



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

---

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Μελέτη αντικατάστασης οργανικού ρευστού  
για υπάρχουσα μονάδα Οργανικού Κύκλου  
Rankine μέσω του λογισμικού ASPEN»*

**Του Φοιτητή**

Γαλανού Μιχαήλ

**Επιβλέπων**

Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

---

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020



## Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Καθηγητή Μ.Μ. Ε.Μ.Π. ,κ.Σωτήριο Καρέλλα για την ανάθεση αυτού του θέματος και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

Ειδική μνεία θα ήθελα να απευθύνω στον Τρύφωνα Ρουμπεδάκη,ο οποίος παρά τον αυξημένο φόρτο εργασίας του,ήταν πάντοτε παρών σε ότι χρειαζόμουν για την εκπόνηση αυτού του θέματος.Οι ιδέες,η καθοδήγηση και η υποστήριξη του ήταν κομβικής σημασίας στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι ήταν παρόντες σε όλες τις δύσκολες αλλά και ευχάριστες στιγμές της φοιτητικής μου διαδρομής.

Τέλος,το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το απευθύνω στην οικογένεια μου,η οποία με στήριξε ανιδιοτελώς πνευματικά,ηθικά αλλά και οικονομικά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου,επιτρέποντας μου να εργαστώ αναπόσπαστος.

## Περίληψη

Δεδομένων των αυξανόμενων προβληματισμών γύρω από το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την επίδραση πολλών ψυκτικών υγρών σε αυτό, το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ ορίζει την αντικατάσταση ορισμένων βλαβερών ψυκτικών με πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Προς αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα μελέτη πραγματεύεται την αντικατάσταση του ψυκτικού υγρού R134a σε έναν Οργανικό Κύκλο Rankine χαμηλής θερμοκρασίας με άλλα πιο φιλικά ρευστά. Για αυτό τον σκοπό ελέγχθηκαν 5 καθαρά ρευστά και 5 μίγματα αυτών ως προς την ενεργειακή και εξεργειακή ανταγωνιστικότητά τους. Από ενεργειακής απόψης, το R245fa δείχνει να υπερέχει όλων των υπόλοιπων ρευστών τόσο στο βαθμό απόδοσης εγκατάστασης όσο και στην παραγόμενη ισχύ εκτονωτών που δίνει. Η παραγόμενη ισχύς του εν λόγω ρευστού στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας της εν λόγω εγκατάστασης ήταν 8,99 kW με βαθμό απόδοσης 7,5%. Αντίστοιχα και από οικονομικής άποψης, το R245fa για 7200 ώρες λειτουργίας/έτος οδηγεί σε μία περίοδο αποπληρωμής ίση με 0,27 χρόνια, αν ληφθεί ως κέρδος της επένδυσης το κέρδος από την πώληση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την αντικατάσταση του ρευστού. Το ίδιο ρευστό συμφέρει και με βάση την καθαρά παρούσα αξία η οποία προσδιορίστηκε ίση με 120.126 € για μία διάρκεια ζωής της επένδυσης ίση με 20 χρόνια.

## **Abstract**

Given the growing concerns over the greenhouse effect and the effect of many refrigerants on it, the Montreal Protocol sets out to replace some harmful refrigerants with more environmentally friendly ones. Towards this direction, the present study addresses the replacement of R134a refrigerant in a low-temperature Organic Rankine Cycle with other more friendly environmentally working fluids. For this reason, 5 pure fluids and 5 mixtures were evaluated for their energy and energy competitiveness.

From an energy standpoint, the R245fa appears to outperform all other fluids both in the net electrical efficiency as well as the output power of the expanders. The power output using R245fa in the nominal operating conditions of the plant was 8.99 kW with efficiency of 7.5%. Similarly from the economic perspective, the R245fa with 7200 operating hours/year leads to a payback period of 0.27 years if the investment profit is derived from the sale of surplus electricity generated by the replacement of the working fluid. A similar conclusion is based on the net present value (NPV) with R245fa operation to result in a NPV € 120,126 for an investment life of 20 years.

## **Περιεχόμενα**

Πρόλογος .....	ii
Περίληψη.....	iii
Abstract .....	iv
Περιεχόμενα .....	v
Κατάλογος Σχημάτων .....	vii
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Συμβόλων .....	xi
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Κύκλος Rankine Νερού-Ατμού .....	1
1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine .....	3
1.2.1 Εργαζόμενα μέσα Οργανικού Κύκλου Rankine.....	5
1.2.2 Υπερκρίσιμος Οργανικός Κύκλος.....	8
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών στον Οργανικό Κύκλο Rankine.....	9
1.4 Επιστημονικό ερώτημα .....	11
<b>2.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC.....</b>	<b>13</b>
2.1 Περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος .....	13
2.2 Πηγή Θερμότητας.....	14
2.3 Μοντελοποίηση της εγκατάστασης.....	15
2.3.1 Αξιολόγηση του επιλεγθέντος μοντέλου .....	15
<b>3.ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ .....</b>	<b>17</b>
3.1 R152a.....	17
3.2 R245fa .....	18
3.3 R227ea.....	18
3.4 R1234ze.....	19
3.5 R1234yf.....	20
3.6 Ανάλυση ευαισθησίας για κάθε εργαζόμενο μέσο .....	20
3.6.1 R134a.....	21
3.6.2 R245fa .....	24
3.6.3 R227ea.....	28
3.6.4 R1234ze(E).....	32
3.6.5 R1234yf.....	36
3.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	40
<b>4.ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕ ΜΙΓΜΑΤΑ.....</b>	<b>40</b>
4.1 Μεθοδολογία αντικατάστασης.....	43

4.2 Μίγμα R1234yf-R1234ze(E).....	43
4.3 Μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου .....	48
4.4 Μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου .....	51
4.5 Μίγμα R1234ze(E)-προπανίου.....	56
4.6 Μίγμα R1234yf-προπανίου .....	60
4.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	64
<b>5.ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....</b>	<b>67</b>
5.1 Χρήση Φυσικού αερίου.....	67
5.2 Χρήση απορριπτόμενης θερμότητας .....	73
<b>6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....</b>	<b>77</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ .....</b>	<b>79</b>
A.1 Χρήση Φυσικού αερίου.....	79
A.2 Χρήση απορριπτόμενης θερμότητας .....	84
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>87</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1:Ποσοστιαία-Ποσοτική σύγκριση παγκόσμιων ενεργειακών πηγών από 2005-2015.....	1
Σχήμα 2:Μονογραμμικό διάγραμμα απλής εγκατάστασης κύκλου Clausius-Rankine .....	2
Σχήμα 3:Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας κύκλου Clausius-Rankine .....	3
Σχήμα 4:Μονογραμμικό διάγραμμα απλής εγκατάστασης ORC .....	4
Σχήμα 5:Πλήθος εγκατεστημένων συστημάτων ORC ανα πηγή θερμότητας .....	5
Σχήμα 6:Σύγκριση καμπυλών κορεσμού Οργανικού μέσου και νερού-ατμού σε διάγραμμα T-s[19] .....	5
Σχήμα 7:Καμπύλες κορεσμού Ξηρών,Ισεντροπικών και Υγρών ρευστών σε διάγραμμα T-s[22] .....	6
Σχήμα 8:Σύγκριση υποκρίσιμου-υπερκρίσιμου κύκλου σε διάγραμμα T-s για εργαζόμενο μεσο R245fa.....	8
Σχήμα 9:Σχηματική απεικόνιση της εργαστηριακής διάταξης.....	13
Σχήμα 10:Φωτογραφία της πραγματικής εγκατάστασης με ονομασία των επιμέρους τμημάτων της.....	14
Σχήμα 11:Μοντέλο της εγκατάστασης σε Aspen plus .....	15
Σχήμα 12:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για R134a με παροχή ρευστού 21,5 λιτρα/λεπτο.....	16
Σχήμα 13:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R152a .....	17
Σχήμα 14:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R245fa.....	18
Σχήμα 15:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R227ea .....	19
Σχήμα 16:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για το εργαζόμενο μέσο R1234ze.....	19
Σχήμα 17:Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R1234yf .....	20
Σχήμα 18:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή για R134a.....	22
Σχήμα 19:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή για R134a	22
Σχήμα 20:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R134a.....	23
Σχήμα 21:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R134a .....	24
Σχήμα 22:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R245fa .....	25
Σχήμα 23:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R245fa.....	26
Σχήμα 24:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R245fa.....	27
Σχήμα 25:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R245fa... ..	28
Σχήμα 26:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R227ea.....	29
Σχήμα 27:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R227ea ....	30
Σχήμα 28:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R227ea .....	31
Σχήμα 29:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R227ea ..	32
Σχήμα 30:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234ze.....	33
Σχήμα 31:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234ze ..	34
Σχήμα 32:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R1234ze .....	35



Σχήμα 33:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R1234ze	36
Σχήμα 34:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234yf .....	37
Σχήμα 35:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234yf ..	38
Σχήμα 36:Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf.....	39
Σχήμα 37:Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf .....	40
Σχήμα 38:Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή .....	41
Σχήμα 39:Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή	41
Σχήμα 40:Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή.....	42
Σχήμα 41:Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή	42
Σχήμα 42:Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-R1234ze(E).....	47
Σχήμα 43:Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-R1234ze(E) .....	47
Σχήμα 44:Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-ισοβουτανίου.....	51
Σχήμα 45:Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-ισοβουτανίου.....	51
Σχήμα 46:Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-ισοβουτανίου .....	55
Σχήμα 47:Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-ισοβουτανίου .....	55
Σχήμα 48:Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-προπανίου.....	59
Σχήμα 49:Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-προπανίου .....	59
Σχήμα 50:Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-προπανίου.....	63
Σχήμα 51:Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες μοριακές συστάσεις μίγματος R1234yf-προπανίου .....	64
Σχήμα 52:Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της υψηλής πίεσης κυκλώματος.....	65
Σχήμα 53:Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της υψηλής πίεσης κυκλώματος .....	65
Σχήμα 54:Οικιακή χρήση- Ελλάδα, Καθαρά παρούσα αξία(α), Περίοδος αποπληρωμής (β) .....	69
Σχήμα 55:Βιομηχανική χρήση-Ελλάδα , Καθαρά παρούσα αξία (α), Περίοδος αποπληρωμής (β).....	70
Σχήμα 56:Οικιακή χρήση-Γερμανία , Καθαρά παρούσα αξία (α) , Περίοδος αποπληρωμής (β) .....	71
Σχήμα 57:Βιομηχανική χρήση-Γερμανία , Καθαρά παρούσα αξία (α) , Περίοδος αποπληρωμής (β).....	72
Σχήμα 58:Οικιακή χρήση-Ελλάδα . Περίοδος αποπληρωμής (α) , Καθαρά παρούσα αξία (β) .....	73
Σχήμα 59:Βιομηχανική χρήση-Ελλάδα , Περίοδος αποπληρωμής (α) , Καθαρά παρούσα αξία (β).....	74

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:Οργανικά ρευστά που χρησιμοποιούνται σε τυπικές εφαρμογές ORC[25] .....	7
Πίνακας 2:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή(TBTURB) για R134a .....	21
Πίνακας 3:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R134a.....	23
Πίνακας 4:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή(TBTURB) για R245fa.....	24
Πίνακας 5:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R245fa.....	26
Πίνακας 6:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R227ea .....	28
Πίνακας 7:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R227ea.....	30
Πίνακας 8:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R1234ze .....	32
Πίνακας 9:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή για R1234ze .	34
Πίνακας 10:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R1234yf .....	36
Πίνακας 11:Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf	38
Πίνακας 12:Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος .....	44
Πίνακας 13:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,2-0,8 .....	44
Πίνακας 14:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,3-0,7 .....	45
Πίνακας 15:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,4-0,6 .....	45
Πίνακας 16:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,5-0,5 .....	45
Πίνακας 17:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,6-0,4 .....	46
Πίνακας 18:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,7-0,3 .....	46
Πίνακας 19:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,8-0,2 .....	46
Πίνακας 20: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος .....	48
Πίνακας 21:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,8-0,2 .....	48
Πίνακας 22:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,7-0,3 .....	49
Πίνακας 23:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,6-0,4 .....	49
Πίνακας 24:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,5-0,5 .....	49
Πίνακας 25:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,4-0,6 .....	50
Πίνακας 26:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,3-0,7 .....	50
Πίνακας 27:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,2-0,8 .....	50
Πίνακας 28: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος .....	52

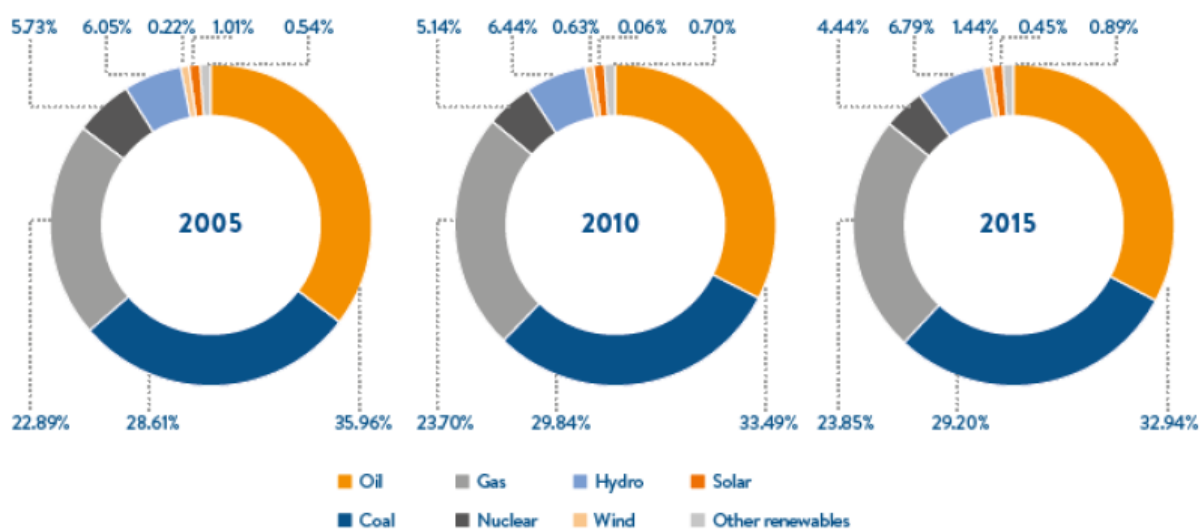
Πίνακας 29:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,8-0,2.....	52
Πίνακας 30:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,7-0,3.....	53
Πίνακας 31:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,6-0,4.....	53
Πίνακας 32:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,5-0,5.....	53
Πίνακας 33:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,4-0,6.....	54
Πίνακας 34:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,3-0,7.....	54
Πίνακας 35:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,2-0,8.....	54
Πίνακας 36: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος .....	56
Πίνακας 37:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,8-0,2 .....	56
Πίνακας 38:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,7-0,3 .....	57
Πίνακας 39:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,6-0,4 .....	57
Πίνακας 40:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,5-0,5 .....	57
Πίνακας 41:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,4-0,6 .....	58
Πίνακας 42:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,3-0,7 .....	58
Πίνακας 43:Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,2-0,8 .....	58
Πίνακας 44: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος .....	60
Πίνακας 45:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,8-0,2.....	60
Πίνακας 46: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,7-0,3.....	61
Πίνακας 47: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,6-0,4.....	61
Πίνακας 48:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,5-0,5.....	61
Πίνακας 49:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,4-0,6.....	62
Πίνακας 50:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,3-0,7.....	62
Πίνακας 51:Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,2-0,8.....	63
Πίνακας 52:Κόστος και safety group του εκάστοτε ρευστού, παραγόμενη ισχύς και θερμική ισχύς ατμοποιητή που δίνει[43-48] .....	67
Πίνακας 53:Κόστη ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου σε Ελλάδα και Γερμανία.....	68
Πίνακας 54:Αρχική επένδυση για αντικατάσταση ρευστού .....	68

