



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

*ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ RANKINE  
ΓΙΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΑΠΟ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΙΖΕΛ*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του

Παπαϊωάννου Ιωάννη

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Οκτώβριος – 2011

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σωτήρη Καρέλλα, χωρίς τη βοήθεια, την καθοδήγηση και την υπομονή του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην πολύ καλή μου φίλη και συνάδελφο Άννα Μάκαρη για την ουσιαστική της βοήθεια κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα.....	3
Εισαγωγή.....	4
Κεφάλαιο 1. Απορριπτόμενη Θερμότητα.....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Εφαρμογές Ανάκτησης Θερμότητας.....	5
1.2.1 Παραγωγή Ενέργειας.....	5
1.2.2 Καύση βιομάζας.....	7
1.2.3 Ανάκτηση θερμότητας από Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.).....	7
1.2.4 Γεωθερμία.....	8
1.2.5 Μίκρο-συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.....	10
1.2.6 Ηλιακές εφαρμογές.....	11
1.3 Ταξινόμηση και εφαρμογές.....	13
1.4 Οφέλη της ανάκτησης θερμότητας.....	15
Κεφάλαιο 2. Κύκλος Rankine.....	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Θερμοδυναμική προσέγγιση.....	17
2.3 Βασικές Παραλλαγές του απλού κύκλου.....	20
2.3.1 Κύκλος Rankine με προθέρμανση.....	20
2.3.2 Κύκλος Rankine με αναγέννηση.....	21
2.3.3 Διβάθμιος κύκλος Rankine.....	22
2.4 Οργανικός Κύκλος Rankine.....	23
2.4.1 Εισαγωγή.....	23
2.4.2 Επιλογή εργαζόμενου μέσου.....	23
Κεφάλαιο 3. Εκτονωτής.....	25
3.2 Σπειροειδής εκτονωτής.....	25
3.2.1 Διαρροές.....	26
3.2.2 Μετατροπή ενός σπειροειδούς συμπιεστή σε εκτονωτή.....	26
3.2.3 Δικαιολόγηση της επιλογής του σπειροειδούς εκτονωτή.....	28
3.3 Εμβολοφόρος Εκτονωτής.....	29
3.4 Εκτονωτής Screw.....	30
3.5 Συμπεράσματα.....	31
Κεφάλαιο 4. Ανάλυση διαφόρων Οργανικών Κύκλων Rankine.....	32
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Η ναυτική μηχανή αναφοράς.....	32
4.2.1 Πιθανότητα ανάκτησης ενέργειας από την θερμική μηχανή.....	32
4.2.2 Σκοπιμότητα ανάκτησης ενέργειας με τεχνολογία ORC.....	35
4.3 Θερμικό Μέσο.....	36
4.4 Απλός κύκλος Rankine.....	38
4.4.1 Ατμοποιητής.....	39
4.4.2 Εκτονωτής.....	40
4.4.3 Συμπυκνωτής.....	41
4.4.4 Τροφοδοτική αντλία.....	41
4.4.5 Συνολικός ενεργειακός ισολογισμός κύκλου Rankine.....	42
4.5 Κύκλος Rankine με προθέρμανση.....	50
4.6 Κύκλος Rankine με αναγέννηση.....	59
4.7 Διβάθμιος κύκλος Rankine.....	65
4.8 Συμπεράσματα.....	79
Βιβλιογραφία.....	81

## Εισαγωγή

Η παραγωγή θερμότητας συνοδεύει πάντα την μετατροπή της ενέργειας από τη μια μορφή σε μια άλλη ως παραπροϊόν. Είναι γνωστό ότι τεράστια ποσά θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον από σταθμούς παραγωγής ενέργειας, βιομηχανίες, ακόμη και από τα αυτοκίνητά μας. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας διερευνώνται οι διάφορες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας και η χρήση οργανικών κύκλων Rankine για την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στη ναυτιλία, τα πλοία που χρησιμοποιούνται κινούνται από μεγάλης ισχύος ντιζελομηχανές, οι οποίες δεν είναι μόνο υπεύθυνες για την πρόωση του πλοίου αλλά και για όλες τις ιδιοκαταναλώσεις του σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Τα απορριπτόμενα καυσαέρια φεύγουν στο περιβάλλον σε υψηλή θερμοκρασία και δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν με χρήση διατάξεων που βασίζονται στη χρήση του νερού/ατμού ως εργαζόμενο μέσο. Στην παρούσα διπλωματική, αναλύονται οι διάφορες παραλλαγές του κύκλου Rankine που χρησιμοποιούν οργανικά μέσα για τη λειτουργία τους, προκειμένου να εκμεταλλευτούν τη συγκεκριμένη πηγή θερμότητας και προτείνεται η καλύτερη λύση για μεγιστοποίηση της ισχύος και του βαθμού απόδοσης του κύκλου.



# 1. ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

## 1.1 Εισαγωγή

Ο όρος Απορριπτόμενη Θερμότητα αναφέρεται στη θερμότητα που παράγεται από μια διεργασία καύσης ή άλλης χημικής αντίδρασης, και κατόπιν αποβάλλεται στο περιβάλλον παρόλο που θα μπορούσε κάλλιστα να αξιοποιηθεί για κάποιο χρήσιμο και οικονομικό σκοπό. Η ουσιαστική ποιότητα της θερμότητας δεν εξαρτάται από την ποσότητα στην οποία είναι διαθέσιμη. Η στρατηγική για την ανάκτηση αυτής της θερμότητας εξαρτάται εν μέρει από τη θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη καθώς και από τα οικονομικά ζητήματα που περιλαμβάνονται.

## 1.2 Εφαρμογές Ανάκτησης Θερμότητας

### 1.2.1 Παραγωγή Ενέργειας

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας έχουν ένα μέσο βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται από 30% έως 45% στις σύγχρονες και μοντέρνες ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις. Κατά τη λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας μεγάλα ποσά θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον διαμέσου των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωτές ατμού, πύργοι ψύξης, ψυκτικά κυκλώματα των μηχανών Diesel ή Otto). Οι δύο βασικές εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας αφορούν στους σταθμούς συμπαραγωγής (CHP), όπου αξιοποιείται μέρος αυτής της ενέργειας φτάνοντας βαθμούς απόδοσης της τάξης του 80 – 90 % συγκριτικά με το 30 – 45 % των καλύτερων συμβατικών σταθμών και σε ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς που λειτουργούν με βιομάζα σαν κύριο καύσιμο. Στους σταθμούς συμπαραγωγής έχουμε δύο ενδεχόμενα. Είτε δίνεται προτεραιότητα στην ισχύ, οπότε η παραγόμενη ενέργεια οδηγείται στον ατμοποιητή ή δίνεται προτεραιότητα στο ζεστό νερό, όπου η θερμότητα των καυσαερίων του ατμοποιητή χρησιμοποιείται για την θέρμανση του ζεστού νερού.

Ένας άλλος τρόπος να αξιοποιήσουμε την απορριπτόμενη ενέργεια είναι να παράξουμε ηλεκτρισμό. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την μετατροπή της θερμικής σε ηλεκτρική ενέργεια, που, όμως, βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της εξέλιξης. Μια από αυτές είναι ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) όπου ένα οργανικό μέσο αντικαθιστά το νερό στον θερμοδυναμικό κύκλο του Rankine. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να αξιοποιήσει χαμηλότερες θερμοκρασίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές που απαιτεί ο κύκλος του νερού [1].



### 1.2.2 Καύση βιομάζας

Η χρήση του κύκλου ORC για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Combined Heat and Power production ή CHP) με καύση βιομάζας, έχει μελετηθεί εκτεταμένα την τελευταία δεκαετία [3],[4]. Σήμερα λειτουργούν αρκετές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή/και θερμότητας με βάση τον κύκλο ORC (Π.χ. Stadtwärme Lienz Austria 1000 kW<sub>el</sub>, Sauerlach Bavaria 700 kW<sub>el</sub>, Toblach South Tyrol 1100 kW<sub>el</sub>, Fußach Austria 1500 kW<sub>el</sub>) [5],[ 6].

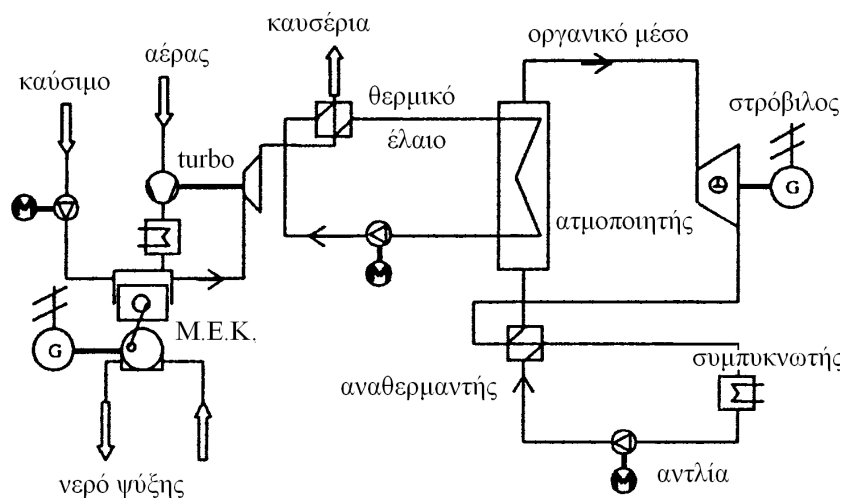
Ο κύριος λόγος για τον αυξανόμενο αριθμό τέτοιου τύπου εγκαταστάσεων είναι ότι η τεχνολογία ORC είναι η μόνη αποδεδειγμένη τεχνολογία για αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος μέχρι και 1 MW<sub>el</sub> από στερεά καύσιμα όπως η βιομάζα. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 6-17% [7].

Όμως παρόλο τον μικρό βαθμό απόδοσης, υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα. Η εγκατάσταση δεν απαιτεί μεγάλα κόστη προσωπικού. Επίσης, το οργανικό μέσο έχει, σε σχέση με το νερό, χαμηλότερη διαφορά ενθαλπίας μεταξύ υψηλής και χαμηλής πίεσης. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες παροχές μάζας σε σχέση με το νερό. Άρα χρησιμοποιούνται μεγαλύτεροι στρόβιλοι (για την ίδια παραγωγή ισχύος), και έτσι μειώνονται οι απώλειες κενού (gap losses). Τέλος, ο βαθμός απόδοσης ενός στρόβιλου σε οργανικό κύκλο Rankine είναι της τάξης του 85% και έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε μερικά φορτία.

### 1.2.3 Ανάκτηση θερμότητας από Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.), απορρίπτουν στο περιβάλλον μεγάλες ποσότητες θερμότητας, με τη μορφή θερμών καυσαερίων. Λόγω της χαμηλής τους θερμοκρασίας, μόνο η τεχνολογία ORC είναι ικανή να εκμεταλλευτεί τέτοιες θερμές πηγές. Έτσι, τα καυσαέρια μπορούν να θερμαίνουν ένα κλειστό κύκλωμα θερμικού ελαίου το οποίο στη συνέχεια θερμαίνει το οργανικό ρευστό (Σχήμα 1.2 1.2). Επίσης υπό μελέτη βρίσκεται η απευθείας θέρμανση του οργανικού ρευστού από τα καυσαέρια χωρίς τη μεσολάβηση κυκλώματος θερμικού ελαίου. Η παραγόμενη από το στρόβιλο μηχανική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας ως μηχανική ισχύς (π.χ. πλοίο) είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη με αεριοστρόβιλους φυσικού αερίου). Έτσι, αυξάνεται σημαντικά ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Για παράδειγμα ο οργανικός κύκλος Rankine μπορεί να συναντηθεί σε εγκαταστάσεις χώνευσης βιομάζας. Σε αυτή την περίπτωση το βιοαέριο, που προέρχεται από τη χώνευση της βιομάζας, χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιακών απαιτήσεων, η δεξαμενή χώνευσης θερμαίνεται από το νερό ψύξης της μηχανής. Για τη λειτουργία του οργανικού κύκλου Rankine χρησιμοποιούνται τα καυσαέρια. Επίσης

άλλες εφαρμογές είναι μηχανές πλοίων, λεωφορείων, ηλεκτροπαραγωγών αεριοστροβίλων, ηλεκτροπαραγωγών μηχανών Diesel κ.α.

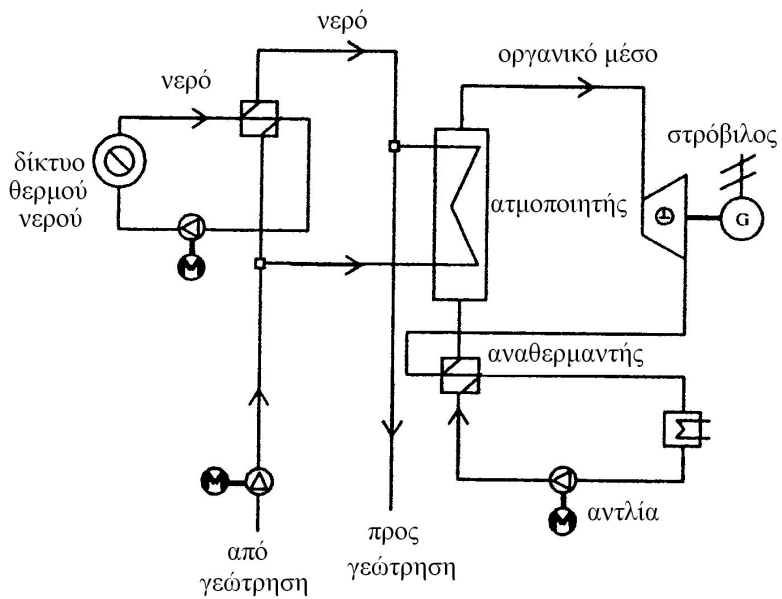


Σχήμα 1.2 . Αναπαράσταση εγκατάστασης ανάκτησης θερμότητας από Μ.Ε.Κ. [8]

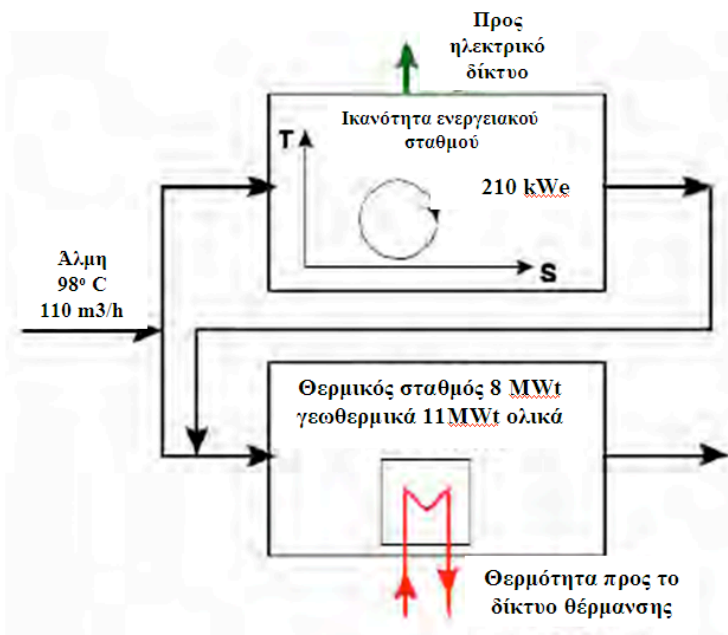
#### 1.2.4 Γεωθερμία

Μια άλλη περίπτωση, στην οποία εφαρμόζεται η τεχνολογία ORC είναι η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Οι συμβατικές τεχνολογίες δεν είναι κατάλληλες για θερμικές πηγές με θερμοκρασιακό πεδίο από 80 °C έως 120 °C. Ο κύκλος Kalina [9], στον οποίο ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται ένα μείγμα αμμωνίας – νερού, φαίνεται να είναι η μόνη εναλλακτική ,έναντι του ORC, λύση. Το Σχήμα 1.3 και το Σχήμα 1.4 δείχνουν το σχεδιάγραμμα μια τυπικής γεωθερμικής εγκατάστασης ORC. Μία βασική διαφορά σε σχέση με μια κλασική εγκατάσταση ORC είναι ότι δεν γίνεται χρήση θερμικού ελαίου και η θερμική ενέργεια μεταφέρεται στο οργανικό μέσο απευθείας από το ζεστό νερό που εξέρχεται από τη γη.

Ένα παράδειγμα γεωθερμικής εγκατάστασης, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία ORC είναι το εργοστάσιο Neustadt–Glewe στη Γερμανία (έτος ίδρυσης 2003) [10]. Η εγκατάσταση χρησιμοποιεί θερμό νερό που εξέρχεται από τη γη σε θερμοκρασία περίπου 98° C, από βάθος 2250 μέτρων , και το μετατρέπει σε 210 kW<sub>el</sub> περίπου, με τη βοήθεια ενός ORC στροβίλου. Το σύστημα ORC είναι εγκατεστημένο απευθείας στην οπή εξαγωγής θερμού νερού. Το μέσο που χρησιμοποιείται είναι το n-perfluoropentane (C5H12) [11]. Μετά την παραγωγή ηλεκτρισμού, το θερμό νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία 70-84° C , ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο, και μεταφέρεται στο τοπικό δίκτυο θέρμανσης της περιοχής.



Σχήμα 1.3: Γεωθερμική Εφαρμογή ORC [8]

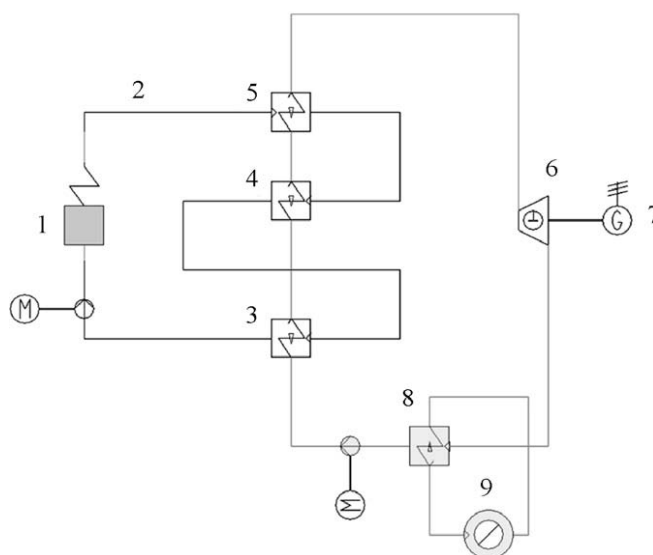


Σχήμα 1.4: Πηγή :Escola Superior de Tecnologia de Setúbal -Portugal

### 1.2.5 Μίκρο-συμπαγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (micro-CHP)

Άλλη μία εφαρμογή του οργανικού κύκλου Rankine είναι η συμπαγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού της τάξης μερικών  $kW_{el}$ , (micro-Combined Heat and Power production ή micro-CHP ). Σε τέτοιου τύπου εφαρμογές η θερμότητα που αποβάλλεται στον συμπυκνωτή χρησιμοποιείται εξ' ολοκλήρου για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του οργανικού ρευστού θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η απορριπτόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύνολο της για θέρμανση. Αυτλο γίνεται περίπου στους  $90^{\circ} C$ . Η πηγή θερμότητας για τον οργανικό κύκλο Rankine μπορεί να είναι η καύση βιομάζας [12].

Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται το σχεδιάγραμμα μιας εγκατάστασης micro-CHP σε συγκρότημα κατοικιών με καυστήρα βιομάζας. Ο καυστήρας αυτός (1) θερμαίνει ένα κλειστό κύκλωμα θερμικού ελαίου (2). Το θερμικό έλαιο προθερμαίνει (3), εξατμίζει (4) και υπερθερμαίνει (5) το οργανικό ρευστό, το οποίο στη συνέχεια εκτονώνεται (6) σε ένα στρόβιλο τύπου scroll ή screw. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται (7) μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί απευθείας από το συγκρότημα κατοικιών είτε να αποδοθεί στο δίκτυο. Το σημαντικό είναι ότι η απορριπτόμενη θερμότητα από τον συμπυκνωτή (8) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση των κατοικιών ή και να αποδοθεί σε ένα τοπικό δίκτυο θέρμανσης (9).



Σχήμα 1.5: Σχεδιάγραμμα εγκατάστασης micro-CHP με τεχνολογία ORC [12]

### 1.2.6 Ηλιακές εφαρμογές

Στον τομέα της ηλιακής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως ο οργανικός κύκλος Rankine, αντί του συμβατικού κύκλου Rankine. Ο οργανικός κύκλος Rankine επιτρέπει χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία εισροής θερμότητας, καλύτερο βαθμός απόδοσης ανταλλαγής θερμότητας λόγω μειωμένων περιβαλλοντικών απωλειών και άρα μείωση του μεγέθους των ηλιακών πάρκων [13].

Δύο κύρια παραδείγματα χρήσης οργανικού κύκλου Rankine για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι τα παρακάτω[1]:

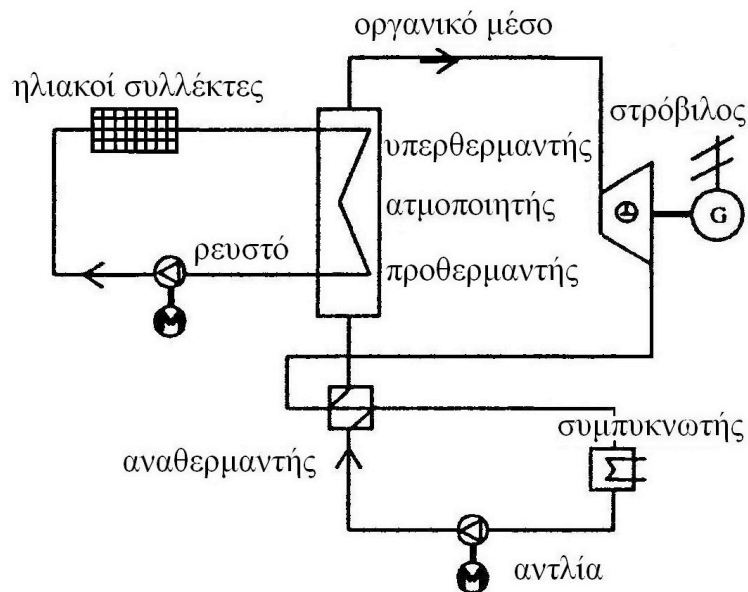
- Ο S. Canada παρουσίασε μία ολοκληρωμένη εγκατάσταση κάνοντας χρήση οργανικού κύκλου Rankine, χρησιμοποιώντας για θερμικό μέσο n-πεντάνιο και θερμοκρασίας εισόδου 204° C [Canada, 2005]
- Ο E.H. Malick Kane, στην διδακτορική του διατριβή, μελέτησε μια εγκατάσταση με διβάθμιο οργανικό κύκλο Rankine, όπου ο πρώτος κύκλος χρησιμοποιούσε R123 για θερμικό μέσο και ο δεύτερος κύκλος χρησιμοποιούσε R134a για θερμικό μέσο [Kane, 2002].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ηλιακές εφαρμογές τόσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για αφαλάτωση νερού με αντίστροφη όσμωση (Solar Reverse Osmosis Desalinations systems). Γενικά ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία συγκεντρώνεται σε ένα, παραβολικό συνήθως, ηλιακό συλλέκτη. Με τη βοήθεια ειδικού θερμικού ελαίου, η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ενός πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας στο οργανικό ρευστό και στον κύκλο ORC (Σχήμα 1.6). Σημειώνεται ότι η τεχνολογία αυτή έχει ήδη εφαρμοστεί με εργαζόμενο μέσο το νερό, σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της τάξεως των 50 MWel. Στις μονάδες αυτές αναπτύσσονται θερμοκρασίες 500-600° C και επομένως η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο είναι εφικτή και επιθυμητή. Ωστόσο σε μικρότερες εγκαταστάσεις της τάξεως των 100 kW για απομονωμένα συστήματα, οι μικρότεροι και απλούστεροι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες αναπτύσσουν θερμοκρασίες το πολύ 150-160° C. Η θερμότητα αυτή σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία, είναι δυνατό να αξιοποιηθεί μόνο με τη χρήση της τεχνολογίας ORC.

Στην περίπτωση του συστήματος αφαλάτωσης, ο στρόβιλος κινεί απευθείας την αντλία του συστήματος αντίστροφης όσμωσης και παράγεται αφαλατωμένο νερό, το οποίο στη συνέχεια αποθηκεύεται σε κατάλληλες δεξαμενές και προωθείται στο δίκτυο υδροδότησης.

Στις ηλιακές εγκαταστάσεις για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων, ORC-παραβολικοί συλλέκτες) σε απομονωμένα συστήματα, η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα ζήτημα

κεφαλαιώδους σημασίας για την ενεργειακή και οικονομική βιωσιμότητα τους. Το πλεονέκτημα των συστημάτων ORC έναντι των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι το γεγονός ότι δεν είναι αναγκαίο να αποθηκευτεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και η αξιοποίηση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού όταν αυτό είναι αναγκαίο. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι πολύ αποδοτικότερη και πιο οικονομική σε σχέση με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες είναι ακριβές, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικές. Έτσι, ενώ οι εγκαταστάσεις με φωτοβολταϊκά στοιχεία μοιάζουν να είναι η ιδανική επιλογή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε απομονωμένα συστήματα λόγω απλότητας κατασκευής, η ανάγκη για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά τα συστήματα ORC μια ανταγωνιστική τεχνολογία για τέτοιου τύπου εφαρμογές. Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία αυτή δεν είναι ακόμα ώριμη, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στο επόμενο κεφάλαιο, αναλύονται τα οφέλη από την εισαγωγή ενός συστήματος αποθήκευσης σε ένα ηλιακό σύστημα ORC και παρατίθενται οι διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 1.6: Ηλιακή εφαρμογή με παραβολικούς συλλέκτες και κύκλωμα ORC για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [7]



### 1.3 Ταξινόμηση και εφαρμογές

Μεγάλες ποσότητες θερμών καυσαερίων παράγονται από λέβητες, καμίνους, κλιβάνους και φούρνους. Αν κάποια από αυτή τη θερμότητα μπορούσε να ανακτηθεί, θα εξοικονομούσαν μία σημαντική ποσότητα του αρχικού καυσίμου. Η ενέργεια που αποβάλλεται μέσω των θερμών καυσαερίων δεν μπορεί να ανακτηθεί πλήρως. Μολαταύτα, μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας θα μπορούσε να ανακτηθεί και να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια υιοθετώντας μεθόδους, όπως αυτές που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Αναλόγως του τύπου της διεργασίας, η ενέργεια μπορεί να απορριφθεί σε σχεδόν οποιαδήποτε θερμοκρασία. Συνήθως, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο υψηλότερη είναι η ποιότητα της θερμότητας και τόσο πιο οικονομικά αποτελεσματική είναι η ανάκτηση θερμότητας. Τυπικές χρήσεις της απορριπτόμενης θερμότητας είναι: προθέρμανση του αέρα καύσης, θέρμανση χώρου, προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας προ του θαλάμου καύσης, συστήματα cascade (τεχνική στην οποία η υψηλής θερμοκρασίας βαθμίδα χρησιμοποιείται για την προθέρμανση αέρα και η χαμηλής θερμοκρασίας βαθμίδα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του τροφοδοτικού νερού ) κλπ. Για την καλύτερη αξιολόγηση των δυνατοτήτων ανάκτησης θερμότητας, είναι χρήσιμη η κατάταξη της θερμότητας σε σχέση με την δυνατότητα αξιοποίησής της, όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 1.1 [14]

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 ΠΗΓΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ

S.No.	Πηγή	Ποιότητα
1.	Θερμότητα Καυσαερίων.	Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη η δυνατότητα αξιοποίησης της ανάκτησής της.
2.	Θερμότητα υδρατμών.	Όπως παραπάνω, αλλά υπάρχει επιπλέον δυνατότητα ανάκτησης της λανθάνουσας θερμότητας κατά τη συμπύκνωση.
3	Θερμότητα που απορρίπτεται λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας των εξωτερικών επιφανειών του εξοπλισμού.	Χαμηλής ποιότητας – εφόσον συλλεχθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση χώρου και προθέρμανση αέρα.
4.	Θερμότητα που απορρίπτεται μέσω του ψυκτικού νερού.	Χαμηλής ποιότητας – χρήσιμη αν έχει συναλλαχθεί με το νέο-εισερχόμενο νερό.
5.	Απώλειες θερμότητας κατά την διάθεση κρύου νερού.	α) Υψηλής ποιότητας, αν μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μείωση της ψυκτικής ζήτησης. β) Χαμηλής ποιότητας, αν η μονάδα ψύξης χρησιμοποιείται ως αντλία θερμότητας.
6.	Θερμότητα αποθηκευμένη σε προϊόντα που εγκαταλείπουν τη διεργασία	Η ποιότητα εξαρτάται μονοσήμαντα από τη θερμοκρασία.
7.	Θερμότητα των αεριούχων και στερεών αποβλήτων των διεργασιών.	Φτωχή δυνατότητα αξιοποίησής των εάν είναι μολυσμένα και επομένως απαιτούν κραταωμένο εναλλάκτη θερμότητας.

