



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – erminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ
RANKINE (ORC) ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ
ASPEN PLUS»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Σαλούστρου Φίλιππου

Επιβλέπων

Τζιβανίδης Χρήστος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Σύνοψη

Ο Οργανικός κύκλος Rankine (ORC) είναι μία αξιόπιστη τεχνολογία μετατροπής θερμότητας σε ηλεκτρισμό αξιοποιώντας είτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως γεωθερμία, ηλιακή ενέργεια και βιομάζα είτε βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα. Η χρησιμότητα αυτής της τεχνολογίας εντοπίζεται κυρίως σε αποκεντρωμένες περιοχές. Η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται από μερικά kW για εφαρμογές μικρής κλίμακας έως και ηλεκτροπαραγωγή της τάξεως των MW από μονάδες συμπαραγωγής, εκμεταλλευόμενες γεωθερμική ενέργεια. Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine με το λογισμικό Aspen Plus. Στο πρώτο μέρος σκέλος μελετάται η δυνατότητα συμπαραγωγής αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια μέσω παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή συλλεκτών κενού. Στο δεύτερο σκέλος μελετάται η δυνατότητα τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης, χρησιμοποιώντας ψύκτη απορρόφησης νερού - βρωμιούχου λιθίου (LiBr). Παράλληλα εξετάζονται και αξιολογούνται ανά εφαρμογή 15 οργανικά ρευστά.

Abstract

The Organic Rankine Cycle (ORC) is a reliable technology able to convert heat into electricity, taking advantage of renewable energy sources as geothermal energy, solar energy and biomass as well as industrial waste heat. This technology mainly focuses on decentralized areas. The capacity of electricity production ranges from a few kW for micro-scale units to MWs for cogeneration units, exploiting geothermal energy. The current study aims on simulation the Organic Rankine Cycle using Aspen Plus software. During the first part the capability of cogeneration from solar energy is examined, using parabolic through collectors or vacuum collectors. During the second part trigeneration of electricity, heat and cooling is studied, using a water – lithium bromide (LiBr) absorption chiller. In parallel 15 organic fluids are examined for each case.

Περίληψη

Η μελέτη του οργανικού κύκλου Rankine (ORC) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς παρέχει την δυνατότητα εκμετάλλευσης πηγών θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση οργανικών ρευστών ως εργαζόμενο μέσο. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως σε εφαρμογές μικρής κλίμακας σε αποκεντρωμένες περιοχές, όπου χρησιμοποιώντας θερμότητα προερχόμενη από γεωθερμία, καύση βιομάζας, ηλιακή ενέργεια ή ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια, εκμεταλλεζόμενες την τεχνολογία του οργανικού κύκλου Rankine, μπορούν να οδηγήσουν στην συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, στην τριπαραγωγή καθώς και σε ανερχόμενες εφαρμογές αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση οργανικού κύκλου Rankine με το λογισμικό Aspen Plus V11. Συγκεκριμένα μελετάται η δυνατότητα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας καθώς και η δυνατότητα τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης με την τεχνολογία του οργανικού κύκλου Rankine, χρησιμοποιώντας θερμότητα προερχόμενη από συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας μελετώνται τα σενάρια συμπαραγωγής μέσω του οργανικού κύκλου Rankine. Αρχικά εξετάζεται το σενάριο συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με χρήση οικονομητήρα στην έξοδο του στρόβιλου με στόχο τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής. Κατόπιν εξετάζονται τα σενάρια συμπαραγωγής χωρίς χρήση οικονομητήρα, όπου μελετώνται οι περιπτώσεις μέγιστης και ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή για κάθε οργανικό ρευστό.

Οι προσομοιώσεις της συμπαραγωγής έλαβαν χώρα για 15 οργανικά ρευστά με θερμοκρασιακό εύρος από 90 °C έως 250 °C. Τα οργανικά ρευστά που μελετήθηκαν είναι το βουτάνιο, το ισοβουτάνιο, το πεντάνιο, το ισοπεντάνιο, το εξάνιο, το τολουόλιο και τα ψυκτικά R-134a, R-C138, R-611, R-31(1B), R-E245, R-227, R-245cb, R-631 και R-123. Όσον αφορά τις εφαρμογές συμπαραγωγής με παροχή θερμότητας στους 90 °C, όπου χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ηλιακοί συλλέκτες κενού αέρος, το οργανικό ρευστό R-134a προκρίνεται έναντι των υπόλοιπων ρευστών. Στις εφαρμογές υψηλότερων θερμοκρασιών, 135 έως 250 °C, όπου χρησιμοποιούνται παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες το ισοπεντάνιο επιλέγεται ως βέλτιστο.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετώνται τα σενάρια τριπαραγωγής μέσω του οργανικού κύκλου Rankine σε συνδυασμό με ψύκτη απορρόφησης νερού - βρωμιούχου λιθίου (LiBr). Μελετήθηκαν δύο σενάρια τριπαραγωγής. Στο πρώτο χρησιμοποιείται ένας στρόβιλος για παραγωγή έργου και εξετάζονται τα οργανικά ρευστά πεντάνιο, ισοπεντάνιο και τολουόλιο. Στο δεύτερο χρησιμοποιούνται δύο στρόβιλοι για παραγωγή έργου και εξετάζονται τα οργανικά ρευστά βουτάνιο, ισοβουτάνιο και αιθυλαμίνη (R-631). Το τολουόλιο επιλέγεται ως βέλτιστο οργανικό ρευστό στην περίπτωση της τριπαραγωγής.

Τέλος, στο τρίτο σκέλος της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας υπολογίζεται για κάθε προσομοίωση η απαιτούμενη επιφάνεια παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος. Ενδεικτικά αναφέρεται πως η απαιτούμενη επιφάνεια των παραβολικών συλλεκτών ανέρχεται σε 208 m², για την περίπτωση συμπαραγωγής (7,72 kW ηλεκτρικής ενέργειας) με χρήση οικονομητήρα και εργαζόμενο μέσο το ισοπεντάνιο.

Summary

Nowadays the study of the Organic Rankine Cycle (ORC) is of great interest as it provides the possibility of exploiting low temperature heat sources in order to produce electricity, using organic fluids as working mediums. Studies focus mainly on small-scale applications in decentralized areas, where the usage of heat generated from a geothermal source, solar panels, biomass combustion or heat coming from exhaust heat recovery combined with the ORC technology can lead to combined heat and power systems (CHP), trigeneration systems or even to a desalination of sea water system.

This study focuses on the simulation of the Organic Rankine Cycle using ASPEN PLUS V11. More specifically the capability of cogeneration of electricity and heat as well the capability of trigeneration of electricity, heat and cooling, using the ORC technology, exploiting energy provided from parabolic through collectors or evacuated tube collectors, is studied.

In the first part of this thesis two cases of cogeneration are studied. During the first one an economiser is used after the expander aiming to maximize the electrical efficiency. During the second case of cogeneration the options of maximum and minimum subcooling of the working medium at the condenser are studied, while the economiser is not used.

Regarding the cogeneration simulations, 15 organic fluids were examined, for temperatures ranging from 90 °C to 250 °C. The organic fluids examined are butane, isobutane, pentane, isopentane, hexane, toluene as well as the refrigerants R-134a, R-C138, R-611, R-31(1B), R-E245, R-227, R-245cb, R-631 και R-123. Regarding the simulations of cogeneration where 90 °C heat is received from the evacuated tube solar collectors, the organic fluid R-134a is the best choice. For the simulations where 135 °C – 250 °C heat is received from parabolic through collectors, isopentane is selected.

During the second part of this study the capability of trigeneration is studied, using the Organic Rankine Cycle technology combined with a water - lithium bromide absorption chiller. Two cases of trigeneration were studied. During the first one, where only one expander is used, the organic fluids pentane, isopentane and toluene are examined. During the second one, where two expanders are used, the organic fluids butane, isobutane and ethylamine are examined. Toluene is the optimal choice regarding the case of trigeneration.

Finally, the required surface of parabolic through collectors or evacuated tube collectors is calculated, for every simulation examined. Regarding the case of cogeneration (7,72 kW of electricity produced) where an economiser is used and isopentane is selected as working medium, the required surface of parabolic through collectors equals to 208 m².

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
<i>Summary</i>	5
<i>Λίστα διαγραμμάτων</i>	9
<i>Λίστα πινάκων</i>	11
<i>Λίστα εικόνων</i>	13
Κεφάλαιο 1. Οργανικός κύκλος Rankine.....	15
1.1. Εισαγωγή	15
1.2. Θερμοδυναμική προσέγγιση κύκλου Rankine	15
1.3. Υποκρίσιμος και υπερκρίσιμος κύκλος Rankine.....	17
1.2. Παραλλαγές απλού κύκλου Rankine.....	19
1.2.1. Εισαγωγή	19
1.2.2. Κύκλος Rankine με προθέρμανση	19
1.2.3. Κύκλος Rankine με αναθέρμανση	20
1.2.4. Σύστημα δύο συνδεδεμένων κύκλων Rankine	21
Κεφάλαιο 2. Εφαρμογές Οργανικού κύκλου Rankine.....	23
2.1. Συμπαράγωγή.....	23
2.2. Τριπαράγωγή.....	25
2.2.1. Ψύξη με απορρόφηση	26
2.3. Υπολογισμός βαθμού απόδοσης.....	27
2.4. Εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας	29
2.4.1. Εισαγωγή	29
2.4.2. Ηλιακές εφαρμογές.....	30
2.4.2.1. Παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (Parabolic Trough Collector)	31
2.4.2.2. Ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος (Evacuated Tube Collectors).....	33
2.4.3. Εφαρμογές γεωθερμίας	33
2.4.4. Εφαρμογές βιομάζας.....	34
2.4.5. Εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας από μηχανές εσωτερικής καύσης	35
Κεφάλαιο 3. Οργανικά ρευστά	36
3.1. Εισαγωγή	36
3.2. Επιλογή οργανικού ρευστού.....	36
3.3. Το νερό ως εργαζόμενο μέσο	39
3.4. Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των υπό μελέτη οργανικών ρευστών	40
Κεφάλαιο 4. Προσομοιώσεις οργανικού κύκλου Rankine - συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	44

4.1. Εισαγωγή	44
4.2. Διάγραμμα ροής οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα.....	44
4.2.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα)	45
4.2.2. Προσδιορισμός προδιαγραφών διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα)	46
4.2.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα.....	47
4.2.4. Επιλογή βέλτιστων οργανικών ρευστών.....	48
4.2.5. Ανάλυση ευαισθησίας (i)	49
4.2.5. Διαδικασία σχεδιασμού προσομοίωσης με το λογισμικό Aspen Plus V11	50
4.3. Διάγραμμα ροής οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα	67
4.3.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα	68
4.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα.....	69
4.3.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή	70
4.3.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή	71
4.3.3. Σύγκριση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης περιπτώσεων μέγιστης και ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή	72
4.3.4. Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από τη παρουσία οικονομητήρα	73
4.3.5. Ανάλυση ευαισθησίας (ii)	74
Κεφάλαιο 5. Προσομοιώσεις οργανικού κύκλου Rankine - τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, ψύξης και θερμότητας	76
5.1. Εισαγωγή	76
5.2. Προσομοίωση τριπαραγωγής ενός στροβίλου	77
5.2.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής τριπαραγωγής ενός στροβίλου	78
5.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου	81
5.3. Προσομοίωση τριπαραγωγής δύο στροβίλων.....	82
5.3.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής τριπαραγωγής δύο στροβίλων.....	83
5.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων	84
5.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας (iii)	85
5.3.4. Σύγκριση σεναρίων τριπαραγωγής	86

Κεφάλαιο 6. Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών	87
6.1. Εισαγωγή	87
6.2. Υπολογισμός βαθμού απόδοσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος	87
6.3. Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.....	88
6.4. Ανάλυση ευαισθησίας (iv)	89
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και προτάσεις για συνέχιση της εργασίας	90
7.1. Συμπεράσματα	90
7.2. Προτάσεις για συνέχιση εργασίας.....	91
Κεφάλαιο 8. Βιβλιογραφία.....	92

Λίστα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον συμβατικό κύκλο Rankine.....	16
Διάγραμμα 1.2: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού σε υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη κατάσταση κατά τον συμβατικό κύκλο Rankine.....	17
Διάγραμμα 1.3: Διάγραμμα Q – T υποκρίσιμου κύκλου Rankine.....	18
Διάγραμμα 1.4: Διάγραμμα Q – T υπερκρίσιμου κύκλου Rankine.....	18
Διάγραμμα 1.5: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον κύκλο Rankine με προθέρμανση ...	20
Διάγραμμα 1.6: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον κύκλο Rankine με αναθέρμανση...	21
Διάγραμμα 1.7: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού στο σύστημα δύο συνδυασμένων κύκλων Rankine.....	22
Διάγραμμα 2.1: Μερίδιο εγκατεστημένης ισχύς μονάδων οργανικού κύκλου Rankine ανά πηγή ενέργειας.....	29
Διάγραμμα 2.2: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων οργανικού κύκλου Rankine ανά έτος.....	30
Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα T-S «υγρού» οργανικού ρευστού.....	37
Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα T-S ισεντροπικού οργανικού ρευστού.....	38
Διάγραμμα 3.3: Διάγραμμα T-S «ξηρού» οργανικού ρευστού.....	39
Διάγραμμα 3.4: Καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας νερού.....	40
Διάγραμμα 3.5: Καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας υπό μελέτη οργανικών ρευστών (i).....	42
Διάγραμμα 3.6: Καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας υπό μελέτη οργανικών ρευστών (ii).....	42
Διάγραμμα 4.1: Εξάρτηση ισχύος στροβίλου από την πίεση εξόδου του στροβίλου.....	49
Διάγραμμα 4.2: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής από την πίεση εξόδου του στροβίλου.....	49
Διάγραμμα 4.3: Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από τους βαθμούς °C υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή.....	74
Διάγραμμα 4.4: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης παραγωγής θερμικής ενέργειας από τους βαθμούς °C υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή.....	74
Διάγραμμα 4.5: Εξάρτηση ισχύος στροβίλου από τους βαθμούς °C υπερθέρμανσης στην είσοδο του στροβίλου.....	75
Διάγραμμα 4.6: Εξάρτηση παραγόμενης θερμικής ενέργειας από τους βαθμούς °C υπερθέρμανσης στην είσοδο του στροβίλου.....	75

Διάγραμμα 5.1: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης παραγωγής ψύξης από την μεταβολή της πίεσης εξόδου του στροβίλου, για το σενάριο χρήσης ενός στροβίλου με εργαζόμενο ρευστό το ισοπεντάνιο.....85

Διάγραμμα 6.1: Εξάρτηση επιφάνειας παραβολικών ηλιακών συλλεκτών από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών, για τις εφαρμογές με θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών ίση με 190 °C.....89

Λίστα πινάκων

Πίνακας 2.1: Συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.....	24
Πίνακας 2.2 : Ηλεκτρικός και θερμικός βαθμός απόδοσης συστημάτων μικρό-συμπαραγωγής	25
Πίνακας 3.1: Σημείο βρασμού, κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine.....	40
Πίνακας 3.2: Περιβαλλοντικοί δείκτες ODP και GWP των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine.....	41
Πίνακας 3.3: Επίπεδα τοξικότητας και ευφλεκτότητας, θερμοκρασία αυτανάφλεξης και κόστος των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine.....	41
Πίνακας 3.4: Χαρακτηρισμός οργανικών ρευστών με βάση την κλίση της καμπύλης κορεσμού (διάγραμμα T-S).....	43
Πίνακας 4.1: Περιγραφή ρευμάτων (streams) και στοιχείων εξοπλισμού (blocks) διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα)	45
Πίνακας 4.2: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα).....	46
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C), της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	47
Πίνακας 4.4: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.....	47
Πίνακας 4.5: Περιγραφή ρευμάτων (streams) και στοιχείων εξοπλισμού (blocks) διαγράμματος ροής χωρίς χρήση οικονομητήρα.....	68
Πίνακας 4.6: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης συμπαραγωγής χωρίς χρήση οικονομητήρα.....	69
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης.....	70
Πίνακας 4.8: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης.....	70
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης.....	71
Πίνακας 4.10: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης.....	71
Πίνακας 4.11: Σύγκριση ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης μεταξύ των περιπτώσεων μέγιστης και ελάχιστης υπόψυξης στης έξοδο του συμπυκνωτή για το σενάριο προσομοίωσης χωρίς χρήση αναγεννητή.....	72
Πίνακας 4.12: Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από την παρουσία οικονομητήρα.....	73

Πίνακας 5.1: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου ...	79
Πίνακας 5.2: Περιγραφή ρευμάτων (streams) και στοιχείων εξοπλισμού (blocks) διαγράμματος ροής τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.....	80
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.....	81
Πίνακας 5.4: Υπολογισμός βαθμών απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και ψύξης της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.....	81
Πίνακας 5.5: Υπολογισμός θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς COP (coefficient of performance, COP).....	81
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.....	84
Πίνακας 5.7: Υπολογισμός βαθμών απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και ψύξης της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.....	84
Πίνακας 5.8: Εξάρτηση ολικού βαθμού απόδοσης από την μεταβολή της πίεσης εξόδου του στροβίλου, για το σενάριο χρήσης ενός στροβίλου με εργαζόμενο ρευστό το ισοπεντάνιο.....	85
Πίνακας 6.1: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος.....	87
Πίνακας 6.2: Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.....	88

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1.1: Συμβατικός κύκλος Rankine.....	16
Εικόνα 1.2: Κύκλος Rankine με προθέρμανση.....	19
Εικόνα 1.3: Κύκλος Rankine με αναθέρμανση.....	20
Εικόνα 1.4: Σύστημα δύο συνδεδεμένων κύκλων Rankine.....	21
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ροής κύκλου ψύξης με απορρόφηση. (Πηγή θερμότητας •, ισχυρό απορροφητικό •, ασθενές απορροφητικό •, ψυκτικό •).....	26
Εικόνα 2.2: Ροή ενέργειας στον κύκλο Rankine.....	27
Εικόνα 2.3: Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες.....	32
Εικόνα 2.4: Παραβολικός ηλιακός συλλέκτης.....	33
Εικόνα 2.4: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρος (ETC)	33
Εικόνα 2.6: Εκμετάλλευση θερμότητας καυσαερίων κινητήρα από σύστημα οργανικού κύκλου Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	35
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine με στόχο την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιώντας αναγεννητή.....	44
Εικόνα 4-2: Δημιουργία νέα προσομοίωσης στο λογισμικό Aspen Plus V11.....	50
Εικόνα 4-3: Προσθήκη ενώσεων/components στην προσομοίωση.....	50
Εικόνα 4-4: Μετάβαση στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης.....	51
Εικόνα 4-5: Επιλογή μεθόδου σύγκλισης υπολογισμών και μετάβαση στο περιβάλλον της προσομοίωσης.....	52
Εικόνα 4-6: Εισαγωγή εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) στην προσομοίωση (i).....	52
Εικόνα 4-7: Εισαγωγή εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) στην προσομοίωση (ii).....	53
Εικόνα 4-8: Εισαγωγή θερμού ρεύματος στον εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) (i).....	53
Εικόνα 4-9: Εισαγωγή θερμού ρεύματος στον εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) (ii).....	54
Εικόνα 4-10: Καθορισμός χαρακτηριστικών θερμού ρεύματος υπερθερμαντήρα.....	54
Εικόνα 4-11: Καθορισμός προδιαγραφής (specification) υπερθερμαντήρα.....	55
Εικόνα 4-12: Καθορισμός μεγέθους προδιαγραφής και θερμοκρασιακή διαφορά στον υπερθερμαντήρα.....	55
Εικόνα 4-13: Εισαγωγή ψυχρού ρεύματος εξόδου υπερθερμαντήρα.....	56
Εικόνα 4-14: Καθορισμός ιδιοτήτων ψυχρού ρεύματος εξόδου υπερθερμαντήρα.....	56

<i>Εικόνα 4-15: Εισαγωγή στροβίλου στην προσομοίωση (i)</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4-16: Εισαγωγή στροβίλου στην προσομοίωση (ii)</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 4-17: Σύνδεση ρεύματος με στοιχείο εξοπλισμού.....</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 4-18: Καθορισμός χαρακτηριστικών στροβίλου.....</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 4-19: Εισαγωγή οικονομητήρα στην προσομοίωση (i)</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4-20: Εισαγωγή οικονομητήρα στην προσομοίωση (ii)</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 4-21: Καθορισμός χαρακτηριστικών οικονομητήρα</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4-22: Εισαγωγή συμπυκνωτή στην προσομοίωση.....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 4-23: Καθορισμό προδιαγραφών συμπυκνωτή.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4-24: Εισαγωγή ψυχρού ρεύματος νερού στον συμπυκνωτή.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 4-25: Καθορισμός χαρακτηριστικών ψυχρού ρεύματος νερού στον συμπυκνωτή.....</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 4-26: Εισαγωγή αντλίας στην προσομοίωση.....</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 4-27: Ορισμός χαρακτηριστικών αντλίας.....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4-28: Εισαγωγή προθερμαντήρα στην προσομοίωση.....</i>	<i>63</i>
<i>Εικόνα 4-29: Καθορισμός χαρακτηριστικών προθερμαντήρα.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4-30: Εισαγωγή εξατμηστήρα στην προσομοίωση.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 4-31: Καθορισμός χαρακτηριστικών εξατμηστήρα.....</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4-32: Ολοκλήρωση εισαγωγής ρευμάτων και στοιχείων εξοπλισμού.....</i>	<i>65</i>
<i>Εικόνα 4-33: Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 4.34: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine χωρίς την χρήση οικονομητήρα....</i>	<i>67</i>
<i>Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine ενός στροβίλου και κύκλου ψύξης με απορρόφηση</i>	<i>77</i>
<i>Εικόνα 5.2: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine δύο στροβίλων και κύκλου ψύξης με απορρόφηση</i>	<i>82</i>

Κεφάλαιο 1. Οργανικός κύκλος Rankine

1.1. Εισαγωγή

Η αρχή λειτουργίας του οργανικού κύκλου Rankine είναι πανομοιότυπη με την λειτουργία του συμβατικού κύκλου Rankine νερού – ατμού. Πρόκειται για σύστημα κλειστού βρόγχου, όπου το ρευστό ανακυκλώνεται συνεχώς μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Η διαφορά του οργανικού κύκλου Rankine από τον απλό κύκλο Rankine εντοπίζεται στο εργαζόμενο μέσο. Ο οργανικός κύκλος Rankine χρησιμοποιεί κάποιο οργανικό ρευστό ως εργαζόμενο μέσο αντί του νερού – ατμού. Τα οργανικά ρευστά προσφέρουν την δυνατότητα παραγωγής έργου από πηγές θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών (π.χ. γεωθερμία 90 °C). Το γεγονός αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα του οργανικού κύκλου Rankine έναντι του συμβατικού κύκλου.

1.2. Θερμοδυναμική προσέγγιση κύκλου Rankine

Τα βασικά στοιχεία του συστήματος τόσο για τον οργανικό όσο και τον συμβατικό κύκλο είναι τα παρακάτω:

1. Ο λέβητας, όπου προσδίδεται θερμότητα από την πηγή θερμότητας προς το εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Αποτελείται συνήθως από τρεις εναλλάκτες θερμότητας:
 - Τον προθερμαντήρα, όπου αυξάνεται η θερμοκρασία του ρευστού, έως ότου φτάσει σε κατάσταση κορεσμένου υγρού.
 - Τον ατμοποιητή, όπου το ρευστό εξατμίζεται και φτάνει σε κατάσταση κορεσμένου ατμού.
 - Τον υπερθερμαντήρα, όπου το ρευστό υπερθερμαίνεται.
2. Ο στρόβιλος, όπου το εργαζόμενο μέσο εκτονώνεται προς παραγωγή έργου.
3. Ο συμπυκνωτής, όπου ο ατμός της εξόδου του στρόβιλου συμπυκνώνεται και απορρίπτεται θερμότητα προς το περιβάλλον.
4. Η αντλία, όπου γίνεται η άντληση του ρευστού από τον συμπυκνωτή προς τον λέβητα.

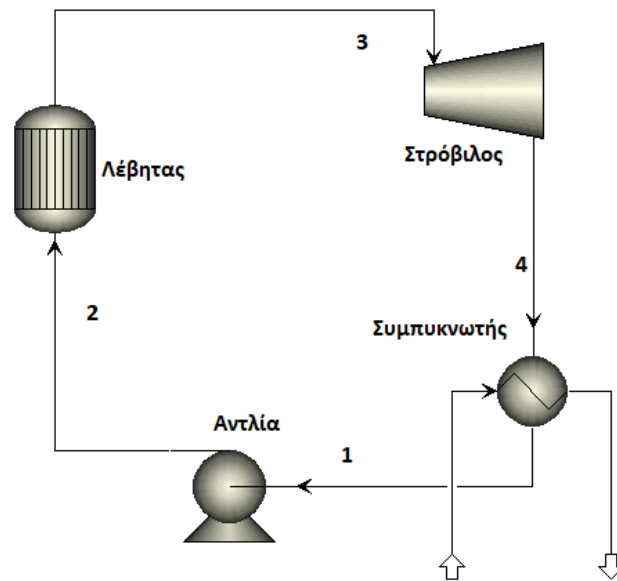
Κατόπιν παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του συμβατικού κύκλου Rankine, καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας για το εργαζόμενο μέσο. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:

1→2: Άντληση από τον συμπυκνωτή προς τον λέβητα.

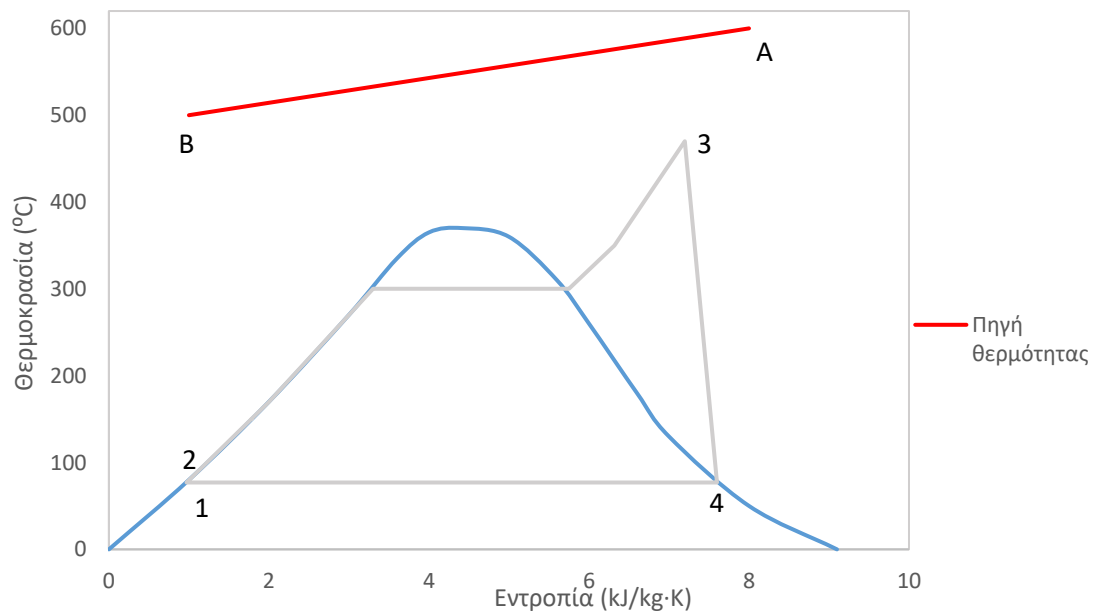
2→3: Πρόσδοση θερμότητας στον λέβητα.

3→4: Εκτόνωση στον στρόβιλο.

4→1: Συμπύκνωση και αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον.



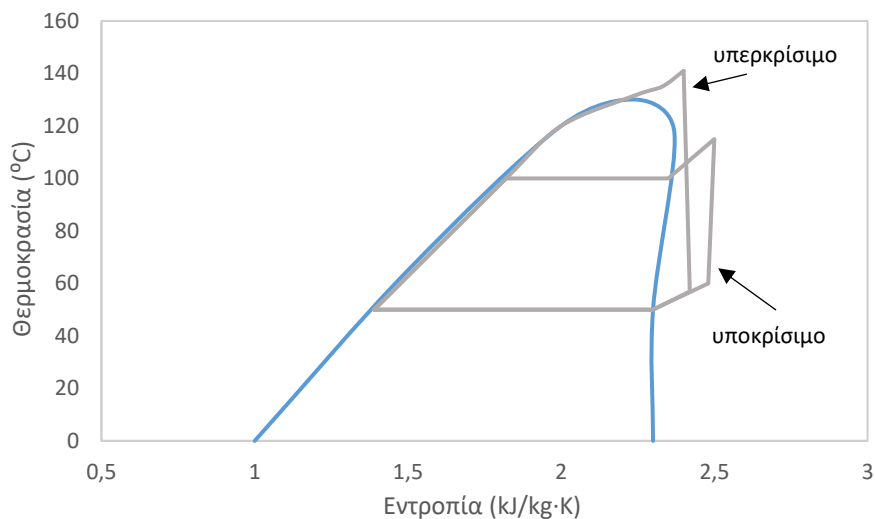
Εικόνα 1.1: Συμβατικός κύκλος Rankine.



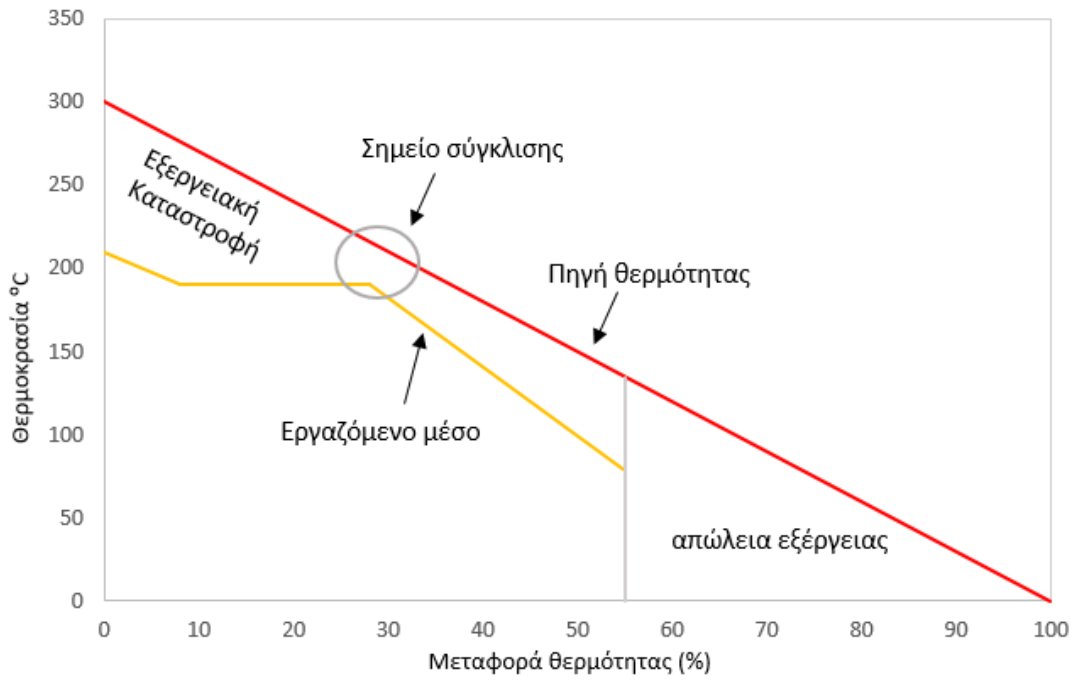
Διάγραμμα 1.1: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον συμβατικό κύκλο Rankine.

1.3. Υποκρίσιμος και υπερκρίσιμος κύκλος Rankine

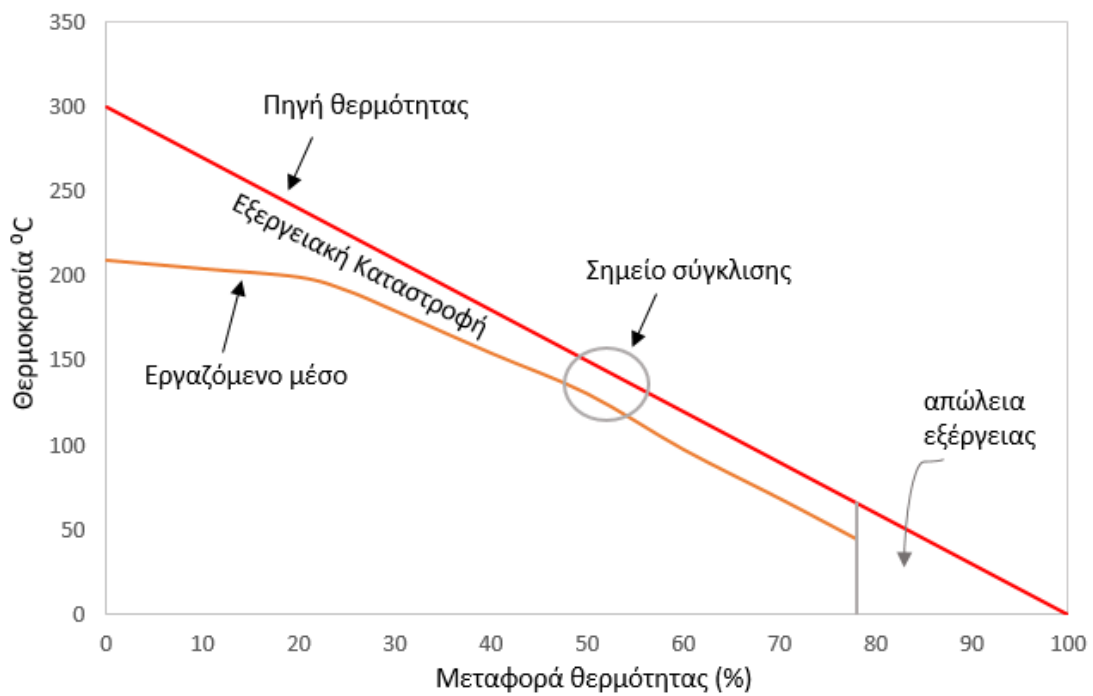
Τα οργανικά ρευστά, όπως παρουσιάζεται και στο κεφάλαιο 3, εμφανίζουν το κρίσιμο σημείο σε αισθητά χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία σε σύγκριση με το νερό. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών ο ατμός του εργαζόμενου μέσου που οδηγείται στην είσοδο της τουρμπίνας βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Ωστόσο ιδιαίτερη σημασία έχει η εξέταση της εισαγωγής του εργαζόμενου μέσου σε υπερκρίσιμη κατάσταση στον στρόβιλο, αφού έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός απόδοσης του συστήματος. Όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα εντροπίας – θερμοκρασίας στην περίπτωση του υπερκρίσιμου ρευστού η πτώση ενθαλπίας κατά την εκτόνωση στον στρόβιλο είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πτώση στην περίπτωση του υποκρίσιμου ρευστού. Ταυτόχρονα η αύξηση ενθαλπίας κατά την άντληση του ρευστού είναι αμελητέα. Επομένως τόσο η παραγωγή έργου όσο και ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση του υπερκρίσιμου ρευστού. Επιπλέον η εξεργειακή καταστροφή στην περίπτωση του υπερκρίσιμου ρευστού είναι μικρότερη, αφού η καμπύλη του εργαζόμενου μέσου βρίσκεται πιο κοντά στην καμπύλη της πηγής θερμότητας, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα που ακολουθούν. Στην περίπτωση του υποκρίσιμου ρευστού, η διεργασία της ατμοποίησης εξελίσσεται ισοθερμοκρασιακά, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη εξεργειακή καταστροφή [1].



