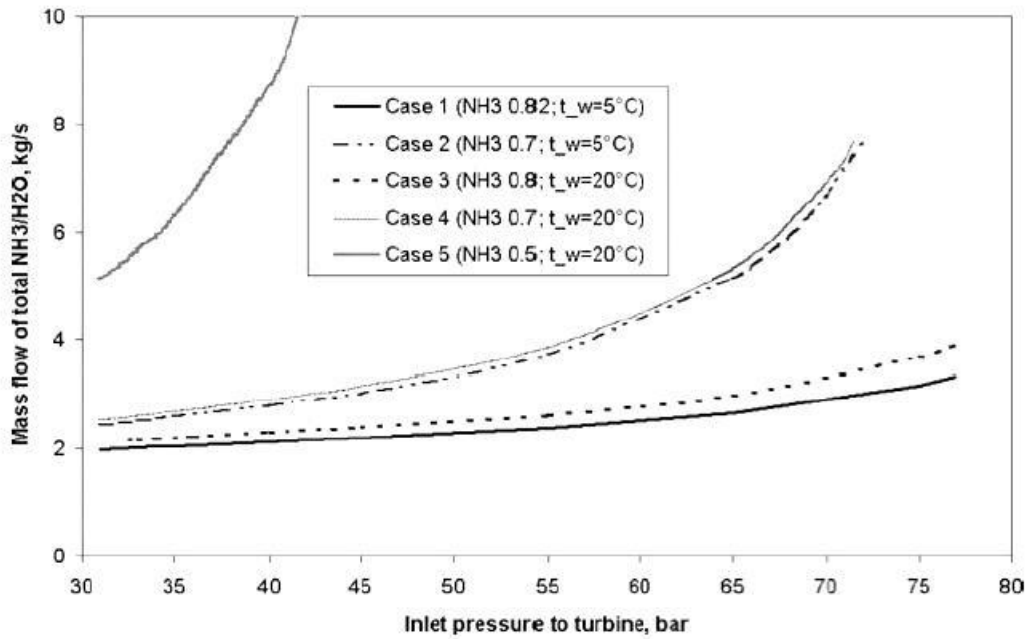
Επίσης, η πίεση συμπύκνωσης έχει επίδραση στην παραγόμενη ενέργεια. Από την μία μεριά μπορεί να ελαττωθεί με χαμηλότερες θερμοκρασίες νερού ψύξης και από την άλλη μειώνοντας την συγκέντρωση της αμμωνίας[17].



Σχήμα 52 . Ενεργειακή απόδοση σε σχέση με την πίεση εισόδου του στροβίλου.



Σχήμα 53. Κατανάλωση ενέργειας από τροφοδοτική αντλία ανάλογα με την πίεση εισόδου στον στρόβιλο.



Σχήμα 54. Παροχή μάζας μίγματος ανάλογα με την πίεση εισόδου στον στρόβιλο.

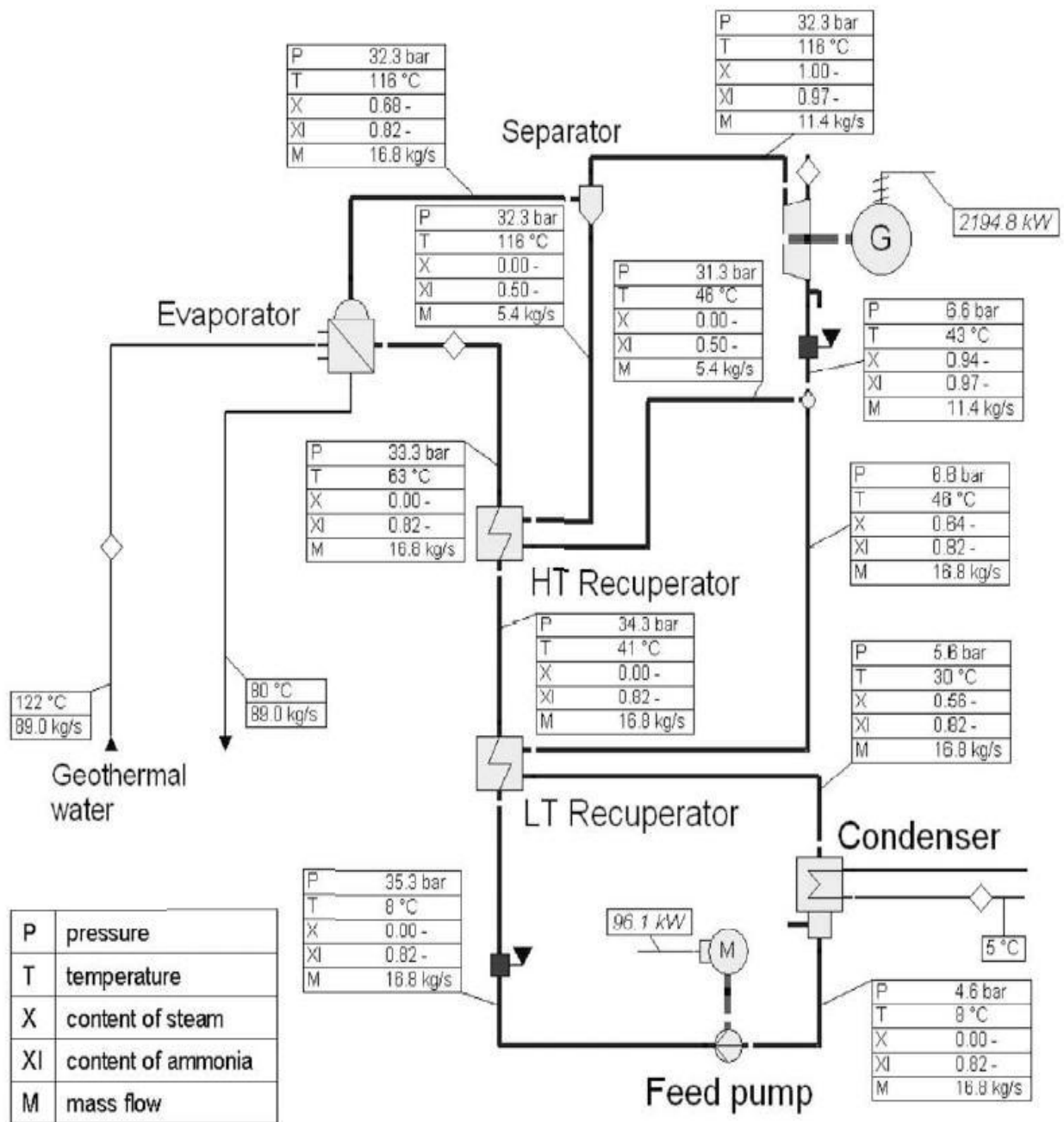
Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η καθαρή απόδοση του ενσωματωμένου κύκλου Kalina είναι μεταξύ 12,3% και 17,1%.

2.6 Kalina + Husavik της Ισλανδίας.



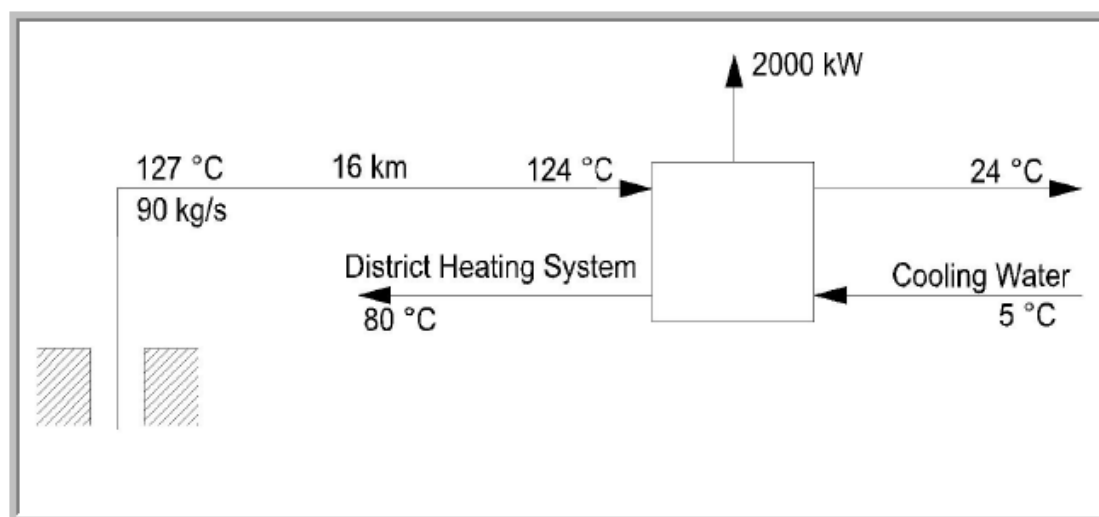
Σχήμα 55. Husavik power plant

Το Husavík είναι μια μικρή αστική κοινότητα στην βόρεια ακτή της Ισλανδίας, 40 χιλιόμετρα από τον αρκτικό κύκλο. Το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας με τον κύκλο Kalina που βρίσκεται στο Husavík χρησιμοποιεί σαν πηγή θερμότητας την γεωθερμία και η λειτουργία του ξεκίνησε 22 Ιουλίου του 2000. Το νερό αντλείται από πηγάδι, έχοντας μια θερμοκρασία περίπου 124°C και παροχή 60 λίτρων το δευτερόλεπτο, και αφού προσφέρει την θερμότητα του στον εναλλάκτη στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την οικιακή θέρμανση της περιοχής. Ο κύκλος διαθέτει εναλλάκτες οι οποίοι αναθερμάνουν το μίγμα της αμμωνίας-νερού. Ο συμπυκνωτής τροφοδοτείται με νερό ψύξης των 5°C. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετρήθηκε στα 2 MW. Το κόστος επένδυσης ανέρχεται στα 4 εκατομμύρια ευρώ. Το συνολικό κόστος επένδυσης συμπεριλαμβανομένου όλες τις εφαρμογές (οικιακή χρήση, ηλεκτρική ενέργεια κλπ) ξεπέρασε τα 12 εκατομμύρια ευρώ. Το ζεστό νερό που εξέρχεται από τον κύκλο Kalina αφού χρησιμοποιηθεί για οικιακή θέρμανση στην συνέχεια έχοντας ακόμα θερμότητα αφού μπορεί να είναι και 35°C χρησιμοποιείται σε ιχθυοκαλλιέργειες και για λιώσιμο χιονιού σε πλατείες και δρόμους. Έτσι αξιοποιείται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η γεωθερμική ενέργεια. Στο παρακάτω **σχήμα 56** φαίνεται παραστατικά το μοντέλο του κύκλου καθώς και κάποια στοιχεία σε κάθε φάση του κύκλου.



Σχήμα 56. Βασικό μοντέλο του κύκλου Kalina στο Husavik της Ισλανδίας.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στο Husavik ξεκίνησε το 1960 όπου οι άνθρωποι της περιοχής ζέστεναν τις πισίνες τους χρησιμοποιώντας το νερό που ανάβλυζε από τις θερμές πηγές. Την δεκαετία του 90' εμφανίστηκε η ιδέα να χρησιμοποιηθεί αυτή η ενέργεια και για ηλεκτροπαραγωγή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που παρουσιάζουν τα γεωθερμικά ρευστά.



Σχήμα 57. Σχηματικό διάγραμμα παραμέτρων του Husavik

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου στο Husavik βρίσκεται στο 10-12% αλλά χρησιμοποιώντας την μετέπειτα θερμότητα για άλλες χρήσεις η απόδοση των γεωθερμικών ρευστών είναι πολύ μεγαλύτερη.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο Husavik είναι:

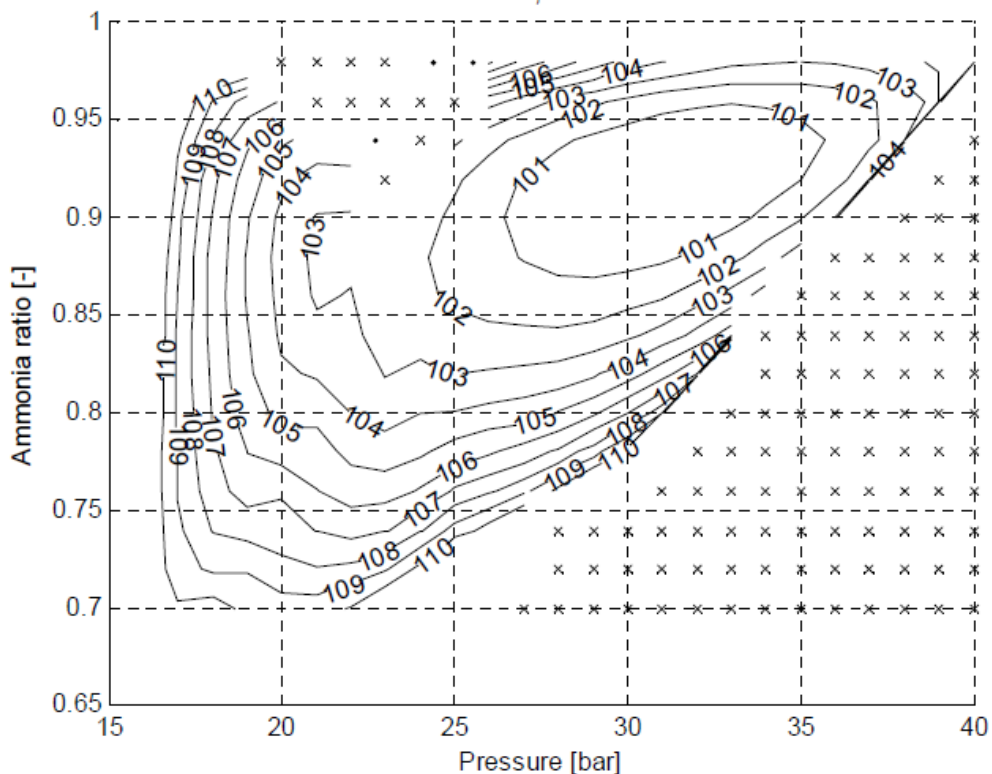
- Ατμοποιητής, εναλλάκτης αυλών και κελύφους με συνολική επιφάνεια επαφής 1600m²
- Διαχωριστής, στρόβιλος, αναθερμαντές
- Συμπυκνωτής με πλακοειδή εναλλάκτη με επιφάνεια 750m²
- Γεωτρήσεις και αντλίες-κυκλοφορητές

Το εργοστάσιο παραγωγής στο Husavik έχει προσφέρει μεγάλη εμπειρία στους ερευνητές με διάφορα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί και μαθηματικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την τεχνολογία Kalina καθώς και πολυετή εμπειρία στην επιδιόρθωση προβλημάτων και βλαβών κατά την διάρκεια της λειτουργίας του τα οποία στο μέλλον απογεύονται με την ταυτόχρονη τεχνολογική ανάπτυξη αυτών των συστημάτων[18].

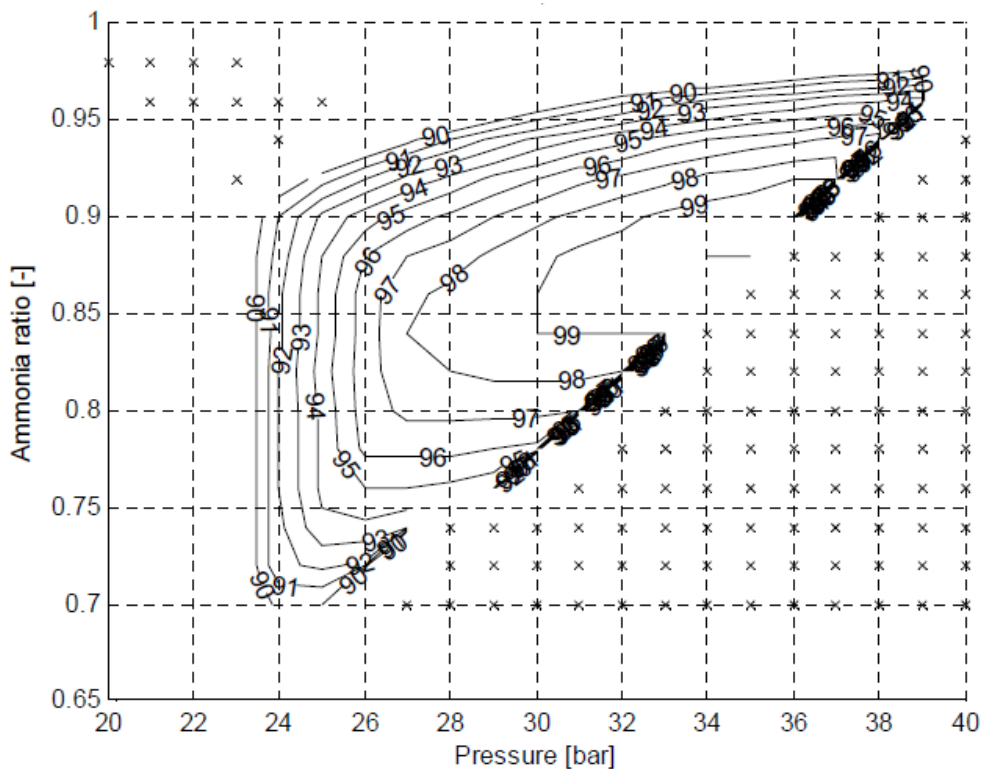
2.7 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός κύκλου Kalina

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα του κύκλου Kalina είναι ότι η διαδικασία της παραλαβής θερμότητας από την πηγή και ατμοποίηση του μίγματος αμμωνίας-νερού γίνεται με μεταβλητή θερμοκρασία. Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι μια εναλλακτική τεχνολογία που παρουσιάζει ευρεία χρήση. Σε αυτόν τον κύκλο η ατμοποίηση γίνεται σε σταθερή θερμοκρασία κάτι που σημαίνει πως ο ατμός που εισέρχεται στον στρόβιλο έχει σχετικά μικρότερη θερμοκρασία σε σύγκριση με αυτόν του κύκλου Kalina. Επίσης για τον κύκλο Kalina η υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης πηγής θερμότητας ή ενός συγκεκριμένου μέσου ψύξης έχει έναν βαθμό ελευθερίας παραπάνω από τον κύκλο ORC και αυτό διότι το μίγμα αμμωνίας-νερού μπορεί εύκολα να προσαρμόζεται σε συνθήκες υψηλής και χαμηλής πίεσης.

Η υψηλή πίεση και το περιεχόμενο της αμμωνίας στο μίγμα είναι σημαντικές μεταβλητές για τον σχεδιασμό του κύκλου Kalina. Οι απαιτήσεις της αγοράς μπορεί να επικεντρώνονται αποκλειστικά στην μέγιστη παραγωγή ισχύος αφήνοντας σε δεύτερη μοίρα το κόστος ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ ή το αντίθετο. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι καμπύλες του κόστους και της εγκατεστημένης ισχύος σε συνάρτηση με την πίεση και το περιεχόμενο της αμμωνίας. Η θερμοκρασία της πηγής θεωρείται 100°C. Ορίζεται ως 100 ο αριθμός για το χαμηλότερο κόστος και για την υψηλότερη ισχύ.



Σχήμα 58. Καμπύλες κόστους ως προς αμμωνία και πίεση.



Σχήμα 59. Καμπύλες εγκατεστημένης ισχύος ως προς αμμωνία και πίεση.

Μπορεί να φανεί από τα διαγράμματα ότι τα σημεία όπου έχουμε μεγαλύτερη ισχύ και μικρότερο κόστος διαφέρουν. Το χαμηλότερο κόστος είναι στα 32 bar, 92% αμμωνία ενώ η υψηλότερη ισχύς είναι στα 34 bar και 88% αμμωνία. Ο κύκλος Kalina έχει παρόμοιο κόστος επένδυσης με μεγάλης κλίμακας κύκλους ORC. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από δεδομένη πηγή είναι μεγαλύτερη στον κύκλο Kalina. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κύκλος Kalina έχει πλεονεκτική θέση απέναντι στον ORC όταν πρόκειται για εφαρμογές με περισσότερο χρόνο λειτουργίας όπως είναι τα φορτία βάσης[19].

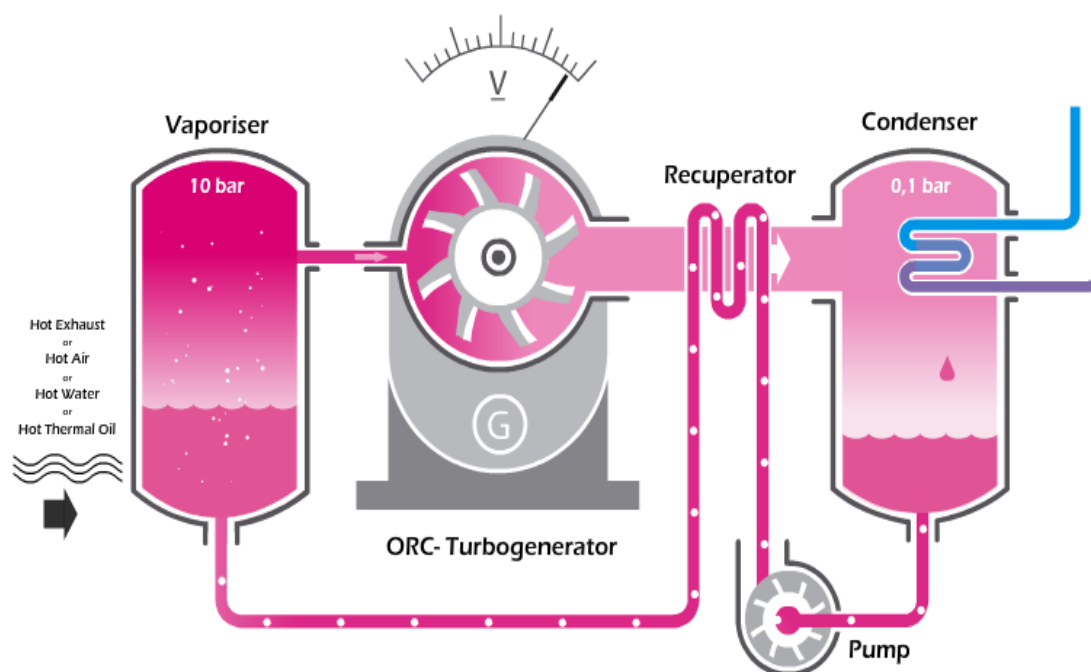
2.8 Κόστος Kalina

Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το κόστος κεφαλαίου του κύκλου Kalina αφού δεν υπάρχει διαθέσιμη η απαραίτητη βιβλιογραφία. Από αναφορές που υπάρχουν το κόστος κεφαλαίου κυμαίνεται από 2000 μέχρι 3000 €/kW για μικρές μονάδες με ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρότερη των 500 kW. Σε μονάδες μεγαλύτερες των 6 MW το κόστος επένδυσης μπορεί να συγκριθεί με αυτό ενός συμβατικού σταθμού. Ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται από 7,9 έως 18,5 χρόνια για μια μονάδα με κύκλο Kalina ηλεκτροπαραγωγής 400kW. Προυποθέσεις για αυτούς τους υπολογισμούς είναι οι 8000 ώρες λειτουργίας του κύκλου ετησίως, 35kW ιδιοκατανάλωση και τιμή ηλεκτρικής ενέργειας 60€/MWh[17].

3. Οργανικός κύκλος Rankine

3.1 Εισαγωγή

Ο οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC) είναι ένας κύκλος Clausius-Rankine στον οποίο χρησιμοποιείται οργανικό εργαζόμενο μέσο στη θέση του νερού-ατμού. Τα τελευταία χρόνια ο κύκλος έχει γίνει αρκετά δημοφιλής στον τομέα παραγωγής ενέργειας λόγω του γεγονότος ότι έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει την θερμότητα καυσαερίων χαμηλής θερμοκρασίας καθώς και οποιαδήποτε πηγή ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας για να παράγει ηλεκτρισμό. Συνήθως ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται οργανικό ρευστό υψηλής μοριακής μάζας το οποίο επιτρέπει στον κύκλο Rankine την ανάκτηση θερμότητας και από πηγές ενέργειας όπως είναι η αποβαλλόμενη θερμότητα, η γεωθερμική και η ηλιακή ενέργεια. Το χαρακτηριστικό των οργανικών αυτών ρευστών είναι η χαμηλή θερμοκρασία βρασμού σε σχέση με αυτή του νερού. Η θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας μέσω του κύκλου μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο το οποίο με την σειρά του μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επιτυχία του ORC μπορεί να εξηγηθεί από το εξής χαρακτηριστικό: ένα σύστημα ORC μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μικρές μετατροπές σε συνδυασμό με πολλές και διάφορες πηγές θερμότητας. Η επιτυχία αυτή ενισχύεται από την υψηλή τεχνολογική ωριμότητα των συνιστωσών του κύκλου λόγω της εκτεταμένης χρήσης τους σε εφαρμογές ψύξης.

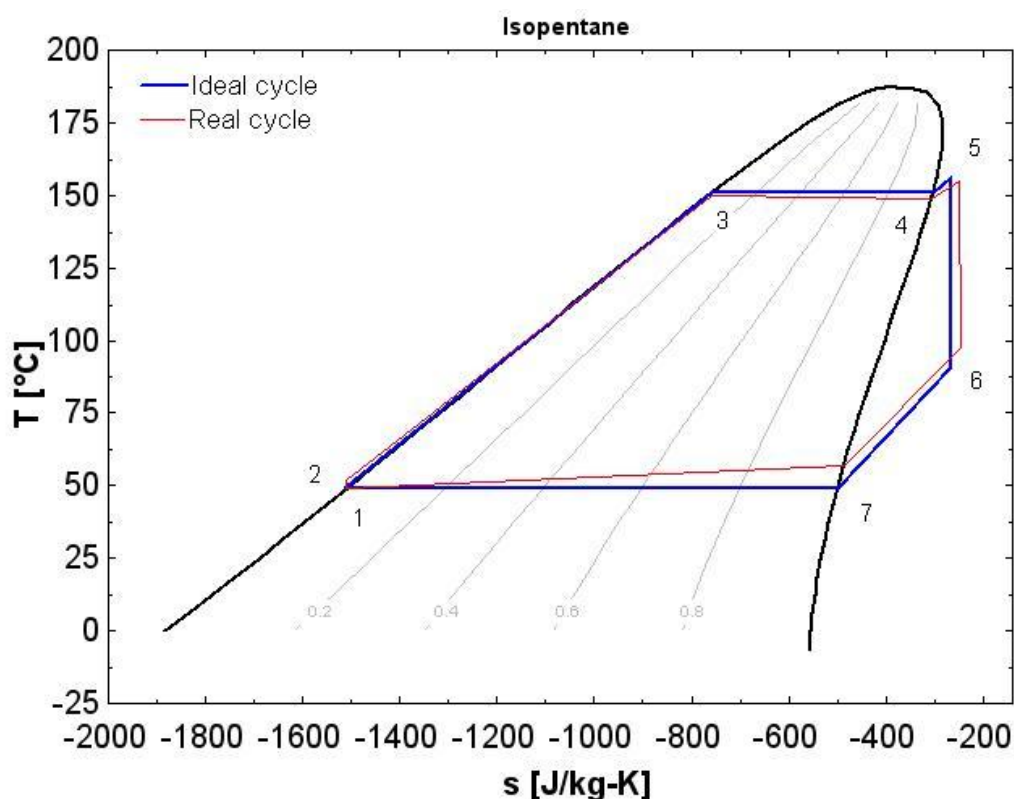


Σχήμα 60. Σχηματικό διάγραμμα ORC

3.2 Αρχές λειτουργίας του ORC

Η βασική αρχή λειτουργίας του οργανικού κύκλου Rankine είναι η εξής: το οργανικό ρευστό μέσω της τροφοδοτικής αντλίας συμπιέζεται και στην συνέχεια λαμβάνοντας θερμότητα από εξωτερική πηγή ατμοποιείται. Ο ατμός οδηγείται στον στρόβιλο όπου και εκτονώνεται με αποτέλεσμα την παραγωγή μηχανικού έργου και στην συνέχεια οδηγείται στον συμπυκνωτή. Σε έναν ιδανικό κύκλο η εκτόνωση στον στρόβιλο θα ήταν ισεντροπική ενώ οι διαδικασίες της ατμοποίησης και συμπύκνωσης θα ήταν ισοβαρείς. Στον πραγματικό κύκλο συμβαίνουν τα εξής:

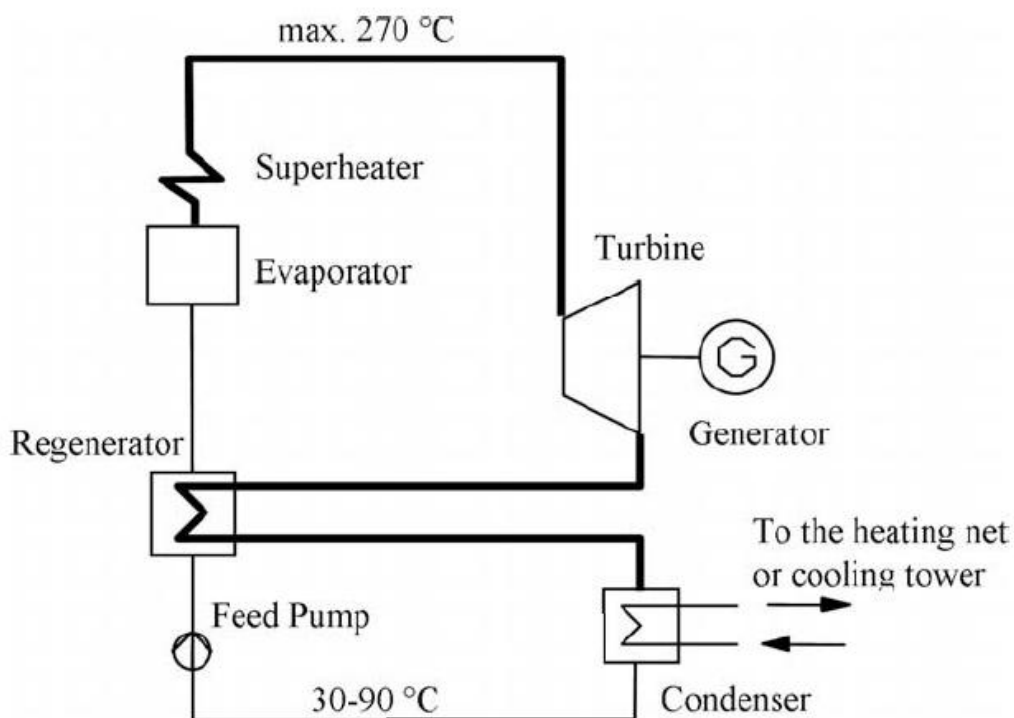
- Κατά την διάρκεια της εκτόνωσης μόνο ένα μέρος της ανακτώμενης ενέργειας λόγω της διαφοράς πίεσης μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Το υπόλοιπο μέρος μετατρέπεται σε θερμότητα και απορρίπτεται στο περιβάλλον. Η αποδοτικότητα του στρόβιλου προσδιορίζεται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.
- Στους εναλλάκτες θερμότητας το εργαζόμενο μέσο διανύει μια μεγάλη απόσταση το οποίο ενισχύει την καλή μεταφορά θερμότητας αλλά προκαλεί και μεγαλύτερες πτώσεις πίεσης το οποίο επιδρά αρνητικά στην ποσότητα ενέργειας που παραλαμβάνουμε από τον κύκλο.



Σχήμα 61. T-S διάγραμμα για ιδανικό και πραγματικό κύκλο ORC

Βελτίωση του οργανικού κύκλου Rankine μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ενός εναλλάκτη αναθέρμανσης. Καθώς το εργαζόμενο μέσο μετά την εκτόνωση του βρίσκεται ακόμα σε ατμώδη κατάσταση η θερμοκρασία του σε αυτό το σημείο είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία συμπύκνωσης. Η υψηλή θερμοκρασία του ρευστού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προθερμάνει το υγρό πριν την εισόδο του στον ατμοποιητή. Οπότε ένας εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής τοποθετείται μετά τον στρόβιλο και πριν τον συμπυκνωτή. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αποδοτικότητα του συστήματος. Επίσης για επιπλέον αύξηση της αποδοτικότητας μπορεί να τοποθετηθεί ένας υπερθερμαντής μετά την ατμοποίηση και πριν την είσοδο του ρευστού στον στρόβιλο[20].

Στο **σχήμα 62** φαίνονται οι κύριες συνιστώσες του κύκλου. Το οργανικό εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται σε μια τροφοδοτική αντλία η οποία εξαναγκάζει το ρευστό να διαπεράσει στην συνέχεια τον αναθερμαντή. Το μέσο αφού προθερμανθεί ατμοποιείται, υπερθερμαίνεται και εκτονώνεται στον στρόβιλο. Μετά τον στρόβιλο το ρευστό συμπυκνώνεται εως την θερμοκρασία συμπύκνωσης. Αν αυτή η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για οικιακή θέρμανση. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας όπως θερμότητα από γεωθερμία ή από θερμικά απόβλητα τότε για την συμπύκνωση χρησιμοποιείται νερό ψύξης.



Σχήμα 62. Διάγραμμα του οργανικού κύκλου Rankine

Οι περισσότερες έρευνες στον κύκλο του Rankine αφορούν την αύξηση της αποδοτικότητας του για δεδομένη πηγή ενέργειας. Μια από τις συνιστώσες που επιδρά σημαντικά στην αποδοτικότητα του κύκλου είναι τα χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου όπως θα δούμε στην συνέχεια. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται διάφοροι κατασκευαστές και το θερμοκρασιακό εύρος των εφαρμογών τους.

Πίνακας 5 . Πίνακας κατασκευαστών με διάφορα στοιχεία.

Manufacturer	Power output	Electrical efficiency	Useful temperature level	Fluid	Technology	Web-site
ORMAT 980 Greg Street Sparks, Nevada 89431- 6039 USA	200 kW–7,5 MW	No data	No data	No data	No data	http://www.ormat.com
Turboden s.r.l. Viale Stazione, 23 25122 Brescia-Italy	300 kW–2 MW	16%–18%	about 280 °C	Silicon oil	2-staged radial turbine	http://www.turboden.com
GMK GmbH Reuterstraße 5 18211 Bargeshagen	50 kW–2 MW	9%–21% depending on the heat source	>120 °C when screw motor is used, >350 °C for turbine	No data	Up to 500 kW screw motor, from 500 kW turbine of KK& K	www.gmk.info
Köhler und Ziegler Anlagentechnik GmbH Auweg 10 c 35457 Lollar	70 kW–200 kW	11%	100 °C	Hydro- carbons	Screw motor	www.koehler-ziegler.de
Ergion GmbH Bruchhäuser Str. 19 68723 Schwetzingen	4 kW–300 kW	13%–16%	120 °C–300 °C	Water- based with additives	Modified screw motor	www.ergion.de
ADORATEC GmbH Rotterdammer Str. 20–30 68219 Mannheim	300 kW–1750 kW	15%–18%	>100	No data	Turbine	www.adoratec.com
WSK Energie und Umwelttechnik GmbH Linxer Straße 26 77694 Kehl–Leutesheim	52 kWel to 65 kWel depending on cooling water temperature	Average of 16,3%	Cooling of exhaust gas from 490 °C to 175 °C	Fluoric Hydro- carbons	Screw motor	www.wsk-group.com

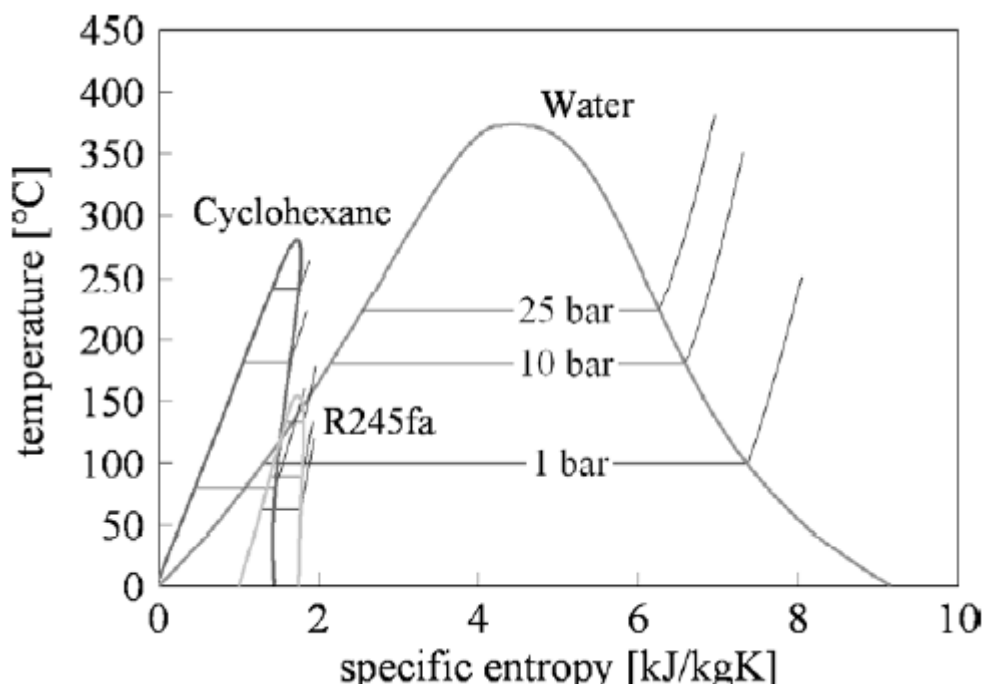
3.3 Εργαζόμενα μέσα

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου παίζει σημαντικό ρόλο στην διαδικασία του κύκλου και καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής και το μέγεθος της πηγής θερμότητας. Στον Πίνακα 6 φαίνονται κάποια ρευστά και τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 6 . Οργανικά ρευστά και τα χαρακτηριστικά τους.

Working fluid	T_c [°C]	p_c [bar]	$T_{s, 1 \text{ bar}}$ [°C]	$p_{s, 20 \text{ °C}}$ [bar]
R134a	101.1	40.6	– 26.4	5.7
R227ea	101.8	29.3	– 16.6	3.9
R236fa	124.9	32.0	– 1.8	2.3
R245fa	154.0	36.5	14.8	1.2
R141b	204.4	42.1	31.7	0.7
R365mfc	186.9	32.7	39.8	0.5
Cyclohexane	280.5	40.8	80.3	0.1

Τα ρευστά δίνονται με βάση την κρίσιμη θερμοκρασία τους, T_c , και την κανονική θερμοκρασία ατμοποίησης τους $T_s, 1 \text{ bar}$. P_c είναι η κρίσιμη πίεση και P_s η πίεση ατμοποίησης στους 20°C . Αυτό δίνει μια πρώτη ιδέα για τις εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτά τα ρευστά. Ρευστά με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία επιτρέπουν από την μια μεριά υψηλές θερμοκρασίες ατμοποίησης από την άλλη όμως λειτουργούν σε μικρές πιέσεις και συνεπώς και μικρές διαφορές πιέσεων. Τα ρευστά του πίνακα έχουν επιλεγεί για να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών με κρίσιμη θερμοκρασία από $101,3^\circ\text{C}$ μέχρι $280,5^\circ\text{C}$. Το **σχήμα 63** δείχνει ένα διάγραμμα T-s με τις ιδιότητες του νερού-ατμού μαζί με το cyclohexane και το R134a για τιμές πιέσεων 1, 10 και 25 bar.



Σχήμα 63. T-s διάγραμμα νερού-ατμού, R134a και cyclohexane.

Η επιφάνεια που περικλείεται μεταξύ των γραμμών κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού δείχνει σε ένα βαθμό την επιτεύξιμη ενθαλπική διαφορά στον θερμοδυναμικό κύκλο. Οι ενθαλπικές διαφορές για οργανικές ουσίες είναι σημαντικά μικρότερες σε σύγκριση με του νερού. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες ροές μάζας για την ίδια ισχύ εξόδου. Ο κύκλος ORC μπορεί να λειτουργήσει με κεκορεσμένο ατμό ή με σταθερή υπερθέρμανση ανάλογα με τις ιδιότητες του ρευστού. Υψηλότερη υπερθέρμανση για να αποφύγουμε να υπάρχει ποσοστό υγρού στον ατμό που εξέρχεται από το στρόβιλο δεν είναι απαραίτητη μιας και για τα περισσότερα ρευστά η εκτόνωση τελειώνει στην περιοχή του υπέρθερμου ατμού σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά του νερού. Η υπερθέρμανση είναι σημαντική για την αύξηση της αποδοτικότητας του κύκλου μέχρι ένα σημείο γιατί λόγω των χαμηλών βαθμών απόδοσης των εναλλακτών χρειάζεται περισσότερη επιφάνεια εναλλαγής και συνεπώς μεγάλο κόστος το οποίο θα επιδρά στο συνολικό κόστος κατασκευής.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη εκτός των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων είναι τα νομοθετικά μέτρα και οι κανονισμοί που

ισχύουν για την λειτουργία των οργανικών μέσων. Η προστασία της τρύπας του όζοντος και η μείωση των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου έχουν προσθέσει νέους κανόνες σε διεθνή, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Κατά καιρούς έχουν συνταχθεί κάποια πρωτόκολλα όπως το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ και το πρωτόκολλο του Κιότο με κανονισμούς και απαγορεύσεις όσον αφορά τις εκπομπές αερίων. Οι ουσίες χαρακτηρίζονται από την δυνατότητα αφαίρεσης όζοντος (ODP, ozone depletion potential). Το εργαζόμενο μέσο R141b με αριθμό ODP = 0.11 έχει απαγορευτεί πλήρως για το έτος 2010[21].

Συνοπτικά για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου πρέπει να προσέχουμε τα εξής:

- Θερμοδυναμική απόδοση. Ο βαθμός απόδοσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος για δεδομένη πηγή θερμότητας.
- Συμπεριφορά στον κύκλο και στην καμπύλη κορεσμένου ατμού. Για την αποφυγή εμφάνισης υγρού στην έξοδο του στρόβιλου και των προβλημάτων που θα επακολουθήσουν ο ατμός υπερθερμαίνεται πριν την είσοδο στον στρόβιλο και μετά τον στρόβιλο αναθερμαίνεται μέσω ενός εναλλάκτη.
- Ανεκτά επίπεδα πιέσεων. Μεγάλες πιέσεις οδηγούν σε πιο στιβαρές εγκαταστάσεις και μεγαλύτερο κόστος.
- Θερμοκρασιακή ισορροπία. Σε αντίθεση με το νερό τα οργανικά ρευστά συνήθως πάσχουν από χημικές αλλοιώσεις και αποσύνθεση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση και υψηλά επίπεδα ασφάλειας. Παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η τοξικότητα και η αναφλεξιμότητα του ρευστού
- Υψηλή διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος του οργανικού ρευστού.

Σύγκριση μεταξύ εργαζόμενων μέσων

Ο σκοπός είναι να συγκριθούν τα κυριότερα οργανικά μέσα για τρεις τυπικές εφαρμογές.

- Η πρώτη εφαρμογή αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία ατμοποίησης των 85°C και μια θερμοκρασία συμπύκνωσης 20°C. Αυτά τα θερμοκρασιακά επίπεδα είναι τυπικά για εφαρμογές με γεωθερμία.
- Η δεύτερη εφαρμογή αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία ατμοποίησης των 150°C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 30°C τα οποία αντιστοιχούν σε έναν ηλιακό συλλέκτη χαμηλής θερμοκρασίας.
- Η τρίτη εφαρμογή αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία ατμοποίησης των 280°C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 100°C , τυπικές τιμές για μονάδα με καύση βιομάζας.