## Κατάλογος Συμβόλων

<i>ORC</i>	<i>Οργανικός κύκλος Rankine</i>	
<i>T</i>	<i>Θερμοκρασία</i>	[ °C]
<i>POWER</i>	<i>Ισχύς</i>	[kW]
<i>Q</i>	<i>Θερμική ισχύς</i>	[kW <sub>th</sub> ]
<u>Δείκτες</u>		
<i>ATURB</i>	<i>Ρεύμα μετα τον εκτονωτή</i>	
<i>BTURB</i>	<i>Ρεύμα πριν τον εκτονωτή</i>	
<i>COND</i>	<i>Συμπυκνωτής</i>	
<i>EVAP</i>	<i>Ατμοποιητής</i>	
<i>IN</i>	<i>Είσοδος</i>	
<i>OUT</i>	<i>Έξοδος</i>	
<i>PUMP</i>	<i>Αντλία</i>	
<i>T4</i>	<i>Εκτονωτής 1</i>	
<i>T5</i>	<i>Εκτονωτής 2</i>	

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα στον πλανήτη κατοικούν περίπου 7,64 δις άνθρωποι. Ο αριθμός αυτός σύμφωνα με τον Ο.Η.Ε αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στα επόμενα 50 χρόνια [1]. Η διαρκής εξέλιξη της τεχνολογίας (η οποία συνεπάγεται αύξηση της ζήτησης σε ηλεκτρισμό) σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα άνοδο του πληθυσμού, αναπόφευκτα θα οδηγήσουν σε αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Σύμφωνα με τη U.S Energy Information Administration η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να εκτοξευθεί σε  $2,17 \cdot 10^{14} \text{ kWh}$  έως το έτος 2040 [2]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 η ενέργεια αυτή σήμερα παράγεται ως επί το πλείστον από ορυκτά καύσιμα με πετρέλαιο, λιθάνθρακα και αέρια καύσιμα (π.χ προπάνιο, βουτάνιο) να κατέχουν πάνω από το 80% στο μερίδιο των ενεργειακών πηγών παγκοσμίως [3].



Σχήμα 1: Ποσοστιαία-Ποσοτική σύγκριση παγκόσμιων ενεργειακών πηγών από 2005-2015

Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ραγδαία αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και επομένως στην εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Είναι χαρακτηριστικό, ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχους για το 2030 [4]:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σχέση με το 1990
- Ενέργεια παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές να φτάσει το 27%
- Αύξηση απόδοσης της παραγωγής ενέργειας κατά 27%

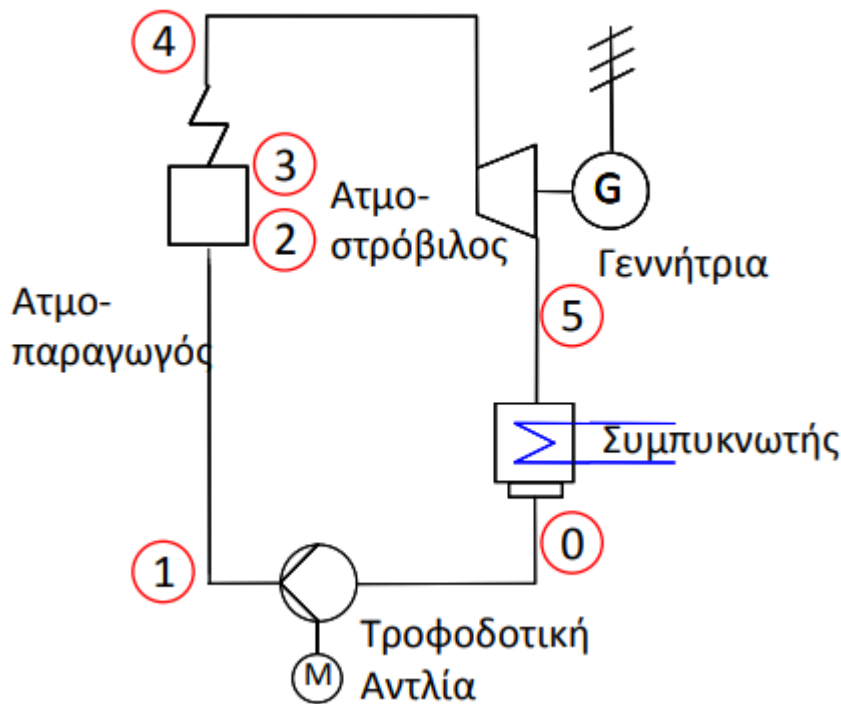
Η επίτευξη των στόχων αυτών κρίνεται αναγκαία για την διατήρηση της ευημερίας και υγείας της έμβιας ζωής. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί και διερευνηθεί διάφορες τεχνολογίες, μεταξύ των οποίων και ο Οργανικός Κύκλος Rankine για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας.

### 1.1 Κύκλος Rankine Νερού-Ατμού

Η λειτουργία μιας πραγματικής μηχανής με κύκλο Carnot θεωρείται ανέφικτη, κυρίως λόγω των ισοθερμοκρασιακών, αλλά και των ισεντροπικών μεταβολών που αυτός περιέχει. Γι' αυτό

χρησιμοποιούνται άλλοι θερμοδυναμικοί κύκλοι, μικρότερου θεωρητικού βαθμού απόδοσης όπως για παράδειγμα ο Clausius-Rankine με εργαζόμενο μέσο νερό-ατμό. Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [5]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 ο κύκλος αυτός,σε απλή μορφή υλοποιείται από [6] :

- Μία Τροφοδοτική Αντλία,η οποία αποτελεί τον κυκλοφορητή του εργαζόμενου μέσου στο σύστημα και αυξάνει την πίεση του συμπυκνώματος.
- Έναν Ατμοπαραγωγό,ο οποίος μετατρέπει το νερό σε υπέρθερμο ατμό,χρησιμοποιώντας θερμότητα που προσδίδεται μέσω κάποιου καυσίμου.
- Τον Ατμοστρόβιλο,ο οποίος εκμεταλεύομενος τα υψηλά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ατμού παράγει ωφέλιμο μηχανικό έργο.
- Τον Συμπυκνωτή,ο οποίος απορρίπτει θερμότητα επαναφέροντας το διαφασικό μίγμα που εξέρχεται του ατμοπαραγωγού σε κορεσμένο νερο.

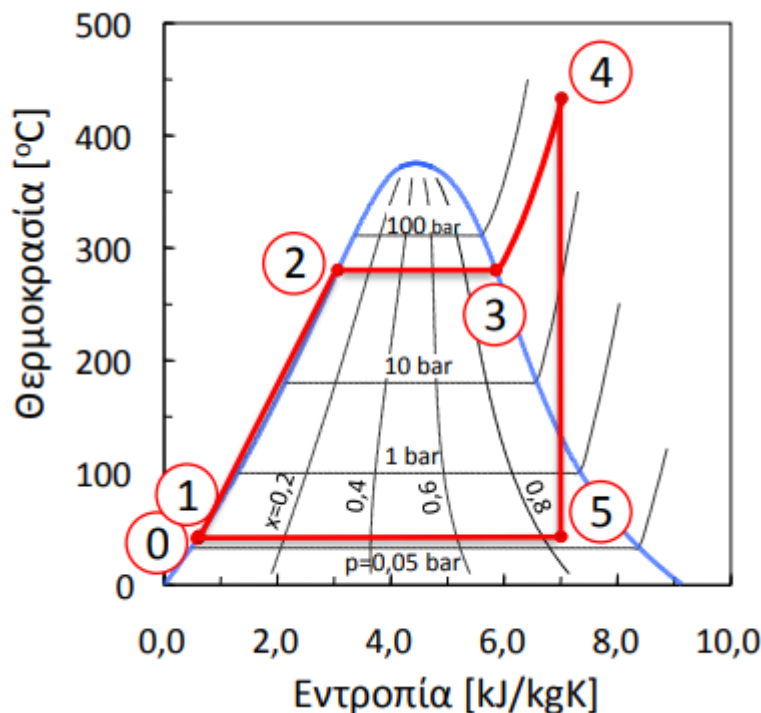


Σχήμα 2:Μονογραμμικό διάγραμμα απλής εγκατάστασης κύκλου Clausius-Rankine

Οι μεταβολές οι οποίες εκτελούνται στον ιδανικό κύκλο Clausius-Rankine όπως φαίνονται στο Σχήμα 3 είναι οι εξής:

- 0-1:Συμπίεση του νερού από την τροφοδοτική αντλία.Παρατηρείται μικρή αύξηση θερμοκρασίας και εντροπίας.
- 1-2:Προθέρμανση του νερού μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού με μεγάλη αύξηση όλων των θερμοδυναμικών του χαρακτηριστικών
- 2-3:Ισοθερμοκρασιακή-Ισόθλιπτη και πλήρης ατμοποίηση του κορεσμένου νερού
- 3-4:Ισόθλιπτη υπερθέρμανση του ατμού για αύξηση της θερμοκρασίας και της εντροπίας του.

- 4-5:Ισεντροπική εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού στο στρόβιλο
- 5-0:Απόρριψη θερμότητας απο το συμπυκνωτή ισόθλιπτα και επαναφορά στην αρχική κατάσταση.



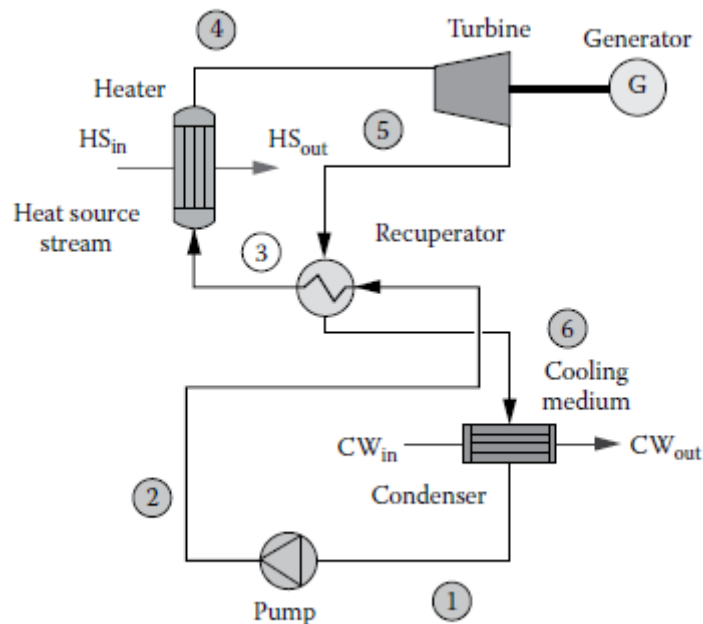
Σχήμα 3:Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας κύκλου Clausius-Rankine

Σε έναν κύκλο Clausius-Rankine, το ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, το οποίο σε πίεση 1bar έχει θερμοκρασία ατμοποίησης  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ . Συνεπώς απαιτούνται υψηλές πιέσεις λειτουργίας ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία και ενθαλπία ατμού και να παραχθεί ικανοποιητικό ωφέλιμο έργο. Τυπική πίεση ατμοποίησης ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να είναι 140bar, στα οποία το νερό έχει θερμοκρασία ατμοποίησης  $550^{\circ}\text{C}$  [7, 8]. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενθαλπία (και κατ'έπекταση η θερμοκρασία) του υπέρθερμου ατμού τόσο αυξάνεται το παραγόμενο έργο από τον στρόβιλο. Για την αποφυγή συμπυκνώσεως στην έξοδο του στροβίλου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των πτερυγίων συνίστανται οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες υπέρθερμου ατμού. Ωστόσο λόγω αντοχής των υλικών υπάρχουν περιορισμοί στα περιθώρια αύξησης τους [6, 9]. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού που χρησιμοποιεί τον συγκεκριμένο κύκλο μπορεί να φτάσει το 40-45% σε ΑΗΣ νέας τεχνολογίας. Οι τυπικές τιμές του σε υπάρχοντες ΑΗΣ παλιότερης τεχνολογίας είναι 30-35% [6, 10].

## 1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) είναι παρόμοιος με τον κύκλο Clausius-Rankine με τη διαφορά ότι αντί για νερό-ατμό χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο κάποιο οργανικό ρευστό, η επιλογή του οποίου εξαρτάται απο την εκάστοτε εφαρμογή [11]. Η χρήση οργανικού εργαζόμενου μέσου οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης και συνεπώς καθίσταται εφικτή η αξιοποίηση πηγών

θερμότητας χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας όπως για παράδειγμα γεωθερμική και ηλιακή ενέργεια, βιομάζα καθώς και καυσαέρια μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.)[12]. Επίσης λειτουργεί σε χαμηλότερες πιέσεις συγκριτικά με τον κύκλο νερού-ατμού [13] μειώνοντας σημαντικά την καταπόνηση των μηχανολογικών εξαρτημάτων, αλλά και το κόστος τους. Η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου δε γίνεται σταδιακά όπως στο νερό αλλά εντός ενός εναλλάκτη θερμότητας, συνεπώς δεν απαιτείται ύπαρξη τυμπάνου για σταδιακή ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου[14]. Τα οργανικά μέσα έχουν υψηλότερη μοριακή μάζα (αρα και πυκνότητα) από το νερό οδηγώντας έτσι σε εγκαταστάσεις μικρότερου όγκου[15].

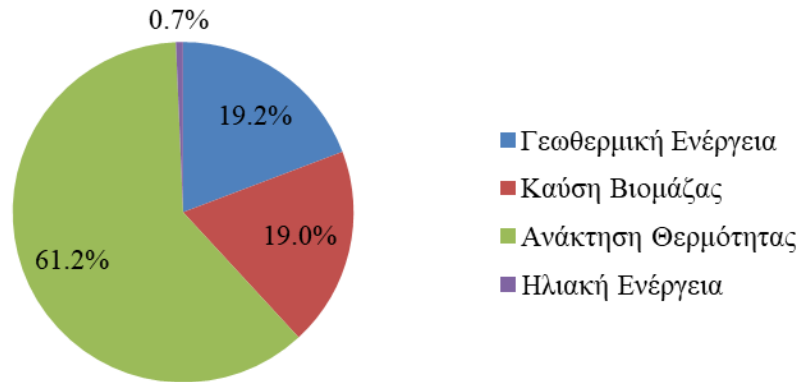


Σχήμα 4: Μονογραμικό διάγραμμα απλής εγκατάστασης ORC

Όσον αφορά την εκμετάλευση απορριπτόμενης θερμότητας, σχετικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι το 50% της ενέργειας που παράγεται στη βιομηχανία εκλύεται στο περιβάλλον μέσω θερμών καυσαερίων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αξιοποίηση της, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά τον βαθμό απόδοσης αυτών των εγκαταστάσεων[16]. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων ORC παγκοσμίως προσεγγίζει τις 1800. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η πηγή θερμότητας των μονάδων αυτών ως ποσοστό επί του συνόλου τους[17]. Παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των μονάδων αφορά την ανάκτηση θερμότητας.