Διάγραμμα 1.2: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού σε υπερκρίσιμη και υποκρίσιμη κατάσταση κατά τον συμβατικό κύκλο Rankine.



Διάγραμμα 1.3: Διάγραμμα Q – T υποκρίσιμου κύκλου Rankine.



Διάγραμμα 1.4: Διάγραμμα Q – T υπερκρίσιμου κύκλου Rankine.

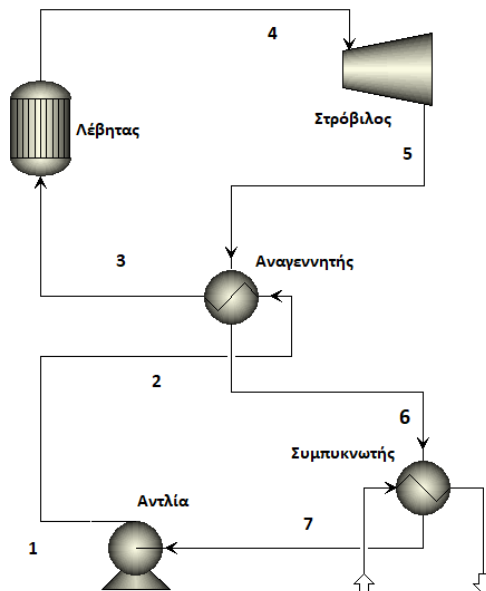
1.2. Παραλλαγές απλού κύκλου Rankine

1.2.1. Εισαγωγή

Με στόχο την αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου ή την μείωση των ιδιοκαταναλώσεων έχουν αναπτυχθεί ορισμένες παραλλαγές του κύκλου Rankine. Μερικές από αυτές είναι:

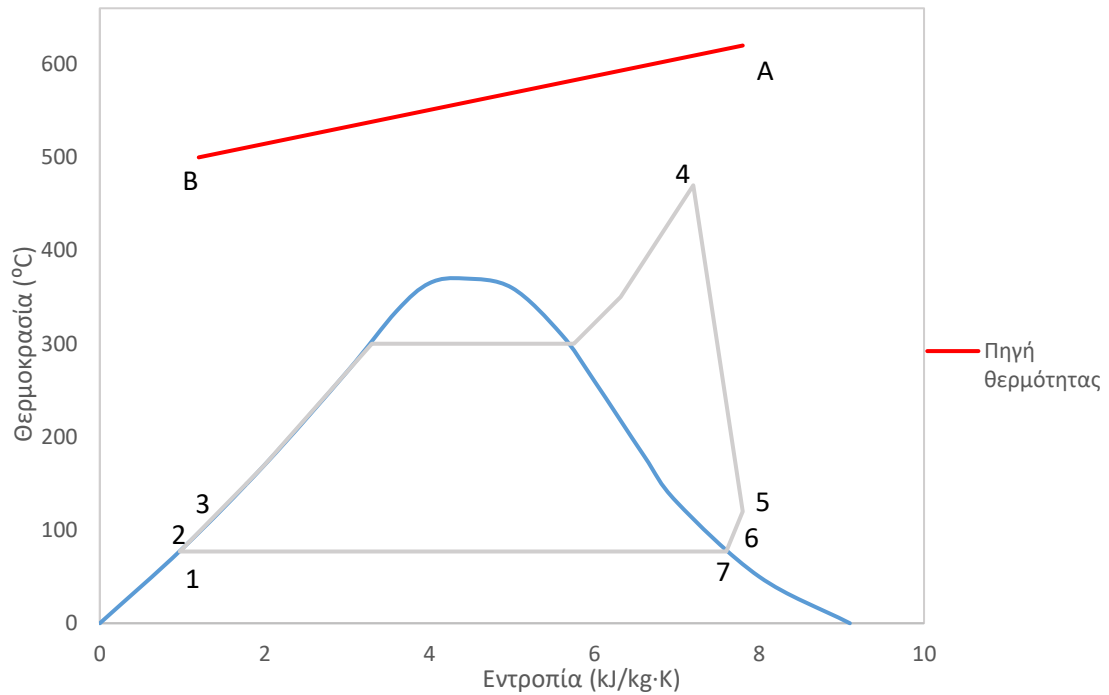
- Κύκλος Rankine με προθέρμανση.
- Κύκλος Rankine με αναθέρμανση.
- Σύστημα δύο συνδεδεμένων κύκλων.

1.2.2. Κύκλος Rankine με προθέρμανση



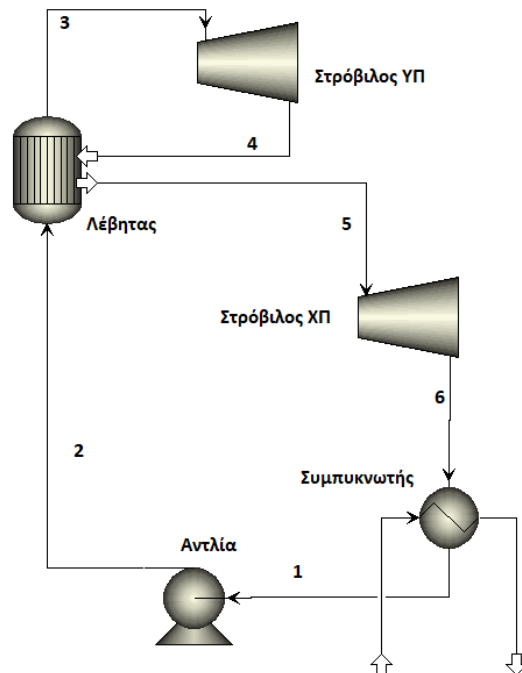
Εικόνα 1.2: Κύκλος Rankine με προθέρμανση.

Το ρεύμα εξόδου του λέβητα (4) οδηγείται προς εκτόνωση στον στρόβιλο. Κατόπιν το ρεύμα εξόδου του στροβίλου (5) εισέρχεται στον αναγεννητή (οικονομητήρα) όπου θα αποδώσει θερμότητα στο ρεύμα εισόδου του λέβητα. Η θερμή έξοδος του οικονομητήρα (6) εισέρχεται στον συμπυκνωτή και στην συνέχεια οδηγείται στην αντλία (7). Το ρεύμα εξόδου της αντλίας (2) αφού προθερμανθεί στον αναγεννητή εισέρχεται στον λέβητα (3). Ο κύκλος κλείνει με το ρεύμα εξόδου του λέβητα να οδηγείται εκ νέου προς εκτόνωση. Με την χρήση του οικονομητήρα επιτυγχάνεται μείωση της προσδιδόμενης θερμότητας από τον λέβητα και ως αποτέλεσμα αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου.



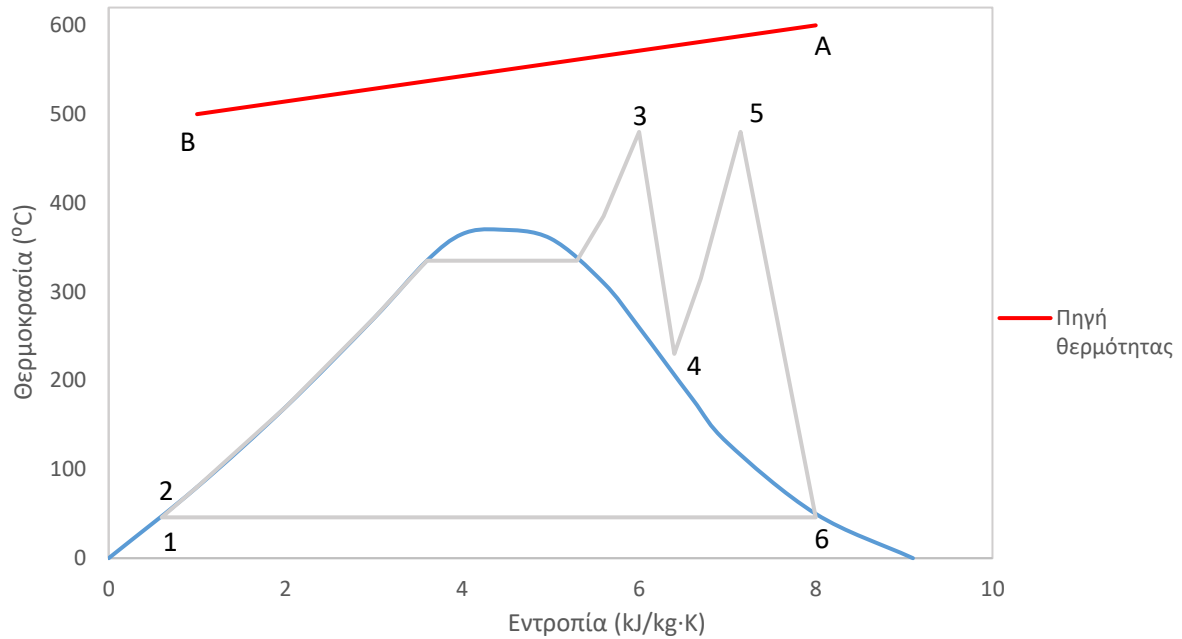
Διάγραμμα 1.5: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον κύκλο Rankine με προθέρμανση.

1.2.3. Κύκλος Rankine με αναθέρμανση



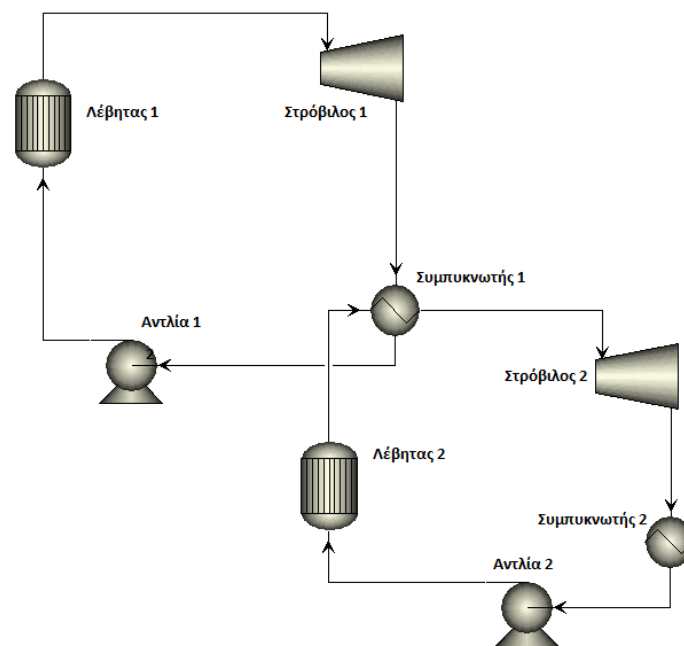
Εικόνα 1.3: Κύκλος Rankine με αναθέρμανση.

Το ρευστό (3) εκτονώνεται μερικώς στον στρόβιλο υψηλής πίεσης και οδηγείται στον λέβητα για αναθέρμανση (4). Στη συνέχεια εκτονώνεται ξανά στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης (5). Κατόπιν ακολουθεί συμπύκνωση και αύξηση της πίεσης από την αντλία προτού εισέλθει και πάλι στον λέβητα.



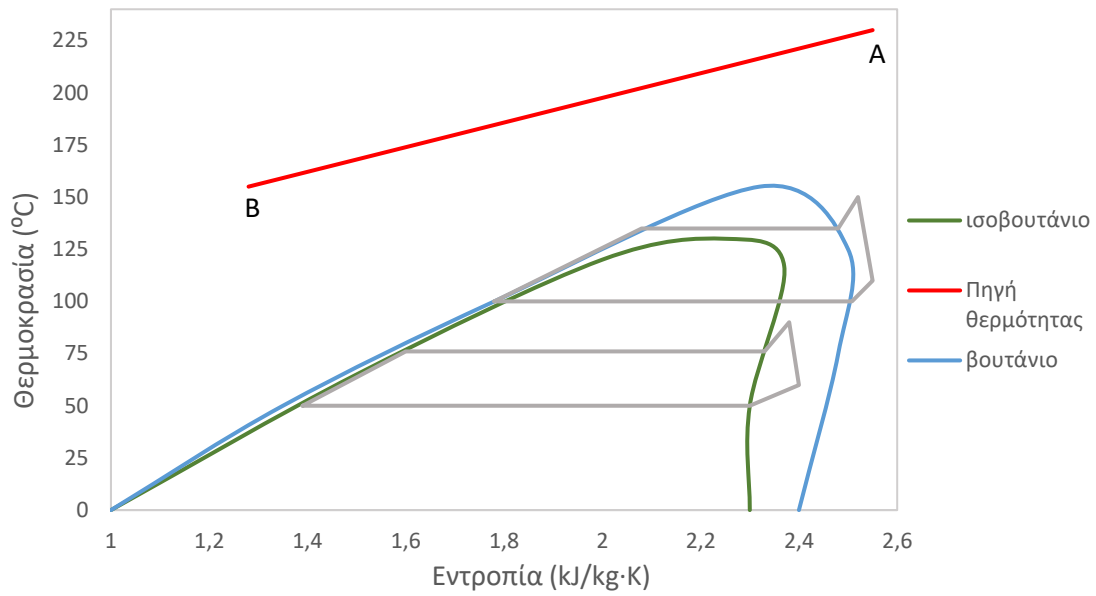
Διάγραμμα 1.6: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού κατά τον κύκλο Rankine με αναθέρμανση.

1.2.4. Σύστημα δύο συνδεδεμένων κύκλων Rankine



Εικόνα 1.4: Σύστημα δύο συνδεδεμένων κύκλων Rankine.

Το εργαζόμενο μέσο του κύκλου υψηλής θερμοκρασίας αποδίδει θερμότητα στον συμπυκνωτή την οποία παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας. Ο κύκλος χαμηλής θερμοκρασίας διαθέτει ατμοποιητή, όπου το ρευστό εξατμίζεται. Ο εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των δύο κύκλων χρησιμοποιείται ως υπερθερμαντήρας για το εργαζόμενο μέσο του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας. Έτσι όταν εκτονώνεται στον στρόβιλο, παράγεται περισσότερο έργο και τελικά αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.



Διάγραμμα 1.7: Μεταβολές καταστάσεων του ρευστού στο σύστημα δύο συνδυασμένων κύκλων Rankine.

Κεφάλαιο 2. Εφαρμογές Οργανικού κύκλου Rankine

2.1. Συμπαραγωγή

Τα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια σε μία ενιαία διεργασία από την ίδια πηγή ενέργειας. Η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων συμπαραγωγής προέκυψε κυρίως λόγω των μειωμένων βαθμών απόδοσης των θερμοηλεκτρικών μονάδων. Οι θερμοηλεκτρικές μονάδες εμφανίζουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 60 % στην καλύτερη περίπτωση, ενώ στις περιπτώσεις των αεριοστροβίλων ο βαθμός απόδοσης είναι περίπου ίσος με 30 %. Τα συστήματα συμπαραγωγής στηρίζονται στην ανάκτηση ενός μέρους της προσδιδόμενης θερμικής ενέργειας, η οποία σε ένα απλό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής απορρίπτεται στο περιβάλλον μετά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι τα συστήματα συμπαραγωγής επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας με την ίδια κατανάλωση ενέργειας μεγιστοποιώντας τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος [2].

Τα προσδοκώμενα οφέλη από τα ΣΗΘ είναι:

- Μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά μονάδα τελικής παραγωγής (αυξημένη απόδοση μετατροπής και χρήσης της ενέργειας)
- Μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα CO₂.
- Αυξημένη σκοπιμότητα ανάπτυξης αποκεντρωμένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας με εγγυημένη κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών των καταναλωτών, μειωμένες απώλειες μεταφοράς και δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας όπως η βιομάζα.

Οι βασικές εφαρμογές των συστημάτων συμπαραγωγής καθώς και τριπαραγωγής εντοπίζονται στα παρακάτω:

- Κεντρικοί θερμοηλεκτρικοί σταθμοί μεγάλης ισχύος, οι οποίοι εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν ταυτόχρονα να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των θερμικών αναγκών παρακείμενων πόλεων και οικισμών.
- Βιομηχανικός τομέας: Δυνατότητα εισαγωγής μονάδων ΣΗΘ σε βιομηχανίες αλουμινίου, διυλιστήρια, βιομηχανίες τσιμέντου και άλλες βιομηχανίες.
- Κτήρια όπως νοσοκομεία, ξενοδοχεία, γραφεία, όπου υπάρχουν ποικίλες ημερήσιες ανάγκες σε ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη.
- Αξιοποίηση ανακτώμενης θερμότητας για κάλυψη αγροτικών αναγκών όπως τα θερμοκήπια.

Οι βασικές τεχνολογίες συμπαραγωγής είναι:

- Συμπαραγωγή με ατμοστρόβιλο, όπου ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λιγνίτης και το πετρέλαιο. Ο ατμός μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανική.
- Συμπαραγωγή με αεριοστρόβιλο, όπου ως καύσιμο χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο ή το πετρέλαιο και τα καυσαέρια αποτελούν το εργαζόμενο μέσο.
- Συμπαραγωγή με συνδυασμένο κύκλο όπου τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου παρέχουν την απαραίτητη θερμική ενέργεια στη δεύτερη διεργασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ατμοστρόβιλου.
- Συμπαραγωγή με εμβολοφόρο μηχανή.

Πίνακας 2.1: Συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας [2].

Σύστημα	Καύσιμο	Ηλεκτρική ισχύς (MW)	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	Ολικός βαθμός απόδοσης	Power to Heat Ratio - PHR
Ατμοστρόβιλος	Κάρβουνο, μαζούτ, πετρέλαιο, φυσικό αέριο	0,5-100	25-35	60-85	0,1-0,3
Αεριοστρόβιλος κλειστού τύπου	Φυσικό αέριο, υγραέριο, πετρέλαιο	0,5-100	30-35	60-80	0,5-0,8
Συνδυασμένος κύκλος	Φυσικό αέριο, υγραέριο, πετρέλαιο	4-100	35-45	70-88	0,6-1,1
Βιομηχανικός κινητήρας Otto ή Diesel	Φυσικό αέριο, υγραέριο, κυροζίνη	0,2-40	35-45	60-80	1,2-2,4

Εκτός από τις μονάδες συμπαραγωγής μεγάλης ηλεκτρικής ισχύος υπάρχουν και τα μικρό-συστήματα συμπαραγωγής. Η μικρό-συμπαραγωγή αναφέρεται σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως 50 kW. Οι βασικές τεχνολογίες μικρό-συμπαραγωγής είναι:

- Οργανικός κύκλος Rankine
- Μηχανές Stirling
- Μηχανές εσωτερικής καύσης
- Ατμομηχανές
- Κυψέλες καυσίμου

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο το σύστημα του οργανικού κύκλου Rankine λειτουργεί όπως ακριβώς και το αντίστοιχο συμβατικό σύστημα, αλλά αντί για νερό το εργαζόμενο μέσο είναι ένα οργανικό ρευστό το οποίο δίνει την δυνατότητα παραγωγής έργου σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες από τον συμβατικό κύκλο Rankine. Η ισχύς των συστημάτων κυμαίνεται συνήθως από 2-1000 kW_{el} ενώ σπάνια συναντώνται και εφαρμογές της τάξεως του 1 MW_{el}. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την θερμοκρασία στην οποία είναι διαθέσιμη η

θερμότητα που προσδίδεται. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 75 έως 400 °C και ο βαθμός απόδοσης από 10 -20 % ενώ σπάνια φτάνει έως 30 %. Η πηγή πρόσδοσης θερμότητας στον κύκλο μπορεί να προέρχεται από ηλιακούς συλλέκτες, γεωθερμία, θερμά καυσαέρια από εφαρμογές μηχανών εσωτερικής καύσης ή καύσης βιομάζας. Από κατασκευαστικής πλευράς πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του οργανικού κύκλου Rankine, καθώς πρέπει να είναι συμβατά με το εκάστοτε οργανικό ρευστό. Η διάρκεια εγκατάστασης ενός συστήματος έως 50 kW_{el} είναι 4-8 μήνες, ενώ αυξάνεται για μεγαλύτερα συστήματα. Η ετήσια διαθεσιμότητα του συστήματος εκτιμάται στο 90 % και η διάρκεια ζωής είναι 20 έτη.

Πίνακας 2.2 : Ηλεκτρικός και θερμικός βαθμός απόδοσης συστημάτων μικρό-συμπαγωγής [2].

Σύστημα μικρό-συμπαγωγής	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)
Οργανικός κύκλος Rankine	10-20 %	75-85 %
Μηχανές Stirling	12-25 %	71-81 %
Μηχανές εσωτερικής καύσης	25-31,5 %	55-74 %
Ατμομηχανές	13%	85%
Κυψέλες καυσίμου	37-45 %	45-50 %

2.2. Τριπαραγωγή

Τα συστήματα συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας εμφανίζουν υψηλό συνολικό βαθμός απόδοσης μόνο κατά τις περιόδους όπου υπάρχει ταυτόχρονη ζήτηση θερμότητας και ηλεκτρισμού. Εάν σταματήσει η ζήτηση θερμικής ενέργειας τότε το σύστημα παύει να αποτελεί σύστημα συμπαγωγής και λειτουργεί αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα εάν ένα σύστημα συμπαγωγής στοχεύει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην θέρμανση ενός κτηρίου, παραμένει αποδοτικό μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες όπου υπάρχει ζήτηση για θερμική ενέργεια. Την περίοδο του καλοκαιριού σταματά να λειτουργεί ως σύστημα συμπαγωγής. Επομένως η σκοπιμότητα του ως σύστημα συμπαγωγής περιορίζεται περίπου στους επτά μήνες ετησίως. Ως αποτέλεσμα προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων τριπαραγωγής.

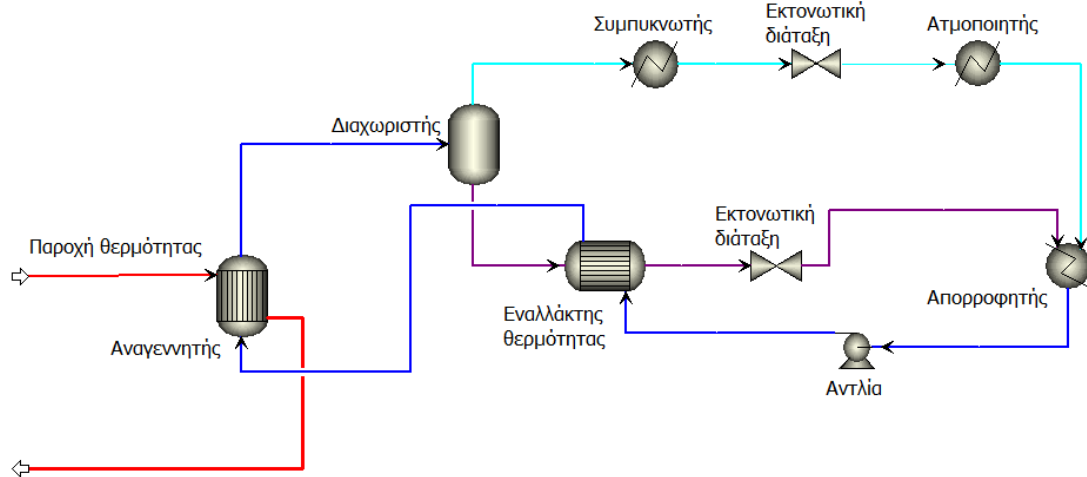
Ως τριπαραγωγή ορίζεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης από την ίδια πηγή αρχικής ενέργειας. Η μέθοδος της τριπαραγωγής βρίσκει ευρεία εφαρμογή στον κτηριακό τομέα όπου εμφανίζονται ταυτόχρονα ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρισμού που υπερβαίνουν τις 5500 ώρες ετησίως.

2.2.1. Ψύξη με απορρόφηση

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ψύξης στα συστήματα τριπαραγωγής είναι η ψύξη με απορρόφηση. Οι ψύκτες με απορρόφηση χρησιμοποιούν την θερμότητα ως ενεργειακή πηγή. Απαιτούν παροχή θερμότητας σε θερμοκρασίες 100 – 200 °C. Ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας για τον κύκλο ψύξης με απορρόφηση από διάταξη ηλιακών συλλεκτών [3].

Ο κύκλος ψύξης με απορρόφηση λειτουργεί όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αρχικά στον ατμοποιητή το ψυκτικό μέσο παραλαμβάνει θερμότητα από τον κλιματιζόμενο χώρο και εξατμίζεται. Κατόπιν ο ατμός του ψυκτικού μέσου απορροφάται από το απορροφητικό υγρό. Η έξοδος του απορροφητή αποτελεί το ρεύμα «ασθενούς απορροφητικού» και οδηγείται στον αναγεννητή με την βοήθεια αντλίας, αφού πρώτα παραλάβει θερμότητα στον εναλλάκτη θερμότητας από το ρεύμα πυθμένα του διαχωριστή το οποίο καλείται «ισχυρό απορροφητικό». Στον αναγεννητή το ρεύμα ασθενούς απορροφητικού παραλαμβάνει θερμότητα και οδηγείται στον διαχωριστή. Το ρεύμα πυθμένα του διαχωριστή όπως αναφέρθηκε αποδίδει θερμότητα στον εναλλάκτη θερμότητας και κατόπιν εκτονώνεται και οδηγείται στον απορροφητή. Το ρεύμα κορυφής του διαχωριστή αποτελεί ατμό ψυκτικού, ο οποίος οδηγείται αρχικά στον συμπυκνωτή, στη συνέχεια εκτονώνεται και τελικά ατμοποιείται ώστε τελικά να εισέλθει στον απορροφητή και να ολοκληρωθεί ο κύκλος ψύξης.

Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς COP (coefficient of Performance, COP) ορίζεται ως ο λόγος της θερμικής ισχύος που απορρίπτεται στον ατμοποιητή ($Q_{cooling}$) προς την απορροφούμενη θερμική ισχύ στον αναγεννητή (Q_{th}) [4].



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ροής κύκλου ψύξης με απορρόφηση. (Πηγή θερμότητας •, ισχυρό απορροφητικό •, ασθενές απορροφητικό •, ψυκτικό •).

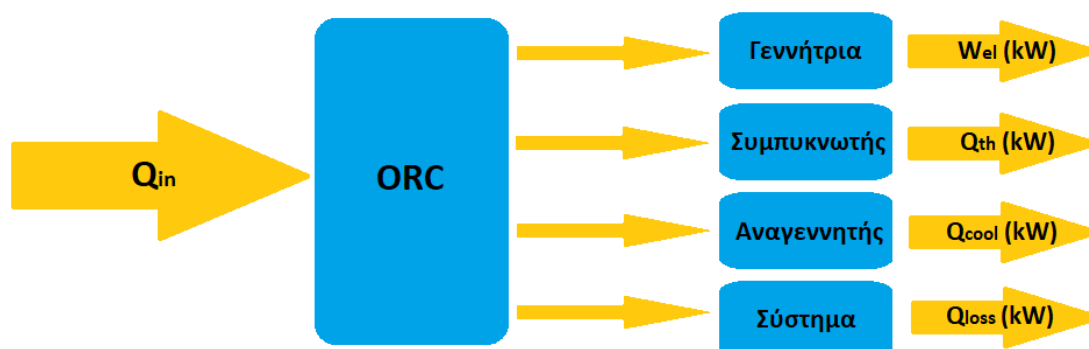
Αναλόγως τις ανάγκες της εφαρμογής χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συνδυασμοί ψυκτικού και απορροφητικού μέσου. Συγκεκριμένα στις εφαρμογές ψύξης αέρα άνω των 0 °C επιλέγεται ο συνδυασμός νερού – βρωμιούχου λιθίου (LiBr), όπου το νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό και το βρωμιούχο λίθιο ως

απορροφητικό μέσο. Σε εφαρμογές κατάψυξης, με θερμοκρασίες εξάτμισης μικρότερες των 0 °C επιλέγεται το ζεύγος αμμωνίας – νερού. Σε αυτή την περίπτωση η αμμωνία λειτουργεί ως ψυκτικό ενώ το νερό ως απορροφητικό μέσο.

2.3. Υπολογισμός βαθμού απόδοσης

Η προσδιδόμενη θερμότητα σε ένα σύστημα όπως είναι ο οργανικός κύκλος Rankine μπορεί να μετατραπεί σε:

- Ηλεκτρική ενέργεια, μέσω της γεννήτριας
- Θερμική ενέργεια, μέσω του συμπυκνωτή
- Παραγωγή ψύξης, μέσω αναγεννητή και ψύκτη απορρόφησης
- Απώλειες



Εικόνα 2.2: Ροή ενέργειας στον κύκλο Rankine.

α) Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_{el} = \frac{W_{turbine} - W_{pump}}{Q_{in}} \quad (2.1)$$

Όπου:

n_{el} : ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

$W_{turbine}$: το παραγόμενο έργο του στροβίλου (kW)

W_{pump} : το απαιτούμενο έργο της αντλίας (kW)

Q_{in} : η προσδιδόμενη θερμότητα στον κύκλο ORC (kW)

β) Ο θερμικό βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{Q_{th}}{Q_{in}} \quad (2.2)$$

Όπου:

n_{th} : ο θερμικός βαθμός απόδοσης

Q_{th} : θερμότητα που παραλαμβάνει το ψυχρό ρεύμα του συμπυκνωτή (kW)

γ) Το πηλίκο του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης προς τον θερμικό βαθμό απόδοσης ονομάζεται λόγος ηλεκτρισμού – θερμότητας (power to heat ratio):

$$PHR = \frac{n_{el}}{n_{th}} \quad (2.3)$$

δ) Τέλος ο βαθμός απόδοσης παραγωγής ψύξης υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_{cooling} = \frac{Q_{cooling}}{Q_{in}} \quad (2.4)$$

Όπου:

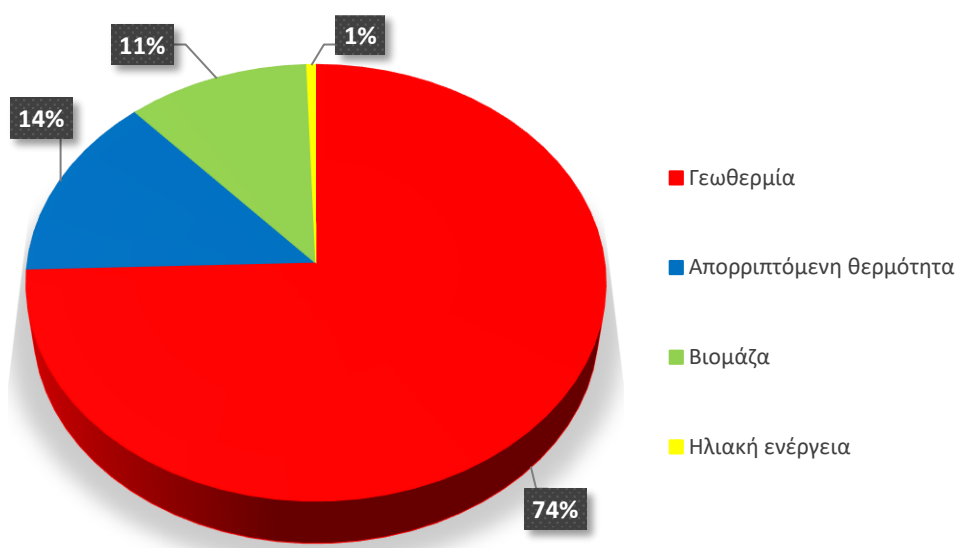
$Q_{cooling}$: η παραγόμενη ψύξη (kW)

2.4. Εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας

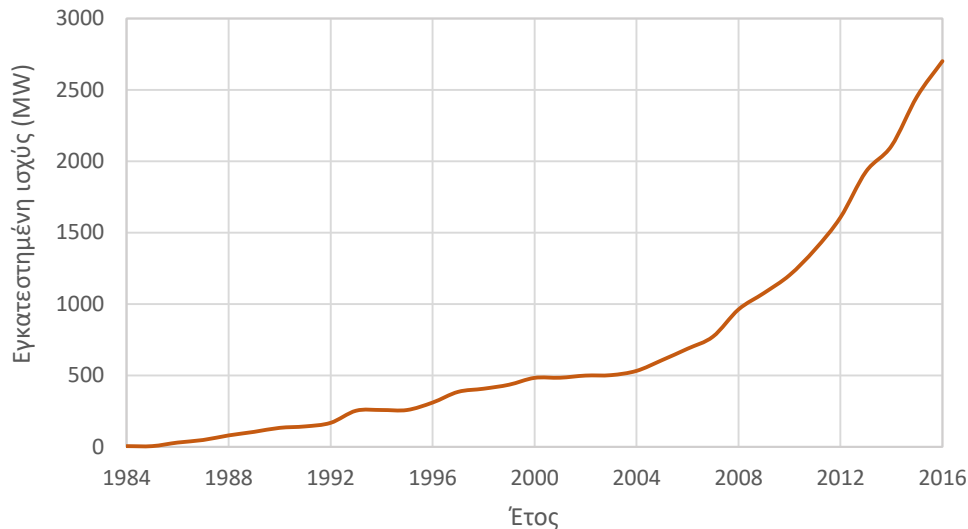
2.4.1. Εισαγωγή

Η πρώτη εφαρμογή κύκλου Rankine αναπτύχθηκε περίπου το 1960. Ωστόσο η ανάπτυξη των εφαρμογών έγινε πιο έντονη μετά το 1970. Σήμερα οι συνολικές εγκαταστάσεις οργανικού κύκλου Rankine ξεπερνούν τις 1800 με συνολική ισχύ 2,7 GW, ενώ υπάρχουν τουλάχιστον 27 κατασκευαστές ^[6]. Οι εφαρμογές χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας:

- Γεωθερμία
- Απορριπτόμενη θερμότητα μηχανών εσωτερικής καύσης
- Βιομάζα
- Ηλιακή ενέργεια



Διάγραμμα 2.1: Μερίδιο εγκατεστημένης ισχύς μονάδων οργανικού κύκλου Rankine ανά πηγή ενέργειας ^[7].



Διάγραμμα 2.2: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων οργανικού κύκλου Rankine ανά έτος [7].