Μελετώνται τα 4 πιο συνήθη ρευστά που βρίσκονται σε εφαρμογές ORC : R134a , R245fa , n-pentane και silicon oil . Το επιλεγόμενο silicon oil ονομάζεται οκταμεθυλκυκλοτετρασιλοξάνη ή D4.

Ο βαθμός απόδοσης του αναθερμαντή (recuperator) είναι 80%. Υπολογίζεται επίσης ένας νέος δείκτης απόδοσης BWR (back work ratio) και προσδιορίζεται από τον λόγο μεταξύ του έργου που καταναλώνεται από την αντλία και του έργου που παράγεται κατά την εκτόνωση. Η πυκνότητα του ρευστού μετά την εκτόνωση $\rho_{ex,exp}$ μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε το μέγεθος του εξοπλισμού.

Πίνακας 7 . Απόδοση του κύκλου για τρεις διαφορετικές εφαρμογές[22].

	Fluid	P_{ev} [bar]	P_{cd} [bar]	η_{cycle}	BWR	$\rho_{ex,exp}$ [kg/m ³]
$T_{cd} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{ev} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$	R134a	29.28	5.73969	10.6%	10.8%	26.2
	R245fa	8.92	1.28839	11.7%	2.9%	6.775
	n-pentane	4.16	0.62557	11.5%	1.6%	1.803
	D4	0.04541	0.0009533	10.3%	0.0%	0.007966
$T_{cd} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{ev} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	R245fa	33.79	1.80767	16.4%	8.0%	8.598
	n-pentane	15.91	0.84297	18.1%	3.9%	2.055
	D4	0.50238	0.001985	15.6%	0.1%	0.01437
$T_{cd} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{ev} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$	D4	8.04243	0.08718	18.6%	2.2%	0.483

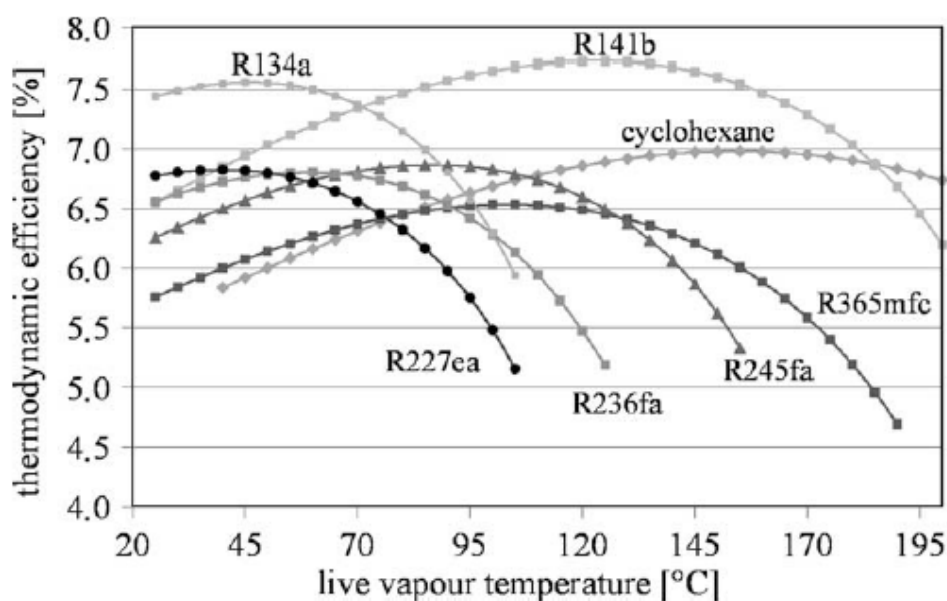
Για υψηλές θερμοκρασίες το μόνο ρευστο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το D4. Τα υπόλοιπα ρευστά ξεπερνούν το κρίσιμο σημείο. P_{ev} είναι η υψηλή πίεση στον ατμοποιητή και P_{cd} είναι η χαμηλή πίεση στον συμπυκνωτή. Ο πίνακας μας δείχνει ότι τα εργαζόμενα μέσα R134a και R245fa έχουν συγκρίσιμο βαθμό απόδοσης στα επίπεδα χαμηλών θερμοκρασιών. Επίσης έχουν και τους υψηλότερους δείκτες BWR. Το πεντάνιο έχει καλό βαθμό απόδοσης στην δεύτερη περίπτωση με αρκετά μικρότερη όμως πυκνότητα από το R245fa. Για το silicon oil η πολύ χαμηλή πυκνότητά του στις χαμηλές θερμοκρασίες είναι επιζήμια για την εφαρμογή. Για παράδειγμα είναι 61 φορές μικρότερη από την πυκνότητα του R245fa στην θερμοκρασία συμπύκνωσης των 30°C πράγμα που οδηγεί σε ανάγκη για πολύ μεγαλύτερο σε μέγεθος εξοπλισμό.

Φαίνεται λοιπόν ότι κάθε ρευστό χαρακτηρίζεται από ένα βέλτιστο εύρος θερμοκρασιών σε σχέση με την απόδοση του κύκλου και την πυκνότητά του. Γενικά, όσο υψηλότερο είναι το κρίσιμο σημείο τόσο υψηλότερο είναι και το εύρος των θερμοκρασιών[22].

3.4 Πλεονεκτήματα ORC

- Υψηλή αποδοτικότητα του κύκλου
- Υψηλός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου
- Χαμηλού βαθμού καταπονήσεις των μηχανικών μερών λόγω χαμηλής περιφερειακής ταχύτητας
- Χαμηλά RPM στροβίλου επιτρέπουν την άμεση επαφή με την γεννήτρια χωρίς μεγάλες σχέσεις ταχυτήτων.
- Καμία διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου λόγω της απουσίας υγρασίας
- Απλή διαδικασία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας
- Αυτόματη και αθόρυβη λειτουργία
- Μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας[23]

Οι αποδοτικότητες για διάφορα εργαζόμενα μέσα μπορεί να φανεί στο παρακάτω **σχήμα 64**. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται για ένα ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 75% κατά την εκτόνωση και 85% για την τροφοδοτική αντλία. Ο βαθμός απόδοσης δίδεται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου.



Σχήμα 64. Σύγκριση διαφορετικών εργαζόμενων μέσων

Το εργαζόμενο μέσο R134a παρουσιάζει μέγιστη απόδοση περίπου στους 75°C. Για τον λόγο αυτό και επειδή οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν κυρίως τέτοιες θερμοκρασίες το R134a επιλέγεται συχνά ως εργαζόμενο μέσο.

3.5 Σύστημα εκτόνωσης - στρόβιλος

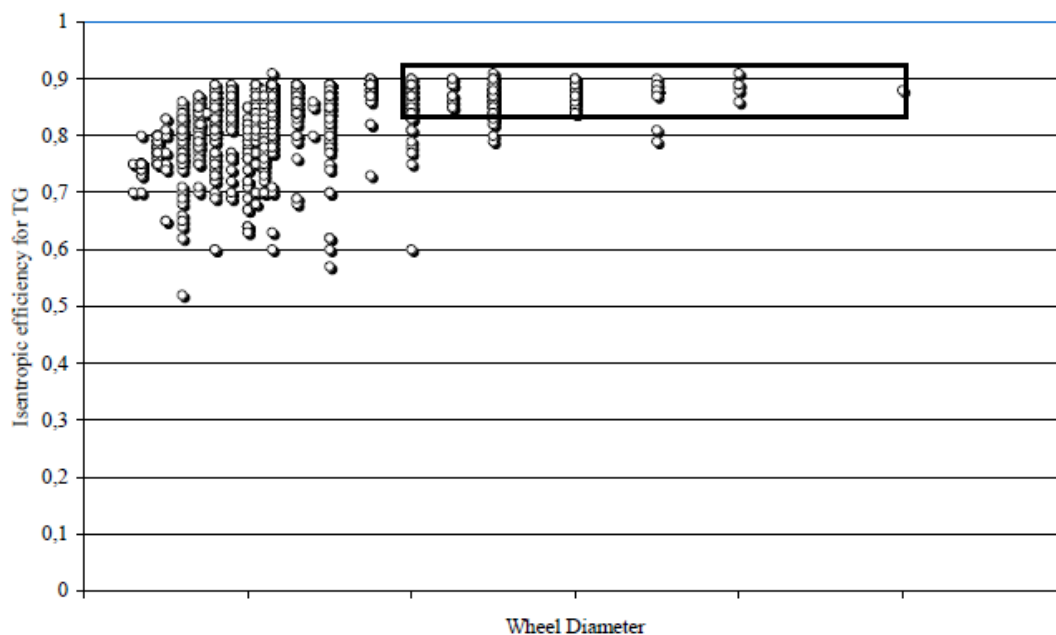
Από την εμπειρία που έχει αποκτηθεί μετά από σχεδιασμό και παραγωγή πειραματικών στρόβιλων μαζί με γεννήτρια σε δυαδικό κύκλο φαίνεται ότι οι συμβατικοί στρόβιλοι μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές γεωθερμίας και ανάκτησης θερμότητας. Η κύρια ανησυχία για την ικανότητα αντίδρασης των στοιχείων του στρόβιλου στην διάβρωση ενάντια σε ένα διαβρωτικό εργαζόμενο μέσο όπως είναι το μίγμα αμμωνίας-νερού βρίσκει λύση από την αυστηρή και κατάλληλη επιλογή των υλικών. Μια άλλη ανησυχία ήταν το πρόβλημα της διαρροής το οποίο με την πάροδο των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει αντιμετωπιστεί πλήρως. Με ακτινική ροή στην είσοδο του στρόβιλου επιτυγχάνεται η μέγιστη προσδοκώμενη ισεντροπική απόδοση. Απώλειες στο κιβώτιο σχέσεων, στην γεννήτρια και στα ρουλεμάν δεν ξεπερνούν το 10% της συνολικής ισεντροπικής ενθαλπικής πτώσης. Σε μεγάλες μονάδες ο στρόβιλος φτάνει σε ισεντροπικό βαθμό απόδοσης κοντά στο 85%.

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αρκετά ωφέλιμη η βελτιστοποίηση του δυαδικού κύκλου μαζί με τον βέλτιστο σχεδιασμό του στρόβιλου για μέγιστη απόδοση. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή στρόβιλων για δυαδικούς κύκλους όπως είναι ο οργανικός κύκλος Rankine και ο κύκλος Kalina δεν απαιτούν ξεχωριστές βελτιώσεις. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σπάνταρ εξοπλισμός όσο η συμβατότητα μεταξύ υλικών και εργαζόμενου μέσου λαμβάνεται υπόψη. Για παράδειγμα στον κύκλο Kalina όπου χρησιμοποιείται αμμωνία-νερό υλικά όπως χαλκός και αλουμίνιο απαγορεύονται. Το τιτάνιο είναι ένα υλικό που προτιμάται για την αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης.

Το σύστημα εκτόνωσης μπορεί να χωριστεί στα εξής υποσυστήματα:

- Προστασία του στρόβιλου. Σε περίπτωση που έχουμε κατάσταση κρίσιμου σημείου η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ζημία του στρόβιλου η μονάδα πρέπει να σταματήσει την λειτουργία της. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια μιας ρυθμιστικής βαλβίδας. Επίσης έχουμε φίλτρα στην είσοδο του στρόβιλου για να μην εισέλθουν κομμάτια από ενδεχόμενη ζημία.
- Στρόβιλος και συναφή βοηθητικά. Το σύστημα λαδιού είναι σημαντικό για την ομαλή λειτουργία του στρόβιλου. Επίσης σύστημα πτερυγίων χρησιμοποιείται για έλεγχο της ροής του εργαζόμενου μέσου.
- Κιβώτιο ταχυτήτων. Ο στρόβιλος περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι η γεννήτρια και συνεπώς χρειάζεται το κιβώτιο για να μεταδοθεί ομαλά η κίνηση προς την γεννήτρια.
- Γεννήτρια και σύνδεση με το δίκτυο. Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονου ή ασύγχρονου τύπου. Η σύγχρονη γεννήτρια περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα και χρειάζεται ηλεκτρική διέγερση για να παράγει ηλεκτρισμό. Η ασύγχρονη γεννήτρια περιστρέφεται γρηγορότερα από την ασύγχρονη και παράγει ηλεκτρισμό μέσω επαγωγής.
- Σύστημα ελέγχου. Πρωταρχικός σκοπός του συστήματος ελέγχου είναι να βεβαιώνει την ομαλή μεταφορά της ισχύος στην γεννήτρια από τον στρόβιλο. Η βέλτιστη παραγωγή ισχύος ελέγχεται έμμεσα ελέγχοντας την πίεση στην είσοδο του στρόβιλου.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την απόδοση στροβίλων της εταιρίας Cryostar. Στο ορθογώνιο τμήμα του διαγράμματος φαίνονται στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται μόνο σε κύκλους Kalina και ORC. Είναι φανερό ότι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ποικίλλει σε ένα εύρος από 0,82 μέχρι 0,90 .



Σχήμα 65. Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ως προς την διάμετρο του στροβίλου. Στο ορθογώνιο βρίσκονται σημεία σχεδιασμού για Kalina και ORC.

Πλεονεκτήματα της ακτινικής ροής στην είσοδο του στροβίλου για εφαρμογές με γεωθερμία.

Μετρήσεις και υπολογισμοί του συνολικού βαθμού απόδοσης που περιγράφονται παραπάνω αφορούν το σημείο σχεδιασμού. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία εκτός σχεδίασης τότε χρειάζονται να γίνουν εκ νέου υπολογισμοί. Αυτές οι περιπτώσεις είναι συχνές για εφαρμογές γεωθερμίας όταν οι συνθήκες χειμώνα και καλοκαιριού λαμβάνονται υπόψη. Σε τέτοια συστήματα τον περισσότερο χρόνο χρησιμοποιούνται συμπυκνωτές με αέρα ως μέσο ψύξης επειδή δεν υπάρχει πάντα διαθέσιμο νερό ψύξης.

Το καλοκαίρι λοιπόν οι υψηλές θερμοκρασίες μας οδηγούν σε μια υψηλή πίεση συμπύκνωσης και συνεπώς χαμηλό λόγο πίεσης κατά την εκτόνωση και χαμηλότερο έργο στην έξοδο από ότι θα είχαμε τον χειμώνα. Υπάρχουν διάφορα μέσα για να

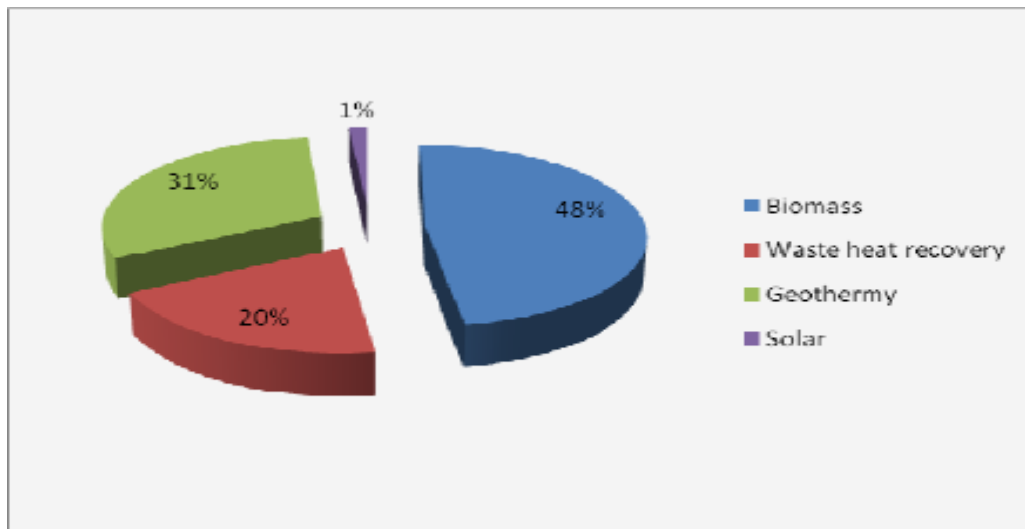
εξομαλυνθεί αυτή η εποχιακή διαφοροποίηση χρησιμοποιώντας διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής της αντλίας και του ψυχόμενου αέρα . Παρ' όλα αυτά είναι σχεδόν ακατόρθωτο να διατηρηθούν οι συνθήκες σταθερές καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου.

Σε αυτήν την περίπτωση είναι αρκετά επικερδές να χρησιμοποιηθεί ακτινική ροή στην είσοδο του στροβίλου χρησιμοποιώντας ακροφύσια εισόδου[24].

3.6 Εφαρμογές ORC

3.6.1 Καύση βιομάζας

Η βιομάζα είναι ευρέως διαθέσιμη σε έναν αριθμό γεωργικών και βιομηχανικών διαδικασιών όπως είναι τα γεωργικά απόβλητα ή τα εργοστάσια ξυλείας. Σήμερα πολλά εργοστάσια με καύση βιομάζας χρησιμοποιούν τον ORC, παράγοντας θερμότητα και ωφέλιμο έργο. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συνεχίζονται και αυξάνονται οι κατασκευές νέων εφαρμογών ORC οφείλεται στο γεγονός ότι είναι αποδεδειγμένη τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται και για αποκεντρωμένες εφαρμογές για την παραγωγή ισχύος μεγαλύτερη των 1 MWel από στερεά καύσιμα όπως είναι η βιομάζα. Ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 6 μέχρι 17%. Η απόδοση εξαρτάται από την μέγιστη ανακτώμενη θερμότητα και από τον θερμικό βαθμό απόδοσης του λέβητα. Στην περίπτωση της βιομάζας, ζεστό λάδι μεταφέρει την θερμότητα από τον θάλαμο καύσης σε ένα οργανικό μέσο. Ακόμη και αν η απόδοση του ORC είναι χαμηλή υπάρχουν κάποια πλεονεκτήματα όπως το γεγονός το σύστημα μπορεί να λειτουργεί χωρίς συντήρηση κάτι που οδηγεί σε μικρό κόστος προσωπικού. Επίσης το οργανικό μέσο σε αντίθεση με το νερό, έχει σχετικά χαμηλή ενθαλπική διαφορά μεταξύ υψηλής πίεσης και χαμηλής, το οποίο σημαίνει υψηλότερη παροχή μάζας και μείωση των απωλειών[22].



Σχήμα 66. Ποσοστά εφαρμογών στην αγορά του κύκλου Rankine

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι σχεδόν οι μισές εφαρμογές ORC χρησιμοποιούν ενέργεια από καύση βιομάζας. Γεωθερμία και θερμικά απόβλητα κατέχουν σημαντικό ποσοστό ενώ η ηλιακή ενέργεια βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο αλλά αναμένεται τα επόμενα χρόνια να αναπτυχθεί περισσότερο.

3.6.2 Εφαρμογές ORC με γεωθερμία

Στην εποχή μας ο οργανικός κύκλος Rankine είναι εμπορικά διαθέσιμος στην παραγωγή ισχύος της τάξεως των MW. Μια άλλη περίπτωση όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία ORC είναι οι γεωθερμικές πηγές θερμότητας. Η συμβατική τεχνολογία των σταθμών δεν είναι κατάλληλη να αξιοποιήσει πηγές με θερμοκρασία μεταξύ 80°C και 120°C. Ο κύκλος Kalina χρησιμοποιώντας μίγμα αμμωνίας-νερού είναι η μόνη τεχνολογία που μπορεί να ανταγωνιστεί τον κύκλο ORC. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του κύκλου ORC σε εργοστάσιο χρησιμοποιώντας γεωθερμία είναι το Neustadt-Glewe στην Γερμανία όπου ήταν και το πρώτο που χρησιμοποίησε γεωθερμία σε όλη την Γερμανία.

Η εγκατάσταση χρησιμοποιεί ζεστό νερό περίπου 98°C το οποίο αντλείται από ένα βάθος 2250m και μετατρέπει αυτήν την θερμότητα σε ισχύ 210 kW χρησιμοποιώντας τεχνολογία ORC. Το σύστημα του ORC βρίσκεται ενσωματωμένο στον κύκλο που διαγράφει το γεωθερμικό ρευστό. Το γεωθερμικό ρευστό αφού προσδώσει την θερμότητα του στον κύκλο ORC έχει μια θερμοκρασία περίπου 70-84°C και χρησιμοποιείται για περαιτέρω οικιακή θέρμανση.

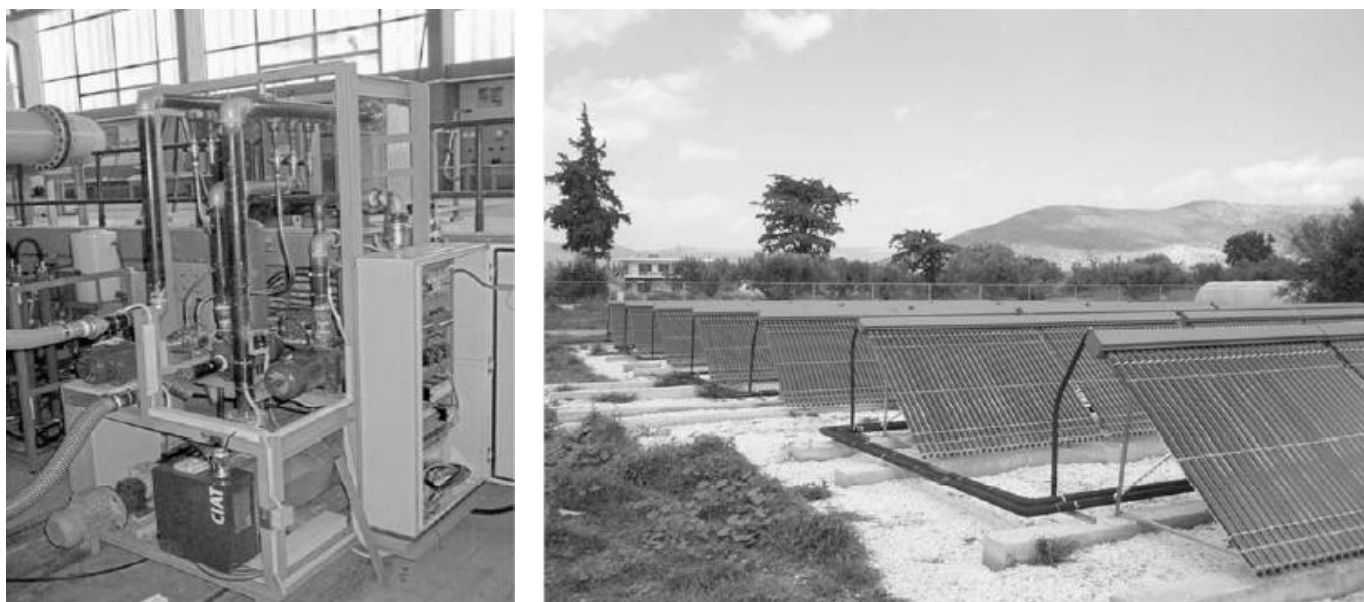
Παρόλο που ο κύκλος ORC παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα χρησιμοποιώντας θερμικά απόβλητα αναπτύσσονται νέες πρωτοποριακές ιδέες που μπορούν να συνδυαστούν με τον κύκλο ORC με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και την χρήση νέων ανανεωσιμων πηγών ενέργειας. Για την μοντελοποίηση αυτών των τεχνολογιών χρησιμοποιείται το υπολογιστικό περιβάλλον προσομείωσης IPSEpro.

Το IPSEpro παρουσιάζει μεγάλη ελαστικότητα σε υπολογιστικά εργαλεία και χρησιμοποιείται για ανάλυση θερμικών ισοζυγίων σε εργοστάσια παραγωγής, σχεδιασμό διάφορων συνιστωσών, πειραματικούς υπολογισμούς και βελτιστοποιήσεις όπως θα δούμε αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

3.6.3 Ηλιακή ενέργεια με οργανικό κύκλο Rankine

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια πηγή ενέργειας που παρουσιάζεται σε αφθονία και είναι ανεξάντλητη. Η αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως οδηγεί αυτόματα σε αύξηση των αναγκών για νερό με συνέπεια να υπάρχει πρόβλημα στα αποθέματα νερού καθώς μειώνονται ραγδαία. Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού είναι μια λύση. Η πιο συνήθης μέθοδος αφαλάτωσης του νερού είναι με την διαδικασία αλλαγής φάσης (MFS, Multi-Effect-Distillation) [20]. Ένα αυτόνομο σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης οδηγούμενο από οργανικό κύκλο Rankine μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει πόσιμο νερό από το νερό της θάλασσας. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι συνδυάζει μια αποδοτική τεχνολογία αφαλάτωσης (Reverse Osmosis) με μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Επίσης ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σαν πηγή ενέργειας σε ένα κύκλο Rankine ή ακόμη και σε συνδυασμό με κάποιο άλλο είδος ενέργειας ανάλογα με την εφαρμογή[21].



Σχήμα 67. Φωτογραφίες από ένα σύστημα ηλιακής αφαλάτωσης.

Ο οργανικός κύκλος Rankine φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με την προοπτική να μικρύνουν τα μεγέθη των εργοστασίων και συνεπώς το κόστος επένδυσης. Μέχρι στιγμής υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα συστήματα ORC με ηλιακή ενέργεια στην αγορά όπως:

- Εργοστάσιο CSP (concentrating solar power) 1 MWe με ORC ολοκληρώθηκε το 2006 στην Αριζόνα. Χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο πεντάνιο και παρουσιάζει έναν βαθμό απόδοσης περίπου 20%.
- Μονάδα 250 kWe δημιουργήθηκε στην Γερμανία το 2005 με βαθμό απόδοσης 15%.
- Μονάδα 1 kWe εγκαταστήθηκε στο Lesotho της Αφρικής. Σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι η ανάπτυξη και ενσωμάτωση μιας μικρής κλίμακας τεχνολογίας ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιώντας συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας σε έναν οργανικό κύκλο Rankine έτσι ώστε να πετύχουν κέρδη ανάλογα με μονάδες μεγάλης κλίμακας.



Σχήμα 68. Ηλιακοί συλλέκτες με ORC στο Lesotho, Africa 2007

4. Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας

4.1 Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για ενέργεια η οποία καλύπτεται κυρίως από την χρήση υγρών καυσίμων σε θερμικά εργοστάσια έχει σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες και συμβάλλει στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια καλή λύση αφού είναι σε αφθονία και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον ενώ βρίσκεται παντού σε όλα τα μέρη της γης. Ο κύκλος Kalina και ο οργανικός κύκλος του Rankine έχουν την ικανότητα να παράγουν ενέργεια από χαμηλής θερμοκρασίας πηγές θερμότητας. Ο κύκλος Rankine έχει αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές και χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας από γεωθερμία ή από θερμικά απόβλητα για ηλεκτροπαραγωγή. Hettiarachchi et al. [25] μελέτησε ένα θερμοδυναμικό κύκλο με χρήση γεωθερμικής πηγής και έδειξε ότι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά στο συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Το μίγμα αμμωνίας-νερού ήταν το προτιμότερο σε μια σειρά από οργανικά μίγματα.

Τα τελευταία χρόνια κάποια υβριδικά συστήματα θερμοδυναμικών κύκλων χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες παραβολικού τύπου για να παράγουν κεκορεσμένο ατμό θερμοκρασίας 250°C και μαζί με έναν καυστήρα αερίου ο οποίος υπερθερμαίνει τον ατμό σε θερμοκρασία 1300°C προτείνονται για να βελτιώσουν τον θερμικό βαθμό απόδοσης των συμβατικών θερμικών εγκαταστάσεων. Αυτών των ειδών οι κύκλοι έχουν μεγάλο λόγο πίεσης και επιτυγχάνουν καθαρό βαθμό απόδοσης (ο λόγος την παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια του καυσίμου που καταναλώθηκε) από 75%-95% , και έναν βαθμό απόδοσης για το σύστημα ηλιακής ενέργειας (ο λόγος της ηλιακής θερμότητας προς την συνολική θερμότητα που εισάγεται στο σύστημα) 45%-60%.

Η τεχνολογία του κύκλου Kalina έχει αναπτυχθεί εδώ και δύο δεκαετίες. Παρ' όλα αυτά το εμπορικό μάρκετινγκ αυτών των συστημάτων ξεκίνησε λίγα χρόνια πριν. Ο κύκλος Kalina χρησιμοποιώντας διμερές ρευστό για εργαζόμενο μέσο έχει μοναδική ικανότητα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με καλή απόδοση ανακτώντας την από χαμηλής ενθαλπίας πηγές. Η σύνθεση του μίγματος ποικίλλει κατά την διάρκεια του κύκλου. Η υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι οι θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας και αυτής που δουλεύει καλά ο κύκλος ταιριάζουν απόλυτα συν το γεγονός της ύπαρξης των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται για να αναθερμάνουν το εργαζόμενο μέσο σε διάφορα σημεία του κύκλου. Ο κύκλος Kalina χρησιμοποιεί τα ίδια μηχανικά μέρη με αυτά ενός συμβατικού σταθμού διότι το μοριακό βάρος της αμμωνίας είναι πολύ κοντά με αυτό του νερού.

Η πρώτη αναφορά για τον κύκλο Kalina περιελάμβανε μια εφαρμογή συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιούσε θερμικά απόβλητα για την παραγωγή ενέργειας [26]. Επίσης, χρησιμοποιώντας αμμωνία-νερό εδείχθει ότι έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από αυτόν του κύκλου Rankine. Μια σύγκριση των δύο κύκλων από τους El-Sayed και Tribus [27] έδειξε 10%-20% αύξηση της αποδοτικότητας. Kalina and Leibowitz [28] παρουσίασαν ένα θερμοδυναμικό κύκλο

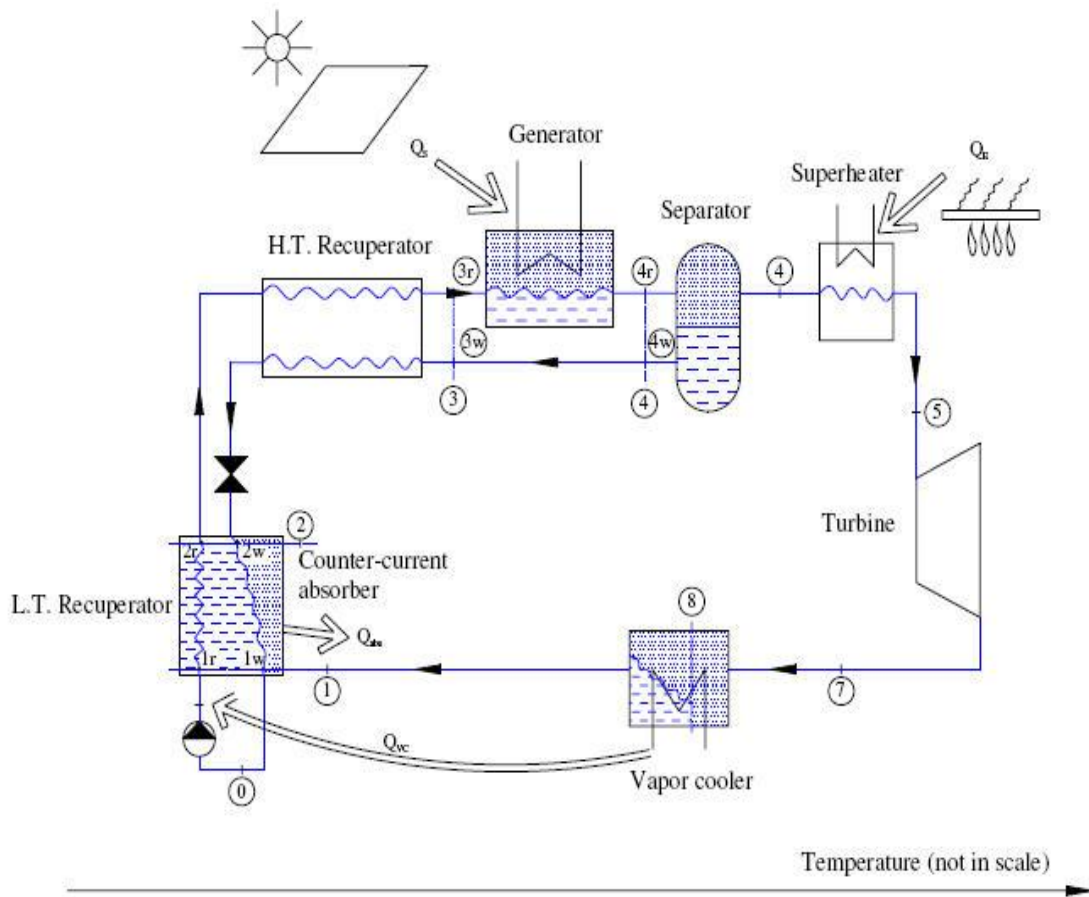
για γεωθερμικές εφαρμογές . Σε αυτήν την έρευνα φαίνεται ότι ο κύκλος Kalina έχει κερδίσει μεγαλύτερο έργο στην έξοδο του για δεδομένη γεωθερμική πηγή θερμότητας σε σύγκριση με τον οργανικό κύκλο του Rankine.

Όσον αφορά τα υβριδικά συστήματα χρησιμοποιείται σαν εργαζόμενο μέσο μίγμα αμμωνίας-νερού. Αυτό ατμοποιείται μερικώς με πηγή ενέργειας την ηλιακή. Το ατμώδες μίγμα αμμωνίας –νερού το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο μίγμα στον διαχωριστή υπερθεμαίνεται από εξωτερική πηγή θερμότητας και στη συνέχεια εκτονώνεται στον στρόβιλο. Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για την ατμοποίηση του μίγματος σε ποσοστό 95% της μονάδας απαίτησης θερμότητας. Το υπόλοιπο μέρος που απαιτείται για την υπερθέρμανση του ατμού καλύπτεται από κάποια εξωτερική πηγή χαμηλής θερμοκρασίας. Μέσα από τον συνδυασμό αυτών των πηγών επιταγχάνεται επαρκή ενέργεια. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν αποδειχθεί μια βέλτιστη επιλογή λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο της ωφέλιμης θερμότητας προς το κόστος για εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας μεγαλύτερες των 80°C.

4.2 Περιγραφή του κύκλου.

Ο προτεινόμενος κύκλος αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Εναλλάκτες θερμότητας με αντιρροή (αναθερμαντές)
- Ατμοποιητής
- Διαχωριστής
- Στρόβιλος
- Απορροφητής
- Υπερθερμαντής
- Συμπυκνωτής



Σχήμα 69. Σχηματικό διάγραμμα κύκλου Kalina με ηλιακή ενέργεια.

Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σχηματικό διάγραμμα του κύκλου. Το πλούσιο σε αμμωνία κεκορεσμένο διάλυμα κλάσματος μάζας X_r (σημείο 0) το οποίο αφήνει τον απορροφητή και αντλείται σε υψηλή πίεση δια μέσου της τροφοδοτικής αντλίας (σημείο 1r). Έπειτα προθερμαίνεται στον χαμηλής θερμοκρασίας και στον υψηλής θερμοκρασίας αναθερμαντή (σημεία 2r,3r) και οδηγείται στον ατμοποιητή. Στον ατμοποιητή το μίγμα θερμαίνεται στην θερμοκρασία T_H (σημείο 4r) όπου ατμοποιείται μερικώς χρησιμοποιώντας την ηλιακή ενέργεια που παρέχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Στη συνέχεια το μίγμα εισέρχεται στον διαχωριστή όπου διαχωρίζεται σε ένα πλούσιο σε αμμωνία μίγμα ατμού X_v (σημείο 4) και σε ένα φτωχό σε αμμωνία μίγμα υγρής φάσης κλάσματος μάζας X_w (σημείο 4w). Ο υψηλής πίεσης κεκορεσμένος ατμός υπερθερμαίνεται σε μια θερμοκρασία T_{max} στον υπερθερμαντή (σημείο 5) από εξωτερική πηγή ενέργειας και εκτονώνεται στον στρόβιλο (σημείο 7) και φτάνει σε μια χαμηλή πίεση P_L . Κατά την εκτόνωση του στο στρόβιλο έχουμε και την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεννήτριας.

Ο ατμός που εκτονώθηκε ψύχεται στον συμπυκνωτή σε μια θερμοκρασία T_L . Στην περίπτωση όπου στο σημείο 7 έχουμε κατάσταση υπέρθερμου ατμού τότε η ψύξη του γίνεται σε δύο στάδια: πρώτα ο ατμός ψύχεται μέχρι το σημείο κορεσμένου ατμού (σημείο 8) και μετά συμπυκνώνεται στην θερμοκρασία T_L (σημείο 1). Το

φτωχό διάλυμα κορεσμένου υγρού (σημείο 4w) αφού προσδώσει κάποιο μέρος της θερμότητας του στον αναθερμαντή υψηλής θερμοκρασίας, στραγγαλίζεται στην χαμηλή πίεση (σημείο 2w) και αναμειγνύεται με το διάλυμα που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή ολοκληρώνοντας τον κύκλο.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές παράμετροι που είναι ικανοί να καθορίσουν την λειτουργία του κύκλου. Αμελούνται οι πτώσεις πιέσεων και οι απώλειες θερμότητας στους σωλήνες του συστήματος. Οι ανεξάρτητες παραμέτροι είναι:

- Χαμηλή πίεση P_L
- Η ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου, T_L
- Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, T_{max}
- Το κλάσμα μάζας της αμμωνίας στον ατμό, X_v

Οι παρακάτω υποθέσεις χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση του κύκλου.

- Η θερμοκρασία μετά την έξοδο του ατμοποιητή είναι $T_H = 70^\circ\text{C}$. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν εύκολα να διαθέσουν πηγή ενέργειας με θερμοκρασία 70°C .
 - Ο ατμός υπερθερμαίνεται σε μια θερμοκρασία των 130°C . Αυτές οι θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως για παράδειγμα παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες ή γεωθερμικά συστήματα.
 - Η κατάσταση του μίγματος μετά τον απορροφητή είναι κεκορεσμένη.
 - Η ελάχιστη και η μέγιστη διαφορά του κλάσματος μάζας μεταξύ πλούσιου και φτωχού διαλύματος ΔX_{min} και ΔX_{max} είναι 5% και 15% αντίστοιχα.
 - Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι 80%. Αυτή η τιμή αποτελεί μια ρεαλιστική απόδοση του ισεντροπικού βαθμού σε υπάρχοντες στροβίλους μικρής κλίμακας (1-10 MWe) σε εργοστάσια παραγωγής.
 - Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών-αναθερμαντών είναι 85%.
 - Ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι 75%.
- Οι πτώσεις πίεσης στον κύκλο είναι ως εξής: αναθερμαντές, ατμοποιητής, συμπυκνωτής, υπερθερμαντής : 2% , Απορροφητής : 3%.
- Η εκτόνωση στην στραγγαλιστική βαλβίδα θεωρείται ισενθαλπική.

Καθορισμός των εξισώσεων-παραμέτρων

Η συνήθης έκφραση για τον θερμικό βαθμό απόδοσης είναι:

$$\eta = \frac{W_t}{Q_t}$$

Όπου W_t η ενέργεια που παράγεται και Q_t η ενέργεια που δίδεται στο σύστημα. Η συνολική θερμότητα που δίδεται στον κύκλο αποτελείται από την ποσότητα θερμότητας που παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια για να ατμοποιηθεί μερικώς το μίγμα αμμωνίας-νερού Q_s και από την θερμότητα του υπερθερμαντή Q_ε :

$$Q_t = Q_s + Q_\varepsilon$$

Κάποιοι θερμοδυναμικοί παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της απόδοσης του κύκλου και είναι οι εξής:

Ο λόγος θερμότητας, HR (heat ratio) είναι ο λόγος της εξωτερικής θερμότητας προς την συνολική θερμότητα που εισάγεται στον κύκλο.

$$HR = \frac{Q_\varepsilon}{Q_t}$$

Ο παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας, PESF (primary energy saving factor) , είναι ο λόγος της θερμότητας από τον ηλιακό συλλέκτη προς την συνολική θερμότητα εισόδου.

$$PESF = \frac{Q_s}{Q_t} = 1 - HR$$

Ο παράγοντας απόδοσης, PF (performance factor) είναι ο λόγος του έργου που παράγεται προς την εξωτερική πηγή θερμότητας.

$$PF = \frac{W_t}{Q_\varepsilon} = \frac{\eta}{1 - PESF}$$

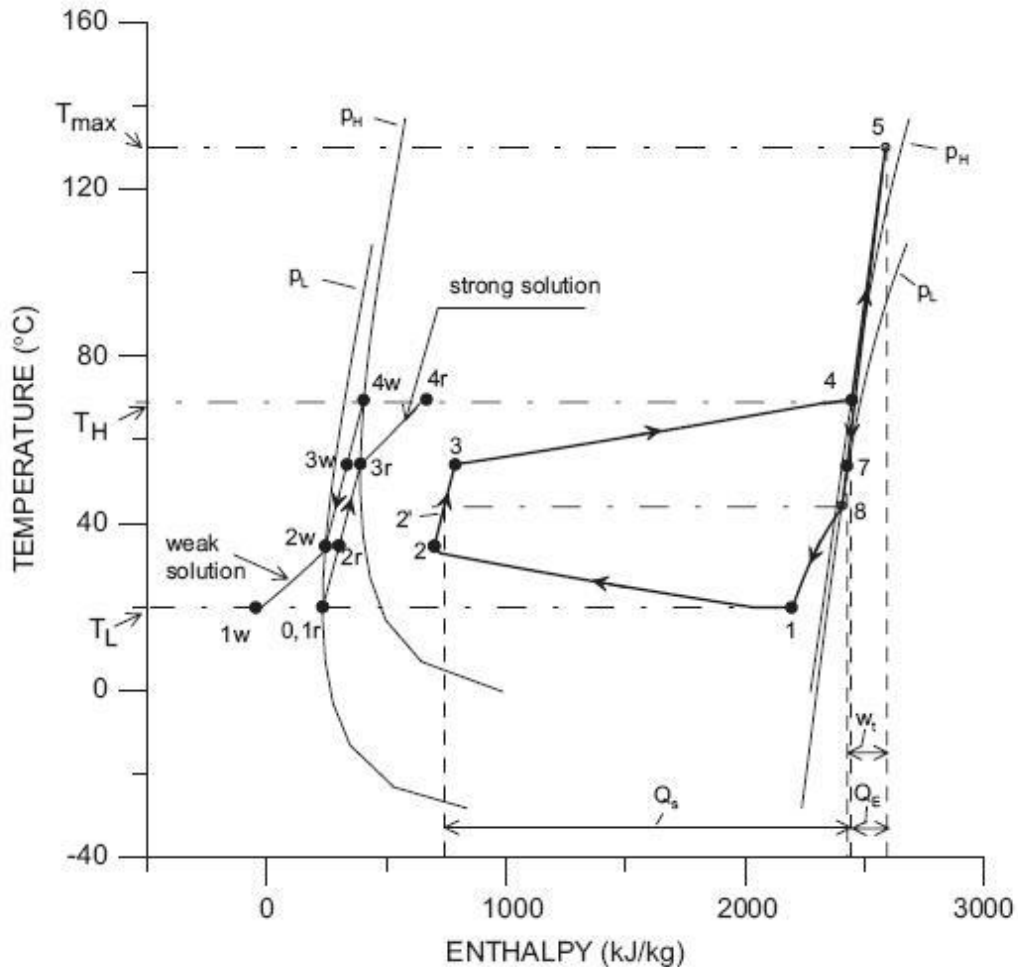
Εξίσωση Μάζας

Ποσότητα μάζας (1+g) kg του διαλύματος ρέει προς τον ατμοποιητή και μετά διαχωρίζεται σε 1 kg ατμώδους μίγματος και σε g kg φτωχού διαλύματος. Από την εξίσωση μάζας έχω:

$$1X_v + gX_w = (1 + g)X_R \leftrightarrow g = \frac{X_v - X_R}{X_R - X_w} \quad \forall 1kg NH_3 \text{ vapor}$$

Παρουσίαση του κύκλου σε διαγράμματα T-s και T-h.