## Συμμετοχή πηγών θερμότητας στο συνολικό πλήθος εγκατεστημένων μονάδων ORC

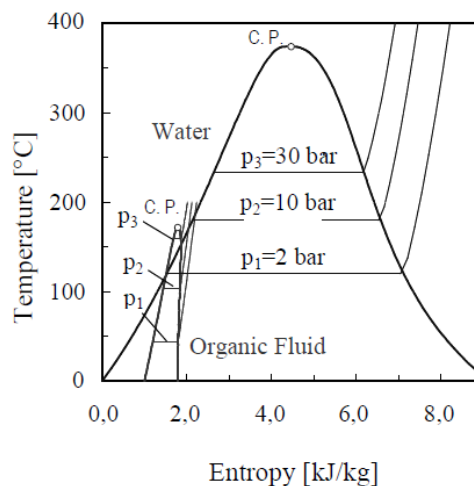


Σχήμα 5: Πλήθος εγκατεστημένων συστημάτων ORC ανα πηγή θερμότητας

Τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα, βασιζόμενα στην τεχνολογία ORC σήμερα διαθέτουν ένα εύρος ισχύος από 0,2 *kWe* έως και 2,2 *MWe* [18]. Η τεχνολογία ORC αποτελεί την πλέον αξιόπιστη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος μέχρι 1 *MWe*, παρ'όλα αυτά ο βαθμός απόδοσης του είναι αρκετά μικρός ειδικά σε κύκλους χαμηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, σε πηγή θερμότητας θερμοκρασίας 300 °C ο βαθμός απόδοσης δέν υπερβαίνει το 10-14% [6].

### 1.2.1 Εργαζόμενα μέσα Οργανικού Κύκλου Rankine

Όπως προαναφέρθηκε η βασική διαφορά του Οργανικού Κύκλου Rankine με τον τυπικό κύκλο Rankine νερού-ατμού είναι στο εργαζόμενο μέσο και πιο συγκεκριμένα στην καμπύλη κορεσμού του. Στο Σχήμα 6 φαίνεται ενδεικτικά η σύγκριση των καμπυλών κορεσμού των δύο κύκλων.

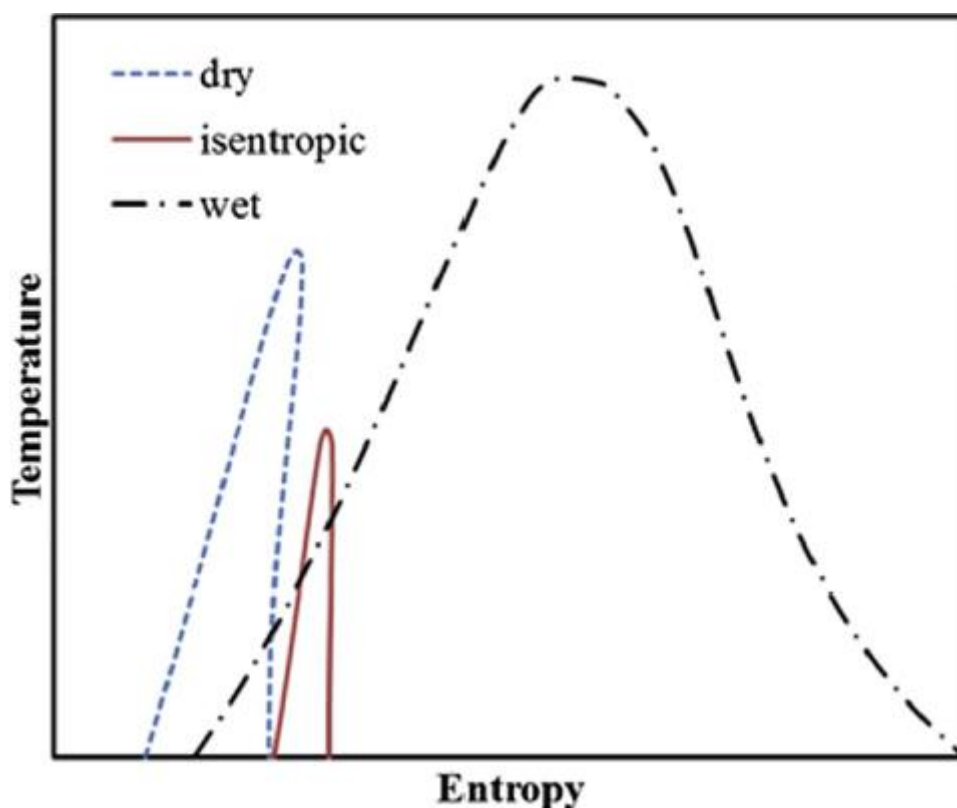


Σχήμα 6: Σύγκριση καμπυλών κορεσμού Οργανικού μέσου και νερού-ατμού σε διάγραμμα T-s [19]

Τα οργανικά εργαζόμενα μέσα κατηγοριοποιούνται με βάση την καμπύλη κορεσμένου ατμού που διαθέτουν σε τρεις βασικές ομάδες:

- Υγρά(wet)
- Ξηρά(dry)
- Ισεντροπικά(isentropic)

Τα **Υγρά** μέσα έχουν καμπύλη κορεσμού αρνητικής κλίσης (π.χ. νερό και αμμωνία) και έχουν την τάση να συμπυκνώνονται μετά απο την εκτόνωση[20], τα **Ξηρά** έχουν καμπύλη θετικής κλίσης (π.χ. HFE7000) και ο κορεσμένος ατμός μετατρέπεται σε υπέρθερμο ώστε να ακολουθήσει ισεντροπική εκτόνωση στον εκτονωτή. Τα **Ισεντροπικά** έχουν σχεδόν κάθετη καμπύλη κορεσμένου ατμού (π.χ. R11, R245fa, R134a) γεγονός που σημαίνει ότι όταν ο κορεσμένος ατμός εκτονωθεί ακολουθώντας την κάθετη καμπύλη, θα παραμείνει κορεσμένος και κατά την έξοδο απο τον εκτονωτή χωρίς να παρατηρηθεί συμπύκνωση. Αυτό επιτρέπει να μην εγκατασταθεί αναγεννητής στον κύκλο καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές ORC[21]. Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των τριών ομάδων που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 7: Καμπύλες κορεσμού Ξηρών, Ισεντροπικών και Υγρών ρευστών σε διάγραμμα T-s[22]

Στις εφαρμογές ORC η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς το επιλεγόμενο ρευστό θα πρέπει να διαθέτει θερμικά και φυσικά χαρακτηριστικά τα οποία να ταιριάζουν στην εκάστοτε εφαρμογή και τις απαιτήσεις της αλλά και να είναι χημικά ευσταθές στην επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας[23]. Το βέλτιστο υγρό είναι συνήθως αυτό που δίνει τον υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης στις δεδομένες παραμέτρους λειτουργίας του κύκλου. Ελέγχονται η κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία του ρευστού καθώς και η θερμοκρασία βρασμού του σε διάφορες πιέσεις[19]. Ωστόσο ο θερμικός βαθμός απόδοσης που δίνει το εργαζόμενο μέσο (σε δεδομένη εφαρμογή) δεν είναι το μοναδικό κριτήριο επιλογής του. Παρακάτω παρουσιάζονται εξίσου σημαντικά κριτήρια[24]:

- Θετική ή ισεντροπική καμπύλη κορεσμένου ατμού, αφού η αρνητική καμπύλη δηλαδή υγρό(wet) ρευστό οδηγεί σε δημιουργία σταγονιδίων στο τέλος της διαδικασίας εκτόνωσης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ζημιά στον εκτονωτή. Για να αποφευχθεί αυτό θα πρέπει να εργαζόμενο μέσο να υπερθερμανθεί πριν την είσοδο του στον εκτονωτή.
- Υψηλή πυκνότητα ατμού ώστε να μειωθεί σημαντικά το μέγεθος του εκτονωτή και συνεπώς το κόστος του.
- Χαμηλό ιξώδες τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια κατάσταση ώστε να μειώνονται οι απώλειες λόγω τριβών στον εναλλάκτη θερμότητας.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα με σκοπό να επιτευχθεί αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας στους εναλλάκτες
- Θετική μανομετρική θερμοκρασία συμπυκνώσεως, δηλαδή η χαμηλή πίεση του κύκλου θα πρέπει να είναι υψηλότερη της ατμοσφαιρικής ώστε να μην υπάρξει διαρροή και είσοδος αέρα στον κύκλο.
- Αποδεκτή πίεση ατμοποίησης, αφού οι υψηλές πιέσεις συνήθως οδηγούν σε υψηλά κόστη και πολυπλοκότητα στην κατασκευή.
- Το σημείο πήξεως θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από την χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος που καταγράφεται στην περιοχή της εγκατάστασης ώστε να αποφευχθεί η στερεοποίηση του εργαζόμενου μέσου κατά το χειμώνα.
- Υψηλό επίπεδο ασφαλείας το οποίο αποτελείται κατά βάση από δύο κριτήρια: 1)Τοξικότητα και 2)Ευφλεκτότητα. Το ASHRAE Standard 34 κατηγοριοποιεί τα εργαζόμενα μέσα σε ομάδες με βάση αυτά τα κριτήρια.
- Χαμηλή δυνατότητα αραίωσης του ατμοσφαιρικού όζοντος (ODP). Η δυνατότητα αραίωσης του όζοντος στα υπάρχοντα ψυκτικά είναι μηδενική ή σχεδόν μηδενική λόγω του πρωτόκολλου του Montreal.
- Χαμηλή δυνατότητα συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP) η οποία μετράται σε σύγκριση με το GWP του διοξειδίου του άνθρακα και προς το παρόν δεν υπάρχει νομοθεσία που να ρυθμίζει αυτόν τον παράγοντα.
- Υψηλή διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος

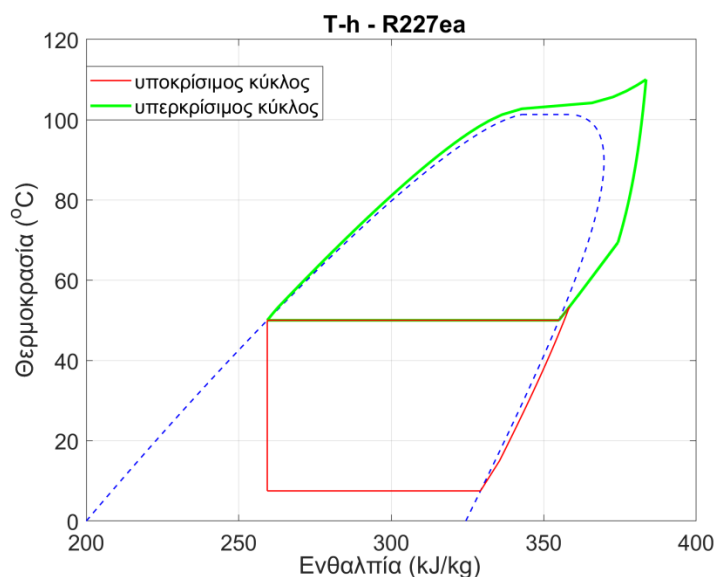
Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει κάποια από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα οργανικά εργαζόμενα ρευστά σε εφαρμογές ORC.

*Πίνακας 1: Οργανικά ρευστά που χρησιμοποιούνται σε τυπικές εφαρμογές ORC[25]*

<b>Εργαζόμενο μέσο</b>	<b>Κατασκευαστής</b>
R134a	Cryostar (Γαλλία)
R245fa	Bosch KWK(Γερμανία), Turboden(ΗΠΑ), GE clean cycle (ΗΠΑ), Cryostar (Γαλλία), Electratherm(ΗΠΑ)
Solkatherm (SES360)	Turboden(Ιταλία), Enertime(Γαλλία)
n-πεντάνιο	ORMAT(ΗΠΑ)
OMTS (MDM)	Turboden(Ιταλία), Adoratec/Maxdxtec(Γερμανία)
Τολουόλιο	Tri-o-gen(Ολλανδία)

## 1.2.2 Υπερκρίσιμος Οργανικός Κύκλος

Ο υπερκρίσιμος κύκλος ORC συγκεντρώνει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον και έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον υποκρίσιμο κύκλο. Βασικό πλεονέκτημα του είναι οι μειωμένες εξεργειακές απώλειες και συνεπώς η πιο αποδοτική αξιοποίηση της θερμότητας[26]. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του έναντι του υποκρίσιμου είναι ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης του, λόγω της μεγαλύτερης μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας γεγονός που τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας[19]. Ένα μειονέκτημα του υπερκρίσιμου κύκλου είναι ότι συνήθως λειτουργεί σε υψηλότερες πιέσεις από τον υποκρίσιμο οδηγώντας πολλές φορές σε προβλήματα κατά τη λειτουργία του αλλά και σε ζητήματα ασφαλείας[27]. Οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας έχουν αντίκτυπο και στο κόστος του εναλλάκτη αφού θα πρέπει να είναι ανθεκτικός σε αυτές τις συνθήκες και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει αλλαγή του τύπου του (π.χ. αντί για επίπεδο πλακοειδή να χρησιμοποιηθεί εναλλάκτης αυλών-κελύφους που διαθέτει μεγαλύτερο εύρος πιέσεων λειτουργίας)[26]. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η θερμοδυναμική σύγκριση υπερκρίσιμου-υποκρίσιμου κύκλου ORC.



Σχήμα 8: Σύγκριση υποκρίσιμου-υπερκρίσιμου κύκλου σε διάγραμμα T-s για εργαζόμενο μεσο R245fa

Στο Σχήμα 8 φαίνεται ότι σε αντίθεση με τον υποκρίσιμο ORC το εργαζόμενο μέσο του υπερκρίσιμου κύκλου θερμαίνεται απευθείας από υγρή κατάσταση σε υπερκρίσιμη κατάσταση χωρίς να μπαίνει στη διφασική περιοχή. Αυτό του επιτρέπει να έχει καλύτερη θερμική συμβατότητα με την πηγή θερμότητας, με αποτέλεσμα την μικρότερη καταστοφή εξέργειας. Επιπροσθέτως, σε ένα τυπικό υποκρίσιμο σύστημα ORC απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για να διαχωρίσει την υγρή από την αέρια κατάσταση, γεγονός που απλοποιείται με τη χρήση υπερκρίσιμου κύκλου[28].