#### 1.4 Οφέλη της ανάκτησης θερμότητας

Τα οφέλη της ανάκτησης θερμότητας μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Άμεσα οφέλη: Η ανάκτηση θερμότητας έχει άμεση επίδραση στον βαθμό απόδοσης της διεργασίας. Αυτό ανακλάται στη μείωση της κατανάλωσης και του κόστους της διεργασίας.

- Έμμεσα οφέλη:

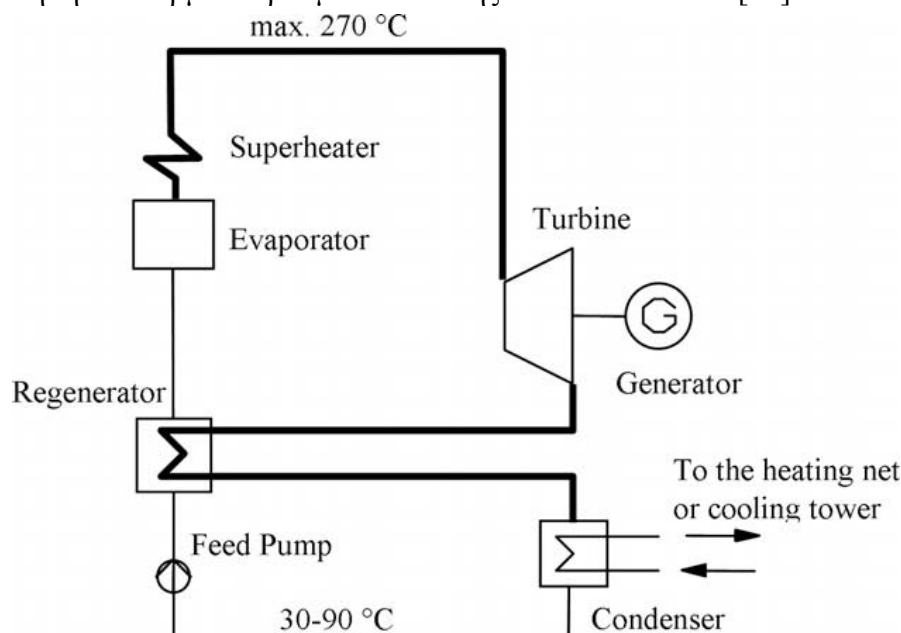
- Μείωση της μόλυνσης: Μεγάλος αριθμός τοξικών αποβλήτων όπως, το μονοξειδίο του άνθρακα, όξινα αέρια, αιθάλη, λυματολάσπη, ακρυλονιτρίλιο και άλλα πλαστικά χημικά κ.α., που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, μπορούν να καούν σε αποτεφρωτήρες εξυπηρετώντας διπλό σκοπό πχ ανάκτηση θερμότητας και μείωση των επιπέδων της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Επίσης μείωση των ρύπων, όπως για παράδειγμα του διοξειδίου του άνθρακα και του αζώτου[15].
- Μείωση στο μέγεθος του εξοπλισμού: Η ανάκτηση θερμότητας μειώνει την κατανάλωση καυσίμου, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των καυσαερίων που παράγονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους όλου του εξοπλισμού που μετέρχεται των καυσαερίων, όπως ανεμιστήρες, σωληνώσεις, καπνοδόχοι, καυστήρες κλπ.
- Μείωση της κατανάλωσης σε βοηθητική ενέργεια: Η μείωση στα μεγέθη του εξοπλισμού προσφέρει επιπρόσθετα οφέλη στην ιδιοκατανάλωση όπως ηλεκτρικής ενέργειας για ανεμιστήρες, αντλίες, κλπ.

## 2. Κύκλος Rankine

### 2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ο οργανικός κύκλος Clausius-Rankine (Organic Rankine Cycle) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές εκμετάλλευσης πηγών ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια και η θερμότητα που απορρίπτεται στο περιβάλλον ως παραπροϊόν διαφόρων παραγωγικών διαδικασιών (waste heat) [16]. Η διαφορά ενός κύκλου ORC από τον κλασικό κύκλο Rankine είναι η χρήση κάποιου οργανικού μέσου αντί για νερό-ατμό. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ORC. Η αρχή λειτουργίας ενός κύκλου ORC είναι ακριβώς η ίδια με ένα κύκλο Rankine νερού - ατμού. Συνήθως η πρόσδοση θερμότητας στον οργανικό κύκλο Rankine γίνεται με την βοήθεια ειδικού θερμικού ελαίου, για την αποφυγή τοπικής υπερθέρμανσης του οργανικού ρευστού και για την εξασφάλιση της λειτουργίας του εναλλάκτη θερμότητας σε ατμοσφαιρική πίεση [17]. Στις σύγχρονες εφαρμογές συνήθως ως στρόβιλος χρησιμοποιείται μια μηχανή τύπου scroll ή screw. Ωστόσο, μελετάται η χρήση εμβολοφόρου εκτονωτή καθώς έχει το πλεονέκτημα να μην επηρεάζεται από την ύπαρξη σταγονιδίων κατά την εκτόνωση και έτσι μπορεί να λειτουργεί με κορεσμένο ή ελαφρώς υπέρθερμο ατμό και να περνά από την υγρή περιοχή χωρίς προβλήματα.

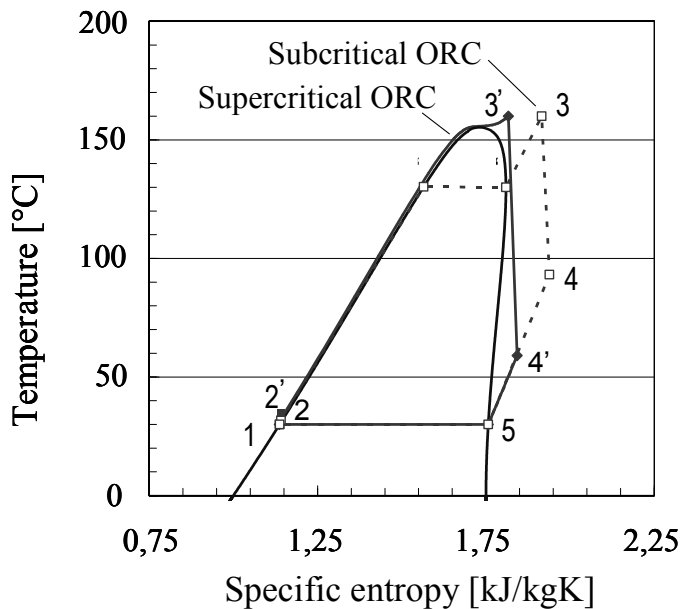
Οι προσπάθειες στη διαθέσιμη διεθνή βιβλιογραφία επικεντρώνονται στη μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου ORC [18].



Σχήμα 2.1. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ORC [19]

## 2.2 Θερμοδυναμική προσέγγιση

Το σχήμα 2.2 δείχνει την διαδικασία ενός κύκλου Rankine σε διάγραμμα T-S.



Σχήμα 2.2: Κύκλος ORC με εργαζόμενο μέσο R245fa [19]

Η διάταξη του κύκλου Rankine αποτελείται με τη σειρά από τον ατμοποιητή, το στρόβιλο, το συμπυκνωτή, και την τροφοδοτική αντλία [20], [21] και αποτελεί το πρότυπο για κύκλους παραγωγής ισχύος με ατμό. Συγκεκριμένα:

- Ατμοποιητής: Είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που προσδίδει τη θερμότητα από το περιβάλλον στο θερμικό μέσο με τη βοήθεια θερμικού ελαίου
- Στρόβιλος: Πραγματοποιεί την εκτόνωση του θερμικού μέσου που έρχεται από τον ατμοποιητή μετατρέποντας. Είναι συνδεδεμένος στον ίδιο άξονα με ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ενθαλπική πτώση του θερμικού μέσου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια
- Συμπυκνωτής: Συλλέγει και συμπυκνώνει τον ατμό εξόδου του στροβίλου απορρίπτοντας την απαραίτητη θερμότητα στο περιβάλλον. Πρόκειται για έναν εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ δύο ρευμάτων, του ατμού εξόδου του στροβίλου, που συμπυκνώνεται και οδηγείται προς το σύστημα τροφοδοσίας και του μέσου ψύξης (συνήθως νερό ή αέρας) που παραλαμβάνει την απορριπτόμενη θερμότητα.
- Τροφοδοτική αντλία: Οι αντλία ανυψώνει την πίεση του κορεσμένου μέσου που επιστρέφει από το συμπυκνωτή, για να τη φέρει στην τιμή πίεσης τροφοδοσίας του ατμοποιητή

Πιο συγκεκριμένα για τα παραπάνω κομμάτια του κύκλου Rankine:

#### Εκτονωτής

Οι δύο κύριες συσκευές για την παραγωγή έργου από ένα κύκλο Rankine είναι ο στρόβιλος και ο εκτονωτής θετικής εκτόπισης. Οι στρόβιλοι είναι μια εφαρμοσμένη τεχνολογία, αρκεί η εκτόνωση να λαμβάνει χώρα πλήρως μέσα στην υπέρθερμη περιοχή. Η εκτόνωση μέσα στη διασπαστική περιοχή είναι μη επιθυμητή γιατί τα σταγονίδια νερού τείνουν να διαβρώσουν τα πτερύγια του στρόβιλου. Από τους εκτονωτές θετικής εκτόπισης, ο πιο ελπιδοφόρος είναι ο εμβολοφόρος. Περαιτέρω ανάλυση θα γίνει σε παρακάτω κεφάλαιο.

#### Συμπυκνωτής

Χρησιμεύει για τη συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο δηλαδή είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου ατμός υπό χαμηλή πίεση και θερμοκρασία συμπυκνώνεται με τη βοήθεια ψυκτικού μέσου που μπορεί να είναι αέρας ή νερό. Όσο χαμηλότερη είναι η πίεση ατμού στο συμπυκνωτή τόσο αυξάνει ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος αφού αυξάνει η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο, επομένως ο συμπυκνωτής είναι βασικό τμήμα του συστήματος αλλά και ο φορέας μέγιστης θερμικής απώλειας.

Από ένα συμπυκνωτή έχουμε τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Ο βαθμός καθαρότητας του ατμού πρέπει να διατηρείται και στο συμπύκνωμα.
2. Η θερμοκρασία του συμπυκνώματος δεν πρέπει να είναι μικρότερη της θερμοκρασίας κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση του ατμού για να αποφύγουμε μία επιπλέον απώλεια και εμπλουτισμό του συμπυκνώματος σε οξυγόνο.
3. Το συμπύκνωμα πρέπει να περιέχει όσο το δυνατό λιγότερο οξυγόνο για να αποφεύγονται οι διαβρώσεις.
4. Αέρας που εισέρχεται στον συμπυκνωτή καθώς και αέρας που τυχόν περιέχεται στον ατμό πρέπει να απομακρύνεται.

Θεωρούμε ότι από το συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται ως κορεσμένο υγρό, ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία εισέρχεται ενώ η πίεση συμπύκνωσης μπορεί να είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Στην περίπτωση αυτή υπεισέρχονται δύο παράγοντες:

- Μεγάλη υποπίεση προϋποθέτει καλή στεγανοποίηση, για να μην εισέλθει στο συμπυκνωτή του συστήματος αέρας από το περιβάλλον.
- Δεδομένου ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται με τη ελάττωση της πίεσης συμπύκνωσης, πρέπει να επιλεγεί τέτοια τιμή για τη δεύτερη ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας. Για το λόγο αυτό και για να αποφύγουμε υπερβολικά μεγάλο μέγεθος συμπυκνωτή η θερμοκρασία συμπύκνωσης πρέπει

να είναι τουλάχιστον 20 °C υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Να σημειωθεί ότι μείωση της πίεσης συμπύκνωσης είναι επιθυμητή από τη πλευρά του στροβίλου διότι αυξάνεται ο λόγος πιέσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της ωφέλιμης ισχύος.

#### Τροφοδοτική αντλία

Είναι εκείνη που καταθλίβει το εργαζόμενο μέσο στον εναλλάκτη θερμότητας και ανυψώνει την πίεση στην υψηλή επιθυμητή. Οι αντλίες πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν τη μέγιστη παροχή εργαζόμενου μέσου στον εναλλάκτη. Στις τροφοδοτικές αντλίες συνήθως διαφέρουν το σημείο υπολογισμού από το σημείο βέλτιστου βαθμού απόδοσης, δεδομένου ότι το περισσότερο χρονικό διάστημα η αντλία δουλεύει σε φορτίο μικρότερου του μεγίστου. Από την τροφοδοτική αντλία έχουμε τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να έχει όσο το δυνατόν καλύτερο βαθμό απόδοσης σε όσο το δυνατό ευρύτερη περιοχή φορτίου.
- Γρήγορη εκκίνηση από ψυχρή σε θερμή κατάσταση
- Όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{th} = \frac{P_{mech}}{\dot{Q}_{th}}$$

όπου  $P_{mech}$  είναι το καθαρό μηχανικό έργο που παράγεται στον άξονα του στροβίλου και  $\dot{Q}_{th}$  είναι το συνολικό θερμικό φορτίο που δίνεται στο οργανικό μέσο.

Το έργο λοιπόν που παράγεται από τη διαδικασία του κύκλου Rankine είναι ανάλογο με την ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο αφαιρώντας την ενθαλπική αύξηση στην αντλία:

$$P_{mech} = \dot{m}_{ORC} \cdot [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)]$$

Η θερμική είσοδος στον κύκλο γίνεται μέσω του ατμοποιητή ενώ το μέσο μεταφοράς θερμότητας είναι συνήθως συνθετικό θερμικό λάδι και ισχύει:

$$\dot{Q}_{Organic\ fluid} = \dot{m}_{ORC} \cdot (h_3 - h_2)$$

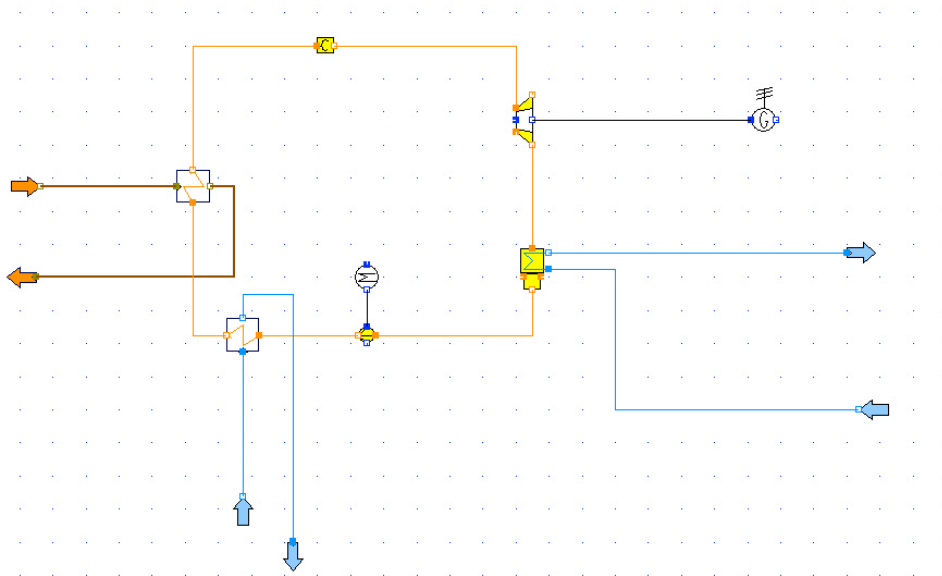
όπου  $h_1, h_2, h_3$  και  $h_4$  οι ειδικές ενθαλπίες σύμφωνα με το σχήμα **Σχήμα 2.2: 2.2**.

## 2.3 Βασικές Παραλλαγές του απλού κύκλου

Η αναζήτηση διατάξεων που επιτρέπουν την αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου ή την αντιστάθμιση των διαφόρων απωλειών και ιδιοκαταναλώσεων που υπάρχουν στον κύκλο, οδήγησε στην ανάπτυξη εγκαταστάσεων που υλοποιούν βασικές παραλλαγές του απλού κύκλου Rankine. Μερικές παραλλαγές είναι ο κύκλος Rankine με προθέρμανση, ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση και ο διβάθμιος κύκλος Rankine.

### 2.3.1 Κύκλος Rankine με προθέρμανση

Μία πρώτη επέμβαση στον αρχικό κύκλο είναι η προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας πριν τον ατμοποιητή, ο οποίος θερμαίνει το θερμικό μέσο με τη βοήθεια ενός ρεύματος θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασίας από την οποία βρίσκεται το θερμικό μέσο μετά την έξοδό του από την αντλία. Η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας επιτρέπει είσοδο θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, το οποίο συνεπάγεται λειτουργία του κύκλου με μεγαλύτερο ρυθμό ροής μάζας. Έτσι, αυξάνεται η ισχύς στο στρόβιλο οπότε έχουμε μεγαλύτερο βαθμός απόδοσης από τον απλό κύκλο. Ο κύκλος Rankine με προθέρμανση φαίνεται στο σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου Rankine με προθέρμανση [22]

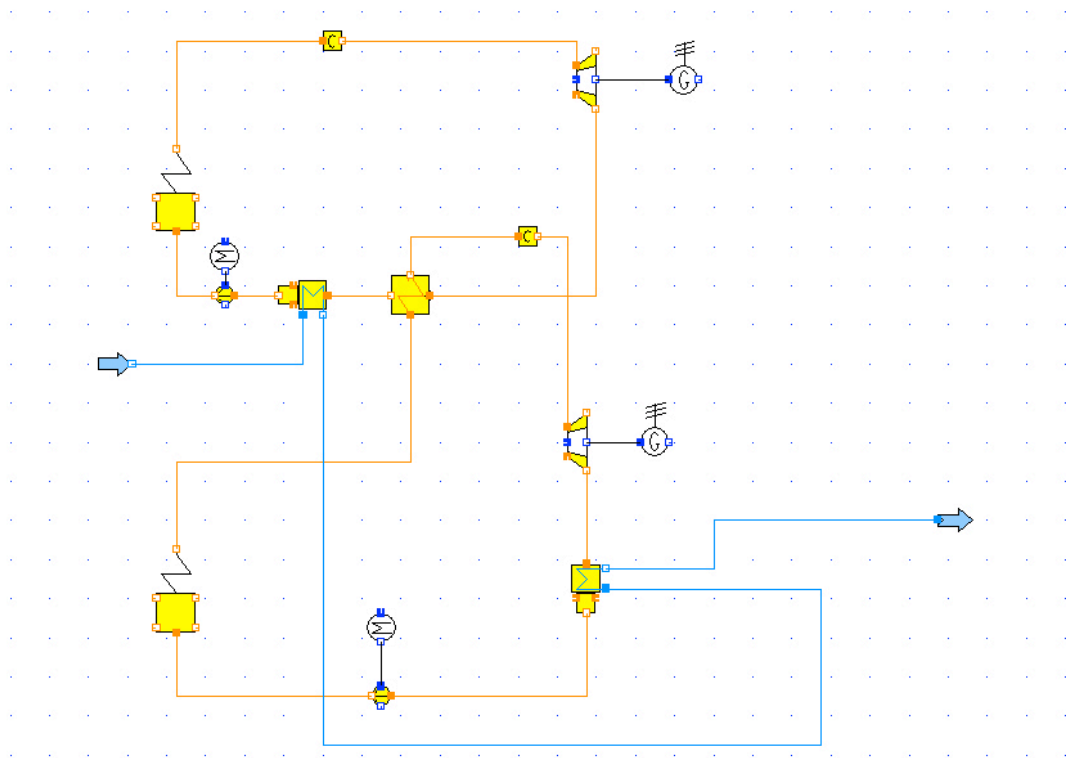




### 2.3.3 Διβάθμιος κύκλος Rankine.

Ένας άλλος τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι ο διβάθμιος κύκλος Rankine. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε δύο κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με τον εξής τρόπο: Το θερμικό μέσο του πρώτου κύκλου μετά την έξοδό του από τον στρόβιλο περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας και ζεσταίνει το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου, λειτουργώντας σαν ατμοποιητής για τον δεύτερο κύκλο. Ο διβάθμιος κύκλος Rankine μπορεί να λειτουργήσει και με διαφορετικό τρόπο. Το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου έχει ξεχωριστό ατμοποιητή και ο εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των δύο κύκλων λειτουργεί σαν υπερθερμαντής για τον δεύτερο κύκλο. Έτσι, το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία και ενθαλπία στην είσοδο του στροβίλου, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της ισχύος του δεύτερου κύκλου.

Κάθε περίπτωση εξαρτάται από το είδος της εισερχόμενης θερμότητας και την χρήση που έχει ο κύκλος. Κάθε βαθμίδα μπορεί να έχει διαφορετικό θερμικό μέσο για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι η μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη της μέγιστης θερμοκρασίας του κάτω κύκλου. Ένας διβάθμιος κύκλος Rankine φαίνεται στο Σχήμα 2.5:



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση του διβάθμιου κύκλου Rankine [22]

## 2.4 Οργανικός Κύκλος Rankine

### 2.4.1 Εισαγωγή

Το σύνηθες θερμικό μέσο του κύκλου Rankine είναι το νερό υπό πίεση. Στην περίπτωση που ο κύκλος έχει χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία, το νερό/ατμός δεν είναι ιδανικά λόγω της χαμηλής απόδοσης σε αυτές τις συνθήκες. Το νερό επίσης παρουσιάζει μεγάλο ειδικό όγκο, πράγμα που απαιτεί μεγαλύτερες εγκαταστάσεις.

Αυτό οδηγεί στην χρήση ψυκτικών μέσων ή υδρογονανθράκων για θερμικά μέσα. Οι φυσικές ιδιότητες του θερμικού μέσου είναι υψηλής σημασίας για την συνολική συμπεριφορά και απόδοση του κύκλου.

### 2.4.2 Επιλογή εργαζόμενου μέσου

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη χρήση ενός οργανικού κύκλου Rankine είναι η σωστή επιλογή εργαζόμενου μέσου για να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του κύκλου. Παρόλα αυτά όμως, τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά δεν είναι τα μόνα που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας. Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, μία διεθνής συνθήκη για την προστασία του στρώματος του όζοντος, και η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2037/2000 απαγορεύουν τη χρήση ουσιών που καταστρέφουν το όζον και επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα χαρακτηριστικά ενός οργανικού ρευστού που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι [1],[17],[24] :

- θερμοδυναμικές ιδιότητες
  - θερμοκρασία βρασμού (να είναι χαμηλή)
  - θερμοκρασία αυτανάφλεξης (η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή)
  - θερμοκρασία τήξης (πρέπει να είναι μικρότερη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ώστε σε περίπτωση μη λειτουργίας της εγκατάστασης να μην στερεοποιηθεί το ρευστό)
- αποδεκτές πιέσεις (οι υψηλές πιέσεις τείνουν να έχουν αρνητική επίδραση στην σταθερότητα του κύκλου)
- σταθερότητα του ρευστού και συμβατότητα με τα υλικά κατά την επαφή με αυτά (μη διαβρωτικό)

- παράμετροι ασφαλείας, υγείας και περιβάλλοντος
  - όριο αναφλεξιμότητας
  - μη τοξικό
- διαθεσιμότητα και κόστος

Στον πίνακα 2.1 στη συνέχεια δίνονται τα χαρακτηριστικά ορισμένων οργανικών ρευστών.

ρευστό	T <sub>c</sub> (°C)	p <sub>c</sub> (bar)	σημείο ζέσης (°C)	GWP	ODP
R143a	72,73	37,64	- 47,60	μέσο	όχι
R134a	101,10	40,60	- 26,10	μέσο	όχι
R227ea	101,70	29,30	- 16,50	υψηλό	όχι
R236fa	124,90	32,00	- 1,40	υψηλό	όχι
R236ea	139,00	35,00	-	μέσο	όχι
R245fa	154,10	36,40	15,10	μέσο	όχι
R123	184,00	36,60	27,80	πολύ χαμηλό	πολύ χαμηλό
R601	196,50	33,70	37,00	-	-
R113	214,10	33,90	47,60	υψηλό	υψηλό
Ισοβουτάνιο	134,66	36,23	-159.6	μέσο	όχι
Πεντάνιο	196,6	33,7	36,1	μέσο	όχι
Τολουένιο	318	41,26	-93	μέσο	όχι

Πίνακας 2.1: Θερμοδυναμικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά διαφόρων οργανικών ρευστών [25], [26], [27], [28], [29], [30].

Στον πίνακα 2.1 τα μεγέθη GWP (Global Warming Potential) και ODP (Ozone Depletion Potential) αναφέρονται στο ποσοστό συνεισφοράς του ρευστού στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στο ποσοστό της υποβάθμισης που μπορούν να προκαλέσουν στο στρώμα του όζοντος, αντίστοιχα.