Για την αναπαράσταση του κύκλου σε διαγράμματα T-s και T-h χρησιμοποιήθηκε κώδικας υπολογιστή. Η τεχνική ανάλυση όπου αρχικά αναπτύχθηκε για έναν αναστρέψιμο κύκλο Kalina [30], βασίζεται στην υπόθεση ότι σε κάθε σημείο του κύκλου δύο ροές διαφορετικής συγκέντρωσης αμμωνίας η κάθε μια σε ομοροή ή σε αντιρροή εναλλάσσουν θερμότητα μεταξύ τους και με τα τοιχώματά τους. Στο διάγραμμα θερμοκρασίας-ενθαλπίας κάθε ποσότητα θερμότητας όπως επίσης και το παραγόμενο έργο που περιλαμβάνονται σε κάθε διαδικασία απεικονίζονται σαν μήκη πάνω στον άξονα των ενθαλπιών, ενώ στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας θερμότητα ή έργο παρουσιάζονται σαν εμβαδό περιοχής.

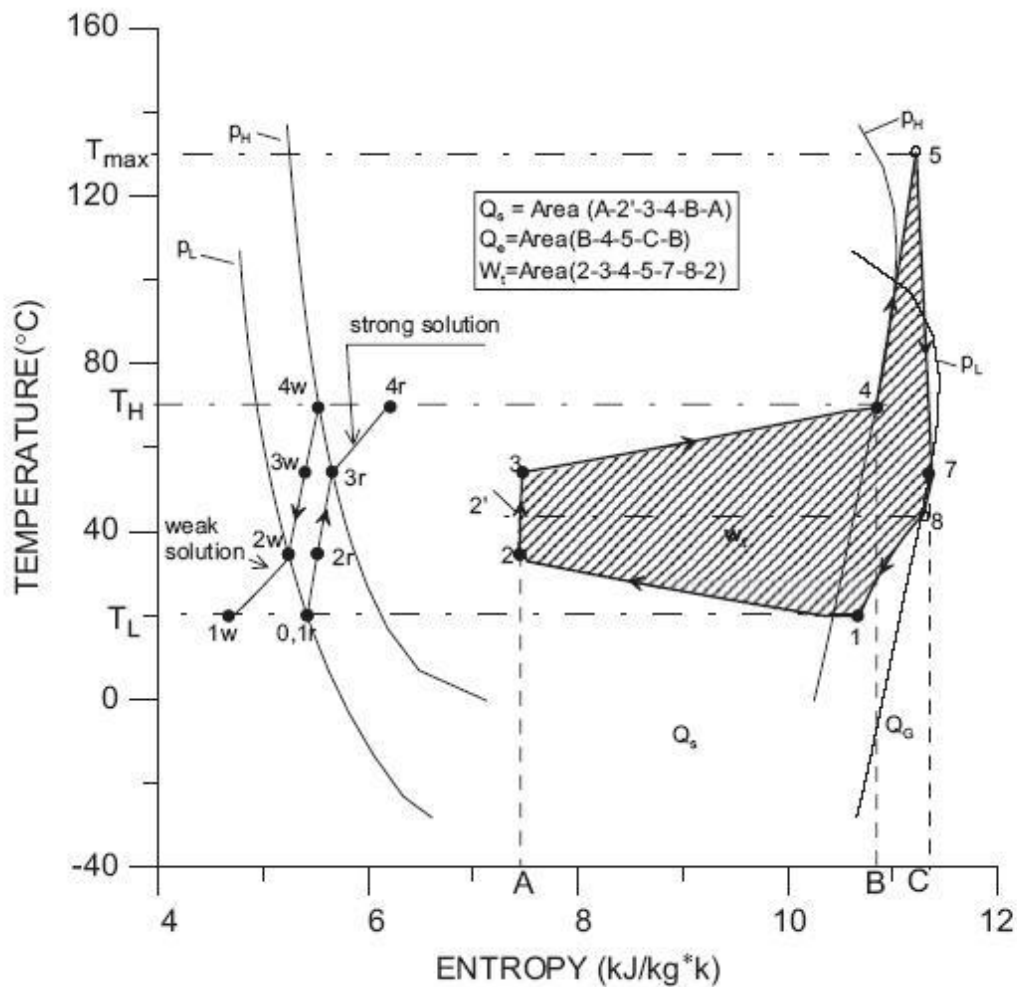


Σχήμα 70. T-h διάγραμμα του κύκλου Kalina

Στα διαγράμματα αυτά, οι καμπύλες ισορροπίας για τις καταστάσεις κορεσμένου υγρού και ατμού του μίγματος απεικονίζονται και για τα δύο επίπεδα πιέσεων. Κάθε σημείο της καμπύλης αποτυπώνει ένα κεκορεσμένο μίγμα συγκεκριμένου κλάσματος μάζας εκτεινώντας από 0% (pure water) στο υψηλότερο σημείο της κεκορεσμένης καμπύλης μέχρι 100% (pure ammonia) στο χαμηλότερο σημείο της. Η γραμμή 4w-1w περιγράφει την αλλαγή του φτωχού διαλύματος το οποίο εξέρχεται από τον διαχωριστή ενώ η γραμμή 1r-4r περιγράφει την αλλαγή του συνολικού διαλύματος που εξέρχεται από τον απορροφητή.

- Φτωχό διάλυμα
 Η γραμμή 2w-1w περιγράφει την ισοδύναμη ροή κατά την διαδικασία της απορρόφησης για 1 kg ατμού από g kg φτωχού διαλύματος.
 Η γραμμή 4w-2w δείχνει την διαδικασία ψύξης του φτωχού διαλύματος στον αναθερμαντή υψηλής θερμοκρασίας.
- Πλούσιο διάλυμα
 1r-3r περιγράφει την θέρμανση του διαλύματος στον εναλλάκτη υψηλής θερμοκρασίας.
 3r-4r παρουσιάζει την ισοδύναμη ροή κατά την διαδικασία της ατμοποίησης
- Ατμώδες διάλυμα

Η γραμμή 4-5 είναι η υπερθέρμανση του ατμού
 Η γραμμή 5-7 είναι η εκτόνωση του ατμού στον στρόβιλο
 Η γραμμή 7-8-1 περιγράφει την ψύξη και την μερική συμπύκνωση του ατμού



Σχήμα 71. T-s διάγραμμα του κύκλου Kalina

Στη συνέχεια θα γίνουν διάφορες συσχετίσεις με τιμές και παραμέτρους του κύκλου και λαμβάνονται υπόψη οι εξής συνθήκες:

- Ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου $T_L = 20^\circ\text{C}$
- Θερμοκρασία ατμοποίησης $T_H = 70^\circ\text{C}$
- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου $T_{\text{max}} = 130^\circ\text{C}$
- Χαμηλή πίεση, $P_L = 0.18\text{-}2\text{bar}$
- Ατμώδες κλάσμα μάζας $X_n = 70\text{-}95\%$

Η χαμηλή πίεση του κύκλου, P_H απορεί από το ατμώδες κλάσμα μάζας X_n και από την θερμοκρασία στην έξοδο του ατμοποιητή T_H . Σύμφωνα με τις βασικές υποθέσεις η θερμοκρασία του ατμού μετά το τέλος της ατμοποίησης παραμένει

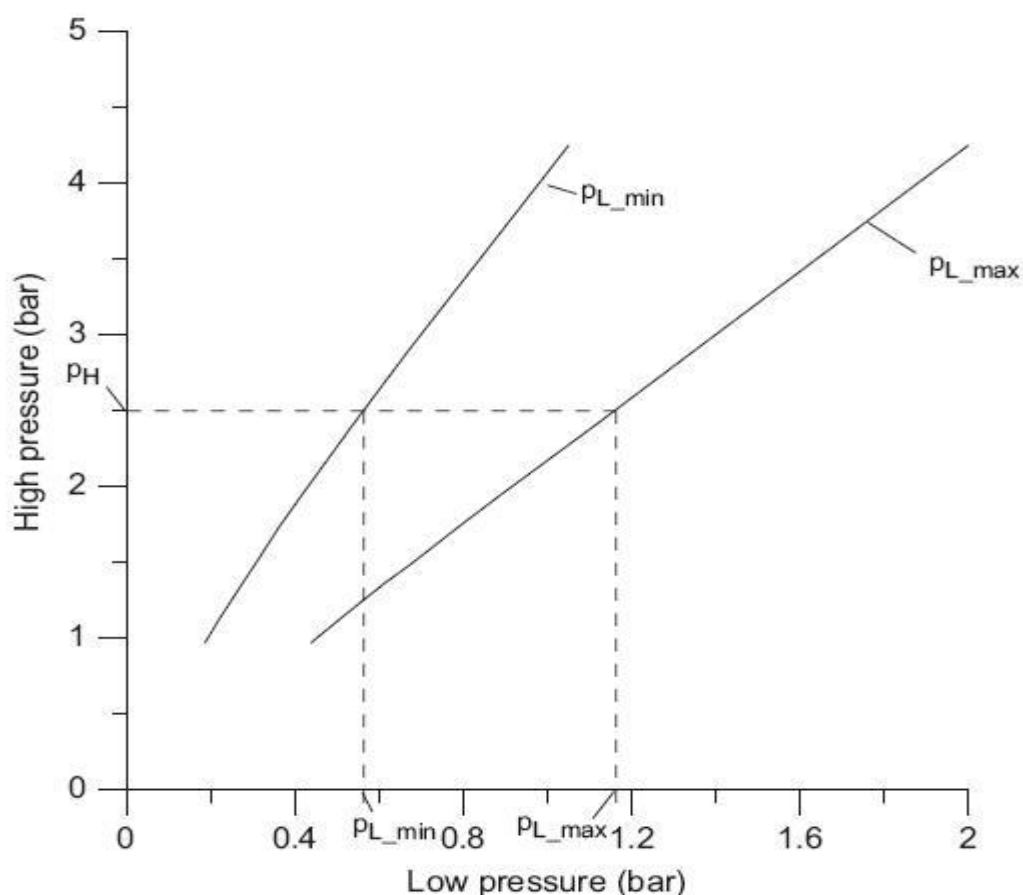
σταθερή. Η υψηλή πίεση του κύκλου έχει υπολογιστεί για διάφορα κλάσματα μάζας του ατμού (70-90%) σε 1,02-4,50 bar. Οι τιμές προέκυψαν από την σχέση :

$$P_H = \frac{1}{1.9 - 1.85X_v^{1.93}}$$

Στο **σχήμα 72** η ελάχιστη και η μέγιστη χαμηλή πίεση ($P_{L_{min}}$ και $P_{L_{max}}$) αναπαρίσταται γραφικά σε σχέση με την υψηλή πίεση για ένα εύρος τιμών του κλάσματος μάζας ($X_v = 70-95\%$) σύμφωνα με τις σχέσεις:

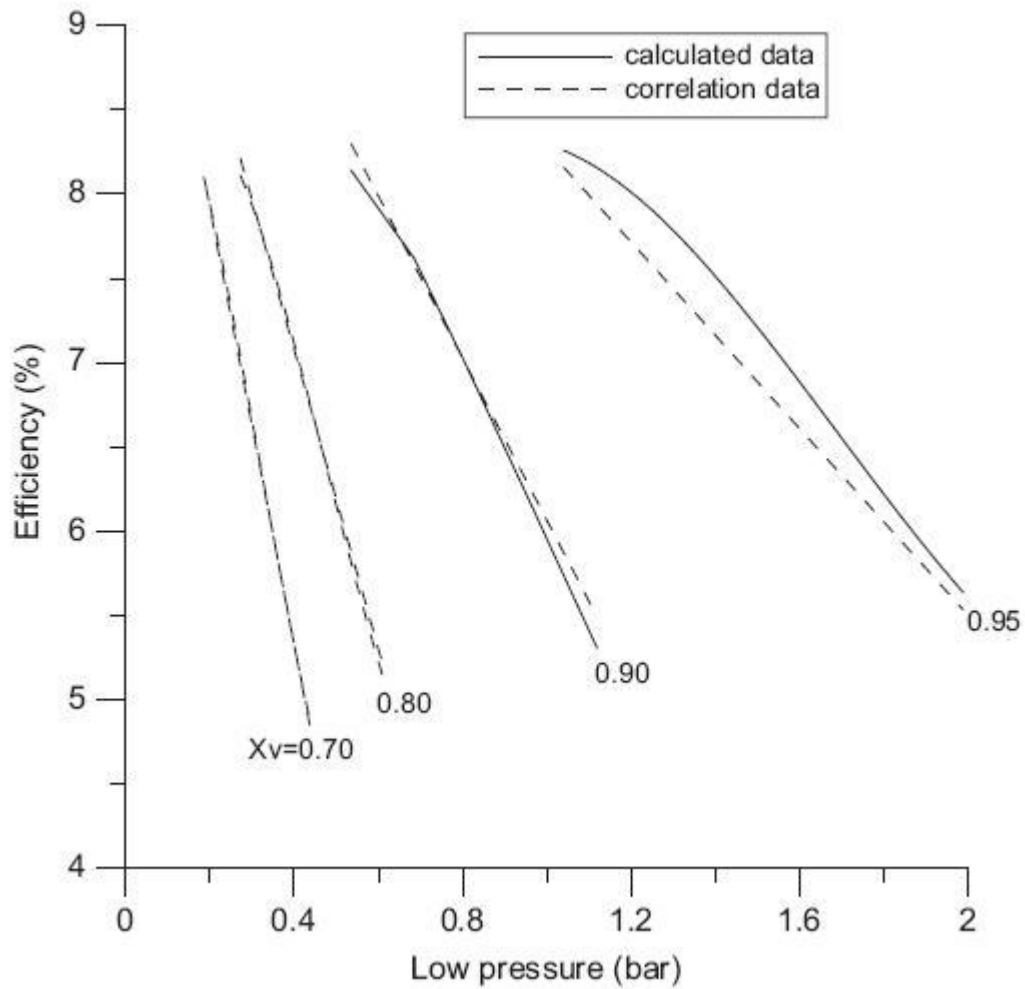
$$P_{L_{min}} = \frac{1}{16.88 - 15.38X_v - 1.45X_v^2}$$

$$P_{L_{max}} = \frac{1}{4.86 - 1.1X_v - 3.67X_v^2}$$

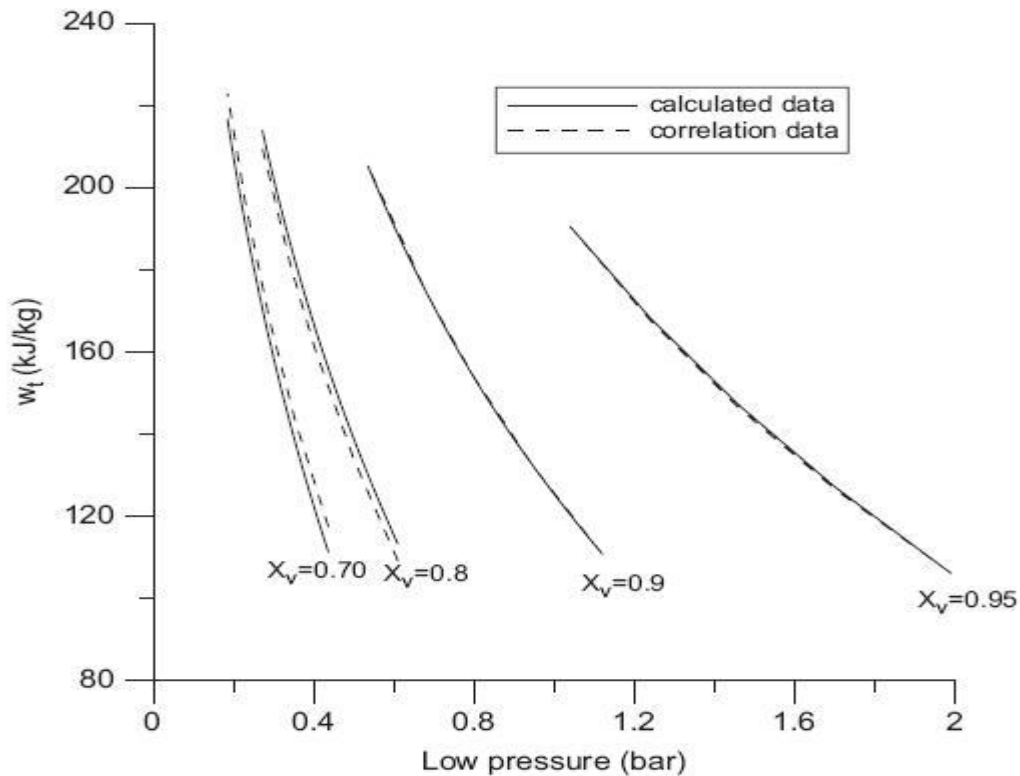


Σχήμα 72. Υψηλή πίεση σε σχέση με την χαμηλή πίεση για $\Delta X = 5\%$ ($P_{L_{min}}$) και $\Delta X = 15\%$ ($P_{L_{max}}$).

Η απόδοση του κύκλου υπολογίζεται για διάφορες τιμές της χαμηλής πίεσης και του ατμώδους κλάσματος μάζας και παρουσιάζεται στα **σχήματα 73 και 74**. Για μια δεδομένη τιμή του κλάσματος μάζας, αυξάνοντας την χαμηλή πίεση προκαλείται μείωση του έργου εξόδου και της αποδοτικότητας του κύκλου. Επιπλέον, μειώνοντας το X_v το σύστημα γίνεται πιο ευαίσθητο για μικρές αλλαγές της χαμηλής πίεσης.



Σχήμα 73. Εξάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης με την χαμηλή πίεση και το κλάσμα μάζας.



Σχήμα 74. Εξάρτηση του έργου εξόδου με την χαμηλή πίεση και το κλάσμα μάζας.

Η μέγιστη απόδοση και το μέγιστο έργο εξόδου επιτυγχάνονται στις τιμές ελάχιστης χαμηλής πίεσης. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του κύκλου υπολογίστηκε $\eta=8,3\%$ για $X_v = 95\%$ και $P_L = 1,04$ bar. Το έργο εξόδου μεγιστοποιείται για $X_v = 70\%$ και $P_L = 0,185$ bar. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται οι συνθήκες λειτουργίας του κύκλου για μέγιστη απόδοση και μέγιστο έργο εξόδου χωριστά.

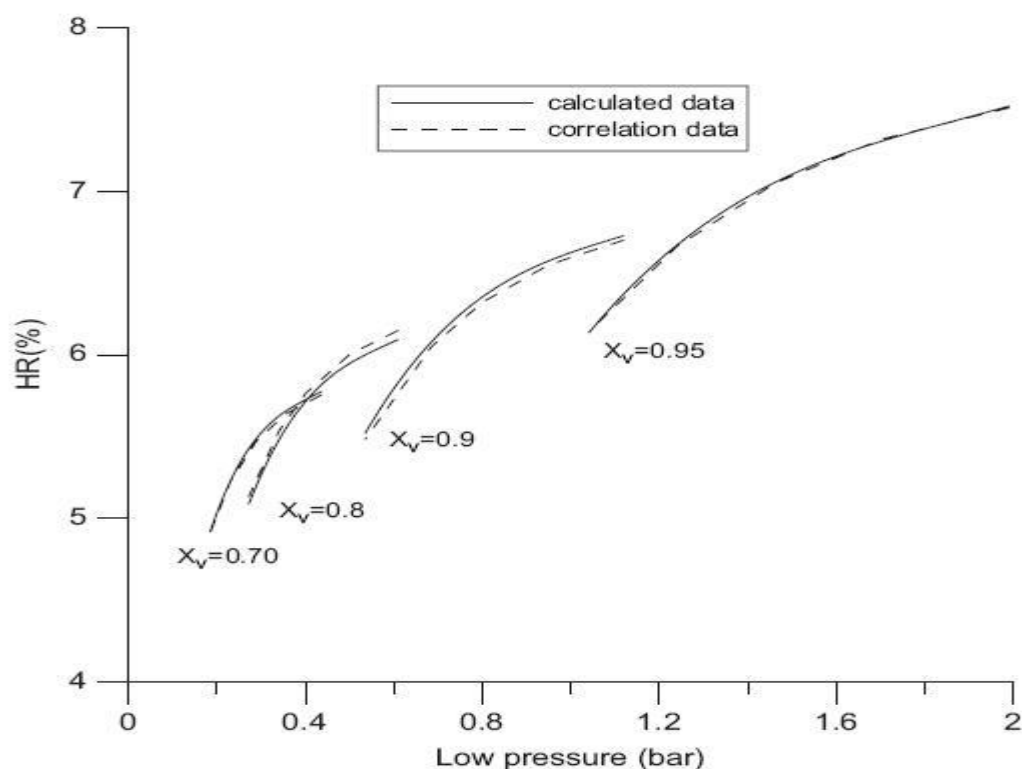
Πίνακας 8. Μεγέθη του κύκλου για μέγιστη αποδοτικότητα.

Low pressure (bar)	1.04
High pressure (bar)	4.6
Maximum temperature, T_{max} ($^{\circ}C$)	130
Vapor mass fraction, X_v (%)	95
Strong solution mass fraction, X_R (%)	35
Weak solution mass fraction, X_W (%)	30
Mass ratio (kg strong solution/kg vapor)	12.3
Total heat input, Q_T (kJ/kg vapor)	2302.6
Heat input from external heat source, Q_E (kJ/kg vapor)	141.2
Net heat rejection (kJ/kg vapor)	1504.9
Work output, W_r (kJ/kg vapor)	190.5
Efficiency, η (%)	8.3
Heat ratio, HR (%)	6.1
Primary energy saving factor, PESF (%)	93.9
Performance factor, PF	1.35

Πίνακας 9. Μεγέθη του κύκλου για μέγιστο έργο εξόδου και παράγοντα απόδοσης.

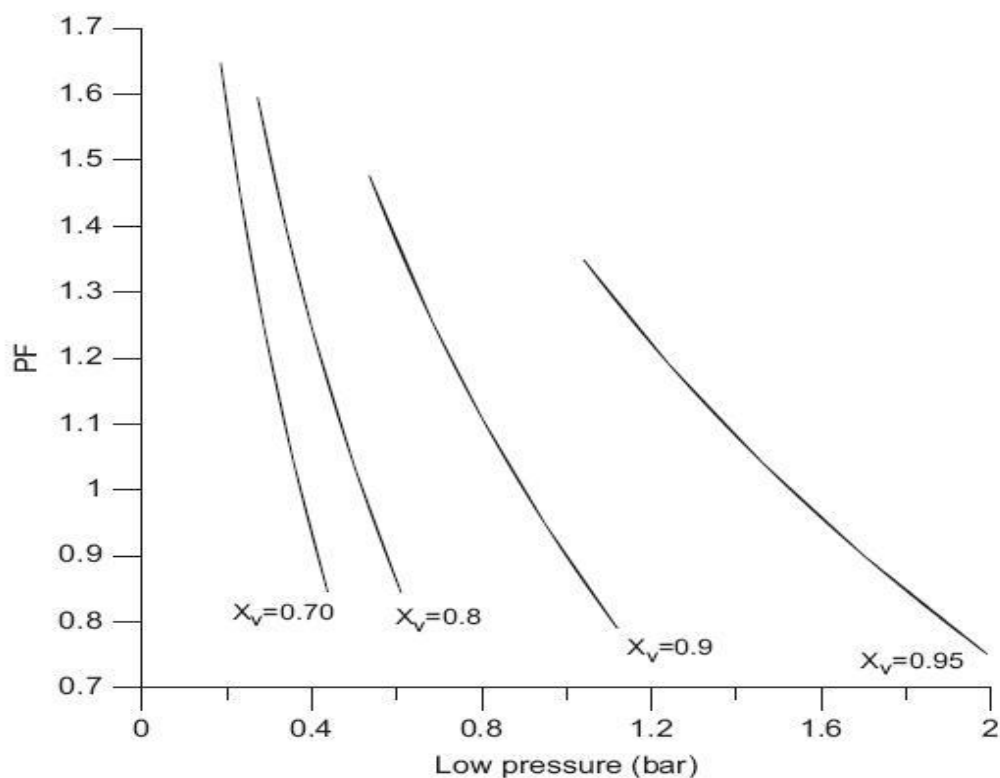
Low pressure (bar)	0.185
High pressure (bar)	1.05
Maximum temperature, T_{max} (°C)	130
Vapor mass fraction, X_v (%)	70
Strong solution mass fraction, X_R (%)	15
Weak solution mass fraction, X_W (%)	10
Mass ratio (kg strong solution/kg vapor)	11.4
Total heat input, Q_T (kJ/kg vapor)	2675.9
Heat input from external heat source, Q_E (kJ/kg vapor)	131.5
Net heat rejection (kJ/kg vapor)	1941.4
Work output, W_r (kJ/kg vapor)	216.7
Efficiency, η (%)	8.1
Heat ratio, HR (%)	4.9
Primary energy saving factor, PESF (%)	95.1
Performance factor, PF	1.65

Λόγω του ότι έχουμε διαφορετικές πηγές ενέργειας οι οποίες συνεισφέρουν στο σύστημα (ηλιακή ενέργεια και εξωτερική πηγή θερμότητας) με διαφορετική ποσότητα η κάθε μια είναι χρήσιμο να παρασταθούν γραφικά και οι παράγοντες HR και PF, που έχουν οριστεί παραπάνω, σε σχέση με την χαμηλή πίεση και το κλάσμα μάζας.



Σχήμα 75. Εξάρτηση του λόγου θερμότητας από την χαμηλή πίεση και το κλάσμα μάζας.

Βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα ότι για δεδομένο ατμώδες κλάσμα μάζας ο λόγος θερμότητας HR αυξάνεται όσο αυξάνεται η χαμηλή πίεση. Ο παράγοντας απόδοσης PF αντίθετα αυξάνεται μειώνοντας την χαμηλή πίεση και φτάνει στο μέγιστο σημείο του για $X_v = 70\%$.



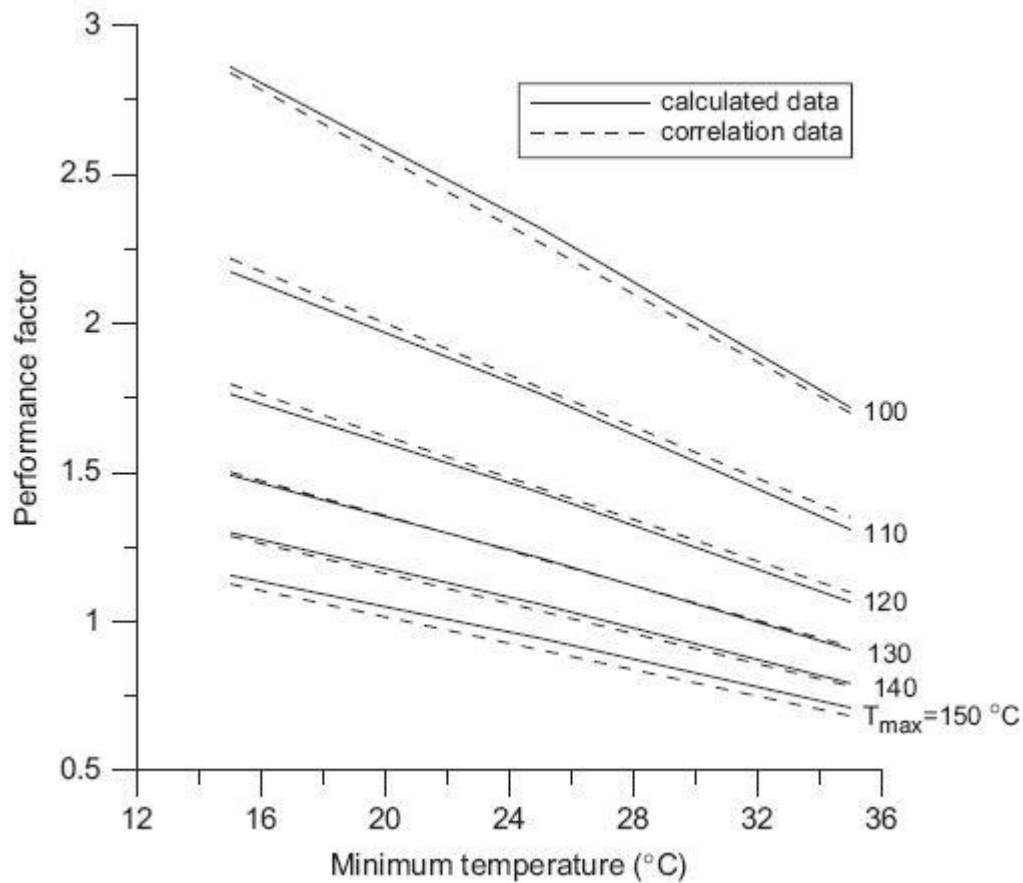
Σχήμα 76. Παράγοντας απόδοσης με το κλάσμα μίγματος.

4.3 Επίδραση της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου.

Αλλαγή στην ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου επιφέρει αλλαγές και στην απόδοσή του. Αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, του έργου εξόδου και του παράγοντα απόδοσης.

Πίνακας 10 . Επίδραση της T_L στην απόδοση του κύκλου.

T_{max} (°C)		130	
p_L (bar)	1		
T_L (°C)	15	25	35
p_H (bar)	4.85	3.45	2.44
X_W (%)	33	28	22
X_R (%)	38	33	27
X_v (%)	96	94	90
Q_L (kJ/kg vapor)	2314.0	2289.7	2230.5
Q_E (kJ/kg vapor)	142.3	139.7	137.6
Net heat rejection(kJ/kg vapor)	1503.5	1537.4	1626.9
W_L (kJ/kg vapor)	212.1	169.5	124.7
η (%)	9.2	7.4	5.6
HR (%)	6.2	6.1	6.2
PF	1.49	1.21	0.9
PESF (%)	93.8	93.9	94.0



Σχήμα 77. Εξάρτηση του παράγοντα απόδοσης για διάφορες τιμές ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας.

Ο παράγοντας PF υπολογίστηκε για διάφορες τιμές της T_{max} (100-150°C). Αν μειωθεί η T_{max}, αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης φτάνοντας σε ένα μέγιστο για T_{max}=100°C και T_l = 15°C [29].

5. Υπολογιστικό μέρος

5.1 Γενικά

Τα ενεργειακά αποθέματα και η ραγδαία αύξηση των ενεργειακών αναγκών τον τελευταίο αιώνα συντελούν στην ανάγκη για αναζήτηση νέων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας κυρίως από ανανεώσιμες πηγές όπως είναι η γεωθερμία και η ηλιακή ενέργεια. Οι τεχνολογίες του κύκλου Kalina και του οργανικού κύκλου Rankine (ORC) μπορούν να βοηθήσουν σε αυτόν τον σκοπό αφού είναι ικανές να χρησιμοποιήσουν πηγές ενέργειας με χαμηλή θερμοκρασία, ανανεώσιμες και μη, που σε άλλη περίπτωση θα παρέμεναν ανεκμετάλλευτες. Σε αυτό το υπολογιστικό μέρος της άσκησης θα γίνει εκτενής μελέτη στους δύο αυτούς κύκλους κυρίως σε συνδυασμό με την ενέργεια της γεωθερμίας. Θα υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης των κύκλων σε σχέση με διάφορους παραμέτρους όπως είναι η θερμοκρασία του ρευστού από την πηγή, η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, η υψηλή πίεση λειτουργίας του κύκλου, το κλάσμα μάζας του μίγματος αμμωνίας νερού για τον κύκλο Kalina, το είδος του οργανικού μέσου για τον Rankine, αριθμός εναλλακτών, βαθμός απόδοσης εναλλακτών, ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου κτλ. Στην συνέχεια θα γίνει προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης τιμής του βαθμού απόδοσης για τους δύο κύκλους και τέλος σύγκριση των αποτελεσμάτων σε εξάρτηση με την επίδραση των διάφορων παραμέτρων.

Το υπολογιστικό περιβάλλον προσομείωσης που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς που θα γίνουν και την μοντελοποίηση αυτών των τεχνολογιών είναι το IPSEpro. Το IPSEpro παρουσιάζει μεγάλη ελαστικότητα σε υπολογιστικά εργαλεία και χρησιμοποιείται για ανάλυση θερμικών ισοζυγίων σε εργοστάσια παραγωγής, σχεδιασμό διάφορων συνιστωσών, πειραματικούς υπολογισμούς και βελτιστοποιήσεις.

Επίσης ένα σημαντικό στοιχείο για την κατάλληλη επιλογή του κύκλου σε μια εφαρμογή είναι τα στοιχεία και οι συνιστώσες της εκάστοτε εφαρμογής καθώς και το κόστος επένδυσης αυτής σε συνδυασμό με την απόσβεση της αρχικής επένδυσης καθώς η οικονομικότητα μιας ενεργειακής εφαρμογής παίζει κυρίαρχο ρόλο στην τελική επιλογή.

5.2 Προσομοίωση με το IPSEpro

Τα βασικά βήματα για την μοντελοποίηση των τεχνολογιών στο πρόγραμμα αυτό είναι τα εξής:

- Επιλογή και χρησιμοποίηση της κατάλληλης βιβλιοθήκης. Η βιβλιοθήκες αποτελούνται από την βάση όλων των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν αυτές οι τεχνολογίες των θερμοδυναμικών κύκλων. Περιλαμβάνουν εξισώσεις καθώς και θερμικά ισοζύγια για κάθε τμήμα του κύκλου ανάλογα με την τεχνολογία που εξετάζεται και προσφέρουν στο χρήστη επιλογές για την κατασκευή και συναρμολόγηση ενός κύκλου.
- Κατασκευή και συναρμολόγηση ενός κύκλου. Είναι η τοποθέτηση όλων εκείνων των τμημάτων που είναι απαραίτητα για τον σχεδιασμό του κύκλου στο περιβάλλον του IPSEpro.
- Τρέξιμο του προγράμματος. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του κύκλου γίνονται οι υπολογισμοί για όλες τις συνιστώσες του κύκλου και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.
- Επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η πηγή θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί είναι η γεωθερμία η οποία χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- Η **Υψηλής Ενθαλπίας** (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ισχύς τέτοιων εγκαταστάσεων το 1979 ήταν 1.916 MW με παραγόμενη ενέργεια 12×10^6 kWh/yr.
- Η **Μέσης Ενθαλπίας** (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).
- Η **Χαμηλής Ενθαλπίας** (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

5.3 Έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου

Τοποθετώντας στο υπολογιστικό μοντέλο του IPSErgo πραγματικά δεδομένα από υπάρχουσα μονάδα εγκατάστασης του κύκλου Kalina μαζί με γεωθερμία και κάνοντας επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων ελέγχουμε την αξιοπιστία του μοντέλου μας. Ο σταθμός του οποίου θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα εισόδου του είναι στο Husavik της Ισλανδίας.

Η μονάδα του κύκλου Kalina στο Husavik της Νότιας Ισλανδίας χρησιμοποιεί για πηγή θερμότητας γεωθερμικά ρευστά μέσης ενθαλπίας (120°C) και περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους:

- Παροχή μάζας γεωθερμικού ρευστού : 90 kg/s
- Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού : 120° C
- Θερμοκρασία του νερού ψύξης : 5° C
- Υψηλή πίεση λειτουργίας : 32,3 bar
- Χαμηλή πίεση λειτουργίας : 6 bar
- Κλάσμα μάζας αμμωνίας στο μίγμα : 0,82

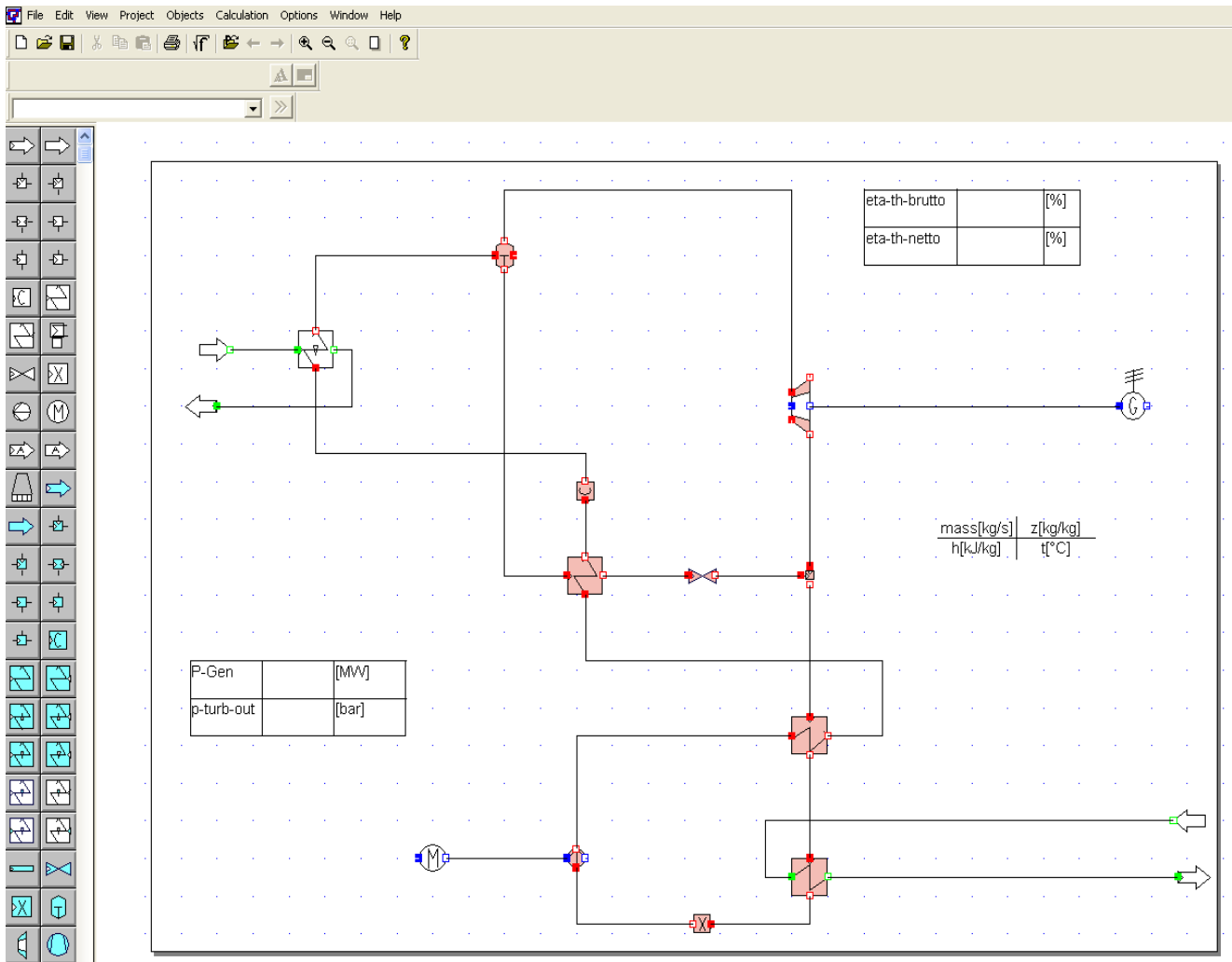
Τα στοιχεία εξόδου της μονάδας είναι :

- Ισχύς εξόδου στην γεννήτρια : 2000 kW
- Βαθμός απόδοσης κύκλου : 10-12 %

Επίσης ο κύκλος αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Στρόβιλος - γεννήτρια
- Αναθερμαντές υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας (recuperators)
- Συμπυκνωτή
- Τροφοδοτική αντλία
- Ατμοποιητή (evaporator)
- Και τέλος τον διαχωριστή(separator).

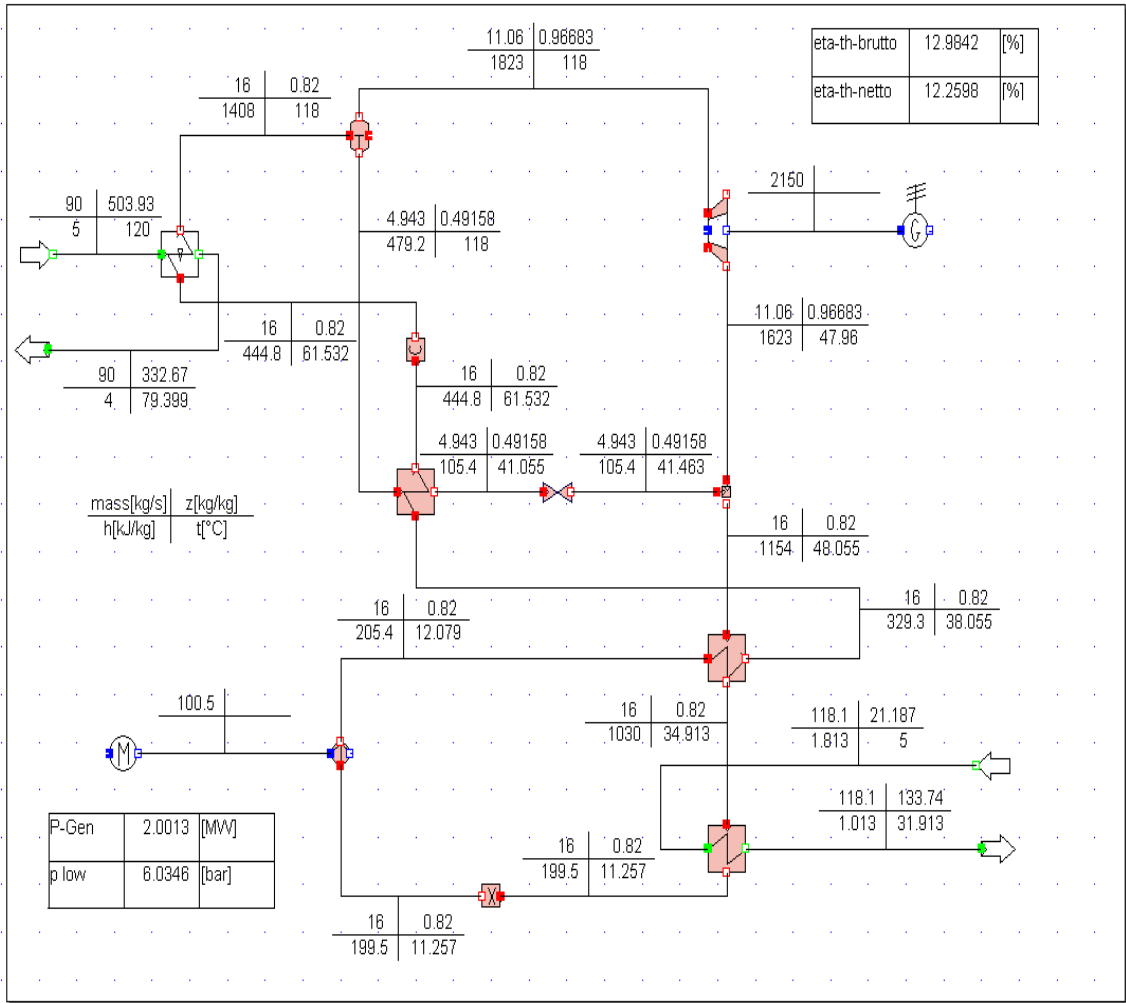
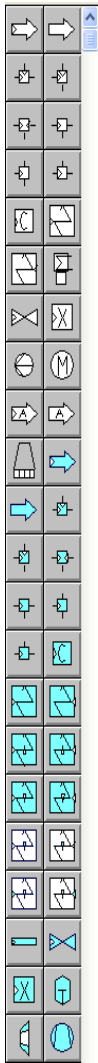
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του κύκλου στο περιβάλλον IPSErgo και τα αποτελέσματα μετά την διαδικασία επίλυσης του συστήματος σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου για τον κύκλο Kalina στο Husavik. Φαίνεται λοιπόν ότι το μοντέλο του Kalina δουλεύει σωστά αφού εξάγει τα ίδια στοιχεία εξόδου με την μονάδα του Husavik όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 10.