### **1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών στον Οργανικό Κύκλο Rankine**

Οι T.Q Nguyen, J.D. Slawnwhite και K. Goni Boulama [20] διερεύνησαν θεωρητικά ένα απλό σύστημα ORC (συμπυκνωτής, ατμοποιητής, εκτονωτής και αντλία) το οποίο αξιοποιεί απορριπτόμενη θερμότητα από τη βιομηχανία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πηγή θερμότητας εύρους θερμοκρασιών 100-225 °C θεωρήθηκε μίγμα απορριπτόμενων αέριων, με ιδιότητες ίδιες με τον αέρα, παροχής 300 kg/sec. Δοκιμάστηκε η απόδοση διαφόρων εργαζόμενων μέσων μεταξύ των οποίων προπάνιο, αμμωνία, νερό, βενζόλιο. Η θερμοκρασία συμπυκνώσεως του κύκλου τέθηκε στους 30 °C ενώ η μέγιστη θερμοκρασία του ορίστηκε 20 °C μικρότερη από εκείνη της πηγής θερμότητας. Παρατήρησαν ότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή τα ξηρά ρευστά απέδιδαν καλύτερα από τα υγρά όσον αφορά το βαθμό απόδοσης και την παραγόμενη καθαρή ισχύ. Πιο συγκεκριμένα το βενζόλιο σε θερμοκρασία πηγής θερμότητας 225 °C δίνει την μεγαλύτερη καθαρή ισχύ, 14,1 MW και έχει τον υψηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης 23,6 %. Επίσης παρατήρησαν ότι η χρήση ψυκτικού μέσου και συνεπώς η χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης αυξάνουν το βαθμό απόδοσης και το παραγόμενο έργο. Η χρήση προθερμαντήρα αύξησε και αυτήν τον βαθμό απόδοσης και παραγόμενο έργο.

Η Calentix Technologies, LLC σε συνεργασία με τη Mitsubishi Heavy Industries [29] ανέπτυξαν το Hydrocurrent™ 125EJW το οποίο χρησιμοποιεί κύκλο ORC με εργαζόμενο μέσο R245fa προκειμένου να αξιοποιήσει την απορριπτόμενη θερμότητα από το νερό ψύξεως ναυτικού κινητήρα Diesel. Η μονάδα αυτή παράγει μέχρι και 125 kW ηλεκτρικής ισχύος, η οποία εάν παραγόταν από γεννήτρια θα απαιτούσε 250.000 kg κάυσιμο diesel ετησίως. Η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας κυμαίνεται μεταξύ 80-95 °C και η θερμική ισχύς της είναι ίση με 1942,9 kW. Η συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου μετά την εκτόνωση γίνεται με τη χρήση θαλάσσινου νερού ως ψυκτικού. Οι δοκιμές έδειξαν ότι για παροχή εργαζόμενου μέσου 8,5 kg/s, θερμοκρασία εισόδου του στο στρόβιλο 79,1 °C και πίεση εισόδου 6,7 bar το σύστημα απέδωσε 125,3 kW ισχύος εκ των οποίων τα 119,8 kW είναι καθαρή ηλεκτρική ισχύς. Ο καθαρός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι 6,2%.

Οι Allouache A, Leggett S, Hall M, Tu M et al. [30] προσομοίωσαν οργανικό κύκλο Rankine με εργαζόμενο μέσο R245fa, ο οποίος ανακτά θερμότητα από τα καυσαέρια ενός κινητήρα Diesel 15 L που δουλεύει σε σταθερά φορτία. Παρατηρήθηκε ότι για τις μέγιστες στροφές του κινητήρα (1830 rpm) και ροή εργαζόμενου μέσου 1,45 φορές μεγαλύτερη από τη ροή του καυσαερίου, η παραγωγή καθαρής ισχύος από το ORC φτάνει τη μέγιστη τιμή της στα 21 kW περίπου. Επίσης παρατηρήθηκε ότι για διαφορετικές μέσες πιέσεις στο θάλαμο καύσης του κινητήρα ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC φτάνει ένα μέγιστο 11% σε κάθε περίπτωση, αλλά με διαφορετικό ποσοστό παροχής εργαζόμενου μέσου ανά παροχή καυσαερίου. Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου ORC για συνθήκες μέγιστων στροφών-φορτίου είναι περίπου 180 °C.

Οι Yin Song, Jian Song και Chun-wei Gu [31] εξέτασαν την ανάπτυξη ενός συστήματος ORC για ανάκτηση θερμότητας από το ψυκτικό νερό και τα καυσαέρια ναυτικού κινητήρα diesel. Η συνολική θερμική ισχύς των καυσαερίων εάν αυτά φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εκτιμήθηκε στα 600 kW ενώ του ψυκτικού νερού στα 200 kW περίπου. Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση δύο διαφορετικών συστημάτων εκ των οποίων το ένα εκμεταλεύεται το νερό ψύξης και το άλλο τα καυσαέρια. Για το ORC του νερού ψύξης δοκιμάστηκαν διάφορα εργαζόμενα μέσα εκ των οποίων τα R236fa (με θερμοκρασία ατμοποίησης 337,7 K) και R245fa (με θερμοκρασία ατμοποίησης 336,4 K) έδωσαν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, αλλά και φορτίο με 5,2% και 10,3 kW αντίστοιχα. Στο ORC του καυσαερίου εξετάστηκαν τρία εργαζόμενα μέσα εκ των οποίων το βενζόλιο με θερμοκρασία ατμοποίησης 479,8 K έδωσε τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης 21,3% με καθαρή παραγόμενη ισχύ

90,8 kW. Επόμενο βήμα ήταν να εξεταστεί ένα απλοποιημένο συνδυασμένο κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιεί το νερό ψύξεως για προθέρμανση και τα καυσαέρια για υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου (κυκλοεξάνιο) το οποίο απέδωσε 99,7 kW καθαρής ισχύος με μέγιστη θερμοκρασία κύκλου 490 K περίπου με θερμικό βαθμό απόδοσης κοντά στο 20%. Κρίθηκε ότι λόγω απλότητας της κατασκευής, αλλά και χαμηλότερου κόστους το συνδυασμένο σύστημα συμφέρει περισσότερο.

Οι Bernardo Peris et al. [32] διερεύνησαν ένα σύστημα ORC, με διάφορες παραλλαγές στην δομή του, το οποίο αξιοποιεί νερό ψύξης από κινητήρα εσωτερικής καύσεως θερμοκρασίας 90 °C. Εκτός από διάφορες παραλλαγές εξέτασαν και ποιο εργαζόμενο μέσο δίνει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στην εκάστοτε περίπτωση. Παρατήρησαν επίσης ότι το μέγεθος του εκτονωτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εργαζόμενο μέσο. Τα SES36, Novec και R245fa απαιτούν μεγάλο μέγεθος εκτονωτή ενώ τα R125 και R218 απαιτούν μικρότερο μέγεθος εκτονωτή. Συμπέραναν ότι τα SES36 και Novec7000 είναι τα πιο αποδοτικά για το σύστημα με δύο αναγεννητές και δύο εκτονωτές (DRORC) με βαθμούς απόδοσης 7,17% και 7,11% αντίστοιχα. Το R245fa δίνει μέγιστο βαθμό απόδοσης 6,62% για σύστημα με έναν αναγεννητή (RORC). Στο σύστημα με αναγέννηση και αναθέρμανση (RRORC) η χρήση R134a μπορεί να αποφέρει απόδοση 6,55%. Όλες οι εφαρμογές αύξησαν τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της MEK από 4,9 έως 5,3%.

Οι Bause T. et al [33] διεξήγαγαν μια μελέτη για την εταιρία παραγωγής χάλυβα Feralpi στην Ιταλία, προκειμένου να αξιοποιηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα του μίγματος διαφόρων αερίων που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία. Η θερμότητα αυτή εκτιμήθηκε ότι είναι το 25% περίπου της ενέργειας που καταναλώνει το εργοστάσιο. Λόγω κόστους αλλά και απαιτήσεων συντήρησης αποφάνθηκε ότι ο τυπικός κύκλος Rankine νερού-ατμού δεν ήταν βιώσιμος. Έτσι αποφασίστηκε η χρήση συστήματος ORC. Μετά από απαίτηση της χαλυβουργίας, η Turboden σχεδίασε μία εγκατάσταση η οποία χρησιμοποιώντας τα θερμά αέρια από τη βιομηχανία, παράγει κορεσμένο ατμό υψηλής πίεσεως (26 bar) με θερμοκρασία 228-245 °C το 1/3 του οποίου παρέχεται σε άλλες βιομηχανίες για δική τους χρήση, συνεισφέροντας στην γρηγορότερη απόσβεση της επένδυσης. Η εγκατάσταση έχει ονομαστική ισχύ 2,7 MW και ο καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εκτιμήθηκε στο 18,5%.

Οι Iacopo Vaja et al. [34] διεξήγαγαν μία θερμοδυναμική ανάλυση τριών διαφορετικών κύκλων Rankine. Τρία, διαφορετικής καμπύλης κορεσμού εργαζόμενα μέσα (βενζόλιο, R11, R134a) δοκιμάστηκαν σε κάθε παραλλαγή με σκοπό την αξιολόγηση του καθενός στην εκάστοτε περίπτωση. Πηγή θερμότητας είναι τα καυσαέρια μίας Μ.Ε.Κ. και σε μία εκ των περιπτώσεων και το νερό ψύξης της. Παρατηρήθηκε ότι για την απλή διάταξη ORC με αντλία, συμπυκνωτή, ατμοποιητή και εκτονωτή, το βενζόλιο δίνει το μεγαλύτερο παραγόμενο έργο αλλά και τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης με 19,8% με υψηλή θερμοκρασία κύκλου 494,5 K. Στην διάταξη όπου το νερό ψύξεως της Μ.Ε.Κ. χρησιμοποιήθηκε για προθέρμανση, υπήρξε αύξηση του παραγόμενου έργου από 9,9% στο βενζόλιο έως 34,8% στο R134a σε σχέση με τον απλό κύκλο. Τέλος για κύκλο με αναγέννηση το παραγόμενο έργο με βενζόλιο ήταν μεγαλύτερο και από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, δίνοντας βαθμό απόδοσης 22,3%. Παρόλο που το βενζόλιο αυξάνει το συνολικό βαθμό απόδοσης της Μ.Ε.Κ. σε μεγαλύτερο βαθμό από τα άλλα δύο μέσα, το R11 στην περίπτωση της προθέρμανσης συνεισφέρει εξίσου σημαντικά στην αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης, καθιστώντας το προτιμότερη επιλογή για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτό συμβαίνει διότι ο λόγος παροχών όγκου εξόδου/εισόδου στον εκτονωτή παραμένει κάτω του 50, επιτρέποντας τη χρήση απλών εκτονωτών όπως στρόβιλοι μονής βαθμίδας.

## **1.4 Επιστημονικό ερώτημα**

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα κύρια επιστημονικά ερωτήματα που θα κληθεί να απαντήσει η εν λόγω μελέτη είναι τα εξής:

- Πώς μοντελοποιείται ένας υποκρίσιμος Οργανικός κύκλος Rankine στο λογισμικό ASPEN Plus;
- Πώς τροποποιείται η απόδοση του συστήματος αλλάζοντας το R134a με κάποιο άλλο καθαρό ρευστό;
- Πόσο ωφέλιμη είναι η χρήση κάποιου μίγματος αντί καθαρού ρευστού;
- Πώς μεταβάλλεται η απόδοση των διαφόρων ρευστών αλλάζοντας τις συνθήκες λειτουργίας;
- Ποιο εργαζόμενο μέσο προσφέρει το μεγαλύτερο κέρδος για την αντικατάσταση του R134a αν ο οργανικός κύκλος κινείται από την καύση φυσικού αερίου;
- Πώς μεταβάλλεται η οικονομικότητα των διαφόρων ρευστών αν αντί για φυσικό αέριο η θερμότητα προέρχεται από κάποια απορριπτόμενη πηγή;

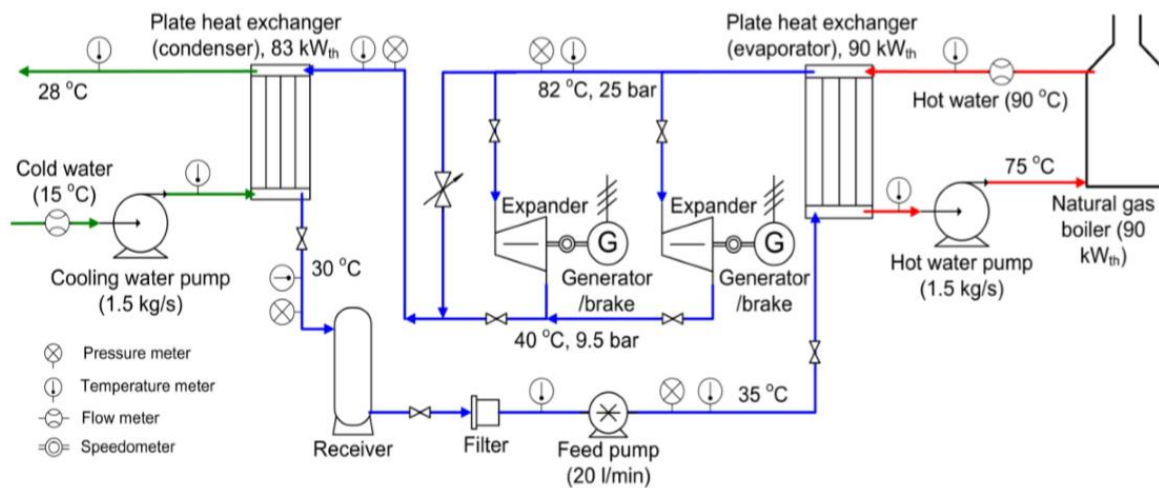




## 2.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC

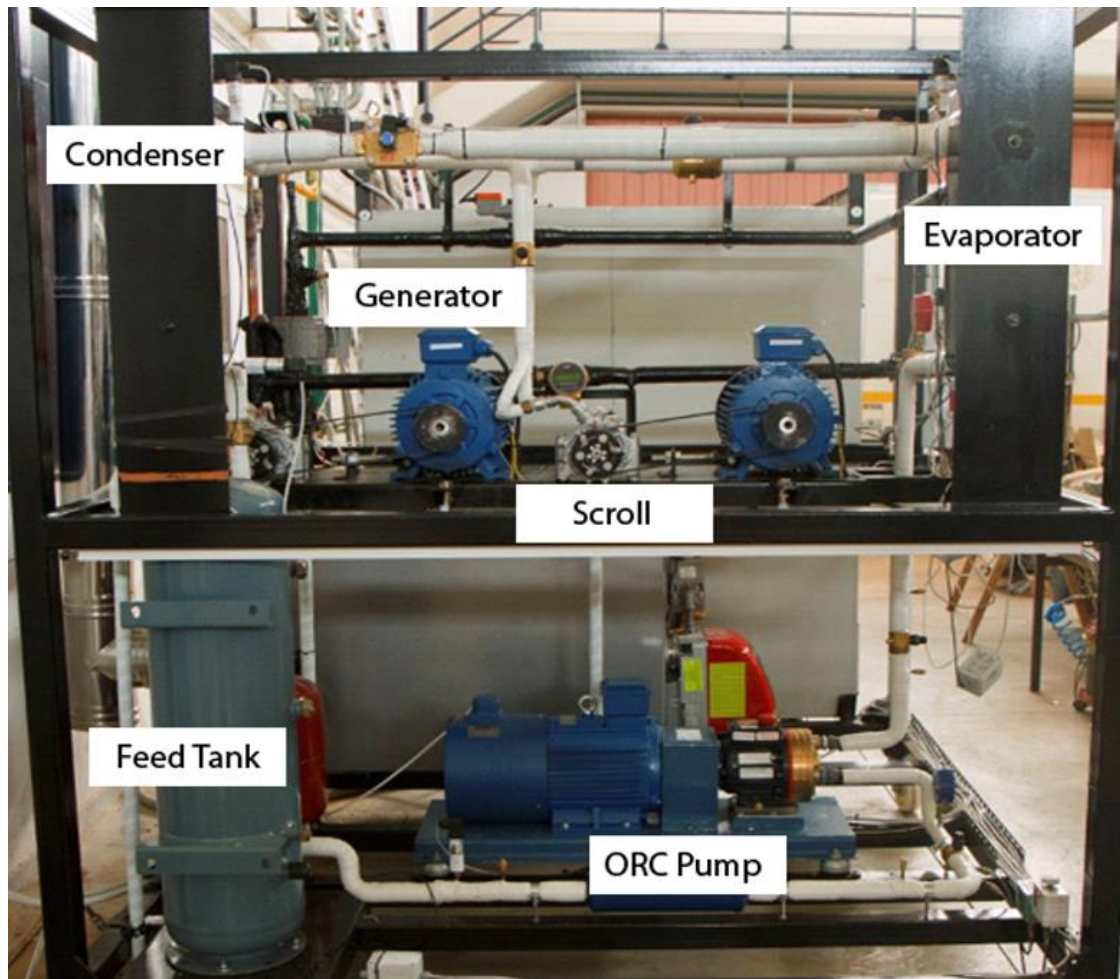
### 2.1 Περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος

Η εξεταζόμενη ναυτική πειραματική διάταξη ORC βασίζεται στον συμβατικό, χαμηλής θερμοκρασίας και υποκρίσιμο Οργανικό Κύκλο Rankine και χρησιμοποιεί R134a ως εργαζόμενο μέσο. Σκοπός της υλοποίησης αυτής της διάταξης είναι η αξιοποίηση της θερμότητας του νερού ψύξης που εξέρχεται από τον ναυτικό κινητήρα Diesel. Παρακάτω παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της διάταξης[35]:



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση της εργαστηριακής διάταξης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9 ο κύκλος τροφοδοτείται από ένα δοχείο (Feed tank/Receiver) σε μια μέση πίεση 9.5 bar και μέση θερμοκρασία 30 °C. Οι παράμετροι αυτές, ελέγχονται από τη ροή κρύου νερού στο συμπυκνωτή (Condenser) η οποία ρυθμίζεται από μια βαλβίδα. Η τροφοδοτική αντλία (Feed pump) είναι θετικής μετατόπισης, πολυδιαφραγματική και ανεβάζει την πίεση του εργαζόμενου μέσου στα 22-25 bar αναλόγως με τις συνθήκες λειτουργίας. Στον σχεδιασμό της εγκατάστασης ελήφθη υπόψη η σπηλαιώση της αντλίας γεγονός που οδήγησε στην προσθήκη υποψύκτη (subcooler) ώστε αυτή να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο. Όταν η αντλία δουλεύει σε ονομαστικές στροφές 960 rpm επιτυγχάνεται παροχή όγκου στον κύκλο 20 λίτρα/λεπτό. Οι στροφές της αντλίας είναι ρυθμιζόμενες, συνεπώς η παροχή μάζας του ψυκτικού υγρού μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την επιθυμητή θερμοκρασία υπερθέρμανσης του ατμού στον ατμοποιητή (Evaporator).



Σχήμα 10: Φωτογραφία της πραγματικής εγκατάστασης με ονομασία των επιμέρους τμημάτων της

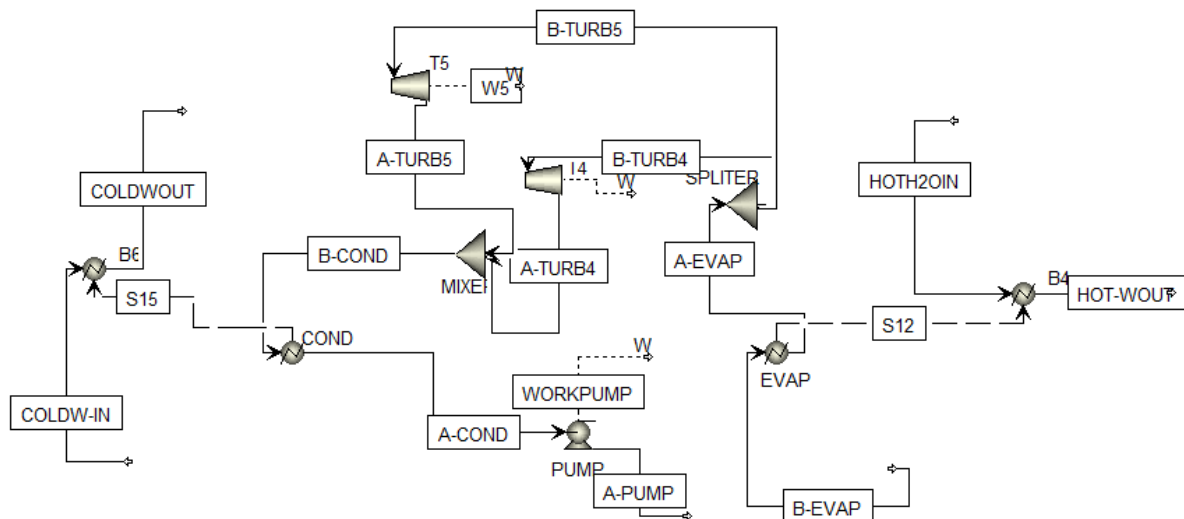
Ο υψηλής πίεσης υπέρθερμος ατμός εισέρχεται σε δύο παράλληλους σπειροειδείς εκτονωτές (Scroll expanders). Οι εκτονωτές αυτοί είναι στην πραγματικότητα σπειροειδείς συμπιεστές (με μερικές μετατροπές) σε αντίστροφη λειτουργία. Η μονάδα αυτή παράγει 5 kW<sub>el</sub> καθαρής ηλεκτρικής ισχύος, όταν η υψηλή πίεση του κυκλώματος είναι 25 bar και η θερμοκρασία εισόδου στους εκτονωτές 82 °C. Το νερό που χρησιμοποιείται για την συμπύκνωση έχει παροχή 1.5 kg/sec και εισέρχεται σε θερμοκρασία 15 °C στον συμπυκνωτή (condenser). Να σημειωθεί ότι ατμοποιητής και συμπυκνωτής είναι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας.

## 2.2 Πηγή Θερμότητας

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της εγκατάστασης είναι να αξιοποιεί απορριπτόμενη θερμότητα από ψυκτικό νερό ναυτικού κινητήρα Diesel. Συνεπώς είναι προφανές ότι η πηγή θερμότητας του κύκλου αυτού είναι χαμηλής θερμοκρασίας. Το νερό αυτό εξέρχεται από τον κινητήρα στους 90 °C και έχει παροχή 1.5 kg/sec. Προκειμένου να προσομοιωθεί αυτή η πηγή θερμότητας εγκαταστάθηκε ένα boiler θερμικής ισχύος 90 kW<sub>th</sub> ώστε να φέρει το νερό στην επιθυμητή θερμοκρασία.

## 2.3 Μοντελοποίηση της εγκατάστασης

Η μοντελοποίηση της εγκατάστασης έγινε στο λογισμικό Aspen plus®. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε είχε ως σκοπό την όσο δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας.



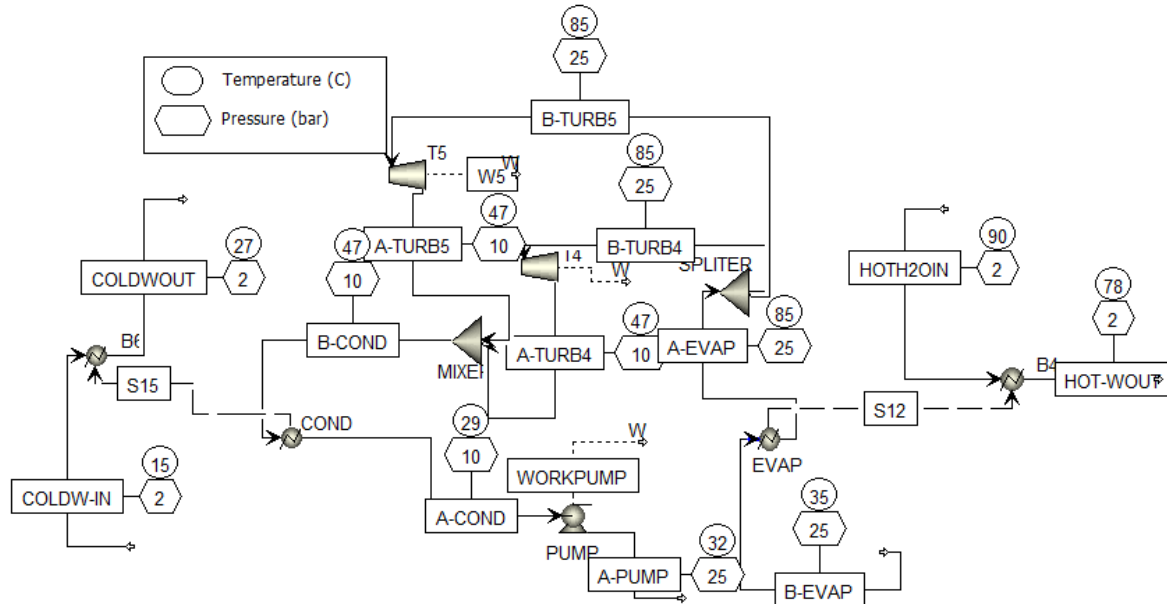
Σχήμα 11: Μοντέλο της εγκατάστασης σε Aspen plus

Η προϋπόθεση που τέθηκε για την αντλία (PUMP), αφορά το εισερχόμενο σε αυτή ρεύμα οργανικού ρευστού (A-COND). Αυτό θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι υγρό και να μην περιέχει ατμώδη φάση, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή της λειτουργία. Η αντλία πραγματοποιεί ισεντροπική συμπίεση στο εργαζόμενο μέσο. Για λόγους απλότητας ο ατμοποιητής (EVAP) μοντελοποιήθηκε σαν απλός θερμαντήρας ο οποίος λαμβάνει τη θερμική του ισχύ από το ρεύμα ζεστού νερού (HOTH2OIN-HOTWOUT) το οποίο εισέρχεται στους 90 °C και 2 bar πίεση. Αντίστοιχα μοντελοποιήθηκε και ο συμπυκνωτής (COND) στον οποίο εισέρχεται ψυκτικό νερό 15 °C και 2 bar. Σε ατμοποιητή και συμπυκνωτή αμελήθηκε η πτώση πίεσης. Ο διαχωριστής (SPLITER) δεν παρουσιάζει απώλειες πίεσης και η μοναδική του συνεισφορά στο μοντέλο είναι η διαχωρισμός του ρεύματος A-EVAP σε δύο ίσης παροχής ρεύματα που θα εισέλθουν στους εκτονωτές (T4, T5). Οι εκτονωτές έχουν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 0,7 και βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία τους, είναι τα ρεύματα που εισέρχονται σε αυτούς (B-TURB4, B-TURB5) καθώς και τα εξερχόμενα, να είναι καθαρός ατμός χωρίς υγρή φάση. Όλες οι πτώσεις πίεσης της εγκατάστασης, γραμμικές και συγκεντρωμένες (σωληνώσεις, βαλβίδες κ.λ.π), θεωρήθηκαν αμελητέες.

### 2.3.1 Αξιολόγηση του επιλεγθέντος μοντέλου

Προκειμένου να αξιολογηθεί το επιλεγθέν μοντέλο ως προς την ακρίβεια του, έγιναν δοκιμές οι οποίες συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα της εγκατάστασης (πίεσεις, θερμοκρασίες κ.λ.π) τα οποία

φαίνονται στο Σχήμα 9. Προέκυψαν για παροχή εργαζόμενου μέσου R134a 21,5 λίτρα/λεπτό σε πιέσεις λειτουργίας 10-25 bar και με θερμοκρασίες συμπυκνωτή και ατμοποιητή 29 °C και 85 °C αντίστοιχα, τα δεδομένα που φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 12: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για R134a με παροχή ρευστού 21,5 λίτρα/λεπτό

Προέκυψε επίσης ότι η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δύο εκτονωτών είναι 5,97 kW, η ισχύς που αποορρά η αντλία είναι 1,9 kW και η θερμική ισχύς ατμοποιητή και συμπυκνωτή είναι 85 kW και 83 kW αντίστοιχα, τιμές όμοιες δηλαδή με τις πραγματικές.

Ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{\text{Ισχύς εκτονωτών} - \text{Ισχύς αντλίας}}{\text{Θερμική ισχύς ατμοποιητή}}$$

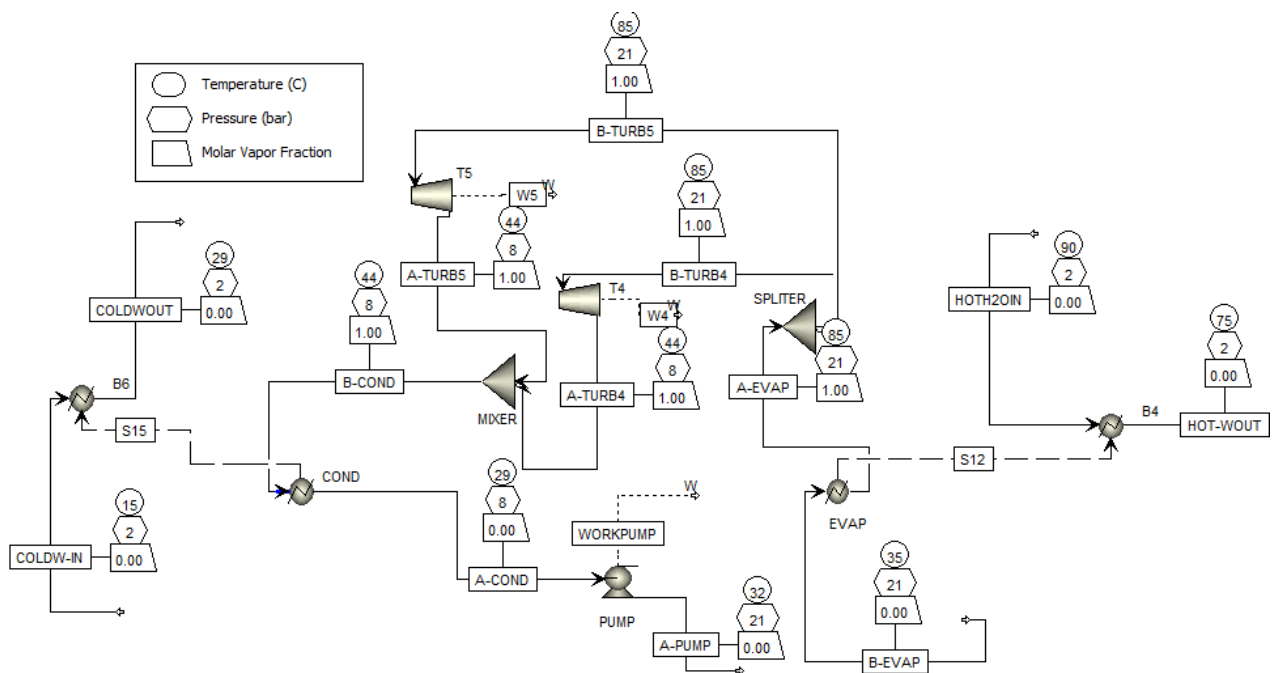
Υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης 4,79% που επίσης συμπίπτει σε ένα μεγάλο βαθμό με τον πειραματικό.