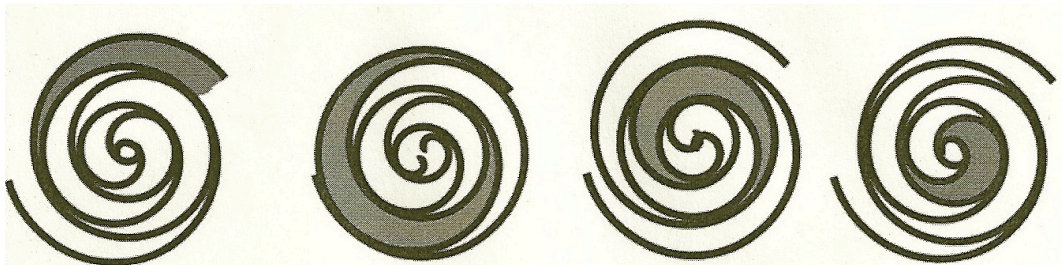
## 3. Εκτονωτής

### 3.1 Εισαγωγή

Οι δύο κύριες συσκευές για την παραγωγή έργου από ένα κύκλο Rankine είναι ο στρόβιλος και ο εκτονωτής θετικής εκτόπισης. Οι στρόβιλοι είναι μια εφαρμοσμένη τεχνολογία, αρκεί η εκτόνωση να λαμβάνει χώρα πλήρως μέσα στην υπέρθερμη περιοχή. Η εκτόνωση μέσα στη διασπαστική περιοχή είναι μη επιθυμητή γιατί τα σταγονίδια νερού τείνουν να διαβρώσουν τα πτερύγια του στροβίλου. Από τους εκτονωτές θετικής εκτόπισης, οι πιο διαδεδομένοι είναι ο σπειροειδής εκτονωτής, ο εκτονωτής screw και ο εμβολοφόρος εκτονωτής.

### 3.2 Σπειροειδής εκτονωτής

Ο σπειροειδής εκτονωτής είναι μία θετικής εκτόνωσης μηχανή. Ο σπειροειδής εκτονωτής αποτελείται από δύο σπείρες, μία σταθερή και μία κινητή. Η κινητή σπείρα έχει έκκεντρη τροχιά χωρίς να περιστρέφεται και με αυτόν τον τρόπο παγιδεύει και συμπιέζει μέρη υγρού ανάμεσα στις σπείρες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, σε κατάσταση συμπίεσης, ο όγκος των δύο παγιδευμένων μερών υγρού μειώνεται και το υγρό κατευθύνεται προς το κέντρο. Τη ίδια ακριβώς στιγμή, η πίεση του υγρού αυξάνεται. Το συμπιεσμένο υγρό εκτονώνεται τελικά μέσω του καναλιού εκτόνωσης που βρίσκεται στο κέντρο των δύο σπирάλ. Σε κατάσταση εκτόνωσης, το υγρό ρέει από το κέντρο προς την περιφέρεια.

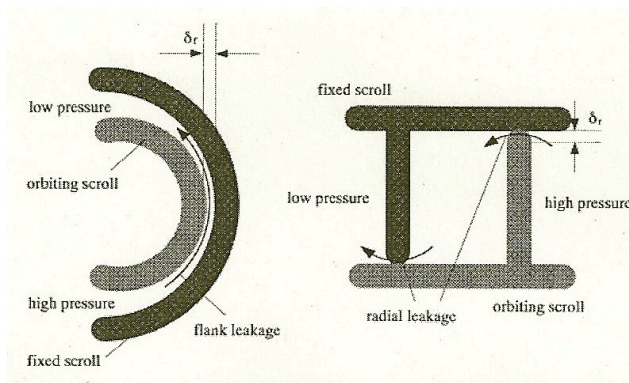


Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας του σπειροειδούς συμπιεστή [1]

Ο σπειροειδής συμπιεστής είναι πολύ διαδεδομένος σε ψυκτικές εφαρμογές. Έχει λιγότερα κινητά μέρη από τους κοινούς συμπιεστές, το οποίο βελτιώνει την αξιοπιστία του και μειώνει την ηχητική μόλυνση. Οι σπειροειδείς συμπιεστές είναι γνωστοί για το ότι είναι πολύ συμπαγείς και για το ότι δουλεύουν ομαλά, καθώς το επίπεδο δόνησής τους είναι περιορισμένο.

### 3.2.1 Διαρροές

Υπάρχουν δύο τύποι διαρροών σε ένα σπειροειδής συμπιεστή, η πλευρική διαρροή και η ακτινωτή διαρροή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Η πλευρική διαρροή οφείλεται στην εκκαθάριση μεταξύ των πλευρών των δύο σπειρών, ενώ η ακτινωτή διαρροή οφείλεται στην εκκαθάριση μεταξύ της άκρης του μιας σπείρας και της επιφάνειας της άλλης.[Chen et al,2002]



Σχήμα 3.2: Διαρροές σε έναν σπειροειδή εκτονωτή

Στην κατάσταση συμπίεσης, η διαρροή μειώνει την ογκομετρική απόδοση και αυξάνει τη συγκεκριμένο έργο συμπίεσης, καθώς το υγρό, περνώντας από μια περιοχή υψηλής πίεσης σε περιοχή χαμηλής πίεσης, χρειάζεται να ξανασυμπίεστεί.

Κατά τον ίδιο τρόπο, η διαρροή μειώνει την ισχύ εξόδου μιας σπειροειδούς μηχανής που λειτουργεί ως εκτονωτής, καθώς το υγρό ρέει κατευθείαν από την περιοχή υψηλής πίεσης στην περιοχή χαμηλής πίεσης χωρίς να παράγει χρήσιμο έργο.

### 3.2.2 Μετατροπή ενός σπειροειδούς συμπιεστή σε εκτονωτή

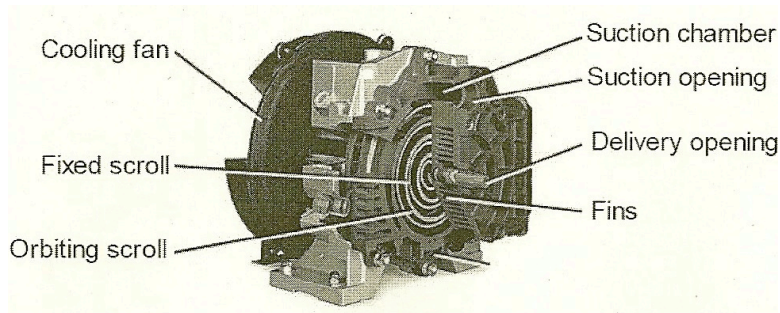
Οι σπειροειδείς συμπιεστές μπορεί να έχουν λιπανθεί ή όχι. Η λίπανση μειώνει την τριβή ανάμεσα στις δύο σπείρες και μειώνει επίσης και την διαρροή. Ωστόσο, η μετατροπή ενός σπειροειδούς συμπιεστή που έχει λιπανθεί σε εκτονωτή εμφανίζει κάποια προβλήματα:

- Καθώς η περιστροφή θα γίνεται στην αντίθετη κατεύθυνση, η αντλία λαδιού μπορεί να μη λειτουργεί πλέον εάν είναι κατευθείαν συνδεδεμένη στον άξονα του συμπιεστή.
- Η συμβατότητα του ρευστού με το λάδι λίπανσης δεν είναι εγγυημένη εάν ο συμπιεστής δεν έχει σχεδιαστεί για ORC υγρά.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα η σπειροειδής μηχανή που επιλέγεται συνήθως είναι ένας συμπιεστής χωρίς λάδι.

Άλλος ένας παράγοντας που έπρεπε να ληφθεί υπ' όψιν για την επιλογή του συμπιεστή ήταν ο εσωτερικός ενσωματωμένος δείκτης: έπρεπε να είναι

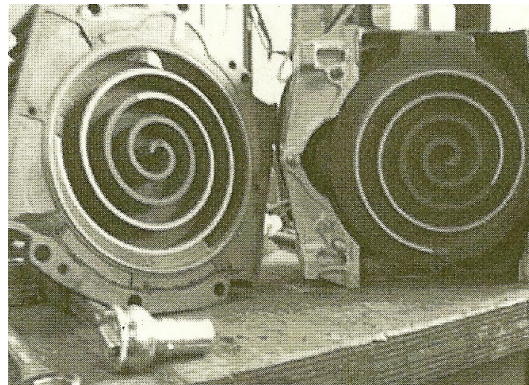
προσαρμοσμένος στο φάσμα των δεικτών πίεσης που θα δεχόταν ο εκτονωτής. Όσον αφορά την εφαρμογή που θα μελετηθεί, επιλέχθηκε μια μηχανή με υψηλό εσωτερικό ενσωματωμένο δείκτη. Μια σχηματική όψη του σπειροειδούς συμπιεστή εμφανίζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σπειροειδής συμπιεστής αέρα χωρίς λάδι [1]

Αυτή η μηχανή παρουσιάζει άλλη μία ιδιαιτερότητα. Προκειμένου να μειωθούν οι διαρροές, δύο τύποι σφραγίσματος είναι ενσωματωμένοι στον συμπιεστή:

- Ένα εσωτερικό σφράγισμα, τοποθετημένο στην άκρη των δύο σπειρών (σχήμα 3.4). Ο ρόλος του είναι να μειώνει την ακτινωτή διαρροή.
- Ένα κυκλικό περιφερικό σφράγισμα, τοποθετημένο στη σταθερή σπείρα, του οποίου ο ρόλος είναι να απομονώνει το εσωτερικό της σπείρας από το εξωτερικό και να εμποδίζει τυχόν εξωτερικές διεισδύσεις ή διαρροές στο εξωτερικό (ανάλογα με την πίεση στα περιφερικά μέρη). (σχήμα 3.4)



Σχήμα 3.4: Σταθερή και κινητή σπείρα [1]

Το σχήμα 3.4 δείχνει μια όψη των δύο σπιράλ των σπειρών. Η κινητή σπείρα βρίσκεται στα δεξιά, ενώ η σταθερή στα αριστερά. Τα σφραγίσματα είναι ορατά στην άκρη της κάθε σπείρας. Στη διαδικασία συμπίεσης, καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας, η πίεση του αέρα ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του συμπιεστή δεν είναι πρωτογενής. Το περιφερειακό σφράγισμα είναι κυρίως χρήσιμο προκειμένου να αποφεύγεται η διείσδυση σκόνης από το εξωτερικό.



Στη διαδικασία εκτόνωσης, το εργαζόμενο μέσο δεν είναι πλέον αέρας και βρίσκεται σε πίεση υψηλότερη από την ατμοσφαιρική. Οποιαδήποτε διαρροή από τη μηχανή προς τα έξω είναι μια απώλεια εργαζόμενου μέσου για τον κύκλο και πρέπει να αποφεύγεται.

Προκειμένου να μειωθεί αυτή η απώλεια, μια επιπλέον στρώση πάχους 0.8mm (από υλικό Reinzit 200) εισάγεται κάτω από τον περιφερικό συνθετικό σωλήνα. Η προσπάθεια επαφής μεταξύ της σταθερής και της κινητής σπείρας αυξάνεται (αυτή η προσπάθεια μπορεί να προσαρμοστεί με τη βοήθεια κατσαβιδιών Allen) και μια συγκολλητική ουσία εφαρμόζεται ανάμεσα στη σταθερή και στην κινητή σπείρα.

Μια άλλη αλλαγή στον συμπιεστή είναι η εμπόδιση της κυκλικής κυκλοφορίας του αέρα (υπάρχει κανάλι αέρα κατά μήκος του εξωτερικού περιβλήματος της σπείρας). Πράγματι, η ψύξη του αερίου είναι ωφέλιμη για μια συμπίεση αλλά όχι για μια εκτόνωση.

### **3.2.3 Δικαιολόγηση της επιλογής του σπειροειδούς εκτονωτή**

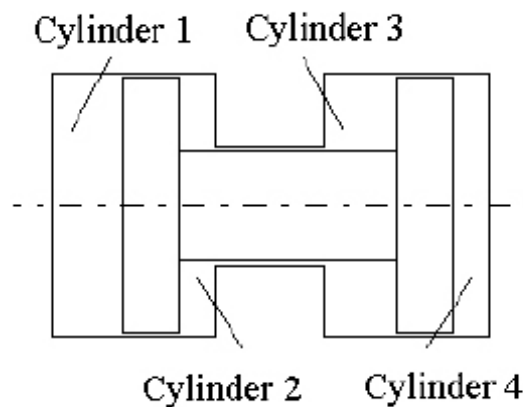
Ο σπειροειδής εκτονωτής έχει επιλεγεί ανάμεσα σε όλες τις μηχανές τύπου μετατόπισης λόγω του ότι έχει μικρό αριθμό κινούμενων μερών, αξιοπιστία, ευρύ φάσμα ισχύος εξόδου και καλή διαθεσιμότητα. Συγκρινόμενη με έναν εμβολοφόρο εκτονωτή, ο σπειροειδής εκτονωτής εμφανίζει επίσης το πλεονέκτημα του να μην έχει βαλβίδες εισαγωγής (που εν μέρει δουλεύουν τέλεια σε κατάσταση συμπίεσης σαν βαλβίδες ελέγχου, αλλά απ' την άλλη χρειάζεται να συγχρονίζονται σε κατάσταση εκτόνωσης, όπως σε μία μηχανή εσωτερικής καύσεως).

Ωστόσο, ο σπειροειδής εκτονωτής δεν είναι η μόνη διαθέσιμη λύση για το ORC. Μερικές έρευνες παρουσιάζουν τη μηχανή Wankel και τον εκτονωτή screw ως κατάλληλες τεχνολογίες για έναν οργανικό κύκλο Rankine [Badr. 1991; Persson, 1994].



### 3.3 Εμβολοφόρος Εκτονωτής

Ο εμβολοφόρος εκτονωτής είναι αρκετά διαδεδομένο σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές όπως για παράδειγμα σε κρυογενικά συστήματα διαχωρισμού αέρα [31]. Επίσης, χρησιμοποιείται και σε κανονικά συστήματα ψύξης με ψυκτικό μέσο το R134a [32]. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η απλή σχεδίασή του και η ευκολία στη λειτουργία του. Ο εμβολοφόρος εκτονωτής αποτελείται από δύο διπλής-ενέργειας πιστόνια, τα οποία συνδέονται με μία ράβδο. Οι δύο κύλινδροι ορίζουν τέσσερις εργαζόμενους όγκους, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο όγκους που συμπιέζονται (2 και 3) και σε δύο όγκους που εκτονώνονται (1 και 4), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Μονάδα εμβολοφόρου εκτονωτή [31]

Η λειτουργία του εμβολοφόρου εκτονωτή είναι εθικτή σε ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων όπως για παράδειγμα για διαφορετικές θερμοκρασίες ατμοποίησης και θερμοκρασίες εξόδου του εργαζόμενου μέσου καθώς και σε υψηλές πιέσεις. Από τη στιγμή, που θα κατασκευαστεί η μηχανή, έχει συγκεκριμένη εργαζόμενη αναλογία όγκων μεταξύ της βαθμίδας συμπίεσης και εκτόνωσης. Έτσι, η κάθε μηχανή προσαρμόζεται σε έναν συγκεκριμένο κύκλο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Η χρήση εμβολοφόρου εκτονωτή έχει το πλεονέκτημα να μην επηρεάζεται από την ύπαρξη σταγονιδίων κατά την εκτόνωση και έτσι μπορεί να λειτουργεί με κορεσμένο ή ελαφρώς υπέρθερμο ατμό και να περνά από την υγρή περιοχή χωρίς προβλήματα.

### 3.4 Εκτονωτής Screw

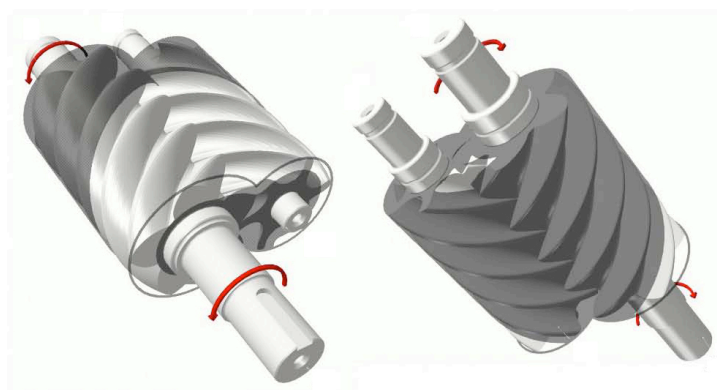
Ένας τέτοιος στρόβιλος ουσιαστικά είναι ένας συμπιεστής Screw, που συχνά συναντάται ως εξοπλισμός σε συστήματα κλιματισμού, ο οποίος δουλεύει ανάστροφα. Ο στρόβιλος αποτελείται από δύο κινούμενα μέρη. Πρόκειται για δύο σπειροειδή γρανάζια κατασκευασμένα έτσι ώστε να εφάπτονται μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6 και στο σχήμα 3.7.

Εξαιτίας της καθαρά περιστροφικής δυνατότητας κίνησης, επιτυγχάνεται συμπίεση – εκτόνωση του μέσου χωρίς εξωτερικές δυνάμεις ταλαντώσεων καθιστώντας το σύστημα πιο αποδοτικό και αξιόπιστο σε λειτουργία στο χρόνο. Επίσης στο στρόβιλο Screw εκ κατασκευής αποφεύγεται η χρήση βαλβίδων, πράγμα που θα δημιουργούσε μηχανικές φθορές και συνεπώς μείωση της συνολικής απόδοσης.

Οι Screw στροβιλομηχανές έχουν μεγάλη απόδοση ανά μονάδα όγκου καθώς συγκριτικά οι διαστάσεις τους είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με άλλες τεχνολογίες για το ίδιο παραγόμενο έργο.

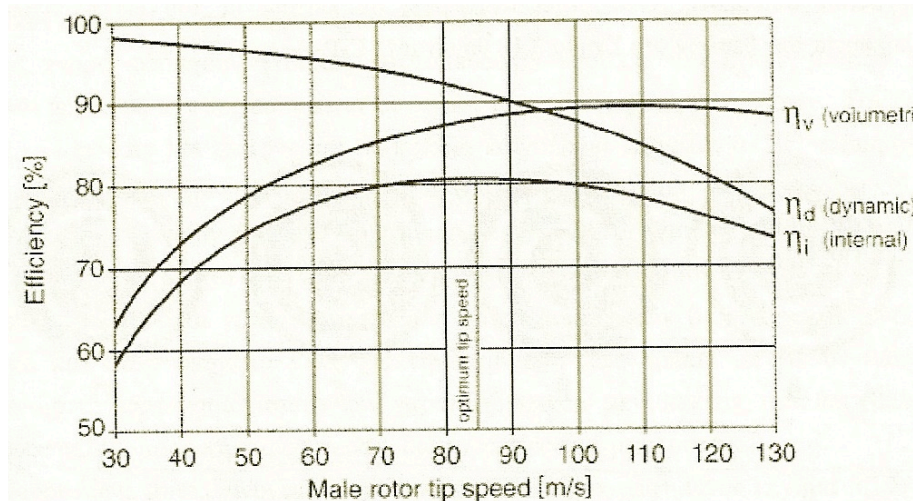


Σχήμα 3.6: Γρανάζια στρόβιλου Screw (βίδα) [33]



Σχήμα 3.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση εκτονωτή screw [34]

Το παραγόμενο έργο στον στρόβιλο Screw πραγματοποιείται μόνο εφόσον τα δύο αυτά γρανάζια είναι ενσωματωμένα σε ένα μεταλλικό κλωβό κατάλληλης αεροδυναμικής κατασκευής και διαστάσεων. Η απαραίτητη ισχύς ή λόγος πίεσης ανάλογα με τη λειτουργία (στρόβιλος ή συμπιεστής) σχετίζεται με τον λόγο όγκου. Από εκεί και πέρα η απόδοση του στροβίλου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής τους (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Βαθμός απόδοσης στροβίλου Screw σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του [33]

### 3.5 Συμπεράσματα

Όλοι οι παραπάνω τύποι εκτονωτών είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε οργανικούς κύκλους Rankine. Είναι μικροί σε διαστάσεις, απλοί στην λειτουργία τους, χωρίς πολλά κινητά μέρη, εύκολοι στην συντήρηση και μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλα εύρη θερμοκρασίας και πίεσης. Η επιλογή εξαρτάται από το τι ζητάμε σε κάθε εγκατάσταση και πώς μπορούμε να το υλοποιήσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ως προς τον οικονομικό και ενεργειακό τομέα.

## 4. Ανάλυση διαφόρων Οργανικών Κύκλων Rankine

### 4.1 Εισαγωγή

Τη σημερινή εποχή το κόστος των καυσίμων ανεβαίνει μέρα με την μέρα και η ανάγκη για την εκμετάλλευση των υπαρχόντων πόρων με το μέγιστο βαθμό απόδοσης είναι επιτακτική. Οι προσπάθειες για εκμετάλλευση της θερμότητας που χάνεται σε κάθε διεργασία είναι μεγάλες και πολλοί τρόποι έχουν προταθεί για την ανάκτηση αυτής της ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένας αξιόπιστος τρόπος είναι η εισαγωγή ένας κύκλου Rankine στο κυρίως σύστημα με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανακτώντας και μετατρέποντας την θερμική ενέργεια από καυσαέρια, από ηλιακούς συλλέκτες, από γεωθερμία κτλ.

Όπως αναφέρθηκε, ένας τρόπος για την βελτιστοποίηση του κύκλου Rankine είναι ο διβάθμιος κύκλος Rankine, όπου υπάρχουν δύο κύκλοι Rankine, όπου ο ένας εξαρτάται από τον άλλο και επιτρέπεται η μεταφορά θερμικής ενέργειας μεταξύ τους. Η μελέτη που ακολουθεί αναλύει διαφορετικές διατάξεις οργανικών κύκλων Rankine στην προσπάθεια ανάκτησης θερμότητας από τα παραγόμενα καυσαέρια ναυτικής ντιζελομηχανής.

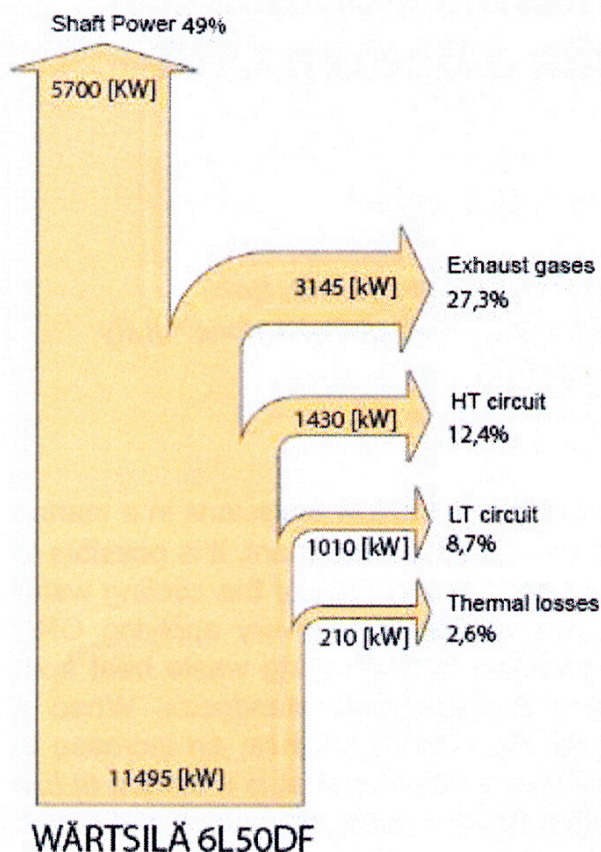
### 4.2 Η ναυτική μηχανή αναφοράς

Η ναυτική μηχανή που έχει επιλεγεί να μελετηθεί είναι μία διπλή μηχανή Wartsila 6L50 DF. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι μία εξακύλινδρη εν σειρά μηχανή, παράγει 5,7 MW ισχύ με απόδοση περίπου 49% λειτουργώντας στις 514 rpm. Από την πλευρά του καυσίμου που χρησιμοποιείται είναι αρκετά ευέλικτη, αφού μπορεί να αλλάξει από αέριο καύσιμο LNG σε υγρό diesel LFO-HFO και αντίστροφα, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία με το φθηνότερο δυνατό καύσιμο κάθε στιγμή. Εξαιτίας της πολυπλοκότητάς της το κόστος απόκτησης αυτής της διπλής μηχανής είναι 30% μεγαλύτερο από τις κοινές ναυτικές ντιζελομηχανές, ωστόσο επιτρέπει μία ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 5-8%[35]

#### 4.2.1 Πιθανότητα ανάκτησης ενέργειας από την θερμική μηχανή

Τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να ενισχυθούν με την ανάκτηση της θερμικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη στα απορριπτόμενα καυσαέρια και σε άλλα εργαζόμενα υγρά της μηχανής, τα οποία υπό κανονικές συνθήκες απορρίπτονται στο περιβάλλον.

Το ενεργειακό ισοζύγιο μίας μηχανής Wartsila 6L50 DF σε μέγιστο φορτίο δείχνει περίπου 11,5 MW σαν θερμική ισχύ εισόδου και 5,7 MW σαν μηχανική ισχύ εξόδου (σχήμα 4.1). Η υπόλοιπη ενέργεια απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω των καυσαερίων (περίπου 3,1 MW σε θερμοκρασία 400° C) και του συστήματος ψύξης (2,6 MW σε θερμοκρασίες μεταξύ 50° και 90° C).

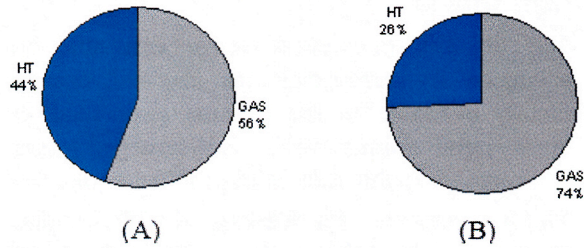


Σχήμα 4.1: Ενεργειακό Ισοζύγιο της μηχανής W6L50DF [35]

Σε αυτού του τύπου μηχανές, το σύστημα ψύξης χωρίζεται σε δύο κομμάτια, ανάλογα του θερμοκρασιακού τους επιπέδου: στο κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας που είναι περίπου στους 90° C και στο κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας που είναι περίπου στους 50° C. Μία πρώτη επιλογή πιθανής ανάκτησης θερμότητας μπορεί να βασιστεί πρωταρχικά στην διαθεσιμότητα των θερμικών πηγών υψηλής θερμοκρασίας, όπως τα απορριπτόμενα καυσαέρια και το κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας.