Σχήμα 78 Σχηματικό διάγραμμα κύκλου Kalina (Husanik) με την βοήθεια του IPSEpro.

Πίνακας 10. Πίνακας αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κύκλου Kalina

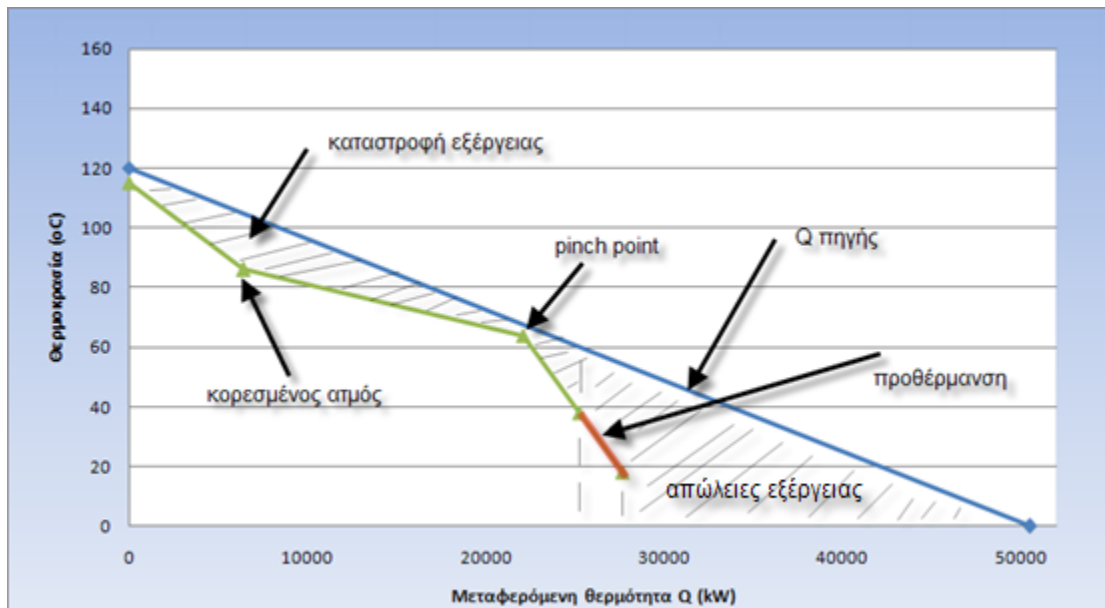
Βαθμός απόδοσης κύκλου(net)	12.25 %	Κλάσμα μάζας αμμωνίας z(kg/kg)	0.82
Έργο εξόδου (kW)	2001 kW	Κλάσμα μάζας αμμωνίας πλούσιου διαλύματος	0.96
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	32.3	Κλάσμα μάζας αμμωνίας φτωχού διαλύματος	0.49
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	6.03	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.80
Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου(° C)	118° C	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.97
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	90 kg/s	Ισχύς αντλίας (kW)	100 kW
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95



Σχήμα 79 Σχηματικό διάγραμμα Ηυσανικό μετά την επίλυση του μοντέλου.

5.4 Αποτελέσματα υπολογισμών για κύκλο Kalina

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων θα γίνει σε κύκλο Kalina με τα ίδια χαρακτηριστικά του παραπάνω κύκλου όπως τα έχουμε περιγράψει.



Σχήμα 80 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει της μεταφερόμενης θερμότητας για τον κύκλο Kalina.

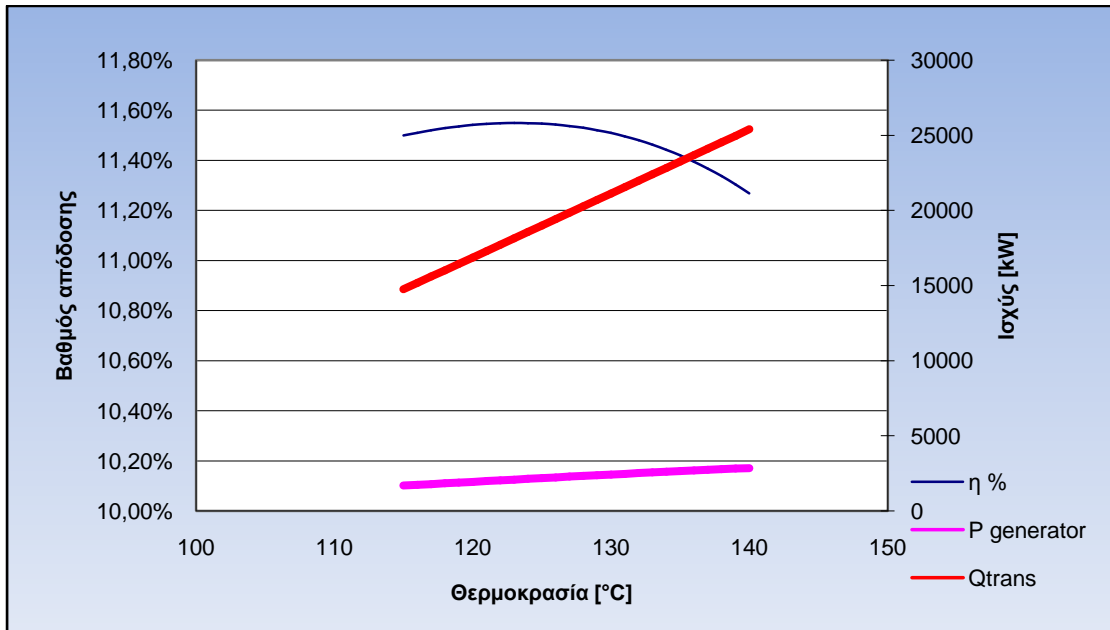
Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών είναι $(22088/50499) \cdot 100 = 43,73\%$. Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε καθαρά ότι η ατμοποίηση του μίγματος γίνεται σε μεταβαλλόμενη θερμοκρασία καθώς αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα του μίγματος αμμωνίας –νερού και συνεπώς αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο το εμβαδό που περικλείει η καμπύλη άρα και την ποσότητα θερμότητας που εκμεταλλευόμαστε. Τα στοιχεία του κύκλου που οδηγούν στο παραπάνω διάγραμμα είναι :

Πίνακας 11 . Στοιχεία κύκλου Kalina

Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	35	Παροχή μάζας μίγματος (kg/s)	25
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	5 (° C)
Θερμοκρασία πηγής	120° C	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντirroή	
Θερμοκρασία εξόδου πηγής	67° C	Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar
Ισχύς κύκλου kW	2562	Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C
Πίεση συμπυκνώσεως	7,17 bar	Βαθμός απόδοσης κύκλου	9,96
Κλάσμα μάζας αμμωνίας z(kg/kg)	0.82	Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98		

Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού συναρτήσει βαθμού απόδοσης κύκλου και ισχύος.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί βλέπουμε την μεταβολή του βαθμού απόδοσης αν αυξηθεί η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού.



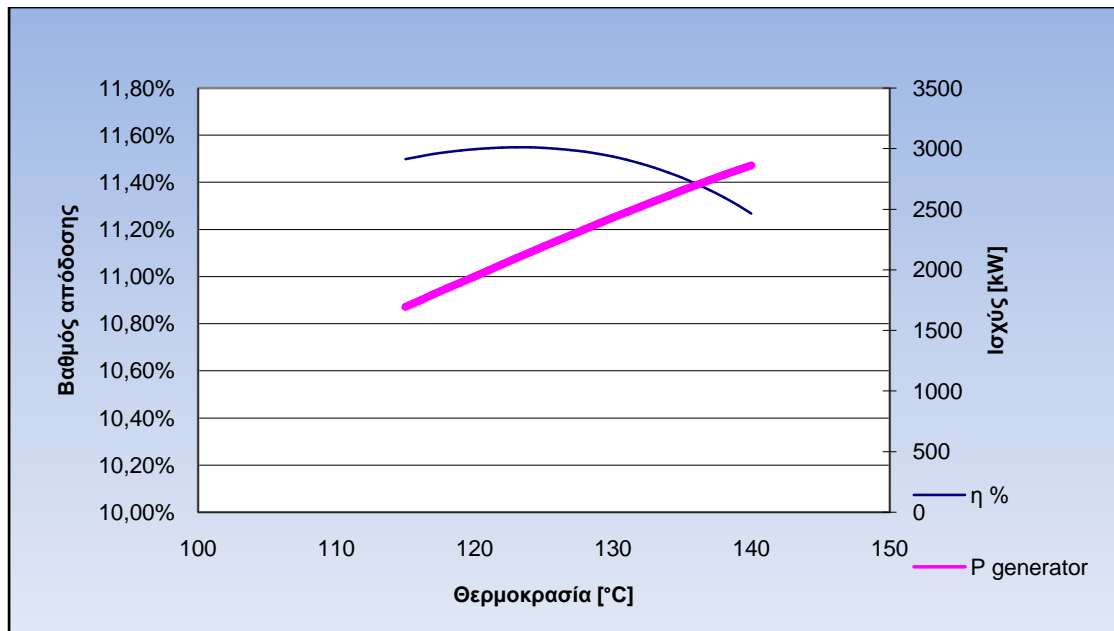
Σχήμα 81 Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού συναρτήσει βαθμού απόδοσης κύκλου και ισχύος.

Βλέπουμε λοιπόν ότι ο βαθμός απόδοσης φθάνει σε μια μέγιστη τιμή και μετά μειώνεται ελαφρά καθώς ο ρυθμός αύξησης της ισχύος από την γεννήτρια είναι μικρότερος από τον ρυθμό αύξησης της μεταφερόμενης θερμότητας που είναι διαθέσιμη προς εκμετάλλευση. Αντίθετα η ισχύς αυξάνεται αφού αυξάνεται η μεταφερόμενη θερμότητα που μπορώ να εκμεταλλευτώ.

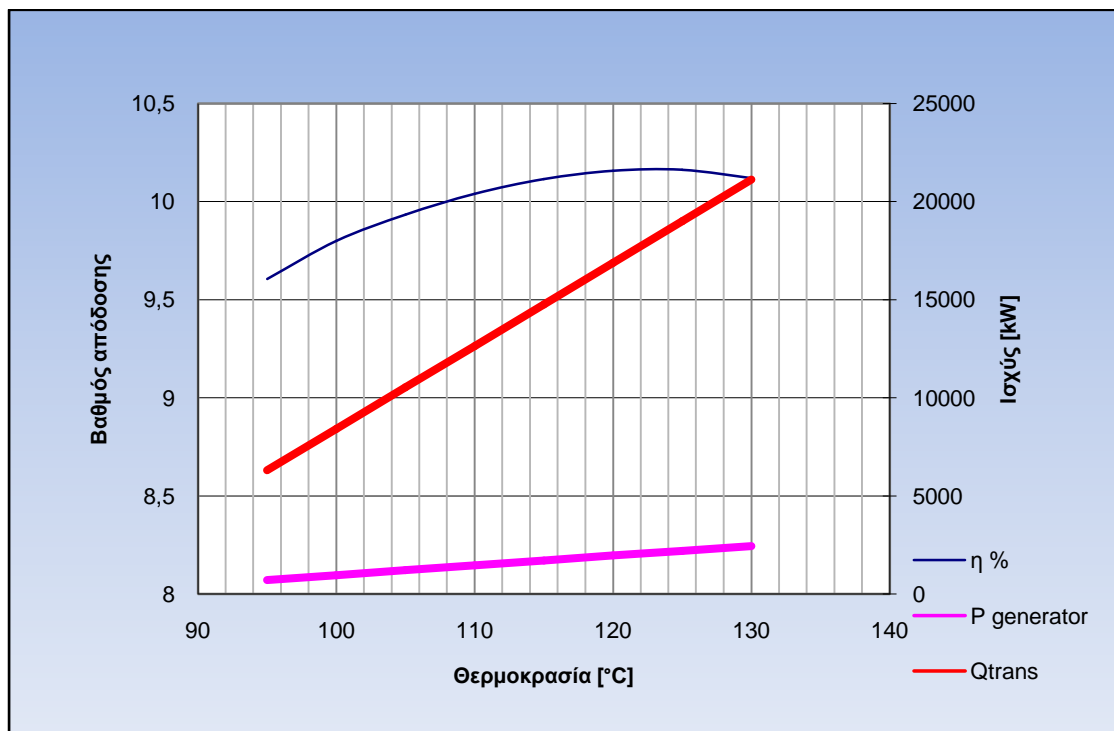
Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Kalina κυμαίνεται από 11,20% μέχρι 11,55% με μέγιστο βαθμό απόδοσης 11,55% για θερμοκρασία 122°C.

Τα στοιχεία του κύκλου είναι τα εξής:

Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	30	Θερμοκρασία εξόδου πηγής	80 ° C
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	5 (° C)
Κλάσμα μάζας αμμωνίας z(kg/kg)	0.82	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντιρροή	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75	Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98	Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C
Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95		



Σχήμα 82 Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού συναρτήσσει βαθμού απόδοσης κύκλου και ισχύος στα 30 bar.

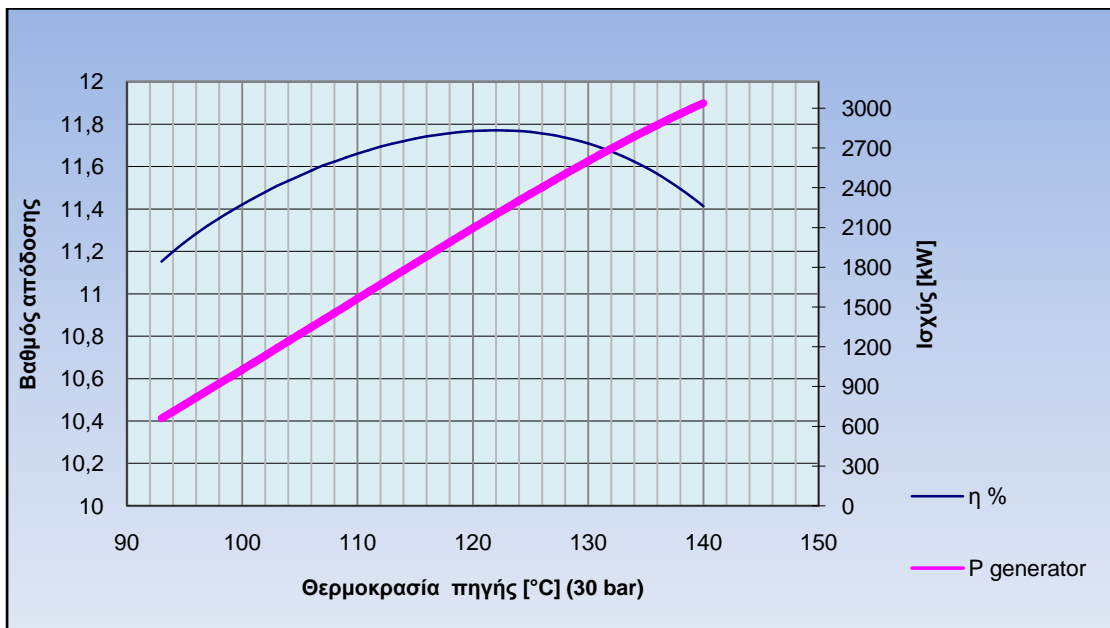


Σχήμα 83 Θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού συναρτήσσει βαθμού απόδοσης κύκλου και ισχύος στα 35 bar.

- 1) **30 bar, $z=0,82\text{kg/kg}$** (z =κλάσμα μάζας αμμωνίας). Κρατώντας σταθερά τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα γίνονται τρεξίματα για τον υπολογισμό του καθαρού βαθμού απόδοσης του κύκλου, για το έργο εξόδου στην γεννήτρια, ισχύς του στροβίλου, πίεση συμπυκνώσεως, συστάσεις του μίγματος, ισχύς της τροφοδοτικής αντλίας ,παροχή μάζας διφασικού μίγματος κ.α

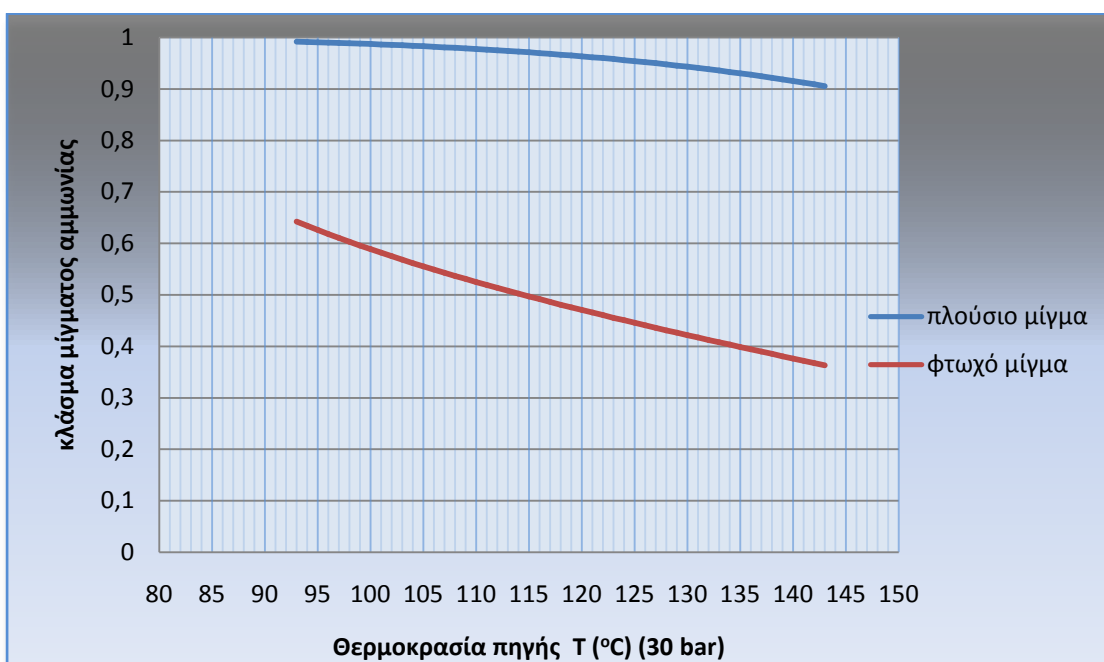
Πίνακας 12 . Σταθερές συνιστώσες του κύκλου.

Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	30	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	2 (° C)
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντιρροή	
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C	Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar
Κλάσμα μάζας αμμωνίας $z(\text{kg/kg})$	0.82		
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.85		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98		
Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95		



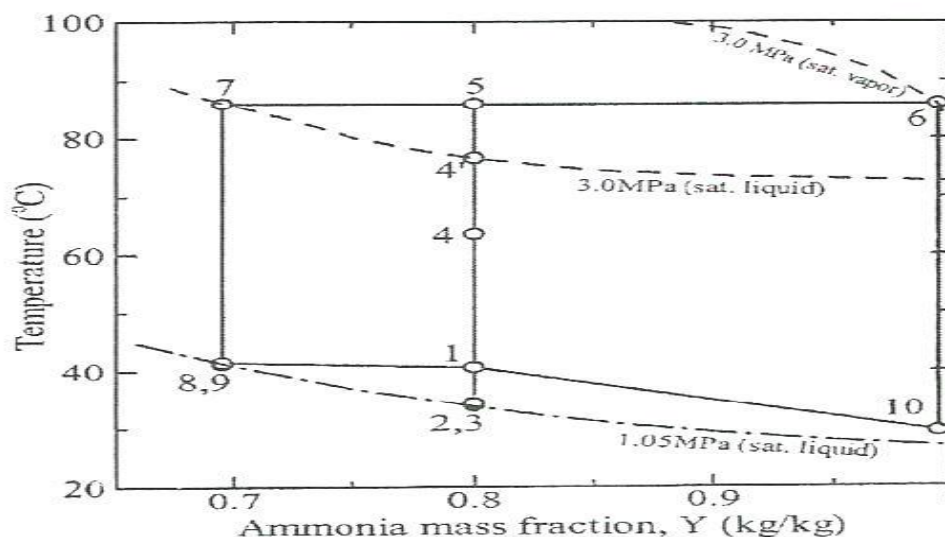
Σχήμα 84 Βαθμός απόδοσης και ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

Παρατηρούμε και εδώ ότι η ισχύς του κύκλου αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαθέσιμη θερμότητα. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει στην μέγιστη τιμή 11,77% με παραγωγή ισχύος 2200 kW. Η μείωση του βαθμού απόδοσης φαίνεται και από το γεγονός ότι αυξάνεται η ισχύς της τροφοδοτικής αντλίας.

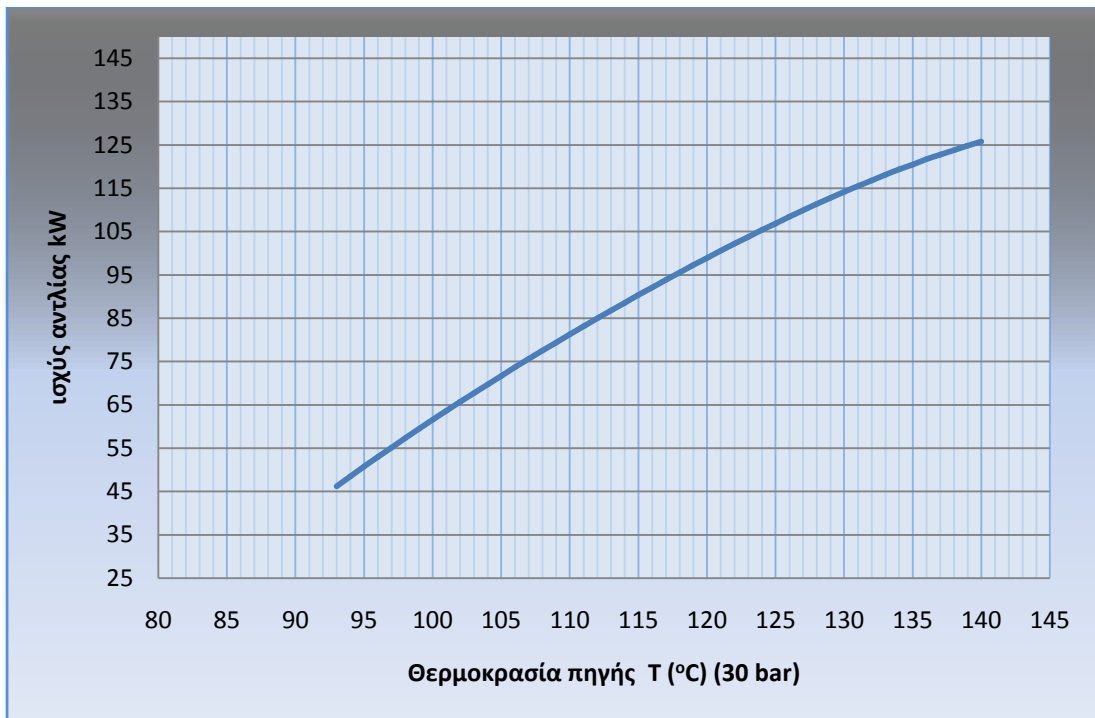


Σχήμα 85 Συστάσεις του μίγματος για πλούσιο και φτωχό σε αμμωνία συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής.

Οι συστάσεις του πλούσιου και του φτωχού μίγματος σε αμμωνία μειώνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου υγρού μίγματος πριν την ατμοποίηση και συνεπώς την αύξηση της πίεσης συμπύκνωσης. Από το διάγραμμα θερμοκρασίας –κλάσματος αμμωνίας καθώς αυξάνεται η πίεση συμπύκνωσης μειώνονται οι συστάσεις μετά τον διαχωριστή.



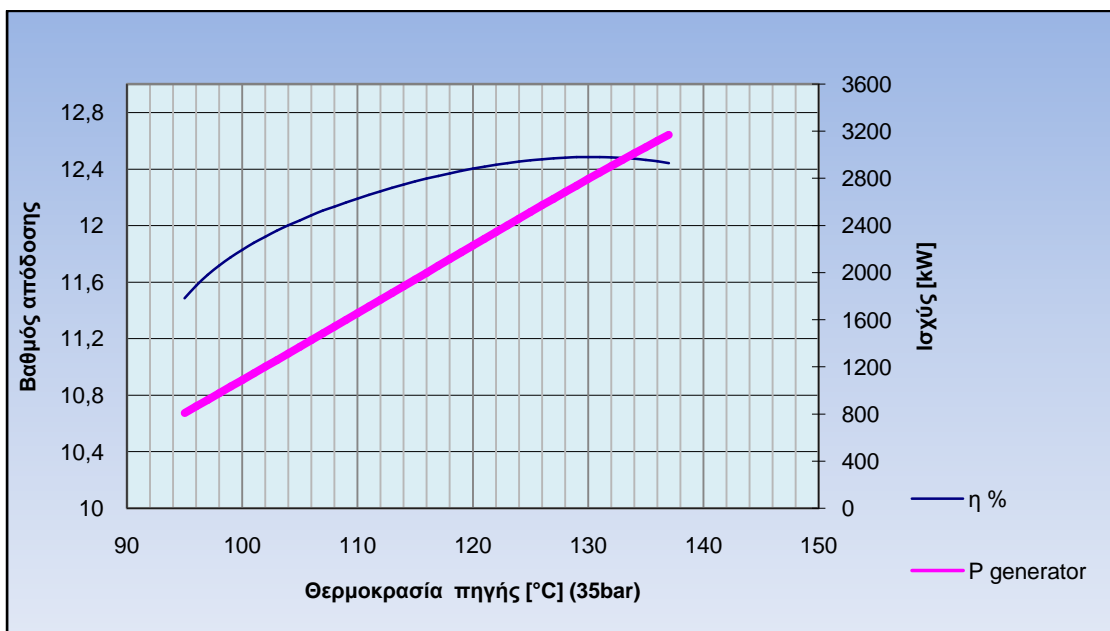
Σχήμα 6 Διάγραμμα θερμοκρασίας-σύστασης αμμωνίας στο μίγμα για τον κύκλο Kalina (για την περίπτωση $Y_5=0.8$ και $P_6=3\text{MPa}$).



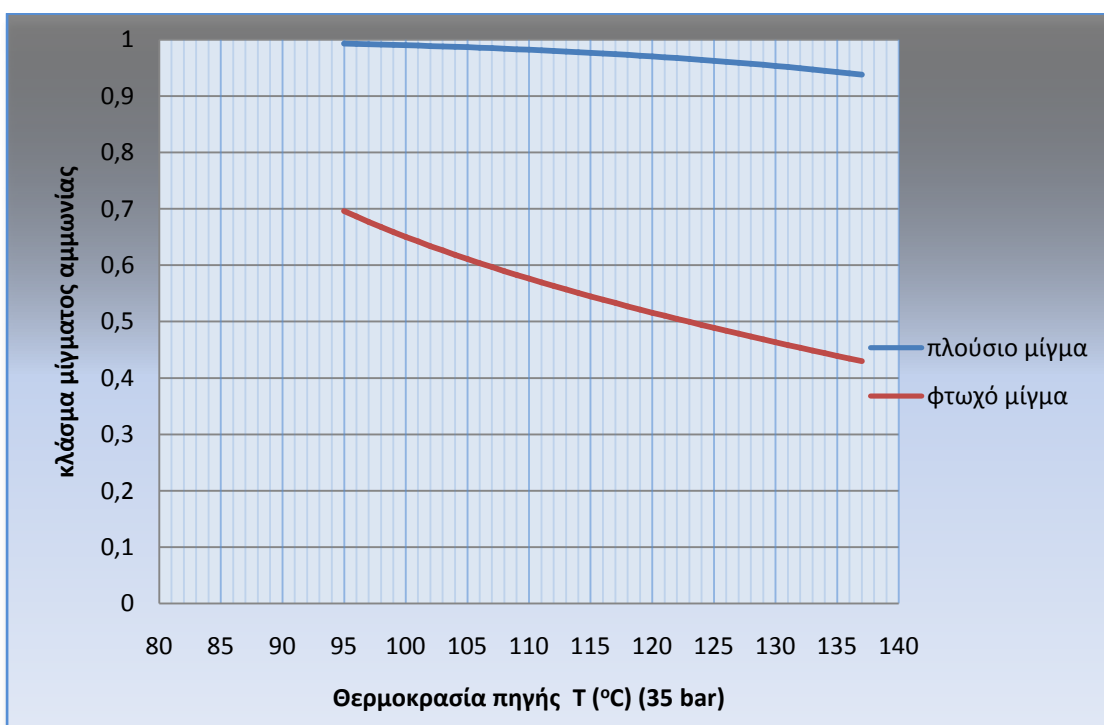
Σχήμα 87 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 30 bar.

Η ισχύς της αντλίας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου με σκοπό την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της 'παραπάνω' διαθέσιμης θερμότητας.

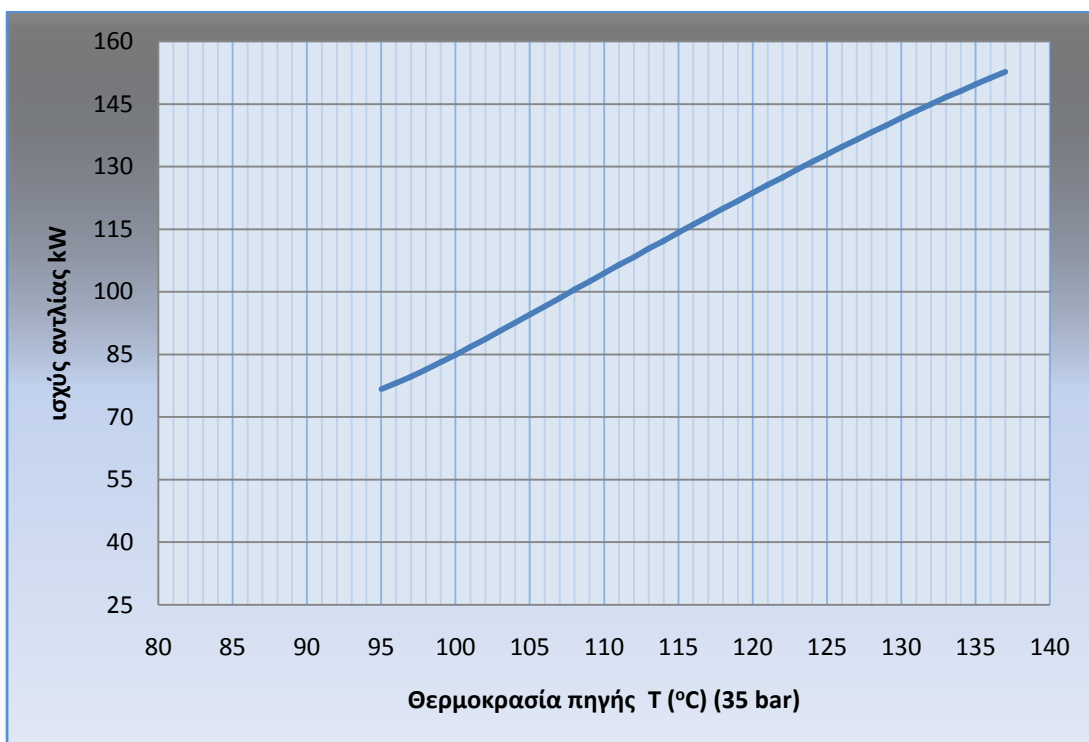
2) 35 bar, z=0,82 kg/kg .



Σχήμα 88 Βαθμός απόδοσης και ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

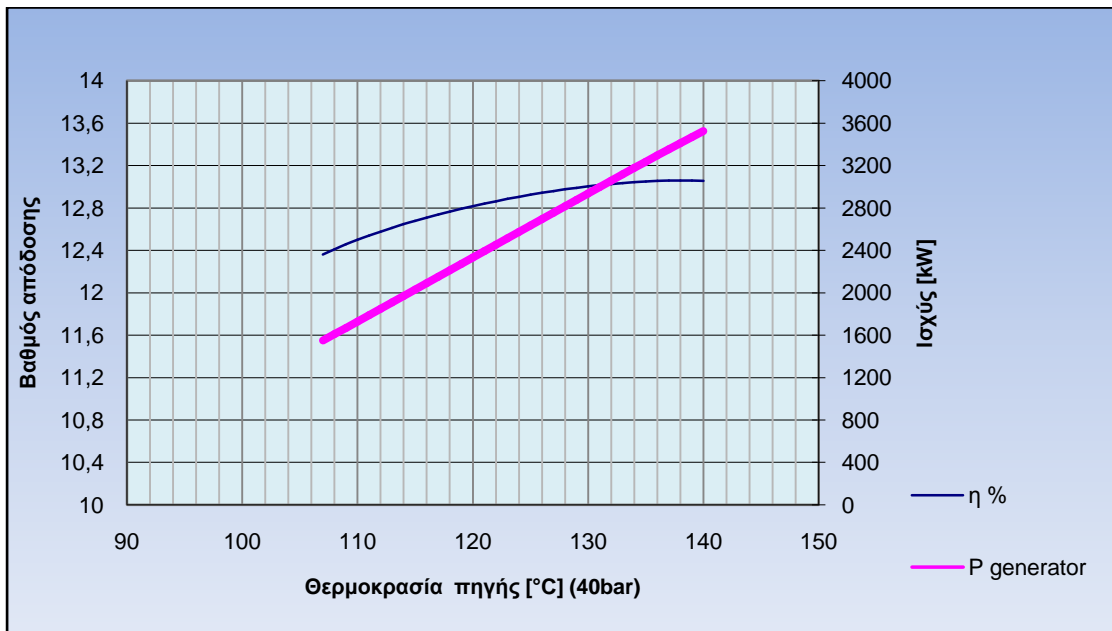


Σχήμα 89 Συστάσεις του μίγματος για πλούσιο και φτωχό σε αμμωνία συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής.

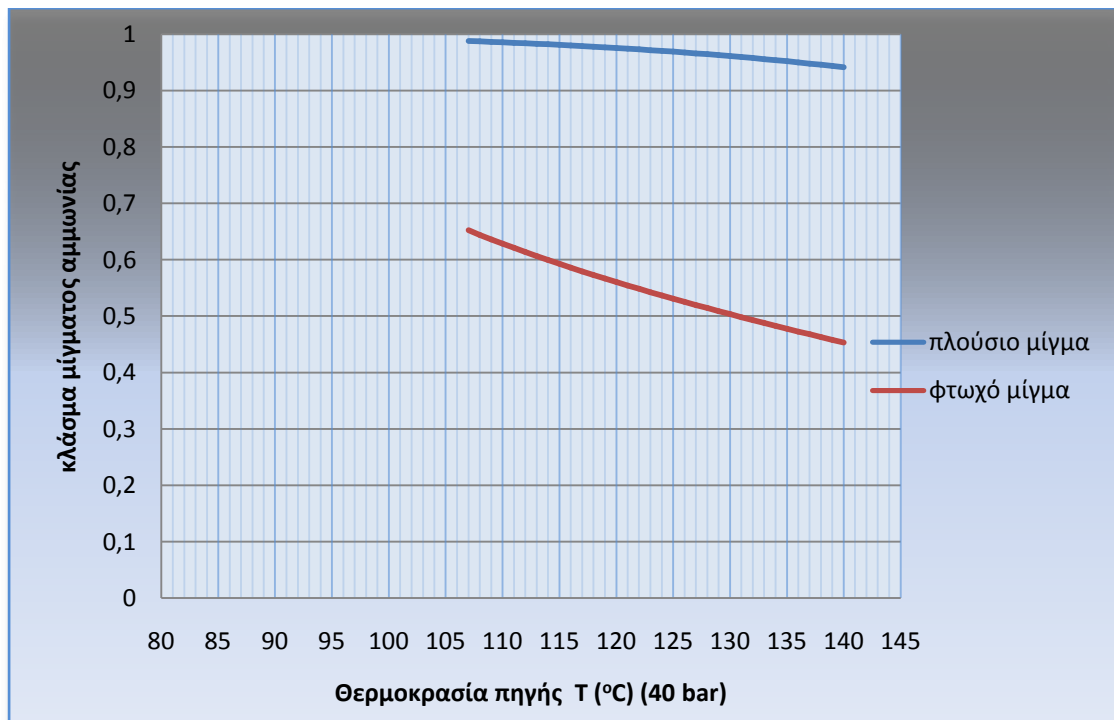


Σχήμα 90 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 35 bar.

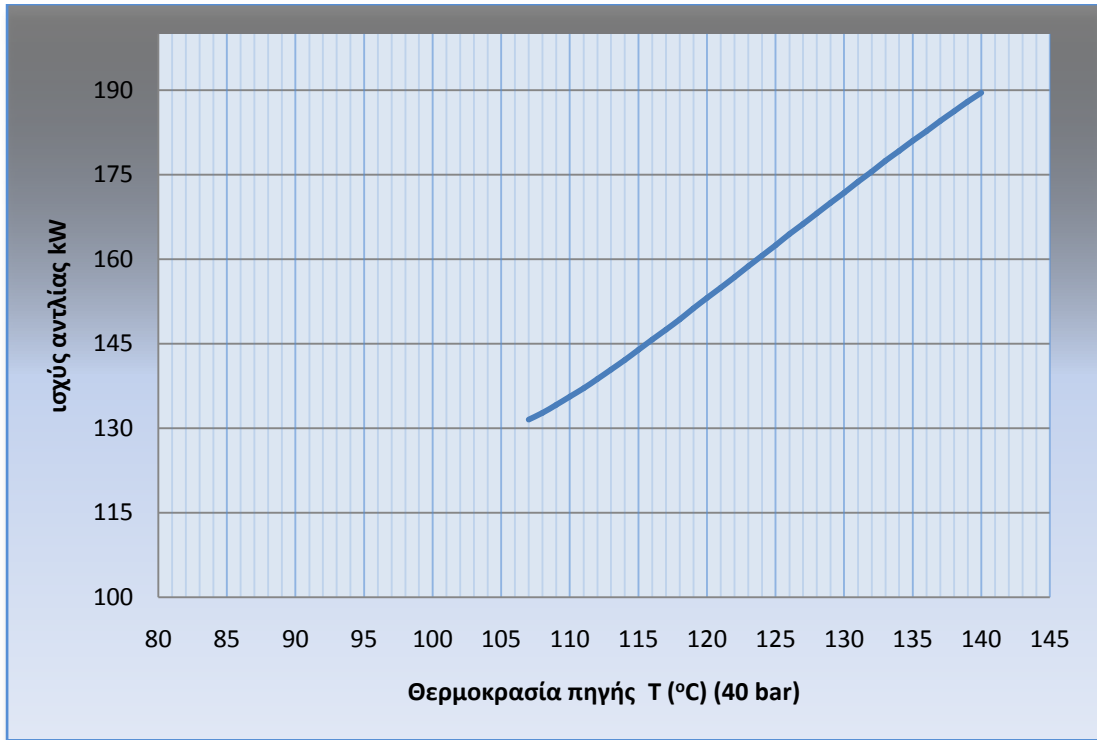
3) 40 bar, $z=0,82$ kg/kg .



Σχήμα 91 Βαθμός απόδοσης και ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

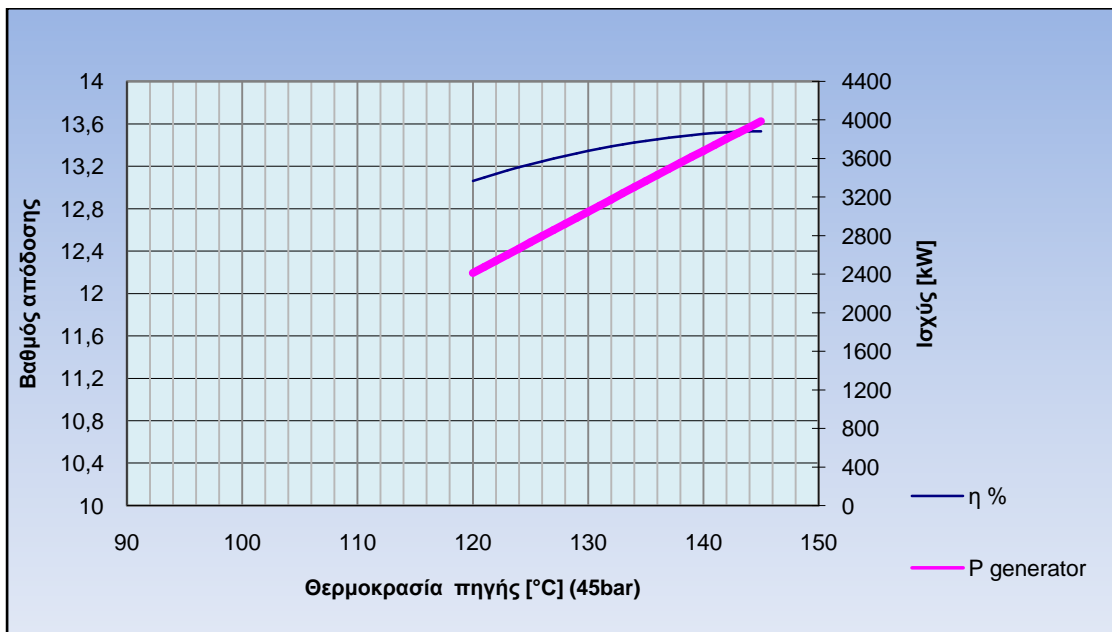


Σχήμα 92 Συστάσεις του μίγματος για πλούσιο και φτωχό σε αμμωνία συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής.

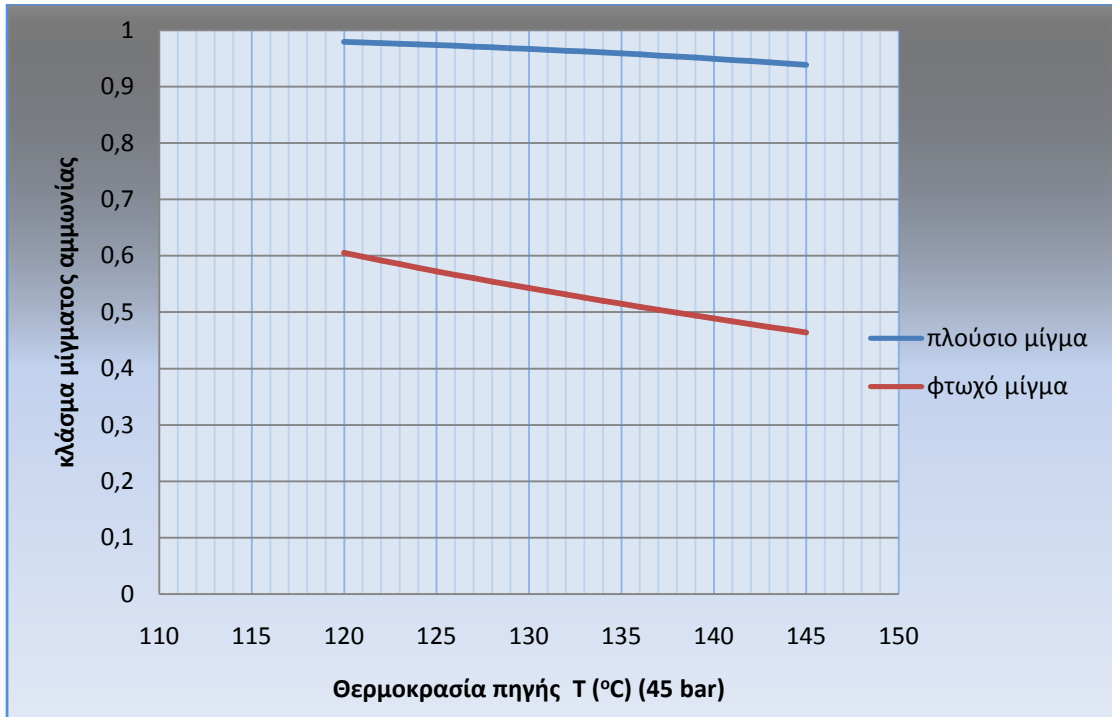


Σχήμα 93 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 40 bar.