2.4.2. Ηλιακές εφαρμογές

Η επιφάνεια της Γης δέχεται 170 W/m^2 ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε $7,14 \cdot 10^7 \text{ GW}$. Ένα πολύ μικρό κλάσμα αυτής της ενέργειας αρκεί για να καλυφθούν οι παγκόσμιες ανάγκες. Δύο πιθανές τεχνολογίες για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

- Συστοιχία φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Ηλιακοί συλλέκτες σε συνδυασμό με οργανικό κύκλο Rankine

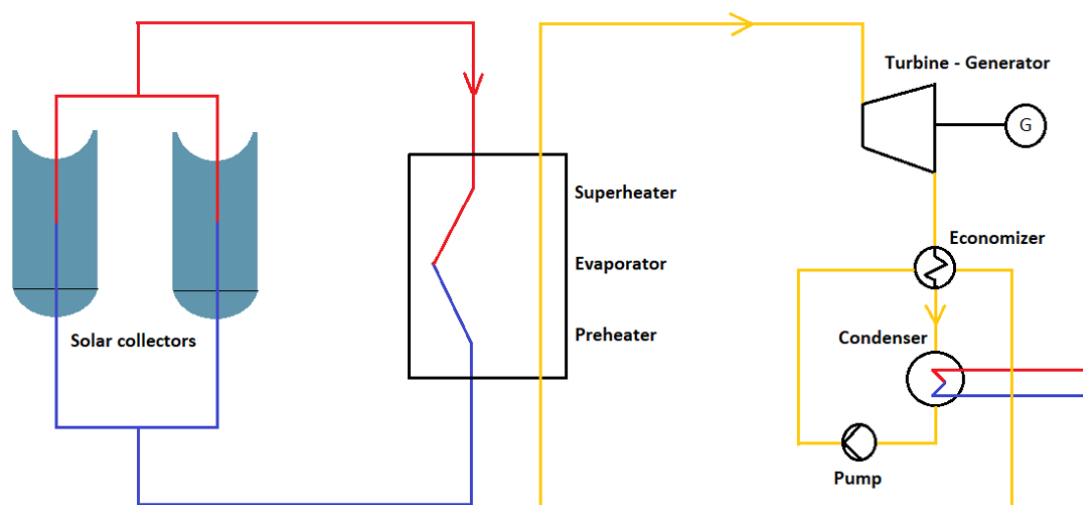
Το ερώτημα που προκύπτει είναι γιατί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία του οργανικού κύκλου Rankine σε συνδυασμό με μία συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών, έναντι μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών συλλεκτών, όσον αφορά εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας. Η απάντηση εντοπίζεται στην αποθήκευση ενέργειας. Η συστοιχία φωτοβολταϊκών συλλεκτών στοχεύει στην άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία λαμβάνει χώρα τις ώρες της ημέρας όπου οι συλλέκτες δέχονται ηλιακή ακτινοβολία. Επομένως τίθεται το ζήτημα του συγχρονισμού παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας συχνά αυξάνεται κατά τις βραδινές ώρες. Η λύση είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συστοιχία μπαταριών. Η τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει αυξημένο κόστος και μικρό χρόνο ζωής και ως αποτέλεσμα θέτει σε κίνδυνο την βιωσιμότητα ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Αντίθετα η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι πιο αποδοτική και οικονομική από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες. Έτσι ενώ τα φωτοβολταϊκά φαίνεται να είναι η βέλτιστη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών απομονωμένων συστημάτων, η ευκολία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καθιστά τις διατάξεις οργανικού κύκλου Rankine ανταγωνιστικές.

Πιθανές εφαρμογές του οργανικού κύκλου Rankine με συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος είναι:

- Συμπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για την κάλυψη αναγκών, απομακρυσμένων περιοχών .
- Αφαλάτωση (desalination) [8].
- Τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης.

Κατόπιν παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Οι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια στο σύστημα του οργανικού κύκλου Rankine. Στον στρόβιλο παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και στον συμπυκνωτή ρεύμα νερού παραλαμβάνει θερμότητα από το εργαζόμενο μέσω του κύκλου και οδηγείται προς τηλεθέρμανση. Στο σενάριο της τριπαραγωγής ο οικονομητήρας αντικαθίσταται από τον αναγεννητή, ο οποίος προσδίδει την απαραίτητη ενέργεια στον κύκλο ψύξεως με απορρόφηση (ενότητα 2.2.1.)

Όσον αφορά τις εφαρμογές αφαλάτωσης, μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον στρόβιλο του κύκλου οδηγείται στη διάταξη αντίστροφης ώσμωσης.



Εικόνα 2.3: Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας από παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες.

2.4.2.1. Παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες (Parabolic Trough Collector)

Ο παραβολικός επιμήκης ηλιακός θερμικός συλλέκτης αποτελεί την πιο ώριμη τεχνολογία συγκεντρωτικών συλλεκτών. Αποτελείται από το επίμηκες παραβολικό κάτοπτρο και τον δέκτη. Το κάτοπτρο αποτελείται από ανακλαστική επιφάνεια μικρού πάχους που εμφανίζει ανακλαστικότητα της τάξης του 93 %. Ο δέκτης είναι συνήθως ένας σωλήνας κενού, ώστε να παρουσιάζει υψηλή θερμική απόδοση. Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι νερό / ατμός, θερμικό έλαιο για θερμοκρασίες έως

400 °C ή τηγμένο άλας (ιοντικό υγρό) για θερμοκρασίες λειτουργίας έως 600 °C. Οι παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες συνήθως διαθέτουν σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου ενός βαθμού ελευθερίας ^{[9],[11]}.



Εικόνα 2.4: Παραβολικός ηλιακός συλλέκτης (PTC) ^[10].

Η απαιτούμενη επιφάνεια των ηλιακών συγκεντρωτικών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το σύστημα του οργανικού κύκλου Rankine, μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$A = \frac{W_{net}}{I_{solar} \cdot \eta_{elORC} \cdot \eta_{solar}} \quad (2.5)$$

Όπου:

A: η επιφάνεια των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών (m²)

W_{net}: το καθαρό έργο που παράγεται από τον οργανικό κύκλο Rankine (W)

η_{elorc}: ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης οργανικού κύκλου Rankine

η_{solar}: ο βαθμός απόδοσης των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών

Ο βαθμός απόδοσης των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta_{solar} = \eta_0 - \alpha_1 \cdot \left(\frac{T_f - T_a}{I_{solar}} \right) - \alpha_2 \cdot \left(\frac{T_f - T_a}{I_{solar}} \right)^2 \cdot I_{solar} \quad (2.6)$$

Όπου:

I_{solar}: η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (W/m²)

T_f : η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο των ηλιακών συλλεκτών ($^{\circ}\text{C}$)

T_a : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($^{\circ}\text{C}$)

$$n_0 = 0,75, \quad \alpha_1 = 0,11232 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}, \quad \alpha_2 = 0,00128 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^2}$$

2.4.2.2. Ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος (Evacuated Tube Collectors)

Οι ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται θερμοκρασίες έως 200°C . Αποτελείται από παράλληλες σειρές δίδυμων γυάλινων σωλήνων. Ο εσωτερικός γυάλινος σωλήνας φέρει έναν μεταλλικό σωλήνα προσαρτημένο σε ένα πτερύγιο απορρόφησης. Ο αέρας μεταξύ των δύο γυάλινων σωλήνων απομακρύνεται, δημιουργώντας κενό, μειώνοντας έτσι τις απώλειες θερμότητας. Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος υπολογίζεται από την σχέση 6 όπου:

$$n_0 = 0,665, \quad \alpha_1 = 0,59 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}, \quad \alpha_2 = 0,0019 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^2}$$



Εικόνα 2.5: Ηλιακός συλλέκτης με σωλήνες κενού αέρος (ETC) ^[12].

2.4.3. Εφαρμογές γεωθερμίας

Με τον όρο γεωθερμική ενέργεια νοείται η ενέργεια του εσωτερικού της γης που απελευθερώνεται προς την επιφάνεια της. Η διαφορά της θερμοκρασίας του πυρήνα της Γης και της επιφάνειας ανέρχεται περίπου στους 3000°C και προκαλεί συνεχή θερμική ροή $0,06 \text{ W/m}^2$. Βέβαια η θερμική ροή ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία. Η ενέργεια αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες θέρμανσης ή παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια διακρίνεται ανάλογα με την θερμοκρασία της σε 3 κατηγορίες:

- Χαμηλής ενθαλπίας, όπου το ρευστό έχει θερμοκρασίες από 25 έως 100 °C.
- Μέσης ενθαλπίας, όπου το ρευστό έχει θερμοκρασίες από 90 έως 150 °C.
- Υψηλής θερμοκρασίας, όπου το ρευστό έχει θερμοκρασίες από 150 °C και πάνω.

Οι εφαρμογές οργανικού κύκλου Rankine εστιάζονται κυρίως σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ενθαλπίας, σε θερμοκρασίες άνω των 80 °C. Το 75 % των εγκατεστημένων εφαρμογών οργανικού κύκλου Rankine βασίζονται στην γεωθερμία ως πηγή θερμότητας. Ενδεικτικά αναφέρεται η εφαρμογή υβριδικού συστήματος γεωθερμίας και ηλιακών συλλεκτών σε συνδυασμό με μονάδα οργανικού κύκλου Rankine εγκατεστημένο στο Νεπάλ ^[13]. Η θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας από την γεωθερμική πηγή ανέρχεται στους 70 °C. Στο σύστημα χρησιμοποιεί το R134a ως οργανικό ρευστό, με ροή 1kg/s. Η ηλεκτροπαραγωγή είναι ίση με 17,5 kW και το κόστος 0,17 δολάρια ανά κιλοβατώρα.

2.4.4. Εφαρμογές βιομάζας

Ως βιομάζα ορίζεται οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς. Τα είδη βιομάζας είναι τα εξής:

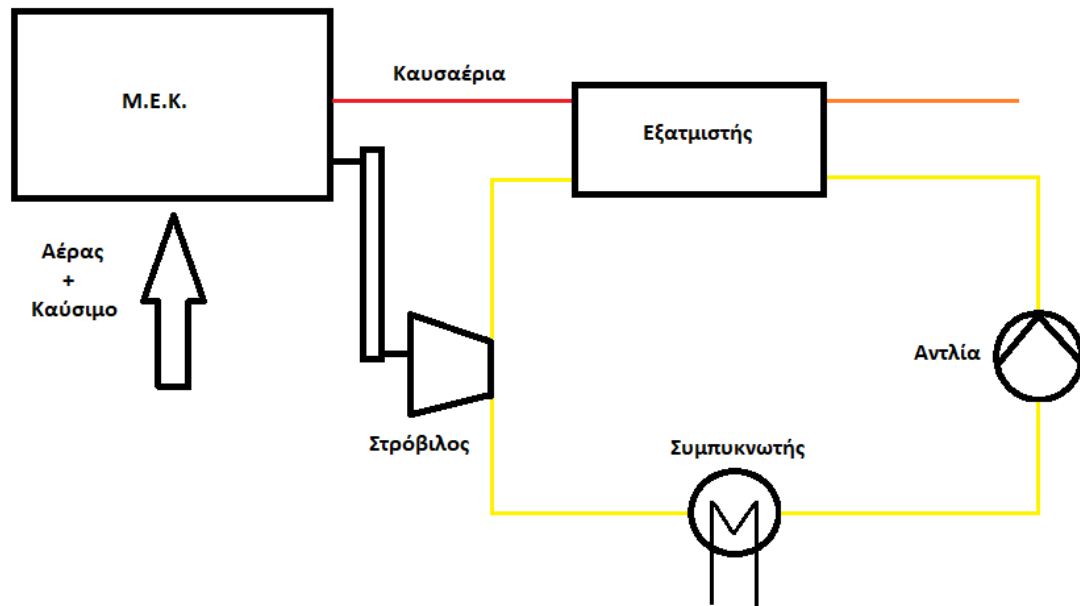
- Υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής (άχυρα, κλαδιά δέντρων, κτηνοτροφικά απόβλητα κ.α.).
- Υποπροϊόντα από την επεξεργασία των παραπάνω υλικών (πριονίδι, ελαιοπυρηνόξυλα κ.α.).
- Βιολογικής προέλευσης αστικά λύματα και σκουπίδια.

Η καύση της βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές καύσης βιομάζας σε συνδυασμό με τον οργανικό κύκλο Rankine που στοχεύουν στην συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (Biomass ORC CHP Plants). Τα συστήματα βιομάζας – ORC εμφανίζουν υψηλή θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας (π.χ. από την καύση ξύλου), επομένως μπορεί να αποβούν αρκετά αποδοτικά με την κατάλληλη επιλογή εργαζόμενου μέσου.

Η εφαρμογή των παραπάνω συστημάτων εμφανίζει μεγάλη σκοπιμότητα σε αποκεντρωμένες περιοχές, απομακρυσμένες από το δίκτυο, όπου η αγροτική ενασχόληση είναι αρκετά ανεπτυγμένη. Καίγοντας τα υπολείμματα των αγροτικών και κτηνοτροφικών εργασιών παρέχεται η απαραίτητη ενέργεια για την συμπαραγωγή. Για παράδειγμα κατά την συγκομιδή της ελιάς, τόσο τα κλαδιά όσο και τα υπολείμματα των καρπών αποτελούν εξαιρετική πηγή θερμότητας. Ωστόσο η εφαρμογή των μονάδων βιομάζας – ORC δεν περιορίζεται σε μικρή κλίμακα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την εγκατάσταση 1000 kW_{el} στο Lienz της Αυστρίας ^[14]

2.4.5. Εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας από μηχανές εσωτερικής καύσης

Η εκμετάλλευση της αποβαλλόμενης θερμότητας από μηχανές εσωτερικής καύσης και συγκεκριμένα από κινητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Οργανικού κύκλου Rankine και να συμβάλει στην μείωση της κατανάλωσης του οχήματος.



Εικόνα 2.6: Εκμετάλλευση θερμότητας καυσαερίων κινητήρα από σύστημα οργανικού κύκλου Rankine για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κεφάλαιο 3. Οργανικά ρευστά

3.1. Εισαγωγή

Η επιλογή του οργανικού ρευστού που θα λειτουργήσει ως εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου Rankine, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα. Επηρεάζει άμεσα τον βαθμό απόδοσης της μονάδας, το ποσοστό αξιοποίησης της διαθέσιμης θερμότητας, το μέγεθος και το κόστος της εγκατάστασης.

3.2. Επιλογή οργανικού ρευστού

Η επιλογή του οργανικού ρευστού καθίσταται αρκετά περίπλοκη εάν αναλογιστεί κανείς το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας ενός συστήματος οργανικού κύκλου Rankine, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από 80 °C για εφαρμογές αξιοποίησης γεωθερμικής ή ηλιακής ενέργειας έως και 500 °C για εφαρμογές καύσης βιομάζας. Επιπλέον με εξαίρεση ορισμένα οργανικά ρευστά των οποίων η κρίσιμη θερμοκρασία είναι είτε πολύ μεγάλη είτε πολύ μικρή, τα υποψήφια οργανικά ρευστά είναι εκατοντάδες συμπεριλαμβανομένων ^[15]:

- Υδρογονάνθρακες (HC) , χρησιμοποιούνται αλλά εμφανίζουν υψηλή αναφλεξιμότητα.
- Υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC), πρόκειται να αποσυρθούν.
- Υδροφθοράνθρακες (HFC), χρησιμοποιούνται ευρέως.
- Χλωροφθοράνθρακες (CFC), έχουν αποσυρθεί.
- Υπερφθοράνθρακες (PFC), σταθερά και αδρανή ρευστά, έντονα διαβρωτικά.
- Αιθέρες, εμφανίζουν μη επιθυμητές ιδιότητες (τοξικότητα, υψηλή αναφλεξιμότητα, διαβρωτικοί).
- Αλκοόλες, εμφανίζουν μη επιθυμητές ιδιότητες (τοξικότητα, υψηλή αναφλεξιμότητα, διαβρωτικές).
- Σιλοξάνες.

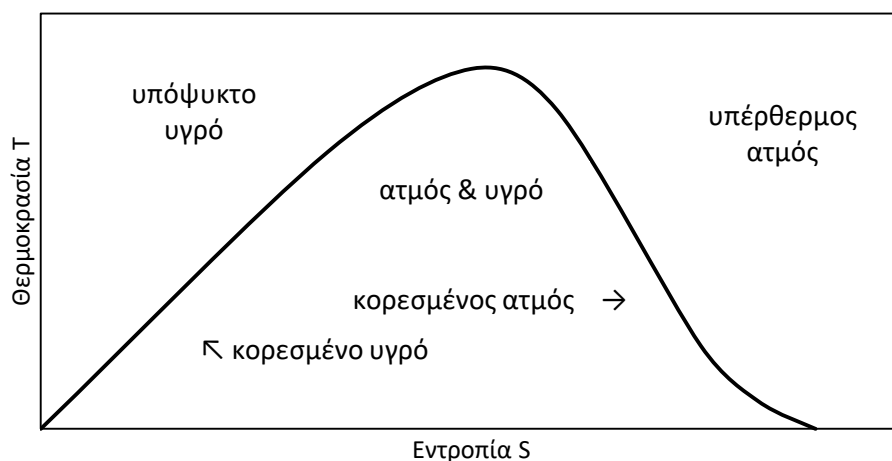
Η επιλογή του οργανικού ρευστού που θα λειτουργήσει ως εργαζόμενο μέσο στον οργανικό κύκλο Rankine εξαρτάται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ^{[16],[17]}:

- Θερμοδυναμική απόδοση του οργανικού ρευστού (π.χ. βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, βαθμός απόδοσης ψύξης, κτλ.).
- Κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση.
- Ευφλεκτότητα.
- Τοξικότητα.
- Θερμική και χημική σταθερότητα.

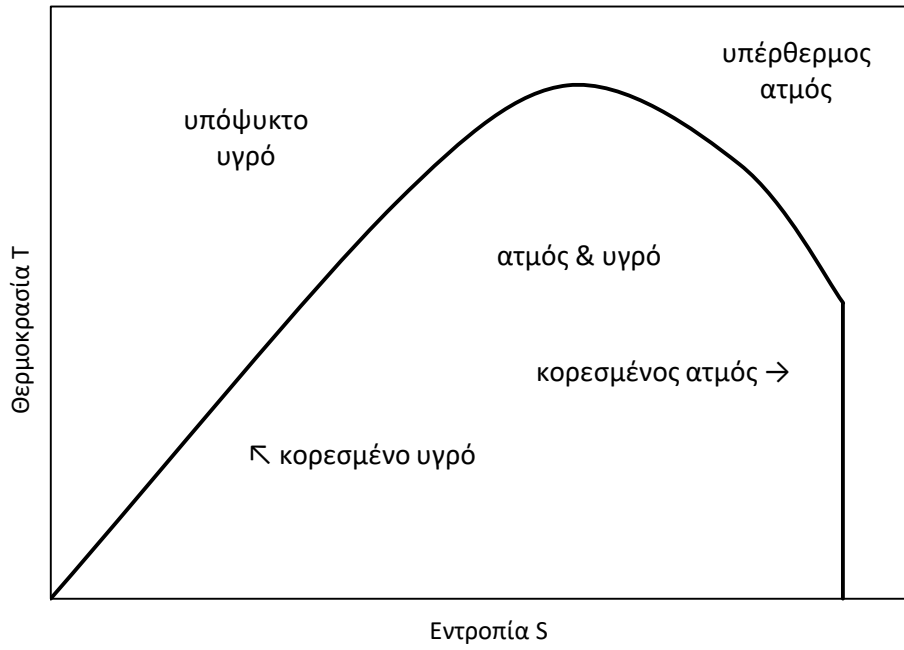
- Δείκτης ODP (Ozone Depletion Potential). Ο περιβαλλοντικός δείκτης ODP εκφράζει την υποβάθμιση που θα μπορούσε να προκαλέσει στην στιβάδα του όζοντος μία χημική ένωση, σε σχέση με το ψυκτικό R-11 (Freon-11).
- Δείκτης GWP (Global Warming Potential). Ο περιβαλλοντικός δείκτης GWP εκφράζει την συνεισφορά ενός αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, σε σύγκριση με το διοξείδιο του άνθρακα ($GWP_{CO_2} = 1$).
- Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής του εκάστοτε συστήματος (μη διαβρωτικό).
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης και πυκνότητα με στόχο την αύξηση παραγωγής έργου στην τουρμπίνα.
- Ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας (χαμηλό ιξώδες, υψηλή θερμική αγωγιμότητα).
- Κόστος και διαθεσιμότητα.

Τα οργανικά ρευστά κατηγοριοποιούνται σε 3 κατηγορίες αναλόγως την κλίση της καμπύλης κορεσμού του διαγράμματος θερμοκρασίας – εντροπίας (T-S) ^{[19],[20]}.

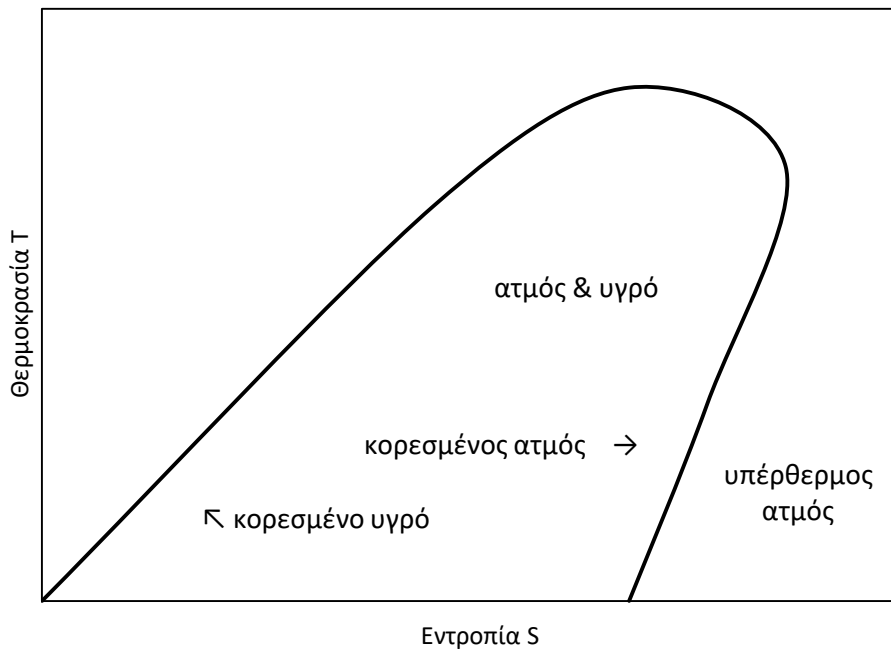
- «Υγρά» οργανικά ρευστά, όπου η κλίση του διαγράμματος T-S είναι αρνητική (διάγραμμα 3-1).
- Ισεντροπικά οργανικά ρευστά, όπου η κλίση του διαγράμματος T-S είναι κάθετη (διάγραμμα 3-2).
- «Ξηρά» οργανικά ρευστά, όπου η κλίση του διαγράμματος T-S είναι θετική (διάγραμμα 3-3).



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα T-S «υγρού» οργανικού ρευστού ^[18].



Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα T-S ισηντροπικού οργανικού ρευστού [18].



Διάγραμμα 3.3: Διάγραμμα T-S «ξηρού» οργανικού ρευστού [18].

Ένα ισεντροπικό ρευστό το οποίο εισέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού στον στρόβιλο, εκτονώνεται κατά μήκος της κατακόρυφης γραμμής του αντίστοιχου διαγράμματος T-S, με αποτέλεσμα η έξοδος του στροβίλου να είναι επίσης κορεσμένος ατμός. Σαν αποτέλεσμα δεν απαιτείται προσθήκη οικονομητήρα στην έξοδο του στροβίλου ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει ανάγκη για υπερθέρμανση του ρευστού πριν την είσοδο του στον στρόβιλο. Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν τα ισεντροπικά ρευστά ιδανικά εργαζόμενα μέσα για εφαρμογές οργανικού κύκλου Rankine [22].

Ένα «αρκετά ξηρό» οργανικό ρευστό εξερχόμενο από τον στρόβιλο βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Η επιπλέον ενέργεια που διαθέτει θα αποδοθεί στον συμπυκνωτή ως μη ωφέλιμη. Προκειμένου να γίνει εκμετάλλευσή αυτής της ενέργειας μπορεί να προστεθεί ένας οικονομητήρας στην έξοδο του στροβίλου ώστε να προθερμανθεί το ρεύμα εξόδου της αντλίας και τελικά να αυξηθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης. Ωστόσο η εγκατάσταση του οικονομητήρα συνοδεύεται με επιπλέον κόστος.

Στην περίπτωση ενός «υγρού» η έξοδος του στροβίλου διαθέτει σημαντική ποσότητα κορεσμένου υγρού σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα T-S. Η παρουσία υγρού φθείρει τα εξαρτήματα του στροβίλου ενώ ταυτόχρονα μειώνει τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του. Με στόχο την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου απαιτείται η υπερθέρμανση του ρευστού πριν την είσοδο στον στρόβιλο. Εξαιτίας του μειωμένου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας κατά την αέρια φάση, η επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του υπερθερμαντήρα αυξάνεται σημαντικά, αυξάνοντας ταυτόχρονα και το κόστος της εγκατάστασης.

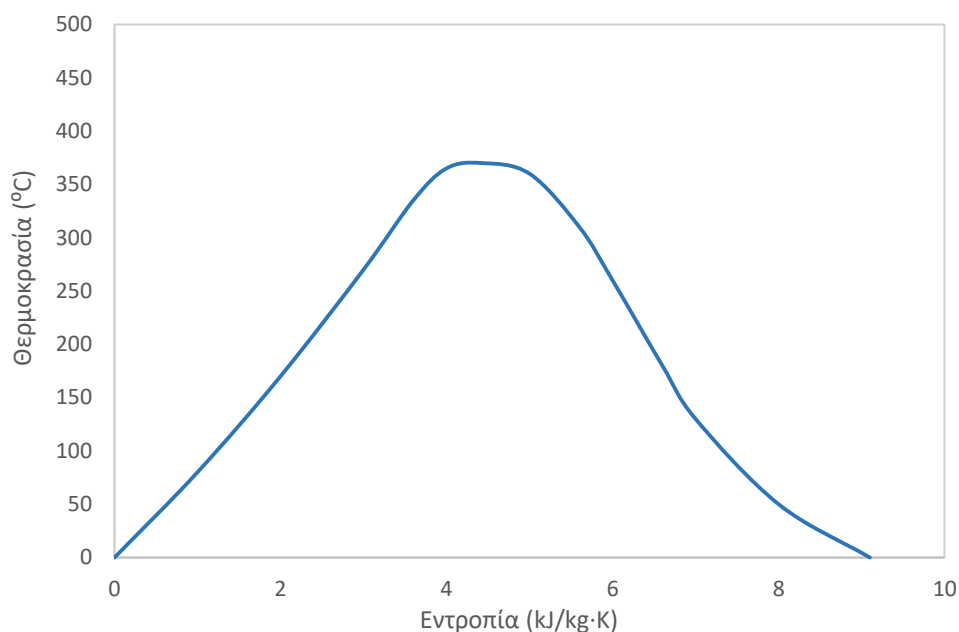
3.3. Το νερό ως εργαζόμενο μέσο

Ο συμβατικός κύκλος Rankine χρησιμοποιεί το νερό ως εργαζόμενο μέσο. Το νερό παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα [21]:

- Χαμηλό κόστος και αφθονία.
- Μηδενικοί περιβαλλοντικοί δείκτες ODP και GWP.
- Θερμική και χημική σταθερότητα.
- Μη τοξικό και μη εύφλεκτο.
- Χαμηλό ιξώδες (συνεπάγεται μειωμένο κόστος άντλησης).
- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα.

Ωστόσο εμφανίζει ορισμένα μειονεκτήματα:

- Ανάγκη για υπερθέρμανση.
- Υψηλή πίεση ατμοποίησης (κρίσιμη πίεση 220,64 bar, κρίσιμη θερμοκρασία 373,95 °C).
- Πολυβάθμιος στρόβιλος.
- Ανάγκη υψηλών θερμοκρασιών.



Διάγραμμα 3.4: Καμπύλη κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας νερού [23].

3.4. Ιδιότητες και χαρακτηριστικά των υπό μελέτη οργανικών ρευστών

Κατόπιν παρουσιάζονται τα οργανικά ρευστά τα οποία δοκιμάστηκαν κατά τις προσομοιώσεις του οργανικού κύκλου Rankine, καθώς και ορισμένες από τις ιδιότητες τους που συνέβαλαν στην επιλογή των βέλτιστων.

Πίνακας 3.1: Σημείο βρασμού, κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine [30].

α.α.	Οργανικό ρευστό	Εναλλακτική ονομασία	Χημικός τύπος	Σημείο βρασμού (°C)	P _c (bar)	T _c (°C)
1	pentane	-	C ₅ H ₁₂	36,05	33,67	196,55
2	isopentane (2-methyl-butane)	-	C ₅ H ₁₂	27,83	33,78	187,20
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane	R-134a	C ₂ H ₂ F ₄	-26,07	40,59	101,06
4	Octafluorocyclobutane	R-C138	C ₄ F ₈	-5,80	27,78	114,00
5	Methyl formate	R-611	C ₂ H ₄ O ₂	31,80	60,00	214,30
6	Decafluorobutane	R-31(1B)	C ₄ F ₁₀	-1,70	23,23	113,00
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane	R-E245	C ₃ H ₃ F ₅ O	29,30	34,20	170,00
8	N-hexane	-	C ₆ H ₁₄	69,00	30,58	234,70
9	N-butane	R-600	C ₄ H ₁₀	-0,50	37,96	151,98
10	Isobutane	R-600A	C ₄ H ₁₀	-11,75	36,28	134,66
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane	R-227	C ₃ HF ₇	-16,34	29,25	101,75
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane	R-245cb	C ₃ H ₃ F ₅	-17,40	31,37	107,00
13	Ethyl-amine	R-631	C ₂ H ₇ N	16,60	56,20	183,30
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane	R-123	C ₂ HCl ₂ F ₃	27,82	36,62	183,68
15	toluene	-	C ₇ H ₈	110,60	41,00	319,00

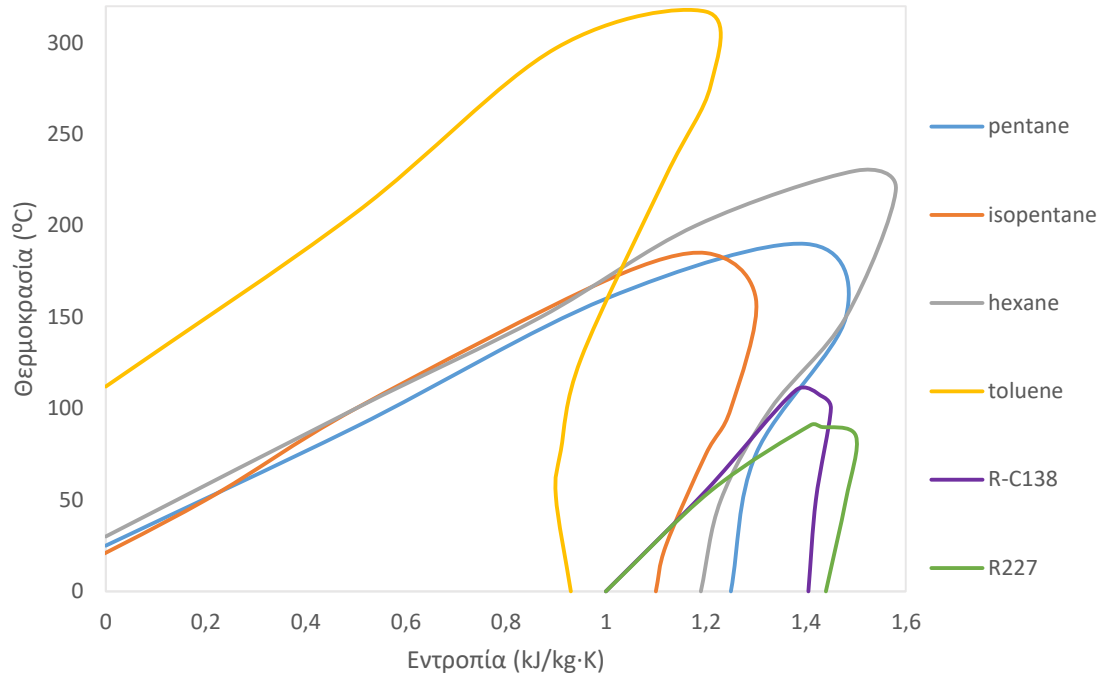
Πίνακας 3.2: Περιβαλλοντικοί δείκτες ODP και GWP των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine [24],[25].

α.α.	Οργανικό ρευστό	ODP (ozone depletion potential relative to R11)	GWP (Global Warming Potential relative to CO ₂)	Χρόνος ζωής στην ατμόσφαιρα (χρόνια)	Ιξώδες (μPas, 25 °C, 1 bar)
1	pentane	0,00	20,0	0,009	199,54
2	isopentane	0,00	4,0	0,009	213,50
3	R-134a	0,00	1430,0	14,000	378,70
4	R-C138	0,00	10250,0	3000,000	109,00
5	R-611	0,00	25,0	0,197	355,00
6	R-31(1B)	0,00	8860,0	2600,000	465,00
7	R-E345	0,00	708,0	1,300	12,17
8	N-hexane	0,00	50,0	0,005	303,13
9	N-butane	0,00	4,0	0,017	203,41
10	Isobutane	0,00	3,0	0,018	227,77
11	R-227	0,00	3220,0	38,900	423,44
12	R-245cb	0,00	693,0	1,800	537,38
13	R-631	0,00	0,0	0,002	176,00
14	R-123	0,01	77,0	1,300	404,20
15	toluene	0,00	3,3	0,005	560,03

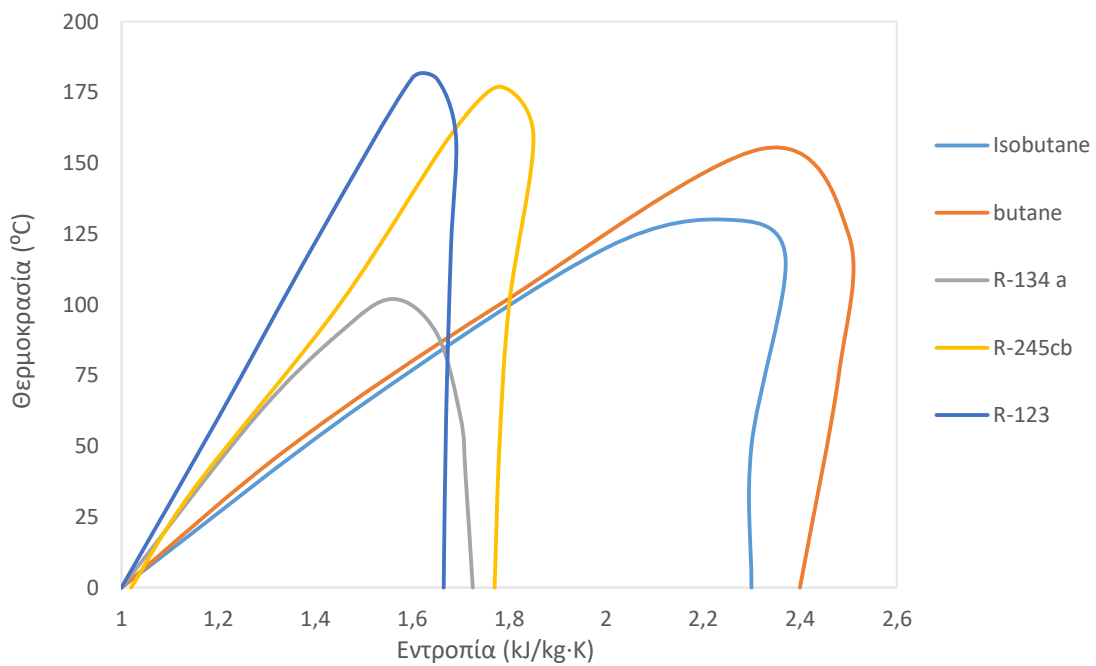
Πίνακας 3.3: Επίπεδα τοξικότητας και ευφλεκτότητας, θερμοκρασία αυτανάφλεξης και κόστος των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine [30].