### 3.ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Επιλέχθηκαν με κριτήριο την κρίσιμη τους θερμοκρασία πέντε οργανικά ρευστά τα R152a,R245fa,R227ea,R1234ze(E) και R1234yf. Τέθηκε ως προϋπόθεση η κρίσιμη θερμοκρασία να μην ξεπερνάει τους 155 °C. Οι θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης διατηρήθηκαν ίδιες (29 °C και 85 °C) για λόγους συγκρισιμότητας. Διατηρήθηκε επίσης και η παροχή όγκου της αντλίας στα 21,5 λίτρα/λεπτό για όλες τις περιπτώσεις. Στο εκάστοτε εργαζόμενο μέσο έγιναν δοκιμές για την επιλογή της χαμηλής και υψηλής πίεσης λειτουργίας του κύκλου ώστε να μην υπάρξει διφασική κατάσταση του ρευστού στους εκτονωτές η την αντλία.

#### 3.1 R152a

Για το R152a επιλέχθηκε χαμηλή και υψηλή πίεση 8 bar και 21 bar αντίστοιχα. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:

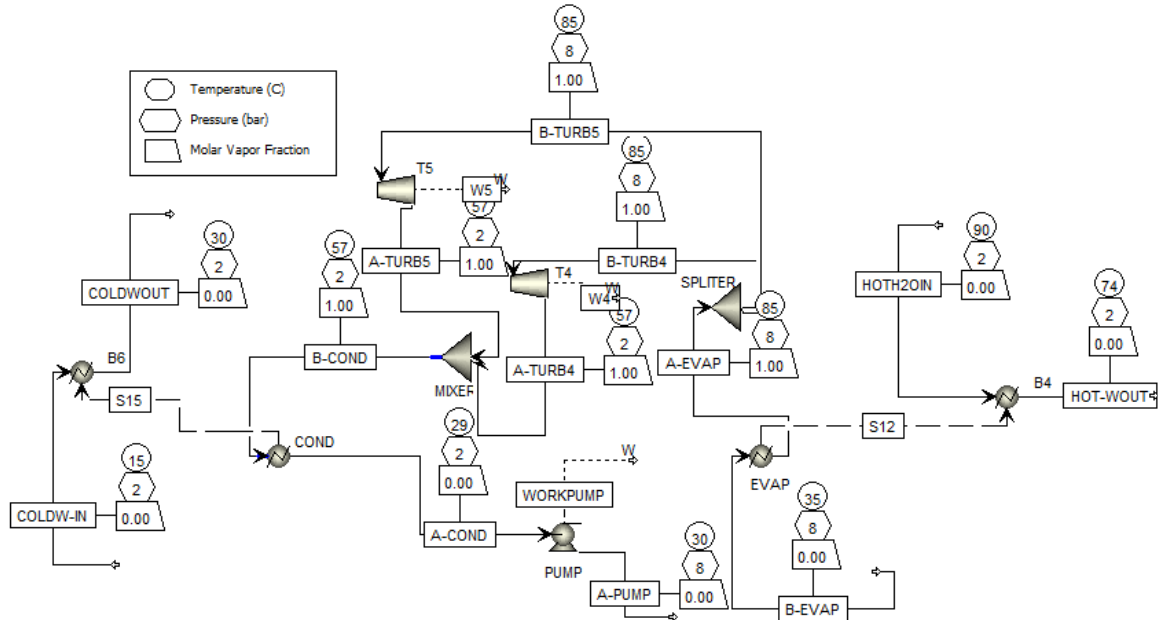


Σχήμα 13: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R152a

Επίσης υπολογίστηκε η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δυο εκτονωτών στα 7,26 kW ,η ισχύς της αντλίας στα 1,59 kW και η θερμική ισχύς του ατμοποιητή στα 99,4 kW.Από τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι 5,7% .

### 3.2 R245fa

Για το R245fa επιλέχθηκε χαμηλή και υψηλή πίεση 2 bar και 8 bar αντίστοιχα με βάση τη μελέτη του Seok Hun Kang [36]. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:

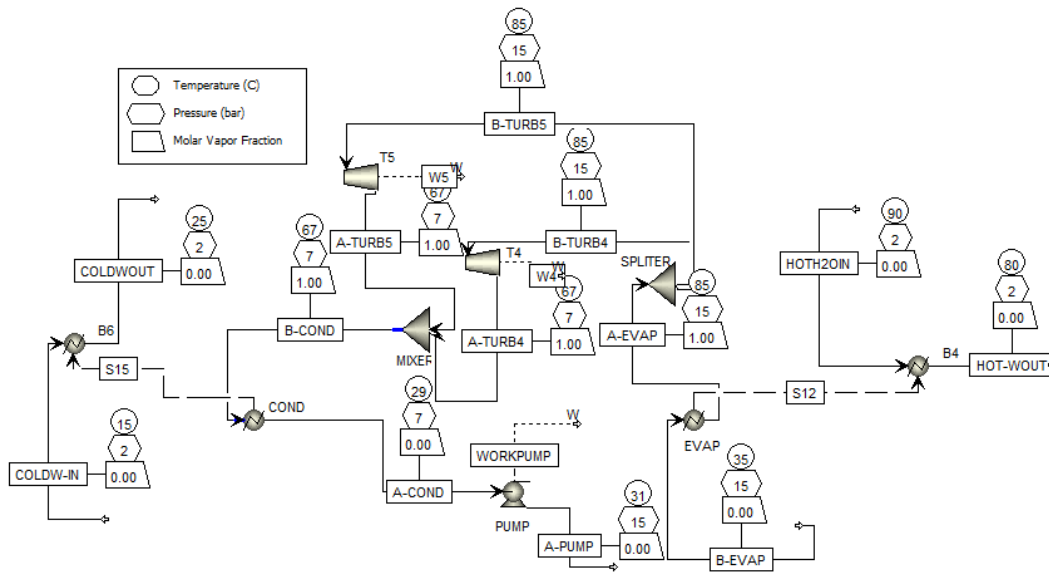


Σχήμα 14: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R245fa

Επίσης υπολογίστηκε η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δυο εκτονωτών στα 8,99 kW, η ισχύς της αντλίας στα 0,75 kW και η θερμική ισχύς του ατμοποιητή στα 109,5 kW. Από τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι 7,53%.

### 3.3 R227ea

Για το R227ea επιλέχθηκε χαμηλή και υψηλή πίεση 7 bar και 15 bar αντίστοιχα με βάση τη μελέτη της Aleksandra Borsukiewicz-Gozdur [37]. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:

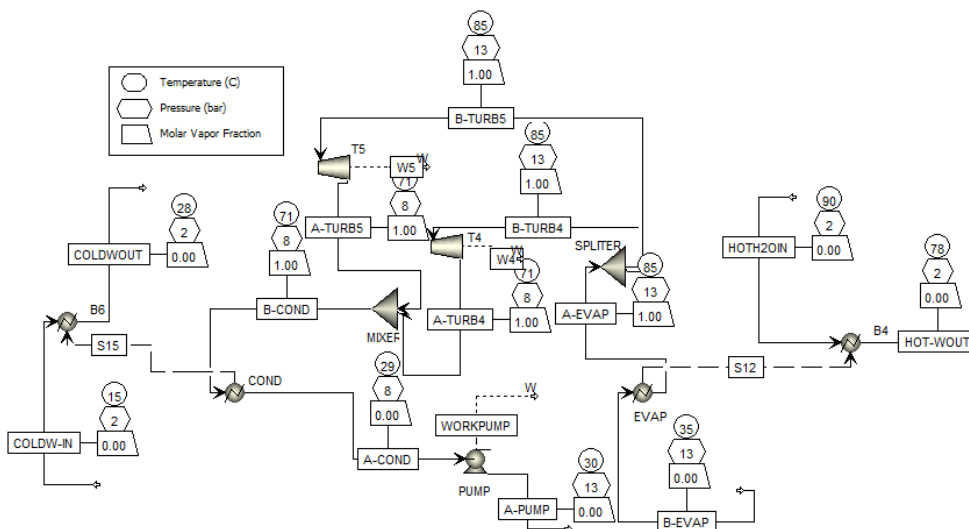


Σχήμα 15: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R227ea

Επίσης υπολογίστηκε η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δυο εκτονωτών στα 3,6 kW ,η ισχύς της αντλίας στα 0,98 kW και η θερμική ισχύς του ατμοποιητή στα 70,4 kW. Από τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι 3,73% .

### 3.4 R1234ze

Για το R1234ze επιλέχθηκε χαμηλή και υψηλή πίεση 8 bar και 13 bar αντίστοιχα. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:

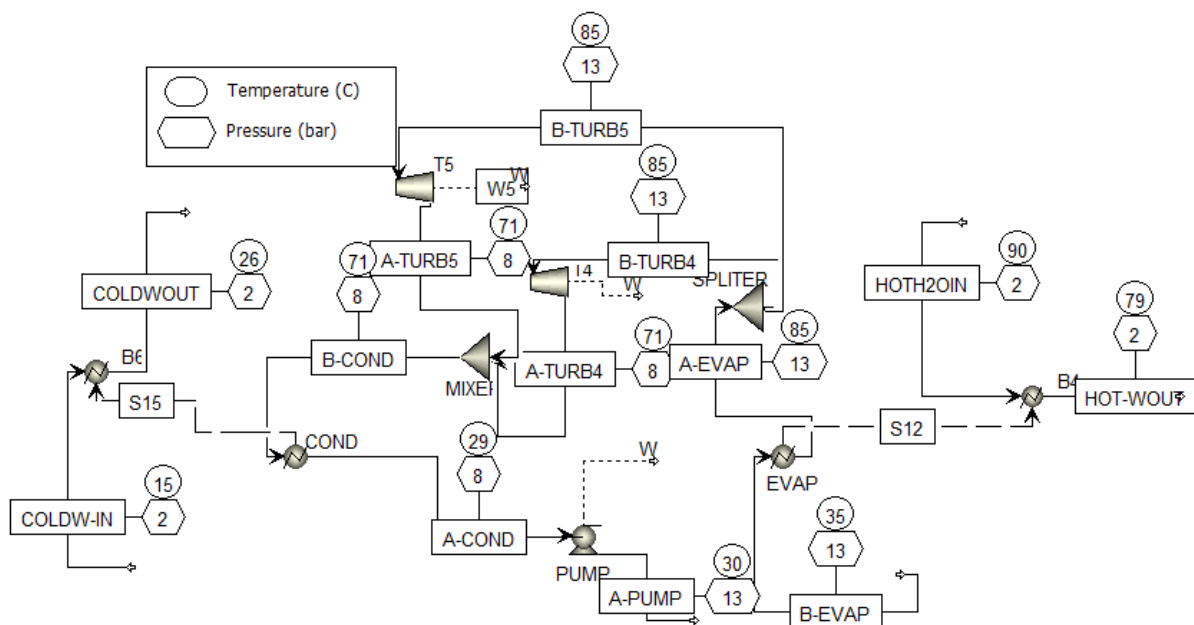


Σχήμα 16: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για το εργαζόμενο μέσο R1234ze

Επίσης υπολογίστηκε η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δυο εκτονωτών στα 3,05 kW ,η ισχύς της αντλίας στα 0,62 kW και η θερμική ισχύς του ατμοποιητή στα 85 kW.Από τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι 2,86 % .

### **3.5 R1234yf**

Για το R1234yf επιλέχθηκε χαμηλή και υψηλή πίεση 8 bar και 13 bar αντίστοιχα. Οι πιέσεις και θερμοκρασίες που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 17: Προκύπτουσες πιέσεις και θερμοκρασίες για εργαζόμενο μέσο R1234yf

Επίσης υπολογίστηκε η παραγόμενη μηχανική ισχύς των δυο εκτονωτών στα 2,89 kW ,η ισχύς της αντλίας στα 0,61 kW και η θερμική ισχύς του ατμοποιητή στα 72 kW. Από τα προηγούμενα συνεπάγεται ότι ο βαθμός απόδοσης θα είναι 3,15% .

### **3.6 Ανάλυση ευαισθησίας για κάθε εργαζόμενο μέσο**

Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε αλλάζοντας μια παράμετρο της εγκατάστασης και διατηρώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους που είχαν τεθεί στα αρχικά σενάρια σταθερές. Αρχικά μεταβλήθηκε η θερμοκρασία εξόδου του ατμοποιητή (ρεύμα A-EVAP και B-TURB), μεταβάλλοντας κάθε φορά την υψηλή πίεση του κυκλώματος και θέτοντας ως δεδομένο στον ατμοποιητή το επίπεδο υπερθέρμανσης (level of superheating) στους 5 °C. Στη συνέχεια μεταβλήθηκε η θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή (ρεύμα A-COND), αλλάζοντας κάθε φορά την χαμηλή πίεση του κυκλώματος. Όπως προαναφέρθηκε, κριτήριο επιλογής των θερμοκρασιών αυτών είναι η μή ύπαρξη διφασικής κατάστασης του ρευστού τόσο στην αντλία όσο και στους εκτονωτές.