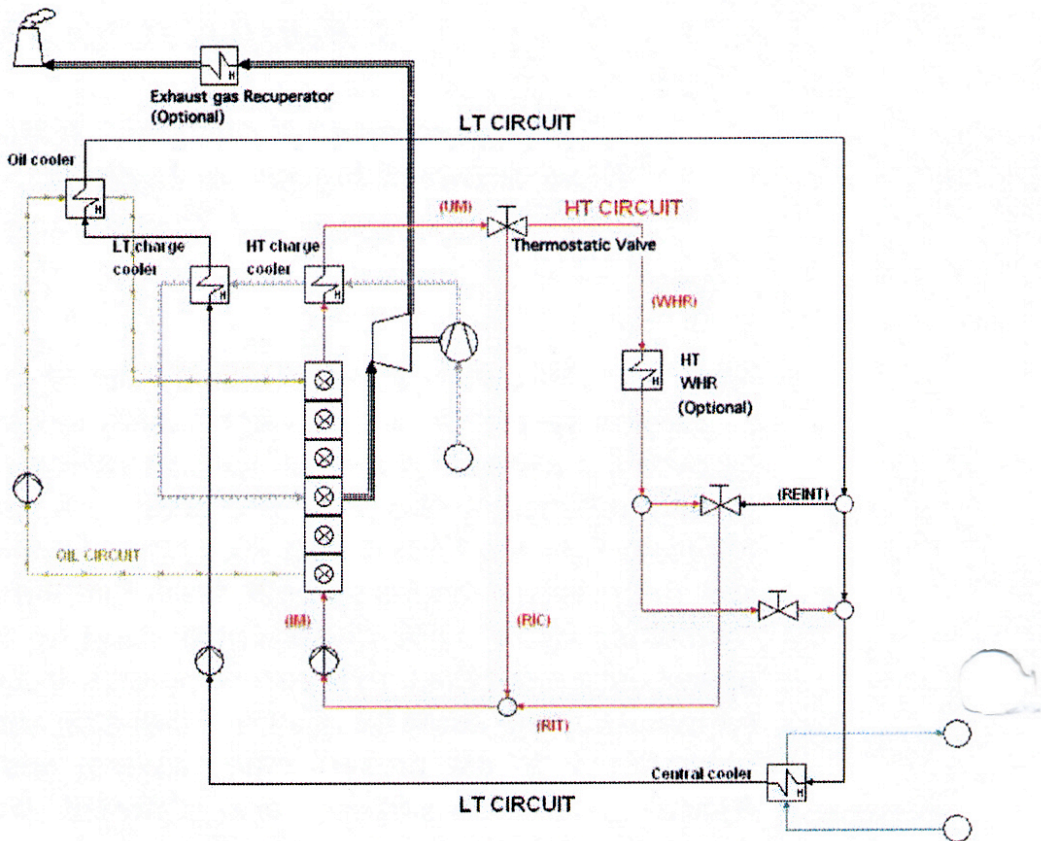
Τα ενεργειακά και εξεργειακά αποθέματα των δύο ρευμάτων αποτυπώνονται στο σχήμα 4.2. Λαμβάνοντας υπόψη τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, μπορεί να συναχθεί ότι το ποσό του έργου που μπορεί να ληφθεί ιδανικά από τα απορριπτόμενα καυσαέρια (αέριας μορφής) είναι τρεις φορές μεγαλύτερο από το ποσό του έργου που θα παίρναμε από το κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας (υγρής μορφής), ακόμη και αν το ποσό της ενέργειας που απορρίπτεται από τη μηχανή είναι ισόποσα μοιρασμένα μεταξύ των θερμικών πηγών.





Σχήμα 4.2: Ενέργεια (A) και Εξέργεια (B) στο μέγιστο φορτίο μηχανής [15]

Συμπερασματικά, η βελτιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας πρέπει να επικεντρωθεί περισσότερο στο ρεύμα των απορριπτόμενων καυσαερίων. Για να δούμε την πιθανότητα της ανάκτησης θερμότητας, είναι αναγκαία μία σύντομη περιγραφή του κυκλώματος ψύξης και του κυκλώματος απόρριψης των καυσαερίων. (σχήμα4.3)



Σχήμα 4.3: Απλουστευμένο σχέδιο των κυκλωμάτων ψύξης και των καυσαερίων [15]

Το κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας περνάει από τη μηχανή και ψύχει τις κεφαλές των κυλίνδρων και την πρώτη βαθμίδα του αεροψυκτήρα, ενώ το κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας ψύχει τη δεύτερη βαθμίδα του αεροψυκτήρα και μετά το λιπαντικό λάδι. Ο έλεγχος του κυκλώματος υψηλής θερμοκρασίας βασίζεται στην

θερμοκρασία του νερού που φεύγει από τη μηχανή. Μία θερμοστατική βαλβίδα τριών θέσεων επανακυκλοφορεί μέρος της ροής για να διατηρήσει την θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού στα σωστά επίπεδα. Το φρέσκο νερό ψύχεται αργότερα σε ένα κεντρικό ψύκτη με θαλασσινό νερό. Ένας εναλλάκτης θερμότητας (HT WHR) επιτρέπει την ανάκτηση της θερμικής ενέργειας από το κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας. Ο σκοπός της ανάκτησης είναι να επιτρέψει την μέγιστη παραγωγή ισχύος από τον κάτω κύκλο χωρίς να εμποδίζεται η σωστή λειτουργία του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας.

Για να μεγιστοποιήσουμε την ανάκτηση θερμότητας από το ψυκτικό κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας, η εξαγόμενη θερμική ισχύ πρέπει να είναι ίση με την θερμική ισχύ της μηχανής σε οποιοδήποτε φορτίο δουλεύει η μηχανή.

#### **4.2.2 Σκοπιμότητα ανάκτησης ενέργειας με τεχνολογία ORC**

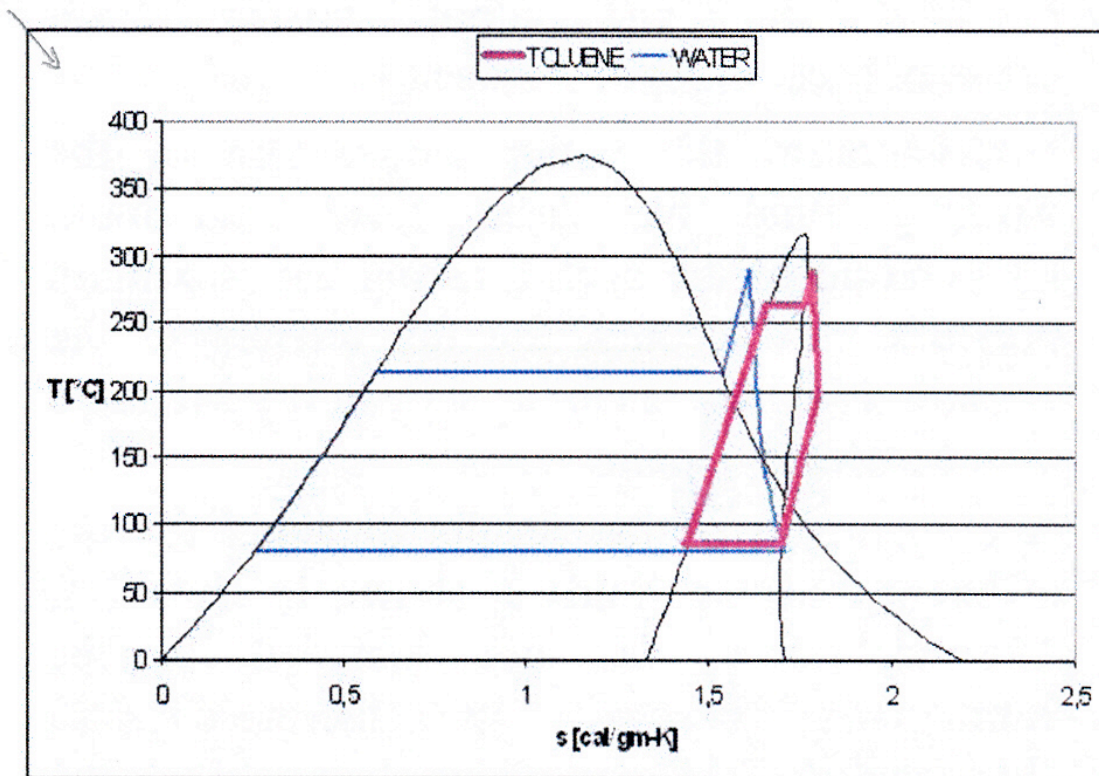
Σε εγκαταστάσεις, όπως αυτής που έγινε περιγραφή παραπάνω, η χρήση οργανικών μέσων στον κύκλο του Rankine φαίνεται μία ιδανική τεχνολογία. Πολλές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας έχουν γίνει σε επίγειες εγκαταστάσεις, όπως εγκαταστάσεις καύσης βιομάζας, εκμετάλλευσης ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας [36],[37],[38]. Πρόσφατα, έρευνες έχουν διεξαχθεί στην πιθανή εφαρμογή οργανικών κύκλων Rankine σε ντιζελομηχανές [23],[39], ωστόσο δεν υπάρχει καμία εφαρμογή ORC σε πλοία.

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να μελετηθεί ο διβάθμιος κύκλος Rankine με τη βοήθεια δεδομένων από τη σύζευξή του με την μηχανή Wartsila 6L50 DF. Η μελέτη ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- Μελέτη διαφόρων παραλλαγών κύκλου Rankine
- Ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του κύκλου
- Επιλογή Θερμικού Μέσου
- Σύγκριση μεταξύ τους

### 4.3 Θερμικό Μέσο

Η ευκολία χρήσης συστημάτων βασισμένων σε ORC βασίζεται πρωταρχικά στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά που έχουν ορισμένα οργανικά μέσα, συγκρινόμενα με το νερό, όπως μεγαλύτερη μοριακή μάζα, χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία, χαμηλότερη κρίσιμη πίεση, χαμηλότερη ενθαλπία συμπύκνωσης και χαμηλότερη θερμοκρασία στερεοποίησης [40],[41]. Για να φανεί καλύτερα η διαφορά, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα T-S για τη σύγκριση του νερού και ενός οργανικού μέσου (πχ. τολουένιο):



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα T-S για το νερό και το τολουένιο [15]

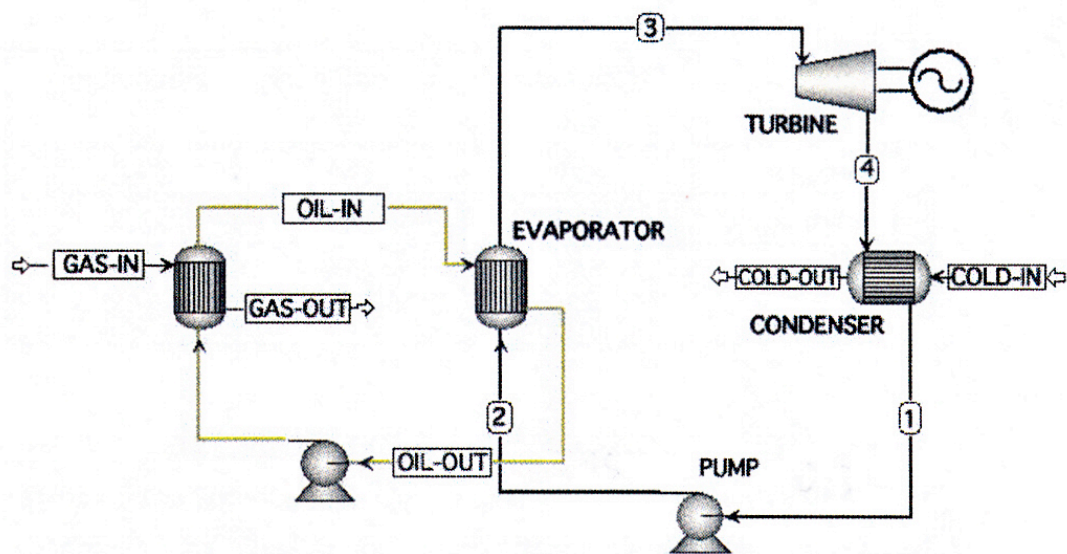
Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι ο κύκλος του νερού έχει συγκεκριμένο έργο ανά μονάδα μάζας, ο οποίος είναι μεγαλύτερος από τον κύκλο του τολουένιου και συγκεκριμένα είναι 4,5 φορές μεγαλύτερο το εμβαδόν του κύκλου του νερού από τον αντίστοιχο του τολουένιου. Το χαρακτηριστικό που καθιστά το νερό ακατάλληλο, για εφαρμογές μικρού μεγέθους που χαρακτηρίζονται από χαμηλές μέγιστες θερμοκρασίες κύκλου, είναι η μεγάλη εντροπία εξάτμισής του σε σύγκριση με την αντίστοιχη των οργανικών μέσων.

Έτσι, καταλήγουμε ότι με ένα οργανικό κύκλο Rankine είναι δυνατόν να λειτουργήσουμε με μεγαλύτερους ρυθμούς ροής και χαμηλότερες πιέσεις εκτόνωσης,



επιτυγχάνοντας ισχύ εξόδου μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενός κύκλου που λειτουργεί με νερό/ατμό.

Στη παρούσα μελέτη θα γίνει σύγκριση έξι διαφορετικών οργανικών μέσων που ήδη έχουν βρει αξιόλογη εφαρμογή σε διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις ORC [42], [43]. Αυτά είναι τα ακόλουθα: το ισοπεντάνιο, το methylsiloxane (MDM), το νεοπεντάνιο, το πεντάνιο, το R245fa και το τολουένιο. Η συμπεριφορά τους θα μελετηθεί τόσο για τον απλό κύκλο Rankine (σχήμα 4.5) και τις παραλλαγές του όσο και για τον διβάθμιο κύκλο Rankine. Για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί θερμικό έλαιο για την εναλλαγή της θερμότητας μεταξύ των καυσαερίων και του κύκλου.



Σχήμα 4.5: Δομικά στοιχεία απλού κύκλου Rankine [15]

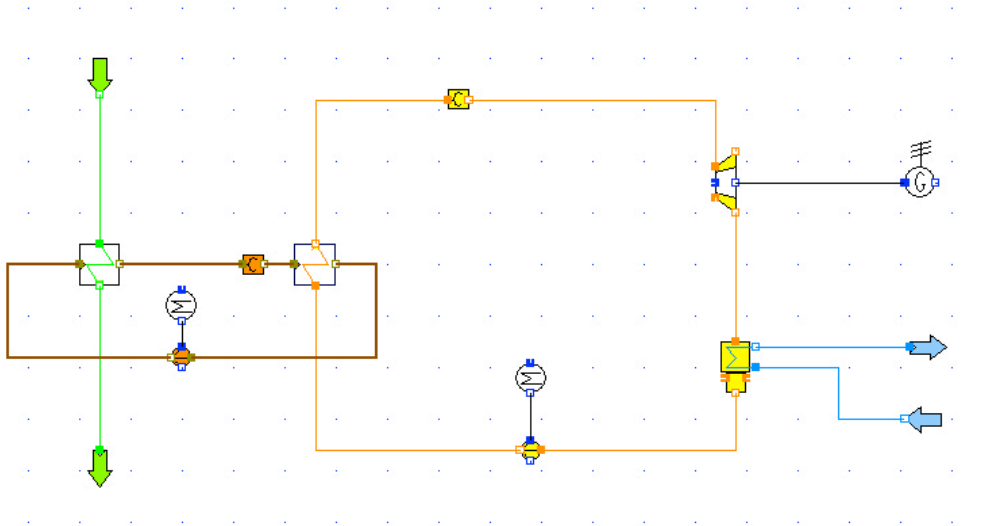
Τα παρακάτω λειτουργικά χαρακτηριστικά έχουν χρησιμοποιηθεί για όλα τα θερμικά μέσα, έχοντας πάντα υπόψιν ότι η ανάκτηση ενέργειας γίνεται μόνο από τα απορριπτόμενα καυσαέρια [35]:

- Θερμοκρασία ζεστής πηγής (θερμικό έλαιο): 350° C
- Ρυθμός ροής μάζας ζεστής πηγής (θερμικό έλαιο): 5 kg/s
- Θερμοκρασία ατμοποίησης: 250° C
- Μέγιστη πίεση: 15 bar
- Πίεση συμπύκνωσης: 0,3 bar
- Θερμοκρασία ψυχρού ρεύματος στον συμπυκνωτή: 38° C
- Ρυθμός ροής θερμικού μέσου: 3 kg/s

Ο υπολογισμός των κύκλων έγινε με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος IPSEpro.

#### 4.4 Απλός κύκλος Rankine

Ο απλός κύκλος Rankine που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτός που φαίνεται στο σχήμα 4.5:

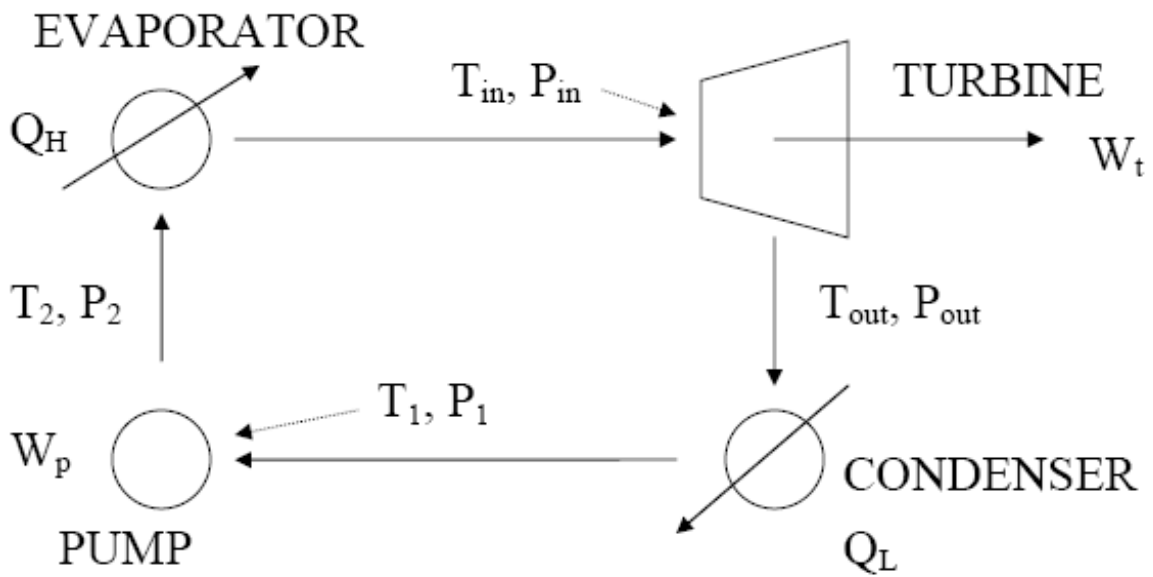


Σχήμα 4.5: Ο απλός κύκλος Rankine όπως σχεδιάστηκε στο IPSEpro [22]

Περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Ατμοποιητής
- Στρόβιλος
- Συμπυκνωτής
- Τροφοδοτική αντλία

Στο σημείο αυτό γίνεται ενεργειακή ανάλυση των επιμέρους συστημάτων. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου κατά την είσοδο και έξοδο από αυτά φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.6:



Σχήμα 4.6: Απλουστευμένη διάταξη απλού κύκλου Rankine [23]

#### 4.4.1 Ατμοποιητής

Όπως προαναφέρθηκε ο ατμοποιητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας και συνήθως αποτελείται από διαφορετικούς διακριτούς τομείς. Η ενεργειακή ανάλυση που θα γίνει θεωρεί τον εναλλάκτη ως ενιαίο στοιχείο. Το ποσό της ενέργειας που αφαιρείται από το θερμικό έλαιο υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$Q_{exh} = \dot{m}_{exh} C_p (T_{exh,in} - T_{exh,out})$$

Όπου:

$Q_{exh}$ : η ενέργεια που εξάγεται από τα καυσαέρια (J/kg)

$\dot{m}_{exh}$ : παροχή θερμικού ελαίου (kg/s)

$C_p$ : ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg °C)

$T_{exh}$ : θερμοκρασία ρευμάτων (°C)

Επιπλέον η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου μετά τον εναλλάκτη πρέπει να είναι συμβατή με το κρίσιμο σημείο του εναλλάκτη (pitch point). Σύμφωνα με αυτή την απαίτηση η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου μετά των εναλλάκτη πρέπει να είναι το λιγότερο  $10^{\circ} C$  υψηλότερη από την θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου στον εναλλάκτη δηλαδή:

$$T_{exh,out} \geq T_2 + 10^{\circ} C$$

όπου  $T_2$  είναι η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου στον εναλλάκτη.

Προφανώς για να διασφαλιστεί η μεταφορά θερμότητας από την θερμή στη κρύα πλευρά του εναλλάκτη, η θερμοκρασία του θερμού ρευστού θα πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτή του κρύου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Όταν η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου είναι μικρή, η συναλλαγή θερμότητας διασφαλίζεται μειώνοντας την πίεση στην τροφοδοτική αντλία του κυκλώματος επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο μικρότερη θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου. Στον ατμοποιητή το θερμικό μέσο μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό και κατευθύνεται για να εισέλθει στον εκτονωτή σε κατάσταση  $T_{a,in}$ ,  $P_{in}$ . Ο ενεργειακός ισολογισμός έχει ως ακολούθως:

$$Q_H = \dot{m}_{wfl} (h_{in} - h_2)$$

Όπου:

$Q_H$ : Ανακτηθείσα θερμική ενέργεια που ανακτάται από το θερμικό έλαιο

$h_{in}, h_2$ : ειδική ενθαλπία του θερμικού μέσου πριν και μετά τον ατμοποιητή (J/kg)

#### 4.4.2 Εκτονωτής

Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται στον εμβολοφόρο εκτονωτή στη χαμηλότερη πίεση  $p_{out}$  και εξέρχεται από αυτόν με θερμοκρασία  $T_{out}$ . Η ισχύς που δίνει ο εκτονωτής  $P_T$  δίδεται από τη σχέση :

$$P_T = \dot{m}_{wfl} (h_{in} - h_{out}) \eta_{is} \eta_{m,T}$$

όπου :

$\eta_{is}$ : ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή

$\eta_{m,T}$ : μηχανικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή

Για τον υπολογισμό της ενθαλπίας εξόδου του εκτονωτή ισχύει η σχέση, η οποία προέρχεται από τον ορισμό του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης:

$$h_{out} = h_{in} - \eta_{is}(h_{in} - h_{is,out})$$

Όπου  $h_{in}$ ,  $h_{out}$  είναι η ειδική ενθαλπία του ατμού στην είσοδο και στην έξοδο του εκτονωτή, ενώ  $h_{is,out}$  είναι η ειδική ενθαλπία του ατμού στην έξοδο του εκτονωτή εάν η μεταβολή ήταν ισεντροπική.

Ένας περιορισμός που εφαρμόζεται στην παρούσα ανάλυση είναι ότι κατά την αποτόνωσή του, το εργαζόμενο μέσο δεν πρέπει να εισέλθει στη διφασική περιοχή. Συγκεκριμένα, σε στρόβιλο δυναμικής ροής ο ατμός στην έξοδό του πρέπει να είναι τουλάχιστον κορεσμένος, ενώ εάν η αποτόνωση γίνει σε εμβολοφόρο εκτονωτή η ξηρότητα του ατμού δεν πρέπει να υπερβαίνει το 95%.

#### 4.4.3 Συμπυκνωτής

Ο υγρός ατμός απορρίπτει την λανθάνουσα θερμότητα στο περιβάλλον διαμέσου του υγρόψυκτου συμπυκνωτή φτάνοντας σε κορεσμένη κατάσταση. Η συμπύκνωση του ατμού πραγματοποιείται κάτω από σταθερή πίεση. Η πίεση του εργαζόμενου μέσου εσωτερικά του συμπυκνωτή είναι ίση με τη χαμηλή πίεση του κύκλου Rankine και η θερμοκρασία του είναι ίση με την αντίστοιχη θερμοκρασία κορεσμού  $T_L$ . Το θερμικό φορτίο του συμπυκνωτή  $Q_{out}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{out} = \dot{m}_{wfl}(h_{out} - h_1)$$

#### 4.4.4 Τροφοδοτική αντλία

Η τροφοδοτική αντλία είναι ο κινητήριος μηχανισμός του συστήματος. Το εργαζόμενο μέσο στην έξοδο του συμπυκνωτή έχει πίεση ίση με  $p_1$  (χαμηλή πίεση κύκλου Rankine) συμπιέζεται στην πίεση  $p_2$  (υψηλή πίεση του κύκλου Rankine) και εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας. Η ισχύς που καταναλώνεται από την τροφοδοτική αντλία  $P_{e,pump}$  για αύξηση της πίεσης από την χαμηλή  $p_1$  στην υψηλή  $p_2$  δίδεται από τη παρακάτω σχέση:

$$P_{e,pump} = \frac{(p_2 - p_1)\dot{m}_{wfl}}{\rho\eta_{pump}}$$

Όπου:

$\rho$  : είναι η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου (σε κατάσταση κορεσμού)

$\eta_{pump}$  : ο αδιαβατικός βαθμός απόδοσης της τροφοδοτικής αντλίας

Η ειδική ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της τροφοδοτικής αντλίας  $h_2$  υπολογίζεται:

$$h_2 = h_1 + \frac{P_{e,pump}}{\dot{m}_{\omega\Gamma}}$$

Όπου:

$h_1$ : η ειδική ενθαλπία του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο της αντλίας.

#### 4.4.5 Συνολικός ενεργειακός ισολογισμός κύκλου Rankine

Η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία της τροφοδοτικής αντλίας προέρχεται από αυτή του εκτονωτή. Έτσι η καθαρή ισχύς εξόδου  $P_{ORC}$  του κύκλου Rankine δίδεται από τη σχέση:

$$P_{ORC} = P_T \cdot \eta_{GT} - \frac{P_{e,pump}}{\eta_{m,p}}$$

Όπου:

$\eta_{m,p}$  : ο βαθμός απόδοσης της αντλίας

$\eta_{GT}$  : ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος που είναι συζευγμένη με τον εκτονωτή.

Τις τιμές των βαθμών αυτών απόδοσης τις θεωρούμε περίπου σταθερές και ίσες με 98%.

Τρέχοντας το πρόγραμμα για τα παραπάνω εργαζόμενα μέσα βγάζουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Ισοπεντάνιο	125	10,1
MDM	97	16,2
Νεοπεντάνιο	82	12,3
Πεντάνιο	250	14,8
R245fa	195	13,1
Τολουένιο	368	18,8

Πίνακας 4.1

Από τη σύγκριση βλέπουμε ότι τα πιο υποσχόμενα εργαζόμενα μέσα είναι το πεντάνιο και το τολουένιο. Έτσι, αποφασίστηκε να αναλυθεί η απόδοση του κύκλου με αυτά τα μέσα σε διαφορετικές συνθήκες, ανεβάζοντας την θερμοκρασία ατμοποίησης στους 290° C και τη μέγιστη πίεση του κύκλου στα 28 bar. Ειδικά για το τολουένιο είναι πιθανόν να μειώσουμε την πίεση συμπύκνωσης στο 0,1 bar, με τη βοήθεια της θερμοκρασίας του κυκλώματος ψύξης. Τα αποτελέσματα στις νέες συνθήκες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Τολουένιο	457	20,4
Πεντάνιο	362	17,1

Πίνακας 4.2

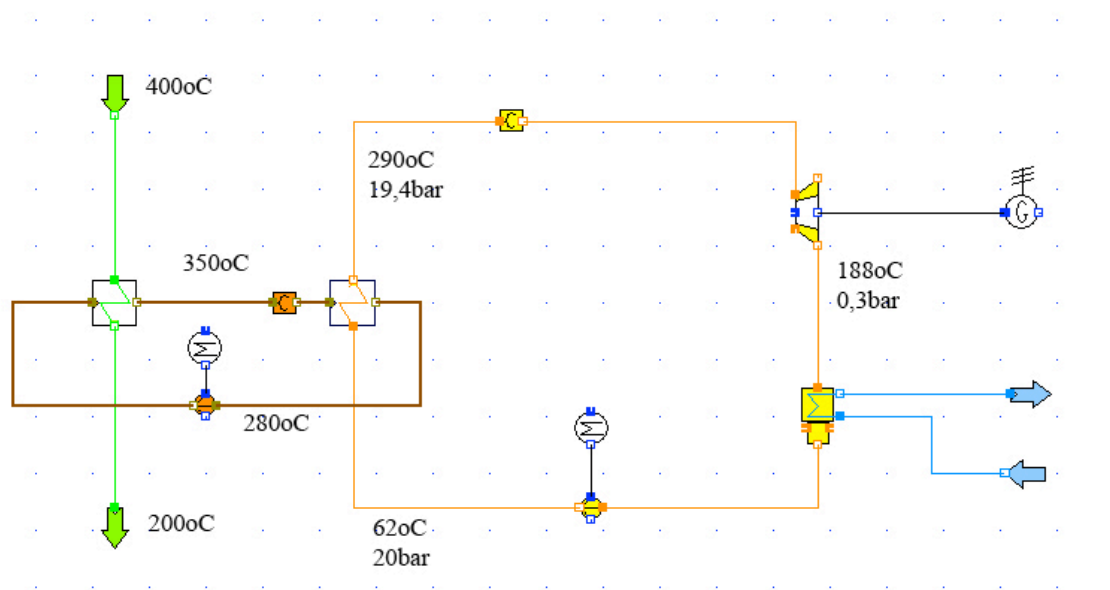
Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι το τολουένιο θα είναι το εργαζόμενο μέσο με την μεγαλύτερη απόδοση ανάμεσα σε όλα όσα εξετάστηκαν. Ειδικά για το τολουένιο είναι εργαστηριακά αποδεδειγμένο ότι έχει καλή αντίσταση στην υποβάθμισή του χρησιμοποιώντας υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 300° C[44]).