α.α.	Οργανικό ρευστό	Τοξικότητα	Ευφλεκτότητα	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	κόστος (€/L)
1	pentane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	260	0,5
2	isopentane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	460	0,6
3	R-134a	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	μη εύφλεκτο	743	9,7
4	R-C138	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αφλεκτο	-	700,0
5	R-611	ιδιαίτερα τοξικό	αρκετά εύφλεκτο	449	350,9
6	R-31(1B)	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	1300,0
7	R-E345	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	μη εύφλεκτο	770	400,0
8	N-hexane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	234	0,3
9	N-butane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	287	6,0
10	Isobutane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	460	6,4
11	R-227	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	350,0
12	R-245cb	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	9000,0
13	R-631	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	385	380,0
14	R-123	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	730	16,7
15	toluene	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	480	0,4

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας - εντροπίας των υπό μελέτη οργανικών ρευστών.



Διάγραμμα 3.5: Καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας υπό μελέτη οργανικών ρευστών (i) ^{[26],[27]}.



Διάγραμμα 3.6: Καμπύλες κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας υπό μελέτη οργανικών ρευστών (ii) ^{[28],[29]}.

Πίνακας 3.4: Χαρακτηρισμός οργανικών ρευστών με βάση την κλίση της καμπύλης κορεσμού (διάγραμμα T-S) [22].

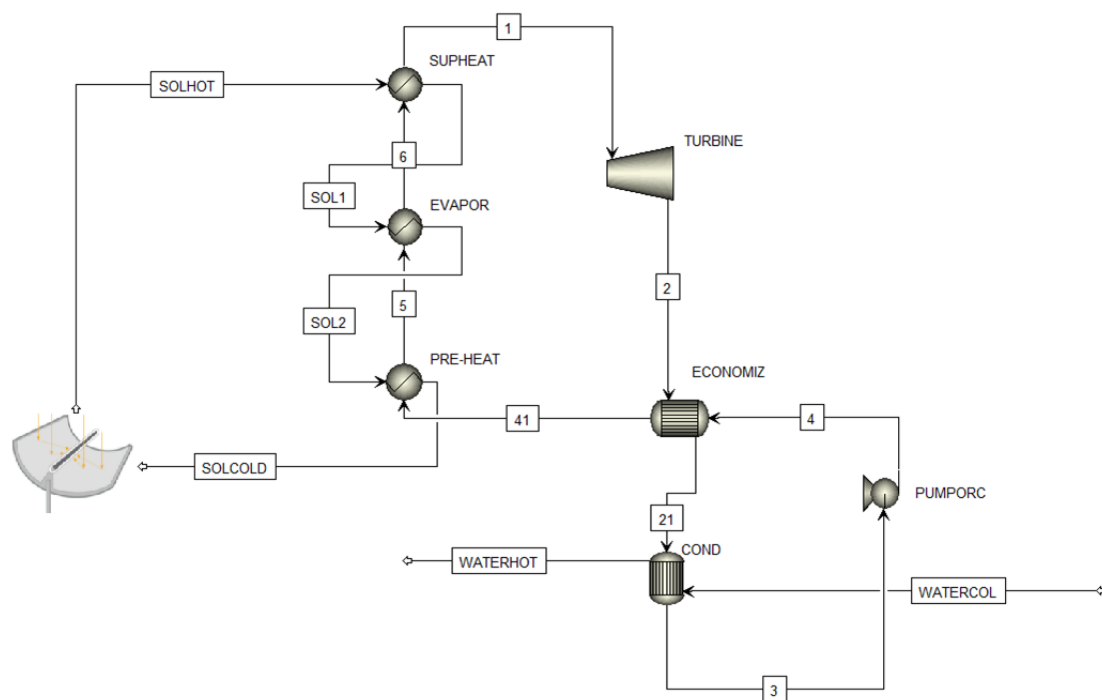
α.α.	Οργανικό ρευστό	Εναλλακτική ονομασία	Κλίση διαγράμματος T - S	Χαρακτηρισμός οργανικού ρευστού
1	pentane	-	θετική	ξηρό
2	isopentane (2-methyl-butane)	-	θετική	ξηρό
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane	R-134a	αρνητική	υγρό
4	Octafluorocyclobutane	R-C138	θετική	ξηρό
5	Methyl formate	R-611	αρνητική	υγρό
6	Decafluorobutane	R-31(1B)	θετική	ξηρό
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane	R-E245	θετική	ξηρό
8	N-hexane	-	θετική	ξηρό
9	N-butane	R-600	θετική	ξηρό
10	Isobutane	R-600A	θετική	ξηρό
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane	R-227	θετική	ξηρό
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane	R-245cb	θετική	ξηρό
13	Ethyl-amine	R-631	αρνητική	υγρό
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane	R-123	θετική	ξηρό
15	toluene	-	θετική	ξηρό

Κεφάλαιο 4. Προσομοιώσεις οργανικού κύκλου Rankine - συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

4.1. Εισαγωγή

Κατόπιν παρουσιάζονται τα δύο σενάρια προσομοίωσης του οργανικού κύκλου Rankine που στοχεύουν στην συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η διαφορά των σεναρίων εντοπίζεται στην παρουσία οικονομητήρα στην έξοδο του στροβίλου.

4.2. Διάγραμμα ροής οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine με στόχο την μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής χρησιμοποιώντας οικονομητήρα.

4.2.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα)

Αρχικά το υπέρθερμο ρευστό (ρεύμα 1) εκτονώνεται στον στρόβιλο (TURBINE), προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν η έξοδος του στρόβιλου (ρεύμα 2) εισέρχεται στον οικονομητήρα (εναλλάκτης θερμότητας ECONOMIZ) όπου απορρίπτει θερμότητα στο ρεύμα προς προθέρμανση (ρεύμα 41). Η έξοδος του οικονομητήρα (ρεύμα 21) εισέρχεται στον συμπυκνωτή (COND). Το ρεύμα 3 που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή βρίσκεται σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού και οδηγείται προς την αντλία. Την θερμότητα που απορρίπτεται στον συμπυκνωτή την παραλαμβάνει ρεύμα νερού (ρεύμα WATERCOL) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τηλεθέρμανση (συμπαγωγή). Στη συνέχεια η αντλία (PUMPORC) αυξάνει την πίεση στο κατάλληλο επίπεδο και το ρεύμα εξόδου της αντλίας (ρεύμα 4) αφού πρώτα παραλάβει θερμότητα από τον οικονομητήρα οδηγείται για προθέρμανση στον 1^ο εναλλάκτη (PRE-HEAT/προθερμαντήρας). Η έξοδος του προθερμαντήρα (ρεύμα 5) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και οδηγείται στον 2^ο εναλλάκτη (EVAPOR/εξατμιστήρας) ώστε να παραλάβει την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Η έξοδος του εξατμιστήρα (ρεύμα 6) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και οδηγείται στον 3^ο εναλλάκτη (SUPHEAT) όπου θα υπερθερμανθεί. Ο κύκλος κλείνει με την έξοδο του υπερθερμαντήρα (ρεύμα 1) η οποία οδηγείται εκ νέου στον στρόβιλο. Η απαραίτητη θερμότητα στο κύκλωμα των τριών εναλλακτών δίνεται από το ρεύμα νερού που προέρχεται από τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες ή τους ηλιακούς συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος για τις εφαρμογές 90 °C.

Πίνακας 4.1: Περιγραφή ρευμάτων (streams) και στοιχείων εξοπλισμού (blocks) διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα).

Ρεύμα / εξοπλισμός	Περιγραφή
1	έξοδος υπερθερμαντήρα
2	έξοδος τουρμπίνας
3	έξοδος συμπυκνωτή
4	έξοδος αντλίας
5	έξοδος προθερμαντήρα
6	έξοδος εξατμιστήρα
21	θερμή έξοδος οικονομητήρα
41	ψυχρή έξοδος οικονομητήρα
SOLHOT	έξοδος ηλιακών συλλεκτών
SOL1	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ υπερθερμαντήρα και εξατμιστήρα
SOL2	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ εξατμιστήρα και προθερμαντήρα
SOLCOLD	είσοδος ηλιακών συλλεκτών
WATERCOL	είσοδος κρύου νερού στον συμπυκνωτή
WATERHOT	έξοδος θερμού νερού από τον συμπυκνωτή
TURBINE	στρόβιλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
COND	συμπυκνωτής κύκλου ORC
PUMPORC	αντλία κύκλου ORC
PRE-HEAT	εναλλάκτης θερμότητας προθέρμανσης / Προθερμαντήρας
EVAPOR	εναλλάκτης θερμότητας εξάτμισης / Εξατμιστήρας
SUPERHEAT	εναλλάκτης θερμότητας υπερθέρμανσης / Υπερθερμαντήρας
ECONOMIZ	εναλλάκτης θερμότητας εξοικονόμησης θερμότητας / Οικονομητήρας

4.2.2. Προσδιορισμός προδιαγραφών διαγράμματος ροής βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα)

Κατά τον σχεδιασμό του οργανικού κύκλου Rankine με στόχο τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής είναι επιθυμητή η εφαρμογή των παρακάτω προδιαγραφών:

- Πίεση εξόδου του στροβίλου, χαμηλότερη δυνατή.
- Υπερθέρμανση στον υπερθερμαντήρα όσο το δυνατόν χαμηλότερη.
- Υπόψυξη στον συμπυκνωτή, όσο το δυνατόν χαμηλότερη.
- Πίεση συμπύκνωσης, χαμηλότερη δυνατή.
- Πτώσεις πίεσης, όσο το δυνατόν χαμηλότερες.

Συγκεκριμένα οι προδιαγραφές της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής (χρήση οικονομητήρα).

Ρεύμα / εξοπλισμός	Προδιαγραφή
TURBINE	πίεση εξόδου
TURBINE	ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
ECONOMIZ	θερμοκρασιακή πτώση θερμού ρεύματος
COND	έξοδος συμπυκνωτή υπόψυκτο υγρό
COND	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά θερμού - ψυχρού ρεύματος
PUMPORC	πίεση εξόδου
PREHEAT	έξοδος προθερμαντήρα κορεσμένο υγρό
EVAPOR	έξοδος εξατμηστήρα κορεσμένος ατμός
SUPHEAT	έξοδος υπερθερμαντήρα υπέρθερμος ατμός
SUPHEAT	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά θερμού - ψυχρού ρεύματος

4.2.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C), της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.

α.α.	Οργανικό ρευστό	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_21	T_41	T_WATERCOL	T_WATERHOT	T_SOLHOT	T_SOL1	T_SOL2	T_SOLCOLD
1	pentane	181,60	107,23	36,29	37,52	171,60	171,60	43,23	86,86	10,00	30,48	190,00	188,07	177,55	160,30
2	isopentane (2-methyl-butane)	181,67	102,37	27,14	28,64	171,67	171,67	34,04	81,82	10,00	26,27	190,00	187,83	179,76	161,27
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	81,48	33,73	21,65	22,87	71,48	71,48	28,23	26,31	10,00	20,52	90,00	88,48	73,55	64,27
4	Octafluorocyclobutane / R-C138	123,73	68,06	18,42	20,07	113,72	113,72	25,56	51,91	10,00	17,13	132,00	128,25	125,49	108,17
5	Methyl formate / R-611	180,88	45,12	31,44	32,60	170,88	170,88	37,62	37,34	10,00	28,50	190,00	188,78	172,08	152,61
6	Decafluorobutane / R-31(1B)	81,05	59,15	22,82	23,35	71,05	71,05	28,65	46,66	10,00	15,11	90,00	88,30	76,44	71,18
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	166,81	89,41	28,87	30,07	156,81	156,81	35,41	69,54	10,00	20,43	175,00	173,90	169,52	159,93
8	N-hexane	181,28	136,56	68,85	69,41	171,28	171,28	74,56	118,51	10,00	29,15	190,00	188,42	173,75	163,66
9	N-butane / R-600	151,82	70,19	27,30	29,32	141,82	141,82	34,69	55,44	10,00	27,26	160,00	157,40	149,44	130,07
10	Isobutane / R-600A	136,93	62,68	26,19	28,45	126,93	126,93	33,68	49,74	10,00	25,80	145,00	142,28	135,36	117,85
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	81,75	49,88	21,01	21,91	71,75	71,76	27,38	37,88	10,00	16,62	90,00	88,69	79,43	73,73
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	81,99	47,89	21,23	22,12	71,99	71,99	27,39	36,57	10,00	18,21	90,00	88,55	76,48	69,82
13	Ethyl-amine / R-631	181,88	48,51	34,75	36,81	171,88	171,88	42,01	40,96	10,00	32,87	190,00	187,13	175,39	144,48
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	181,87	75,18	27,80	29,42	171,87	171,87	36,68	58,33	10,00	18,03	190,00	189,06	185,52	176,19
15	toluene	241,44	183,47	102,14	102,66	231,44	231,44	112,47	158,91	10,00	27,54	250,00	248,90	234,17	224,24

Πίνακας 4.4: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine βέλτιστου βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής.

α.α.	Οργανικό ρευστό	Ροή μάζας οργανικού ρευστού (kg/h)	Ροή μάζας ρεύματος νερού ηλιακών συλλεκτών (kg/h)	Πίεση αντλίας (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου (bar)	Θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών (°C)	Ροή μάζας ρεύματος νερού απαγωγής θερμότητας στον συμπηκνωτή (kg/h)	Ισχύς στροβίλου (kW)	Ισχύς αντλίας ORC (kw)	Προσδιόμενη θερμότητα Q_in (kW)	n_el_orc (%)	Heating (kW)	nth (%)	PHR
1	pentane	250	800	23	1,013	190	1000	7,010	0,313	32,52	20,59	24,47	75,23	0,274
2	isopentane (2-methyl-butane)	250	800	27	1,013	190	1200	7,220	0,367	31,48	21,77	23,32	74,09	0,294
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	250	450	22	6,000	90	1000	1,520	0,114	14,65	9,60	12,57	85,79	0,112
4	Octafluorocyclobutane / R-C138	250	300	27	2,500	132	870	1,575	0,140	9,25	15,51	7,41	80,10	0,194
5	Methyl formate / R-611	250	800	31	1,013	190	1400	8,363	0,271	40,73	19,87	30,93	75,94	0,262
6	Decafluorobutane / R-31(1B)	250	300	9,5	2,500	90	1000	0,752	0,040	7,15	9,96	6,11	85,46	0,117
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E24	250	800	26,8	1,013	175	1000	3,344	0,163	16,33	19,47	12,46	76,31	0,255
8	N-hexane	250	800	11,2	1,013	190	1000	4,914	0,144	28,90	16,50	22,88	79,15	0,209
9	N-butane / R-600	250	800	32,3	2,600	160	1200	5,988	0,452	31,64	17,50	24,74	78,19	0,224
10	Isobutane / R-600A	250	800	32	3,600	145	1200	4,910	0,449	28,36	15,73	22,65	79,87	0,197
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	250	450	15,5	4,000	90	1000	1,010	0,071	9,28	10,12	7,92	85,31	0,119
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	250	450	15,4	4,100	90	1000	1,252	0,083	11,51	10,16	9,80	85,21	0,119
13	Ethyl-amine / R-631	250	800	47,2	2,000	190	1400	9,590	0,590	49,36	18,23	38,25	77,49	0,235
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	250	800	30,5	1,013	190	1200	3,308	0,176	15,31	20,45	11,52	75,25	0,272
15	toluene	250	800	12,2	1,013	250	1200	5,412	0,123	31,81	16,63	25,14	79,04	0,210

4.2.4. Επιλογή βέλτιστων οργανικών ρευστών

Τα κριτήρια επιλογής του βέλτιστου οργανικού ρευστού παρουσιάζονται και περιγράφονται αναλυτικά στο 2^ο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Σημειώνεται πως στην παρούσα προσομοίωση γίνεται η χρήση οικονομητήρα στην έξοδο του στροβίλου, επομένως εκμεταλλεύεται η θερμότητα και αυξάνεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυρίως για τις περιπτώσεις των «ξηρών» οργανικών ρευστών. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η προσομοίωση όπου απουσιάζει ο οικονομητήρας.

Αρχικά εντοπίζονται τα οργανικά ρευστά των οποίων η κλήση της καμπύλης κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας είναι αρνητική και σαν αποτέλεσμα η έξοδος του στροβίλου διαθέτει σημαντική ποσότητα κορεσμένου υγρού. Η παρουσία υγρού φθείρει τα εξαρτήματα του στροβίλου και μειώνει τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του. Η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου απαιτεί υπερθέρμανση του ρευστού πριν την είσοδο στον στροβίλο, που τελικά οδηγεί σε αυξημένο κόστος λόγω της αύξησης της επιφάνειας συναλλαγής. Επομένως τα οργανικά ρευστά R-611 (Methyl formate) και R-631 (Ethyl-amine) απαιτούν υψηλότερα επίπεδα υπερθέρμανσης ενώ εμφανίζουν υψηλό βαθμό ηλεκτροπαραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί πως το ρευστό R-631 εμφανίζει μηδενικούς περιβαλλοντικούς δείκτες GWP και ODP.

Το ψυκτικό R-134a αν και χαρακτηρίζεται ως υγρό οργανικό ρευστό, παρατηρώντας την καμπύλη κορεσμού θερμοκρασίας – εντροπίας προσεγγίζει αρκετά την κατάσταση του ισεντροπικού οργανικού ρευστού. Συγκρίνοντας το ψυκτικό R-134a με τα υπόλοιπα οργανικά ρευστά (R-227, R-245cb και R-31) που μελετήθηκαν για την περίπτωση προδιδόμενης θερμότητας στους 90 °C από τους ηλιακούς συλλέκτες, το οργανικό ρευστό R-134a φαίνεται να υπερτερεί. Ενώ και τα 4 οργανικά ρευστά εμφανίζουν σχεδόν ίδιο βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής, το R-134a εμφανίζει τον καλύτερο συνδυασμό περιβαλλοντικών δεικτών, κόστους και ιξώδους.

Όσον αφορά τις εφαρμογές υψηλότερων θερμοκρασιών (135 °C έως 190 °C), οι υδρογονάνθρακες (πεντάνιο, ισοπεντάνιο, εξάνιο, βουτάνιο και ισοβουτάνιο) φαίνεται να προκρίνονται έναντι των οργανικών ρευστών R-C138, R-E245 και R-123 λόγω των χαμηλότερων περιβαλλοντικών δεικτών και του αισθητά χαμηλότερου κόστους. Συγκεκριμένα το ισοπεντάνιο εμφανίζει τον καλύτερο βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής ενώ συνδυάζει αρκετά χαμηλό κόστος, ιξώδες και αρκετά χαμηλούς περιβαλλοντικούς δείκτες. Το ίδιο ισχύει και για το τολουόλιο το οποίο χρησιμοποιείται στην εφαρμογή των 250 °C.

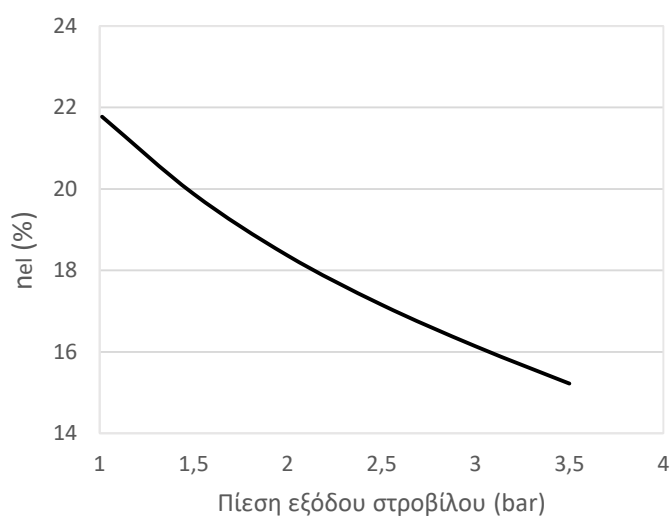
4.2.5. Ανάλυση ευαισθησίας (i)

Για την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα και εργαζόμενο μέσο το ισοπεντάνιο, έλαβαν χώρα οι παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας:

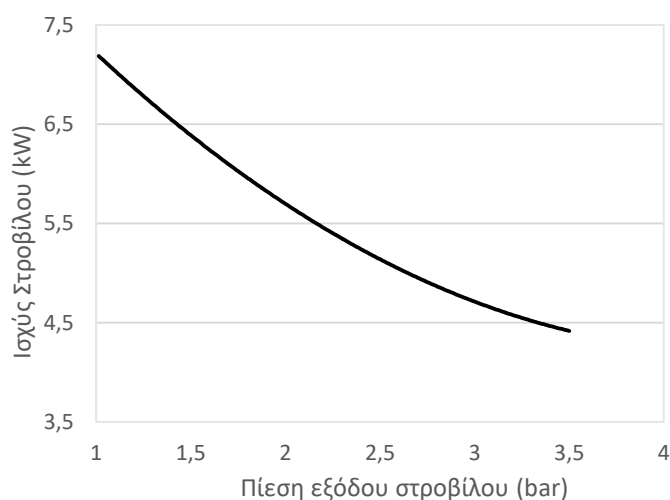
α) μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης σε σχέση με πίεση εξόδου του στροβίλου.

β) μεταβολή της ισχύς του στροβίλου σε σχέση με πίεση εξόδου του στροβίλου.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται επιπλέον διαγράμματα ανάλυσης ευαισθησίας.



Διάγραμμα 4.1: Εξάρτηση ισχύος στροβίλου από την πίεση εξόδου του στροβίλου.



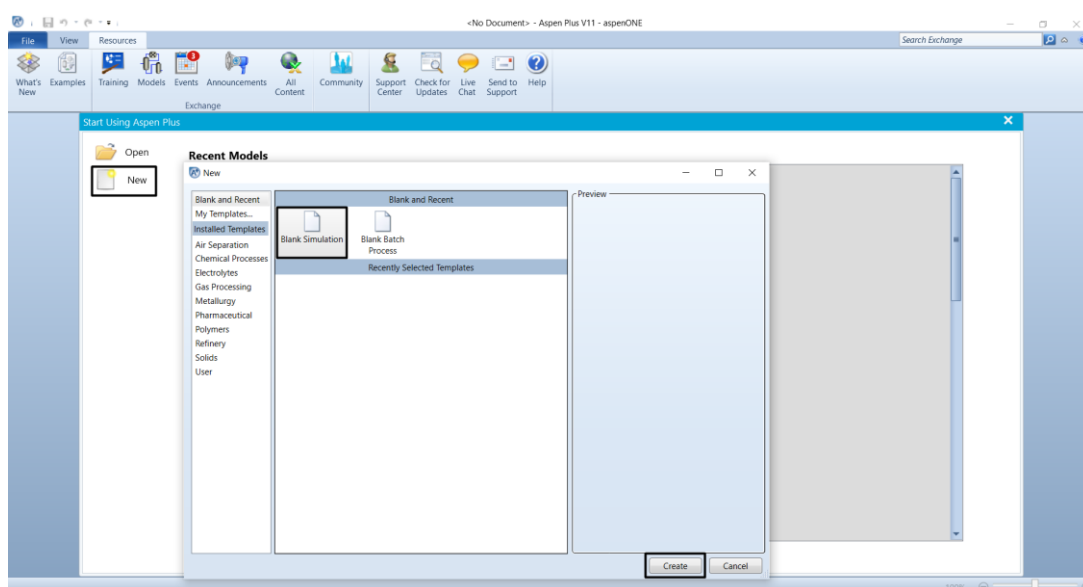
Διάγραμμα 4.2: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής από την πίεση εξόδου του στροβίλου.

Όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση της πίεσης εξόδου του στροβίλου οδηγεί σε μειωμένη ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση σε μειωμένο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

4.2.5. Διαδικασία σχεδιασμού προσομοίωσης με το λογισμικό Aspen Plus V11

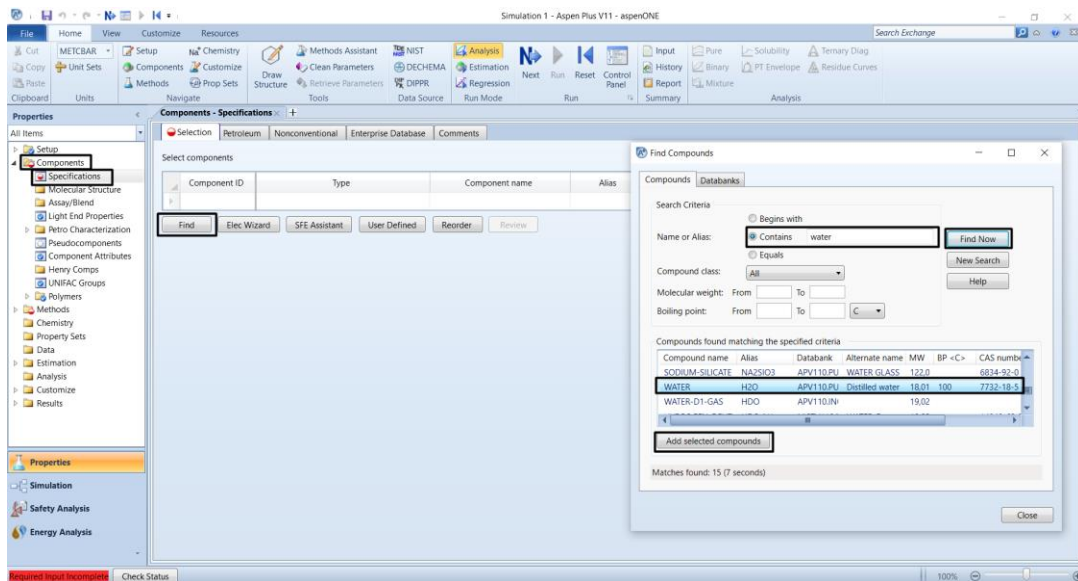
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το λογισμικό Aspen Plus V11. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού της προσομοίωσης του οργανικού κύκλου Rankine με χρήση οικονομητήρα και επιλογή του ισοπεντανίου ως εργαζόμενο μέσο.

Κατά την έναρξη της λειτουργίας του λογισμικού ο χρήστης καλείται να επιλέξει την δημιουργία νέας προσομοίωσης: “New” → “Blank Simulation” → “Create”.




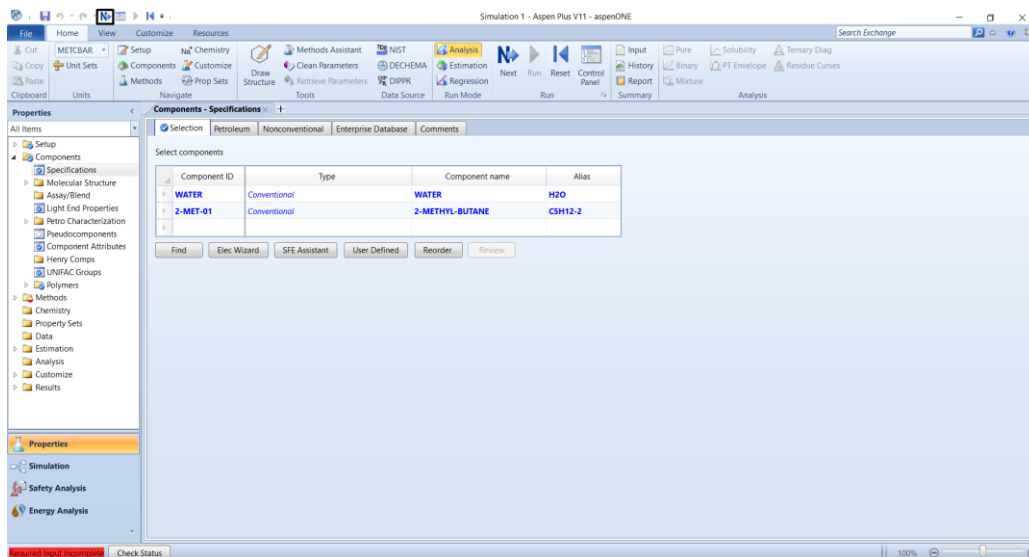
Εικόνα 4-2: Δημιουργία νέα προσομοίωσης στο λογισμικό Aspen Plus V11.

Κατόπιν ο χρήστης καλείται να επιλέξει όλες οι απαραίτητες για την προσομοίωση ενώσεις (π.χ. νερό, βουτάνιο, κτλ.): “Components” → “Specifications” → “Find” → “Contains” → “Find now” → “Add selected compounds”. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όσες φορές χρειαστεί. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση αρκεί να προστεθούν το νερό και το ισοπεντάνιο.



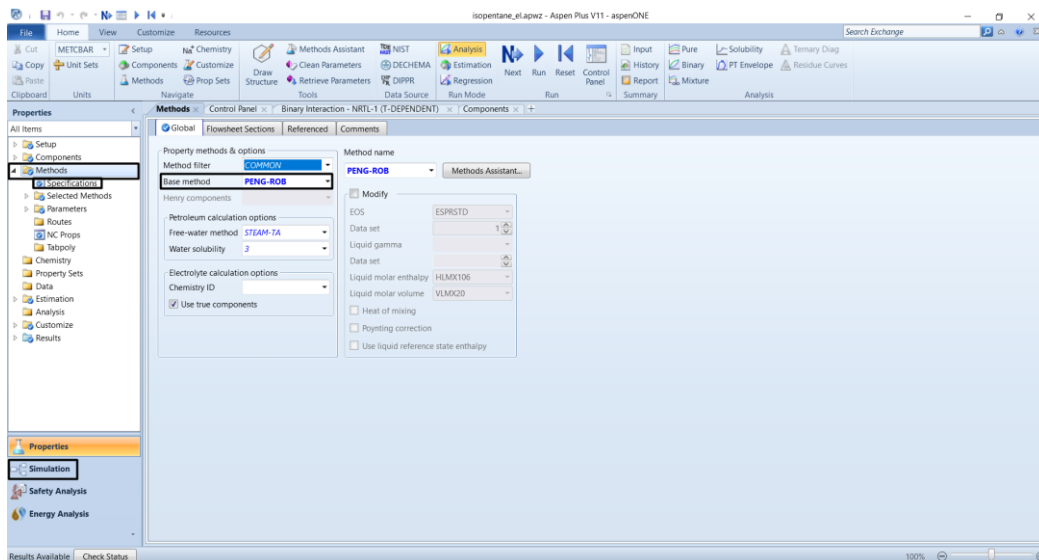
Εικόνα 4-3: Προσθήκη ενώσεων/components στην προσομοίωση.

Αφού έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες προσθήκες ενώσεων ο χρήστης επιλέγοντας το εικονίδιο , οδηγείται στο επόμενο απαραίτητο προς εκτέλεση βήμα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε σημείο της προσομοίωσης.



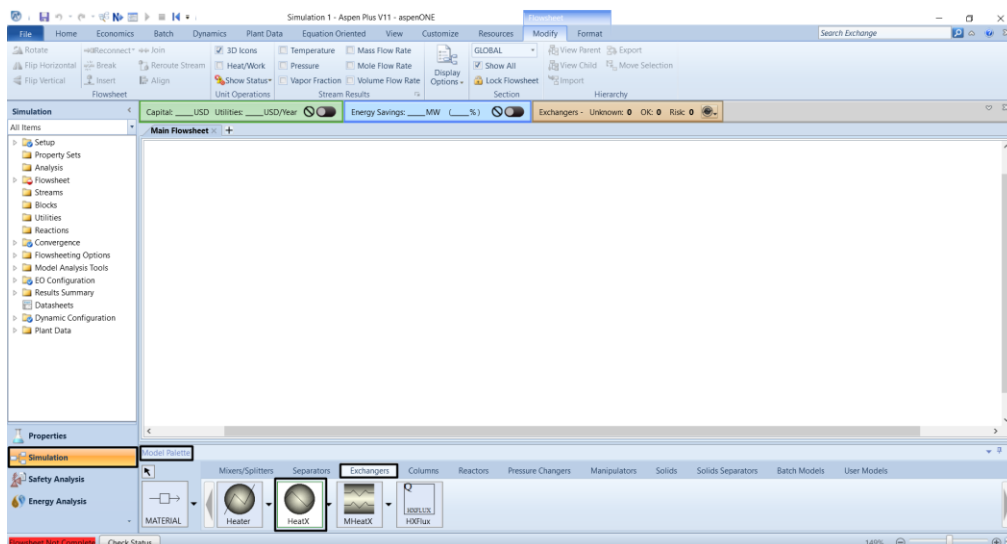
Εικόνα 4-4: Μετάβαση στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης.

Ακολουθεί η επιλογή του μοντέλου σύγκλισης των υπολογισμών. “Methods” → “Specifications” → “Base method”. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέγεται η μέθοδος Peng – Robinson. Στην συνέχεια ο χρήστης επιλέγοντας το πεδίο “Simulation” μεταφέρεται στο περιβάλλον της προσομοίωσης.

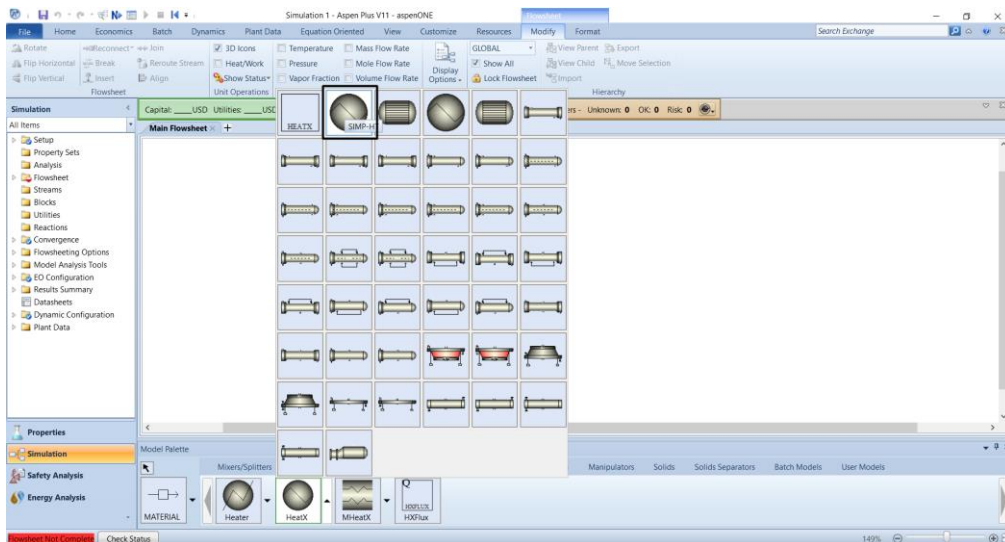


Εικόνα 4-5: Επιλογή μεθόδου σύγκλισης υπολογισμών και μετάβαση στο περιβάλλον της προσομοίωσης.

Ανοίγοντας την καρτέλα “Simulations” ο χρήστης μεταφέρεται στο περιβάλλον της προσομοίωσης. Από την καρτέλα “Model Palette” μπορεί να εισάγει ρεύματα “Material stream” (π.χ. ρεύμα 100% νερού) ή στοιχεία εξοπλισμού “Blocks” όπως εναλλάκτες θερμότητας, στροβίλους και αντλίες. Η προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine με χρήση ισοπεντανίου ξεκινάει με την εισαγωγή του εναλλάκτη θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί ως υπερθερμαντήρας: “Model Palette” → “Exchangers” → “HeatX”.