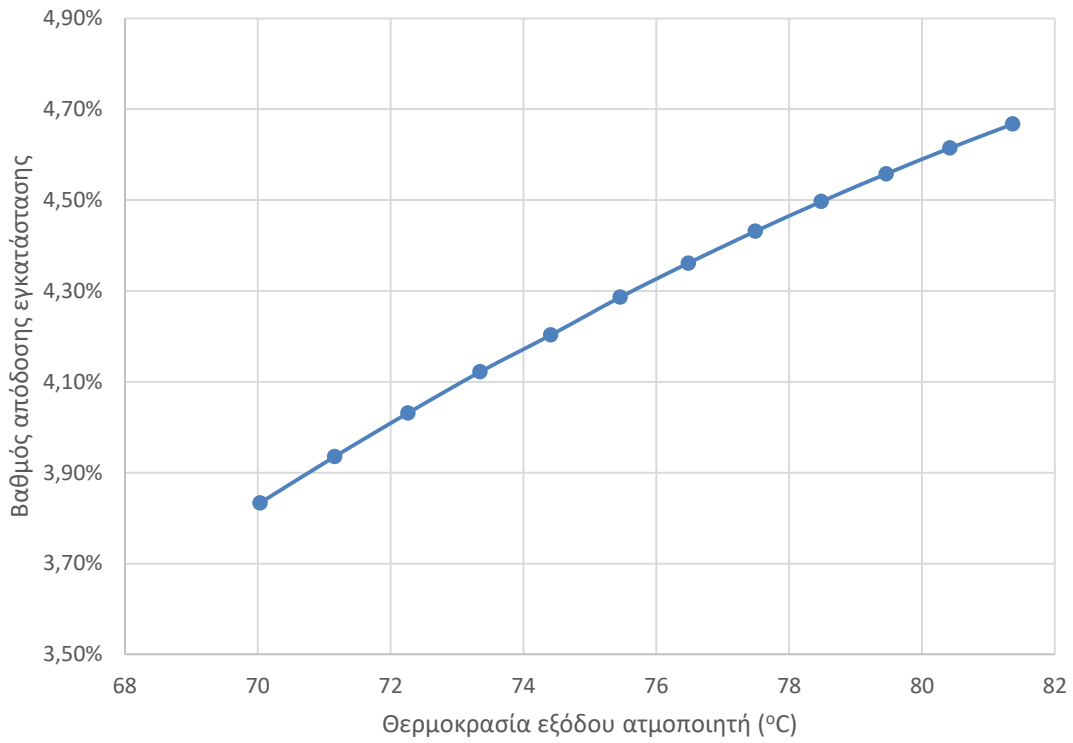
### **3.6.1 R134a**

Το εύρος υψηλής πίεσης που επιλέχθηκε ήταν 19-24,5 bar, από το οποίο προέκυψαν θερμοκρασίες ατμοποίησης 70-81,3 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Θερμοκρασίες πριν και μετά τους εκτονωτές (T4, T5), ισχύς εκτονωτών, θερμική ισχύς ατμοποιητή, ισχύς αντλίας και βαθμός απόδοσης).

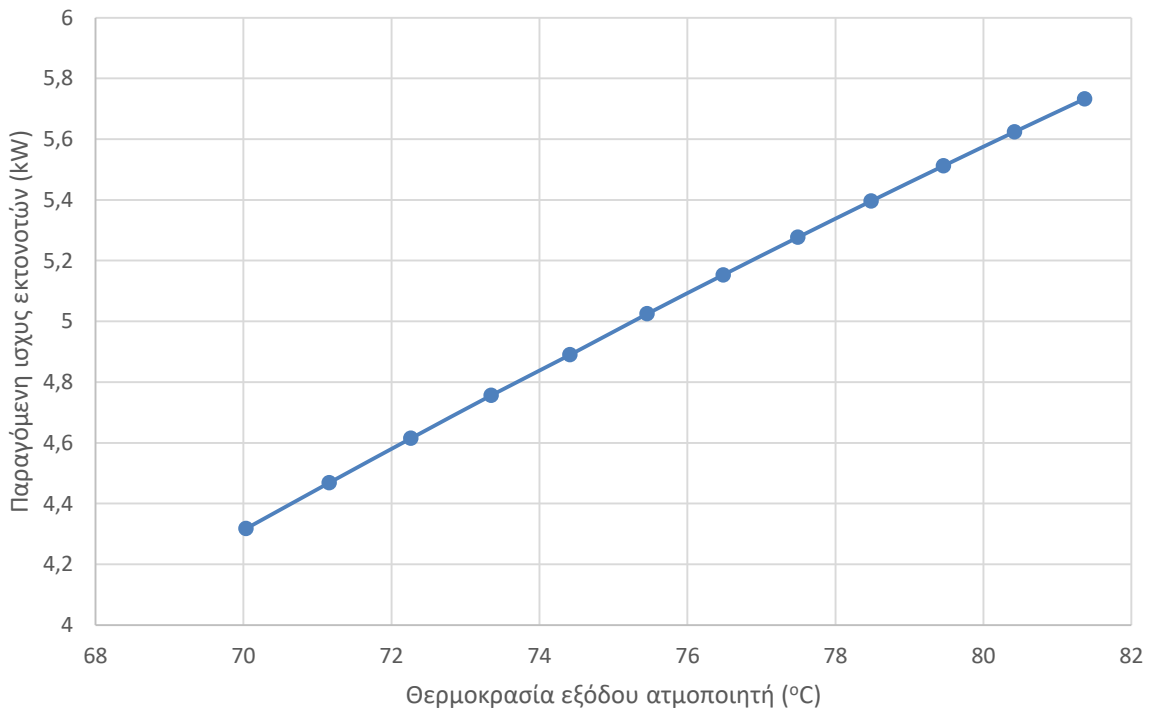
*Πίνακας 2: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R134a*

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
19	70,03	44,30	70,03	44,30	2,16	2,16	82,19	1,17	3,8%
19,5	71,16	44,29	71,16	44,29	2,23	2,23	82,33	1,23	3,9%
20	72,26	44,26	72,26	44,26	2,31	2,31	82,47	1,29	4,0%
20,5	73,35	44,22	73,35	44,22	2,38	2,38	82,60	1,35	4,1%
21	74,41	44,18	74,41	44,18	2,44	2,44	82,73	1,41	4,2%
21,5	75,46	44,11	75,46	44,11	2,51	2,51	82,84	1,47	4,3%
22	76,48	44,04	76,48	44,04	2,58	2,58	82,94	1,54	4,4%
22,5	77,49	43,96	77,49	43,96	2,64	2,64	83,04	1,60	4,4%
23	78,49	43,87	78,49	43,87	2,70	2,70	83,13	1,66	4,5%
23,5	79,46	43,77	79,46	43,77	2,76	2,76	83,21	1,72	4,6%
24	80,42	43,66	80,42	43,66	2,81	2,81	83,28	1,78	4,6%
24,5	81,37	43,54	81,37	43,54	2,87	2,87	83,34	1,84	4,7%

Με βάση τον **Error! Reference source not found.** σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή (TBTURB) με την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 18: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή για R134a



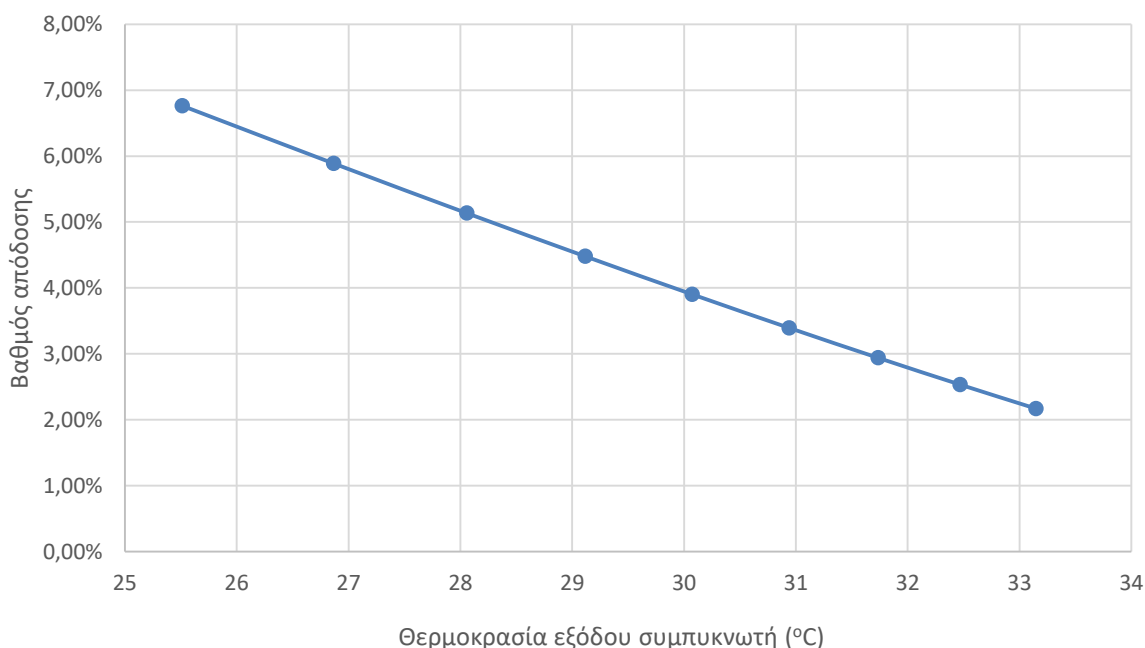
Σχήμα 19: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή για R134a

Για την ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την χαμηλή πίεση του κυκλώματος (και συνεπώς την θερμοκρασία συμπυκνώσεως) επιλέχθηκε εύρος πιέσεων 7-15 bar το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες συμπυκνώσεως 25,5-33,1 °C . Ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων:

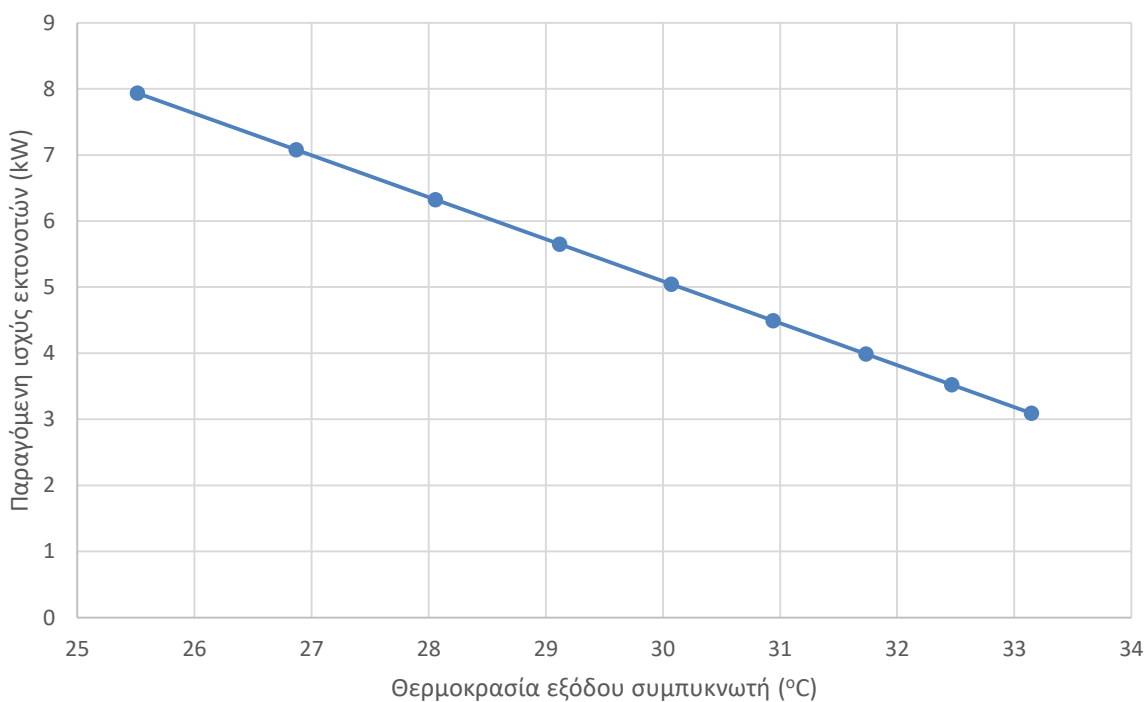
Πίνακας 3: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R134a

Pmin (bar)	T-OUTCOND (°C)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
7,00	25,51	85,07	37,90	85,07	37,90	3,97	3,97	85,00	2,19	6,8%
8,00	26,87	85,07	41,72	85,07	41,72	3,54	3,54	85,00	2,07	5,9%
9,00	28,06	85,07	45,25	85,07	45,25	3,16	3,16	85,00	1,96	5,1%
10,00	29,12	85,07	48,53	85,07	48,53	2,83	2,83	85,00	1,84	4,5%
11,00	30,07	85,07	51,63	85,07	51,63	2,52	2,52	85,00	1,73	3,9%
12,00	30,94	85,07	54,56	85,07	54,56	2,25	2,25	85,00	1,61	3,4%
13,00	31,74	85,07	57,36	85,07	57,36	1,99	1,99	85,00	1,49	2,9%
14,00	32,47	85,07	60,05	85,07	60,05	1,76	1,76	85,00	1,37	2,5%
15,00	33,15	85,07	62,64	85,07	62,64	1,54	1,54	85,00	1,25	2,2%

Με βάση τον Πίνακα 3 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή με την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 20: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R134a



Σχήμα 21: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R134a

### **3.6.2 R245fa**

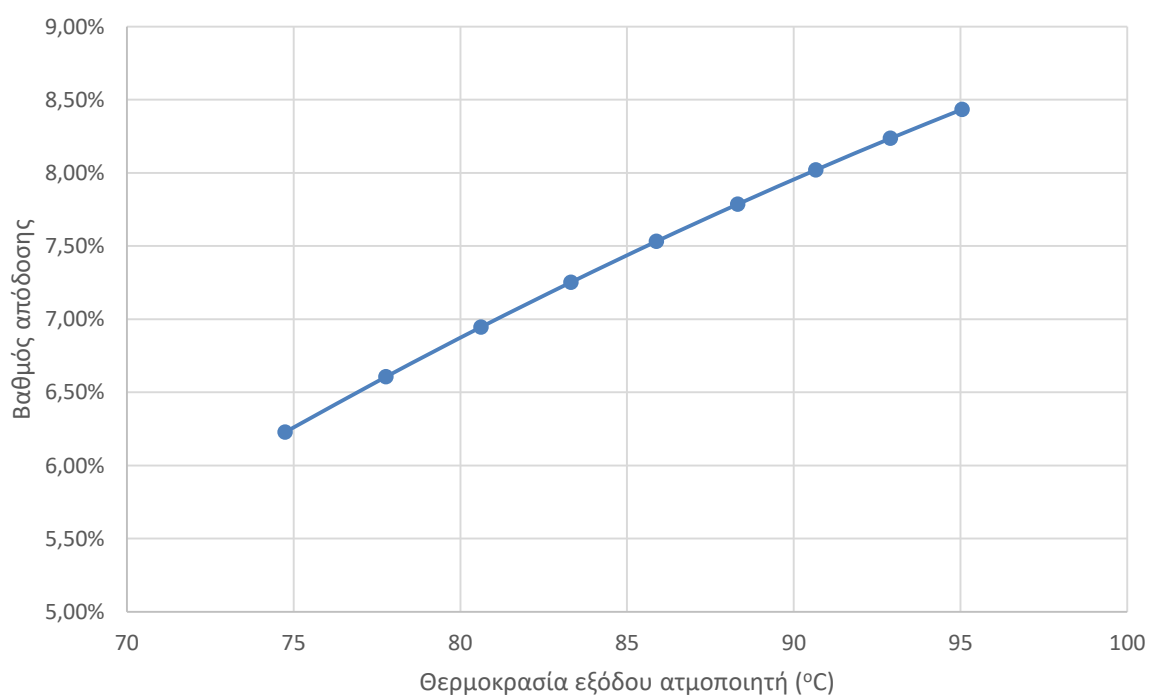
Το εύρος υψηλής πίεσης που επιλέχθηκε ήταν 6-10 bar, από το οποίο προέκυψαν θερμοκρασίες ατμοποίησης 74,7-95 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Θερμοκρασίες πριν και μετά τους εκτονωτές (T4, T5), ισχύς εκτονωτών, θερμική ισχύς ατμοποιητή, ισχύς αντλίας και βαθμός απόδοσης).