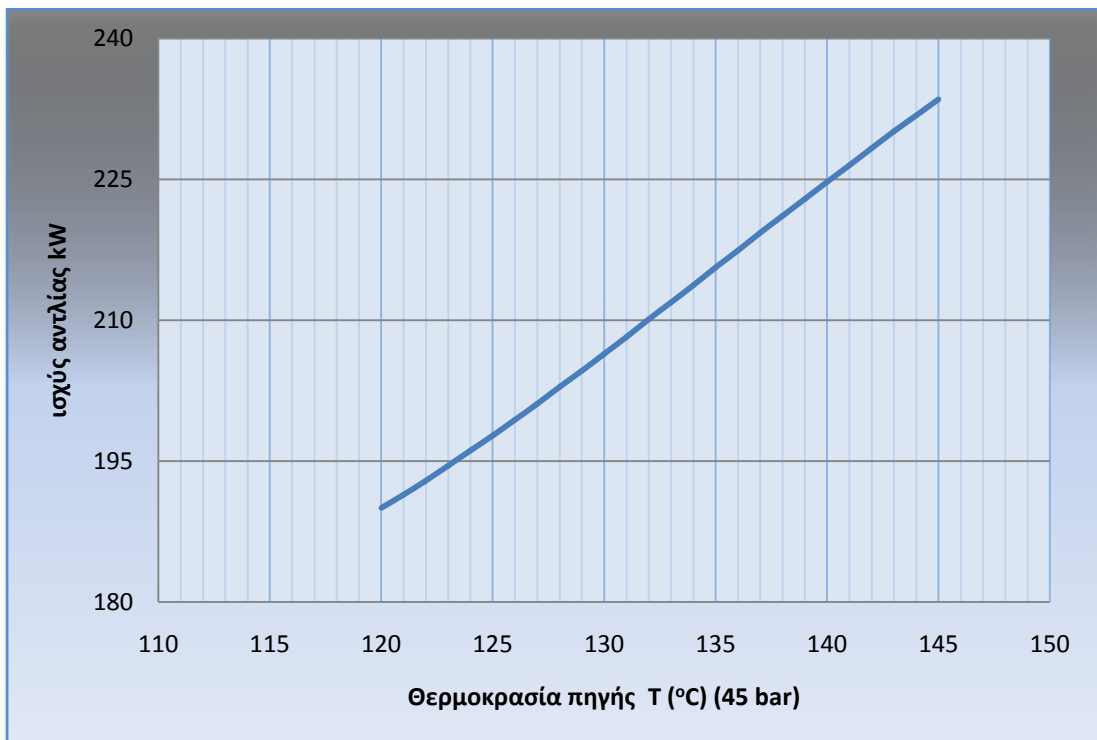
4) 45 bar, $z=0,82$ kg/kg .



Σχήμα 94 Βαθμός απόδοσης κα ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

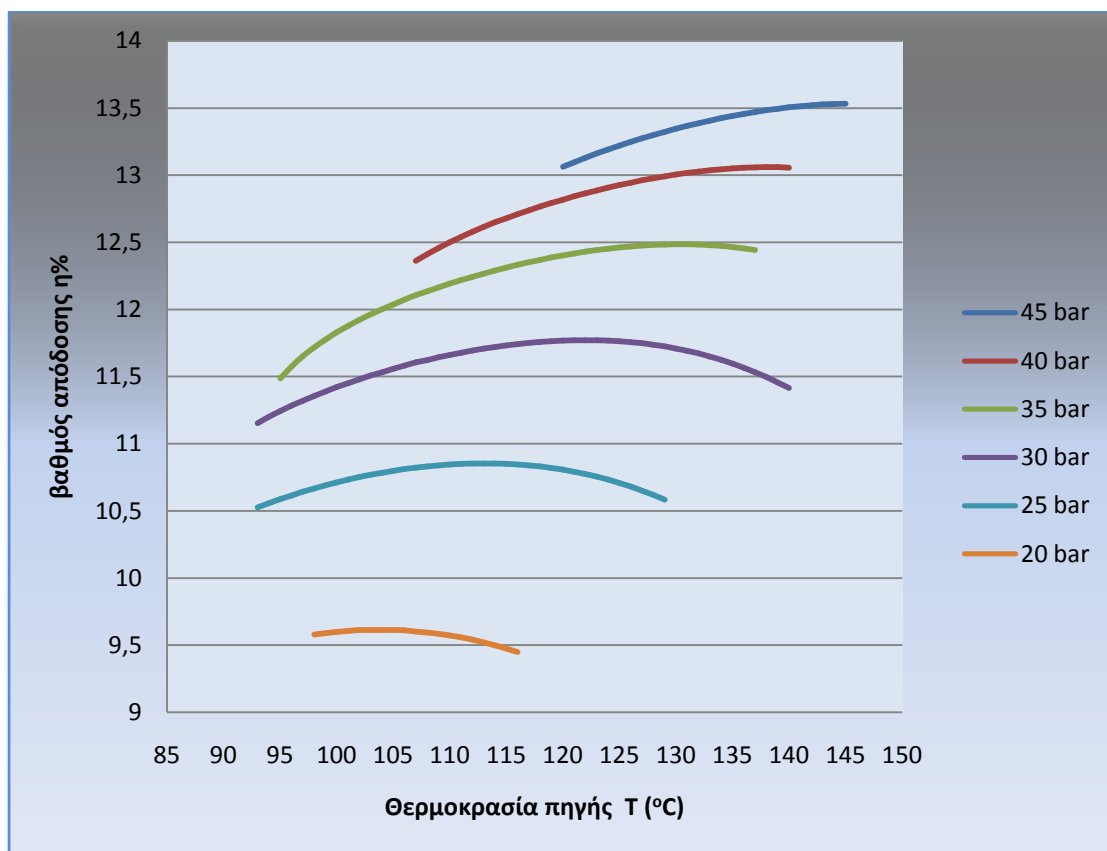


Σχήμα 95 Συστάσεις του μίγματος για πλούσιο και φτωχό σε αμμωνία συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής.



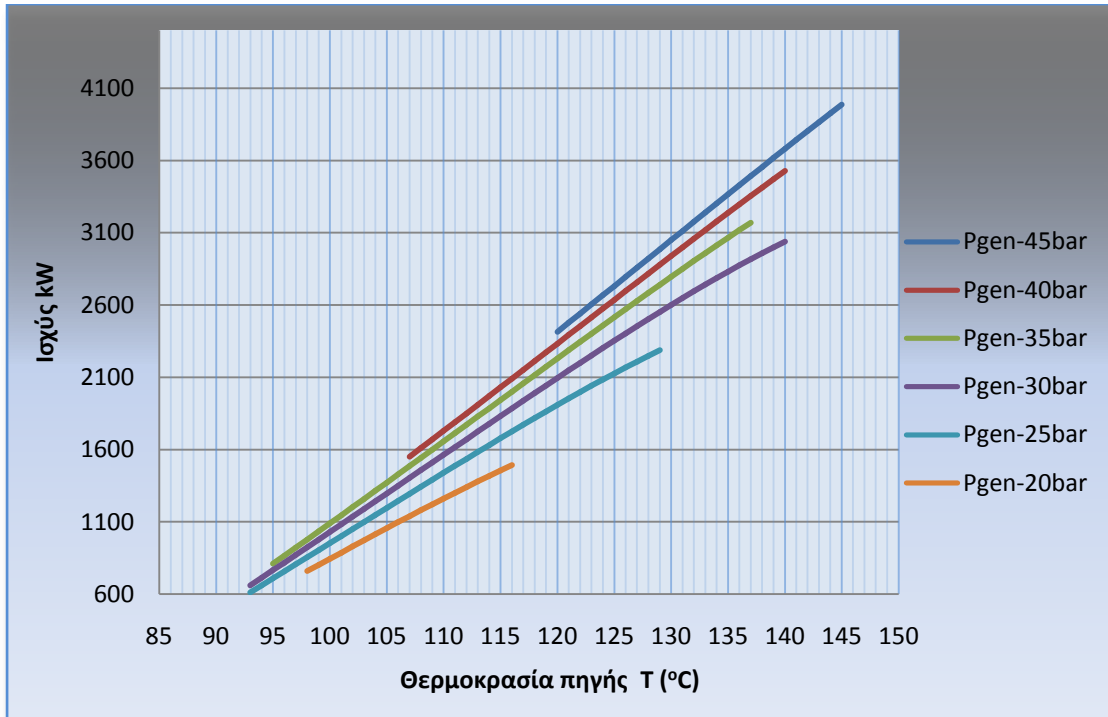
Σχήμα 96 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 45 bar.

Παρακάτω δίδεται διάγραμμα των αποδόσεων για όλα τα επίπεδα πιέσεων σε σχέση με την θερμοκρασία εισόδου του γεωθερμικού ρευστού για $z=0,82$ kg/kg. Επίσης διάγραμμα για την ισχύ της γεννήτριας και της τροφοδοτικής αντλίας.

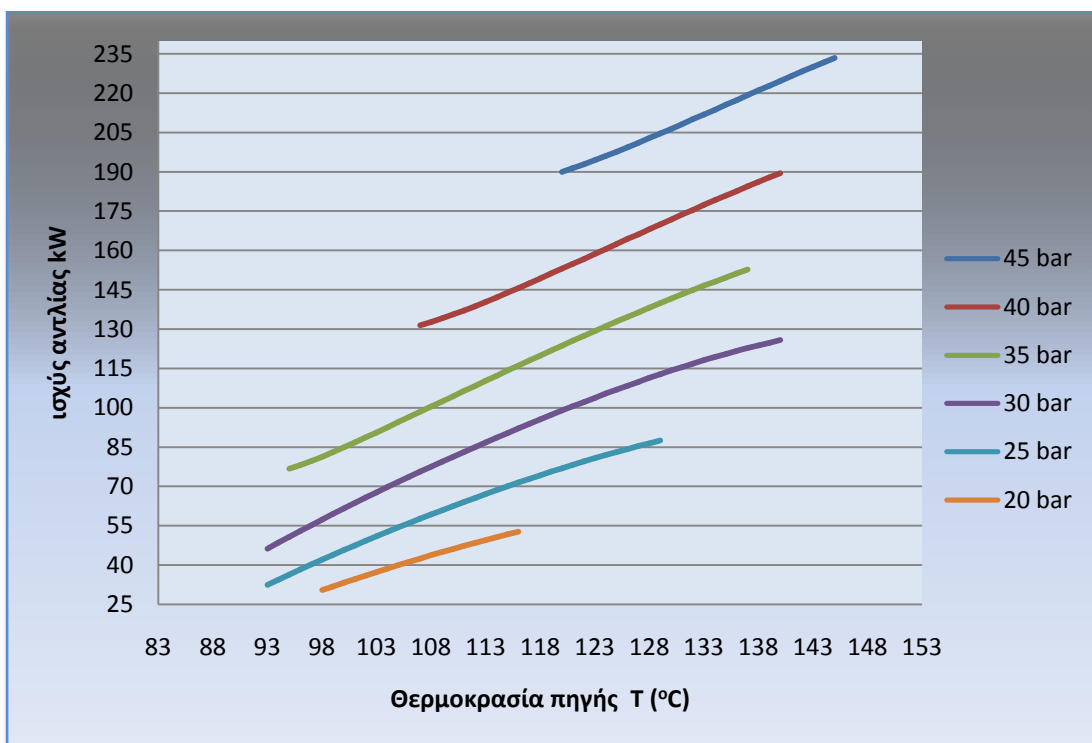


Σχήμα 97 Βαθμός απόδοσης κύκλων σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για όλα τα επίπεδα πιέσεων.

Παρατηρούμε εδώ ότι καθώς αυξάνουμε την υψηλή πίεση του κύκλου ο βαθμός απόδοσης και η ισχύς αυξάνονται για κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας με μέγιστο βαθμό απόδοσης 13,5% στην πίεση των 45 bar για $z = 0,82$ kg/kg. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνοντας την πίεση αυξάνεται η ενθαλπική διαφορά στον στρόβιλο και η παροχή μάζας του μίγματος. Επίσης η αύξηση της κατανάλωσης της τροφοδοτικής αντλίας είναι μικρότερη από την αύξηση ισχύος, συνέπως έχω αύξηση του βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 98 Ισχύς κύκλων σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για όλα τα επίπεδα πιέσεων.



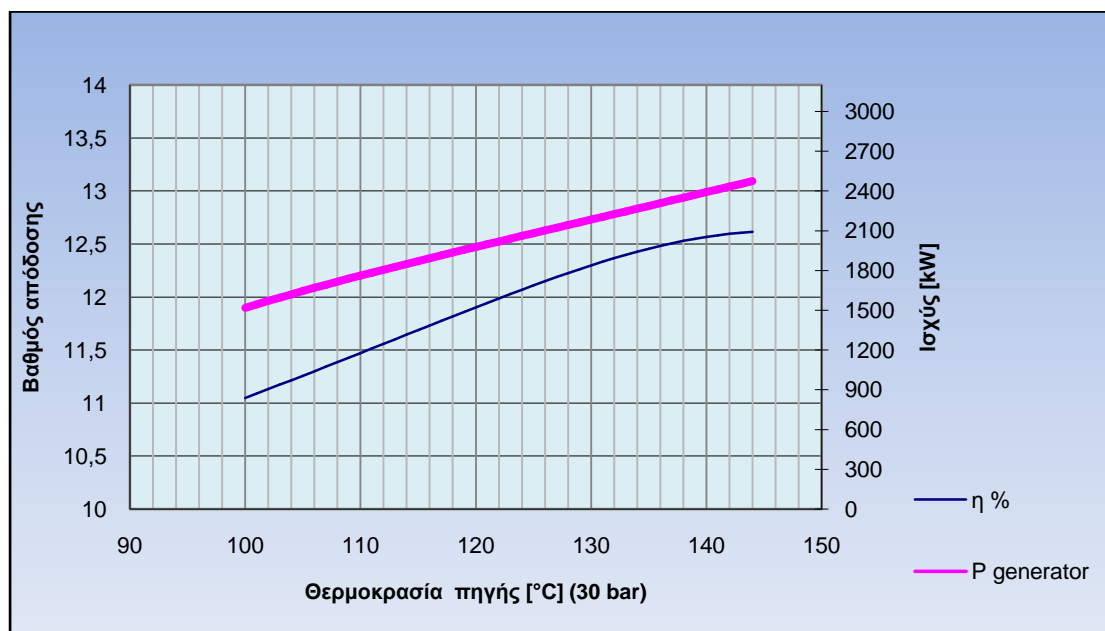
Σχήμα 99 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για όλα τα επίπεδα πιέσεων.

Στη συνέχεια θα σταθούμε περισσότερο στην υψηλή πίεση των 30 bar και 35 bar λόγω του ότι μεγάλο ποσοστό των υπαρχόντων μονάδων λειτουργεί σε αυτή την πίεση. Στην προηγούμενη μέτρηση των 30 bar και 35 bar είχαμε σαν σταθερή μεταβλητή την θερμοκρασία εξόδου των γεωθερμικών ρευστών στους 80° C και σαν μεταβλητή την παροχή μάζας του μίγματος. Σε μια άλλη περίπτωση διατηρούμε σταθερή την παροχή μάζας του μίγματος και μεταβλητή την θερμοκρασία εξόδου της πηγής. Τα σταθερά μας στοιχεία είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 13 . Σταθερές συνιστώσες του κύκλου.

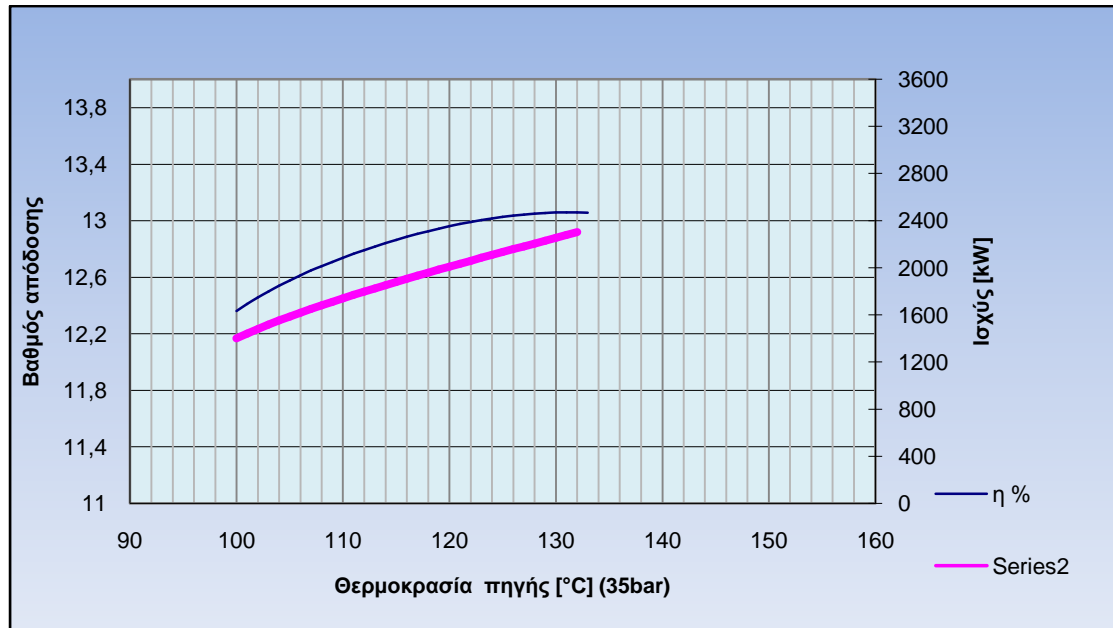
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	30 και 35	Παροχή μάζας μίγματος (kg/s)	16
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	2 (° C)
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντιρροή	
Κλάσμα μάζας αμμωνίας z(kg/kg)	0.82	Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.85		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98		
Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95		

A) 30 bar, z=0,82 kg/kg .



Σχήμα 100 Βαθμός απόδοσης και ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

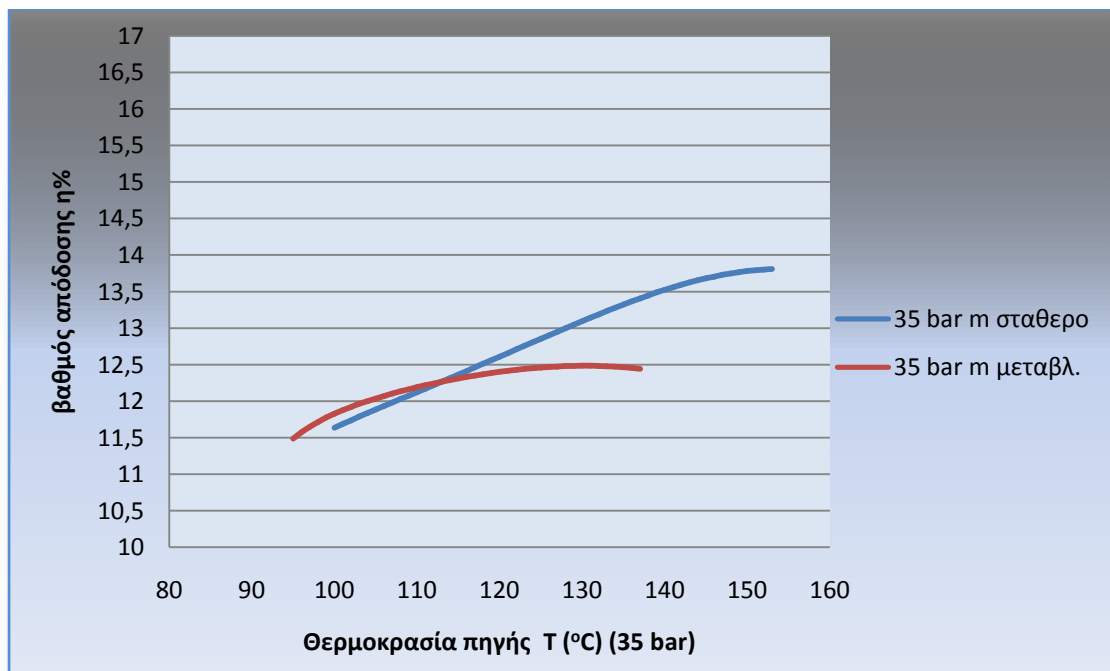
B) 35 bar, $z=0,82$ kg/kg .



Σχήμα 101 Βαθμός απόδοσης και ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

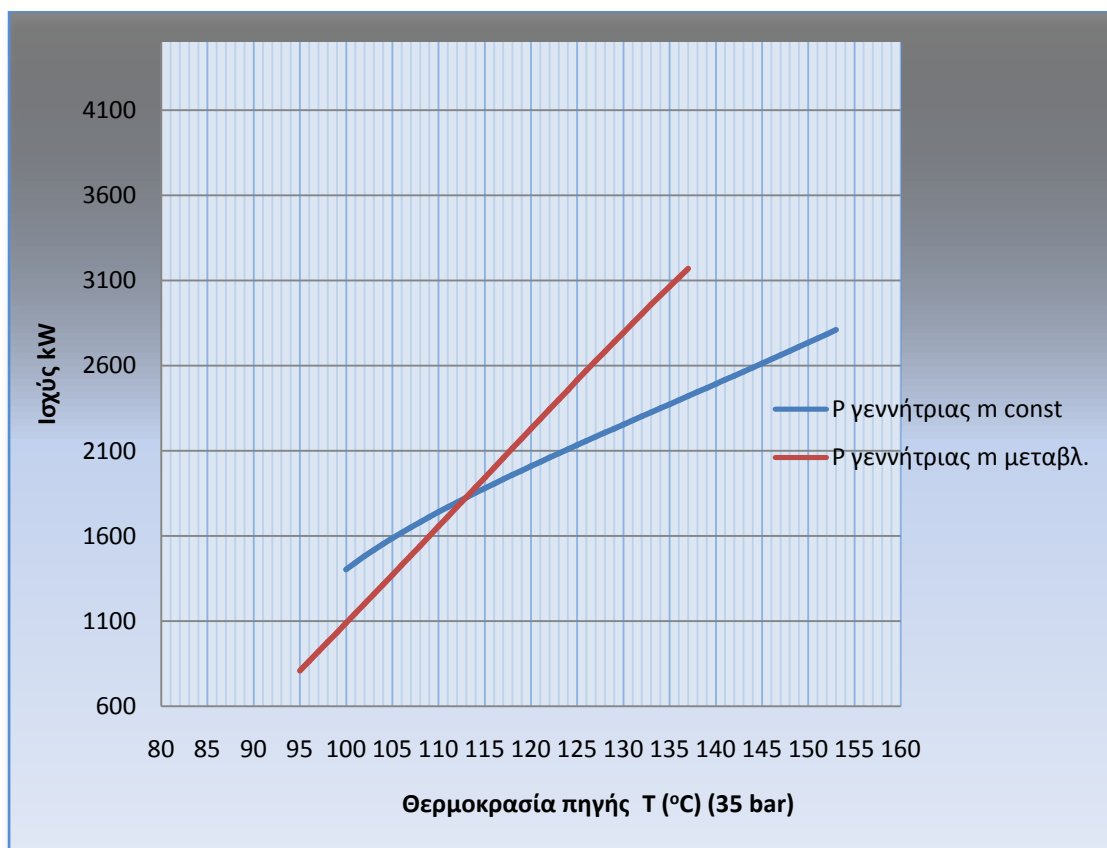
Μπορούμε να συγκρίνουμε λοιπόν τις δύο αυτές περιπτώσεις ως προς τον βαθμό απόδοσης ,την ισχύ της γεννήτριας και την ισχύ της αντλίας.

35 bar



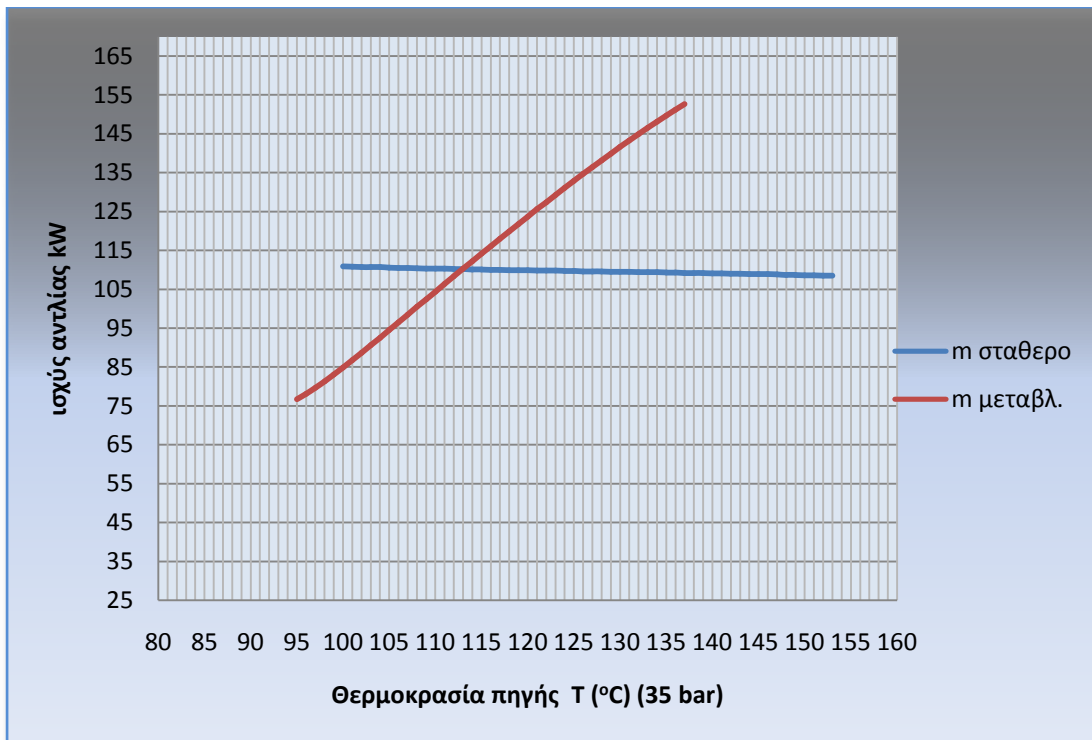
Σχήμα 102 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

Με σταθερή την παροχή και αύξηση της διαθέσιμης προς εκμετάλλευση θερμότητας αυξάνεται η ενθαλπική διαφορά στον στρόβιλο όπως έχουμε αναφέρει, με την ενθαλπία πριν και μετά τον στρόβιλο να αυξάνονται επίσης ξεχωριστά. Ο ρυθμός αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι μεγαλύτερος με m σταθερό διότι βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών της προθέρμανσης μιας και έχουμε έξοδο του μίγματος με μεγαλύτερη ενθαλπία και λόγω της σταθερής κατανάλωσης της τροφοδοτικής αντλίας(αφού οι πιέσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές.)



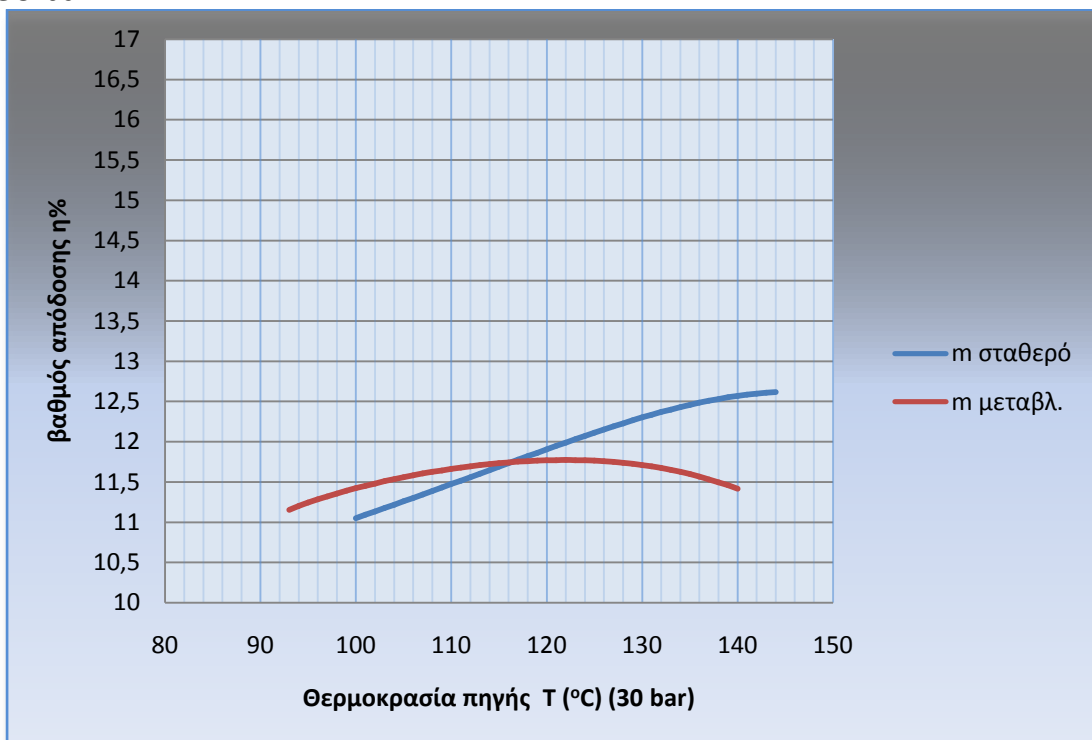
Σχήμα 103 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

Αντίθετα με διατήρηση της παροχής μάζας του εργαζόμενου μέσου σταθερή μετά τους 115°C και μέχρι τους 150°C έχουμε μικρότερο ρυθμό αύξησης της ισχύος διότι δεν αφήνουμε τον κύκλο να εκμεταλλευτεί όσο το δυνατόν περισσότερο την διαθέσιμη θερμότητα.

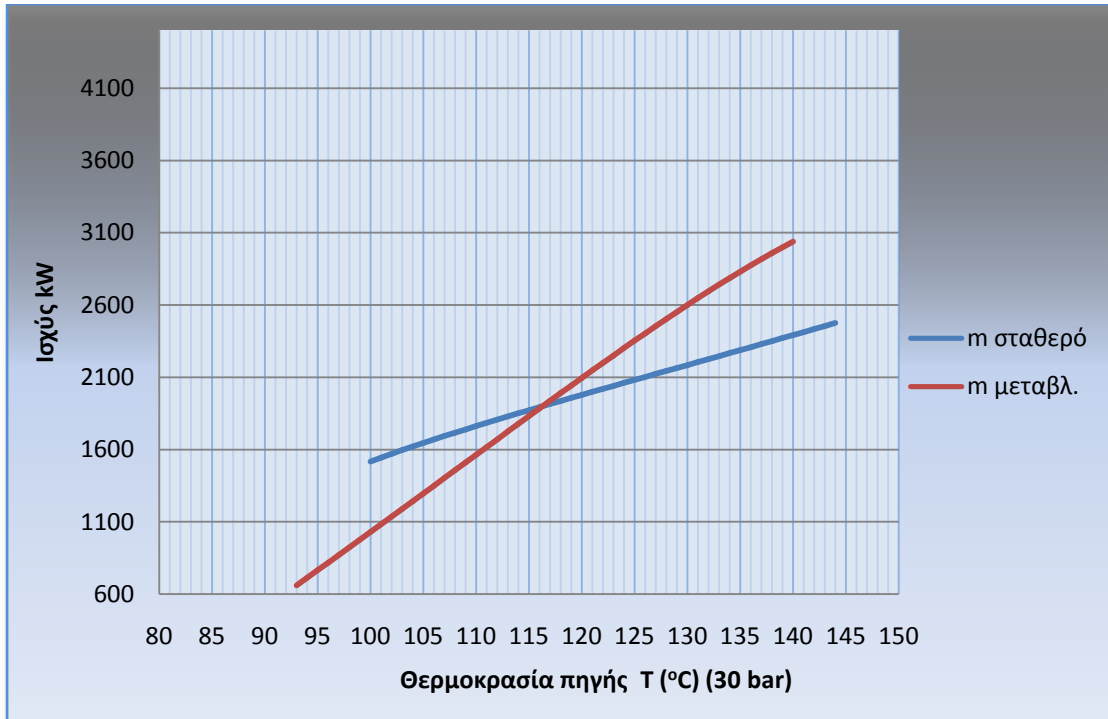


Σχήμα 104 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 35 bar.

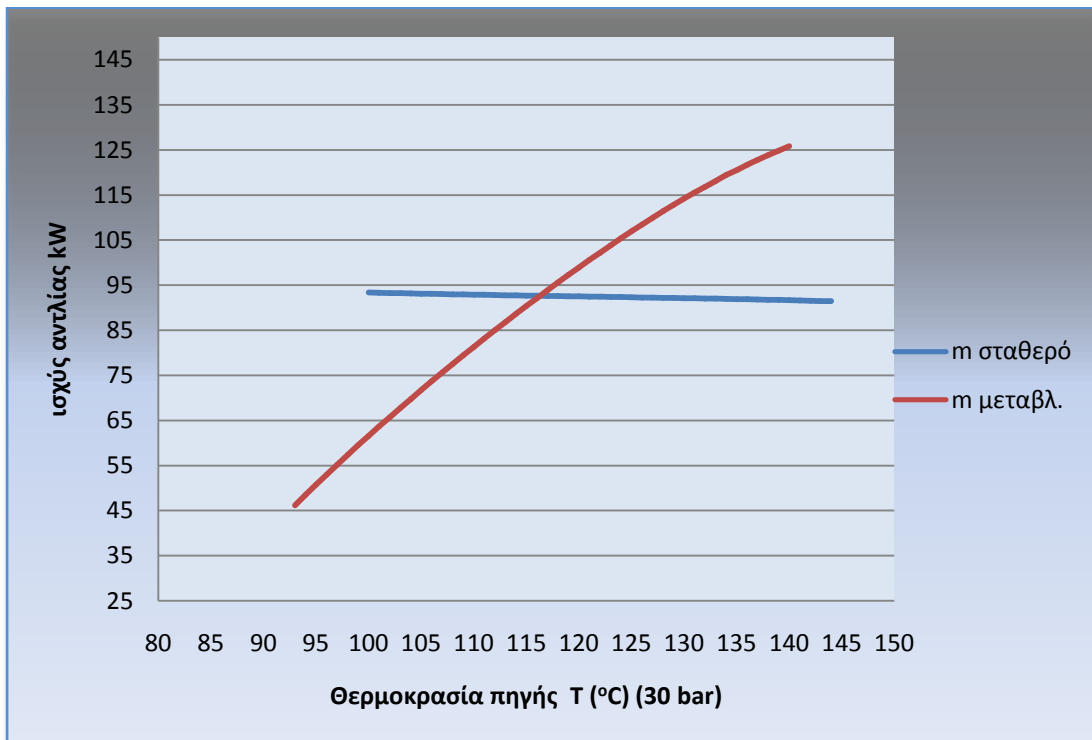
30 bar



Σχήμα 105 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.



Σχήμα 106 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

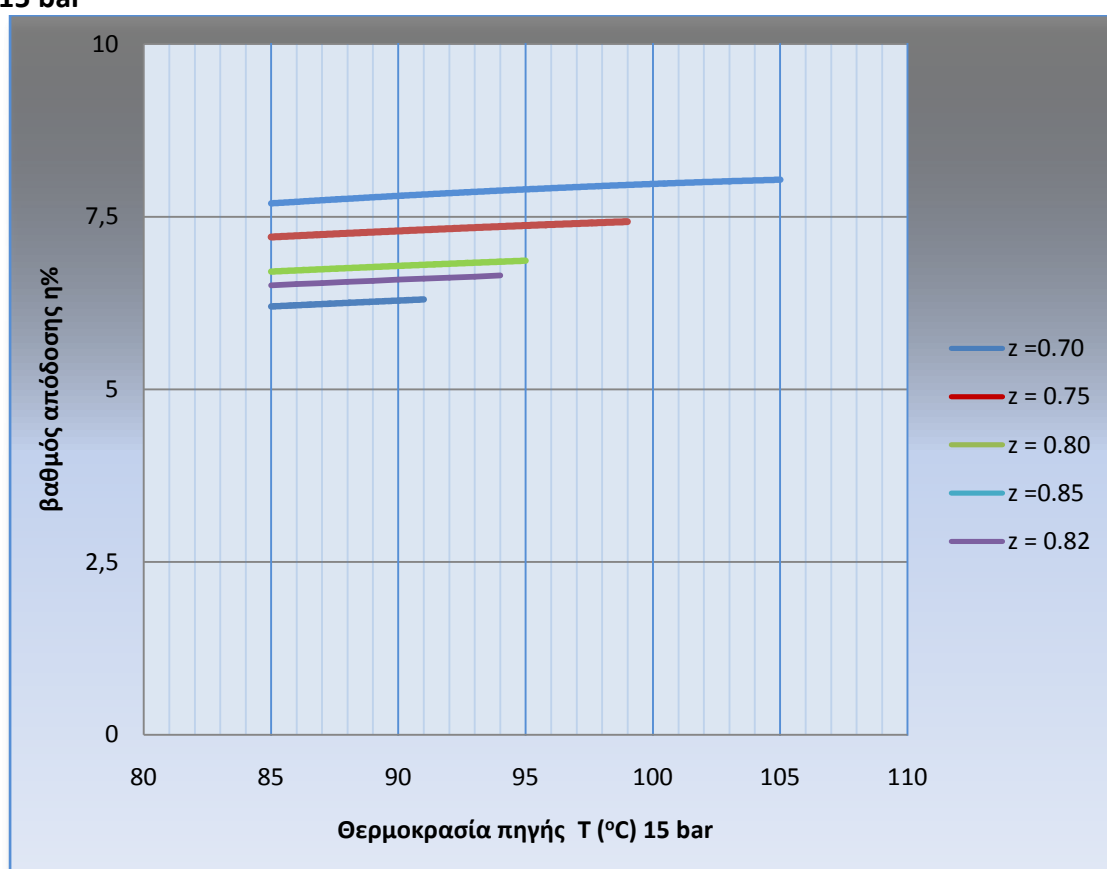


Σχήμα 107 Ισχύς αντλίας σε σχέση με την θερμοκρασία πηγής για υψηλή πίεση 30 bar.

Έχοντας υπολογίσει τις διάφορες παραμέτρους του κύκλου ανάλογα με τα επίπεδα πιέσεων μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι στις υψηλές πιέσεις των 30,35,40 bar επιτυγχάνουμε καλούς βαθμούς απόδοσης σε σχέση και με την ισχύ που παίρνουμε. Για πιέσεις μεγαλύτερες των 45 bar η ενέργεια που πρέπει να δαπανήσουμε μέσω της τροφοδοτικής αντλίας είναι πολύ μεγαλύτερη με συνέπεια στην σταδιακή μείωση του βαθμού απόδοσης.

Μια συνιστώσα η οποία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον κύκλο Kalina είναι το κλάσμα μάζας την αμμωνίας στο εργαζόμενο μέσο. Διατηρώντας σταθερές τις πιέσεις εξετάζονται τα μεγέθη που υπολογίσαμε παραπάνω σε ένα εύρος διαφορετικών συστάσεων του μίγματος πριν την είσοδο του στον διαχωριστή. Οι υπολογισμοί γίνονται για $z = 0.70, 0.75, 0.80, 0.82, 0.85, 0.90, 0.92$.

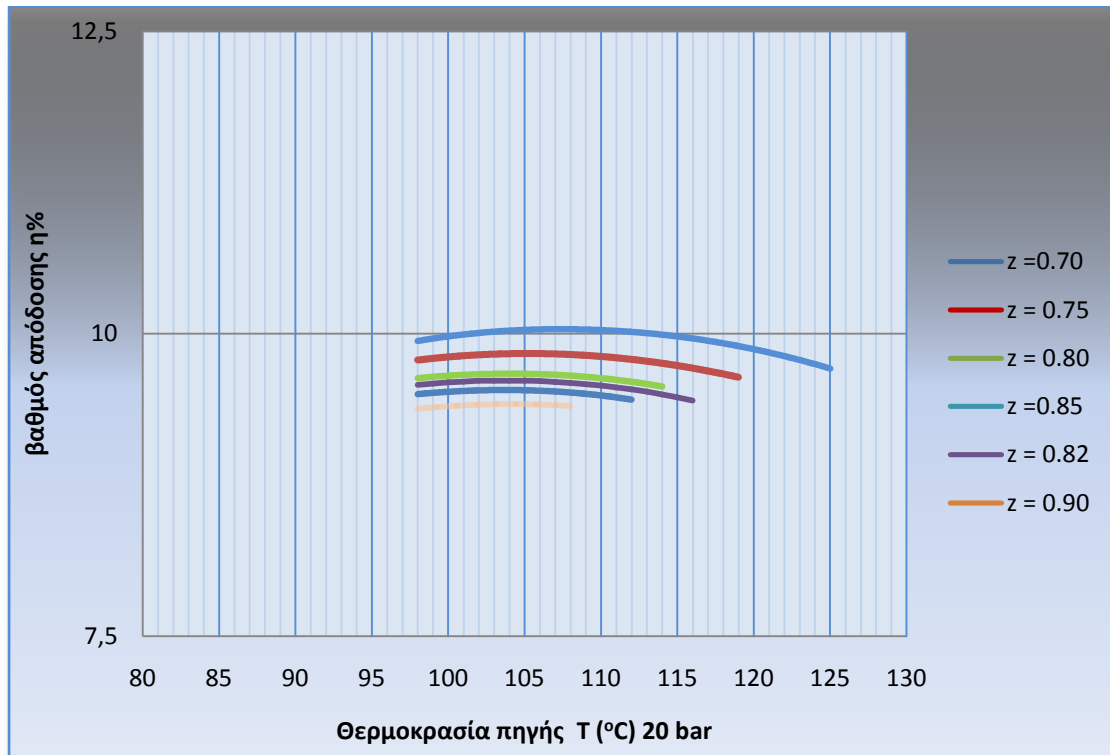
15 bar



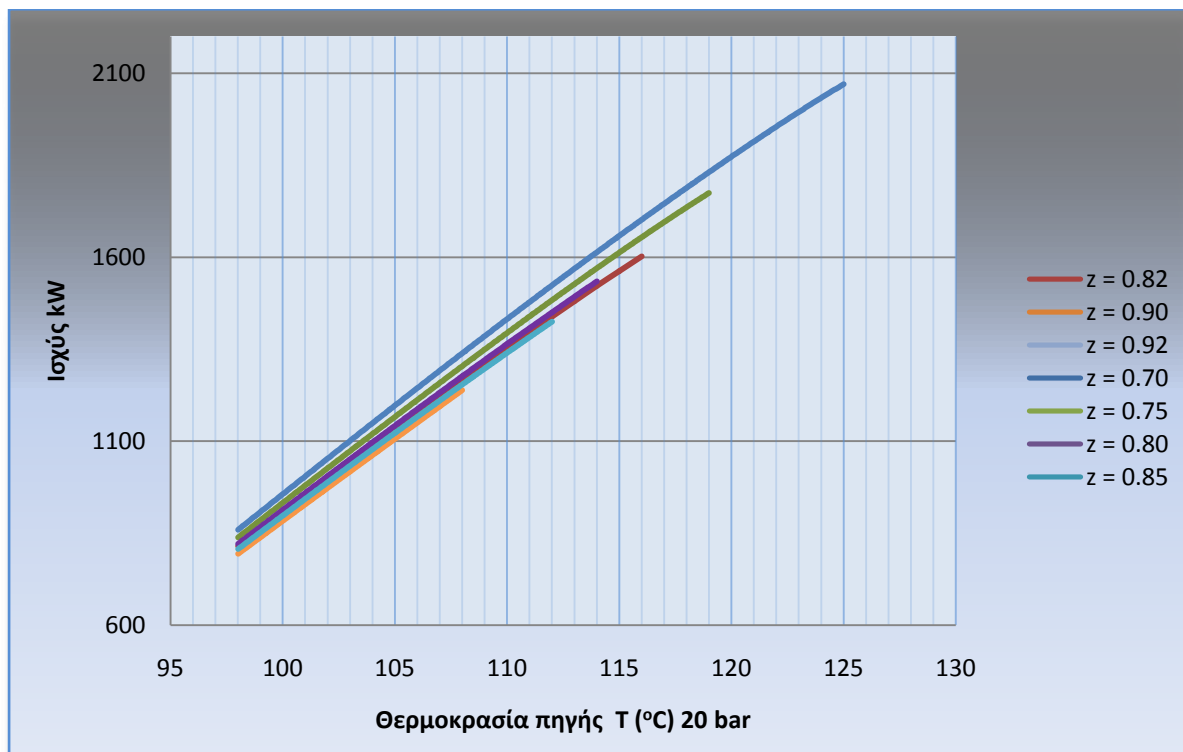
Σχήμα 108 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι έχουμε μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης για $z = 0.70$ και μικρότερους για $z = 0.85$. Καθώς μειώνεται το z , έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης θερμότητας, απορρίπτουμε λιγότερη θερμότητα στο περιβάλλον οπότε έχουμε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης για συγκεκριμένη θερμοκρασία γεωθερμικού ρευστού. Η αύξηση της ισχύος είναι ελάχιστη.