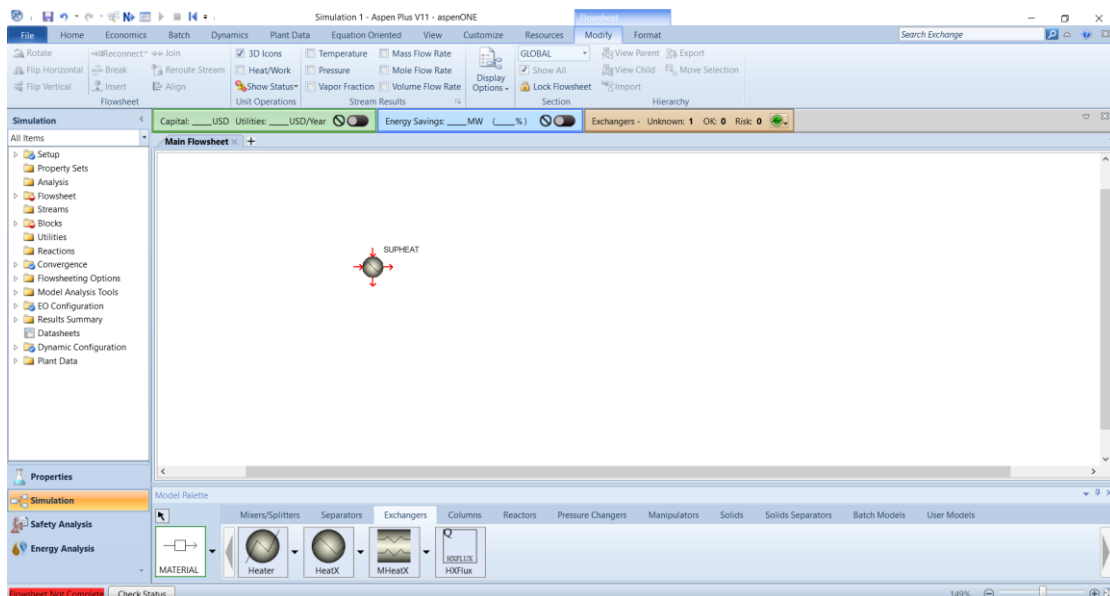


Εικόνα 4-6: Εισαγωγή εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) στην προσομοίωση (i).

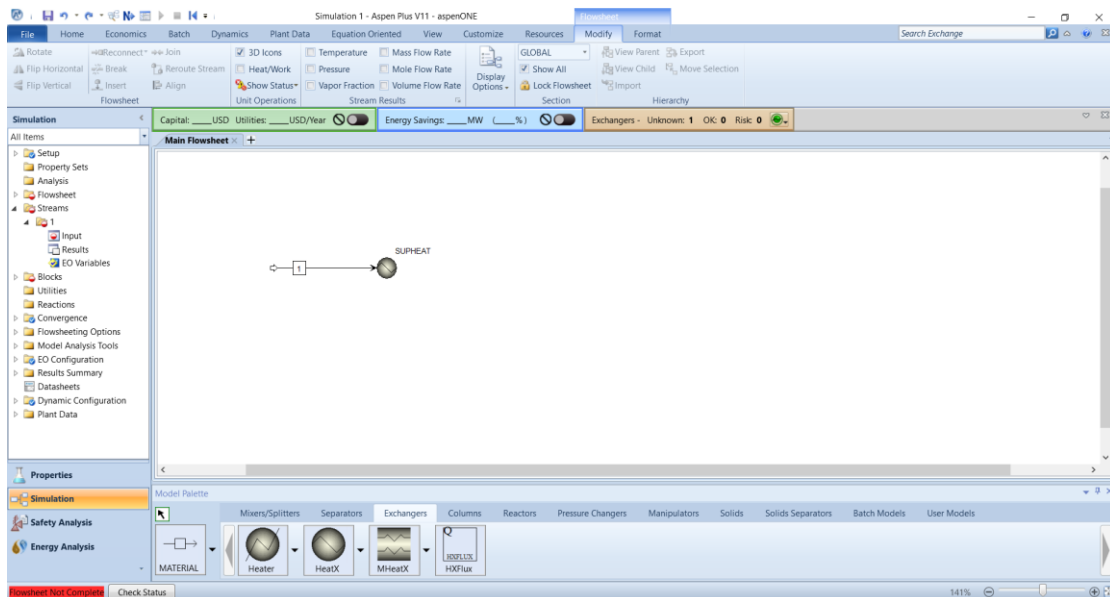


Εικόνα 4-7: Εισαγωγή εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) στην προσομοίωση (ii).

Μετά την προσθήκη του υπερθερμαντήρα ακολουθεί η προσθήκη του ρεύματος που αποτελεί την έξοδο της συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών και προσδίδει την απαραίτητη θερμότητα στον εναλλάκτη. Το ρεύμα θα προστεθεί ως θερμή είσοδος στον εναλλάκτη θερμότητας: “Model Palette” → “Material”. Κάνοντας διπλό «κλικ» πάνω στο ρεύμα, ο χρήστης μεταφέρεται σε νέα καρτέλα, όπου μπορεί να καθορίσει τα χαρακτηριστικά του ρεύματος. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του ονόματος του ρεύματος ή στοιχείου εξοπλισμού κάνοντας «κλικ» στο προκαθορισμένο όνομα που έχει δοθεί αυτόματα από το λογισμικό.

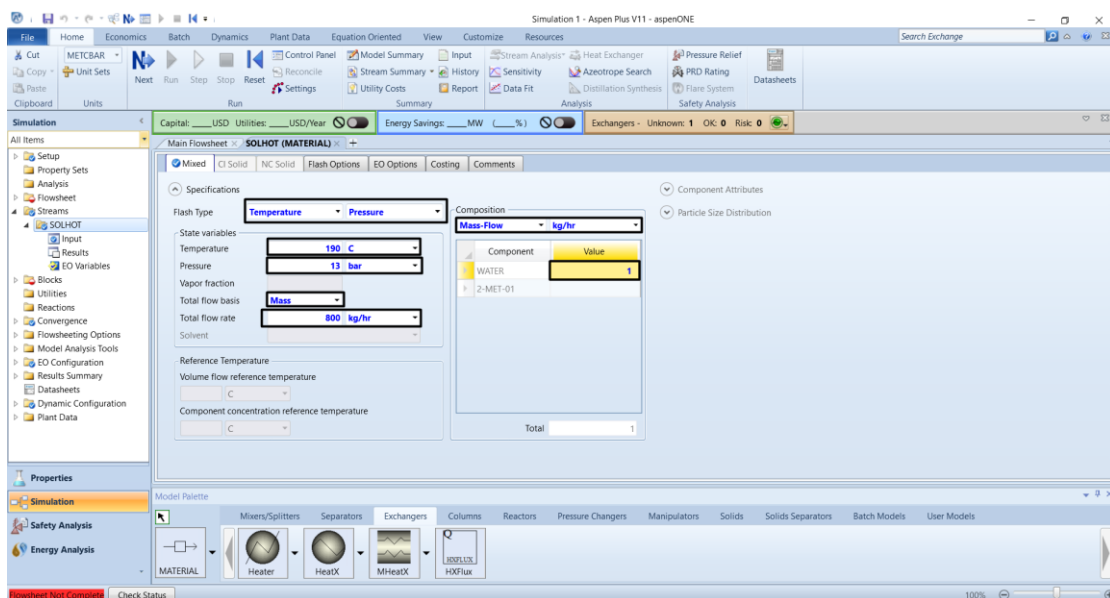


Εικόνα 4-8: Εισαγωγή θερμού ρεύματος στον εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) (i).



Εικόνα 4-9: Εισαγωγή θερμού ρεύματος στον εναλλάκτη θερμότητας (υπερθερμαντήρα) (ii).

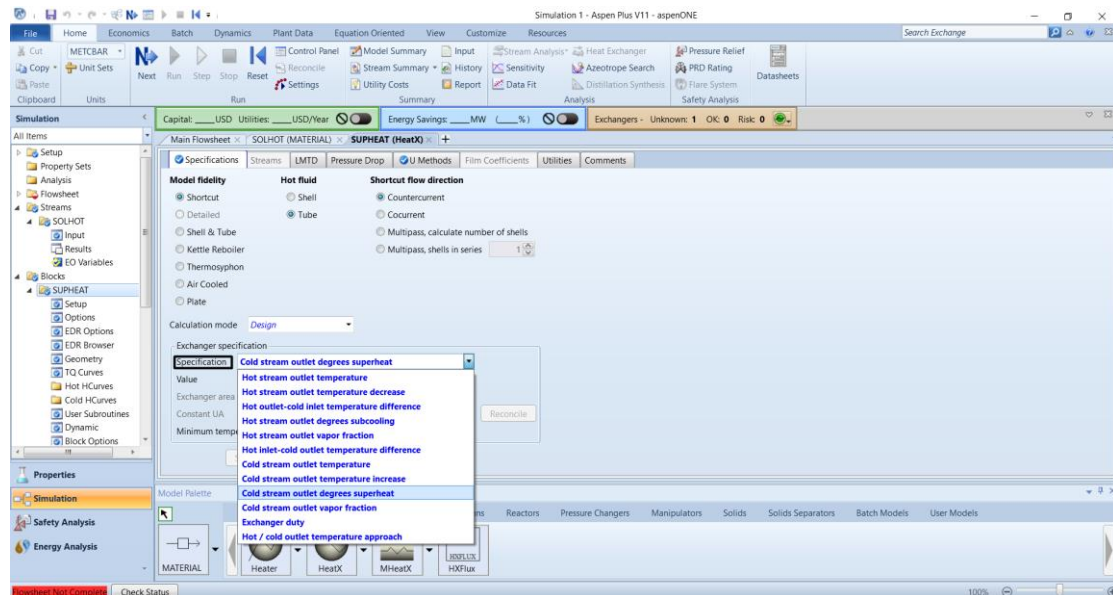
Κατά τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του ρεύματος ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιες ιδιότητες θα οριστούν. Μπορεί να καθορίσει δύο εκ των πίεση, θερμοκρασία και κλάσμα ατμών. Επιπλέον μπορεί να καθορίσει την ροή του ρεύματος στην επιθυμητή μονάδα μέτρησης καθώς και την σύσταση του ρεύματος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το ρεύμα νερού της εξόδου των ηλιακών συλλεκτών έχει ροή 800 κιλά ανά ώρα, βρίσκεται σε πίεση 13 bar και θερμοκρασία 190 °C.



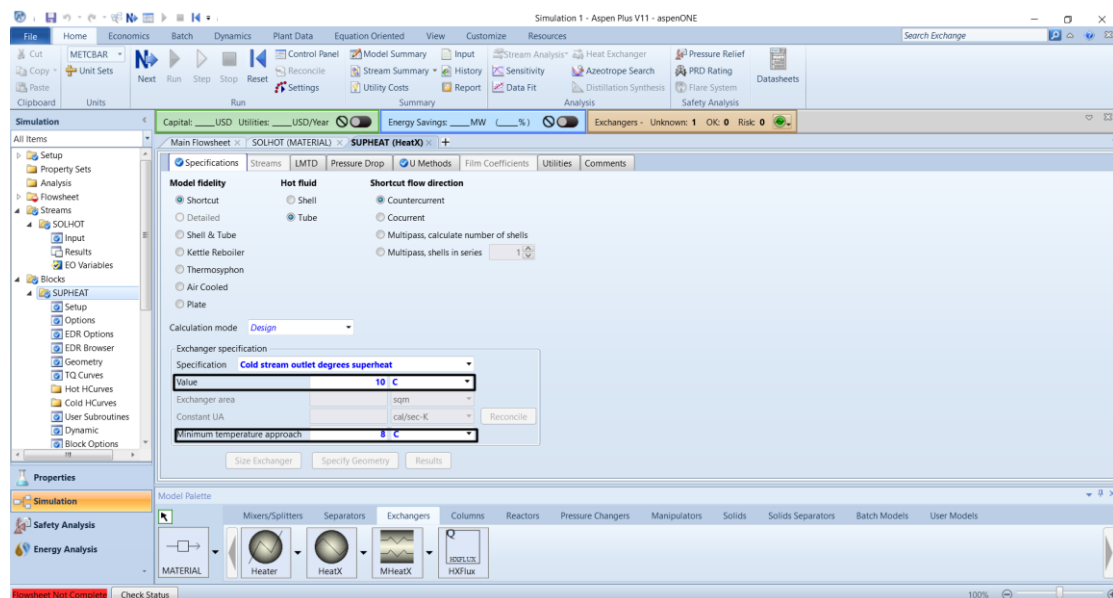
Εικόνα 4-10: Καθορισμός χαρακτηριστικών θερμού ρεύματος υπερθερμαντήρα.

Ακολουθεί ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιείται ως υπερθερμαντήρας. Κάνοντας διπλό «κλικ» πάνω στον εναλλάκτη

ο χρήστης μεταφέρεται σε νέα καρτέλα. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει την προδιαγραφή με βάση την οποία θα λειτουργεί ο εναλλάκτης. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η ψυχρή έξοδος του εναλλάκτη θερμότητας (ισοπεντάνιο) ορίζεται ως υπέρθερμό ρευστό, 10 °C πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού στην αντίστοιχη πίεση. Επιπλέον ορίζεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο θερμό ρεύμα εισόδου και ψυχρό ρεύμα εξόδου.



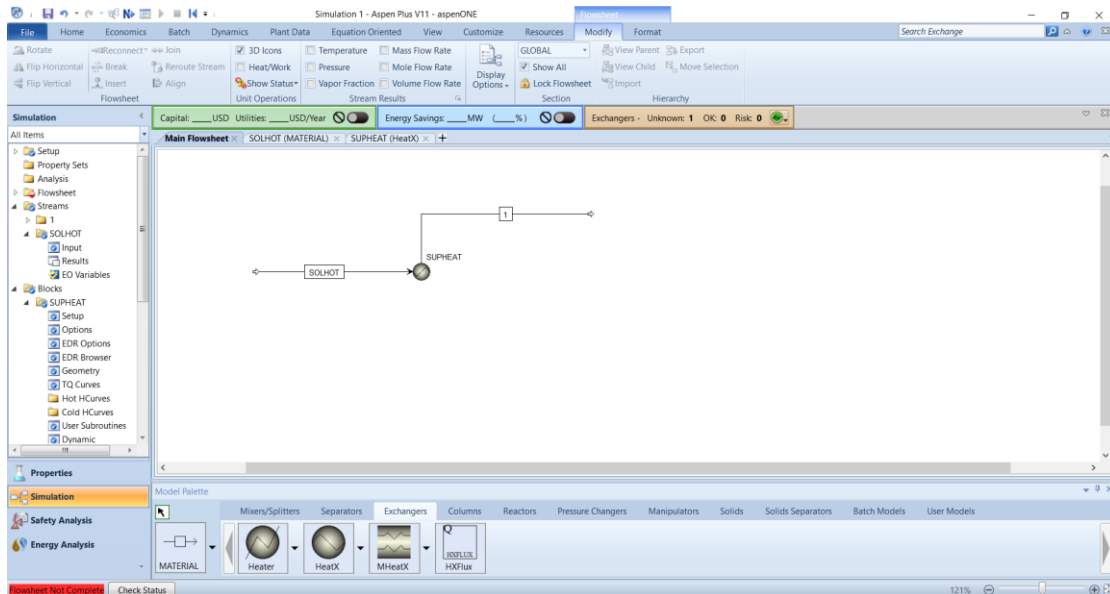
Εικόνα 4-11: Καθορισμός προδιαγραφής (specification) υπερθερμαντήρα.



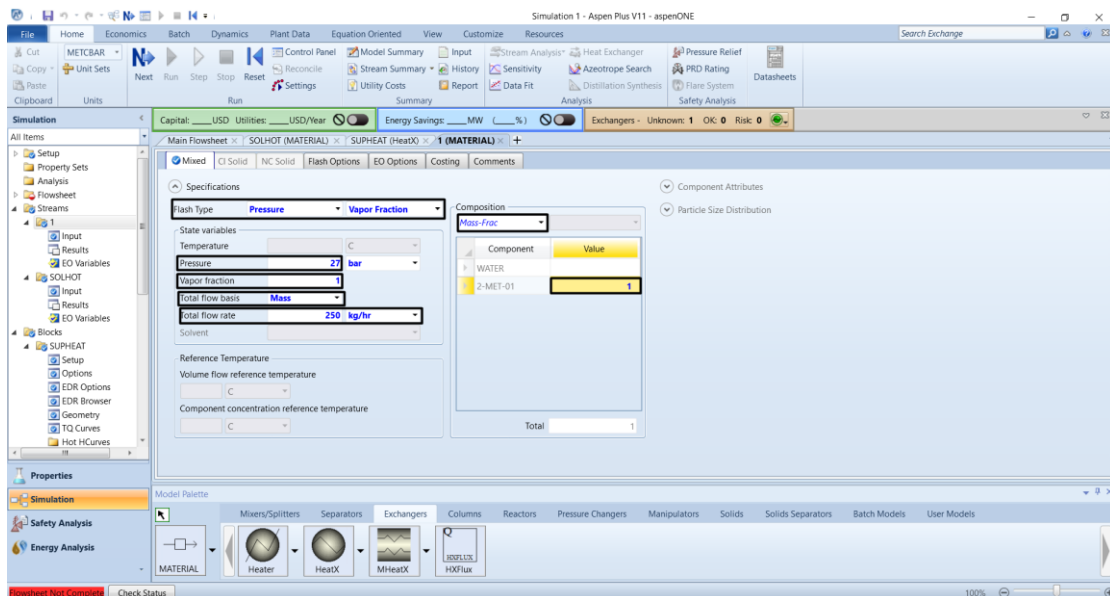
Εικόνα 4-12: Καθορισμός μεγέθους προδιαγραφής και θερμοκρασιακή διαφορά στον υπερθερμαντήρα.

Στην συνέχεια εισάγεται το ψυχρό ρεύμα εξόδου (εργαζόμενο μέσο) του υπερθερμαντήρα το οποίο αποτελεί και την είσοδο του στροβίλου. Το ρεύμα

ισοπεντανίου βρίσκεται σε υπέρθερμη κατάσταση (κλάσμα ατμών ίσο με την μονάδα) και η πίεση του είναι ίση με την πίεση της αντλίας (27 bar) η οποία επιλέγεται με βάση τις κρίσιμες ιδιότητες του ρευστού. Η ροή του είναι ίση με 250 κιλά ανά ώρα.

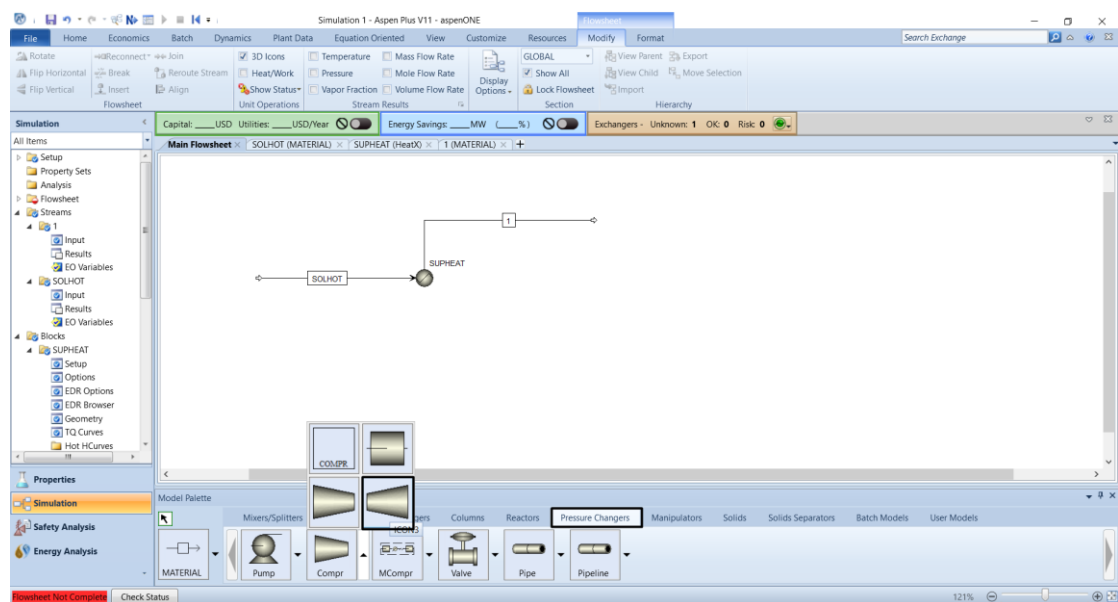


Εικόνα 4-13: Εισαγωγή ψυχρού ρεύματος εξόδου υπερθερμαντήρα.

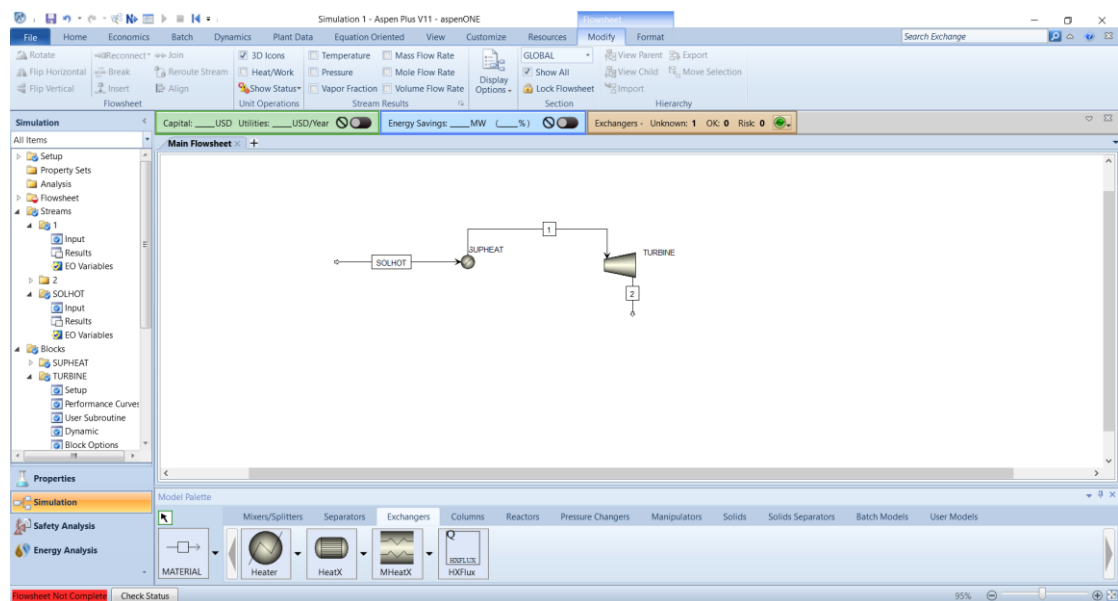


Εικόνα 4-14: Καθορισμός ιδιοτήτων ψυχρού ρεύματος εξόδου υπερθερμαντήρα.

Στην συνέχεια ακολουθεί η εισαγωγή του στροβίλου, όπου θα εκτονωθεί το ψυχρό ρεύμα εξόδου του υπερθερμαντήρα προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

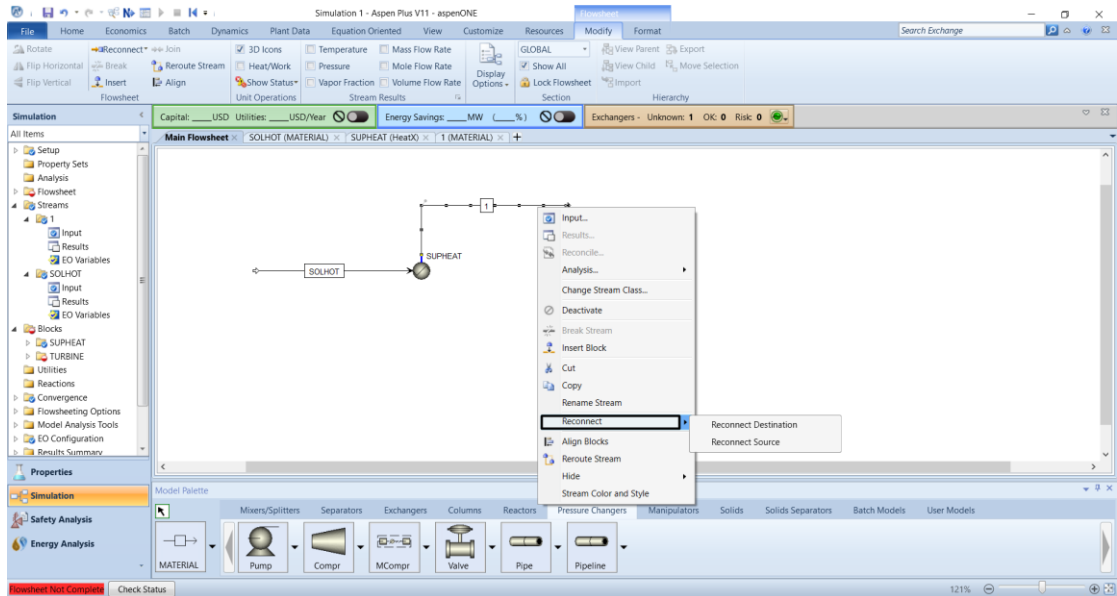


Εικόνα 4-15: Εισαγωγή στροβίλου στην προσομοίωση (i).

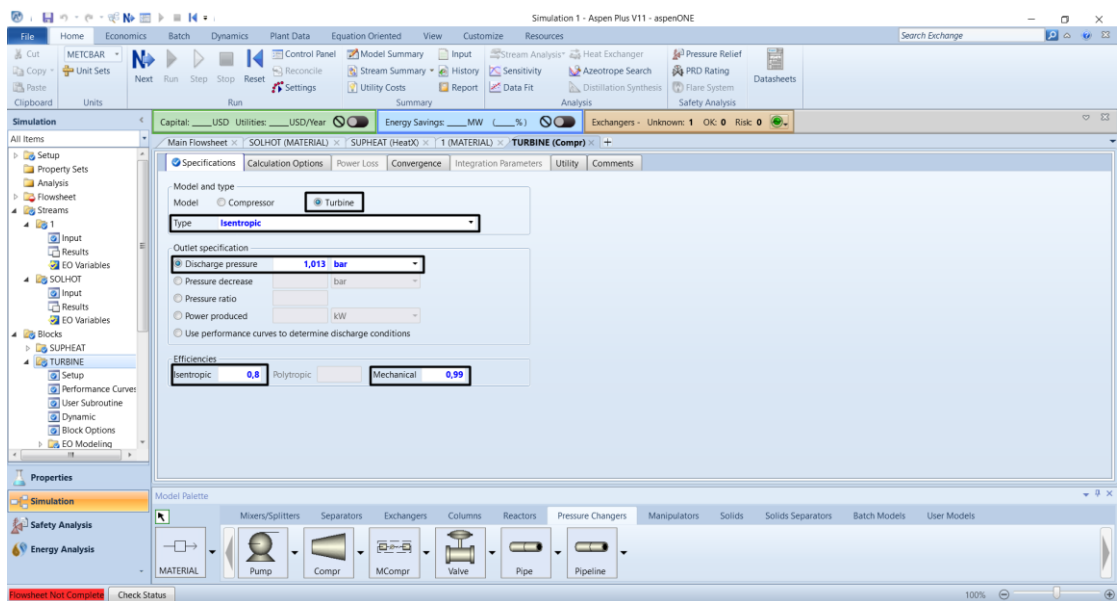


Εικόνα 4-16: Εισαγωγή στροβίλου στην προσομοίωση (ii).

Κάνοντας δεξί «κλικ» σε οποιοδήποτε ρεύμα και επιλέγοντας “reconnect” υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης του ρεύματος με κάποιο στοιχείο εξοπλισμού. Ακολουθεί ο καθορισμός των στοιχείων του στροβίλου. Αρχικά γίνεται η επιλογή ανάμεσα σε στρόβιλο ή συμπιεστή, κατόπιν επιλέγεται ο τύπος του στροβίλου (ισεντροπικός), καθορίζεται η πίεση του ρεύματος εξόδου και ορίζονται οι βαθμοί απόδοσης. Η πίεση εξόδου ορίζεται βάση το σημείο ζέσεως του εργαζόμενου μέσου. Στόχος είναι να αποφευχθεί η δημιουργία υγρής φάσεως κατά την εκτόνωση στον στρόβιλο.

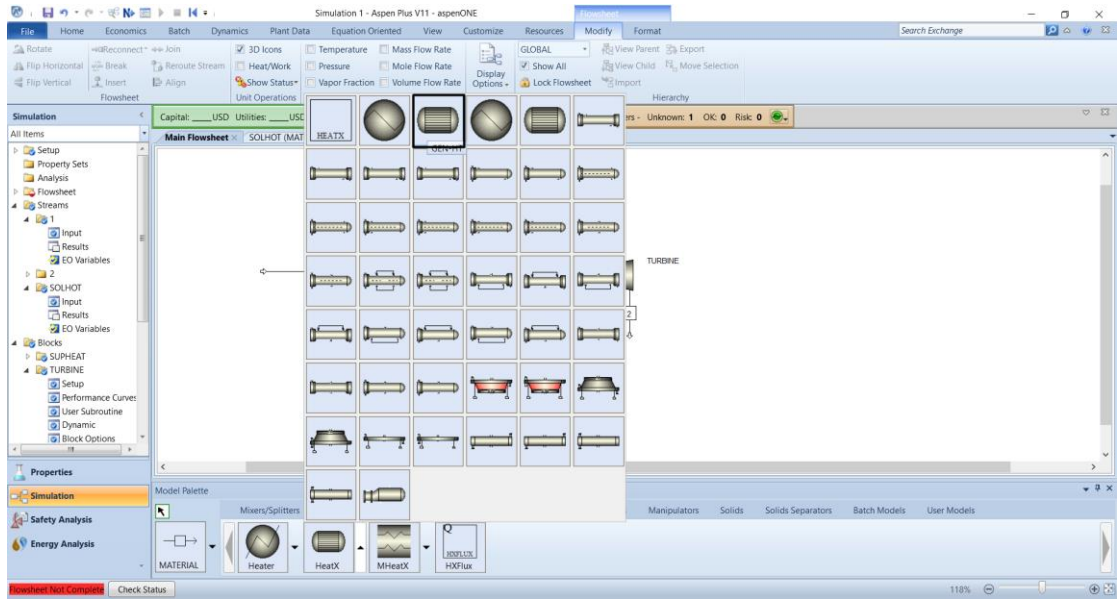


Εικόνα 4-17: Σύνδεση ρεύματος με στοιχείο εξοπλισμού.

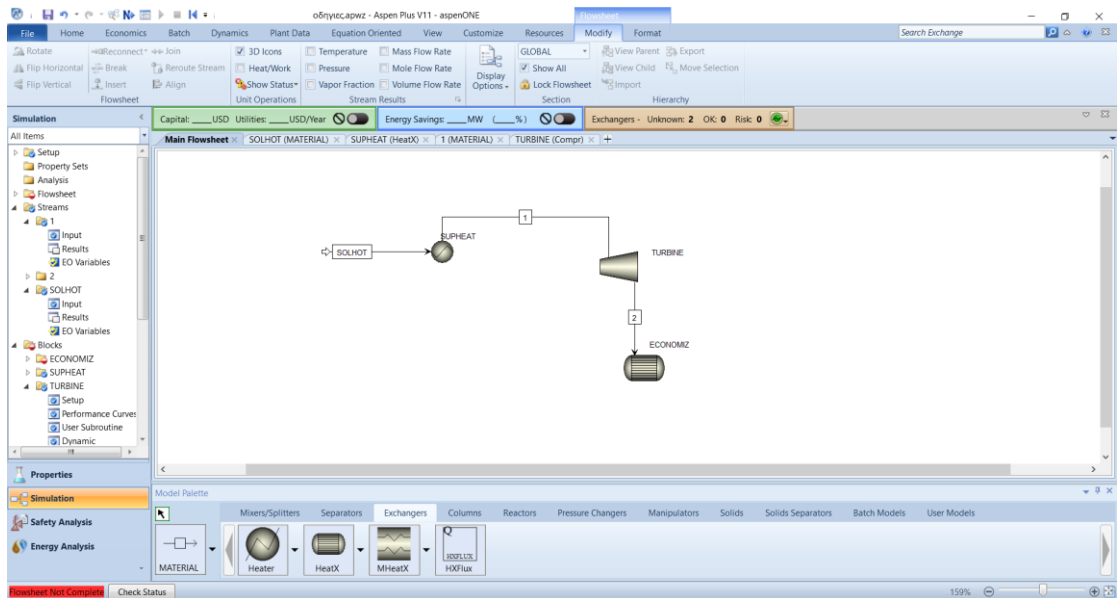


Εικόνα 4-18: Καθορισμός χαρακτηριστικών στροβίλου.

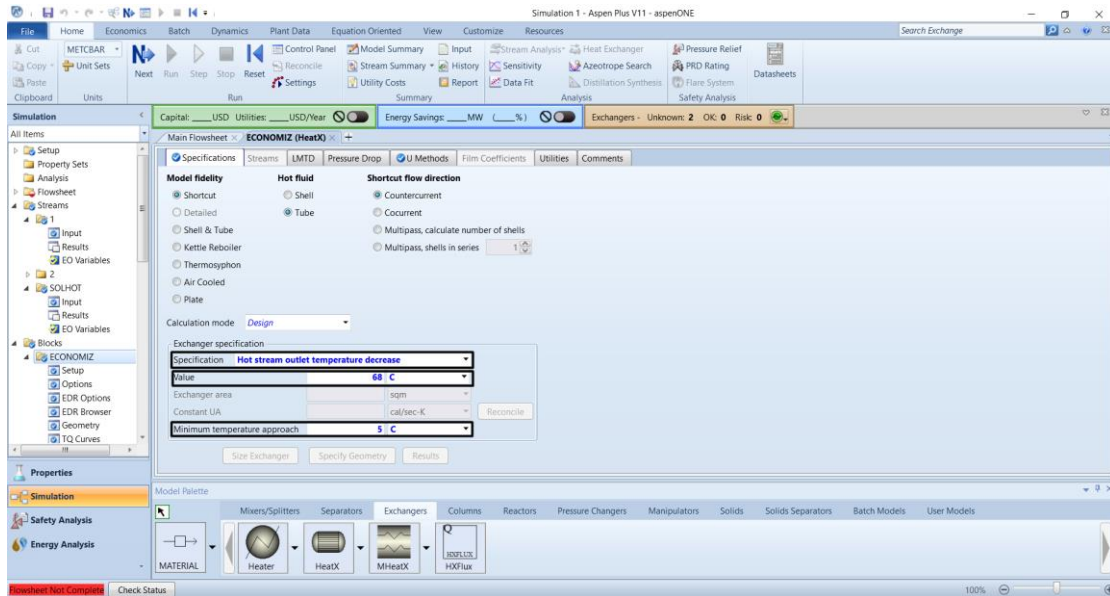
Κατόπιν εισάγεται το ρεύμα εξόδου του στροβίλου το οποίο παράλληλα αποτελεί και ρεύμα εισόδου του οικονομητήρα. Βρίσκεται εξ'ολοκλήρου στην αέρια φάση. Για το συγκεκριμένο ρεύμα δεν απαιτείται ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του, αφού θα υπολογισθούν αυτόματα από το λογισμικό. Ακολουθεί η εισαγωγή του εναλλάκτη θερμότητας που λειτουργεί ως οικονομητήρας και χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του ρεύματος που οδηγείται στον προθερμαντήρα με στόχο την αύξηση του βαθμού απόδοσης της διάταξης. Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του οικονομητήρα είναι παρόμοιος με τον υπερθερμαντήρα. Στην περίπτωση του οικονομητήρα ως προδιαγραφή ορίζεται η θερμοκρασιακή πτώση του θερμού ρεύματος (έξοδος στροβίλου).



Εικόνα 4-19: Εισαγωγή οικονομητήρα στην προσομοίωση (i).