Έτσι, αφού αποφασίστηκε η χρήση του τολουενίου σαν εργαζόμενο μέσο, αυξήθηκε ο ρυθμός ροής μάζας στα 3,5 kg/s και έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη ισχύς εξόδου και βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Τολουένιο	501	20

Πίνακας 4.3

Έτσι, βλέπουμε ότι με την αύξηση της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας του κύκλου και του ρυθμού ροής μάζας, παίρνουμε μεγαλύτερη ισχύ εξόδου και καλύτερο βαθμό απόδοσης. Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις σε διάφορα σημεία του κύκλου φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.1

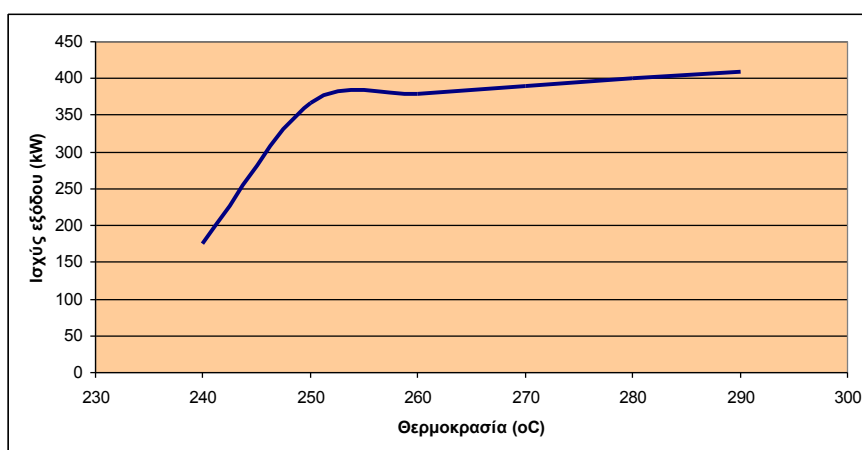
Στη συνέχεια, κρατώντας δύο μεταβλητές σταθερές και αλλάζοντας την τρίτη, προσπαθήσαμε να δούμε την επίδραση της κάθε μεταβλητής στο σύστημα. Έτσι, βγήκαν τα παρακάτω αποτελέσματα.



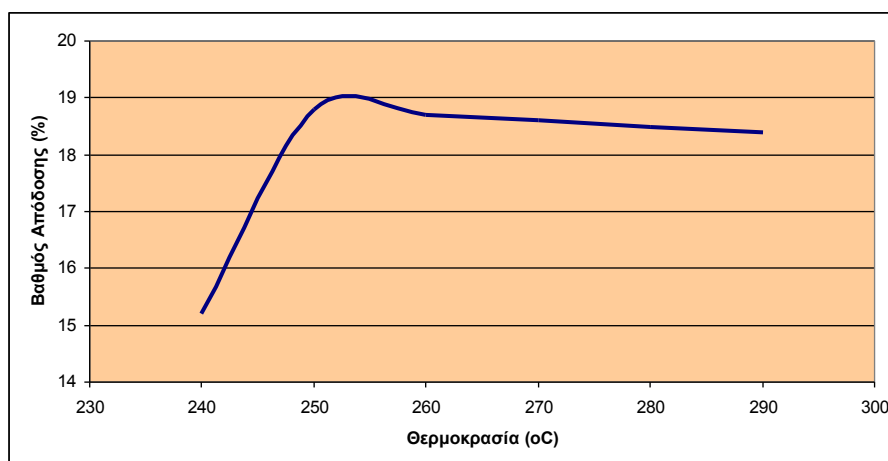
Κρατώντας την μέγιστη πίεση σταθερή στα 15 bar και τον ρυθμό ροής μάζας στα 3 kg/s, αλλάζοντας την θερμοκρασία βγήκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Θερμοκρασία (°C)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
240	176	15,2
250	367	18,8
260	379	18,7
270	389	18,6
280	400	18,5
290	410	18,4

Πίνακας 4.4



Διάγραμμα 4.2

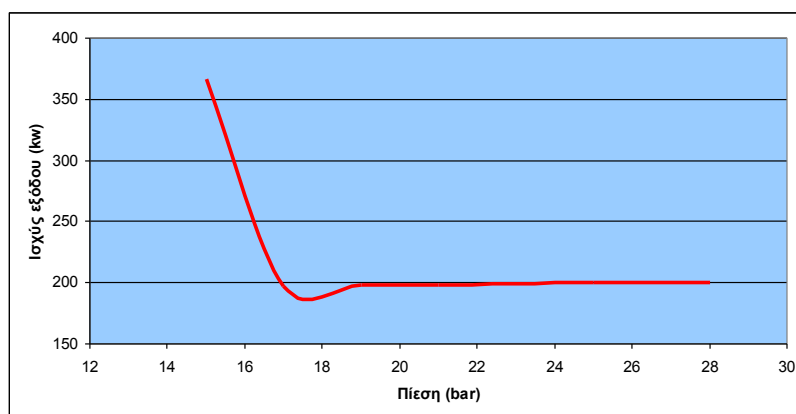


Διάγραμμα 4.3

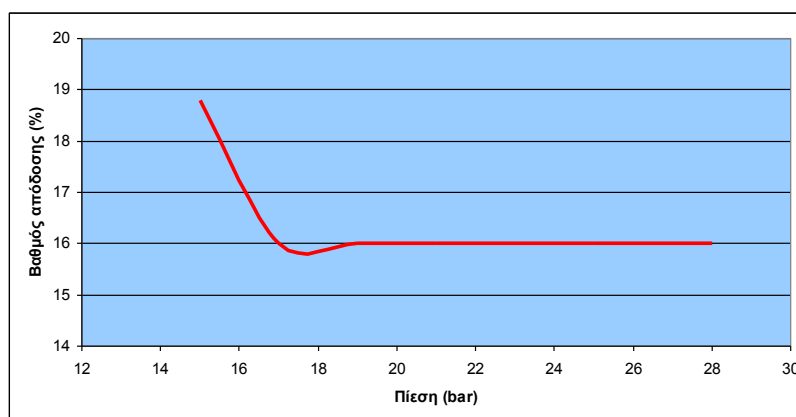
Κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή στους 250° C και τον ρυθμό ροής μάζας στα 3 kg/s, αλλάζοντας την πίεση βγήκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίεση (bar)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
15	367	18,8
17	197	15,8
19	198	16
21	198	16
25	200	16
28	200	16

Πίνακας 4.5



Διάγραμμα 4.4



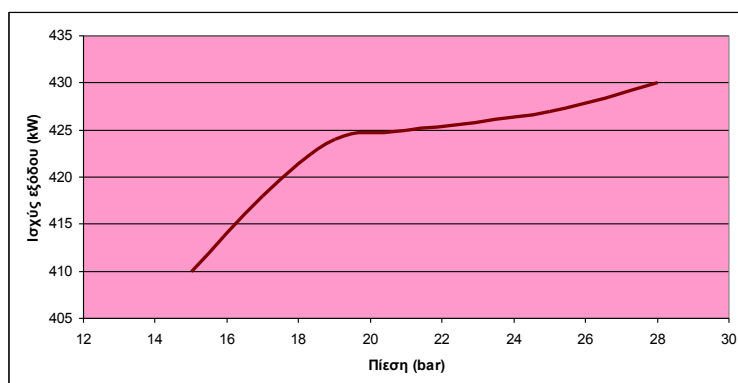
Διάγραμμα 4.5

Στα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε ότι ενώ ο βαθμός απόδοσης είναι σχετικά ικανοποιητικός, η ισχύς εξόδου μειώνεται με την αύξηση της πίεσης.

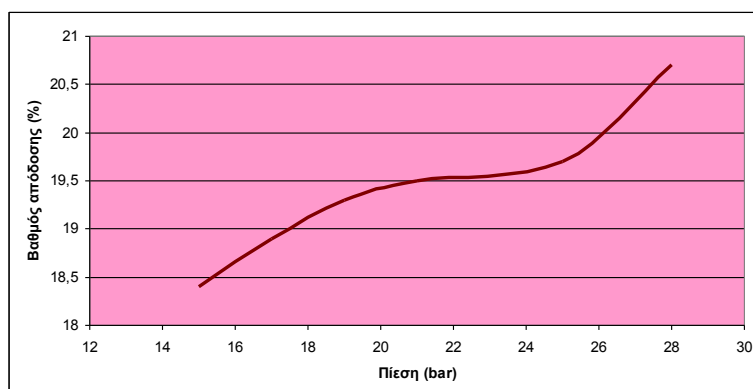
Ξαναδοκιμάζουμε την ίδια διαδικασία, κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή αλλά την αυξάνουμε στους 290° C και ίδιο και για τον ρυθμό ροής μάζας όπου τον αυξάνουμε στα 3,5 kg/s, αλλάζοντας την πίεση. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

Πίεση (bar)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
15	410	18,4
17	418	18,9
19	424	19,3
21	425	19,5
25	427	19,7
28	430	20,7

Πίνακας 4.6



Διάγραμμα 4.6



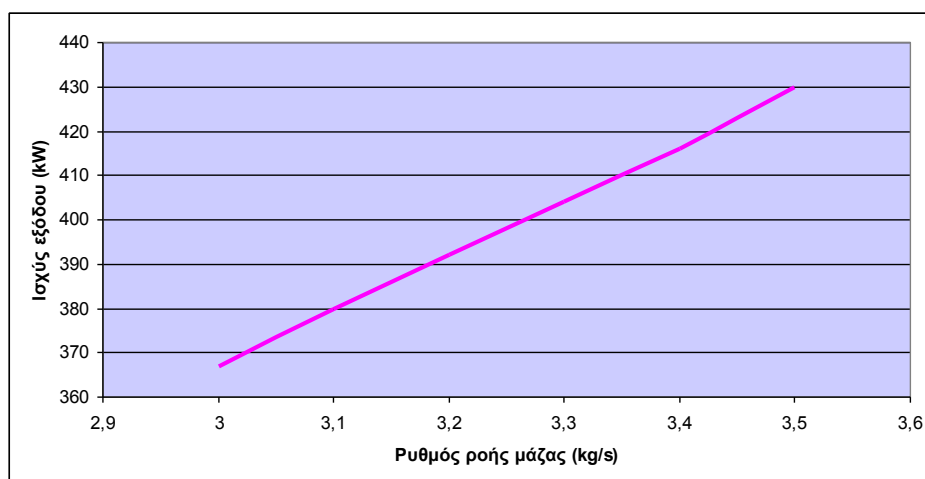
Διάγραμμα 4.7

Σε αυτή την περίπτωση, βλέπουμε ότι με την αύξηση της πίεσης, έχουμε αύξηση τόσο της ισχύος εξόδου, όσο και του βαθμού απόδοσης.

Συνεχίζουμε, κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή στους 250° C και πίεση στα 15 bar, αλλάζοντας τον ρυθμό ροής της μάζας. Έτσι, βγήκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	367	18,8
3,1	380	18,8
3,2	392	18,8
3,3	404	18,8
3,4	416	18,8
3,5	430	18,8

Πίνακας 4.7



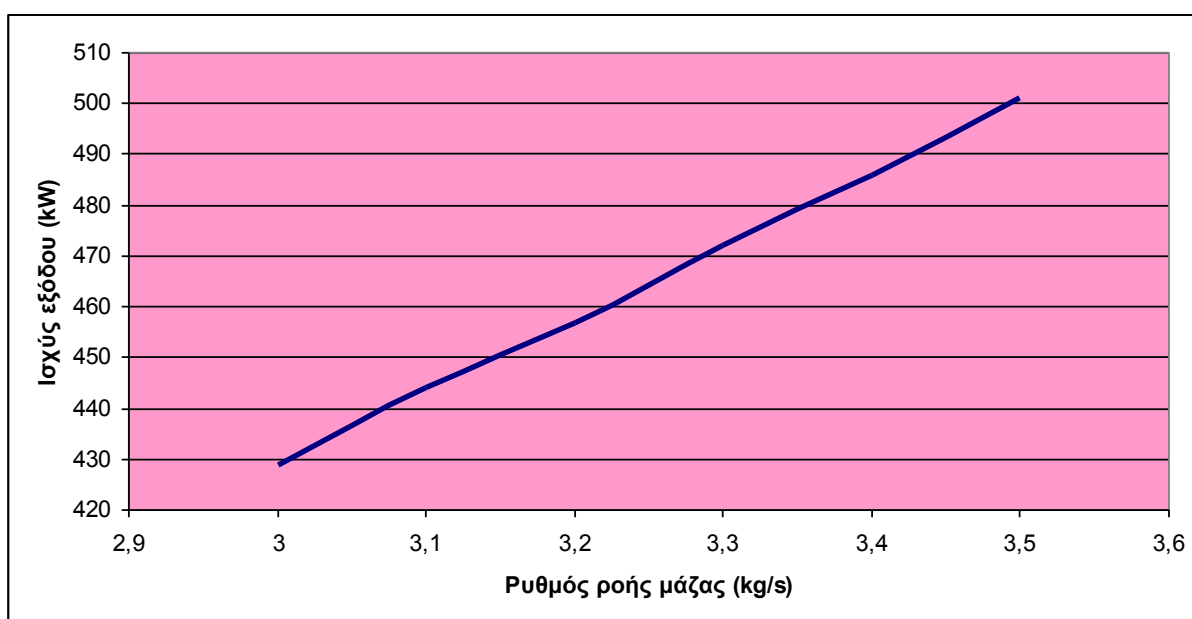
Διάγραμμα 4.8

Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς εξόδου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το ρυθμό ροής μάζας, ενώ ο βαθμός απόδοσης παραμένει σταθερός.

Και σε αυτό το σενάριο θα ξαναδοκιμάσουμε την ίδια διαδικασία, κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή αλλά θα την αυξήσουμε στους 290° C και το ίδιο και για την πίεση όπου θα την αυξήσουμε στα 28 bar, ενώ αλλάζουμε τον ρυθμό ροής μάζας. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	429	20,7
3,1	444	20,7
3,2	457	20,7
3,3	472	20,7
3,4	486	20,7
3,5	501	20,7

Πίνακας 4.8

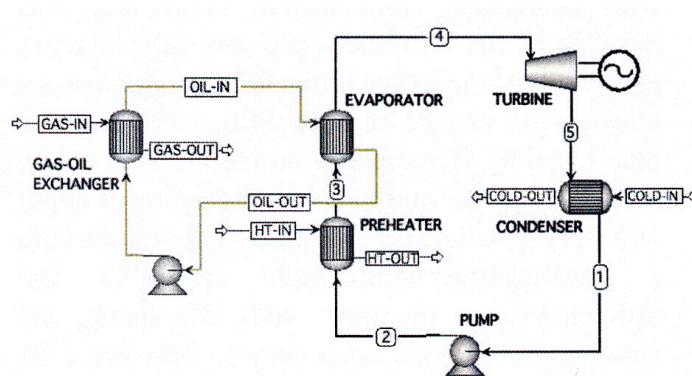


Διάγραμμα 4.9

Σε αυτή την περίπτωση, ο βαθμός απόδοσης παραμένει σταθερός, ωστόσο είναι αυξημένος κατά 2 ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο.

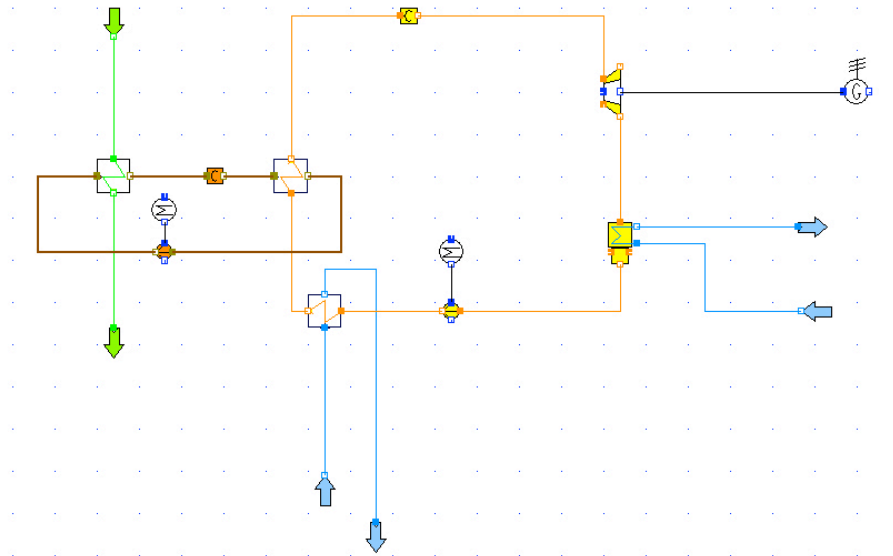
## 4.5 Κύκλος Rankine με προθέρμανση

Μία πρώτη επέμβαση στον αρχικό κύκλο είναι η προσθήκη ενός εναλλάκτη θερμότητας πριν τον ατμοποιητή, ο οποίος θερμαίνει το θερμικό μέσο με τη βοήθεια ενός ρεύματος θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασίας από την οποία βρίσκεται το θερμικό μέσο μετά την έξοδό του από την αντλία. Η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας επιτρέπει είσοδο θερμότητας σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, το οποίο συνεπάγεται λειτουργία του κύκλου με μεγαλύτερο ρυθμό ροής μάζας. Έτσι, αυξάνεται η ισχύς στο στρόβιλο οπότε έχουμε μεγαλύτερο βαθμός απόδοσης από τον απλό κύκλο. Ο κύκλος Rankine με προθέρμανση μαζί με τα στοιχεία που τον αποτελούν, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.7: Δομικά στοιχεία κύκλου Rankine με προθέρμανση [15]

Ο κύκλος όπως εξομοιώθηκε στο IPSEpro φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.8: Ο κύκλος Rankine με προθέρμανση όπως σχεδιάστηκε στο IPSEpro [22]

Ο εναλλάκτης θερμότητας που προστέθηκε στο σύστημα, ονομάζεται προθερμαντήρας και προθερμαίνει το εργαζόμενο μέσο, δηλαδή το τολουένιο, με ρεύμα ζεστού νερού που προέρχεται από κύκλωμα ψύξης υψηλής θερμότητας, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Το νερό έχει θερμοκρασία 91° C και η προθέρμανση είναι χρήσιμη μόνο όταν το εργαζόμενο μέσο βγαίνει από την αντλία με χαμηλότερη θερμοκρασία. Δοκιμάζουμε πάλι όλα τα εργαζόμενα μέσα, ώστε να δούμε τι συμπεριφορά θα έχουν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Ισοπεντάνιο	136	10,3
MDM	102	16,9
Νεοπεντάνιο	89	14,1
Πεντάνιο	268	16,2
R245fa	209	15,5
Τολουένιο	331	17,7

Πίνακας 4.9

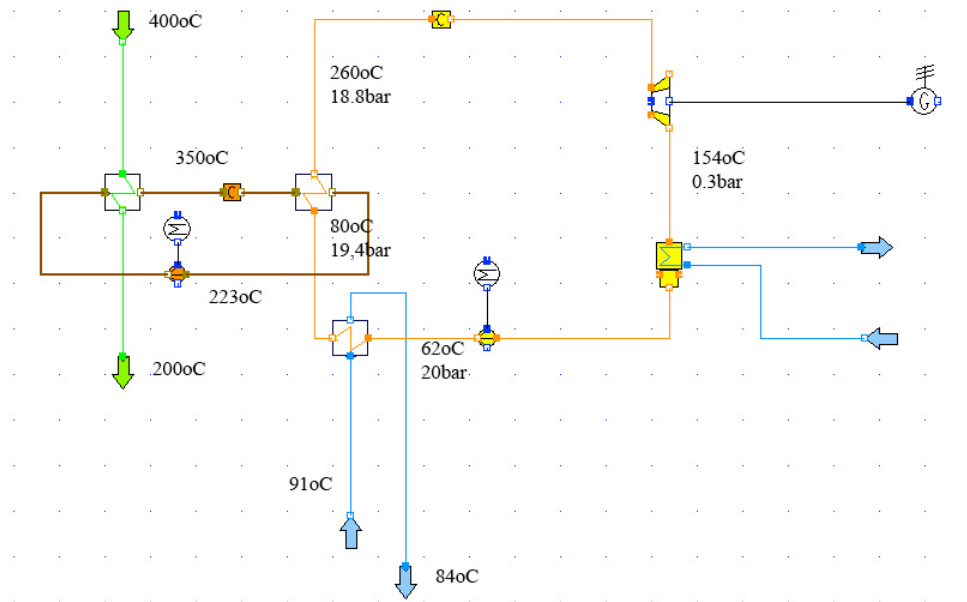
Από τη σύγκριση βλέπουμε ότι η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του απλού κύκλου. Παρατηρούμε ότι το τολουένιο είναι ξανά το εργαζόμενο μέσο που μας δίνει την μεγαλύτερη ισχύ εξόδου και τον καλύτερο βαθμό απόδοσης. Ανεβάζοντας την θερμοκρασία ατμοποίησης στους 260° C, τη μέγιστη πίεση του κύκλου στα 18 bar και το ρυθμό ροής μάζας στα 3,5 kg/s, περιμένουμε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα στις νέες συνθήκες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Τολουένιο	530	21,2

Πίνακας 4.10

Όπως φαίνεται, με τις καινούριες συνθήκες, έχουμε μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, αυξημένη κατά 17% από τις προηγούμενες συνθήκες, γεγονός που το περιμέναμε να συμβεί.

Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις σε διάφορα σημεία του κύκλου φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4.10

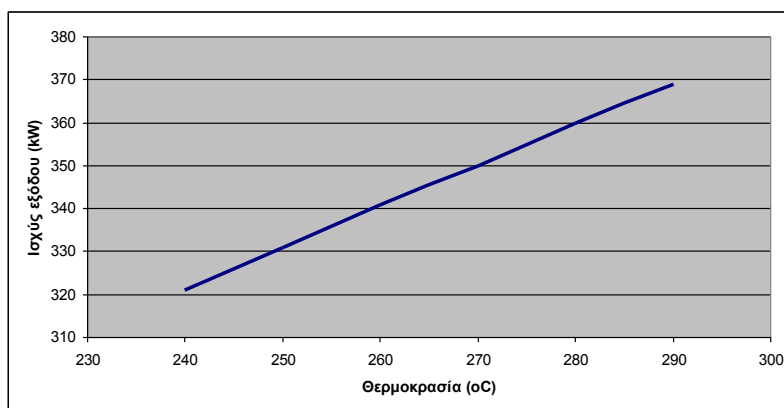
Ακολουθεί παραμετρική ανάλυση του κύκλου, κρατώντας τις δύο μεταβλητές σταθερές και αλλάζοντας την τρίτη, ώστε να μελετήσουμε την επίδραση της κάθε μεταβλητής στο σύστημα.



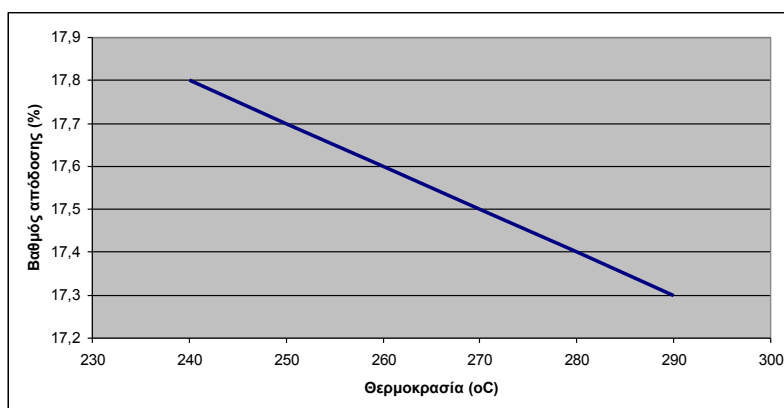
Αρχικά, κρατάμε σταθερή την μέγιστη πίεση του κύκλου στα 15 bar και τον ρυθμό ροής μάζας στα 3 kg/s και αλλάζουμε την θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στο διάγραμμα:

Θερμοκρασία (°C)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
240	321	17,8
250	331	17,7
260	341	17,6
270	350	17,5
280	360	17,4
290	369	17,3

Πίνακας 4.11



Διάγραμμα 4.11



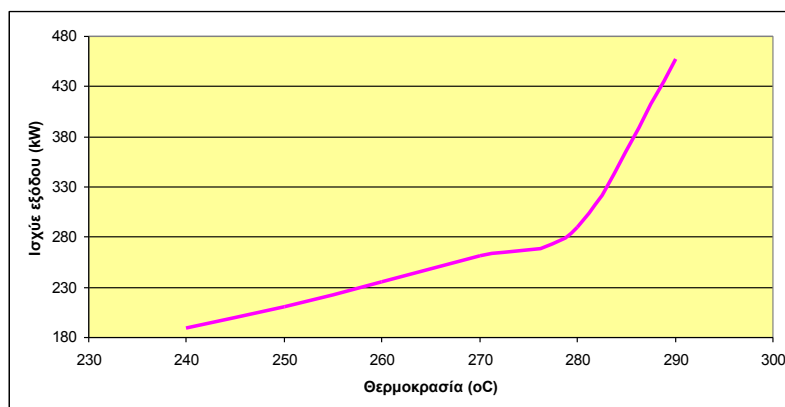
Διάγραμμα 4.12

Από τα αποτελέσματα, βλέπουμε ότι με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, από τη μία αυξάνει η ισχύς εξόδου, αλλά από την άλλη πέφτει ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης.