20 bar

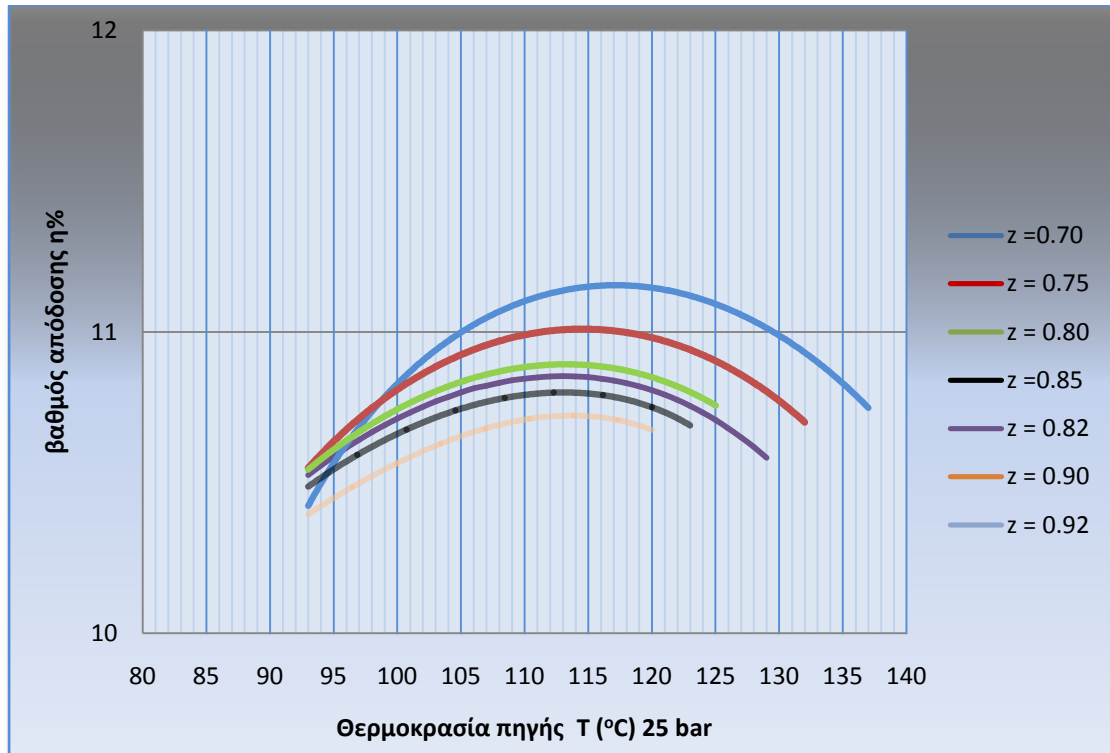


Σχήμα 109 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

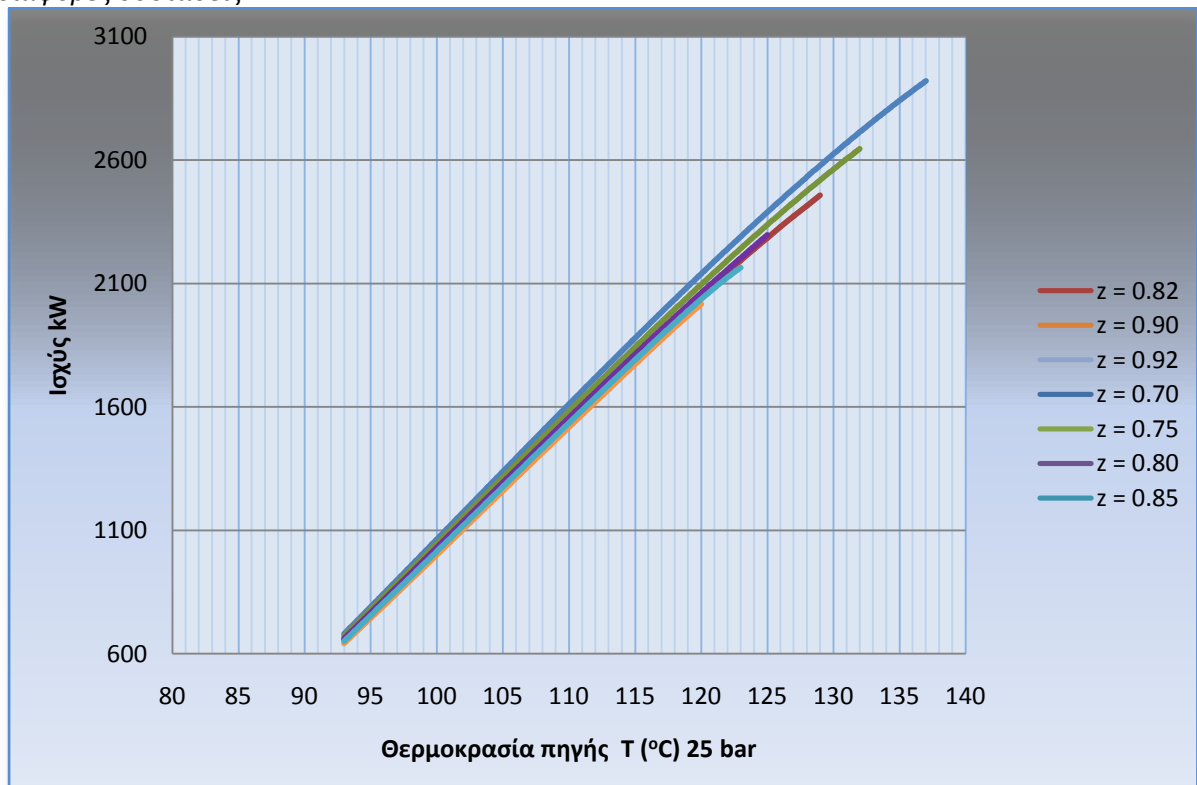


Σχήμα 110 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

25 bar

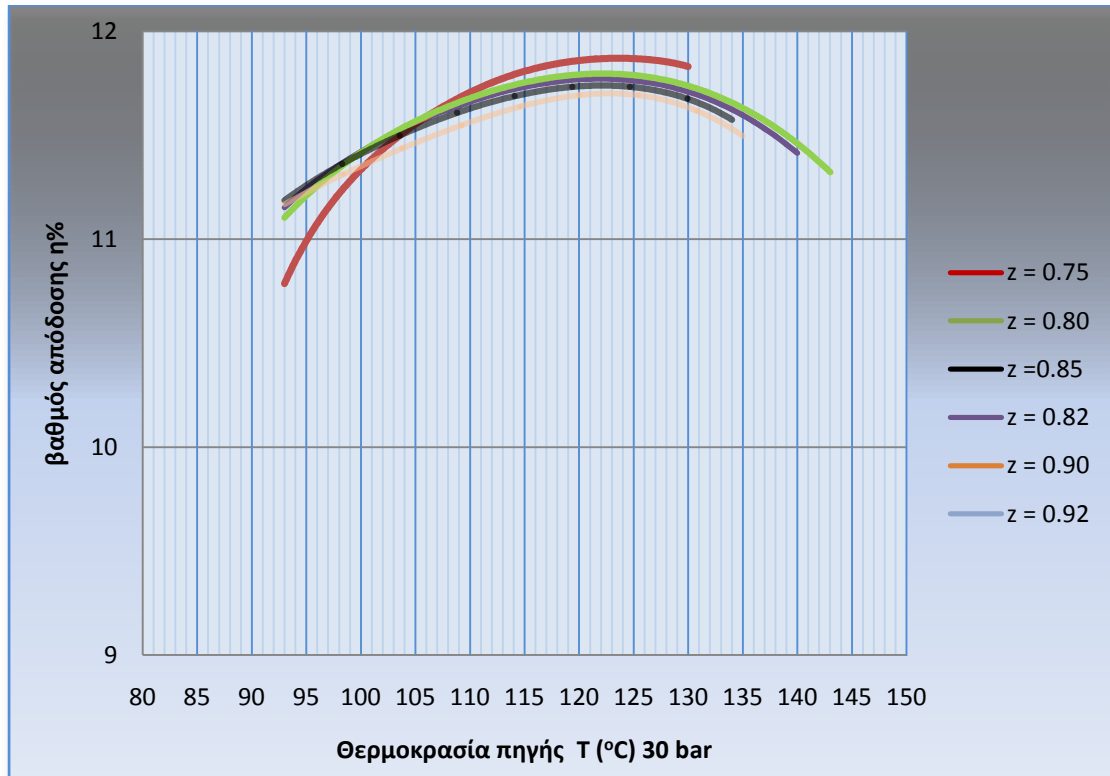


Σχήμα 111 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

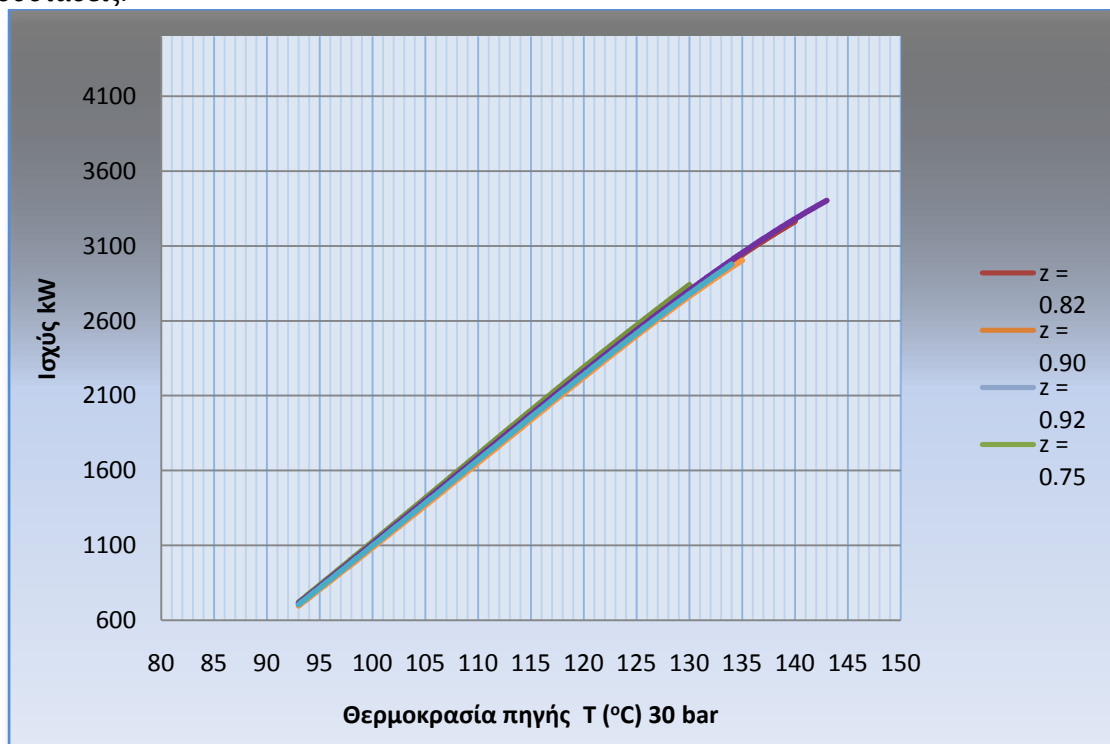


Σχήμα 112 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

30 bar

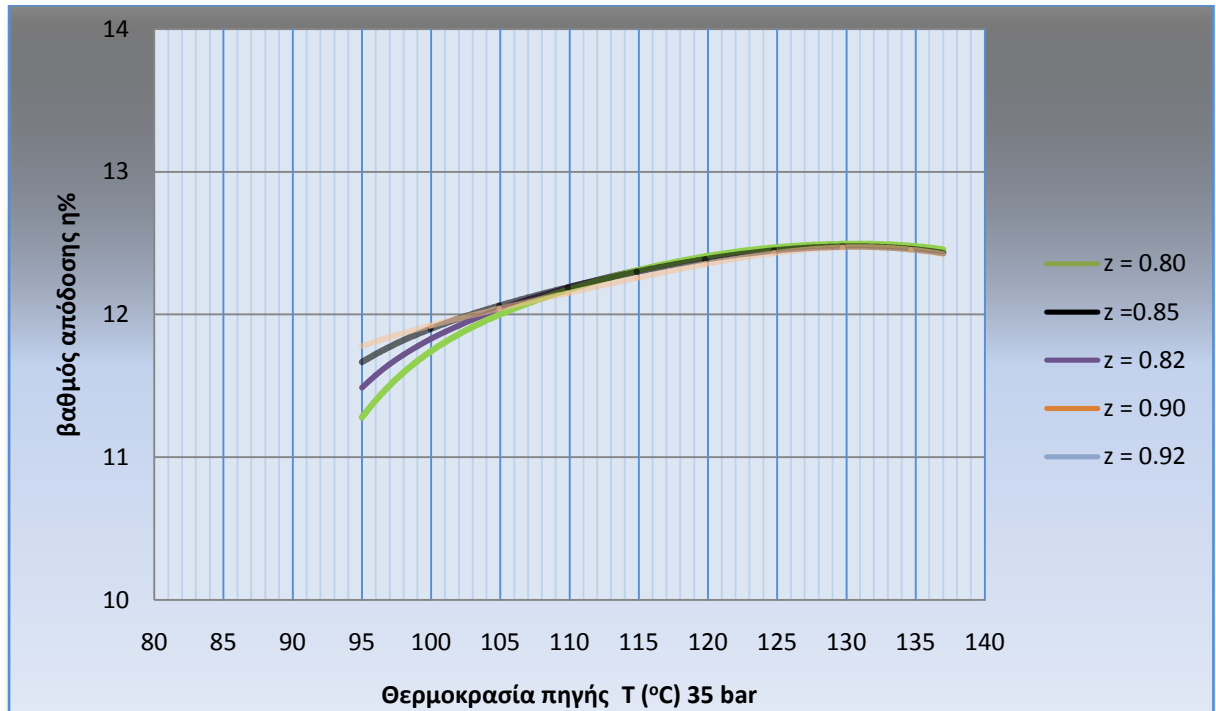


Σχήμα 113 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

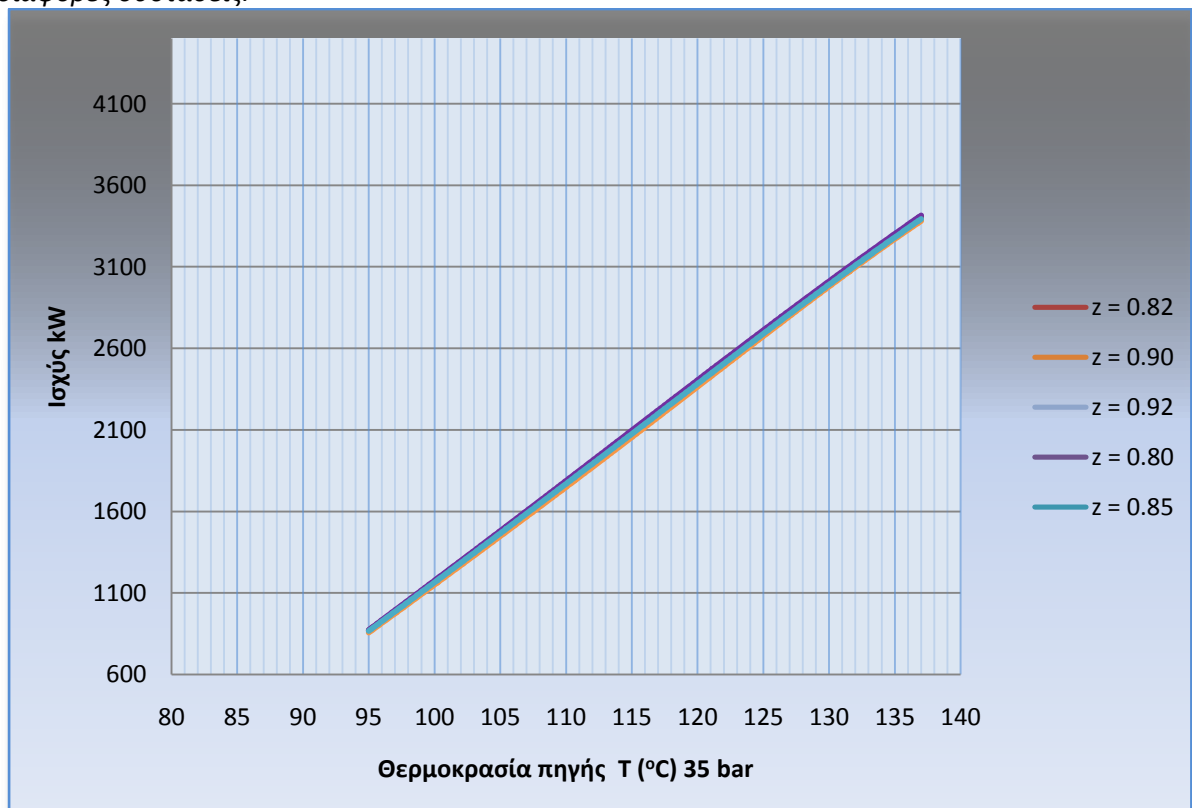


Σχήμα 114 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής.

35 bar



Σχήμα 115 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

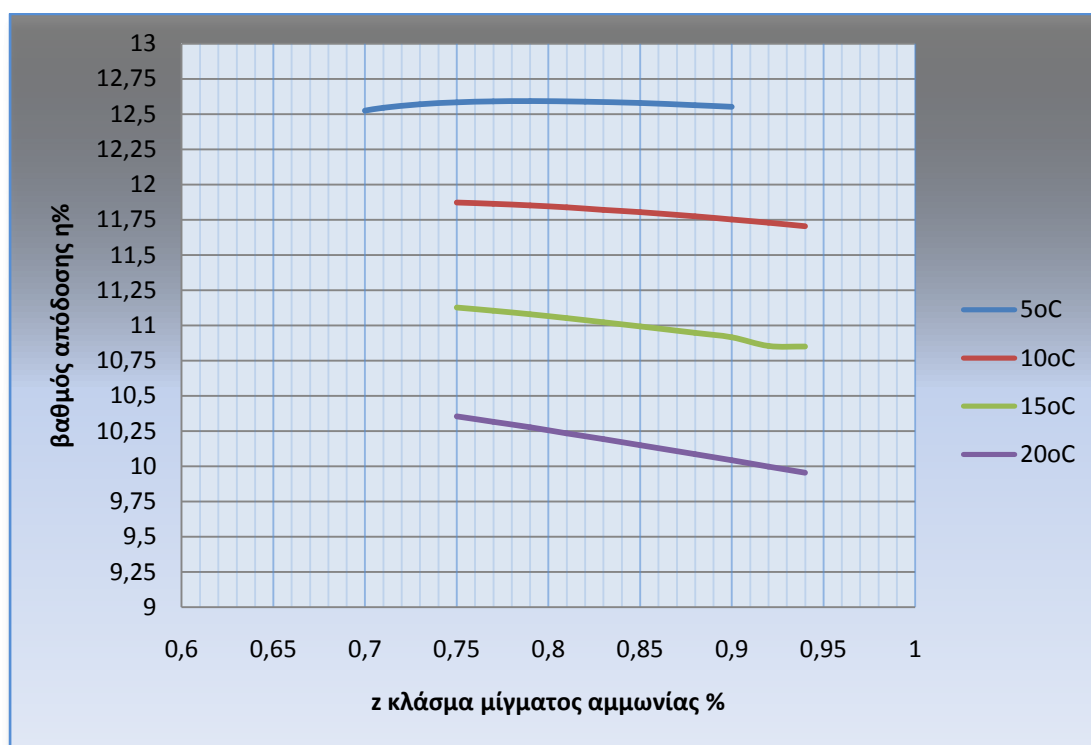


Σχήμα 116 Ισχύς κύκλου σε σχέση με την θερμοκρασία της πηγής για διάφορες συστάσεις.

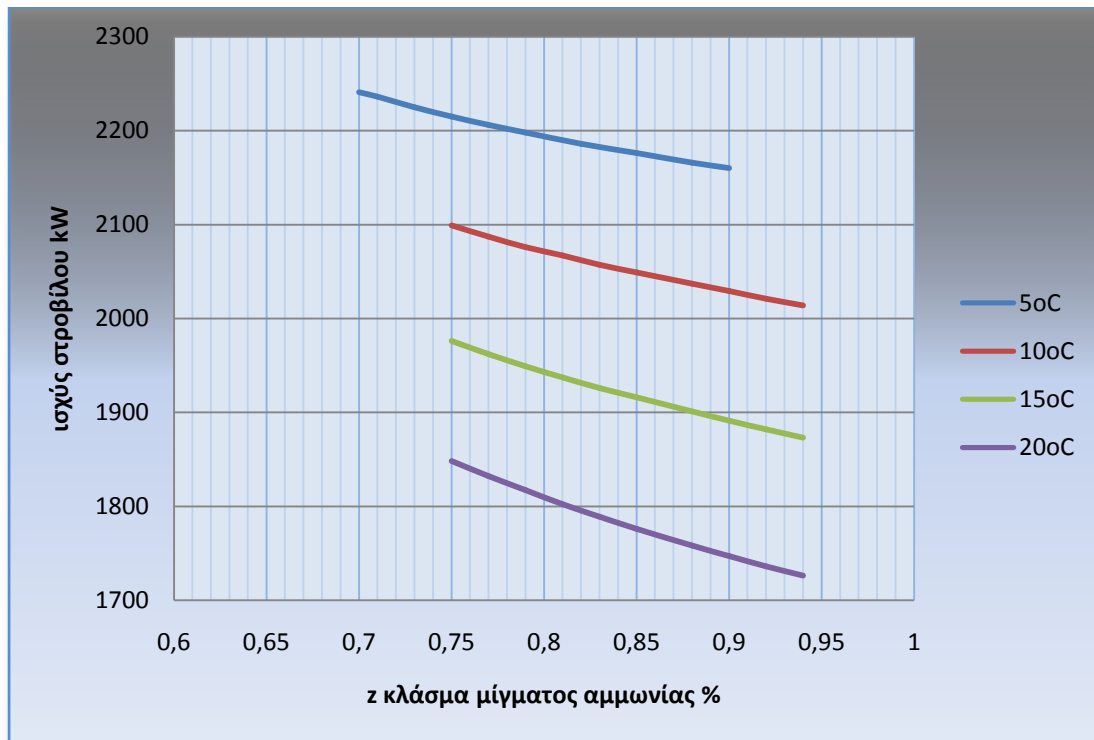
Το νερό ψύξης είναι ένας παράγοντας που παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην απόδοση ενός θερμοδυναμικού κύκλου όπως είναι ο Kalina. Άλλη θερμοκρασία έχει το νερό ψύξης τον χειμώνα και άλλη το καλοκαίρι, όπως επίσης άλλη θερμοκρασία έχει στην Ισλανδία (5°C) και άλλη στην Ελλάδα (18°C). Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα εισόδου για τον κύκλο του Husavik και αλλάζοντας σταδιακά την θερμοκρασία του νερού ψύξης σε συνδυασμό με διαφορετικά κλάσματα μίγματος υπολογίζουμε εκ νέου τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν όπως φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Οι σταθερές συνιστώσες του κύκλου είναι:

Πίνακας 14 . Σταθερές συνιστώσες του κύκλου.

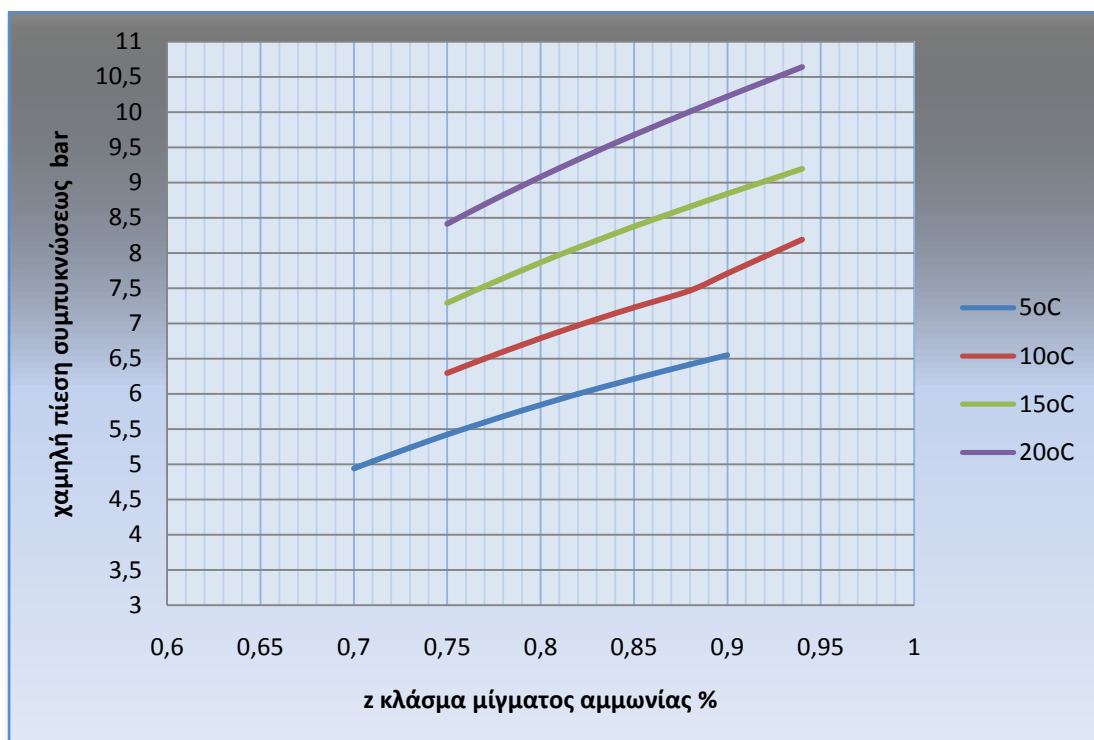
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	35	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	2 (°C)
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	90 kg/s	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντιρροή	
Θερμοκρασία ρευστού πηγής	120(°C)		
Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar		
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.87		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.97		
Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7		
Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95		



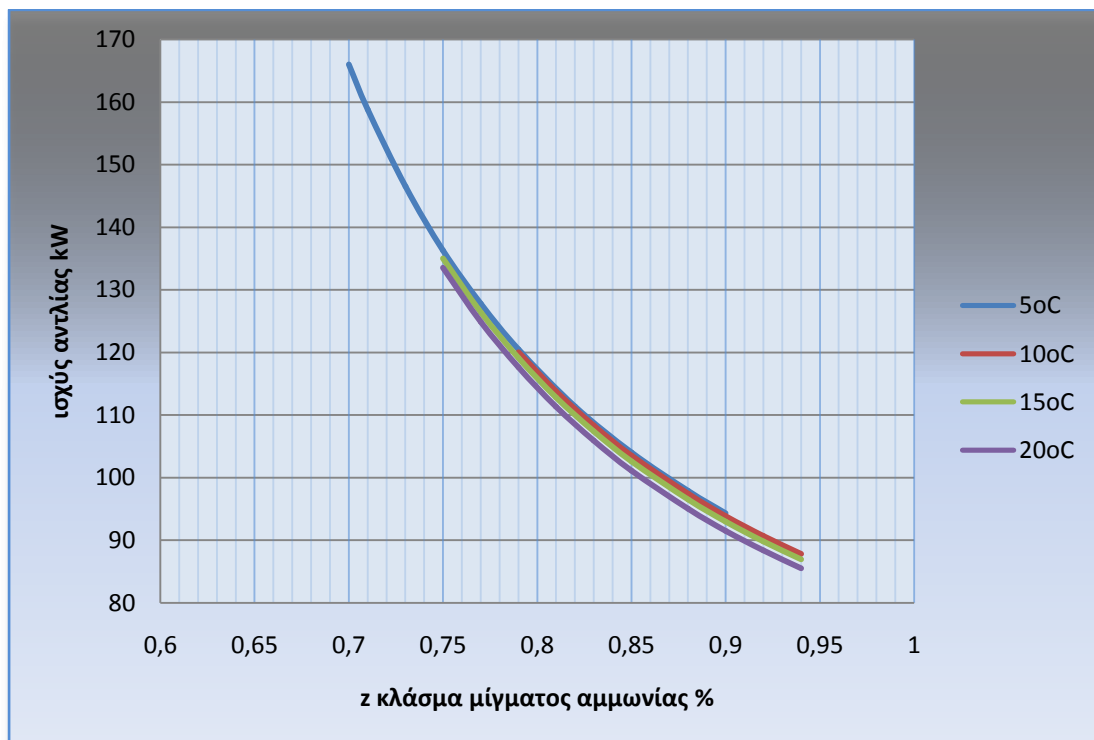
Σχήμα 117 Βαθμός απόδοσης κύκλου σε σχέση με το κλάσμα μίγματος αμμωνίας για διάφορες θερμοκρασίες του νερού ψύξης.



Σχήμα 118 Ισχύς κύκλου σε σχέση με το κλάσμα μίγματος αμμωνίας για διάφορες θερμοκρασίες του νερού ψύξης.



Σχήμα 119 Τιμές της πίεσης συμπυκνώσεως σε σχέση με το κλάσμα μίγματος αμμωνίας για διάφορες θερμοκρασίες του νερού ψύξης.

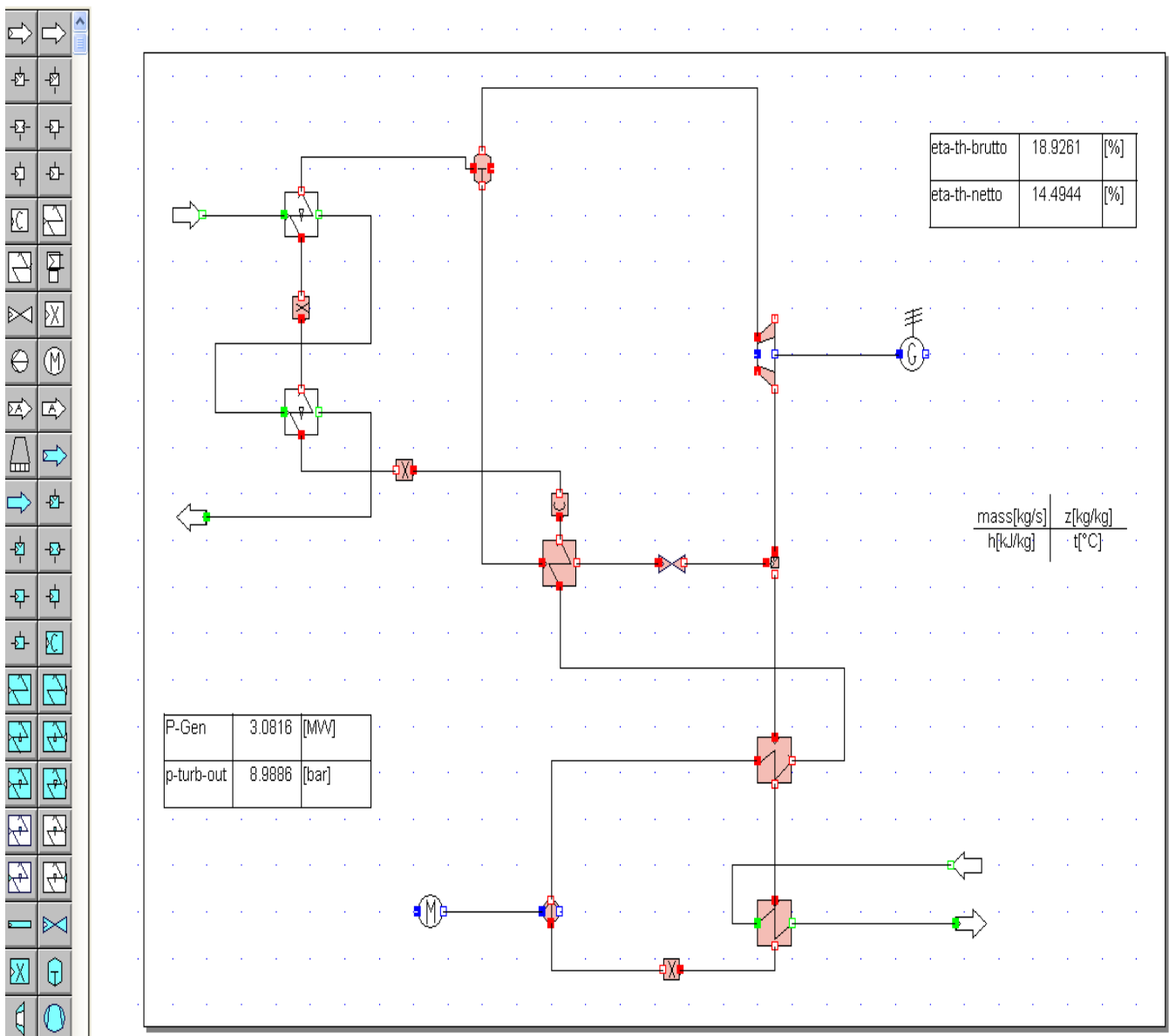


Σχήμα 120 Ισχύς αντλίας σε σχέση με το κλάσμα μίγματος αμμωνίας για διάφορες θερμοκρασίες του νερού ψύξης.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης ο βαθμός απόδοσης και η παραγωγή ισχύος μειώνονται αισθητά. Η αύξηση της πίεσης συμπύκνωσης οδηγεί σε μικρότερη διαφορά πίεσης στον στρόβιλο, άρα μικρότερη παραγωγή ισχύος και συνεπώς μικρότερο βαθμό απόδοσης αφού εκμεταλλευόμαστε με αυτό τον τρόπο μικρότερο ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας.

Κύκλος Kalina με δύο εναλλάκτες στην ατμοποίηση

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας με θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού άνω των 150°C έχουμε την δυνατότητα να τοποθετήσουμε δύο εναλλάκτες σε σειρά κατά την διάρκεια της ατμοποίησης διότι όταν από τον πρώτο εναλλάκτη το ρευστό εξέρχεται με θερμοκρασία περίπου $100-120^{\circ}\text{C}$ μπορεί να διαθέσει επιπλέον ποσό θερμότητας στον κύκλο αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσής του. Το σχηματικό διάγραμμα του κύκλου όπως δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα IPSEpro φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 121 Σχηματικό διάγραμμα κύκλου Kalina με 2 εναλλάκτες στην ατμοποίηση.

Τα στοιχεία του κύκλου δίνονται στον πίνακα.

Πίνακας 15 . Σταθερές συνιστώσες του κύκλου.

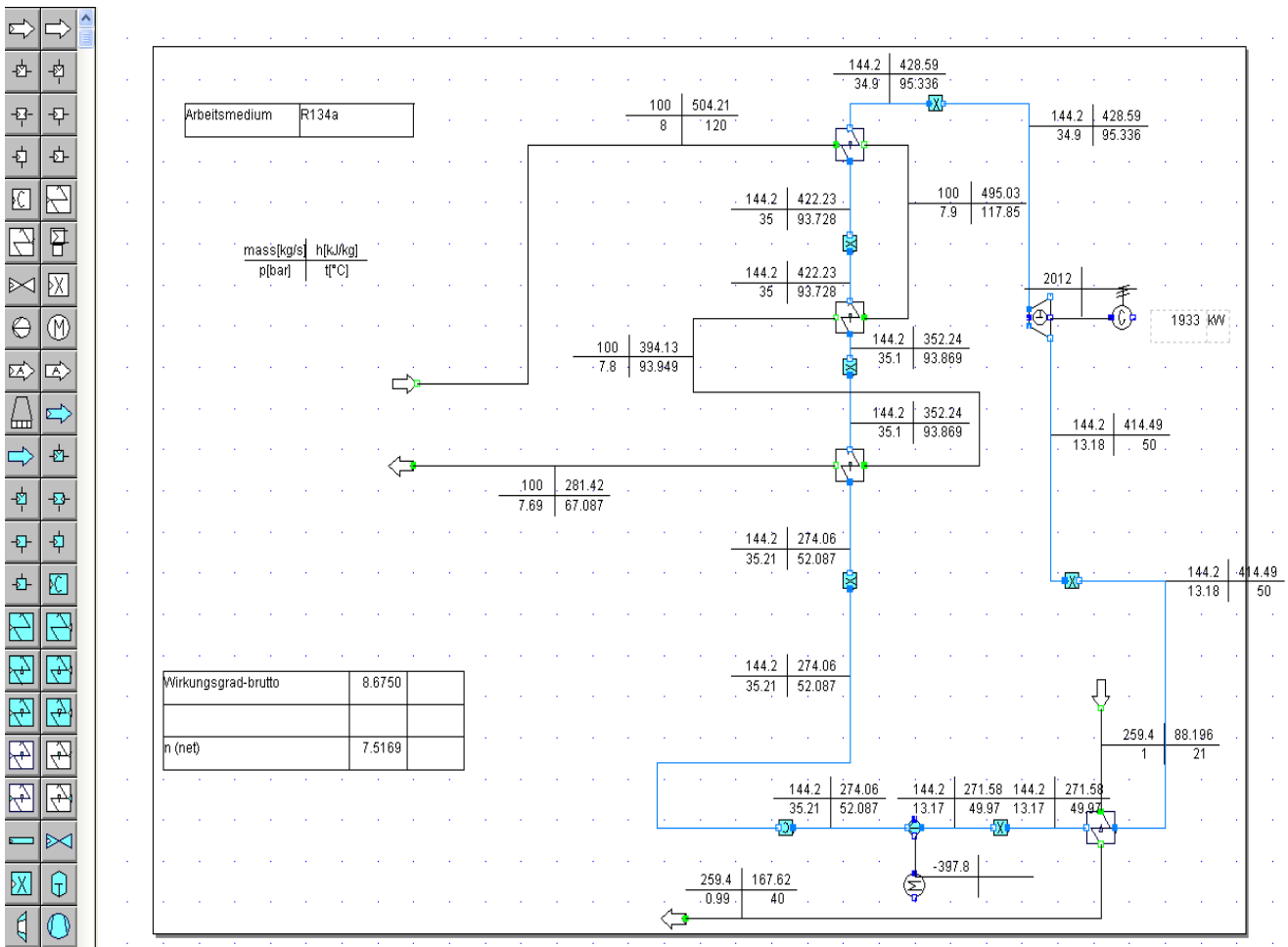
Βαθμός απόδοσης κύκλου(net)	14,49 %	Κλάσμα μάζας αμμωνίας z(kg/kg)	0.82
Έργο εξόδου (kW)	3310 kW	Κλάσμα μάζας αμμωνίας πλούσιου διαλύματος	0.914
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	40	Κλάσμα μάζας αμμωνίας φτωχού διαλύματος	0.407
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	8,8	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.90
Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου(° C)	148° C	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.97
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	80 kg/s	Ισχύς αντλίας (kW)	100 kW
Θερμοκρασία πηγής (° C)	150° C	Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.8
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	10° C	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία επανεισαγωγής	102° C		

5.5 Αποτελέσματα υπολογισμών για οργανικό κύκλο Rankine (O.R.C)

Όπως και προηγουμένα με τον κύκλο Kalina θα γίνει προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine με το πρόγραμμα IPSEpro. Οι συνιστώσες οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο για τις επιδόσεις του κύκλου αυτού είναι καταρχάς το είδος του εργαζόμενου μέσου και στην συνέχεια τα επίπεδα πιέσεων , η ύπαρξη ή όχι αναθέρμανσης , η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού , η θερμοκρασία του νερού ψύξης και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου.

Τα χαρακτηριστικά του κύκλου ο οποίος αρκικά θα εξεταστεί είναι τα εξής:

- Εργαζόμενο μέσο R134a.
- Σύστημα εκτόνωσης στροβίλου – γεννήτριας
- Συμπυκνωτής (condenser)
- Αντλία τροφοδοσίας
- Σύστημα ατμοποίησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 3 εναλλάκτες ο καθένας από τους οποίους παίρνει ποσοστό της θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου.

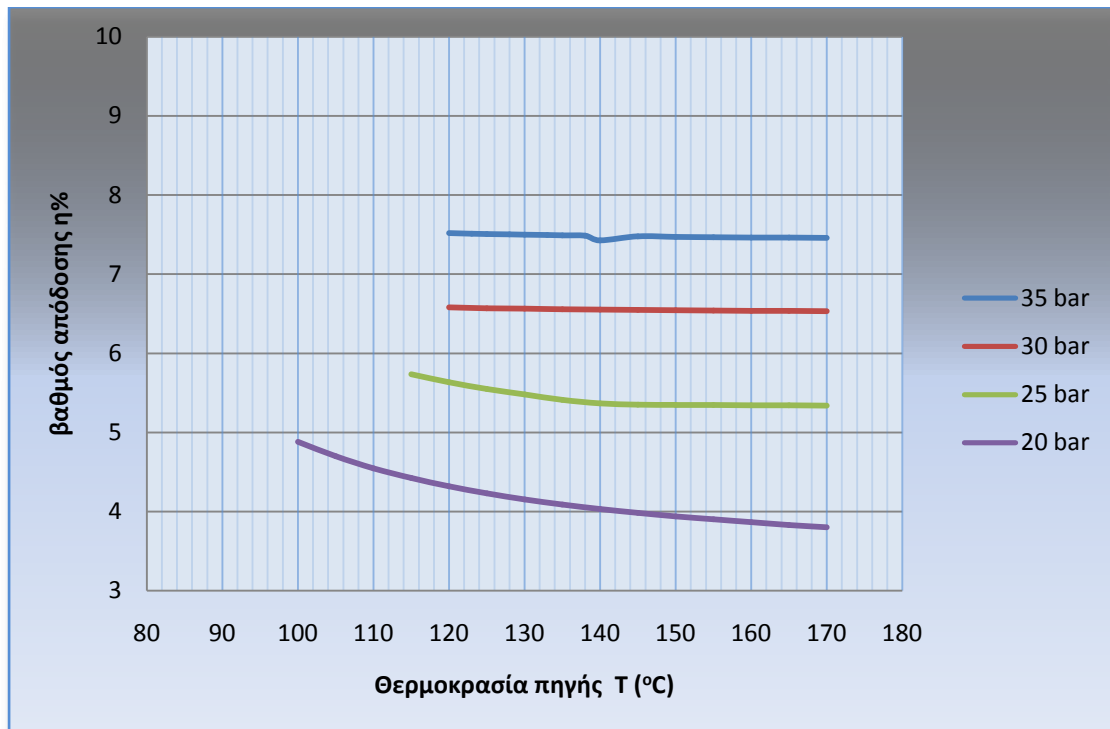


Σχήμα 123 Σχηματικό διάγραμμα ORC μετά τον υπολογισμό των επιμέρους στοιχείων του κύκλου.