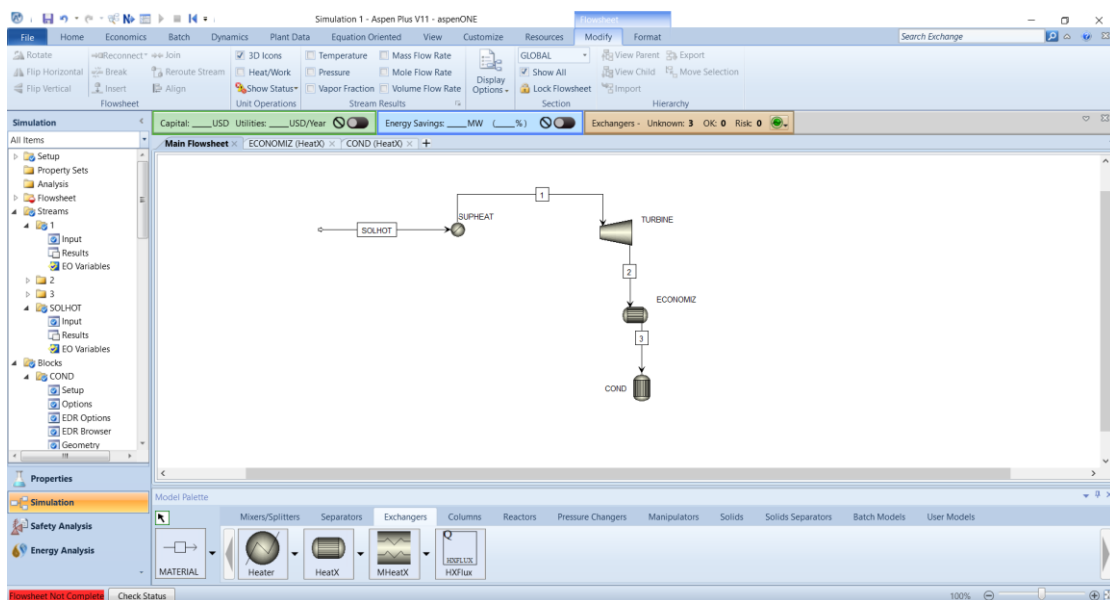


Εικόνα 4-20: Εισαγωγή οικονομητήρα στην προσομοίωση (ii).

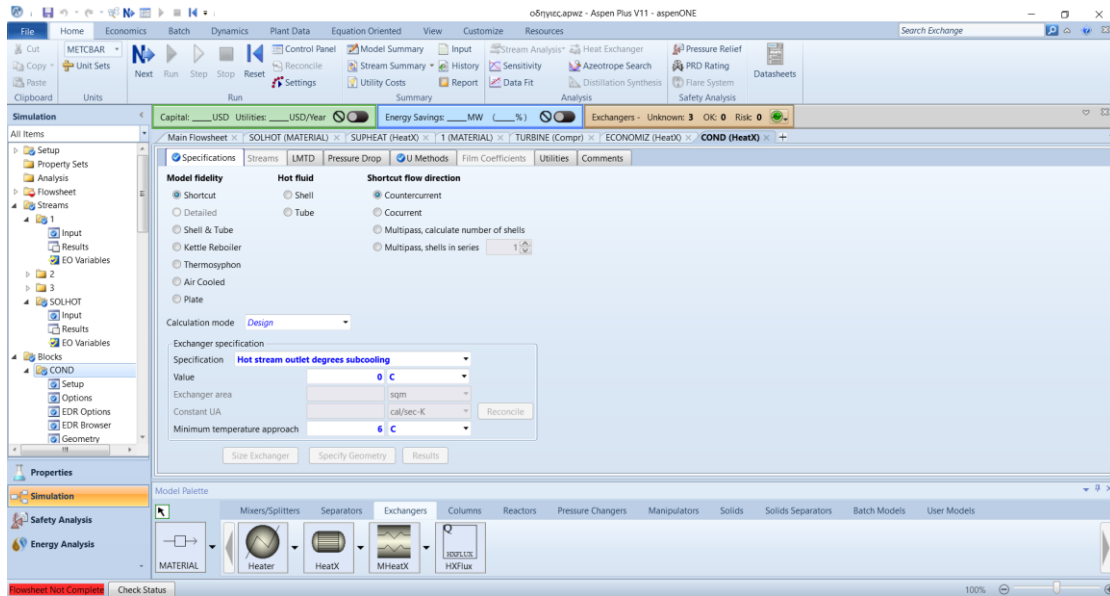


Εικόνα 4-21: Καθορισμός χαρακτηριστικών οικονομητήρα.

Στην συνέχεια εισάγεται το θερμό ρεύμα εξόδου του οικονομητήρα το οποίο θα οδηγηθεί στον συμπυκνωτή. Η εισαγωγή του ρεύματος καθώς και του συμπυκνωτή γίνονται όπως ακριβώς στην περίπτωση του οικονομητήρα. Ως προδιαγραφή στον συμπυκνωτή ορίζονται οι βαθμοί υπόψυξης του θερμού ρεύματος εξόδου (εργαζόμενο ρευστό κύκλου Rankine). Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ορίζεται ίση με 6 °C.

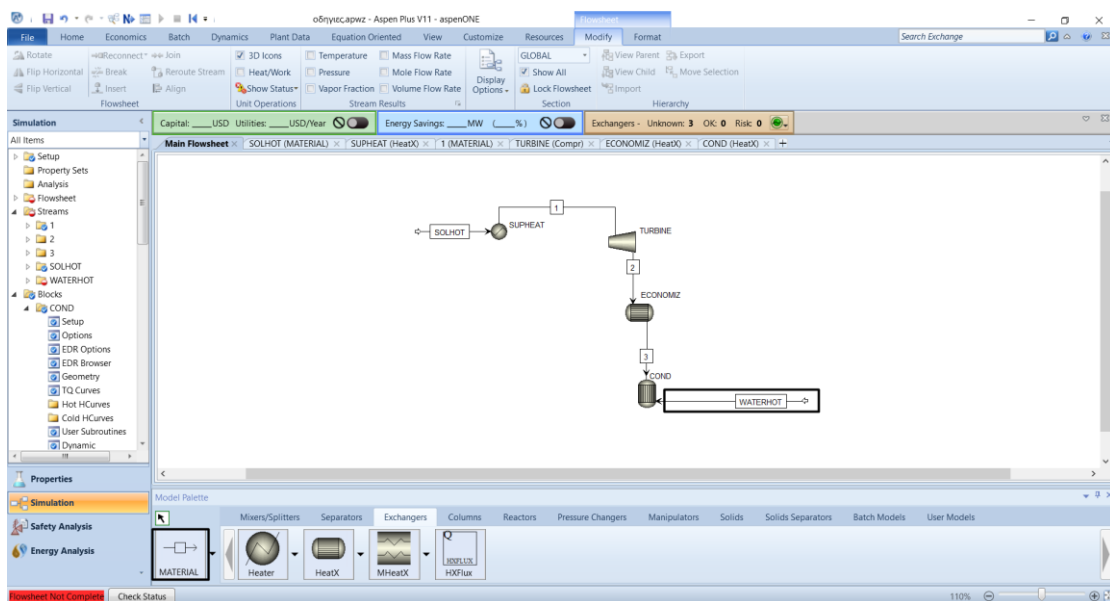


Εικόνα 4-22: Εισαγωγή συμπυκνωτή στην προσομοίωση.

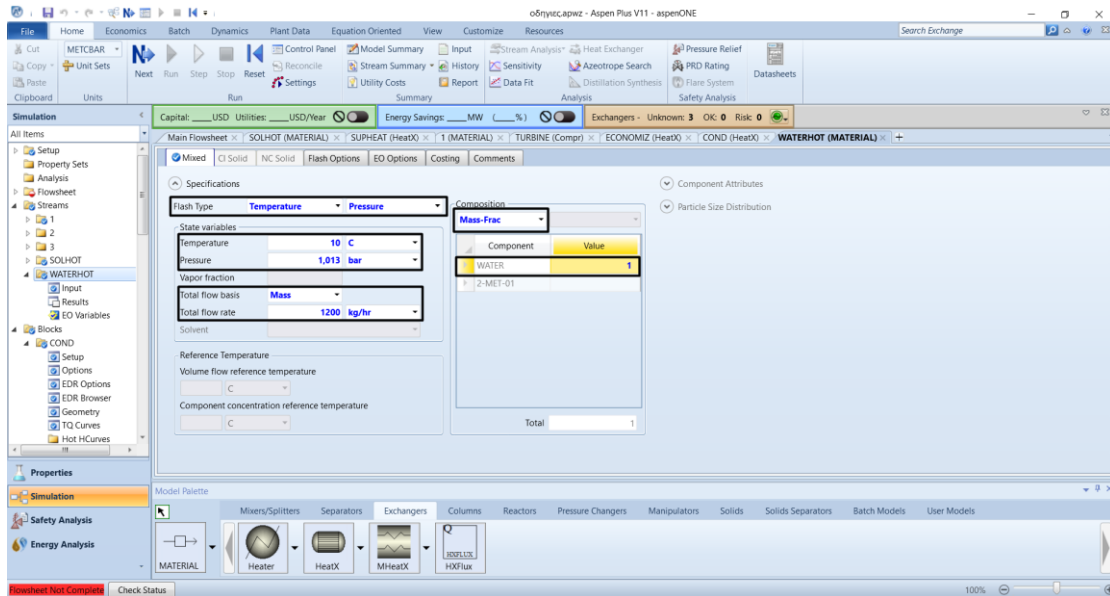


Εικόνα 4-23: Καθορισμό προδιαγραφών συμπυκνωτή.

Η απαγωγή της θερμότητας στον συμπυκνωτή γίνεται από ρεύμα νερού, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία 10 °C, σε ατμοσφαιρική πίεση και έχει ροή 1200 κιλά ανά ώρα. Εισάγεται στην προσομοίωση ως το ψυχρό ρεύμα στον συμπυκνωτή. Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών των ρευμάτων εξόδου του συμπυκνωτή δεν απαιτείται αφού υπολογίζονται από το λογισμικό.

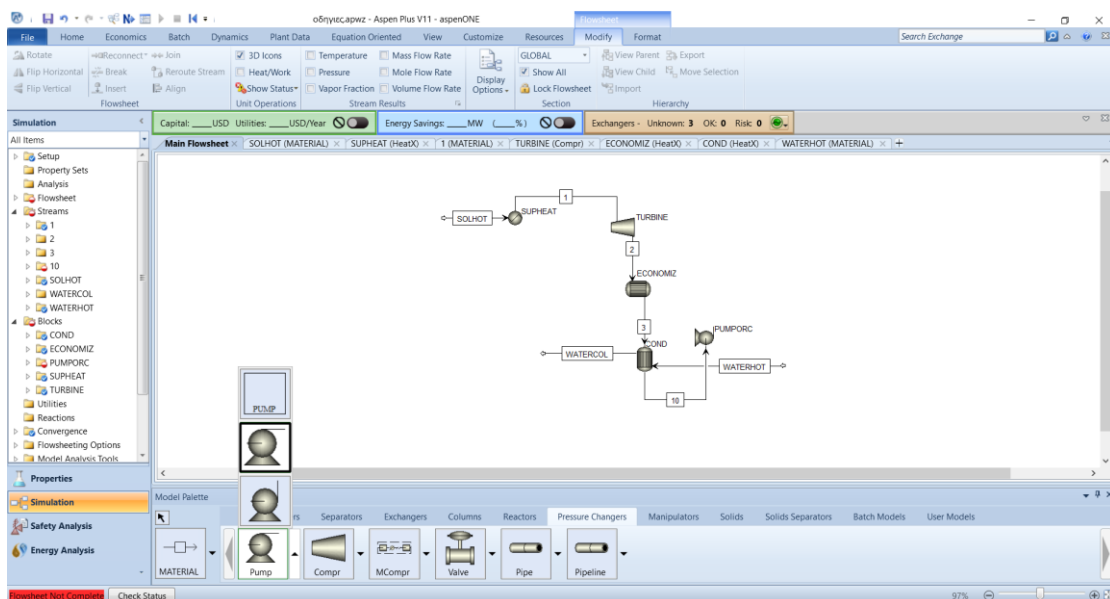


Εικόνα 4-24: Εισαγωγή ψυχρού ρεύματος νερού στον συμπυκνωτή.

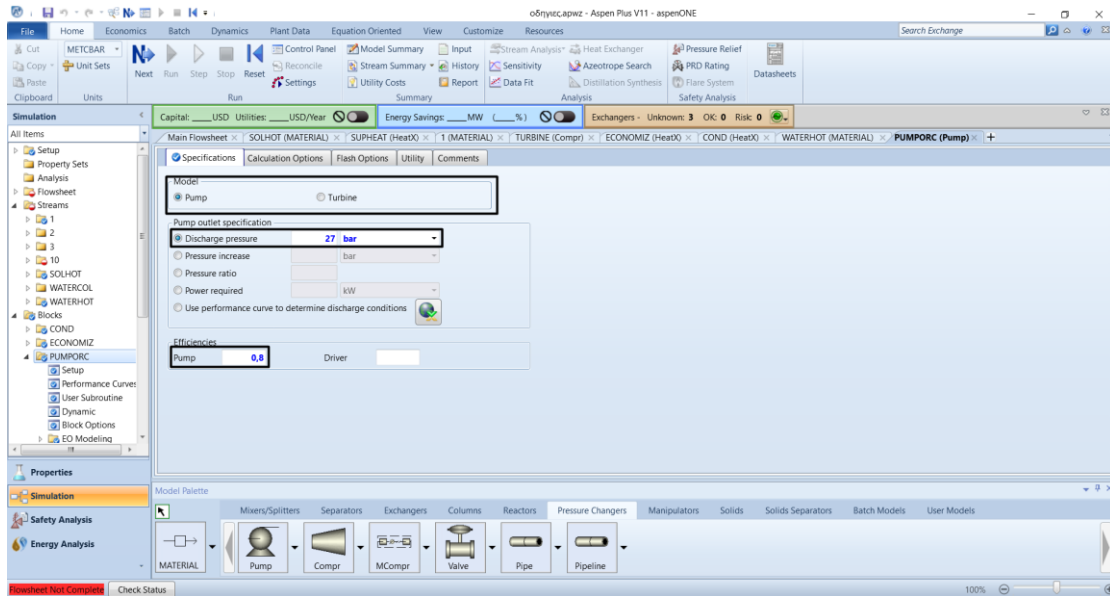


Εικόνα 4-25: Καθορισμός χαρακτηριστικών ψυχρού ρεύματος νερού στον συμπυκνωτή.

Κατόπιν εισάγονται η θερμή και η ψυχρή έξοδος του συμπυκνωτή καθώς και η αντλία του κύκλου. Καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της αντλίας. Ορίζονται η πίεση εξόδου και ο βαθμός απόδοσης της αντλίας.

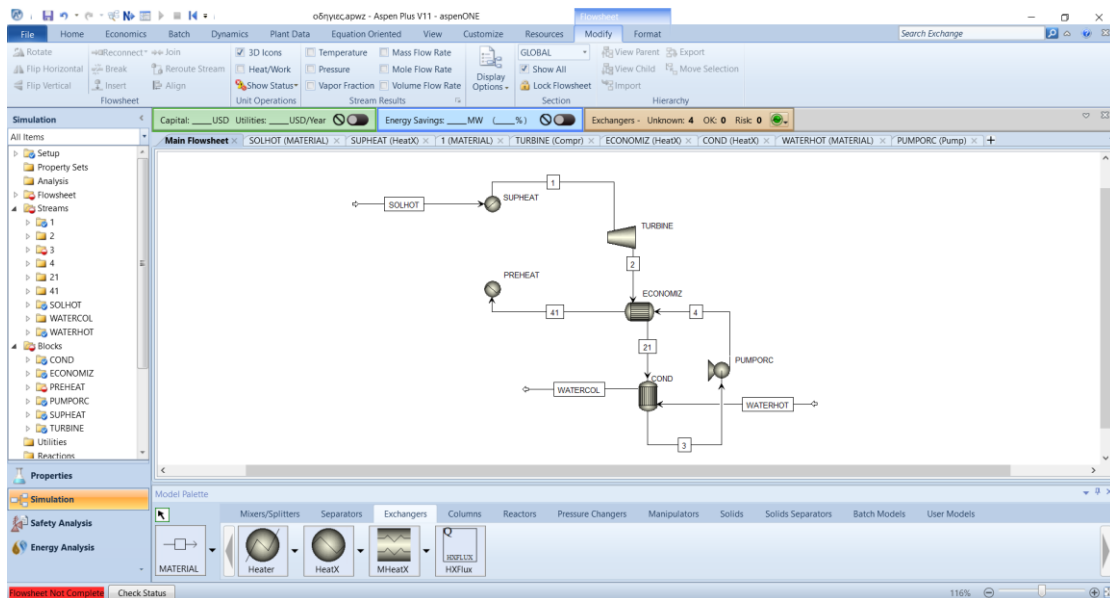


Εικόνα 4-26: Εισαγωγή αντλίας στην προσομοίωση.

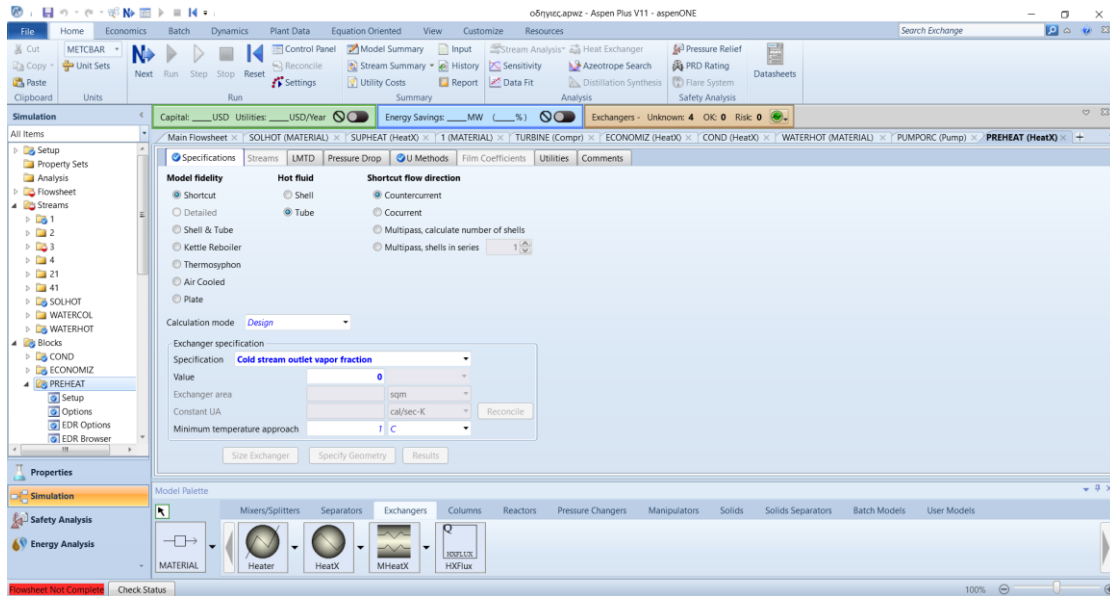


Εικόνα 4-27: Ορισμός χαρακτηριστικών αντλίας.

Το ρεύμα εξόδου της αντλίας οδηγείται στον οικονομητήρα ως ψυχρή είσοδος. Δεν απαιτείται ο καθορισμός των χαρακτηριστικών του. Η ψυχρή έξοδος του προθερμαντήρα οδηγείται στον 1^ο εναλλάκτη θερμότητας (προθερμαντήρα). Ο προθερμαντήρας προσδίδει την κατάλληλη θερμότητα έτσι ώστε στην έξοδο του το εργαζόμενο μέσο (ισοπεντάνιο) να βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Ως προδιαγραφή του προθερμαντήρα ορίζεται η έξοδος του ψυχρού ρεύματος (ισοπεντάνιο) σε κατάσταση κορεσμένου υγρού (κλάσμα ατμών ίσο με το μηδέν).

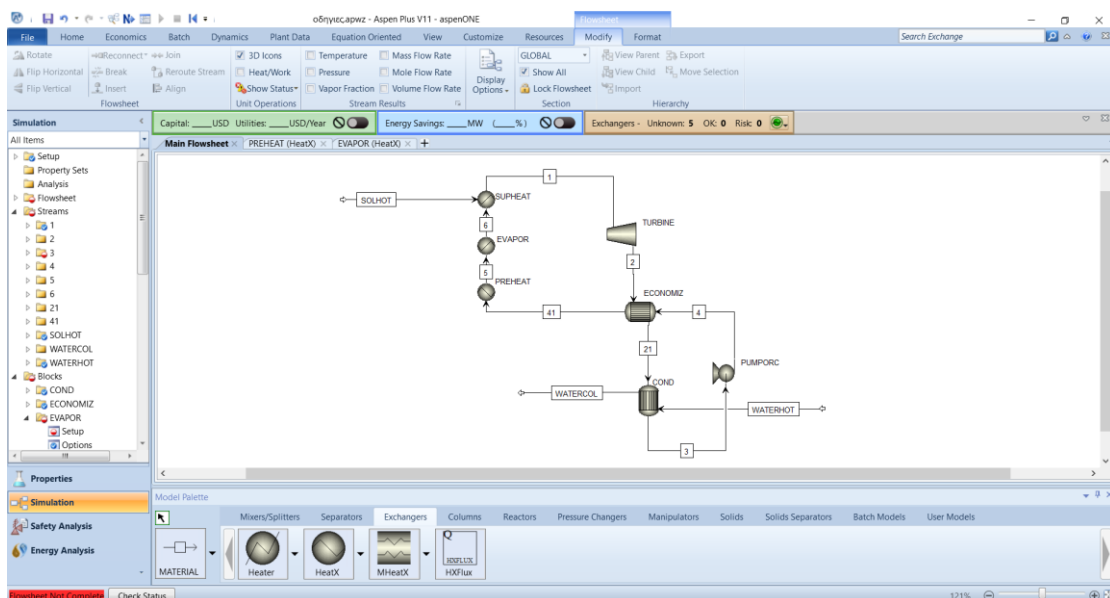


Εικόνα 4-28: Εισαγωγή προθερμαντήρα στην προσομοίωση.

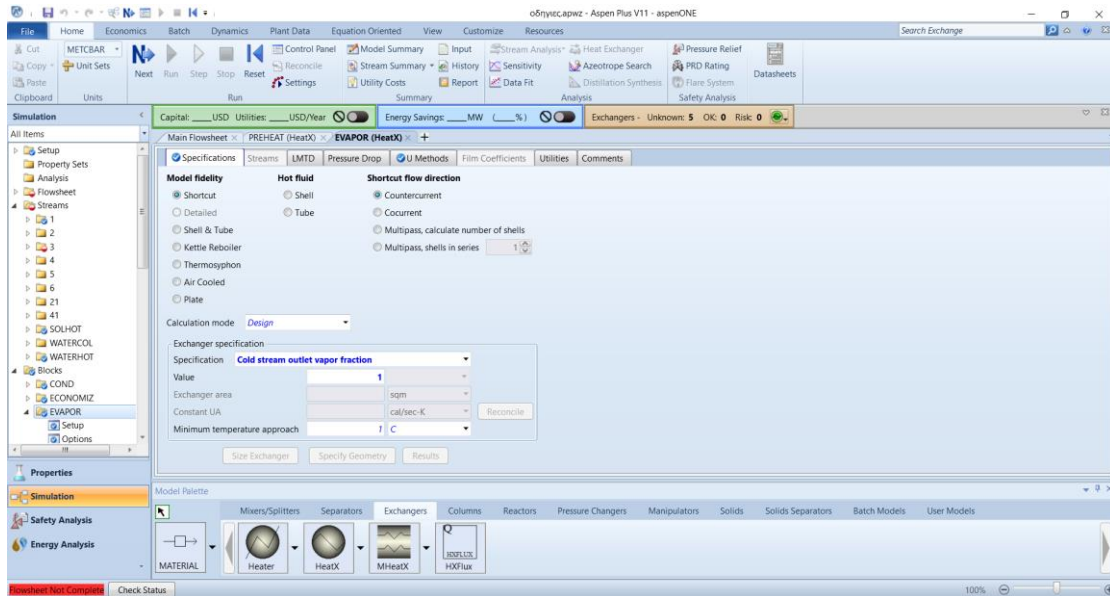


Εικόνα 4-29: Καθορισμός χαρακτηριστικών προθερμαντήρα.

Η έξοδος του προθερμαντήρα οδηγείται στον 2^ο εναλλάκτη θερμότητας, τον εξατμιστήρα. Εκεί προσδίδεται η απαραίτητη θερμότητα ώστε το εργαζόμενο μέσο να ατμοποιηθεί και η έξοδος του εξατμιστήρα να βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού. Ως προδιαγραφή του εξατμιστήρα ορίζεται η έξοδος του ψυχρού ρεύματος (ισοπεντάνιο) σε κατάσταση κορεσμένου ατμού (κλάσμα ατμών ίσο με την μονάδα). Τα ενδιάμεσα ρεύματα μεταξύ των εναλλακτών δεν χρειάζεται να καθοριστούν. Η έξοδος του εξατμιστήρα οδηγείται στον υπερθερμαντήρα, όπου το ρευστό υπερθερμαίνεται και ο κύκλος ολοκληρώνεται.

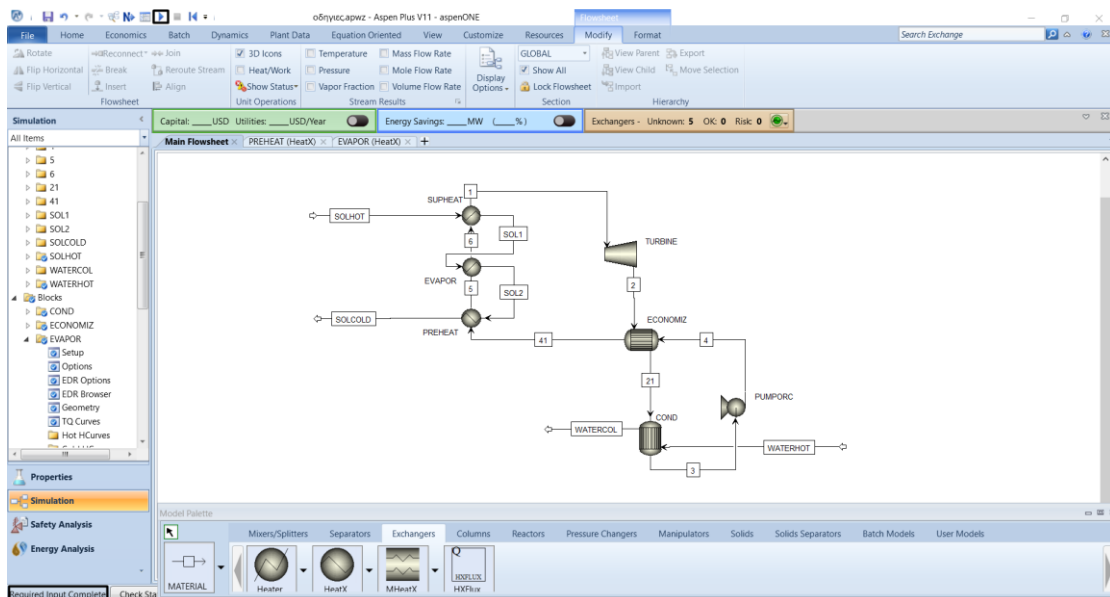


Εικόνα 4-30: Εισαγωγή εξατμιστήρα στην προσομοίωση.



Εικόνα 4-31: Καθορισμός χαρακτηριστικών εξατμιστήρα.

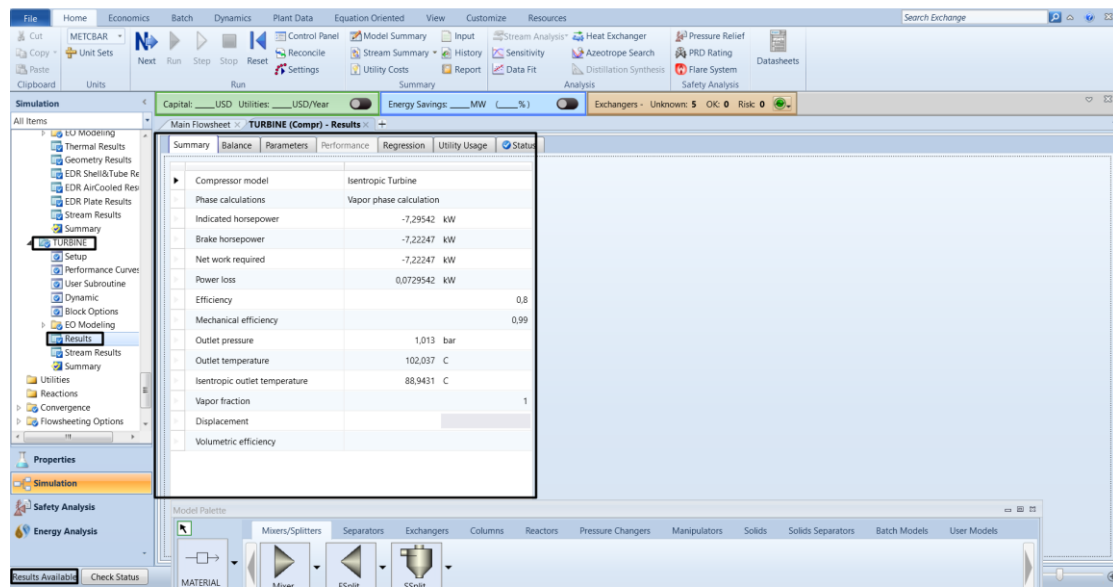
Τα ενδιάμεσα θερμά ρεύματα των τριών εναλλακτών (υπερθερμαντήρας, εξατμιστήρας και προθερμαντήρας) αποτελούν την συνέχεια του ρεύματος εξόδου των ηλιακών συλλεκτών που ορίστηκε στην αρχή της προσομοίωσης. Επομένως δεν απαιτείται ο καθορισμός των χαρακτηριστικών τους.



Εικόνα 4-32: Ολοκλήρωση εισαγωγής ρευμάτων και στοιχείων εξοπλισμού.

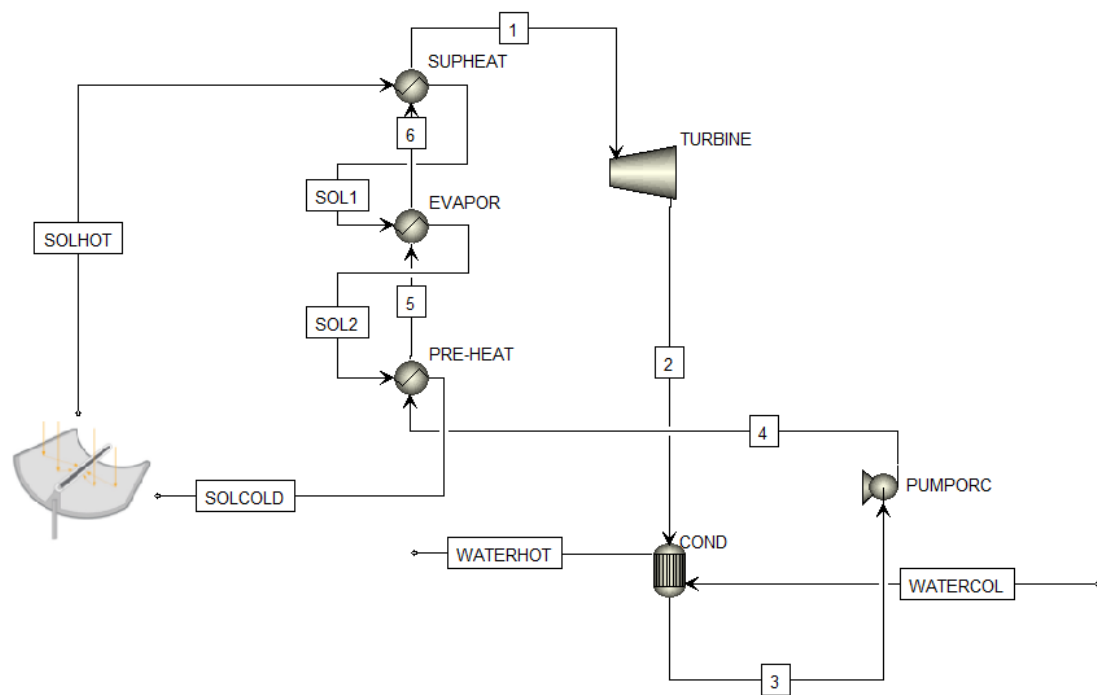
Με την ολοκλήρωση εισαγωγής ρευμάτων και στοιχείων εξοπλισμού παρατηρείται στο κάτω αριστερό άκρο της οθόνης η ένδειξη “Required Input Complete”,

υποδεικνύοντας ότι η εισαγωγή των δεδομένων έχει ολοκληρωθεί και η προσομοίωση είναι έτοιμη να εκτελεστεί επιλέγοντας την ένδειξη ▶. Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, η ένδειξη “Results Available” υποδεικνύει πως η προσομοίωση έχει εκτελεστεί χωρίς σφάλματα. Επιλέγοντας ένα ρεύμα ή στοιχείο εξοπλισμού και πατώντας στην καρτέλα results, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



Εικόνα 4-33: Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

4.3. Διάγραμμα ροής οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα



Εικόνα 4.34: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine χωρίς την χρήση οικονομητήρα.

4.3.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα

Συγκρίνοντας το παρόν διάγραμμα ροής με το διάγραμμα ροής βέλτιστης ηλεκτροπαραγωγής, παρατηρείται πως η μόνη διαφορά είναι η απουσία του οικονομητήρα, με αποτέλεσμα όλη η απορριπτόμενη θερμότητα να απάγεται από το ρεύμα νερού του συμπυκνωτή.

Αρχικά το υπέρθερμο ρευστό (ρεύμα 1) εκτονώνεται στον στρόβιλο (TURBINE), προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν η έξοδος του στρόβιλου (ρεύμα 2) εισέρχεται στον συμπυκνωτή (COND). Το ρεύμα 3 που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή βρίσκεται σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού και οδηγείται προς την αντλία. Την θερμότητα που απορρίπτεται στον συμπυκνωτή την παραλαμβάνει ρεύμα νερού (ρεύμα WATERCOL), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάγκες τηλεθέρμανσης. Στη συνέχεια η αντλία (PUMPORC) αυξάνει την πίεση στο κατάλληλο επίπεδο και το ρεύμα 4 οδηγείται για προθέρμανση στον 1^ο εναλλάκτη (PRE-HEAT). Η έξοδος του προθερμαντήρα (ρεύμα 5) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και οδηγείται στον 2^ο εναλλάκτη (EVAPOR) ώστε να παραλάβει την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Η έξοδος του εξατμιστήρα (ρεύμα 6) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και οδηγείται στον 3^ο εναλλάκτη (SUPERHEAT) όπου θα υπερθερμανθεί. Ο κύκλος κλείνει με την έξοδο του υπερθερμαντήρα (ρεύμα 1) η οποία οδηγείται εκ νέου στον στρόβιλο. Η απαραίτητη θερμότητα στο κύκλωμα των τριών εναλλακτών δίνεται από το ρεύμα νερού που προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Πίνακας 4.5: Περιγραφή ρευμάτων (*streams*) και στοιχείων εξοπλισμού (*blocks*) διαγράμματος ροής χωρίς χρήση οικονομητήρα.