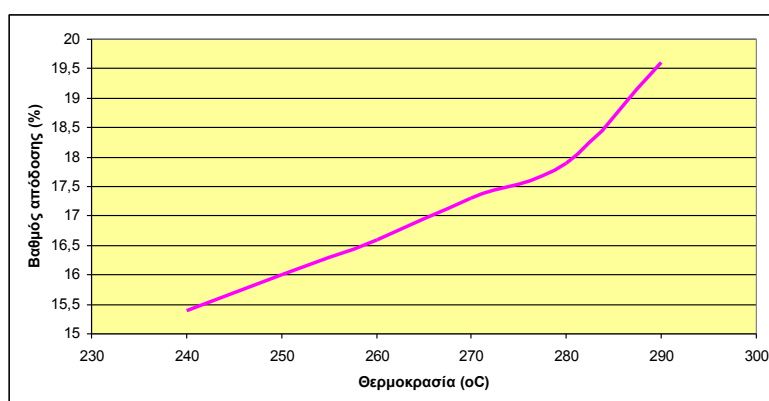
Κρατάμε σταθερή την μέγιστη πίεση του κύκλου αλλά την ανεβάζουμε στα 28 bar και το ίδιο και για τον ρυθμό ροής μάζας που αυξάνεται στα 3,5 kg/s και αλλάζουμε την θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στο διάγραμμα:

Θερμοκρασία (°C)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
240	189	15,4
250	211	16
260	235	16,6
270	261	17,3
280	290	17,9
290	457	19,6

Πίνακας 4.12



Διάγραμμα 4.13



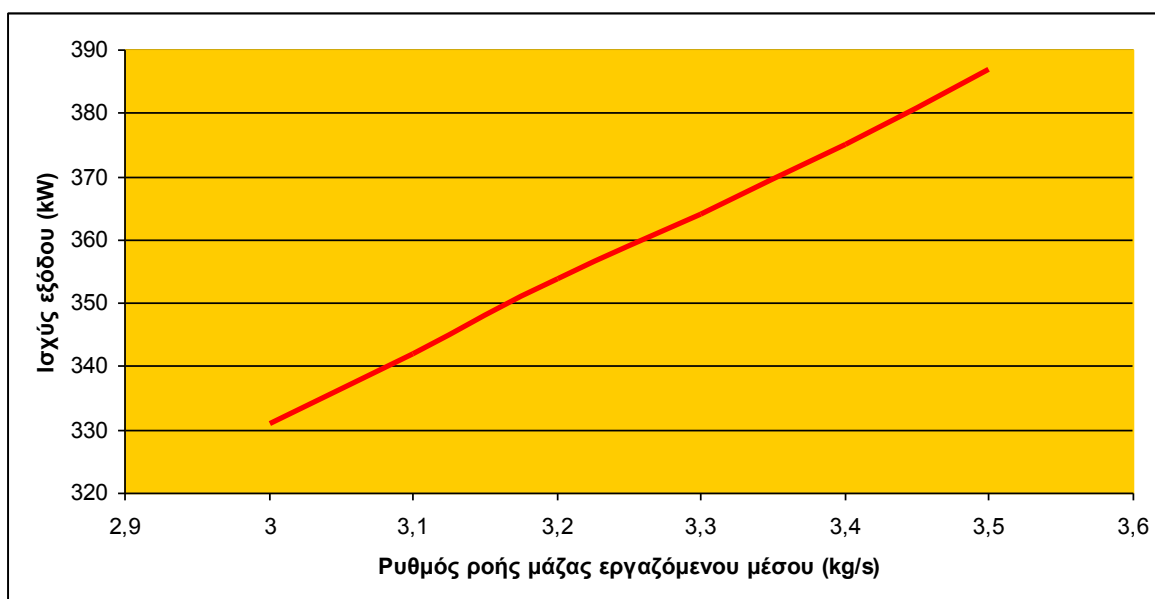
Διάγραμμα 4.14

Με αυτές τις συνθήκες βλέπουμε ότι αυξάνοντας την θερμοκρασία, αυξάνεται και η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης.

Συνεχίζουμε, κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή στους 250° C και πίεση στα 15 bar, αλλάζοντας τον ρυθμό ροής της μάζας. Έτσι, βγήκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	331	17,7
3,1	342	17,7
3,2	354	17,7
3,3	364	17,7
3,4	375	17,7
3,5	387	17,7

Πίνακας 4.13



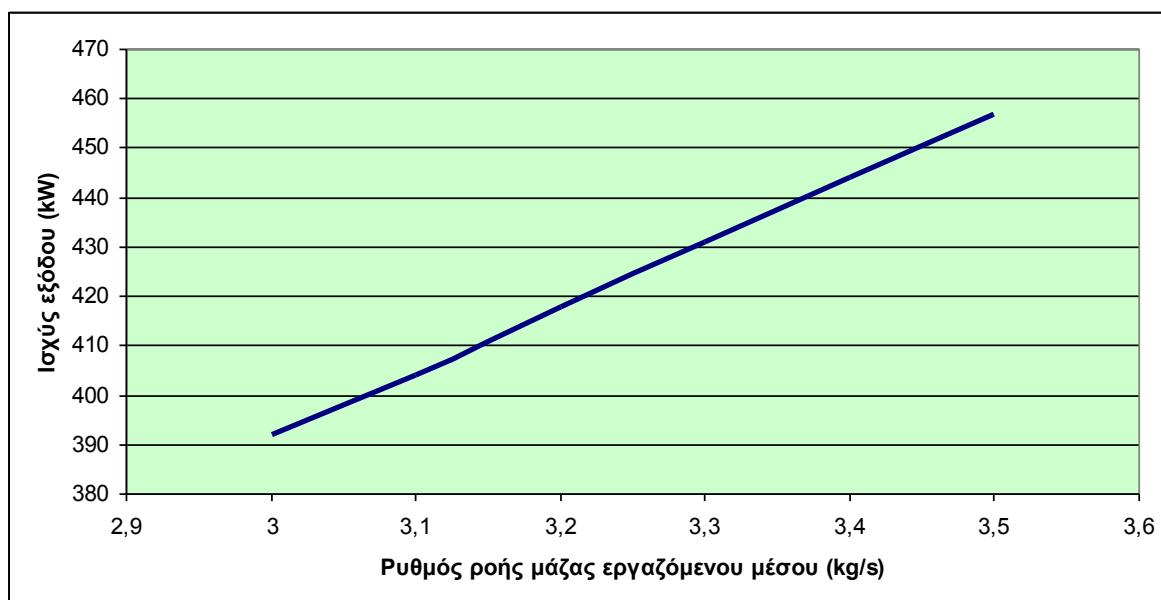
Διάγραμμα 4.15

Σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε αύξηση σχεδόν αναλογική της ισχύος εξόδου αυξάνοντας τον ρυθμό ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου. Αντίθετα, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος της αλλαγής της παροχής μάζας του μέσου.

Συνεχίζουμε, κρατώντας την μέγιστη θερμοκρασία σταθερή αλλά θα την αυξήσουμε στους 290° C και το ίδιο και για την πίεση όπου θα την αυξήσουμε στα 28 bar, ενώ αλλάζουμε τον ρυθμό ροής μάζας. Ακολουθούν τα αποτελέσματα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	392	19,6
3,1	404	19,6
3,2	418	19,6
3,3	431	19,6
3,4	444	19,6
3,5	457	19,6

Πίνακας 4.14



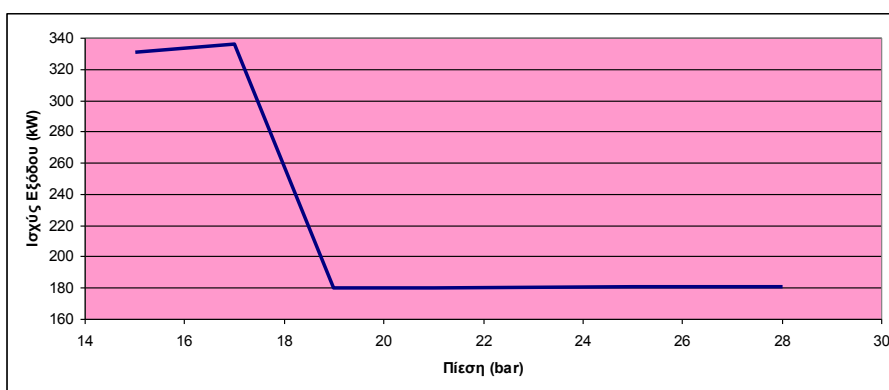
Διάγραμμα 4.16

Εδώ βλέπουμε ότι ξανά αυξάνοντας την παροχή μάζας του μέσου αυξάνεται η ισχύς εξόδου (σχεδόν αναλογικά), ενώ ο βαθμός απόδοσης παραμένει σταθερός. Ωστόσο, να σημειωθεί ότι η αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης στον κύκλο οδήγησε με μεγαλύτερη ισχύ εξόδου για κάθε μία περίπτωση παροχής μάζας.

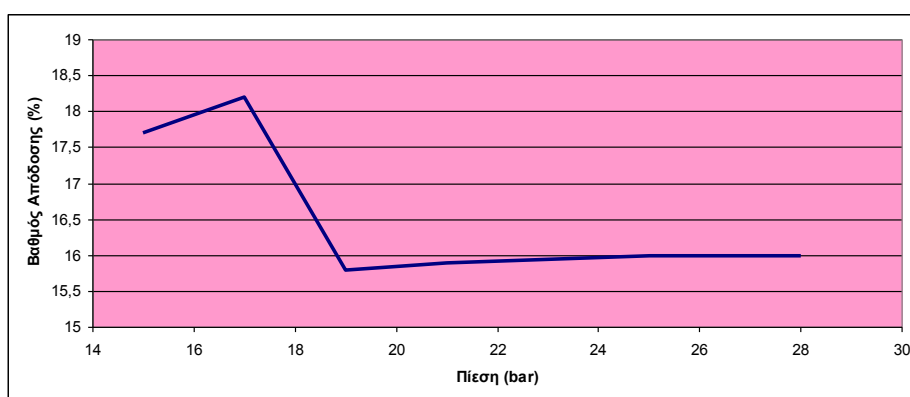
Κρατώντας τώρα την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου σταθερή στους 250° C και τον ρυθμό ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου στα 3 kg/s, αλλάζουμε την τιμή της μέγιστης πίεσης του κύκλου. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίεση (bar)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
15	331	17,7
17	336	18,2
19	170	15,8
21	180	15,9
25	181	16
28	181	16

Πίνακας 4.15



Διάγραμμα 4.17



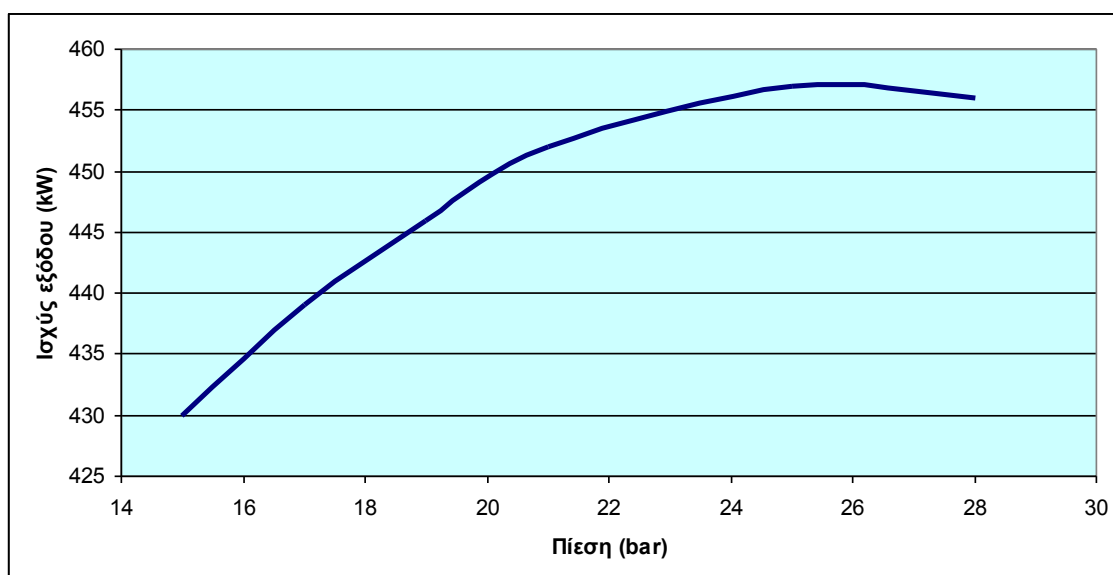
Διάγραμμα 4.18

Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες της ισχύος εξόδου και του βαθμού απόδοσης ακολουθούν την ίδια τάση. Αυξάνοντας την μέγιστη πίεση, βλέπουμε ότι τα παραπάνω μεγέθη στην αρχή αυξάνονται, έπειτα μειώνονται κατακόρυφα και στο τέλος σταθεροποιούνται σε μία τιμή.

Τέλος, κρατάμε σταθερή την μέγιστη θερμοκρασία στους 290° C και τον ρυθμό ροής της μάζας του μέσου στα 3,5 kg/s και αλλάζουμε ξανά την πίεση. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίεση (bar)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
15	430	17,2
17	439	17,8
19	446	18,2
21	452	18,6
25	457	19,2
28	456	19,6

Πίνακας 4.16



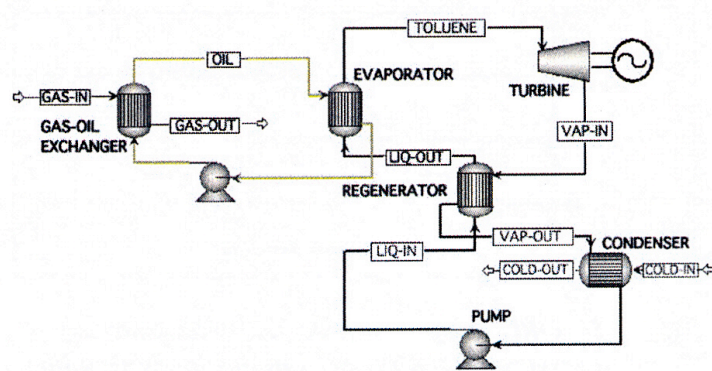
Διάγραμμα 4.19

Σ' αυτό το σενάριο, βλέπουμε ότι με την αύξηση της μέσης πίεσης, αυξάνονται τα άλλα εξαρτώμενα μεγέθη, όχι με τον ίδιο ρυθμό αλλά σχεδόν με την ίδια κλίση.

Στον κύκλο Rankine με προθερμαντήρα βλέπουμε ότι με την αύξηση των μεγεθών λειτουργίας του κύκλου (μέγιστη θερμοκρασία και πίεση, παροχή μάζας), αυξάνεται η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης.

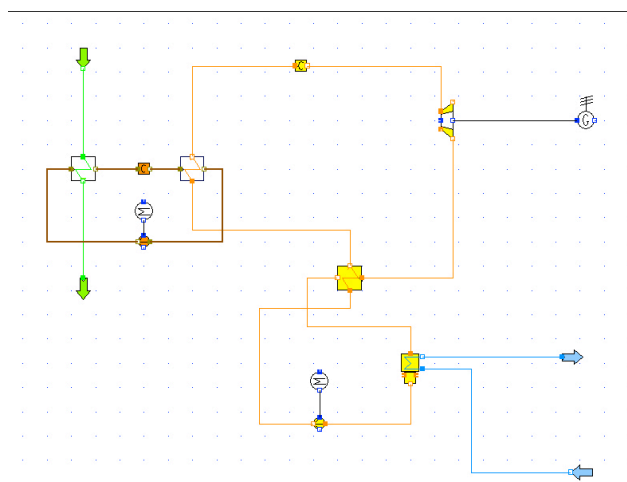
#### 4.6 Κύκλος Rankine με αναγέννηση

Ένας άλλος τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι η εφαρμογή αναγεννητικού κύκλου. Σε πολλές περιπτώσεις ο ατμός που βγαίνει από τον στρόβιλο είναι ακόμη σε υψηλή θερμοκρασία και η διαφορά ενθαλπίας είναι μικρή για να μπορέσει να μπορέσουμε να πάρουμε το μέγιστο δυνατό έργο στο στρόβιλο. Από θερμοδυναμικής άποψης, ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος είναι η προσθήκη ενός αναγεννητή θερμότητας. Ο αναγεννητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, που από τη μία πλευρά διοχετεύεται το ρεύμα του θερμικού μέσου μετά την εκτόνωση του στον στρόβιλο και από την άλλη το ρεύμα του θερμικού μέσου που βγαίνει από την αντλία τροφοδοσίας. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η εσωτερική αναθέρμανση καθιστά πιθανή την λειτουργία του κύκλου με μεγαλύτερο ρυθμό ροής μάζας από τον απλό κύκλο, πράγμα που σημαίνει μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ στον στρόβιλο, άρα και καλύτερο βαθμό απόδοσης από τον απλό κύκλο. Ο κύκλος Rankine με αναγέννηση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.9: Δομικά στοιχεία κύκλου Rankine με αναγέννηση [15]

Ο κύκλος που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό με το πρόγραμμα IPSEpro είναι ο ακόλουθος:



Σχήμα 4.10: Ο κύκλος Rankine με αναγέννηση όπως σχεδιάστηκε στο IPSEpro [22]

Ο εναλλάκτης θερμότητας που προστέθηκε στο σύστημα, ονομάζεται αναγεννητής και προθερμαίνει το εργαζόμενο μέσο, δηλαδή το τολουένιο, με ρεύμα ζεστού νερού που προέρχεται από την έξοδο της τροφοδοτικής αντλίας, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Δοκιμάζουμε πάλι όλα τα εργαζόμενα μέσα, ώστε να δούμε τι συμπεριφορά θα έχουν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Ισοπεντάνιο	142	10,5
MDM	106	16,2
Νεοπεντάνιο	85	14,3
Πεντάνιο	231	15,4
R245fa	164	14,4
Τολουένιο	384	16,3

Πίνακας 4.17

Από τη σύγκριση βλέπουμε ότι η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του απλού κύκλου. Παρατηρούμε ότι το τολουένιο είναι ξανά το εργαζόμενο μέσο που μας δίνει την μεγαλύτερη ισχύ εξόδου και τον καλύτερο βαθμό απόδοσης. Ανεβάζοντας την θερμοκρασία ατμοποίησης στους 270° C και το ρυθμό ροής μάζας στα 5 kg/s, περιμένουμε να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα στις νέες συνθήκες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Εργαζόμενο μέσο	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
Τολουένιο	578	23,1

Πίνακας 4.18

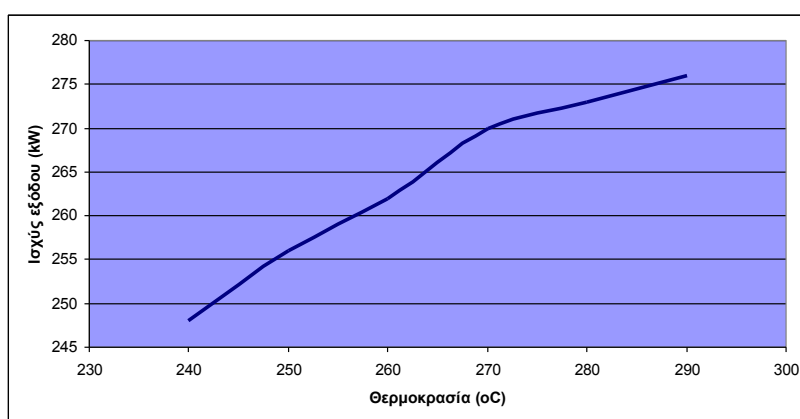
Στη συνέχεια, θα γίνει παραμετρική ανάλυση του κύκλου, προκειμένου να βρεθεί πώς επηρεάζει το κάθε μέγεθος την ισχύ εξόδου και τον βαθμό απόδοσης.



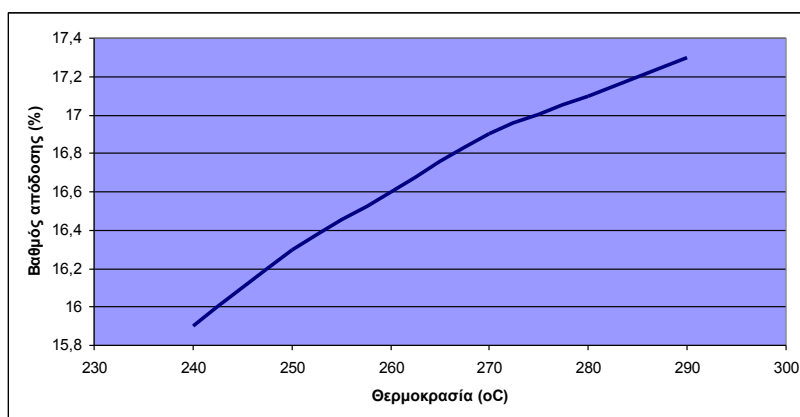
Αρχικά, κρατώντας σταθερή τον ρυθμό ροής της μάζας στα 3 kg/s, μεταβάλλουμε την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου για να βρεθεί η εξάρτησή της με την ισχύ εξόδου και το βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Θερμοκρασία (°C)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
240	248	15,9
250	256	16,3
260	262	16,6
270	270	16,9
280	273	17,1
290	276	17,3

Πίνακας 4.19



Διάγραμμα 4.20



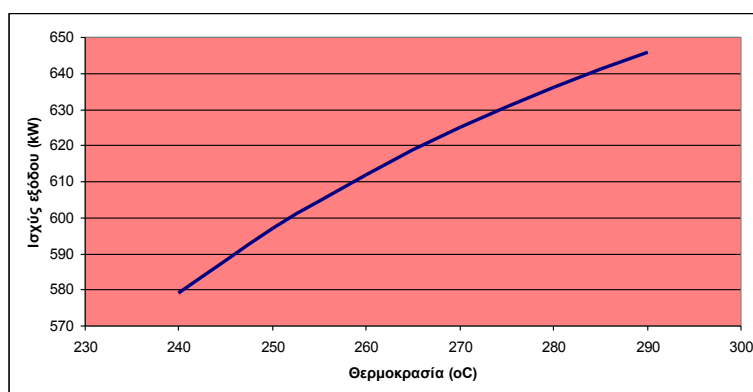
Διάγραμμα 4.21

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, αυξάνεται σχεδόν αναλογικά και η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης. Ωστόσο, η συνολική αύξηση των επιμέρους μεγεθών δεν είναι τόσο μεγάλη όσο θα περιμέναμε.

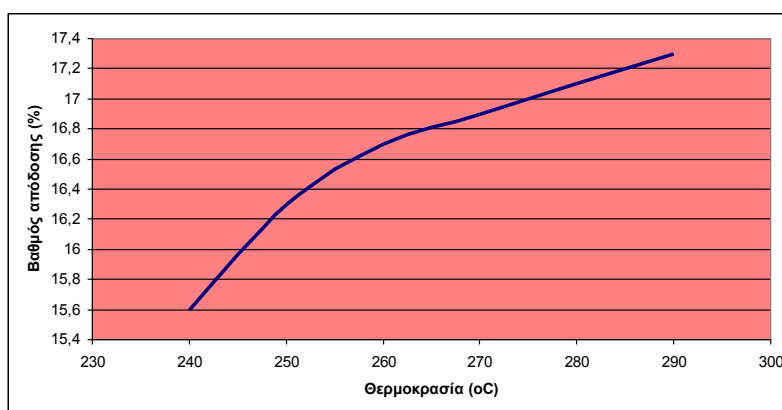
Συνεχίζουμε, κρατώντας πάλι την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου σταθερή, ωστόσο τώρα την αυξάνουμε στα 7 kg/s και μεταβάλλουμε την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Θερμοκρασία (°C)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
240	579	15,6
250	597	16,3
260	612	16,7
270	625	16,9
280	636	17,1
290	646	17,3

Πίνακας 4.20



Διάγραμμα 4.22



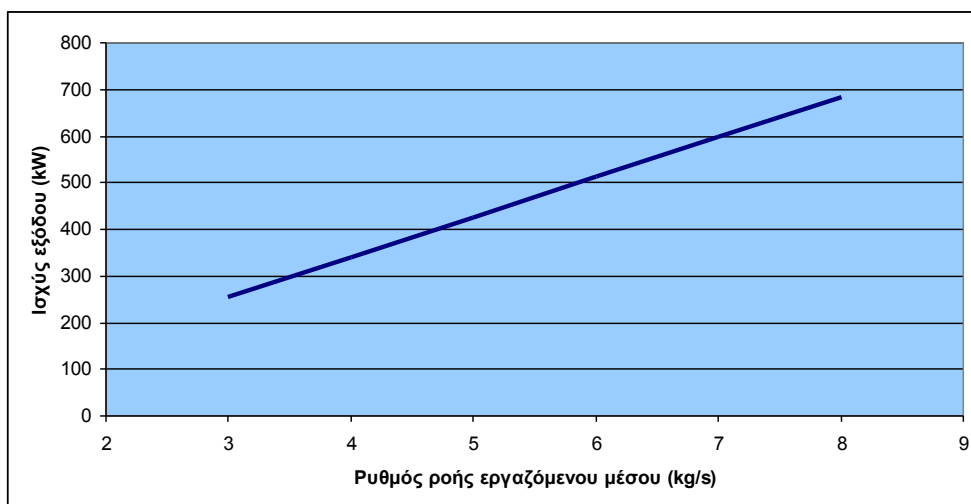
Διάγραμμα 4.23

Και σε αυτή την περίπτωση, βλέπουμε ότι αυξάνοντας την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου αυξάνεται και η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσης. Ωστόσο, φαίνεται και σε αυτό το σενάριο, ότι η αύξηση των επιμέρους μεγεθών είναι μικρότερη απ' ό τι περιμέναμε.

Συνεχίζοντας, κρατάμε σταθερή την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου στους 250° C και αλλάζουμε την παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου για να δούμε την επίδρασή της στην ισχύ εξόδου και τον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	255	16,3
4	341	16,3
5	426	16,3
6	512	16,3
7	597	16,3
8	682	16,3

Πίνακας 4.21



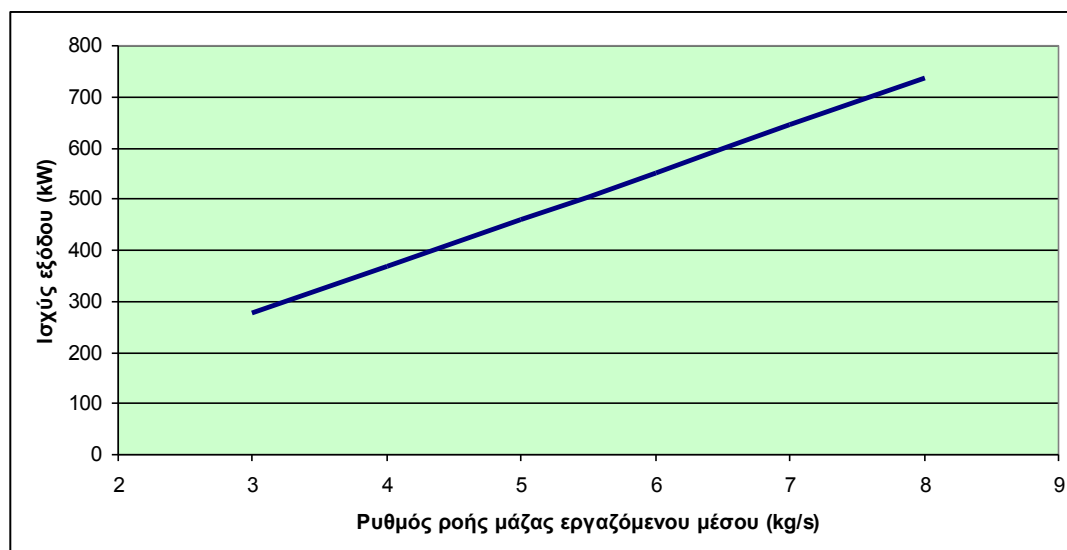
Διάγραμμα 4.24

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, βλέπουμε ότι η αύξηση του ρυθμού ροής της μάζας του εργαζόμενου μέσου οδηγεί στην αύξηση της ισχύος εξόδου και μάλιστα με αναλογικό τρόπο. Αντίθετα, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου παραμένει σταθερός παρόλη την αλλαγή της παροχής μάζας.