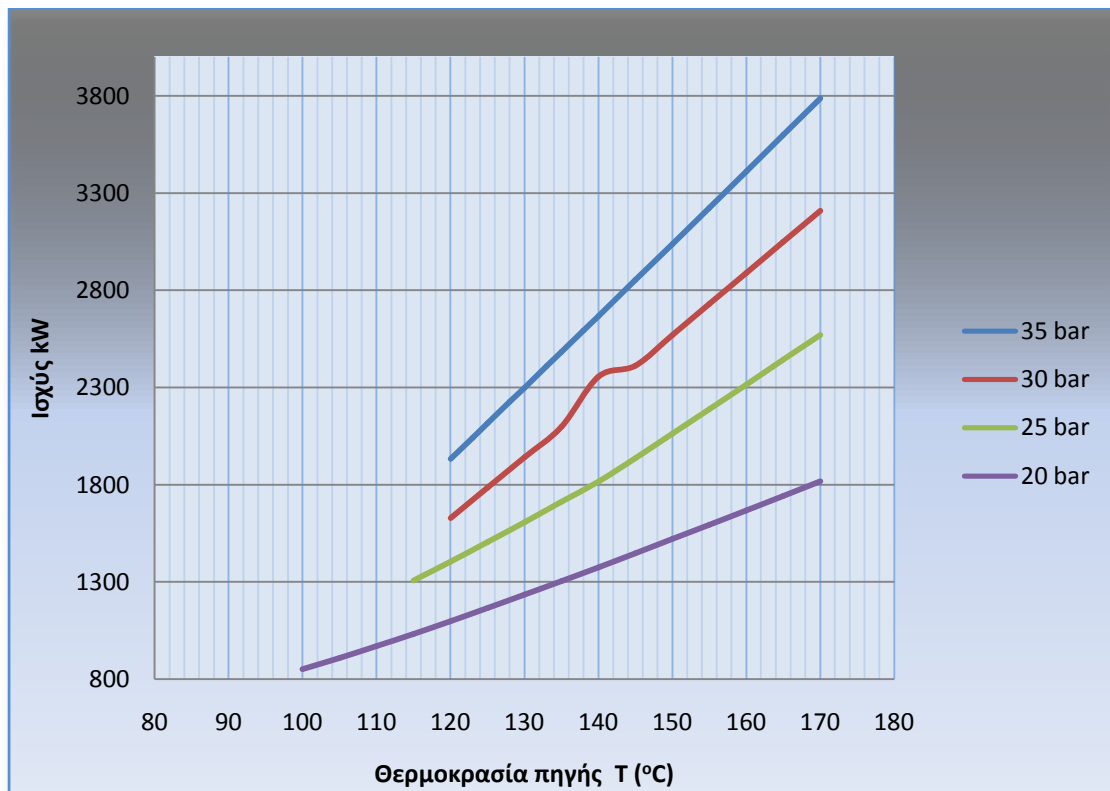
Για το εργαζόμενο μέσο R134a ισχύουν τα εξής:

Refrigerant	T_c (°C)	P_c (bar)	$T_{s,1bar}$ (°C)	$P_{s,20oc}$ (bar)
R134a	101.1	40.6	-27.1	5.7

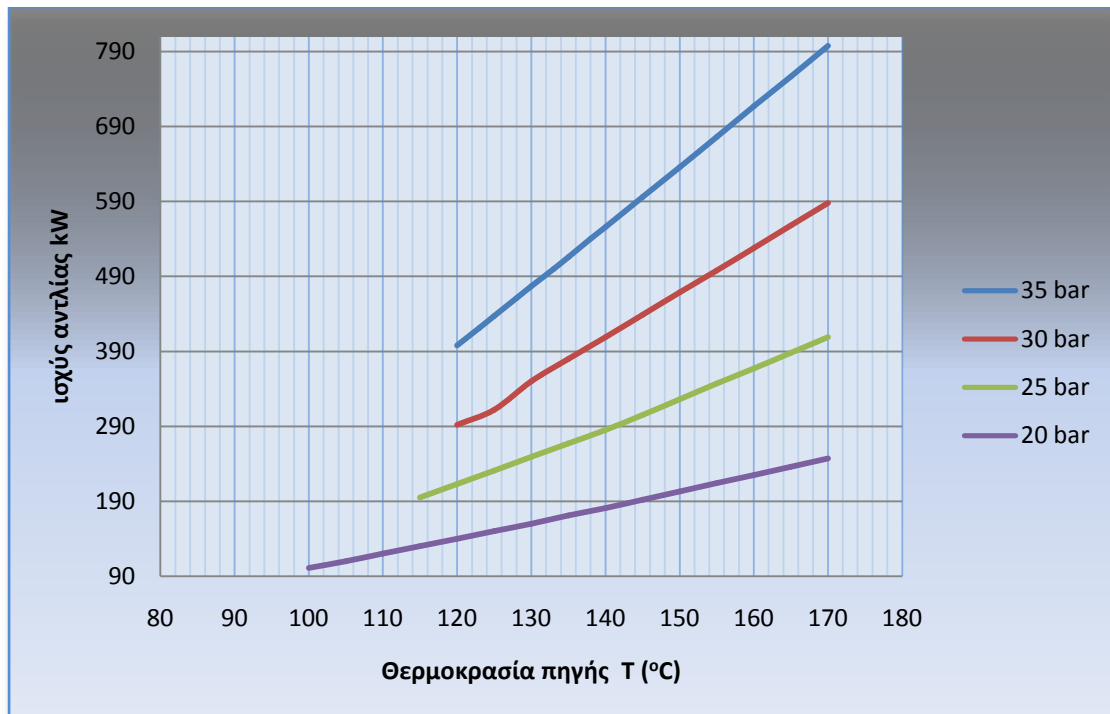
Όπου T_c και P_c είναι η θερμοκρασία και η πίεση του κρίσιμου σημείου, $T_{s,1bar}$ η κανονική θερμοκρασία ατμοποίησης και $P_{s,20 bar}$ η πίεση ατμοποίησης. Παρακάτω δίδονται διαγράμματα του βαθμού απόδοσης, της ισχύς εξόδου του κύκλου στην γεννήτρια και της ισχύς της τροφοδοτικής αντλίας συναρτήσει της θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού για διάφορα επίπεδα πιέσεων.



Σχήμα 124 Βαθμός απόδοσης οργανικού κύκλου Rankine συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής για διάφορα επίπεδα πιέσεων.



Σχήμα 125 Ισχύς της γεννήτριας συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής για διάφορα επίπεδα πιέσεων.



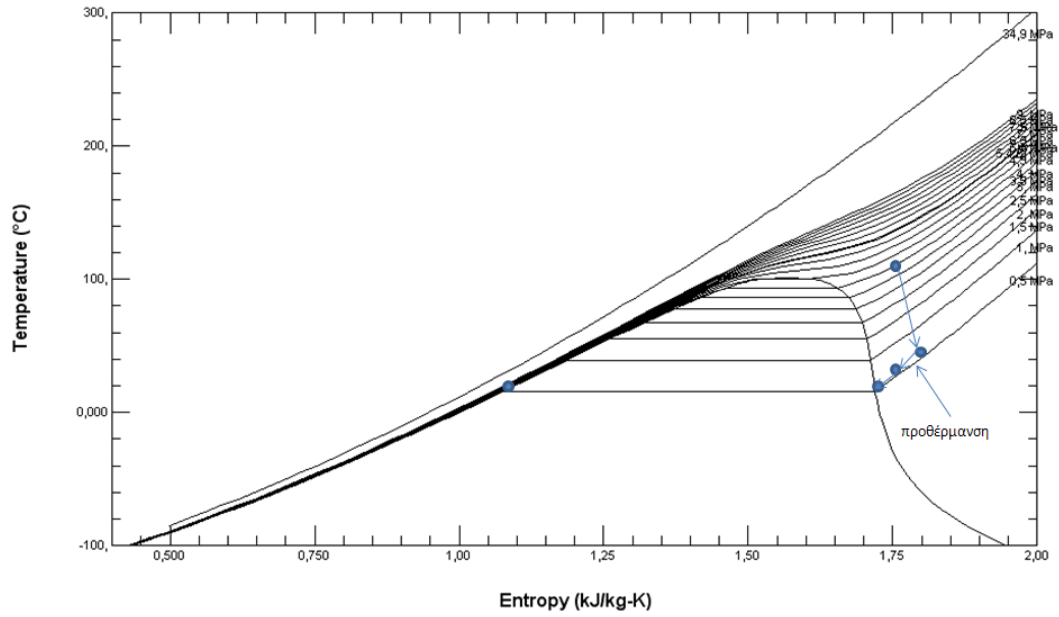
Σχήμα 126 Ισχύς της τροφοδοτικής αντλίας συναρτήσει της θερμοκρασίας της πηγής για διάφορα επίπεδα πιέσεων.

Κύκλος Rankine με εργαζόμενο μέσο R134a και χρήση προθέρμανσης μετά τον στρόβιλο.

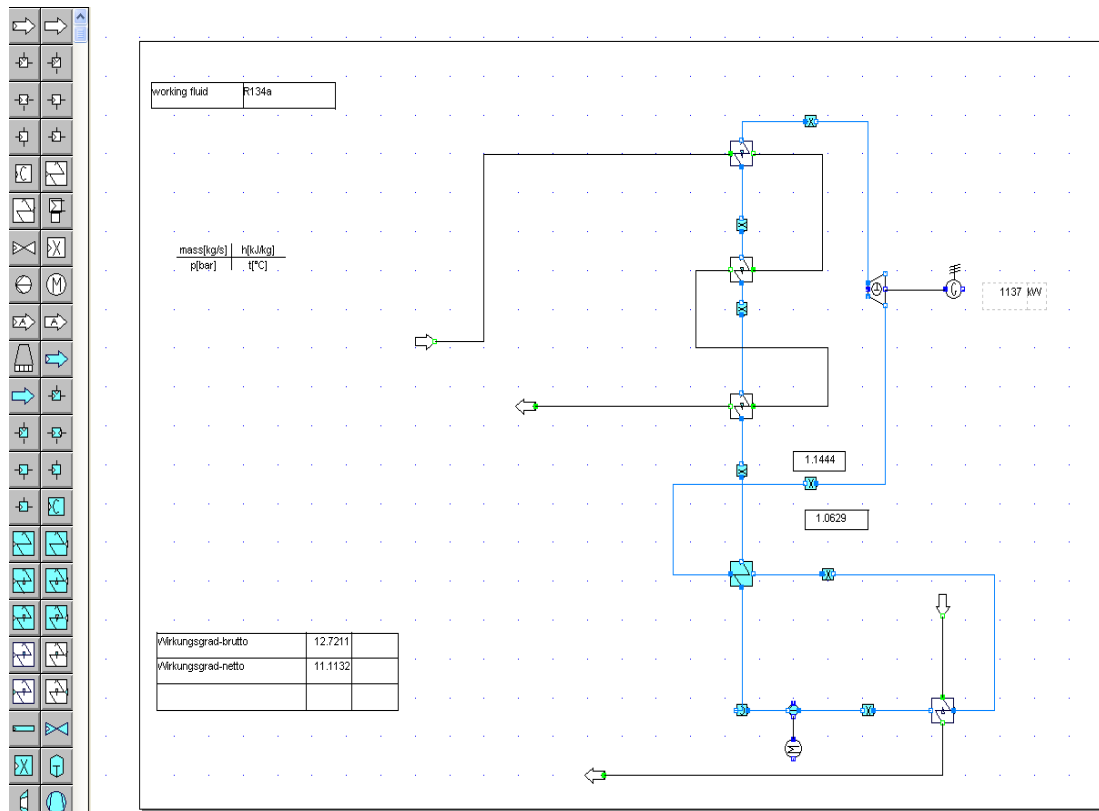
Τα νέα χαρακτηριστικά του κύκλου ο οποίος θα εξεταστεί είναι τα εξής:

- Εργαζόμενο μέσο R134a.
- Σύστημα εκτόνωσης στρόβιλου – γεννήτριας
- Προθερμαντής
- Συμπυκνωτής (condenser)
- Αντλία τροφοδοσίας
- Σύστημα ατμοποίησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από 3 εναλλάκτες ο καθένας από τους οποίους παίρνει ποσοστό της θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου.

Παρακάτω δίδεται διάγραμμα θερμοκρασίας- εντροπίας (T-s) για το μέσο R134a το οποίο μας δείχνει την διαδικασία της προθέρμανσης.



Σχήμα 127 Διάγραμμα T-s για R134a που απεικονίζει την διαδικασία της προθέρμανσης.

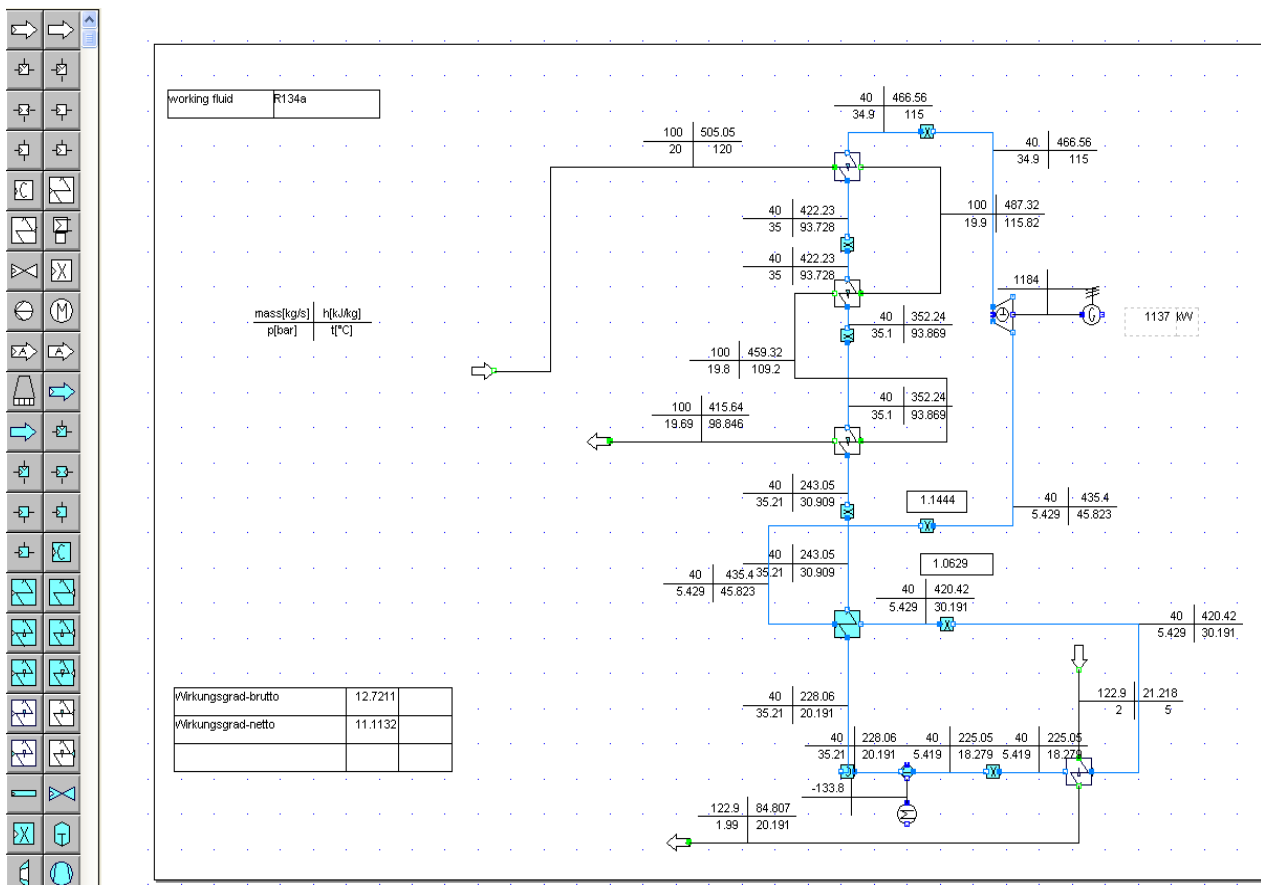


Σχήμα 128 Σχηματικό διάγραμμα ORC με προθερμαντή για R134a.

Για να είναι επιτεύξιμη η σύγκριση μεταξύ των κύκλων Kalina και ORC, για τον υπολογισμό των στοιχείων του ORC θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα από την εγκατάσταση του Husavik δηλαδή γεωθερμικό ρευστό με θερμοκρασία 120°C και παροχή 100 kg/s. Τα υπόλοιπα στοιχεία δίδονται στον πίνακα 17.

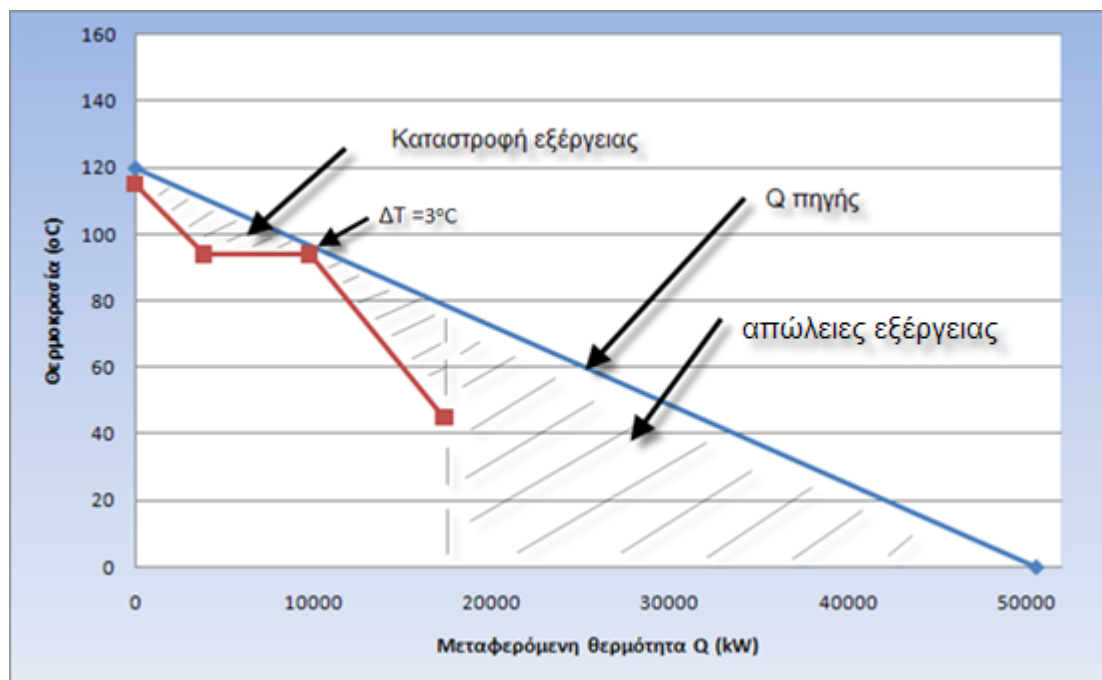
Πίνακας 17 . Στοιχεία από υπολογισμό κύκλου ORC

Εργαζόμενο μέσο	R134a	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	1137	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	34,9	Ισχύς αντλίας (kW)	134 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	5,429	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C		
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	11,11%		



Σχήμα 129 Σχηματικό διάγραμμα ORC με προθερμαντή μετά την επίλυση.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε γεωθερμικό ρευστό διαθέσιμο στους 120°C με μια παροχή 100 kg/s τότε η θερμότητα που μπορούμε να αξιοποιήσουμε είναι δεδομένη. Αν μπορούσαμε να απορροφήσουμε όλη αυτήν την θερμότητα από τον εναλλάκτη τότε θα είχαμε επιτύχει 100% μεταφορά θερμότητας. Επειδή όμως αυτό είναι ανέφικτο προσπαθούμε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερο βαθμό απόδοσης στον εναλλάκτη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 130 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει της μεταφερόμενης θερμότητας για R134a.

Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών είναι $(17349/50550) \cdot 100 = 34,32\%$. Άρα μπορούμε να εκμεταλευτούμε μόνο το 34,32% της προσδιδόμενης θερμότητας από την πηγή. Βλέπουμε επίσης ότι η πλησιέστερη θερμοκρασία που μπορούμε να φτάσουμε στον κύκλο έχει διαφορά 3 βαθμούς σε σχέση με την μέγιστη που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε. Τα στοιχεία αυτού του κύκλου είναι τα εξής:

Πίνακας 18 . Στοιχεία κύκλου για R134a.

Εργαζόμενο μέσο	R134a	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	1895	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	34,9	Ισχύς αντλίας (kW)	268 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	8,439	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (°C)	120° C	Q που εκμεταλλευόμαστε (KW)	17349
Θερμοκρασία νερού ψύξης (°C)	5° C	Q μεταφερόμενο (0-120oC)(kW)	55050
Βαθμός απόδοσης %	9,29%		

Δυο σημαντικοί παράμετροι που καθορίζουν έναν κύκλο είναι ο βαθμός απόδοσης και η ισχύς που παράγει. Για το εργαζόμενο μέσο R134a και με δεδομένη την θερμότητα εισόδου από το γεωθερμικό ρευστό που είναι διαθέσιμο τα στοιχεία του κύκλου που προκύπτει η μέγιστη παραγωγή ισχύος είναι:

Πίνακας 19. Στοιχεία κύκλου για μέγιστη παραγωγή ισχύος.

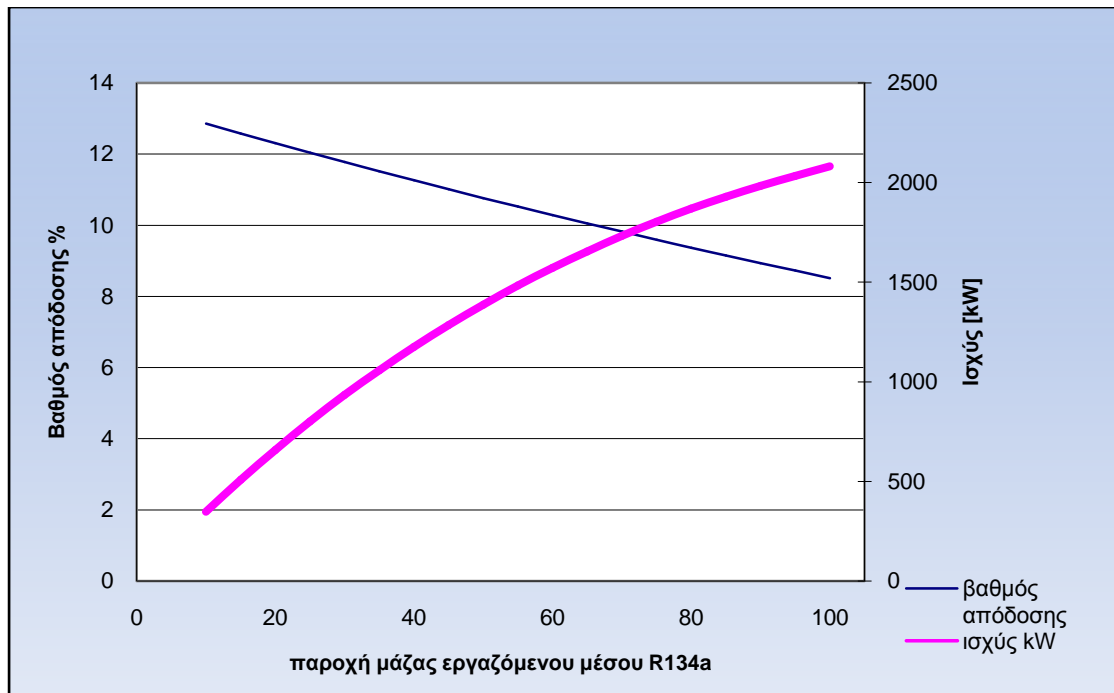
Εργαζόμενο μέσο	R134a	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	2080 kW	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	39,9	Ισχύς αντλίας (kW)	366 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	9,489	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Παροχή εργαζόμενου μέσου	100 kg/s
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	8,52%		

Επίσης τα στοιχεία του κύκλου για τα οποία προκύπτει ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης είναι:

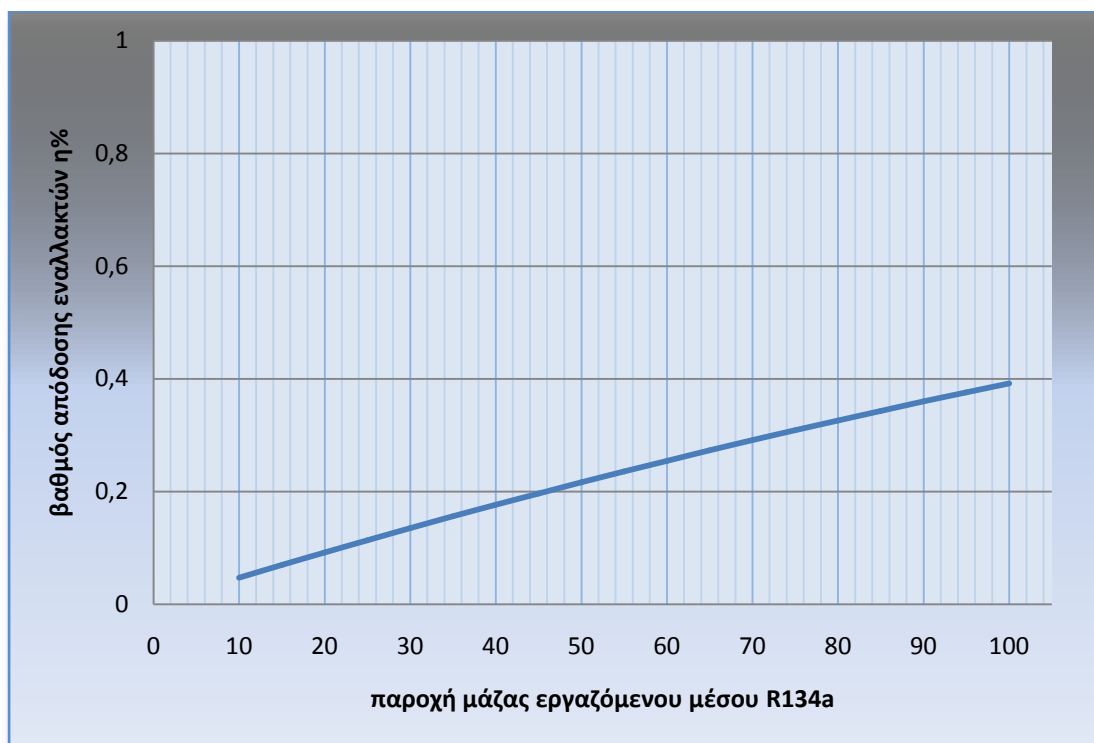
Πίνακας 20. Στοιχεία κύκλου για μέγιστο βαθμό απόδοσης.

Εργαζόμενο μέσο	R134a	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	348 kW	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	39,9	Ισχύς αντλίας (kW)	39.68 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	3.741	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Παροχή εργαζόμενου μέσου	10 kg/s
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	12.85 %		

Βλέπουμε ότι επιτυγχάνουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης 12,85% αλλά η ισχύς στην έξοδο είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση μέγιστης ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται κατα πολύ η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου με συνέπεια να εκμεταλλευόμαστε λιγότερη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται διότι καθώς μειώνεται η πίεση συμπύκνωσης στην δεύτερη περίπτωση το σημείο μετά την εκτόνωση του στροβίλου βρίσκεται κοντά στην καμπύλη κορεσμένου ατμού, οπότε μετά και από την προθέρμανση έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας που μας αποδίδεται από την πηγή. Δίδεται διάγραμμα της παροχής μάζας του R134a σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του κύκλου.



Σχήμα 131 Παροχή μάζας του R134a σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του κύκλου.

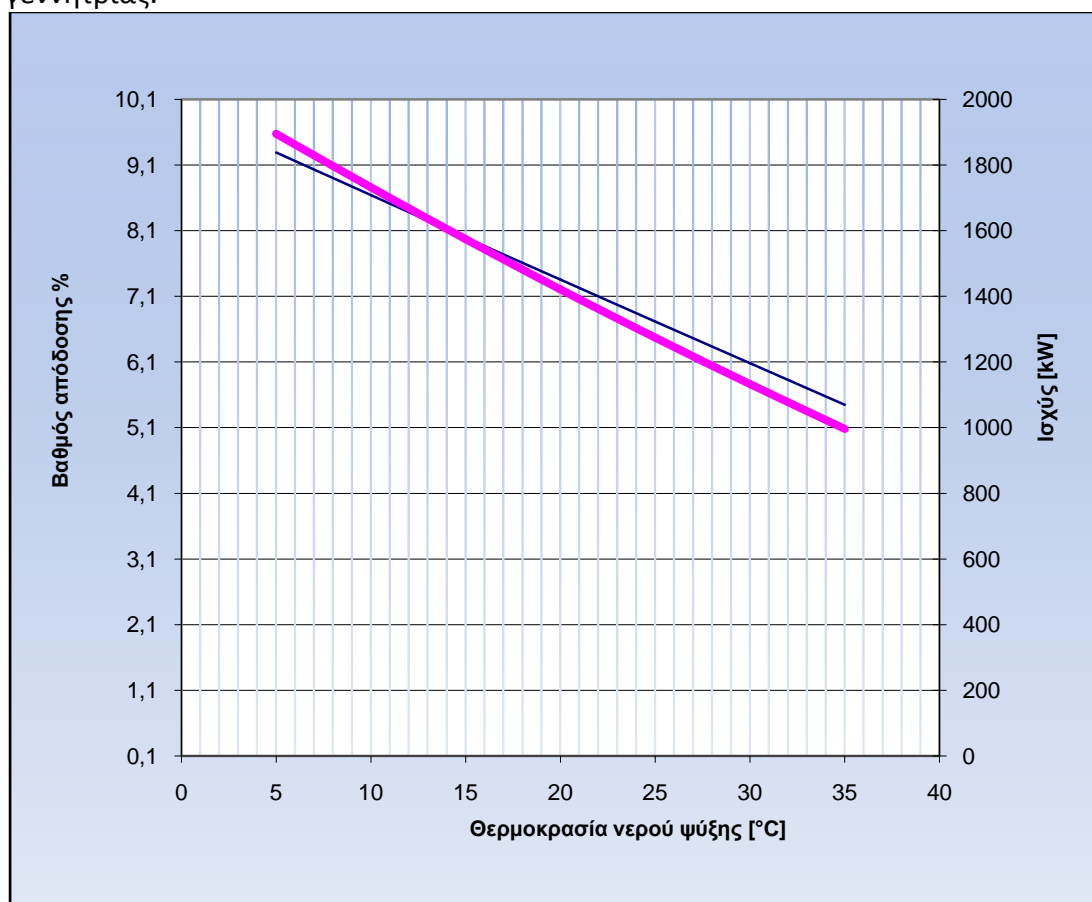


Σχήμα 132 Παροχή μάζας του R134a σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης εναλλακτικών.

Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών δίδεται από τον τύπο :
 $\eta = 1 - (T_{out}/T_{in})$ όπου T_{out} και T_{in} οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του γεωθερμικού ρευστού αντίστοιχα.

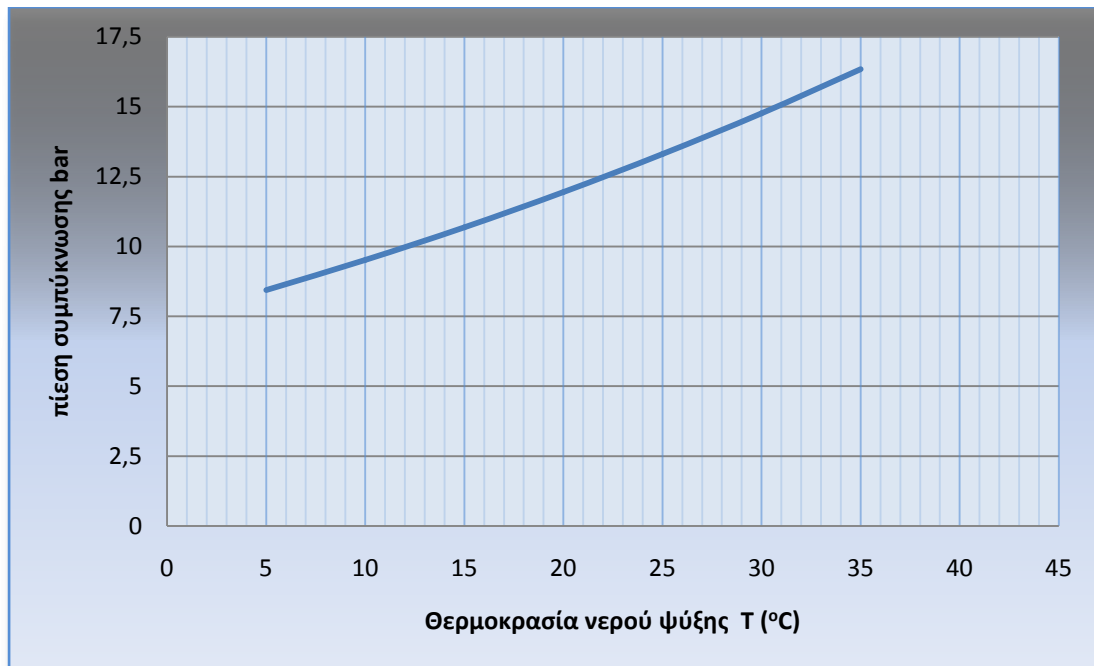
Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου διότι καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας η ενέργεια που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από το γεωθερμικό ρευστό αυξάνεται.

Παρακάτω δίδεται διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού ψύξης, της πίεσης συμπυκνώσεως και της ισχύος της γεννήτριας.



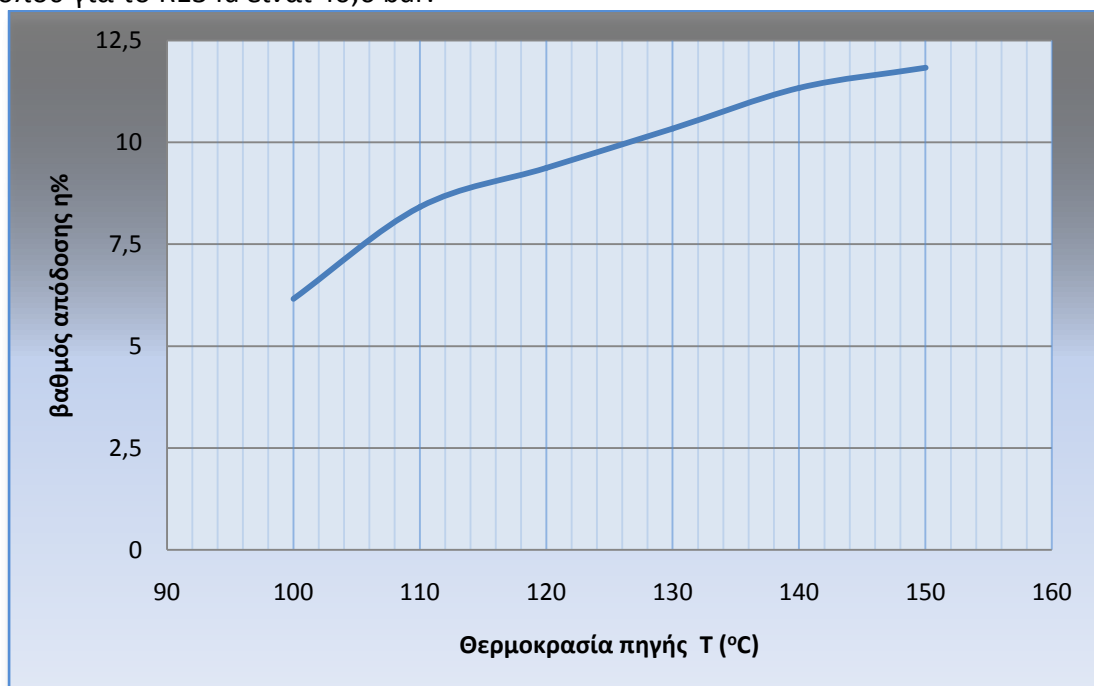
Σχήμα 133 Θερμοκρασία νερού ψύξης συναρτήσει του βαθμού απόδοσης και της παραγωγής ισχύος.

Φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού ψύξης όπως για παράδειγμα συμβαίνει το καλοκαίρι ο βαθμός απόδοσης μειώνεται αισθητά. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνεται το επίπεδο της πίεσης συμπυκνώσεως όπως θα δούμε στο επόμενο διάγραμμα με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη διαφορά πίεσης κατά την εκτόνωση του στροβίλου και συνεπώς μικρή παραγωγή ισχύος.

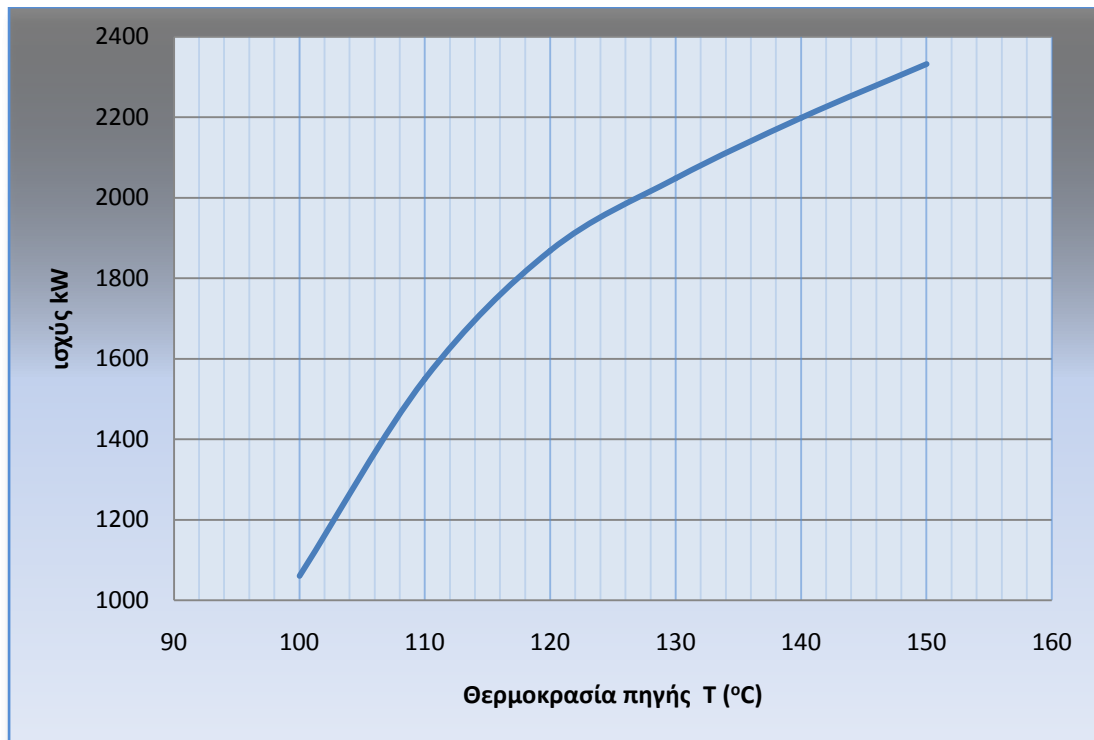


Σχήμα 134 Θερμοκρασία νερού ψύξης συναρτήσει της πίεσης συμπυκνώσεως.

Κρατώντας στην συνέχεια σταθερή την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου και για διάφορες θερμοκρασίες του γεωθερμικού ρευστού που είναι διαθέσιμο υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Να σημειωθεί εδώ ότι η πίεση πριν τον στρόβιλο μεταβάλλεται με σκοπό να επιτύχουμε τον βέλτιστο δυνατό βαθμό απόδοσης. Η αύξηση της πίεσης βέβαια μπορεί να φθάσει μέχρι την κρίσιμη πίεση όπου για το R134a είναι 40,6 bar.



Σχήμα 135 Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας πηγής.



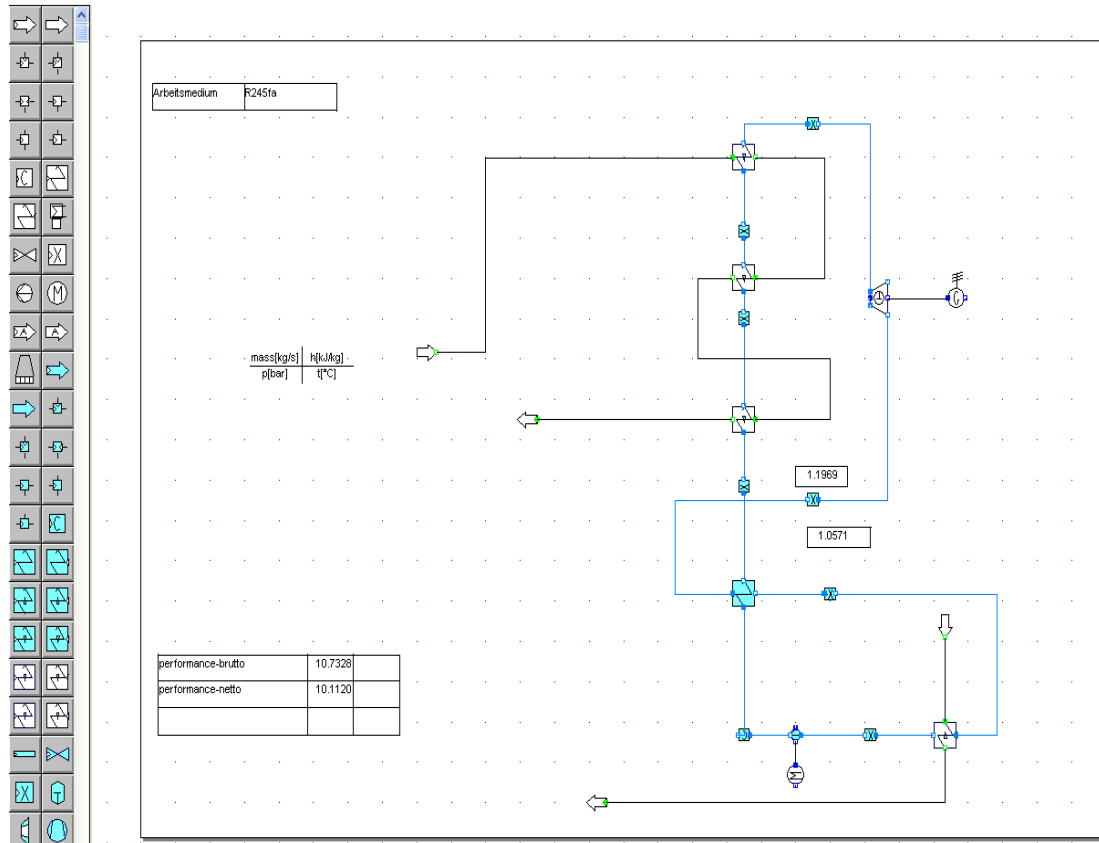
Σχήμα 136 Ισχύς κύκλου συναρτήσει της θερμοκρασίας πηγής.