Ρεύμα / εξοπλισμός	Περιγραφή
1	έξοδος υπερθερμαντήρα
2	έξοδος τουρμπίνας
3	έξοδος συμπυκνωτή
4	έξοδος αντλίας
5	έξοδος προθερμαντήρα
6	έξοδος εξατμιστήρα
SOLHOT	έξοδος ηλιακών συλλεκτών
SOL1	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ υπερθερμαντήρα και εξατμιστήρα
SOL2	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ εξατμιστήρα και προθερμαντήρα
SOLCOLD	είσοδος ηλιακών συλλεκτών
WATERCOL	είσοδος κρύου νερού στον συμπυκνωτή
WATERHOT	έξοδος θερμού νερού από τον συμπυκνωτή
TURBINE	στρόβιλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
COND	συμπυκνωτής κύκλου ORC
PUMPORC	αντλία κύκλου ORC
PRE-HEAT	εναλλάκτης θερμότητας προθέρμανσης / Προθερμαντήρας
EVAPOR	εναλλάκτης θερμότητας εξάτμισης / Εξατμιστήρας
SUPERHEAT	εναλλάκτης θερμότητας υπερθέρμανσης / Υπερθερμαντήρας

Πίνακας 4.6: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης συμπαραγωγής χωρίς χρήση οικονομητήρα.

Ρεύμα / εξοπλισμός	Προδιαγραφή
TURBINE	πίεση εξόδου
TURBINE	ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
COND	έξοδος συμπυκνωτή υπόψυκτο υγρό
COND	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά θερμού - ψυχρού ρεύματος
PUMPORC	πίεση εξόδου
PREHEAT	έξοδος προθερμαντήρα κορεσμένο υγρό
EVAPOR	έξοδος προθερμαντήρα κορεσμένος ατμός
SUPHEAT	έξοδος προθερμαντήρα υπέρθερμος ατμός
SUPHEAT	ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά θερμού - ψυχρού ρεύματος

4.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα

Κατόπιν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του οργανικού κύκλου Rankine, χωρίς την χρήση οικονομητήρα στην έξοδο του στροβίλου. Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις για κάθε οργανικό ρευστό:

- Ελάχιστη δυνατή υπόψυξη στην έξοδο του συμπυκνωτή
- Μέγιστη δυνατή υπόψυξη στην έξοδο του συμπυκνωτή

4.3.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης.

α.α.	Οργανικό ρευστό	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_WATERCOL	T_WATERHOT	T_SOLHOT	T_SOL1	T_SOL2	T_SOLCOLD	subcooling (°C)
1	pentane	181,60	107,23	36,29	37,52	171,60	171,60	10,00	37,23	190,00	188,07	177,55	152,37	0
2	isopentane	181,67	102,04	27,14	28,64	171,67	171,67	10,00	32,14	190,00	187,83	179,76	151,42	0
3	R - 134a	81,48	33,73	21,65	22,87	71,48	71,48	10,00	20,79	90,00	88,48	73,55	63,66	0
4	R - C138	123,73	68,06	18,42	20,07	113,72	113,72	10,00	19,37	132,00	128,25	125,49	101,80	0
5	Methyl formate R-611	180,88	45,12	31,44	32,30	170,88	170,88	10,00	28,84	190,00	188,78	172,08	152,05	0
6	Decafluorobutane	81,05	59,15	22,82	23,35	71,05	71,05	10,00	16,00	90,00	88,30	76,44	66,62	0
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoro / R-E245	166,81	89,41	28,87	30,07	156,81	156,81	10,00	23,34	175,00	173,90	169,52	156,51	0
8	N-hexane	181,30	136,56	68,85	69,41	171,30	171,30	10,00	36,13	190,00	188,42	173,75	155,49	0
9	N-butane	151,82	70,19	27,30	29,32	141,82	141,82	10,00	30,13	160,00	157,40	149,44	125,70	0
10	Isobutane	136,93	62,68	26,19	28,45	126,93	126,93	10,00	28,23	145,00	142,28	135,36	114,30	0
11	heptafluoropropane R-227	81,75	49,88	21,01	21,91	71,75	71,75	10,00	17,68	90,00	88,69	79,43	71,38	0
12	pentafluoropropane R-245	81,99	47,89	21,23	22,12	71,99	71,99	10,00	19,29	90,00	88,55	76,48	67,42	0
13	Ethyl-amine	181,88	48,51	34,75	36,81	171,88	171,88	10,00	33,31	190,00	187,13	175,39	143,74	0
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane R-123	181,87	75,18	27,80	29,42	171,87	171,87	10,00	19,36	190,00	189,06	185,52	174,36	0
15	toluene	241,44	183,47	112,14	112,69	231,44	231,44	10,00	31,92	250,00	248,90	234,17	218,65	0

Πίνακας 4.8: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση ελάχιστης υπόψυξης.

α.α.	Οργανικό ρευστό	Ροή μάζας οργανικού ρευστού (kg/h)	Ροή μάζας ρευστού νερού ηλιακών συλλεκτών (kg/h)	Πίεση αντλίας (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου (bar)	Θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών (°C)	Ροή μάζας ρευστού νερού απαγωγής θερμότητας στον συμπυκνωτή (kg/h)	Ισχύς στροβίλου (kW)	Ισχύς αντλίας ORC (kW)	Προσδισόμενη θερμότητα Q_in (kW)	n_el_orc (%)	Heating (kW)	nth (%)	PHR
1	pentane	250	800	23,0	1,013	190	1000	7,01	0,31	40,99	16,34	32,51	79,32	0,206
2	isopentane (2-methyl-butane)	250	800	27,0	1,013	190	1200	7,22	0,36	40,32	17,01	31,73	78,68	0,216
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	250	450	22,0	6,000	90	1000	1,52	0,11	15,00	9,37	12,90	86,01	0,109
4	Octafluorocyclobutane / R-C138	250	300	27,0	2,500	132	870	1,58	0,14	11,70	12,31	9,74	83,21	0,148
5	Methyl formate / R-611	250	800	31,0	1,013	190	1400	8,36	0,27	41,34	19,58	31,50	76,21	0,257
6	Decafluorobutane / R-31(1B)	250	300	9,5	2,500	90	1000	0,71	0,04	8,88	7,59	7,17	80,76	0,094
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	250	800	26,8	1,013	175	1000	3,34	0,16	19,99	15,89	15,94	79,72	0,199
8	N-hexane	250	800	11,2	1,013	190	1000	4,91	0,14	37,67	12,65	31,20	82,84	0,153
9	N-butane / R-600	250	800	32,3	2,600	160	1200	5,99	0,45	36,19	15,30	29,07	80,31	0,190
10	Isobutane / R-600A	250	800	32,0	3,600	145	1200	4,92	0,45	32,02	13,96	26,13	81,60	0,171
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	250	450	15,5	4,000	90	1000	1,01	0,07	10,61	8,86	9,18	86,52	0,102
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	250	450	15,4	4,100	90	1000	1,25	0,08	12,87	9,07	11,10	86,27	0,105
13	Ethyl-amine / R-631	250	800	47,2	2,000	190	1400	9,59	0,59	50,14	17,95	38,98	77,76	0,231
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	250	800	30,5	1,013	190	1200	3,31	0,18	17,30	18,11	13,42	77,61	0,233
15	toluene	250	800	12,2	1,013	250	1200	5,41	0,13	38,42	13,76	31,42	81,79	0,168

4.3.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης.

α.α.	Οργανικό ρευστό	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_WATERCOL	T_WATERHOT	T_SOLHOT	T_SOL1	T_SOL2	T_SOLCOLD	subcooling (°C)
1	pentane	181,60	107,23	16,30	17,39	171,60	171,60	10,00	39,72	190,00	188,07	177,55	149,40	20,00
2	isopentane (2-methyl-butane)	181,67	102,04	16,14	17,56	171,67	171,67	10,00	33,25	190,00	187,83	179,76	151,42	11,00
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	81,48	33,73	16,65	17,78	71,48	71,48	10,00	21,19	90,00	88,48	73,55	62,78	15,00
4	Octafluorocyclobutane / R-C138	123,73	68,06	16,32	17,93	113,72	113,72	10,00	19,51	132,00	128,25	125,49	101,39	2,00
5	Methyl formate / R-611	180,88	45,12	16,44	17,50	170,88	170,88	10,00	29,90	190,00	188,78	172,08	150,28	15,00
6	Decafluorobutane / R-31(1B)	81,05	59,15	16,82	17,32	71,05	71,05	10,00	21,38	90,00	88,30	76,44	65,49	6,00
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	166,81	89,41	16,87	17,97	156,81	156,81	10,00	24,18	175,00	173,90	169,52	155,52	12,00
8	N-hexane	181,30	136,56	15,85	16,27	171,30	171,30	10,00	42,76	190,00	188,42	173,75	147,64	53,00
9	N-butane / R-600	151,82	70,19	23,30	25,26	141,82	141,82	10,00	30,72	160,00	157,40	149,44	125,05	4,00
10	Isobutane / R-600A	136,93	62,68	17,19	19,29	126,93	126,93	10,00	29,22	145,00	142,28	135,36	112,84	9,00
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	81,75	49,88	16,01	16,85	71,75	71,75	10,00	18,01	90,00	88,69	79,43	70,67	5,00
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	81,99	47,89	16,23	17,07	71,99	71,99	10,00	19,65	90,00	88,51	76,48	66,61	5,00
13	Ethyl-amine / R-631	181,88	48,51	29,75	31,74	171,88	171,88	10,00	33,85	190,00	187,13	175,39	142,85	5,00
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	181,87	75,18	16,30	17,80	171,87	171,87	10,00	19,87	190,00	189,06	185,52	173,65	11,00
15	toluene	241,44	183,47	16,14	16,52	231,44	231,44	10,00	39,64	250,00	248,90	234,17	208,65	96,00

Πίνακας 4.10: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής της προσομοίωσης οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση οικονομητήρα για την περίπτωση μέγιστης υπόψυξης.

α.α.	Οργανικό ρευστό	Ροή μάζας οργανικού ρευστού (kg/h)	Ροή μάζας ρεύματος νερού ηλιακών συλλεκτών (kg/h)	Πίεση αντλίας (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου (bar)	Θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών (°C)	Ροή μάζας ρεύματος νερού απαγωγής θερμότητας στον συμπυκνωτή (kg/h)	Ισχύς στροβίλου (kW)	Ισχύς αντλίας ORC (kW)	Προσδιοσόμενη θερμότητα Q_in (kW)	n_el,orc (%)	Heating (kW)	n _{th} (%)	PHR
1	pentane	250	800	23,0	1,013	190	1000	7,01	0,30	44,15	15,20	35,50	80,42	0,189
2	isopentane (2-methyl-butane)	250	800	27,0	1,013	190	1200	7,22	0,36	42,00	16,33	33,32	79,32	0,206
3	1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	250	450	22,0	6,000	90	1000	1,52	0,10	15,50	9,17	13,37	86,29	0,106
4	Octafluorocyclobutane / R-C138	250	300	27,0	2,500	132	870	1,58	0,14	11,86	12,15	9,89	83,36	0,146
5	Methyl formate / R-611	250	800	31,0	1,013	190	1400	8,36	0,27	43,21	18,73	33,28	77,01	0,243
6	Decafluorobutane / R-31(1B)	250	300	9,5	2,500	90	1000	0,71	0,04	9,31	7,25	8,16	87,66	0,083
7	2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	250	800	26,8	1,013	175	1000	3,33	0,16	21,05	15,06	16,94	80,48	0,187
8	N-hexane	250	800	11,2	1,013	190	1000	4,91	0,13	46,01	10,39	39,12	85,03	0,122
9	N-butane / R-600	250	800	32,3	2,600	160	1200	5,99	0,45	36,87	15,03	29,71	80,57	0,186
10	Isobutane / R-600A	250	800	32,0	3,600	145	1200	4,92	0,44	33,52	13,36	27,54	82,16	0,163
11	1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	250	450	15,5	4,000	90	1000	1,01	0,07	11,02	8,53	9,57	86,83	0,098
12	1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	250	450	15,4	4,100	90	1000	1,25	0,08	13,33	8,78	11,54	86,56	0,101
13	Ethyl-amine / R-631	250	800	47,2	2,000	190	1400	9,59	0,58	51,07	17,64	39,87	78,07	0,226
14	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	250	800	30,5	1,013	190	1200	3,31	0,17	18,07	17,35	14,16	78,34	0,222
15	toluene	250	800	12,2	1,013	250	1200	5,41	0,11	50,06	10,59	42,47	84,84	0,125

4.3.3. Σύγκριση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης περιπτώσεων μέγιστης και ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή

Πίνακας 4.11: Σύγκριση ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης μεταξύ των περιπτώσεων μέγιστης και ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή για το σενάριο προσομοίωσης χωρίς χρήση οικονομητήρα.

Οργανικό ρευστό	minimum subcooling n_el_orc (%)	maximum subcooling n_el_orc (%)	Επί τις εκατό αύξηση (%)
pentane	16,34	15,20	7,51
isopentane (2-methyl-butane)	17,01	16,33	4,16
1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	9,37	9,17	2,16
Octafluorocyclobutane / R-C138	12,31	12,15	1,33
Methyl formate / R-611	19,58	18,73	4,53
Decafluorobutane / R-31(1B)	7,59	7,25	4,81
2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	15,89	15,06	5,52
N-hexane	12,65	10,39	21,81
N-butane / R-600	15,30	15,03	1,81
Isobutane / R-600A	13,96	13,36	4,45
1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	8,86	8,53	3,83
1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	9,07	8,78	3,36
Ethyl-amine / R-631	17,95	17,64	1,77
2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	18,11	17,35	4,36
toluene	13,76	10,59	29,95

Ο βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγαλύτερος στην περίπτωση της ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή σε σύγκριση με το σενάριο μέγιστης υπόψυξης. Το συμπέρασμα αυτό είναι λογικό αφού ελαχιστοποιώντας το επίπεδο υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή, απορρίπτεται λιγότερη θερμότητα και τελικά το οργανικό ρευστό έχει μειωμένες απαιτήσεις παραλαβής θερμότητας από το θερμό ρεύμα των ηλιακών συλλεκτών. Επομένως η απαίτηση προσδιδόμενης θερμότητας από το ρεύμα των ηλιακών συλλεκτών μειώνεται, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον στρόβιλο μένει σταθερή (εξίσωση 1).

Το ποσοστό αύξησης του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης είναι διαφορετικό για κάθε οργανικό ρευστό και εξαρτάται από την δυνατότητα υπόψυξης του ρευστού στην εκάστοτε πίεση (καμπύλη T-S).

4.3.4. Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από τη παρουσία οικονομητήρα

Πίνακας 4.12: Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από την παρουσία οικονομητήρα.

Οργανικό ρευστό	Χαρακτηρισμός οργανικού ρευστού	χρήση αναγεννητή		απουσία αναγεννητή		Επί τις εκατό αύξηση βαθμού απόδοσης (%)
		n_el_orc (%)	PHR	n_el_orc (%)	PHR	
pentane	ξηρό	20,59	0,274	16,34	0,206	26,05
isopentane (2-methyl-butane)	ξηρό	21,77	0,294	17,01	0,216	27,98
1,1,1,2-tetrafluoroethane / R-134a	υγρό	9,60	0,112	9,37	0,109	2,45
Octafluorocyclobutane / R-C138	ξηρό	15,51	0,194	12,31	0,148	26,00
Methyl formate / R-611	υγρό	19,87	0,262	19,58	0,257	1,45
Decafluorobutane / R-31(1B)	ξηρό	9,96	0,117	7,59	0,094	31,16
2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoroethane / R-E245	ξηρό	19,47	0,255	15,89	0,199	22,56
N-hexane	ξηρό	16,50	0,209	12,65	0,153	30,43
N-butane / R-600	ξηρό	17,50	0,224	15,30	0,190	14,37
Isobutane / R-600A	ξηρό	15,73	0,197	13,96	0,171	12,70
1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane / R-227	ξηρό	10,12	0,119	8,86	0,102	14,24
1,1,1,2,2-pentafluoropropane / R-245 cb	ξηρό	10,16	0,119	9,07	0,105	11,97
Ethyl-amine / R-631	υγρό	18,23	0,235	17,95	0,231	1,56
2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane / R-123	ξηρό	20,45	0,272	18,11	0,233	12,94
toluene	ξηρό	16,63	0,210	13,76	0,168	20,83

Όπως παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα η παρουσία οικονομητήρα οδηγεί σε αυξημένους βαθμούς ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με το σενάριο απουσίας οικονομητήρα. Το αποτέλεσμα είναι λογικό αφού η επιπλέον θερμότητα του ρευστού στην έξοδο του στροβίλου χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του ρεύματος που οδηγείται στον προθερμαντήρα αντί να απορριφθεί στον συμπυκνωτή.

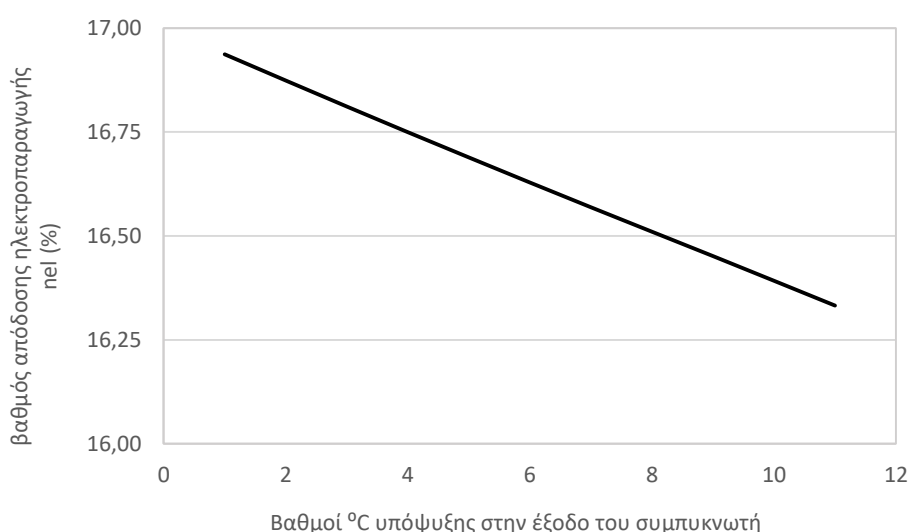
Μάλιστα η αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης είναι μεγαλύτερη όσο πιο «ξηρό» είναι το οργανικό ρευστό με βάση την καμπύλη T-S (κεφάλαιο 2). Για τα «υγρά» οργανικά ρευστά (R-134a, methyl formate, Ethyl-amine), η αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης με την προσθήκη οικονομητήρα είναι πολύ μικρή. Στην περίπτωση των «υγρών» οργανικών ρευστών, η υψηλότερη υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου πριν τον στρόβιλο, θα οδηγούσε σε υψηλότερους βαθμούς απόδοσης.

4.3.5. Ανάλυση ευαισθησίας (ii)

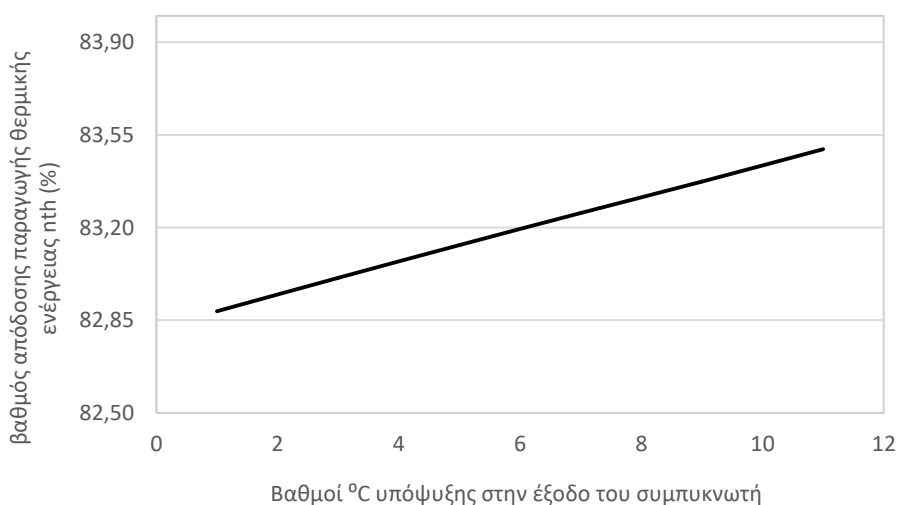
Για την προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine χωρίς την χρήση οικονομητήρα και εργαζόμενο μέσο το ισοπεντάνιο, έλαβαν χώρα οι παρακάτω αναλύσεις ευαισθησίας:

α) μεταβολή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης καθώς και του βαθμού απόδοσης παραγωγής θερμικής ενέργειας σε σχέση με τους βαθμούς °C υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή.

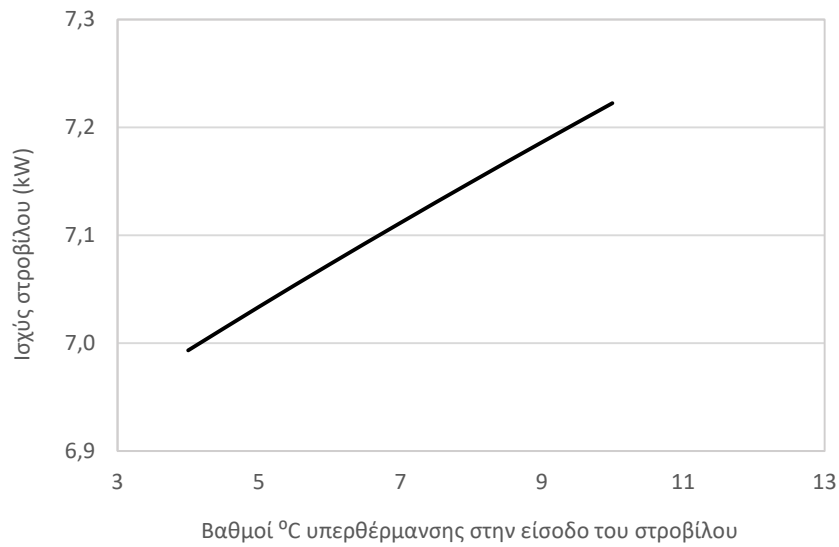
β) μεταβολή της παραγόμενης ισχύος (kW) στον στρόβιλο καθώς και της παραγόμενης θερμικής ενέργειας (kW) σε σχέση με τους βαθμούς °C υπερθέρμανσης στην είσοδο του στροβίλου.



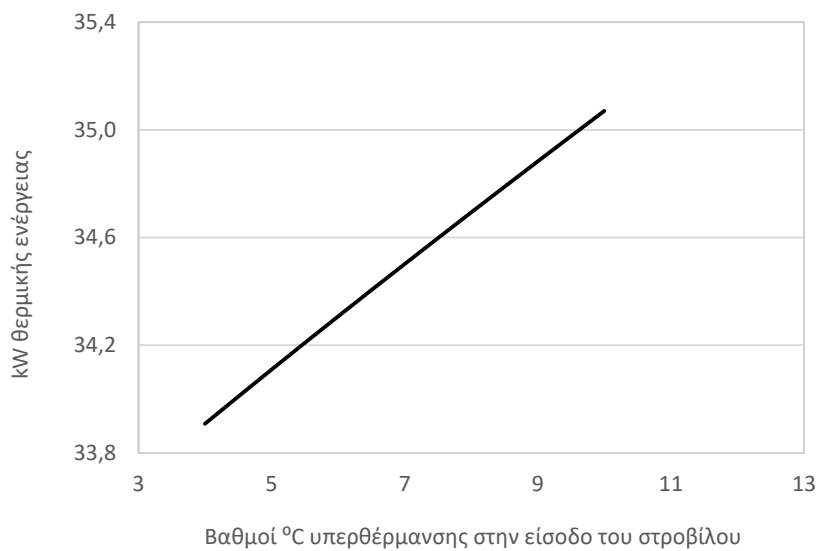
Διάγραμμα 4.3: Εξάρτηση ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης από τους βαθμούς °C υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή.



Διάγραμμα 4.4: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης παραγωγής θερμικής ενέργειας από τους βαθμούς °C υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή.



Διάγραμμα 4.5: Εξάρτηση ισχύος στροβίλου από τους βαθμούς °C υπερθέρμανσης στην είσοδο του στροβίλου.



Διάγραμμα 4.6: Εξάρτηση παραγόμενης θερμικής ενέργειας από τους βαθμούς °C υπερθέρμανσης στην είσοδο του στροβίλου.

Κεφάλαιο 5. Προσομοιώσεις οργανικού κύκλου Rankine - τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, ψύξης και θερμότητας

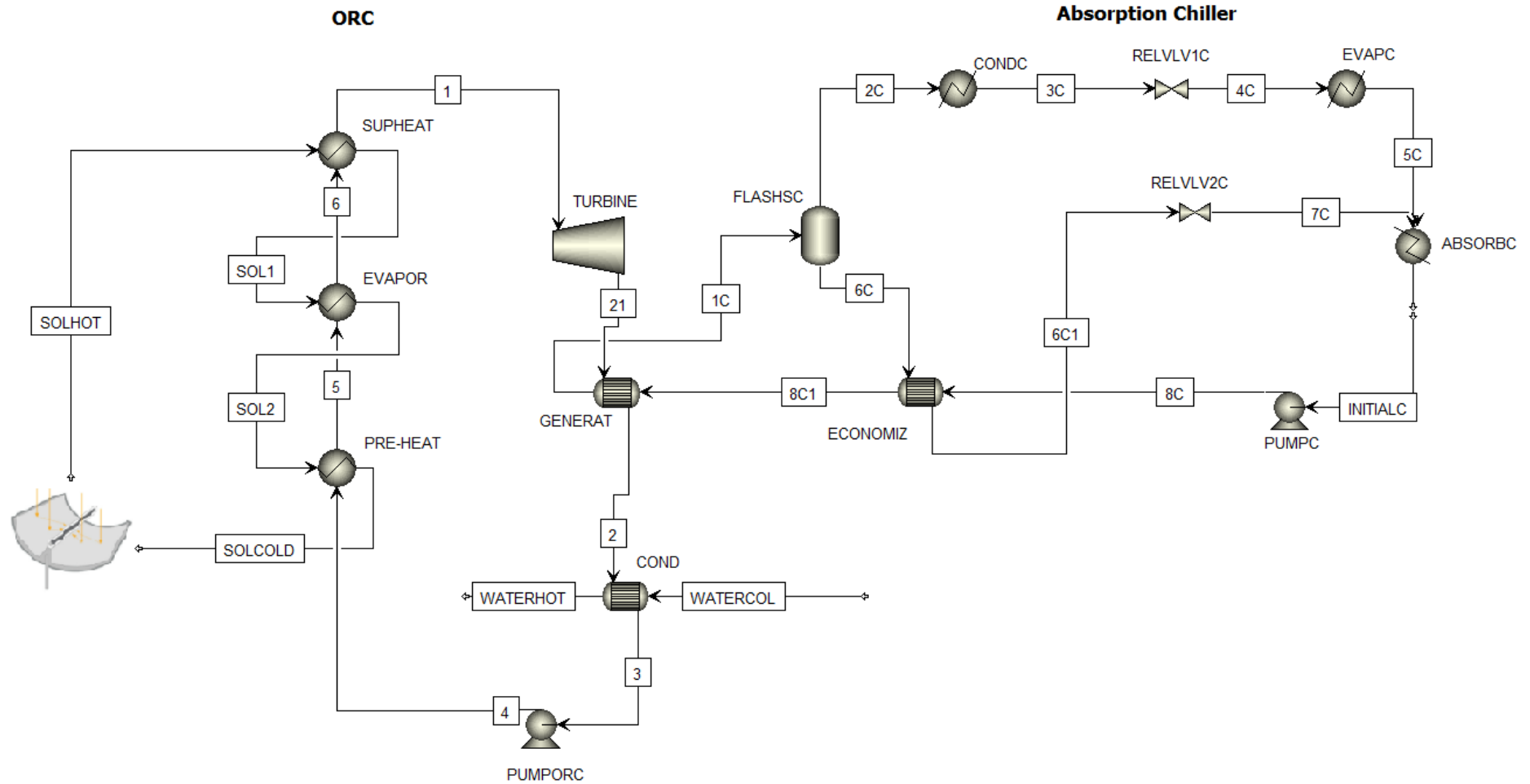
5.1. Εισαγωγή

Κατόπιν παρουσιάζονται τα δύο σενάρια προσομοίωσης του οργανικού κύκλου Rankine που στοχεύουν στην τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, ψύξης και θερμότητας. Η διαφορά των σεναρίων εντοπίζεται στην παρουσία του επιπλέον στρόβιλου πριν τον συμπυκνωτή του οργανικού κύκλου Rankine.

Στο πρώτο σενάριο τριπαραγωγής όπου χρησιμοποιείται μόνο ένας στρόβιλος μελετήθηκαν ως εργαζόμενα μέσα το πεντάνιο, το ισοπεντάνιο και το τολουόλιο. Στο δεύτερο σενάριο τριπαραγωγής όπου υπάρχουν δύο στρόβιλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μελετήθηκαν ως εργαζόμενα μέσα το βουτάνιο, το ισοβουτάνιο και η αιθυλαμίνη.

Η παραγωγή ψύξης επιτυγχάνεται μέσω του κυκλώματος του ψύκτη απορρόφησης που χρησιμοποιεί το νερό ως ψυκτικό υγρό και το βρωμιούχο λίθιο ως απορροφητικό υγρό.

5.2. Προσομοίωση τριπαραγωγής ενός στροβίλου



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine ενός στροβίλου και κύκλου ψύξης με απορρόφηση.

5.2.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής τριπαραγωγής ενός στροβίλου

Κύκλος ORC

Αρχικά το υπέρθερμο ρευστό (ρεύμα 1) εκτονώνεται στον στρόβιλο (TURBINE), προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν η έξοδος του στροβίλου (ρεύμα 21) εισέρχεται στον αναγεννητή (εναλλάκτης θερμότητας GENERAT) όπου αποδίδει θερμότητα στο κύκλο της ψύξης με απορρόφηση. Η έξοδος του αναγεννητή (ρεύμα 2) εισέρχεται στον συμπυκνωτή (COND). Το ρεύμα 3 που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή βρίσκεται σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού και οδηγείται προς την αντλία. Η θερμότητα η οποία απορρίπτεται στον συμπυκνωτή παραλαμβάνεται από το ρεύμα κρύου νερού (WATERCOL). Στη συνέχεια η αντλία (PUMPORC) αυξάνει την πίεση στο κατάλληλο επίπεδο και το ρεύμα 4 οδηγείται για προθέρμανση στον 1^ο εναλλάκτη (PRE-HEAT). Η έξοδος του προθερμαντήρα (ρεύμα 5) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και οδηγείται στον 2^ο εναλλάκτη (EVAPOR) ώστε να παραλάβει την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Η έξοδος του εξατμηστήρα (ρεύμα 6) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και οδηγείται στον 3^ο εναλλάκτη (SUPHEAT) όπου θα υπερθερμανθεί. Ο κύκλος κλείνει με την έξοδο του υπερθερμαντήρα (ρεύμα 1) η οποία οδηγείται εκ νέου στον στρόβιλο. Η απαραίτητη θερμότητα στο κύκλωμα των τριών εναλλακτών δίνεται από το ρεύμα νερού που προέρχεται από τους ηλιακούς συλλέκτες.

Ψύκτης απορρόφησης νερού – βρωμιούχου λιθίου (LiBr)

Ο αναγεννητής (εναλλάκτης GENERAT) χρησιμοποιείται ταυτόχρονα για να παραλάβει θερμότητα από το ρεύμα που εξέρχεται από την τουρμπίνα του κλειστού κυκλώματος του οργανικού κύκλου Rankine καθώς και για να παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για την παραγωγή ψύξης στο κλειστό κύκλωμα του ψύκτη με απορρόφηση. Το κύκλωμα του ψύκτη απορρόφησης χρησιμοποιεί το νερό ως ψυκτικό υγρό και το βρωμιούχο λίθιο ως απορροφητικό υγρό. Το ρεύμα αραιού διαλύματος απορροφητικού και ψυκτικού μέσου (ρεύμα 1C), έχοντας παραλάβει θερμότητα από τον αναγεννητή οδηγείται στον διαχωριστή αέριας και υγρής φάσης (FLASHC).

Η έξοδος από την κορυφή του διαχωριστή φάσεων είναι το ρεύμα καθαρού νερού (ψυκτικό υγρό του κύκλου) σε κατάσταση κορεσμένου ατμού (ρεύμα 2C) το οποίο οδηγείται στον συμπυκνωτή (CONDC). Η έξοδος του συμπυκνωτή (CONDC) είναι το ρεύμα κορεσμένου υγρού (ρεύμα 3C) το οποίο οδηγείται στην εκτονωτική διάταξη (RELVLV1C). Το ρεύμα εξόδου της εκτονωτικής διάταξης (ρεύμα 4C) εισέρχεται στον εναλλάκτη (EVAPC) ο οποίος λειτουργεί σαν εξατμηστήρας. Στον εξατμηστήρα, θερμότητα απορροφάται από τον κλιματιζόμενο χώρο παράγοντας ψύξη και το ρεύμα καθαρού νερού, λειτουργώντας σαν ψυκτικό, ατμοποιείται. Η έξοδος του

εξατμηστήρα (ρεύμα 5C), σε κατάσταση κορεσμένου ατμού, οδηγείται στον απορροφητή (ABSORBC).

Η έξοδος πυθμένα του διαχωριστή φάσεων (ρεύμα 6C) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και αποτελεί μίγμα νερού και βρωμιούχου λιθίου. Αντιστοιχεί στο ρεύμα συμπυκνωμένου διαλύματος απορροφητικού και ψυκτικού μέσου του κύκλου. Το ρεύμα εξόδου πυθμένα του διαχωριστή φάσεων οδηγείται στον οικονομική (εναλλάκτης θερμότητας ECONOMIZ) όπου αποβάλλει θερμότητα η οποία παραλαμβάνεται από το ρεύμα αραιού απορροφητικού και ψυκτικού μέσου του κλειστού κύκλου. Η θερμή έξοδος του οικονομική (ρεύμα 6C1) οδηγείται στην εκτονωτική διάταξη (RELVLV2C). Το ρεύμα εξόδου της εκτονωτικής διάταξης (ρεύμα 7C) εισέρχεται στον απορροφητή (ABSORBC) μαζί με το ρεύμα εξόδου του εξατμηστήρα (ρεύμα 5C). Στον απορροφητή, το απορροφητικό μέσο απορροφά τον ατμό του ψυκτικού μέσου. Την έξοδο του απορροφητή αποτελεί το ρεύμα αραιού διαλύματος απορροφητικού και ψυκτικού μέσου (ρεύμα INITIALC) σε κατάσταση κορεσμένου υγρού το οποίο εισέρχεται στην αντλία (PUMPC). Η έξοδος της αντλίας (ρεύμα 8C) οδηγείται στον οικονομητήρα ώστε να παραλάβει θερμότητα. Στη συνέχεια το ρεύμα αραιού απορροφητικού και ψυκτικού μέσου (ρεύμα 8C1) οδηγείται στον αναγεννητή όπου παραλαμβάνει θερμότητα. Ο κύκλος του ψύκτη απορρόφησης κλείνει με την έξοδο του αναγεννητή (ρεύμα 1C) να οδηγείται εκ νέου προς τον διαχωριστή φάσεων.

Ο συνδυασμός του οργανικού κύκλου Rankine με τον κύκλο ψύξης με απορρόφηση έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού, ψύξης και θερμότητας προς τηλεθέρμανσης.

Για το σενάριο τριπαραγωγής με χρήση μονού στροβίλου ως εργαζόμενα μέσα επιλέχθηκαν το πεντάνιο, το ισοπεντάνιο και το τολουόλιο.