Τέλος, κρατώντας πάλι σταθερή την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου αλλά αυξάνοντας την στους 290° C και αλλάζοντας την παροχή μάζας του τολουενίου, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης (%)
3	276	17,3
4	368	17,3
5	460	17,3
6	552	17,3
7	646	17,3
8	736	17,3

Πίνακας 4.22



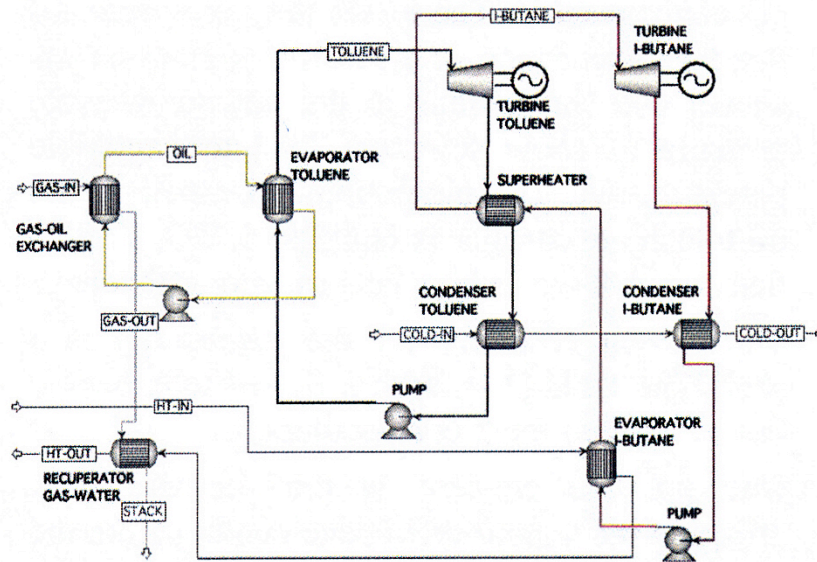
Διάγραμμα 4.25

Παρατηρούμε ότι αυξάνοντας την παροχή μάζας αυξάνεται γραμμικά η ισχύς εξόδου ενώ παραμένει σταθερός ο βαθμός απόδοσης. Ωστόσο, άμα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για τις δύο διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου θα δούμε ότι με μεγαλύτερη θερμοκρασία έχουμε αύξηση των αποτελεσμάτων.

#### 4.7 Διβάθμιος κύκλος Rankine.

Ένας άλλος τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης είναι ο διβάθμιος οργανικός κύκλος Rankine. Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε δύο κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με τον εξής τρόπο: Το θερμικό μέσο του πρώτου κύκλου μετά την έξοδό του από τον στρόβιλο περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας και ζεσταίνει το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου, λειτουργώντας σαν ατμοποιητής για τον δεύτερο κύκλο.

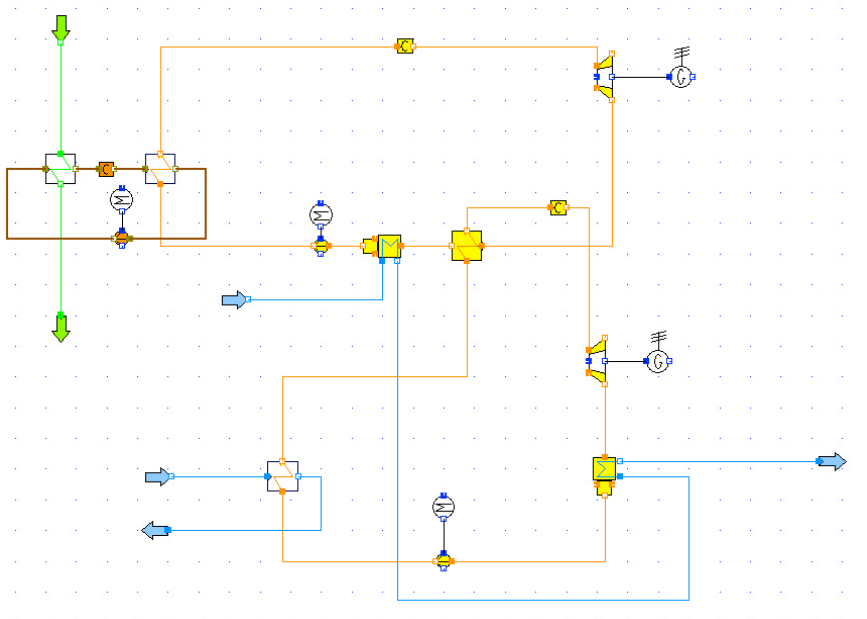
Ο διβάθμιος κύκλος Rankine μπορεί να λειτουργήσει και με διαφορετικό τρόπο. Το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου έχει ξεχωριστό ατμοποιητή και ο εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των κύκλων λειτουργεί σαν υπερθερμαντής για τον δεύτερο κύκλο. Έτσι, το θερμικό μέσο του δεύτερου κύκλου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία και ενθαλπία στην είσοδο του στροβίλου, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της ισχύος του δεύτερου κύκλου. Κάθε περίπτωση εξαρτάται από το είδος της εισερχόμενης θερμότητας και την χρήση που έχει ο κύκλος. Κάθε βαθμίδα μπορεί να έχει διαφορετικό θερμικό μέσο για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι η μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη της μέγιστης θερμοκρασίας του κάτω κύκλου. Ένας διβάθμιος κύκλος Rankine φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.11: Δομικά στοιχεία κύκλου Rankine με αναγέννηση [15]

Ο διβάθμιος κύκλος Rankine που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα υπολογισμού IPSEPro είναι αυτός που φαίνεται στο σχήμα. Ο κύκλος που μελετήθηκε έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ο ατμοποιητής του πάνω κύκλου δεν ανακτά θερμότητα απευθείας από τα απορριπτόμενα καυσαέρια. Τα καυσαέρια οδηγούνται σε έναν άλλο εναλλάκτη θερμότητας και ζεσταίνουν ένα θερμικό έλαιο το οποίο με τη σειρά του περνάει από τον ατμοποιητή του κύκλου μας και ζεσταίνει το εργαζόμενο μέσο του πάνω κύκλου. Η απευθείας ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια αποφεύγεται για λόγους ασφαλείας.
- Ο ατμοποιητής του κάτω κύκλου ανακτά θερμότητα απευθείας από το σύστημα ψύξης υψηλής θερμοκρασίας της ντιζελομηχανής χωρίς την μεσολάβηση κάποιου θερμικού ελαίου. Η παροχή μάζας του νερού ψύξης υψηλής θερμοκρασίας ρυθμίζεται ώστε το νερό που επιστρέφει στη μηχανή να διατηρείται σε μία σταθερή θερμοκρασία. Το νερό που φεύγει από τον ατμοποιητή επιστρέφει στην μηχανή. Ωστόσο, η θερμοκρασία του δεν πρέπει να πέσει κάτι από μία συγκεκριμένη τιμή η οποία έχει τεθεί στο σύστημα ελέγχου της μηχανής. Για να αποφευχθεί αυτή η περίπτωση, τοποθετείται επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος με τη βοήθεια των καυσαερίων που βγαίνουν από τον εναλλάκτη καυσαερίου/ελαίου, θερμαίνει το νερό στην θερμοκρασία που επιθυμούμε.
- Ο εναλλάκτης θερμότητας ανάμεσα στους δύο κύκλους επιτρέπει την μεταφορά θερμότητας από τον πάνω κύκλο στον κάτω, λειτουργώντας σαν ατμοποιητής για τον κάτω κύκλο.



Σχήμα 4.12: Ο κύκλος Rankine με αναγέννηση όπως σχεδιάστηκε στο IPSEpro [22]

Στην περίπτωση του διβάθμιου κύκλου Rankine, έπρεπε να εξεταστούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί μεταξύ των εργαζόμενων μέσων. Οι συνθήκες στις οποίες λειτουργούσαν οι κύκλοι είναι οι ίδιες που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Αφού βρούμε το κατάλληλο ζευγάρι εργαζόμενο μέσων, θα γίνει μία παραμετρική ανάλυση για την βελτιστοποίηση του κύκλου. Όπου αναφέρεται ο αριθμός 1 αφορά τον πάνω κύκλο και όπου αναφέρεται ο αριθμός 2 αφορά τον κάτω κύκλο. Όπου δεν ήταν δυνατή η ολοκλήρωση των υπολογισμών έχει μπει μια παύλα. Τα αποτελέσματα που βγήκαν από τον υπολογισμό του κύκλου στο IPSEpro είναι τα παρακάτω:

<b>Ολική Ισχύς εξόδου (kw)</b>						
Εργαζόμενο μέσο 1	Ισοπεντάνιο	MDM	Νεοπεντάνιο	Πεντάνιο	R245fa	Τολουένιο
Εργαζόμενο μέσο 2						
Ισοπεντάνιο	-	-	268	353	-	303
MDM	-	-	-	-	-	-
Νεοπεντάνιο	-	-	289	375	-	425
Πεντάνιο	-	-	261	346	-	297
R245fa	-	-	-	-	-	-
Τολουένιο	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.23

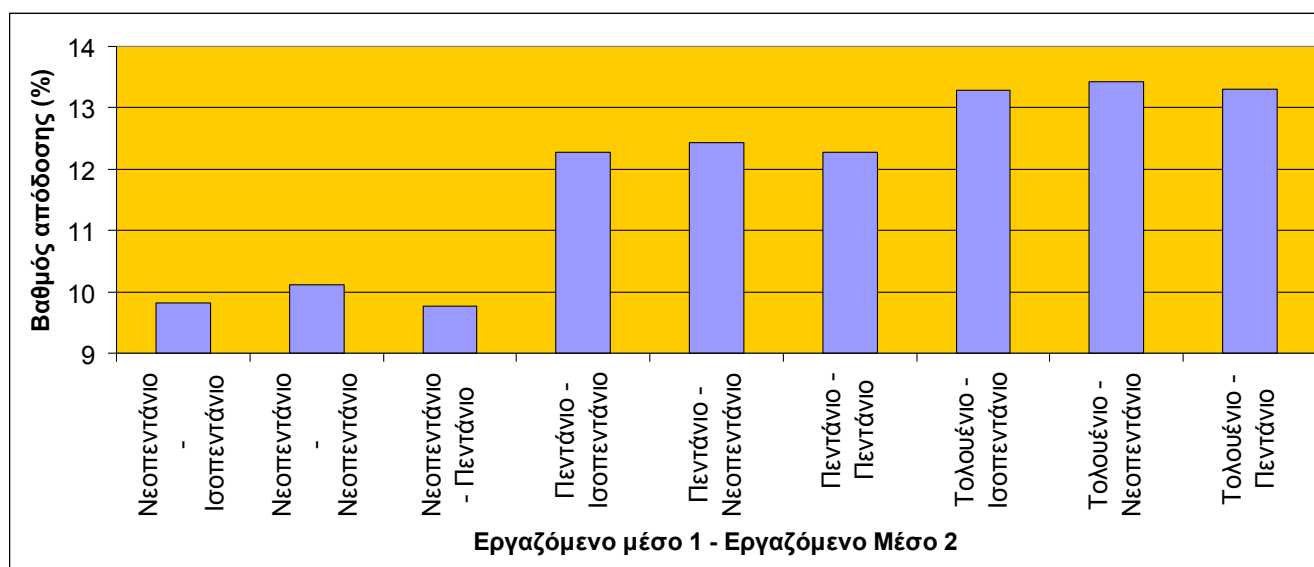
<b>Βαθμός απόδοσης (%)</b>						
Εργαζόμενο μέσο 1	Ισοπεντάνιο	MDM	Νεοπεντάνιο	Πεντάνιο	R245fa	Τολουένιο
Εργαζόμενο μέσο 2						
Ισοπεντάνιο	-	-	9,82	12,28	-	13,28
MDM	-	-	-	-	-	-
Νεοπεντάνιο	-	-	10,11	12,44	-	13,42
Πεντάνιο	-	-	9,77	12,28	-	13,3
R245fa	-	-	-	-	-	-
Τολουένιο	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.24

Άρα τα ζευγάρια που λειτουργούν ομαλά με τον κύκλο είναι τα ακόλουθα:

Εργαζόμενο μέσο 1 - Εργαζόμενο Μέσο 2	Βαθμός απόδοσης (%)
Νεοπεντάνιο - Ισοπεντάνιο	9,82
Νεοπεντάνιο - Νεοπεντάνιο	10,11
Νεοπεντάνιο - Πεντάνιο	9,77
Πεντάνιο - Ισοπεντάνιο	12,28
Πεντάνιο - Νεοπεντάνιο	12,44
Πεντάνιο - Πεντάνιο	12,28
Τολουένιο - Ισοπεντάνιο	13,28
Τολουένιο - Νεοπεντάνιο	13,42
Τολουένιο - Πεντάνιο	13,3

Πίνακας 4.25

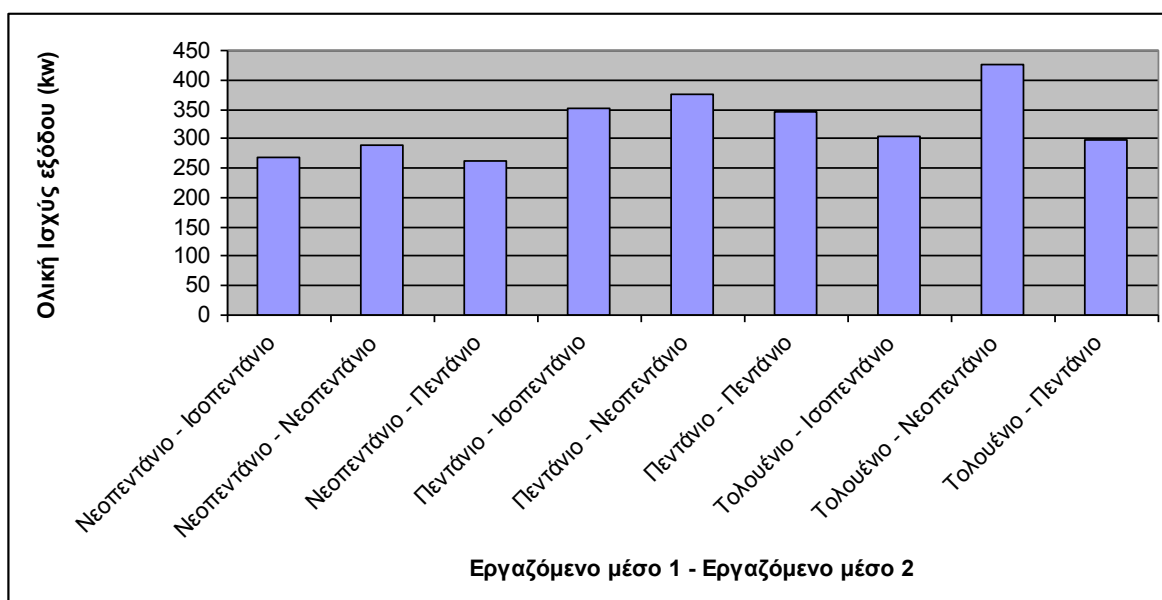


Διάγραμμα 4.25



Εργαζόμενο μέσο 1 - Εργαζόμενο Μέσο 2	Ολική Ισχύς εξόδου (kw)
Νεοπεντάνιο - Ισοπεντάνιο	268
Νεοπεντάνιο - Νεοπεντάνιο	289
Νεοπεντάνιο - Πεντάνιο	261
Πεντάνιο - Ισοπεντάνιο	353
Πεντάνιο - Νεοπεντάνιο	375
Πεντάνιο - Πεντάνιο	346
Τολουένιο - Ισοπεντάνιο	303
Τολουένιο - Νεοπεντάνιο	425
Τολουένιο - Πεντάνιο	297

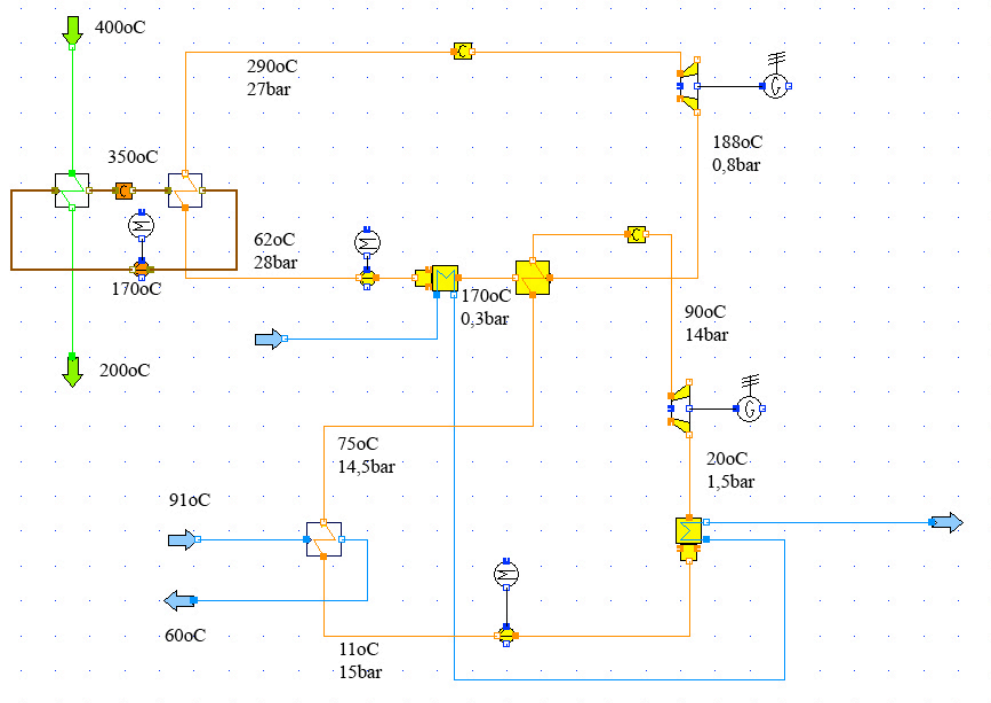
Πίνακας 4.26



Διάγραμμα 4.26

Βλέπουμε ότι το καλύτερο ζεύγος εργαζόμενων μέσων είναι το τολουένιο για τον πάνω κύκλο και το νεοπεντάνιο για τον κάτω κύκλο. Με αυτό το συνδυασμό όχι μόνο επιτύχαμε την μεγαλύτερη ολική ισχύ και τον καλύτερο βαθμό απόδοσης, ξεπεράσαμε και τα αντίστοιχα νούμερα του απλού κύκλου Rankine.

Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις σε διάφορα σημεία του κύκλου φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



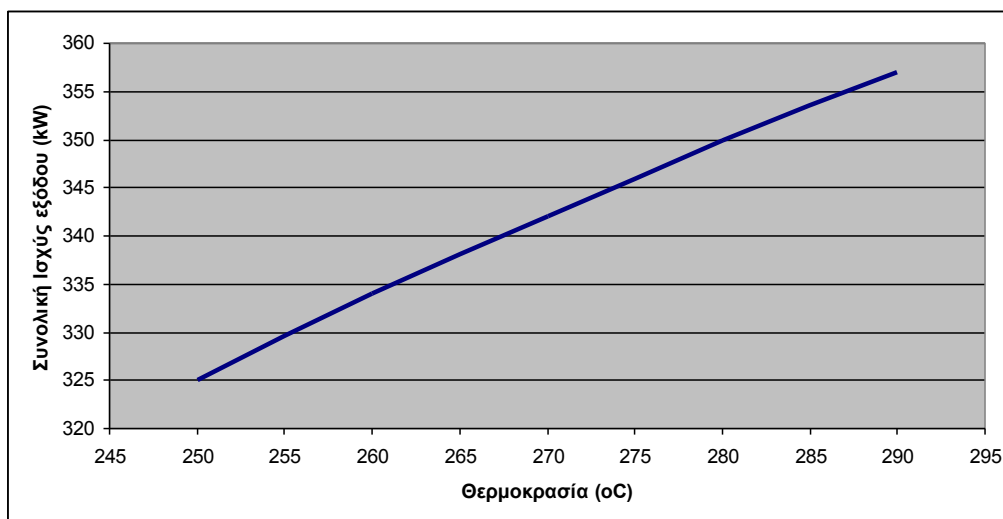
Διάγραμμα 4.27

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βελτιστοποιήσουμε τον κύκλο και να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό βαθμό απόδοσης και την μεγαλύτερη δυνατή ισχύ.

Αρχικά, θεωρούμε σταθερή την παροχή μάζας του τολουενίου στα 3 kg/s και την μέγιστη πίεση του πάνω κύκλου στα 15 bar και αλλάζουμε την μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου για να δούμε τι επίδραση έχει στην ολική ισχύ εξόδου και στον βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Θερμοκρασία (οC)	Συνολική Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης κύκλου (%)
250	325	18,2
260	334	18,2
270	342	18,3
280	350	18,3
290	357	18,3

Πίνακας 4.27



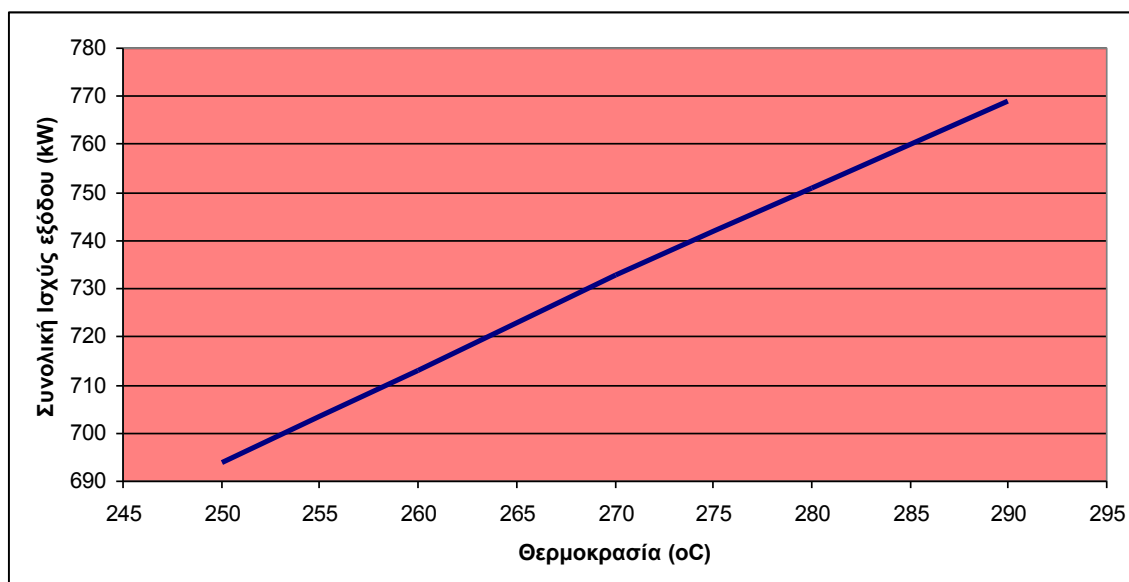
Διάγραμμα 4.28

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του πάνω κύκλου αυξάνεται η συνολική ισχύς εξόδου ενώ παρατηρείται μία μικρή μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου έμεινε σχεδόν σταθερός.