Εργαζόμενο μέσο R245fa

Για το εργαζόμενο μέσο R245fa ισχύουν τα εξής:

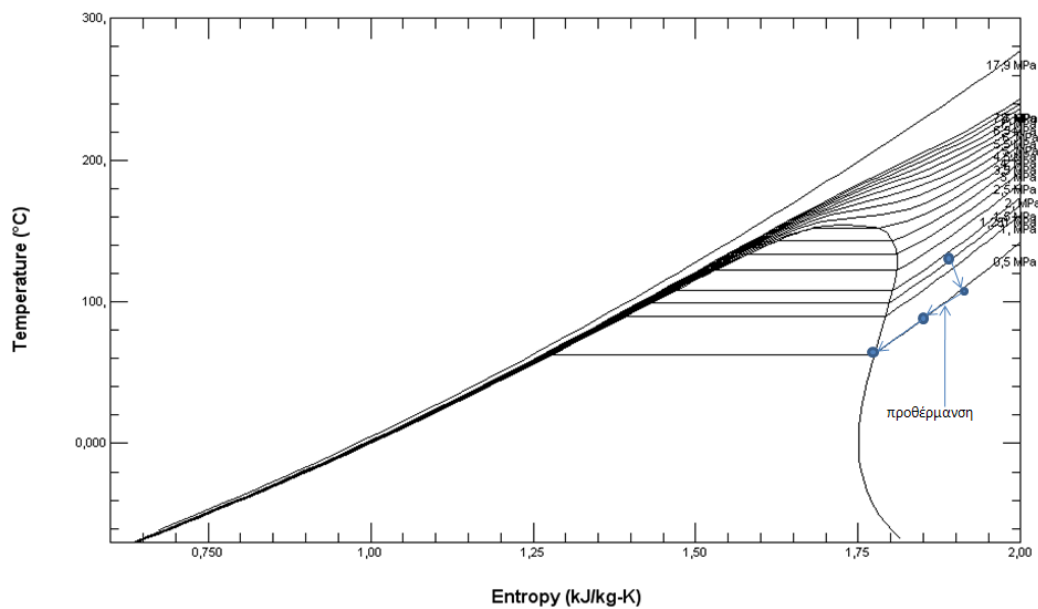
Refrigerant	T_c (°C)	P_c (bar)	$T_{s,1bar}$ (°C)	$P_{s,20oC}$ (bar)
R245fa	154.1	36.4	14.9	1.2

Όπου T_c και P_c είναι η θερμοκρασία και η πίεση του κρίσιμου σημείου, $T_{s,1bar}$ η κανονική θερμοκρασία ατμοποίησης και $P_{s,20 bar}$ η πίεση ατμοποίησης. Για την μελέτη και τον υπολογισμό των στοιχείων του κύκλου με εργαζόμενο μέσο R245fa θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του κύκλου όπως και παραπάνω(στρόβιλος,συμπυκνωτής) μαζί με προθερμαντήρα.



Σχήμα 137 Σχηματικό διάγραμμα ORC με εργαζόμενο μέσο R245fa.

Παρακάτω δίδεται διάγραμμα θερμοκρασίας- εντροπίας (T-s) για το μέσο R245fa το οποίο μας δείχνει την διαδικασία της προθέρμανσης.

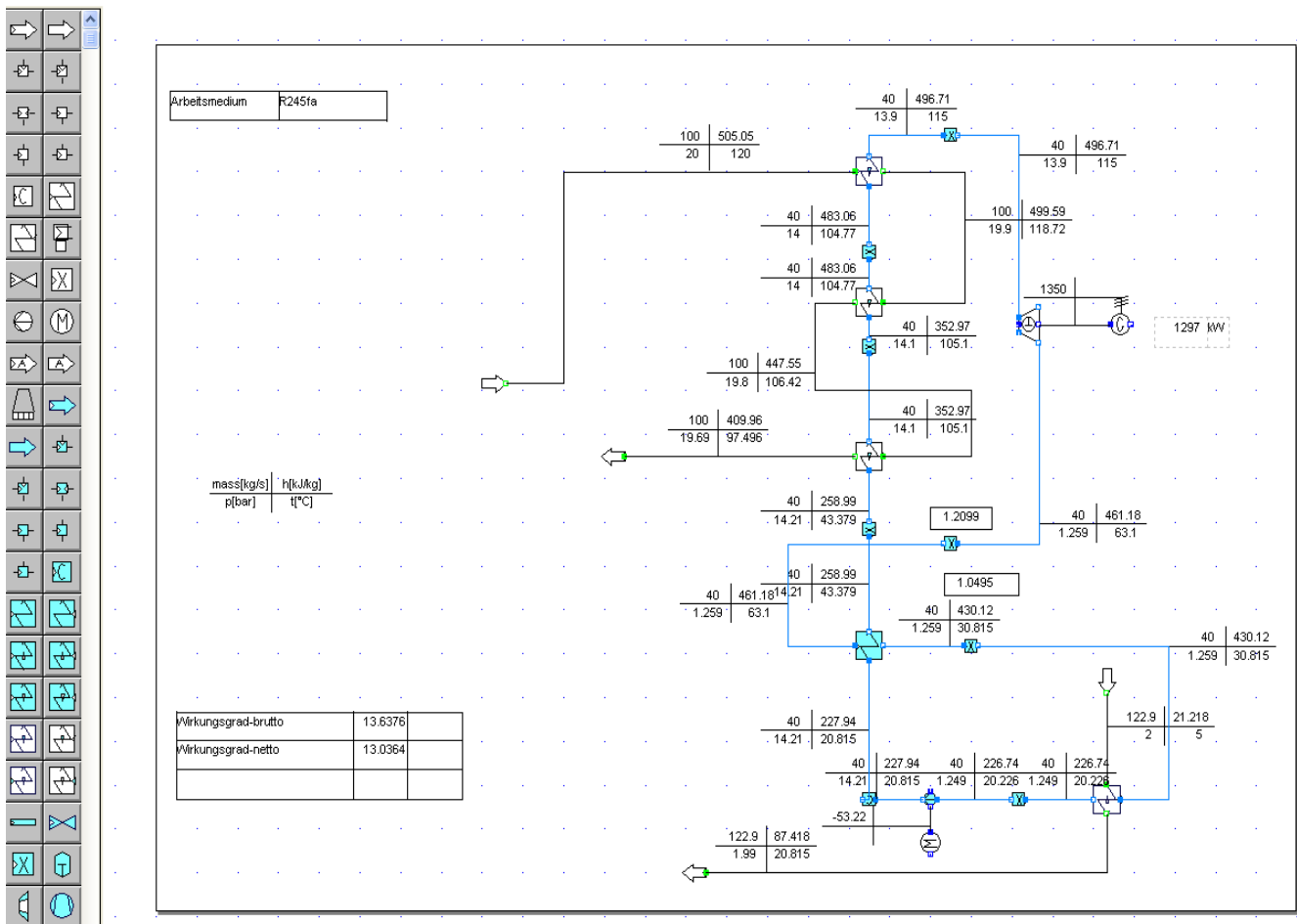


Σχήμα 138 Διάγραμμα T-s για R245fa που απεικονίζει την διαδικασία της προθέρμανσης.

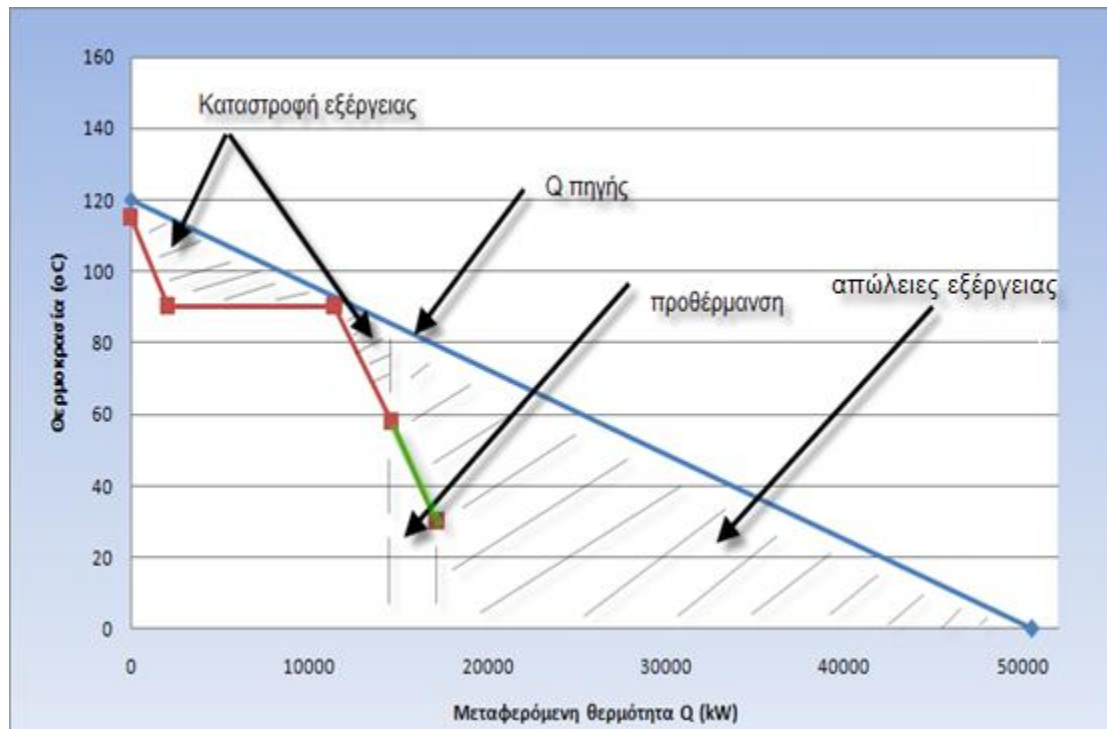
Όπως και για το R134a έτσι και τώρα θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα από την εγκατάσταση του Husanik δηλαδή γεωθερμικό ρευστό με θερμοκρασία 120°C και παροχή 100 kg/s.

Πίνακας 21 . Στοιχεία από υπολογισμό κύκλου ORC

Εργαζόμενο μέσο	R245fa	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	1297	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	13.9	Ισχύς αντλίας (kW)	53 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	1.259	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Παροχή μάζας R245fa kg/s	40
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	13.03%		



Σχήμα 139 Σχηματικό διάγραμμα ORC με εργαζόμενο μέσο R245fa μετά την επίλυση του κύκλου.



Σχήμα 140 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσεως της μεταφερόμενης θερμότητας για R245fa.

Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών είναι $(14606/50550) \cdot 100 = 28.89\%$. Άρα μπορούμε να εκμεταλευτούμε μόνο το 28.89% της προσδιδόμενης θερμότητας από την πηγή. Βλέπουμε επίσης ότι η πλησιέστερη θερμοκρασία που μπορούμε να φτάσουμε στον κύκλο έχει διαφορά 3 βαθμούς σε σχέση με την μέγιστη που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε. Τα στοιχεία αυτού του κύκλου είναι τα εξής:

Πίνακας 22 . Στοιχεία κύκλου για R245fa.

Εργαζόμενο μέσο	R245fa	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	1589	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	9.9	Ισχύς αντλίας (kW)	57 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	1.777	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (°C)	120° C	Q που εκμεταλλευόμαστε (KW)	14606
Θερμοκρασία νερού ψύξης (°C)	5° C	Q μεταφερόμενο (0-120°C)(kW)	55050
Βαθμός απόδοσης %	10.48%	Παροχή μάζας R245fa kg/s	65

Για το εργαζόμενο μέσο R245fa και με δεδομένη την θερμότητα εισόδου από το γεωθερμικό ρευστό που είναι διαθέσιμο τα στοιχεία του κύκλου που προκύπτει η μέγιστη παραγωγή ισχύος είναι:

Πίνακας 23. Στοιχεία κύκλου για μέγιστη παραγωγή ισχύος.

Εργαζόμενο μέσο	R245fa	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	1658 kW	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	10,9	Ισχύς αντλίας (kW)	64 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	1.774	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Παροχή εργαζόμενου μέσου	65 kg/s
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	10.86%		

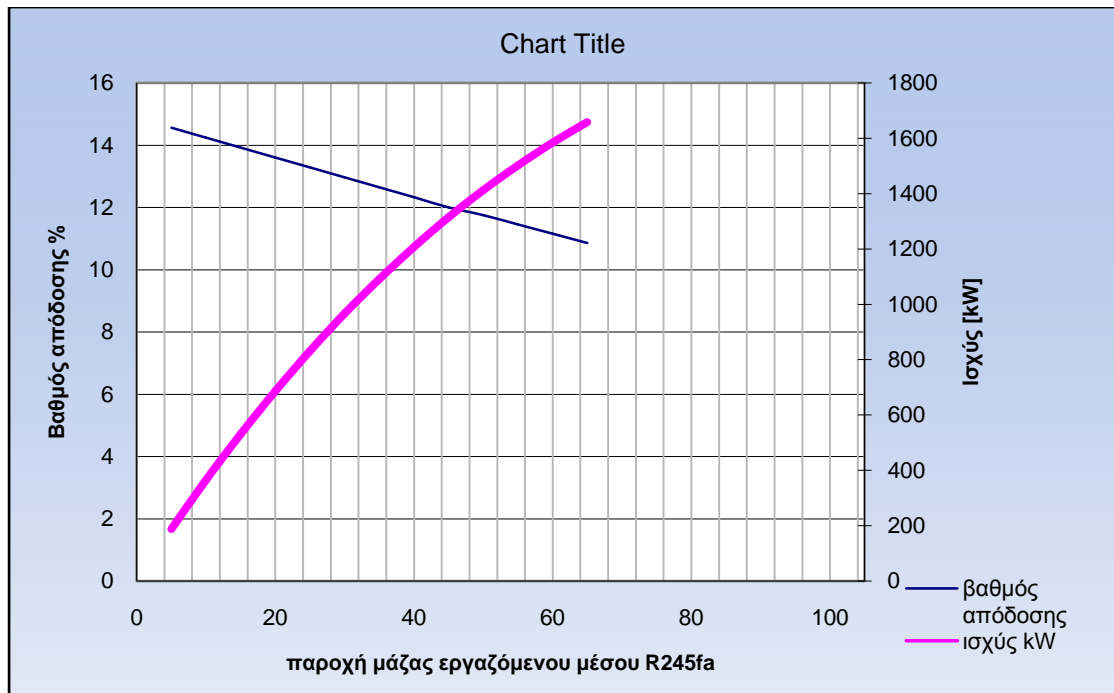
Επίσης τα στοιχεία του κύκλου για τα οποία προκύπτει ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης είναι:

Πίνακας 24. Στοιχεία κύκλου για μέγιστο βαθμό απόδοσης.

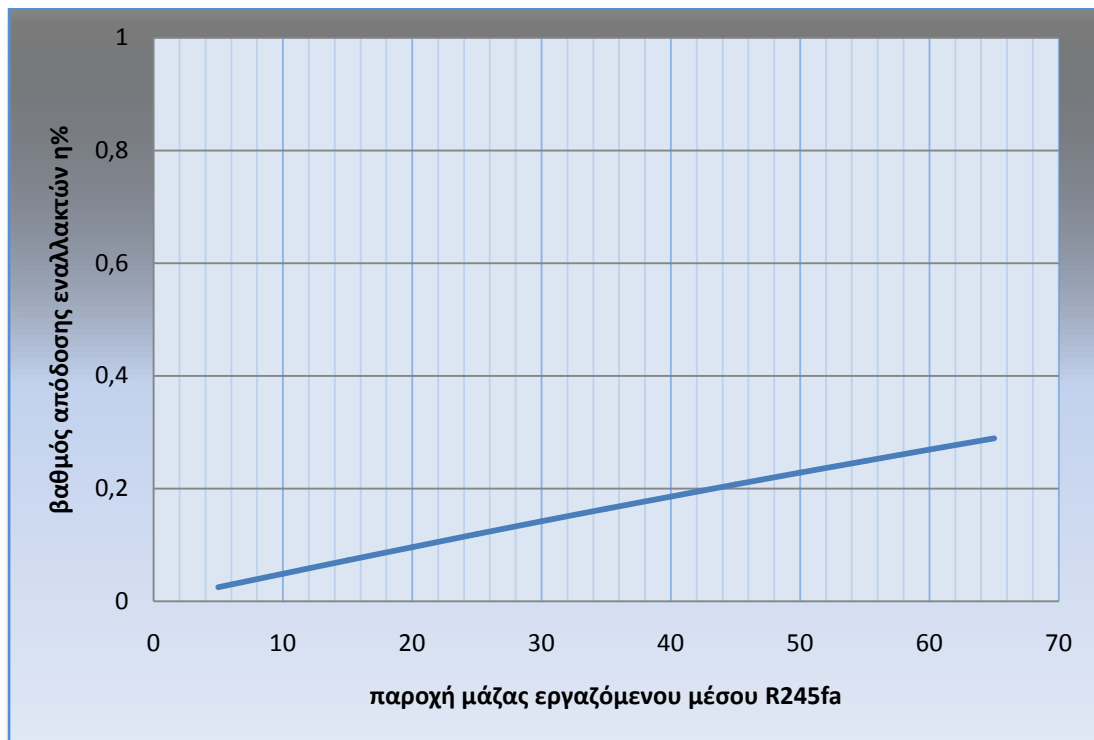
Εργαζόμενο μέσο	R245fa	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75
Ισχύς γεννήτριας (kW)	204 kW	Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98
Υψηλή πίεση λειτουργίας (bar)	16.9	Ισχύς αντλίας (kW)	8.25 kW
Χαμηλή πίεση λειτουργίας (bar)	0.7204	Ηλεκτρικός Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.98
Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95
Θερμοκρασία πηγής (° C)	120° C	Παροχή εργαζόμενου μέσου	5 kg/s
Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C		
Βαθμός απόδοσης %	15.34 %		

Βλέπουμε ότι επιτυγχάνουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης 15.34 % αλλά η ισχύς στην έξοδο είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση μέγιστης ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται κατα πολύ η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου με συνέπεια να εκμεταλλευόμαστε λιγότερη θερμότητα από το γεωθερμικό ρευστό. Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται διότι καθώς μειώνεται η πίεση συμπύκνωσης στην δεύτερη περίπτωση το σημείο μετά την εκτόνωση του στροβίλου βρίσκεται κοντά στην καμπύλη κορεσμένου ατμού, οπότε μετά και από την προθέρμανση έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας που μας αποδίδεται από την πηγή.

Δίδεται διάγραμμα της παροχής μάζας του R245fa σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του κύκλου.



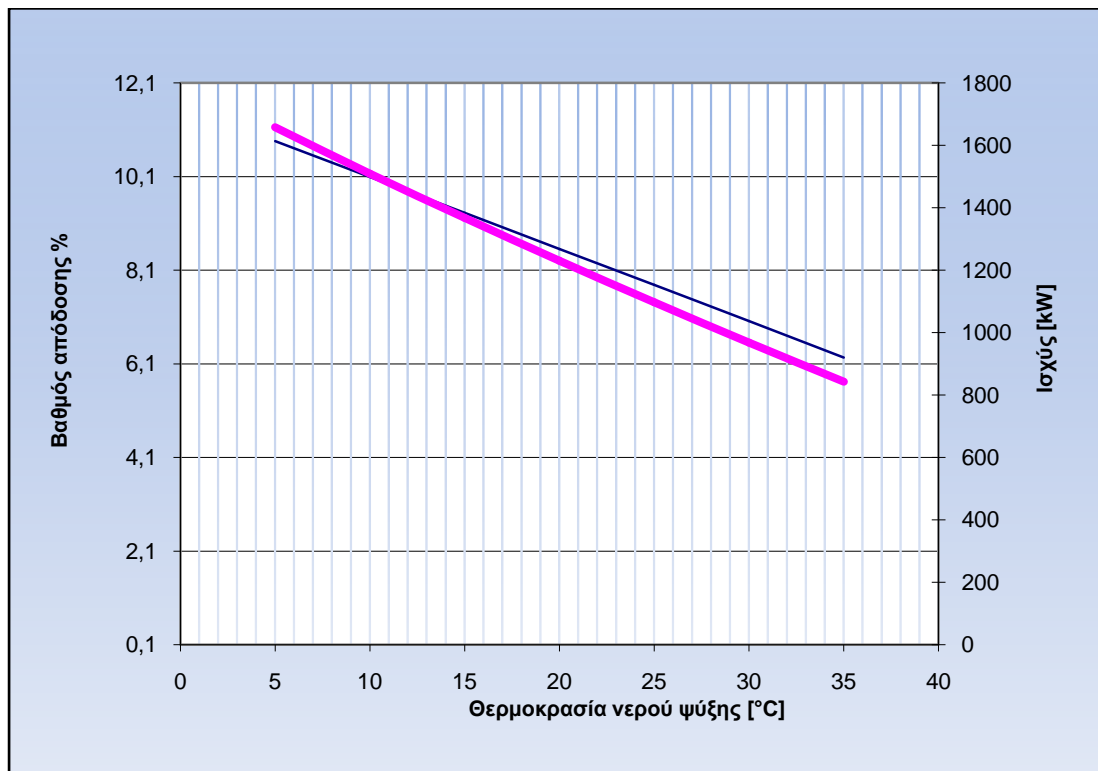
Σχήμα 141 Παροχή μάζας του R245fa σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης και την ισχύ του κύκλου.



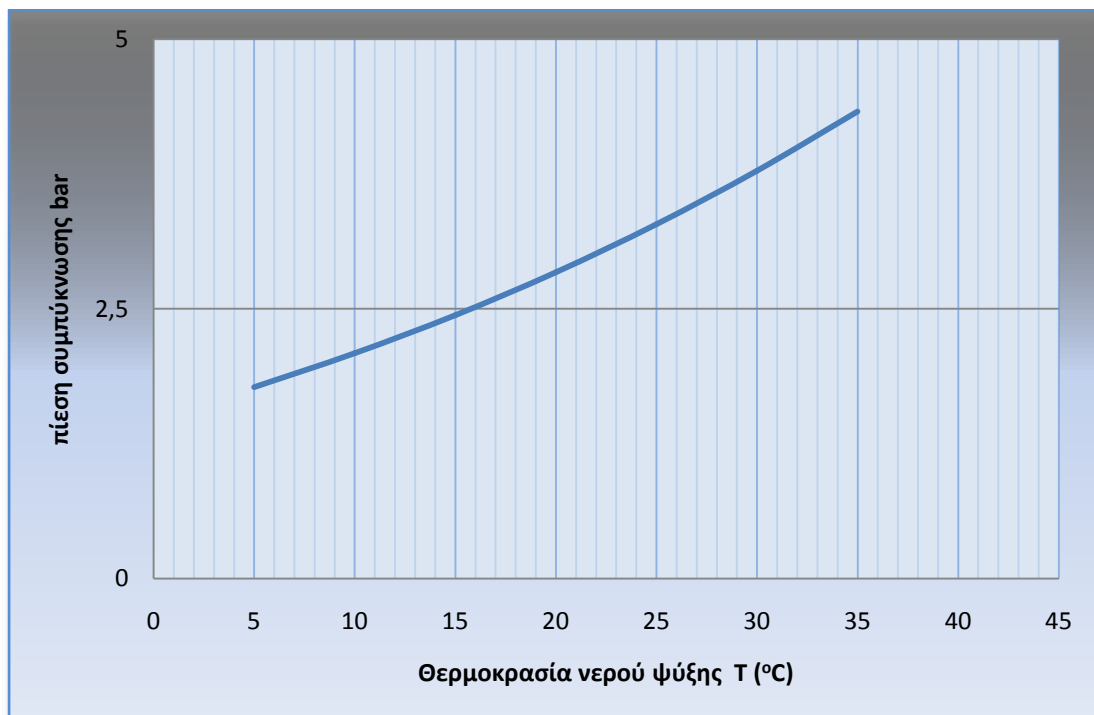
Σχήμα 142 Παροχή μάζας του R134a σε σχέση με τον βαθμό απόδοσης εναλλακτών.

Ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου διότι καθώς αυξάνεται η παροχή μάζας η ενέργεια που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε από το γεωθερμικό ρευστό αυξάνεται.

Παρακάτω δίδεται διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του νερού ψύξης, της πίεσης συμπύκνωσης και της ισχύος της γεννήτριας.

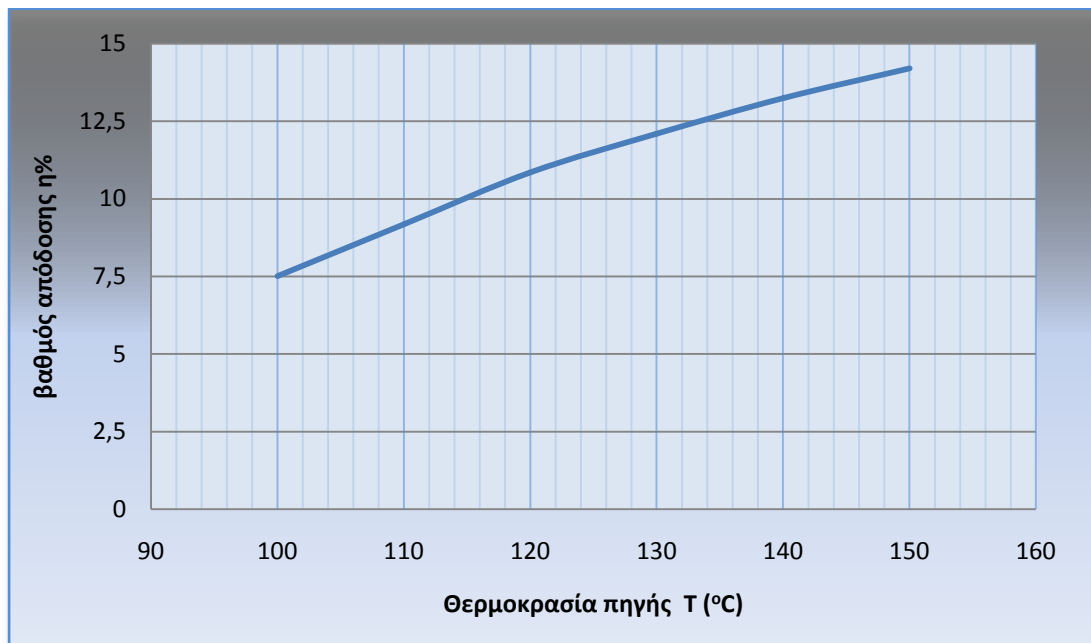


Σχήμα 143 Θερμοκρασία νερού ψύξης συναρτήσει του βαθμού απόδοσης και της παραγωγής ισχύος.

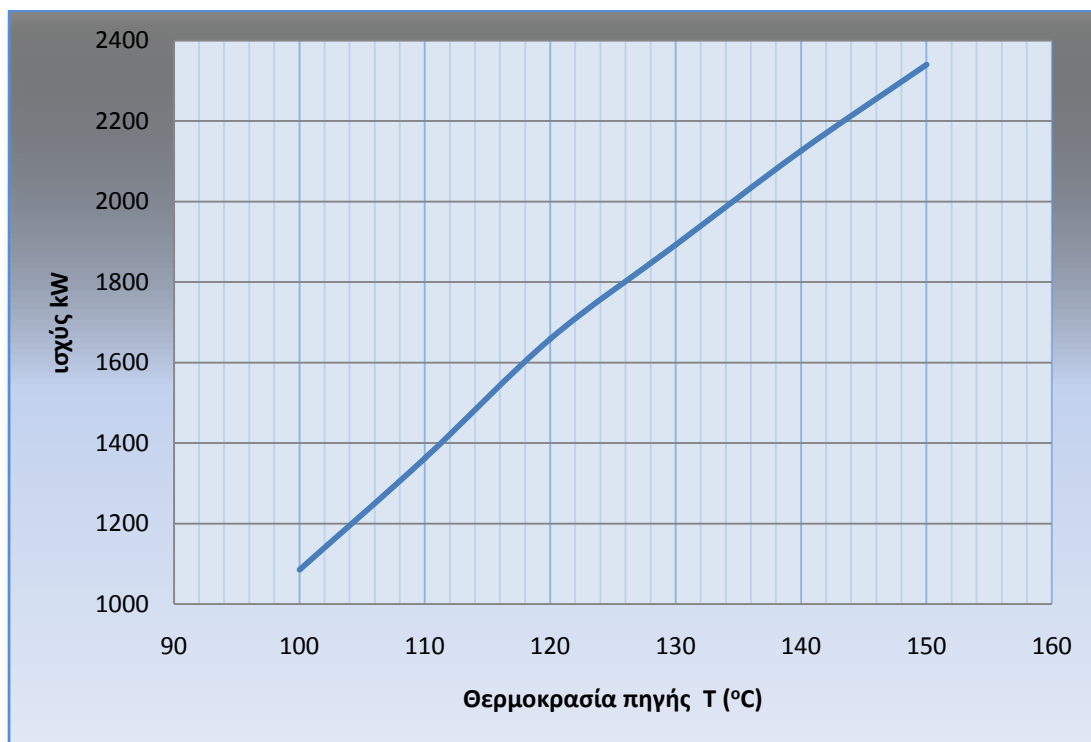


Σχήμα 144 Θερμοκρασία νερού ψύξης συναρτήσει της πίεσης συμπύκνωσης.

Κρατώντας στην συνέχεια σταθερή την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου και για διάφορες θερμοκρασίες του γεωθερμικού ρευστού που είναι διαθέσιμο υπολογίζουμε τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Να σημειωθεί εδώ ότι η πίεση πριν τον στρόβιλο μεταβάλλεται με σκοπό να επιτύχουμε τον βέλτιστο δυνατό βαθμό απόδοσης . Η αύξηση της πίεσης βέβαια μπορεί να φθάσει μέχρι την κρίσιμη πίεση όπου για το R134a είναι 40,6 bar.



Σχήμα 145 Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας πηγής.



Σχήμα 146 Ισχύς κύκλου συναρτήσει της θερμοκρασίας πηγής.

5.6 Σύγκριση βαθμού απόδοσης και ισχύος Kalina και ORC

Έχοντας ολοκληρώσει τους υπολογισμούς και για τους δύο κύκλους θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων με σκοπό να συμπεράνουμε ποιος από τους 2 κύκλους μας δίνει καλύτερο βαθμό απόδοσης και ποια είναι η ισχύς εξόδου στην γεννήτρια για τις συνιστώσες που καθορίζουν αυτόν τον βαθμό .

Χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα τα δεδομένα εισόδου της μονάδας του Husavik στην Ισλανδία, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του βαθμού απόδοσης του κύκλου στην Ισλανδία με αυτά του Kalina και του οργανικού κύκλου Rankine με εργαζόμενα μέσα τα R134a και R245fa.

Τα δεδομένα εισόδου είναι τα εξής:

Παροχή μάζας πηγής (kg/s)	100 kg/s	ΔΤ θερμοκρασιών στον εναλλάκτη-ατμοποιητή	5 (° C)
Θερμοκρασία πηγής	120° C	Τύποι εναλλακτών:πλακών με αντιρροή	
Θερμοκρασία εξόδου πηγής	80° C	Πτώση πίεσης στον ατμοποιητή	1 bar
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.75	Θερμοκρασία νερού ψύξης (° C)	5° C
Μηχανικός βαθμός απόδοσης στροβίλου	0.98	Βαθμός απόδοσης αντλίας	0.7
		Μηχανικός βαθμός απόδοσης αντλίας	0.95

Πίνακας 25 . Αποτελέσματα κύκλων για 120°C γεωθερμικό ρευστό.

	Βαθμός απόδοσης %	Ισχύς εξόδου kW	Θερμοκρασία πηγής
Kalina	11.55	2046.6	120° C
ORC -R134a	8.72	2033	120° C
ORC – R245fa	10.85	1658	120° C

Βλέπουμε λοιπόν ότι για δεδομένη πηγή θερμότητας ο κύκλος Kalina έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος . Από την άλλη το εργαζόμενο μέσο R245fa έχει σαφώς καλύτερους βαθμούς απόδοσης από το R134a αλλά για την ίδια πηγή αποδίδει λιγότερη ισχύ. Με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας έχουμε:

Πίνακας 26 . Αποτελέσματα κύκλων για 130°C γεωθερμικό ρευστό.

	Βαθμός απόδοσης %	Ισχύς εξόδου kW	Θερμοκρασία πηγής
Kalina	11.51	2431	130° C
ORC -R134a	10.35	2048	130° C
ORC – R245fa	12.099	1892	130° C

Πίνακας 27 . Αποτελέσματα κύκλων για 140°C γεωθερμικό ρευστό.

	Βαθμός απόδοσης %	Ισχύς εξόδου kW	Θερμοκρασία πηγής
Kalina	11.27	2862	140° C
ORC -R134a	10.35	2198	140° C
ORC – R245fa	13,249	2126	140° C

Πίνακας 28 . Αποτελέσματα κύκλων για 150°C γεωθερμικό ρευστό.

	Βαθμός απόδοσης %	Ισχύς εξόδου kW	Θερμοκρασία πηγής
Kalina	12,07	2508	150° C
ORC -R134a	11,83	2332	150° C
ORC – R245fa	14,21	2340	150° C

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής ο βαθμός απόδοσης του ORC είναι μεγαλύτερος από αυτόν του Kalina με μικρότερη όμως δυνατότητα παραγωγής ισχύος.

6. Συμπεράσματα

Τέλος συμπαιρένουμε ότι για γεωθερμικές πηγές ενέργειας με θερμοκρασία ρευστού μικρότερη των 120°C συμφέρει ο κύκλος Kalina αφού παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και ταυτόχρονα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον κύκλο Rankine με εργαζόμενα μέσα τα R134a και R245fa. Ο κύκλος ORC με R245fa έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης , μικρότερη όμως παραγωγή ισχύος σε σχέση με το R134a. Καθώς τώρα αυξάνεται η θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής μέχρι τους 150°C τα δεδομένα αλλάζουν. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Kalina αυξάνεται αλλά ο ρυθμός αύξησης του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine είναι μεγαλύτερος με συνέπεια να έχουμε βαθμούς της τάξεως του 14,21% για παραγωγή ισχύος 2340kW την ίδια στιγμή που

ο κύκλος Kalina έχει βαθμό απόδοση 12,07% με παραγωγή ισχύος 2508kW. Για μεγαλύτερες λοιπόν θερμοκρασίες ρευστών έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης στον ORC αλλά μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος στον Kalina. Εξετάζοντας τις διάφορες συνιστώσες των κύκλων αφήνεται στην ευχέρεια του επενδυτή να αποφασίσει την πιο συμφέρουσα λύση.

Είναι βέβαιο ότι οι τεχνολογίες των δύο κύκλων θα μας απασχολήσουν πολύ περισσότερο στο μέλλον λαμβάνοντας υπόψη τον αυξανόμενο ρυθμό της τιμής του πετρελαίου σε συνδυασμό με μείωση των αποθεμάτων. Αντικείμενο μελλοντικής μελέτης αποτελεί και η αναζήτηση υβριδικών συστημάτων για την πρόσδοση της θερμότητας στους θερμοδυναμικούς κύκλους όπως για παράδειγμα γεωθερμία με ηλιακή ενέργεια ή βιομάζα κλπ.

Βιβλιογραφία

- [1] Bullard, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In: Lee, W.H.K., ed. *Terrestrial Heat Flow*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 8, pp. 1-6.
- [2] Lubimova, E.A., 1968. Thermal history of the Earth. In: *The Earth's Crust and Upper Mantle*, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 13, pp. 63-77.
- [3] Stacey, F.D. and Loper, D.E., 1988. Thermal History of the earth : a corollary concerning non-linear mantle rheology. *Phys. Earth. Planet. Inter.* 53.167-174.
- [4] Armstead, H.C.H., 1983. *Geothermal Energy*. E. & F.N. Spon, London, 404 pp.
- [5] Tiwari, G. N.; Ghosal, M. K. *Renewable Energy Resources: Basic Principles and Applications*. Alpha Science Int'l Ltd., 2005 ISBN 1842651250
- [6] Εφαρμογές Γεωθερμίας. Διαθέσιμο από :
<http://www.geocities.com/grphysics/energy/geotherme.html>
- [7] Μ. Φυτίκας & Ν. Ανδρίτσος Γεωθερμία, Γεωθερμικοί Πόροι, Γεωθερμικά ρευστά, Εκδόσεις Τζιόλα ,σελ 55-60, 224-227, 246-252
- [8] Γεωθερμία. Διαθέσιμο από : <http://el.wikipedia.org/wiki/Γεωθερμία>
- [9] Γεωθερμικά πεδία. Διαθέσιμο από: <http://www.ecotec.gr/article.php?ID=133>
- [10] Εναλλάκτες θερμότητας. Διαθέσιμο από :
http://www.cres.gr/energy_saving/biomixania/paragogiki_diadikasia_enallaktes.htm
- [11] Αθανασίου Γ. Κάναρη, υπολογιστική και πειραματική μελέτη για βέλτιστο σχεδιασμό εναλλακτών πλακών.
- [12] Πλακοειδής εναλλάκτες. Διαθέσιμο από:
http://en.wikipedia.org/wiki/Plate_heat_exchanger
- [13] Aydın Durmus_ a,*, Hüseyin Benli b, _Irfan Kurtbas_ a, Hasan Gül. Investigation of heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles.
- [14] Iulian Gherasim a, Nicolas Galanis a,*, Cong Tam Nguyen b. Effects of dissipation and temperature-dependent viscosity on the performance of plate heat exchangers.
- [15] Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development, Geothermal Energy Association, August 2005
- [16] H.D. Madhawa. *The Performance of the Kalina Cycle System 11(KCS-11) With Low-Temperature Sources*, ASME. pg 243-246
- [17] Sirko Ogriseck. *Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study*, *Appl. Therm. Eng.* (2009), doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.02.006
- [18] Páll Valdimarsson. *ORC and Kalina Analysis and experience*. Sabbatical December 2003, Lecture III
- [19] Páll Valdimarsson. *Factors influencing the economics of the Kalina power cycle and situations of superior performance*, pg. 32-40
- [20] Οργανικός κύκλος Rankine. Διαθέσιμος από :
http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_Cycle

- [21] S. Karellas b, E. Kakaras b, *Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications*, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1809–1817
- [22] Sylvain Quoilin and Vincent Lemort. *Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems*, 2009
- [23] Turboden, *Organic Rankine Cycle (ORC)*, 2008
- [24] Frédéric Marcuccilli and Samuel Zouaghi, *Radial Inflow Turbines for Kalina and Organic Rankine Cycles*, Cryostar SAS, 2007
- [25] Hettiarachchi HD, Golubovic M, Worek W, Ikegami Y. *Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources*. *Journal of Energy Resources Technology* 2007; 129(3):243–7.
- [26] Kalina AI. *Combined cycle and waste heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation*. In: *Proceedings of the 1983 joint power generation conference*, IN, USA, ASME paper no.83-JPGC-GT-3, 1983.
- [27] El-Sayed YM, Tribus M. *A theoretical comparison of the Rankine and Kalina cycles*. *ASME Special Publications* 1985; AES-1:97–102.
- [28] Kalina AI, Leibowitz HM. *Application of the Kalina cycle technology to Geothermal power generation*. *Geothermal Resources Council Transactions* 1989; 13:605–11.
- [29] P.A. Lolos, E.D. Rogdakis, *A Kalina power cycle driven by renewable energy sources*, *Laboratory of Applied Thermodynamics, Energy* 34 (2009) 457–464
- [30] Kouremenos DA, Rogdakis ED. *The temperature—entropy (or enthalpy) and the enthalpy—entropy (Mollier) diagram of the Kalina cycle*. *ASME Advanced Energy Systems Division* 1990; AES-19:13–9.

Πηγές από σχήματα

Σχήμα 1: http://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_geothermal_systems

Σχήμα 2: [IGA International Geothermal Association.htm](http://IGAInternationalGeothermalAssociation.htm)

Σχήμα 3: <http://www.reuk.co.uk/Larderello>

Σχήμα 4: Κέντρο Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ΚΑΠΕ

Σχήμα 5: Μ. Φυτίκας & Ν. Ανδρίτσος *Γεωθερμία, Γεωθερμικοί πόροι, Γεωθερμικά ρευστά*, Εκδόσεις Τζιόλα, σελ 58

Σχήμα 6: <http://1gym-ag-parask.att.sch.gr/environment>

Σχήμα 7: Τροποποίηση χάρτη του ΙΓΜΕ

Σχήμα 8: *Geothermal hot dry rock*

Σχήμα 9: http://www.geothermal.ch/uploads/pics/egs_03.jpg

Σχήμα 10: Μ.Φυτίκας & Ν.Ανδρίτσο Γεωθερμία,Γεωθερμικοί πόροι,Γεωθερμικά ρευστά,Εκδόσεις Τζιόλα,σελ 87

Σχήμα 11: <http://www.global-energy.eu/dat/5122442C/image2.jpg>

Σχήμα 12: Μ.Φυτίκας & Ν.Ανδρίτσο Γεωθερμία,Γεωθερμικοί πόροι,Γεωθερμικά ρευστά,Εκδόσεις Τζιόλα,σελ 252

Σχήμα 13: http://www.cres.gr/energy_saving/biomixania/paragogiki_diadikasia_enallaktes.htm

Σχήμα 14: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 15: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 16: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 17: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 18: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 19: http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/heat_exchangers/heat01.pdf

Σχήμα 20: <http://taibong.com/eng/Images/Product/PHE.gif.jpg>

Σχήμα 21: <http://www.metal.ntua.gr/uploads/2263/enallaktes.pdf>

Σχήμα 22: Αθανασίου Γ. Κάναρη

Σχήμα 23: http://www.ashrae.gr/newsletters/Newsletter_23.pdf

Σχήμα 24-37: Αθανασίου Γ. Κάναρη,υπολογιστική και πειραματική μελέτη για βέλτιστο σχεδιασμό εναλλακτών πλακών.

Σχήμα 38-40: Aydın Durmus_ a,*, Hüseyin Benli b, _Irfan Kurtbas_ a, Hasan Gül. Investigation of heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles.

Σχήμα 41 : *Factors Affecting Costs of Geothermal Power Development, Geothermal Energy Association, August 2005*

Σχήμα 42-48 : H.D.Madhawa. *The Performance of the Kalina Cycle System 11(KCS-11) With Low-Temperature Sources, ASME.pg 243-246*

Σχήμα 49-54,56: Sirko Ogriseck. *Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study, Appl.Therm.Eng.(2009),doiQ10.1016/j.applthermaleng.2009.02.006*

Σχήμα 55,57: Páll Valdimarsson. *ORC and Kalina Analysis and experience. Sabbatical December 2003,Lecture III*

Σχήμα 58,59: Páll Valdimarsson. *Factors influencing the economics of the Kalina power cycle and situations of superior performance,pg.32-40*

Σχήμα 60: http://www.gmk.info/popup_en.php

Σχήμα 61: http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_Cycle

Σχήμα 62,63,67: S. Karellas b, E. Kakaras b, *Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1809–1817*

Σχήμα 64: Turboden, *Organic Rankine Cycle (ORC),2008*

Σχήμα 65: Frédéric Marcuccilli and Samuel Zouaghi, *Radial Inflow Turbines for Kalina and Organic Rankine Cycles, Cryostar SAS,2007*

Σχήμα 66,68: Sylvain Quoilin and Vincent Lemort. *Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems,2009*

Σχήμα 69:P .A.Lolos , E.D.Rogdakis, *A Kalina power cycle driven by renewable energy sources, Laboratory of Applied Thermodynamics,Energy 34 (2009) 457–464*