Πίνακας 5.1: Προδιαγραφές σχεδιασμού προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.

Ρεύμα / εξοπλισμός	Προδιαγραφή
TURBINE	Πίεση εξόδου
TURBINE	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης
GENERAT	Θερμή έξοδος σε κατάσταση υπέρθετου ατμού ή κορεσμένου ατμού
COND	Έξοδος υπόψυκτο υγρό
GENERAT	Θερμοκρασιακή πτώση θερμής εξόδου
PUMPC	Πίεση εξόδου
PREHEAT	Ψυχρή έξοδος προθερμαντήρα κορεσμένο υγρό
EVAPOR	Ψυχρή έξοδος προθερμαντήρα κορεσμένος ατμός
SUPHEAT	Ψυχρή έξοδος προθερμαντήρα υπέρθετος ατμός
COND	Έξοδος συμπυκνωτή κορεσμένο υγρό
RELVLV1C	Πίεση εξόδου
EVAPC	Έξοδος εξατμιστή κορεσμένος ατμός
RELVLV2C	Πίεση εξόδου
ABSORBC	Έξοδος απορροφητή κορεσμένο υγρό
PUMPC	Πίεση εξόδου
ECONOMIZ	Θερμοκρασιακή πτώση θερμής εξόδου
FLASHC	Πίεση και ενεργειακή κατανάλωση ίση με μηδέν

Πίνακας 5.2: Περιγραφή ρευμάτων (*streams*) και στοιχείων εξοπλισμού (*blocks*) διαγράμματος ροής τριπαραγωγής με χρήση ενός στρόβιλου.

Ρεύμα / εξοπλισμός	Περιγραφή
1	έξοδος υπερθερμαντήρα
21	έξοδος τουρμπίνας
22	είσοδος συμπυκνωτή κύκλου ORC
2	θερμή έξοδος αναγεννητή
3	έξοδος συμπυκνωτή κύκλου ORC
4	έξοδος αντλίας κύκλου ORC
5	έξοδος προθερμαντήρα
6	έξοδος εξατμιστήρα κύκλου ORC
1C	είσοδος διαχωστή φάσεων
2C	έξοδος κορυφής διαχωριστή φάσεων
3C	έξοδος συμπυκνωτή κύκλου ψύξης με απορρόφηση
4C	είσοδος εξατμιστήρα κύκλου ψύξης με απορρόφηση
5C	έξοδος εξατμιστήρα κύκλου ψύξης με απορρόφηση
6C	έξοδος πυθμένα διαχωριστή φάσεων
6C1	θερμή έξοδος οικονομική
7C	είσοδος συμπυκνωμένου διαλύματος απορροφητικού - ψυκτικού στον απορροφητή
INITIALC	έξοδος απορροφητή
8C	έξοδος αντλίας κύκλου ψύξης με απορρόφηση
8C1	ψυχρή είσοδος αναγεννητή
SOLHOT	έξοδος ηλιακών συλλεκτών
SOL1	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ υπερθερμαντήρα και εξατμιστήρα
SOL2	ενδιάμεσο θερμό ρεύμα μεταξύ εξατμιστήρα και προθερμαντήρα
SOLCOLD	είσοδος ηλιακών συλλεκτών
TURBINE	στρόβιλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
COND	ψύκτης κύκλου ORC
GENERAT	αναγεννητής
PUMPORC	αντλία ORC
PRE-HEAT	εναλλάκτης θερμότητας για προθέρμανση / Προθερμαντήρας
EVAPOR	εναλλάκτης θερμότητας για εξατμισμό / Εξατμιστήρας
SUPERHEAT	εναλλάκτης θερμότητας για υπερθέρμανση / Υπερθερμαντήρας
FLASHC	διαχωριστής φάσεων
CONDC	συμπυκνωτής ψυκτικού μέσου
RELVLV1C	εκτονωτική διάταξη ψυκτικού μέσου
EVAPC	εξατμιστήρας ψυκτικού μέσου
RELVLV2C	εκτονωτική διάταξη συμπυκνωμένου διαλύματος απορροφητικού - ψυκτικού
ABSORBC	απορροφητής
ECONOMIZ	οικονομητήρας κύκλου ψύξης με απορρόφηση
PUMPC	αντλία κύκλου ψύξης με απορρόφηση

5.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.

α.α.	Οργανικό ρευστό	T_1	T_21	T_3	T_4	T_5	T_6	T_2	T_WATERCOL	T_WATERHOT	T_SOLHOT	T_SOL1	T_SOL2	T_SOLCOLD
1	pentane	181,95	111,57	36,04	37,81	171,95	171,95	79,57	10,00	35,96	190,00	188,00	179,53	147,18
2	isopentane	181,87	105,95	27,84	29,98	171,87	171,87	74,95	10,00	31,10	190,00	187,80	182,46	148,02
3	toluene	241,87	184,32	110,64	111,54	231,87	231,87	111,32	10,00	27,87	250,00	248,73	233,21	213,10

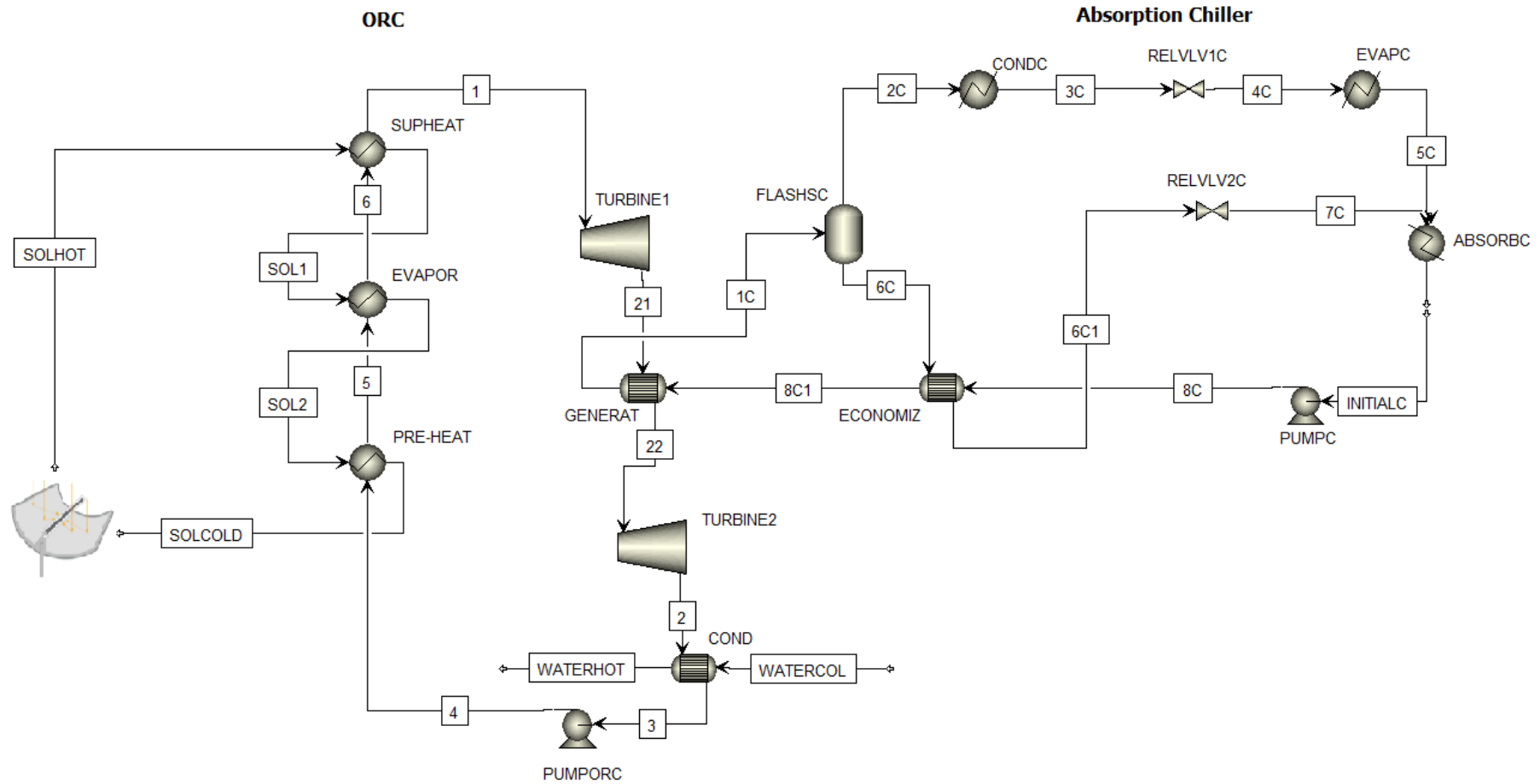
Πίνακας 5.4: Υπολογισμός βαθμών απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και ψύξης της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου.

α.α.	Οργανικό ρευστό	Ροή μάζας οργανικού ρευστού (kg/h)	Ροή μάζας ρεύματος νερού ηλιακών συλλεκτών (kg/h)	Πίεση αντλίας ORC (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου (bar)	Ροή μάζας ρεύματος νερού απαγωγής θερμότητας στον συμπηκνωτή (kg/h)	Ισχύς στροβίλου (kW)	Ισχύς αντλίας ORC (kW)	Προσδιοσόμενη θερμότητα Q_in (KW)	n_el_orc (%)	Heating (kW)	nth (%)	Cooling (kW)	ncooling (%)	ntot (%)
1	pentane	250	800	23	1,013	1000	7,20	0,31	41,56	16,58	28,64	68,92	2,22	5,34	90,83
2	isopentane	250	800	26,7	1,013	1200	7,39	0,36	40,75	17,24	27,94	68,57	1,64	4,03	89,84
3	toluene	250	800	12,7	1,013	1200	5,57	0,13	38,48	14,15	23,66	61,49	6,52	16,94	92,58

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς COP (coefficient of performance, COP).

α.α.	Οργανικό ρευστό	Q _{GEN} (kW)	Cooling (kW)	COP
1	pentane	4,45	2,22	0,499
2	isopentane	5,12	1,64	0,321
3	toluene	8,07	6,52	0,807
4	N-butane	3,36	2,34	0,696
5	Isobutane	2,55	0,77	0,303
6	Ethyl-amine	2,26	1,48	0,654

5.3. Προσομοίωση τριπαραγωγής δύο στροβίλων



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα ροής μονάδας οργανικού κύκλου Rankine δύο στροβίλων και κύκλου ψύξης με απορρόφηση.

5.3.1. Περιγραφή διαγράμματος ροής τριπαραγωγής δύο στροβίλων

Το σενάριο τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων χρησιμοποιείται στην περίπτωση των οργανικών ρευστών όπου απαιτείται η εκτόνωση του ρευστού σε υψηλή πίεση στον 1^ο στρόβιλο, ώστε να προσδοθεί θερμότητα στον κύκλο ψύξης και κατόπιν, η εκτόνωση του οργανικού ρευστού σε χαμηλότερη πίεση στον 2^ο στρόβιλο στην χαμηλότερη δυνατή πίεση με στόχο την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Επομένως η διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο σενάρια τριπαραγωγής εντοπίζεται στην ύπαρξη του 2^{ου} στροβίλου μετά τον αναγεννητή στην περίπτωση της τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.

Συγκεκριμένα η θερμή έξοδος του αναγεννητή (ρεύμα 22), έχοντας προσδώσει την απαραίτητη θερμότητα στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση, εισέρχεται στον δεύτερο στρόβιλο (TURBINE 2) όπου εκτονώνεται προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν η έξοδος του 2^{ου} στροβίλου (ρεύμα 2) οδηγείται στον συμπυκνωτή. Το υπολειπόμενο κομμάτι του οργανικού κύκλου Rankine καθώς και ο κύκλος ψύξης με απορρόφηση λειτουργούν όπως ακριβώς παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Η προσομοίωση έλαβε χώρα για τα οργανικά ρευστά βουτάνιο, ισοβουτάνιο και αιθυλαμίνη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

5.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα θερμοκρασιών (°C) της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.

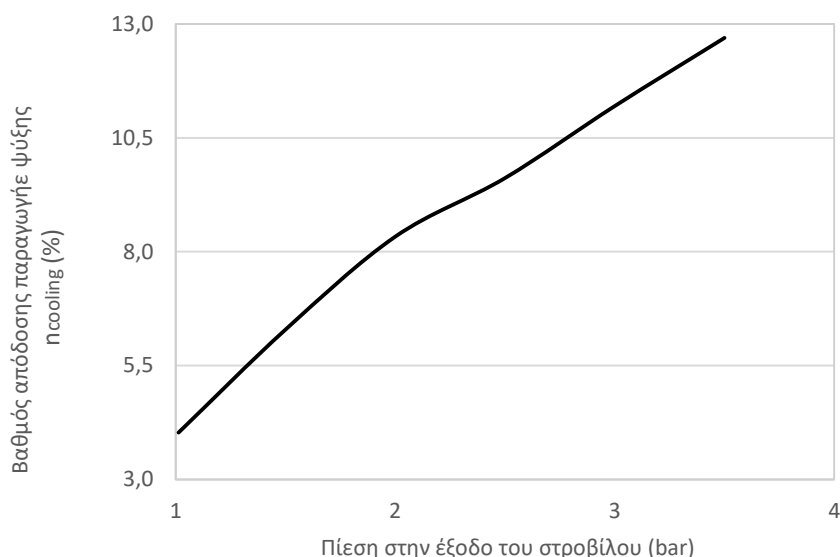
α.α.	Οργανικό ρευστό	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_21	T_22	T_WATERCOL	T_WATERHOT	T_SOLHOT	T_SOL1	T_SOL2	T_SOLCOLD
1	N-butane	151,94	50,50	25,87	28,25	141,94	141,94	113,11	91,10	10,00	26,95	160,00	157,49	153,36	121,62
2	Isobutane	136,90	49,82	26,59	28,90	126,90	126,90	98,30	81,30	10,00	27,95	145,00	142,37	139,46	111,13
3	Ethyl-amine	182,00	43,37	37,45	40,18	172,00	172,00	107,89	91,89	10,00	35,51	190,00	187,38	179,07	135,22

Πίνακας 5.7: Υπολογισμός βαθμών απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής και ψύξης της προσομοίωσης τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.

α.α.	Οργανικό ρευστό	Ροή μάζας οργανικού ρευστού (kg/h)	Ροή μάζας ρεύματος νερού ηλιακών συλλεκτών (kg/h)	Πίεση αντλίας (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου 1 (bar)	Πίεση στην έξοδο του στροβίλου 2 (bar)	Ροή μάζας ρεύματος νερού απαγωγής θερμότητας στον συμπηκνωτή (kg/h)	Ισχύς στροβίλου 1 (kW)	Ισχύς στροβίλου 2 (kW)	Έργο αντλίας ORC (kW)	Προσδιδομένη θερμότητα α Q_in (kW)	η _{el} (%)	Heating (kW)	η _{th} (%)	Cooling (kW)	η _{cooling} (%)	η _{tot} (%)
1	N-butane	250	800	32,2	12	2,5	1400	2,29	3,72	0,45	36,55	16,46	26,19	71,65	2,34	6,40	94,50
2	Isobutane	250	800	31,9	12	3,7	1200	2,16	2,71	0,45	32,05	15,21	23,77	74,18	0,77	2,40	91,79
3	Ethyl-amine	250	800	47,2	10	2,2	1400	4,94	4,75	0,59	52,93	18,31	39,40	74,43	1,48	2,79	95,53

5.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας (iii)

Κατόπιν παρουσιάζεται η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης παραγωγής ψύξης από την μεταβολή της πίεσης εξόδου του στροβίλου, για το σενάριο χρήσης ενός στροβίλου με εργαζόμενο ρευστό το ισοπεντάνιο.



Διάγραμμα 5.1: Εξάρτηση βαθμού απόδοσης παραγωγής ψύξης από την μεταβολή της πίεσης εξόδου του στροβίλου, για το σενάριο χρήσης ενός στροβίλου με εργαζόμενο ρευστό το ισοπεντάνιο.

Πίνακας 5.8: Εξάρτηση ολικού βαθμού απόδοσης από την μεταβολή της πίεσης εξόδου του στροβίλου, για το σενάριο χρήσης ενός στροβίλου με εργαζόμενο ρευστό το ισοπεντάνιο.

Πίεση εξόδου στροβίλου (bar)	Ισχύς στροβίλου (kW)	Ισχύς αντλίας ORC (kW)	Προσδιδόμεν η θερμότητα Q_in (KW)	Heating (kW)	Cooling (kW)	η _{el} (%)	η _{th} (%)	η _{cooling} (%)	η _{total} (%)
1,01	7,39	0,36	40,75	27,94	1,64	17,24	68,57	4,03	89,832
1,50	6,49	0,37	38,70	27,39	2,43	15,82	70,78	6,29	92,893
2,00	5,82	0,36	37,02	25,51	3,08	14,74	68,91	8,33	91,979
2,50	5,30	0,36	35,59	24,87	3,42	13,87	69,88	9,62	93,374
3,00	4,87	0,36	34,34	23,52	3,85	13,14	68,48	11,20	92,819
3,50	4,51	0,36	33,22	22,29	4,22	12,51	67,10	12,69	92,298

Η αύξηση της πίεσης εξόδου του στροβίλου οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή έργου. Ωστόσο το ρεύμα εξόδου του στροβίλου που οδηγείται στον αναγεννητή, έχει αυξημένη θερμοκρασία και αποδίδει περισσότερη θερμότητα στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η παραγωγή ψύξης.

5.3.4. Σύγκριση σεναρίων τριπαραγωγής

Το σενάριο τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου επιλέχθηκε στην περίπτωση των οργανικών ρευστών (πεντάνιο, ισοπεντάνιο, τολουόλιο) τα οποία έχουν την δυνατότητα να εκτονωθούν στην χαμηλότερη δυνατή πίεση ώστε να μεγιστοποιηθεί η ηλεκτροπαραγωγή, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να προσδώσουν ικανοποιητική θερμότητα στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση ώστε να παραχθεί ψύξη.

Το σενάριο τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων στοχεύει στην παραγωγή ψύξης από οργανικά ρευστά (βουτάνιο, ισοβουτάνιο, αιθυλαμίνη), τα οποία εκτονώνονται σε ενδιάμεσα επίπεδα πίεσης, κατόπιν προσδίδουν την απαραίτητη θερμότητα στον κύκλο ψύξης με απορρόφηση και τελικά εκτονώνονται εκ νέου στην χαμηλότερη δυνατή πίεση ώστε να παραχθεί επιπλέον έργο. Τα οργανικά ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο τριπαραγωγής με χρήση ενός στροβίλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο σενάριο τριπαραγωγής με χρήση δύο στροβίλων.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και για τα δύο σενάρια, παρατηρείται πως η επιλογή του τολουολίου (σενάριο ενός στροβίλου) οδηγεί με διαφορά στην υψηλότερη παραγωγή ψύξης (6,52 kW) και στον υψηλότερο βαθμό απόδοσης ψύξης (16,94 %). Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην προσομοίωση του τολουολίου το ρεύμα των ηλιακών συλλεκτών που προσδίδει θερμότητα στον οργανικό κύκλο Rankine βρίσκεται σε θερμοκρασία 250 °C (έναντι 190 °C στις προσομοίωση πεντανίου, ισοπεντανίου, αιθυλαμίνης) και σαν αποτέλεσμα το εργαζόμενο μέσο (τολουόλιο) μπορεί να προσφέρει αυξημένη θερμότητα στο κύκλωμα ψύξης.

Συμπεραίνεται πως η παραγομένη ψύξη αυξάνεται σε εφαρμογές υψηλότερων θερμοκρασιών, όπου η προσδιδόμενη θερμότητα στο κύκλωμα ψύξης με απορρόφηση είναι αυξημένη. Ένας άλλος τρόπος για να αυξηθεί η παραγόμενη ψύξη είναι η εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου σε υψηλή πίεση στον πρώτο στροβίλο, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερο βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής. Η επιλογή των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος γίνεται πάντα με γνώμονα τις ανάγκες σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης.

Κεφάλαιο 6. Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών

6.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία υπολογισμού της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών χωρίζεται σε δύο βήματα. Αρχικά υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή των ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος και κατόπιν υπολογίζεται η επιφάνεια των συλλεκτών. Οι αντίστοιχες σχέσεις παρουσιάζονται στις ενότητες 2.4.2.1. και 2.4.2.2. του κεφαλαίου 2.

6.2. Υπολογισμός βαθμού απόδοσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος

Οι ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος χρησιμοποιούνται μόνο στις εφαρμογές των 90 °C. Στις υπόλοιπες εφαρμογές (132 °C και άνω) επιλέγονται παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες.

Ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης και των δύο τύπων ηλιακών συλλεκτών γίνεται από την εξίσωση 6. Συγκεκριμένα κατά τον υπολογισμό θεωρείται:

- Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος 18 °C.
- Μέση τιμή άμεσης ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου I_b , 277,78 W/m² (1 MJ/m²h).

Επομένως ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών διαφοροποιείται με βάση την θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών.

Πίνακας 6.1: Υπολογισμός βαθμού απόδοσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών και ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος.

Θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου στην έξοδο των ηλιακών συλλεκτών (°C)	Βαθμός απόδοσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών (%)	Βαθμός απόδοσης ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος (%)
250	0,41	-
190	0,54	-
175	0,57	-
160	0,6	-
145	0,62	-
132	0,64	-
90	-	0,48

6.3. Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών

Η επιφάνεια των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών καθώς και των ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος υπολογίζεται από την σχέση 5 της ενότητας 2.4.2.1 του κεφαλαίου 2. Ο υπολογισμός της επιφάνειας εξαρτάται διαφοροποιείται από:

- Την θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τους ηλιακούς συλλέκτες.
- Το παραγόμενο έργο από την εκτόνωση του ρευστού στον στρόβιλο.
- Τον βαθμό απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής που εξαρτάται από:
 - Το απαιτούμενο έργο για την κάλυψη των αναγκών άντλησης του ρευστού.
 - Την προσιδιόμενη θερμότητα από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών στον κύκλο Rankine.

Κατόπιν παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών για τα 4 σενάρια που μελετήθηκαν:

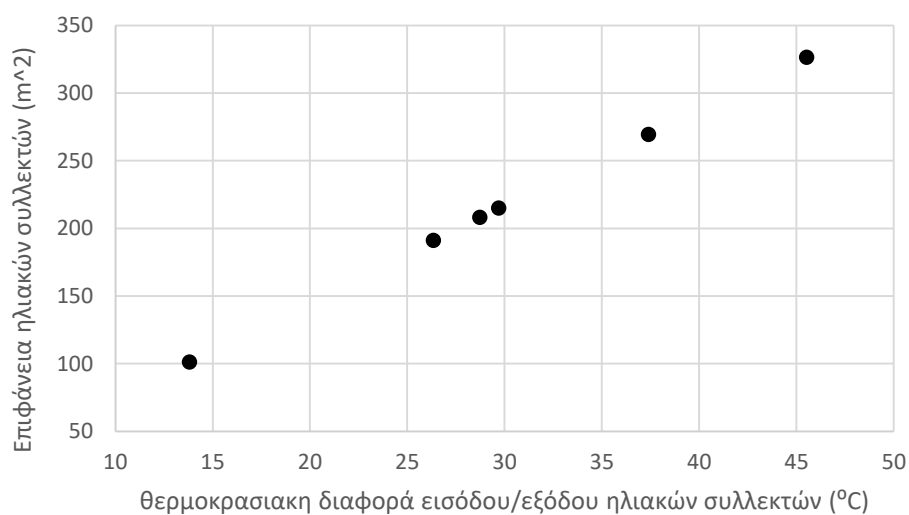
- Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με χρήση οικονομητήρα (μεγιστοποίηση βαθμού απόδοσης ηλεκτροπαραγωγής).
- Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας χωρίς χρήση οικονομητήρα (σενάριο ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή).
- Τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης με χρήση ενός στροβίλου.
- Τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης με χρήση διπλού στροβίλου.

Πίνακας 6.2: Υπολογισμός επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών.

Οργανικό ρευστό	Τύπος ηλιακών συλλεκτών	Συμπαραγωγή με χρήση οικονομητήρα	Επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών (m ²)		
			Συμπαραγωγή χωρίς χρήση οικονομητήρα (σενάριο ελάχιστης υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή)	Τριπαραγωγή με χρήση ενός στροβίλου	Τριπαραγωγή με χρήση διπλού στροβίλου
pentane	παραβολικοί	215,17	271,21	274,93	-
isopentane	παραβολικοί	208,24	266,79	269,59	-
R - 134a	κενού αέρος	110,66	113,19	-	-
R - C138	παραβολικοί	51,70	65,42	-	-
Methyl formate R-611	παραβολικοί	269,50	273,50	-	-
Decafluorobutane	κενού αέρος	53,99	67,01	-	-
2-difluoromethoxy-1,1,1-trifluoro / R-E245	παραβολικοί	102,63	125,62	-	-
N-hexane	παραβολικοί	191,21	249,20	-	-
N-butane	παραβολικοί	189,95	217,28	-	203,00
Isobutane	παραβολικοί	163,51	184,64	-	167,90
heptafluoropropane R-227	κενού αέρος	70,11	80,11	-	-
pentafluoropropane R-245	κενού αέρος	86,91	97,11	-	-
Ethyl-amine	παραβολικοί	326,57	331,70	-	328,90
2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane R-123	παραβολικοί	101,31	114,44	-	-
toluene	παραβολικοί	280,54	338,86	339,42	-

6.4. Ανάλυση ευαισθησίας (iv)

Κατόπιν παρουσιάζεται η εξάρτηση της επιφάνειας των παραβολικών ηλιακών συλλεκτών από την θερμοκρασιακή διαφορά του ρευστού μεταξύ της εισόδου και της εξόδου των ηλιακών συλλεκτών, για τις εφαρμογές των οργανικών ρευστών που μελετήθηκαν με θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών ίση με 190 °C. Όπως είναι αναμενόμενο όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου του ηλιακού συλλέκτη, τόσο αυξάνεται και η επιφάνεια.



Διάγραμμα 6.1: Εξάρτηση επιφάνειας παραβολικών ηλιακών συλλεκτών από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών, για τις εφαρμογές με θερμοκρασία εξόδου ηλιακών συλλεκτών ίση με 190 °C.

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα και προτάσεις για συνέχιση της εργασίας

7.1. Συμπεράσματα

Ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει πως ο συνδυασμός της τεχνολογίας του οργανικού κύκλου Rankine με συστοιχία παραβολικών ηλιακών συλλεκτών μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη εφαρμογή που μπορεί να αναπτυχθεί σε αποκεντρωμένες περιοχές, με στόχο την συμπαραγωγή ή την τριπαραγωγή. Μάλιστα η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δίνει πλεονέκτημα των διατάξεων οργανικού κύκλου Rankine σε συνδυασμό με παραβολικούς συλλέκτες ή συλλέκτες κενού αέρος έναντι των φωτοβολταϊκών πάρκων, όπου η αποθήκευση ενέργειας γίνεται με μπαταρίες.

Αναφορικά με τις εφαρμογές συμπαραγωγής που μελετήθηκαν συμπεραίνεται πως η χρήση οικονομητήρα στην έξοδο του στρόβιλου οδηγεί σε αυξημένο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον μεταβάλλοντας το επίπεδο υπόψυξης στην έξοδο του συμπυκνωτή υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής των επιμέρους βαθμών απόδοσης του κύκλου, ώστε να προσαρμόζεται στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Όσον αφορά τις εφαρμογές όπου η παροχή θερμότητας λαμβάνει χώρα στους 90 °C, όπου χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες με σωλήνες κενού αέρος, το ψυκτικό R-134a εμφανίζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά (ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, περιβαλλοντικοί δείκτες, κόστος, κτλ.). Αντίστοιχα για τις εφαρμογές υψηλότερων θερμοκρασιών (135 °C έως 190 °C), όπου χρησιμοποιούνται παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες επιλέγεται το ισοπεντάνιο.

Ο συνδυασμός του οργανικού κύκλου Rankine με ψύκτη απορρόφησης νερού – βρωμιούχου λιθίου μπορεί να οδηγήσει στην τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, ψύξης και θέρμανσης. Αναλόγως με το επίπεδο εκτόνωσης του εργαζόμενου μέσου στον πρώτο στρόβιλο του κύκλου, μπορεί να τοποθετηθεί και δεύτερος στρόβιλος μετά την πρόσδοση θερμότητας στον κύκλο ψύξης, ώστε να παραχθεί επιπλέον έργο. Η προσομοίωση τριπαραγωγής με επιλογή του τολουολίου ως οργανικό ρευστό και παροχή θερμότητας στους 250 °C εμφανίζει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης ψύξης.

7.2. Προτάσεις για συνέχιση εργασίας

Σκόπιμη θα ήταν η μελέτη και η συγκέντρωση δεδομένων για περισσότερα οργανικά ρευστά. Επιπλέον η συγκέντρωση αναλυτικών δεδομένων όσον αφορά το κόστος του εξοπλισμού και της λειτουργίας του συστήματος ανά προσομοίωση, σε συνδυασμό με τα οικονομικά οφέλη από την λειτουργία του, θα οδηγούσε σε συμπεράσματα σχετικά με την σκοπιμότητα και την βιωσιμότητα της εκάστοτε εφαρμογής. Εστιάζοντας στην περίπτωση της τριπαραγωγής και στην διάταξη του ψύκτη απορρόφησης, αξίζει να εξετασθούν και άλλοι συνδυασμοί απορροφητικού – ψυκτικού, ώστε να επιλεγεί ο βέλτιστος. Τέλος με στόχο την εξαγωγή πιο ασφαλών και ρεαλιστικών συμπερασμάτων, ιδιαίτερη σημασία θα είχε ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της συστοιχίας παραβολικών ηλιακών συλλεκτών ή ηλιακών συλλεκτών με σωλήνες κενού αέρος με βάση τις καιρικές συνθήκες μιας συγκεκριμένης περιοχής.

Κεφάλαιο 8. Βιβλιογραφία

- [1] S. Karellas, A. Schuster (2008), "Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications", *Int. J. of Thermodynamics*, Vol. 11, No. 3.
- [2] D. A. Katsamparakis (2015), "Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων", Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
- [3] C. Somers, A. Mortazavi, Y. Hwang, R. Radermacher, P. Rodgers, S. Al-Hashimi (2011), "Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus", *Applied Energy*, Vol 88.
- [4] E. S. Ramos, G. E. Valencia, A. M. Jimenez, M. Osorio, M. C. Vanegas (2016), "Modelling and simulation of a solar single effect absorption cooling system in Aspen Hysys®", *The American Society of Mechanical Engineers*.
- [5] F. Calise, C. Capuozzo, L. Vanoli (2013), "Design and parametric optimization of an organic Rankine cycle powered by solar energy", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No.3.
- [6] L. Tocci, T. Pal, I. Pasmazoglou, B. Franchetti (2017), "Small Scale Organic Rankine Cycle (ORC): A Techno-Economic Review", *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, Vol. 10.
- [7] T. Tartiere, M. Astolfi (2017), *A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market*, *Energy Procedia*, Vol. 129.
- [8] J. C. Bruno, J. Lopez-Villada, E. Letelier, S. Romera, A. Coronas (2008), "Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28.
- [9] J. A. Duffie, W. A. Beckman, N. Blair (2020), "Solar Engineering of Thermal Processes", *Photovoltaics and Wind*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [10] D. Y. Goswami (2015), "Principles of Solar Engineering", *CRC Press*, New York.
- [11] K.A. Antonopoulos (2011), "Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο", Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [12] M.A. Sabiha, R. Saidur, S. Mekhilef, O. Mahian (2015), "Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors", *Renewable and Sustainable energy Reviews*, Vol 51.

- [13] S. Baral (2019), "Experimental and Techno-Economic Analysis of Solar-Geothermal Organic Rankine Cycle Technology for Power Generation in Nepal", *International Journal of Photoenergy*, V. 2019.
- [14] I. Obernberger, P. Thonhofer, E. Reisenhofer (2002), "Description and evaluation of new 1000 kW_{el} Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria", *Euroheat & Power*, Vol. 10.
- [15] F. A. Latrash, B. Agnew, M. A. Al-Weshahi, N. M. Eshoul (2015), "Optimal Selection of Using Fluids (HFC, HCFC, HFC) for an Organic Rankine Cycle Utilising a Low Temperature Geothermal Energy Source", *International Conference on Environment Science and Engineering*, Vol. 83.
- [16] S. Vijayaraghavan, D. Y. Goswami (2005), "Organic Working Fluids for a Combined Power and Cooling Cycle", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 127.
- [17] U. Drescher, D. Bruggemann (2007), "Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27.
- [18] J. Bao, L. Zhao (2013), "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24.
- [19] H. Chen, D. Y. Goswami, E. K. Stefanakos, "A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14.
- [20] N. Nandaliarasyad, D. T. Maulana, P. S. Darmanto (2020), "Study of Development Scenarios for Bottoming Unit Binary Cycle to Utilize Exhaust Steam from Back Pressure Turbine Geothermal Power Plant", *Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*
- [21] Y. S. H. Najjar, A. E. Qatramez (2019), "Energy utilisation in a combined geothermal and organic Rankine power cycles", *International Journal of Sustainable Energy*.
- [22] J.A. White, S. Velasco (2018), "Characterizing wet and dry fluids in temperature-entropy diagrams, *Energy*", Vol. 154.
- [23] R. Melsert (2007), *Energy optimization of the production of cellulosic ethanol from southern pine*, Georgia Institute of Technology.
- [24] B. F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, "Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29.

- [25] M. D. Surindra, W. Caesarendra, T. Prasetyo, T. M. I. Mahlia, Taufik (2019), "Comparison of the Utilization of 110 °C and 120 °C Heat Sources in a Geothermal Energy System Using Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa, R123, and Mixed-Ratio Fluids as Working Fluids", Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [26] L. Bruscoli, D. Fiaschi, G. Manfrida, D. Tempesti (2015), "Improving the Environmental Sustainability of Flash Geothermal Power Plants—A Case Study", *Sustainability*, Vol 7.
- [27] W. Yaici, E. Entchev, M. Longo, "Performance Analysis of Regenerative Organic Rankine Cycle System for Solar Micro Combined Heat and Power Generation Applications", *International Conference on Renewable Energy Research And Applications*.
- [28] D. Matuszewska, K. Sztekler, J. Gorski (2014), "An influence of low-stability region on dense gas phenomena and their peculiarities in the ORC fluids, MATEC Web of Conferences", Vol. 18.
- [29] H. Yu, H. Helland, X. Yu, T. Gundersen, G. Sin (2021), "Optimal design and operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage", *Energy Conversion and Management*, Vol 244.
- [30] K. Saito, M. Sakui, T. Kishimoto, Y. Kayukawa (2021), *W-refrigerant*, Waseda University, URL: w-refrigerant.com.
- [31] M. Kalikatzarakis (2013), "Εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών ναυτικών κινητήρων diesel με χρήση οργανικού κύκλου Rankine", *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*.
- [32] L. Han, J. Wei-ting, Z. Qun-zhi (2015), "Organic Rankine cycle simulation based on Aspen Plus", *Advanced Materials Research*. Vol. 1070-1072.
- [33] S. P. Fitri, M. B. Zaman, F. A. Azizi (2019), "Design of Organic Rankine Cycle (ORC) Power Plant Systems by Using Flat-Plate Solar Collector", *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol. 4, No. 3.