Έπειτα, θεωρούμε σταθερή την παροχή μάζας του τολουενίου στα 7 kg/s και την μέγιστη πίεση του πάνω κύκλου στα 3 bar και αλλάζουμε την μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου για να δούμε τι επίδραση έχει στην ολική ισχύ εξόδου και στον βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Θερμοκρασία (οC)	Συνολική Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης κύκλου (%)
250	694	19
260	713	19,2
270	733	19,2
280	751	19,5
290	769	19,8

Πίνακας 4.28



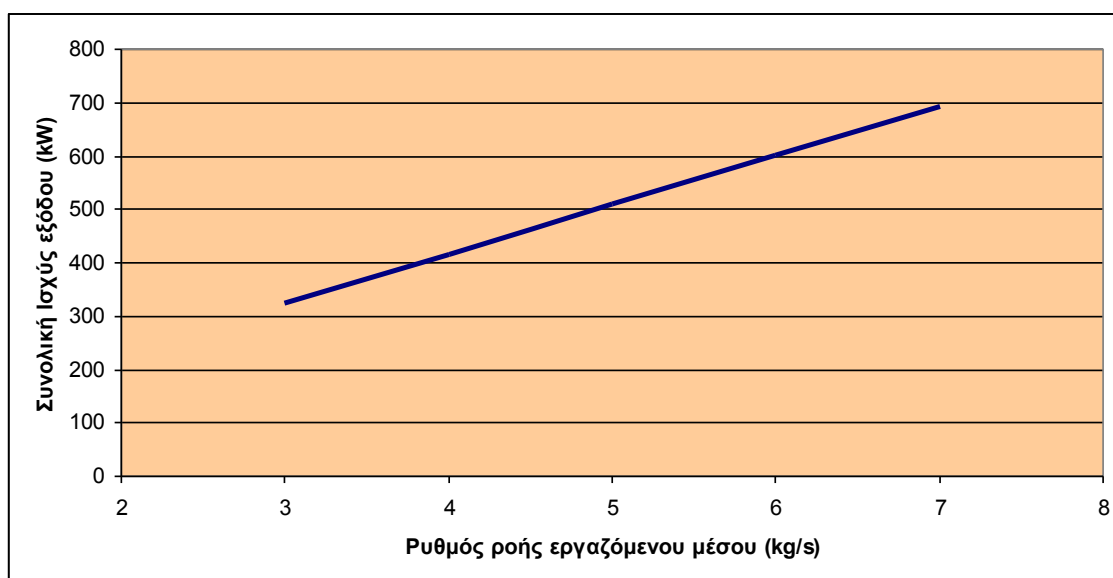
Διάγραμμα 4.29

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του πάνω κύκλου αυξάνεται η συνολική ισχύς εξόδου ενώ παρατηρείται μία μικρή μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου παρέμεινε σχετικά σταθερός στο 19%-19,8%

Συνεχίζουμε θεωρώντας σταθερή την μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου στους 250° C και την μέγιστη πίεση στα 15 bar και αλλάζουμε την παροχή μάζας για να δούμε τι επίδραση έχει στην ολική ισχύ εξόδου και στον βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Συνολική Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης κύκλου (%)
3	325	18,5
4	417	18,6
5	509	18,8
6	601	18,8
7	694	18,8

Πίνακας 4.29



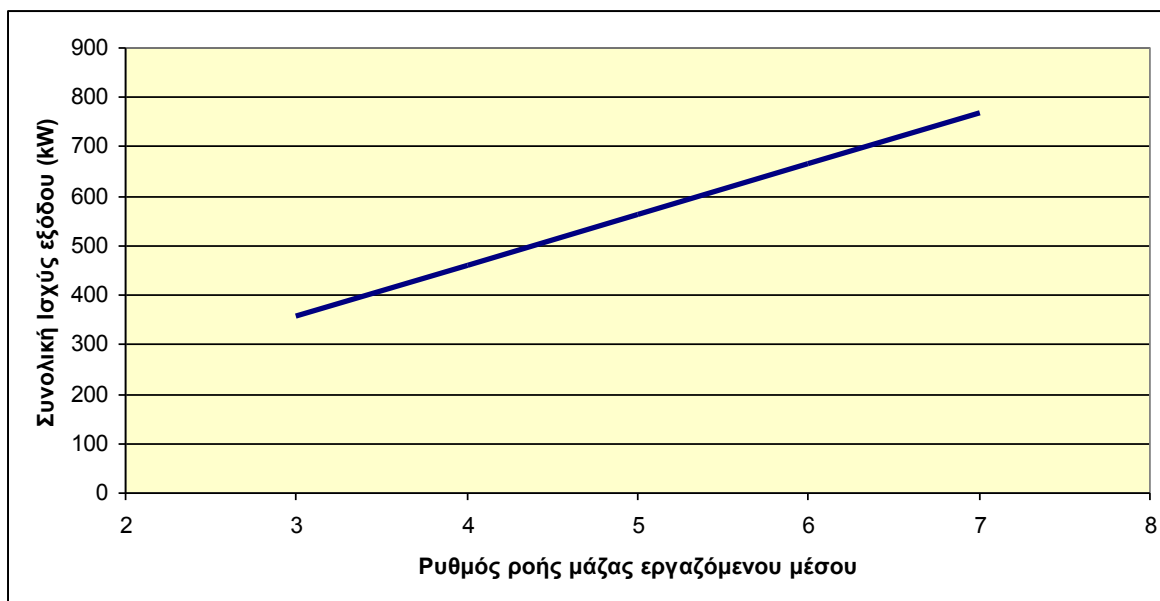
Διάγραμμα 4.30

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της παροχής μάζας του τολουενίου αυξάνεται η συνολική ισχύς εξόδου ενώ παρατηρείται μία μικρή αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου έμεινε σχεδόν σταθερός περίπου στο  $\eta=18,8\%$

Τελικά, θεωρώντας σταθερή την μέγιστη θερμοκρασία του πάνω κύκλου στους 290° C και την μέγιστη πίεση στα 15 bar και αλλάζουμε την παροχή μάζας για να δούμε τι επίδραση έχει στην ολική ισχύ εξόδου και στον βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ρυθμός ροής εργαζόμενου μέσου (kg/s)	Συνολική Ισχύς εξόδου (kW)	Βαθμός απόδοσης κύκλου (%)
3	358	21
4	461	21,4
5	564	21,8
6	667	22
7	769	22,1

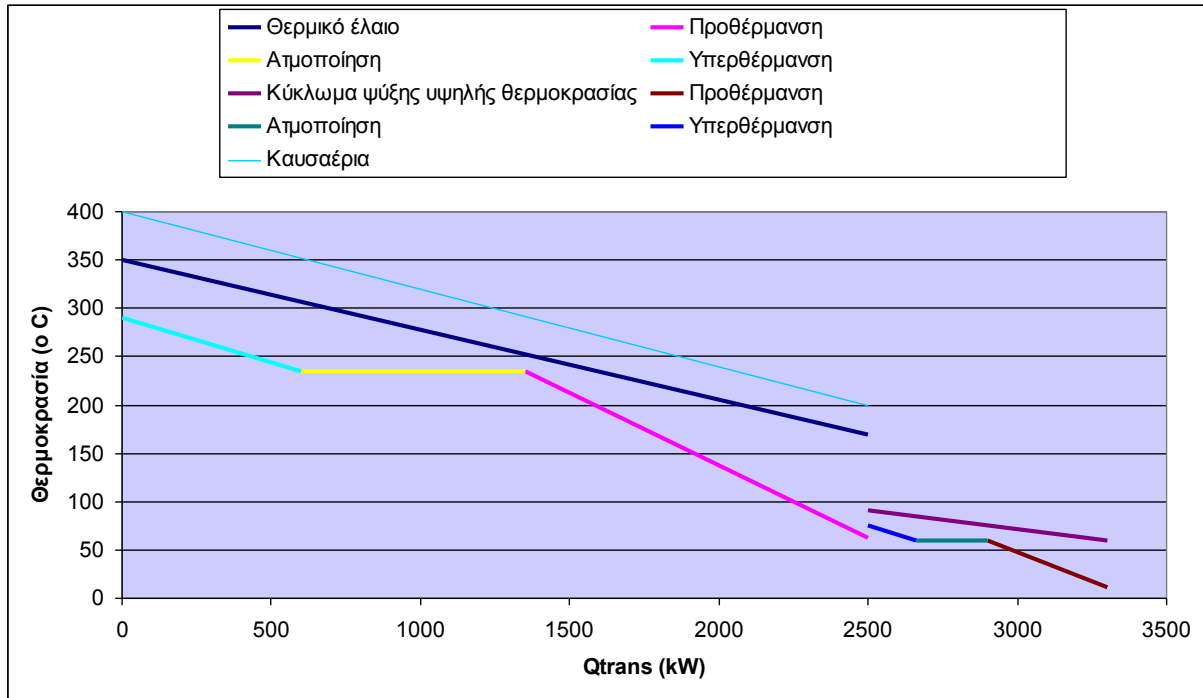
Πίνακας 4.30



Διάγραμμα 4.31

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της παροχής μάζας του τολουενίου αυξάνεται η συνολική ισχύς εξόδου ενώ παρατηρείται μία μικρή αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου έμεινε σχεδόν σταθερός στο 21%-22%

Το διάγραμμα Q-T για τον διβάθμιο κύκλο Rankine είναι το παρακάτω:



Διάγραμμα 4.32: Διάγραμμα Q-T για τους δύο κύκλους

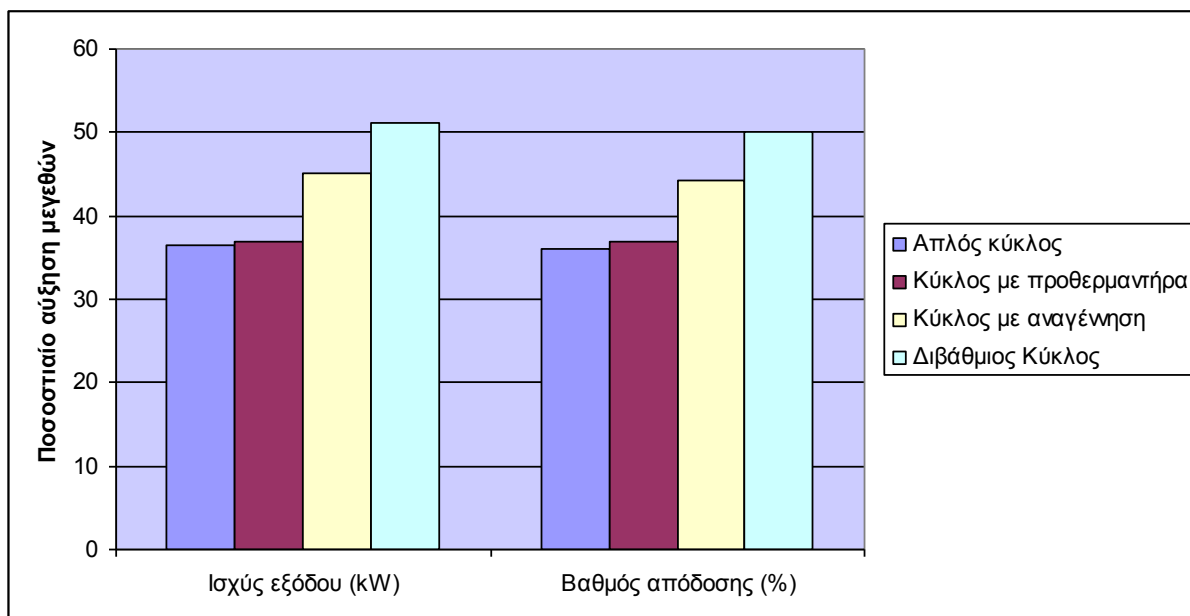
Η διαφορά θερμοκρασίας καυσαερίων – τολουενίου στην είσοδο του ατμοποιητή καθορίζει την ανώτατη πίεση λειτουργίας. Βλέπουμε ότι το pinch point είναι σχετικά μικρό, άρα δεν θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την μέγιστη πίεση λειτουργίας.

#### 4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των κύκλων

Μετά την ενεργειακή μελέτη κάθε κύκλου ξεχωριστά, γίνεται σύγκριση μεταξύ των κύκλων για να βρεθεί η μεταξύ τους σχέση. Αρχικά, γίνεται σύγκριση μεταξύ των αρχικών συνθηκών και των βέλτιστων συνθηκών για κάθε κύκλο ξεχωριστά και μετά γίνεται σύγκριση όλων των κύκλων μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

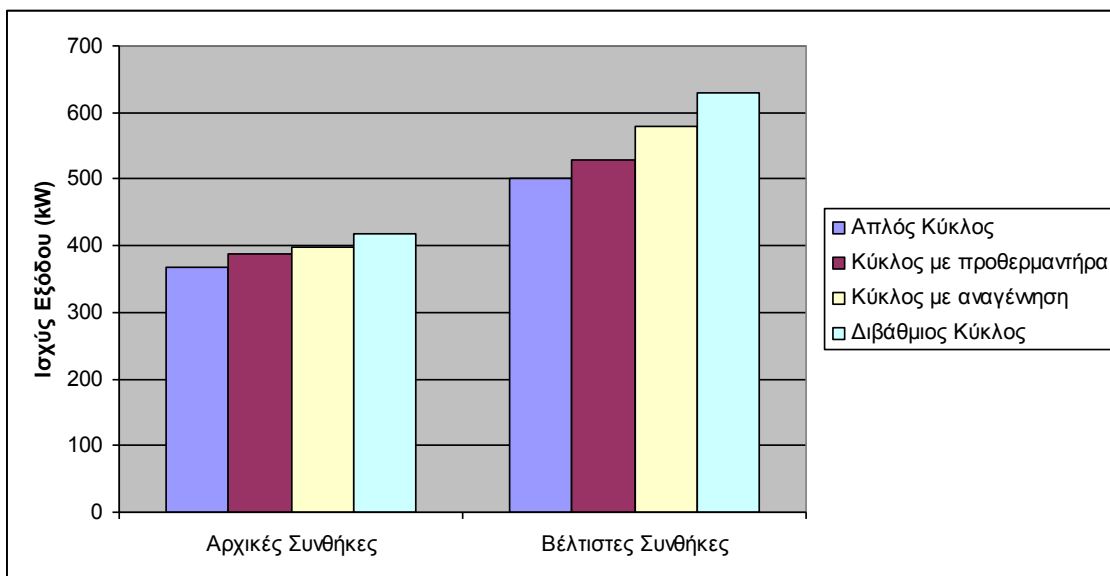
Απλός κύκλος	Αρχικές Συνθήκες	Βέλτιστες Συνθήκες	Διαφορά (%)
Ισχύς εξόδου (kW)	367	501	36,5
Βαθμός απόδοσης (%)	14,7	20	36
<b>Κύκλος με προθερμαντήρα</b>			
Ισχύς εξόδου (kW)	387	530	37
Βαθμός απόδοσης (%)	15,5	21,2	36,8
<b>Κύκλος με αναγέννηση</b>			
Ισχύς εξόδου (kW)	398	578	45,2
Βαθμός απόδοσης (%)	16	23,1	44,3
<b>Διβάθμιος κύκλος</b>			
Ισχύς εξόδου (kW)	417	630	51,1
Ολικός Βαθμός απόδοσης (%)	16,7	25,2	50,1

Πίνακας 4.29

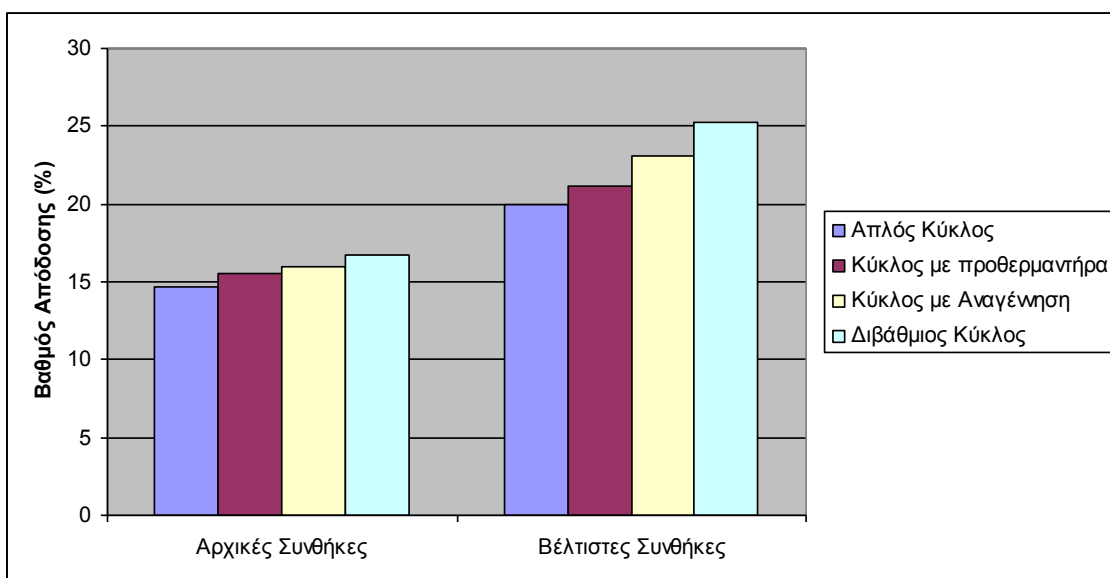


Διάγραμμα 4.33





Διάγραμμα 4.34



Διάγραμμα 4.35

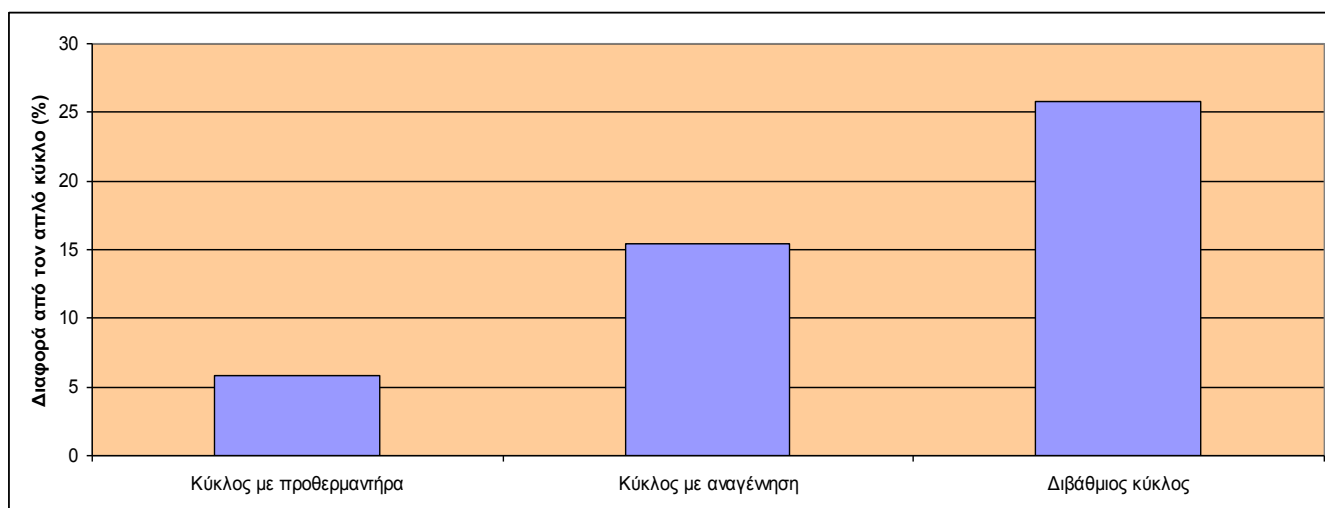
Φαίνεται καθαρά ότι με τις βέλτιστες συνθήκες, υπάρχει μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου ειδικά στην περίπτωση του κύκλου με αναγέννηση και του διβάθμιου κύκλου που κυμαίνεται περίπου στο 45-50%, ενώ για τους άλλους δύο κύκλους είναι χαμηλότερη. Ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει και αυτός αύξηση, με τον διβάθμιο κύκλο και τον κύκλο με αναγέννηση να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη.

## 4.8 Συμπεράσματα

Στην εγκατάσταση που μελετάμε, σημαντικό ρόλο παίζει η ισχύς εξόδου και ο βαθμός απόδοσής καθώς και η προσπάθεια για την μεγιστοποίησής της. Έτσι, γίνεται σύγκριση μεταξύ των ισχύων που μπορεί να παράγει ο κάθε κύκλος στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Εξεταζόμενοι κύκλοι	Ισχύς εξόδου (kW)	Διαφορά από τον απλό κύκλο (%)
Απλός κύκλος	501	0
Κύκλος με προθερμαντήρα	530	5,8
Κύκλος με αναγέννηση	578	15,4
Διβάθμιος κύκλος	630	25,8

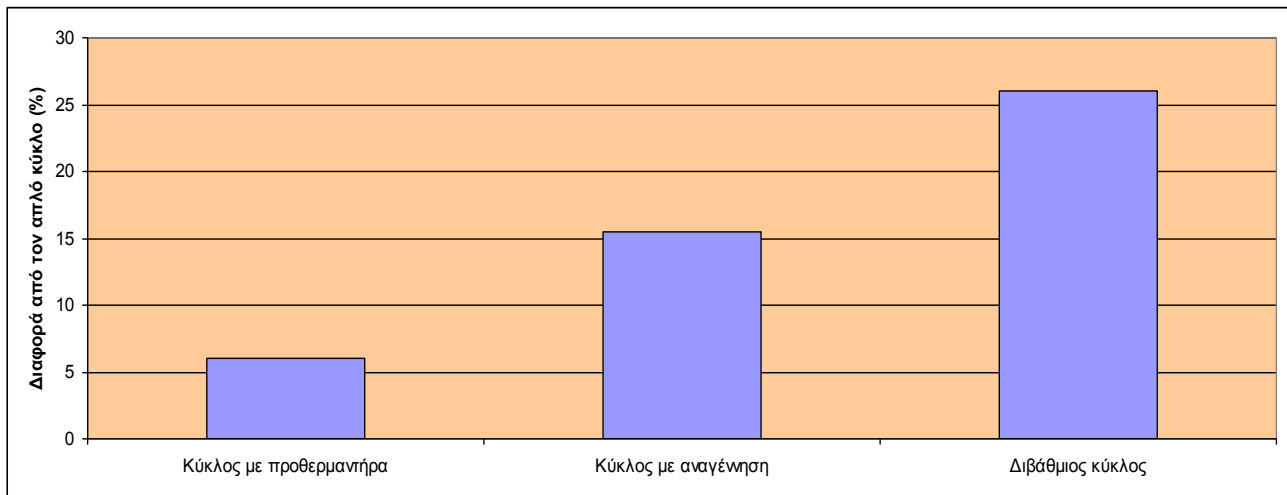
Πίνακας 4.30



Διάγραμμα 4.36

Εξεταζόμενοι κύκλοι	Βαθμός απόδοσης (%)	Διαφορά από τον απλό κύκλο (%)
Απλός κύκλος	20	0
Κύκλος με προθερμαντήρα	21,2	6
Κύκλος με αναγέννηση	23,1	15,5
Διβάθμιος κύκλος	25,2	26

Πίνακας 4.31



Διάγραμμα 4.37

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι η χρήση του διβάθμιου κύκλου Rankine είναι επιβεβλημένη, αν θέλουμε να αυξήσουμε την ισχύ εξόδου, αφού αυτή είναι αυξημένη κατά περίπου 25% σε σχέση με τον απλό κύκλο Rankine, ενώ ο βαθμός απόδοσης είναι αυξημένος κατά περίπου 26%.

## Βιβλιογραφία

[1]: Sylvain Quoilin, Experimental Study and Modeling of a Low Temperature Rankine Cycle for Small Scale Cogeneration, University Of Liege, May 2007

[2]: [www.stadtwaerme-lienz.at](http://www.stadtwaerme-lienz.at)

[3]: M. Gaderer, Combined Heat and Power Production with the use of an organic working fluid in combination with biomass combustion, (Kraft-Wärme-Kopplung bei Verwendung eines organischen Arbeitsmediums in Kombination mit einer Biomassefeuerung), Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., Garching, Germany (in German), Carmen Internationale Tagung für Betreiber von Biomasse-Heizwerken, Hersching, 2007.

[4]: I. Obernberger, Decentralized biomass combustion: state of the art and future development, Biomass and Bioenergy 14, 1998

[5]: A. Duvia, M. Gaia, ORC plants for power production from 0.4 MWe to 1.5 MWe: technology, efficiency, practical experiences and economy, in: Seventh Holzenergie Symposium, Zürich, Switzerland, 18 October 2002

[6]: I. Obernberger, P. Thonhofer, E. Reisenhofer, Description and evaluation of the new 1000 kWel Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria, Euroheat & Power 10, 2002.

[7]: Schuster A., Karellas S., Karl J., Innovative Applications of Organic Rankine Cycle, ECOS 2006, 19th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Agia Pelagia, Crete, Greece, 12 July 2006

[8]: Karellas S., Schuster A., Supercritical steam parameters in organic Rankine cycle applications, International Journal of Thermodynamics, Vol. 12 (No.3), September 2008

[9]: P.K. Nag, A.V.S.S.K.S. Gupta, Exergy analysis of the Kalina cycle, Applied Thermal Engineering 18, 1998

[10]: J.W. Lund, Combined Heat and Power plant Neustadt-Glewe, Germany, GHC, Bulletin June 2005

- [11]: [www.iag.usp.br/siae98/geotermia/fluxo.gif](http://www.iag.usp.br/siae98/geotermia/fluxo.gif)
- [12]: A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle, Applied Thermal Engineering, 29, pp. 1809-1817, June 2009
- [13]: Saitoh TS, Hoshi A. Proposed solar Rankine cycle system with phase change steam accumulator and CPC solar collector. IECEC2002, paper no. 20150
- [14]: Heat Recovery Systems by *D.A.Reay*, E & F.N.Span, London, 1979
- [15]: J. Bonafin, P. Pinamonti, M. Reini, P. Tremuli, Performance Improving of an Internal Combustion Engine for Ship Propulsion with a Bottom ORC, ECOS, 2010
- [16]: A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle, Applied Thermal Engineering, 29, pp. 1809-1817, June 2009
- [17]: Drescher U, Brüggemann D., Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, Applied Thermal Engineering (2007), doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024
- [18]: D. Wei, X. Lu, Z. Lu, J. Gu, Performance analysis and optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery, Energy Conversion and Management 48 (2007) 1113–1119.
- [19]: S. Karellas, A. Schuster, Supercritical fluid parameters in Organic Rankine Cycle Applications, Int. J. of Thermodynamics, Vol. 11 (No. 3), September 2008
- [20]: Εμ. Κ. Κακαράς, Θερμοδυναμικοί Σταθμοί, Εκδόσεις Φούντας, 2005
- [21]: Κ. Μαθιουδάκης, Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2008
- [22]: IPSEpro Version 4.0, Build 869, SimTech Simulation Technology, 1991-2003
- [23]: Α. Βαρελής, Παραμετρική Διερεύνηση για την Εκτίμηση της Επίδρασης της Θερμοκρασίας Καυσαερίου Κινητήρων Ντήζελ Βαρέως Τύπου σε Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας μέσω Κύκλου Rankine, ΕΜΠ, 2009

- [24]: Hettiarachchi Madhawa H. D., et al., Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low – temperature geothermal heat sources, Energy, 2007
- [25]: Bahaa Saleh et al., Working fluids for low – temperature organic Rankine cycles, Energy, 2006
- [26]: Aulich P., Simulation eines ORC zur Abwaermenutzung von Biogasanlagen, Semesterarbeit, TUM, 2007
- [27]: A.S. Nafey, M.A. Sharaf, Combined solar organic Rankine cycle with reverse osmosis desalination process: Energy, Exergy and cost evaluations, Renewable Energy, Elsevier, 2010
- [28]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Toluene>
- [29]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pentane>
- [30]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Isobutane>
- [31]: P. Heyl, H Quack, Free Piston Expander-Compressor for CO<sub>2</sub> – Design, Applications and Results, Germany, 2008
- [32]: K. Hartmann, Kreisverbesserung durch Zwei-Phasen-Entspannungsturbine, DKV-Tagungsbericht 21, vol. II, 1994
- [33]: K. Τερζής, Οικονομική Ανάλυση Αυτόνομου Συστήματος Ηλιοθερμικής Αφαλάτωσης Οργανικού Κύκλου Rankine σε Νησιά, ΕΜΠ, 2009
- [34]: I. K. Smith, N. Stosic and A. Kovacevic, Screw Expanders Increase Output and Decrease the Cost of Geothermal Binary Power Plant Systems, City University, Northampton Square, London EC1V 0HB, UK, 2010
- [35]: Wartsila Italy, website, 2009
- [36]: Micheli D., Pinamonti P. Reini M., Taccani R., Application of Bioamss Power Systems Fed ORC in the furniture Manufacturing Industrial District of Pordenone: Part II: development of Thermodynamic Cycle Simulation Model, 3<sup>rd</sup> Intern. Symp. Energy and Environment 2004, Sorrento, Italy, June 2004
- [37]: Desideri U., Bidini G., Study of Possible Criteria for Optimazation Geothermal Power Plants, Energy Conversion and Management, Vol. 22, issue 15-17, Oct 1997

- [38]: Hung T.C., Shai T.Y., Wang S.K., A Review of Organic Rankine Cycles for the Recovery of Low-Grade Waste Heat, Energy, vol. 22 Issue 15-17, July 1997
- [39]: Gambarotta A. Vaja I. Internal Combustion engine with Organic Rankine bottoming Cycles. A thermodynamic analysis. Proceedings of ECOS 2008, Krakow, Poland, June 24-27, 2008
- [40]: Angelino G., Colonna di Paliano P., Multicomponent Working Fluids for Organic Rankine Cycles, Energy, Vol. 23, Issue 6, June 1998
- [41]: Saleh B., Koglbauer G., Wendland M., Fisher J., Working Fluids for low temperature organic Rankine cycles. Energy, Vol. 32, Issue 7, July 2007
- [42]: Bruno J.C., Lopez-Villada J. Letelier E. Romera S. et al., Modeling and optimization of solar organic Rankine cycle engines for reverse osmosis desalination. Applied Thermal Engineering, Vol. 28, Issue 17-18, Dec. 2008
- [43]: <http://www.dow.com/heattrans/tech.data.htm>
- [44]: Prabhu E., Solar Trough Organic Rankine Electricity System (STORES)-Stage 1 power Plant Optimization and Economics. National Renewable Energy Laboratory, Report NREL/SR-550-39433, March 2006
- [45]: Sankey Helper, Gabor Doka, 2004-2009