Πίνακας 4: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R245fa

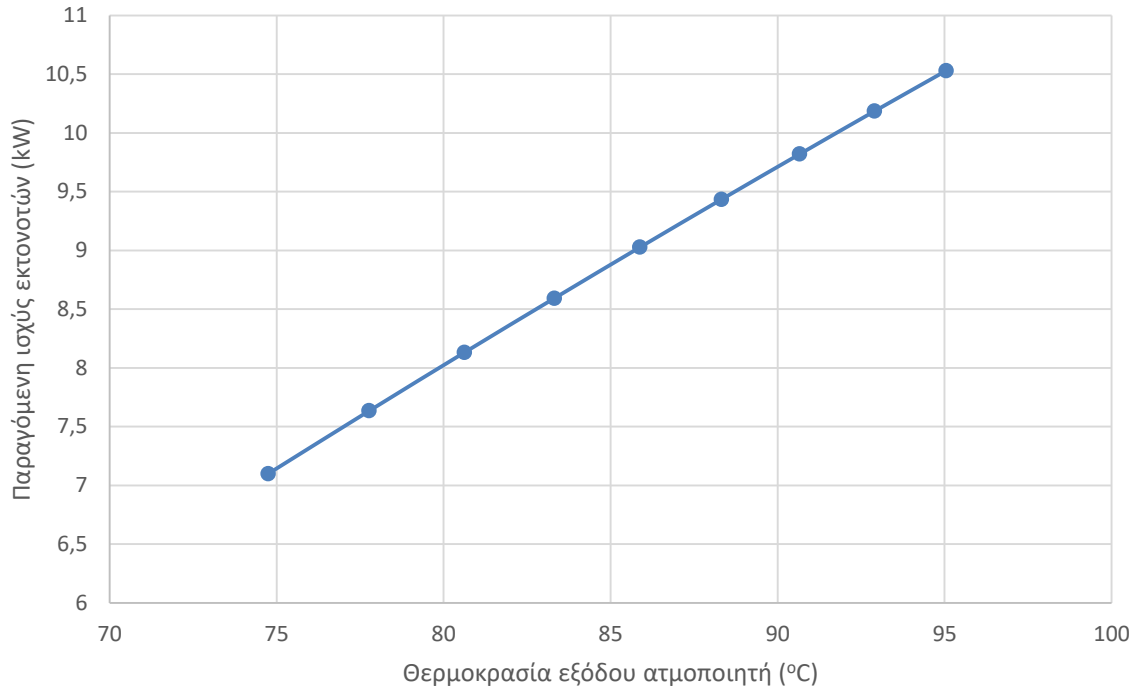
Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER 5 (kW)	QEVPAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
6	74,7	53,2	74,7	53,2	3,5	3,5	106,0	0,50	6,2%
6,5	77,8	54,4	77,8	54,4	3,8	3,8	107,1	0,56	6,6%
7	80,6	55,5	80,6	55,5	4,1	4,1	108,1	0,62	6,9%
7,5	83,3	56,6	83,3	56,6	4,3	4,3	109,0	0,68	7,3%
8	85,9	57,6	85,9	57,6	4,5	4,5	109,9	0,75	7,5%
8,5	88,3	58,6	88,3	58,6	4,7	4,7	110,8	0,81	7,8%
9	90,7	59,5	90,7	59,5	4,9	4,9	111,6	0,87	8,0%

9,5	92,9	60,3	92,9	60,3	5,1	5,1	112,3	0,93	8,2%
10	95,1	61,1	95,1	61,1	5,3	5,3	113,0	1,00	8,4%

Με βάση τον Πίνακα 4 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή (TBTURB) με την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 22: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R245fa



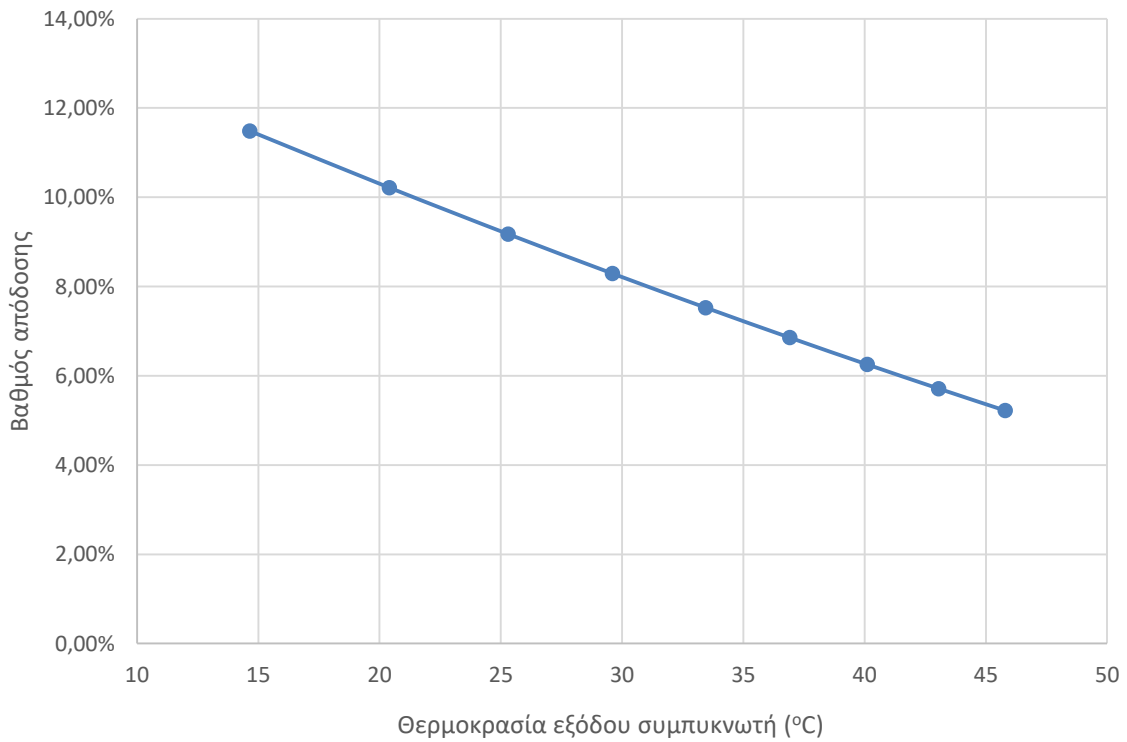
Σχήμα 23: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R245fa

Για την ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την χαμηλή πίεση του κυκλώματος (και συνεπώς την θερμοκρασία συμπυκνώσεως) επιλέχθηκε εύρος πιέσεων 1-3 bar το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες συμπυκνώσεως 14,6-45,8 °C. Ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων:

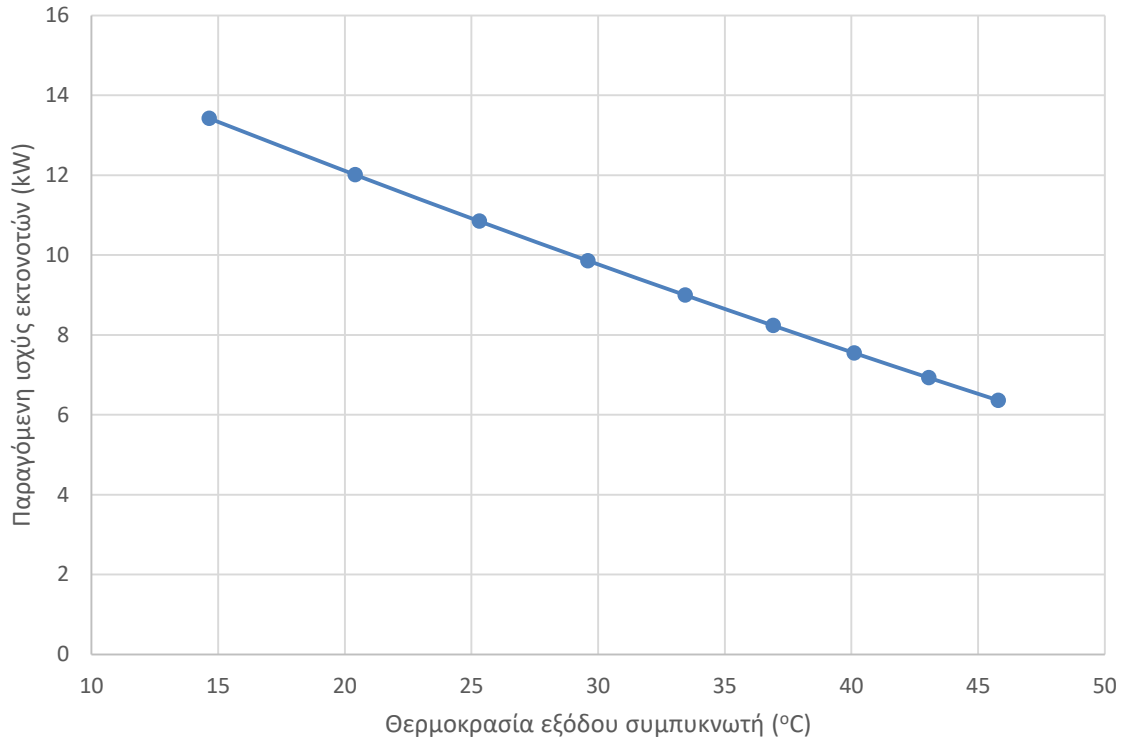
Πίνακας 5: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R245fa

Pmin (bar)	T-OUTCOND (°C)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
1	14,66	85,00	45,24	85,00	45,24	6,71	6,71	109,49	0,85	11,0%
1,25	20,41	85,00	48,82	85,00	48,82	6,00	6,00	109,49	0,82	10,0%
1,5	25,31	85,00	51,82	85,00	51,82	5,42	5,42	109,49	0,80	9,0%
1,75	29,61	85,00	54,41	85,00	54,41	4,93	4,93	109,49	0,78	8,0%
2	33,44	85,00	56,71	85,00	56,71	4,50	4,50	109,49	0,75	8,0%
2,25	36,92	85,00	58,77	85,00	58,77	4,12	4,12	109,49	0,73	7,0%
2,5	40,11	85,00	60,65	85,00	60,65	3,77	3,77	109,49	0,70	6,0%
2,75	43,06	85,00	62,39	85,00	62,39	3,46	3,46	109,49	0,67	6,0%
3	45,81	85,00	64,00	85,00	64,00	3,18	3,18	109,49	0,65	5,0%

Με βάση τον Πίνακα 5 Πίνακα 3 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή με την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 24: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R245fa



Σχήμα 25: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R245fa

### 3.6.3 R227ea

Το εύρος υψηλής πίεσης που επιλέχθηκε ήταν 13-18 bar, από το οποίο προέκυψαν θερμοκρασίες ατμοποίησης 69,2-83,4 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Θερμοκρασίες πριν και μετά τους εκτονωτές (T4, T5), ισχύς εκτονωτών, θερμική ισχύς ατμοποιητή, ισχύς αντλίας και βαθμός απόδοσης).

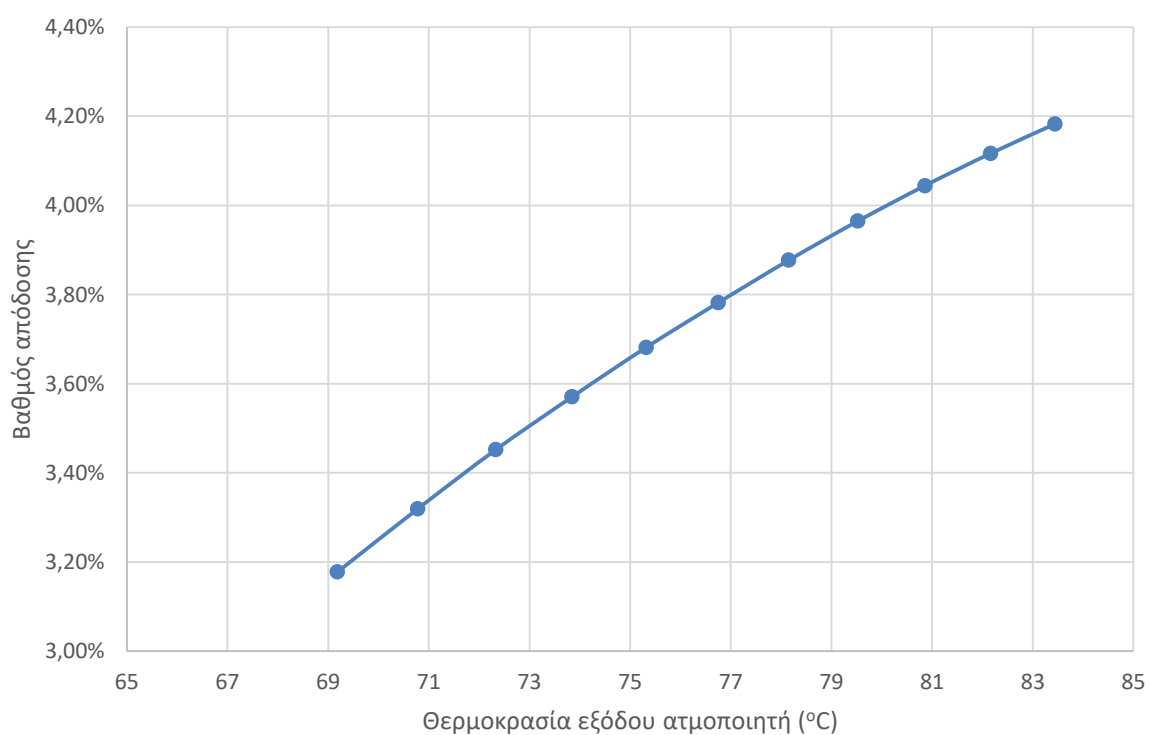
Πίνακας 6: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R227ea

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER 5 (kW)	QEVA (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
13	69,19	54,19	69,19	54,19	1,38	1,38	63,85	0,74	3,2%
13,5	70,78	54,71	70,78	54,71	1,47	1,47	64,26	0,80	3,3%
14	72,34	55,20	72,34	55,20	1,55	1,55	64,65	0,86	3,5%
14,5	73,85	55,67	73,85	55,67	1,62	1,62	65,02	0,92	3,6%
15	75,32	56,12	75,32	56,12	-1,69	-1,69	65,37	0,98	3,7%
15,5	76,75	56,53	76,75	56,53	1,76	1,76	65,70	1,04	3,8%
16	78,15	56,92	78,15	56,92	1,83	1,83	66,02	1,11	3,9%

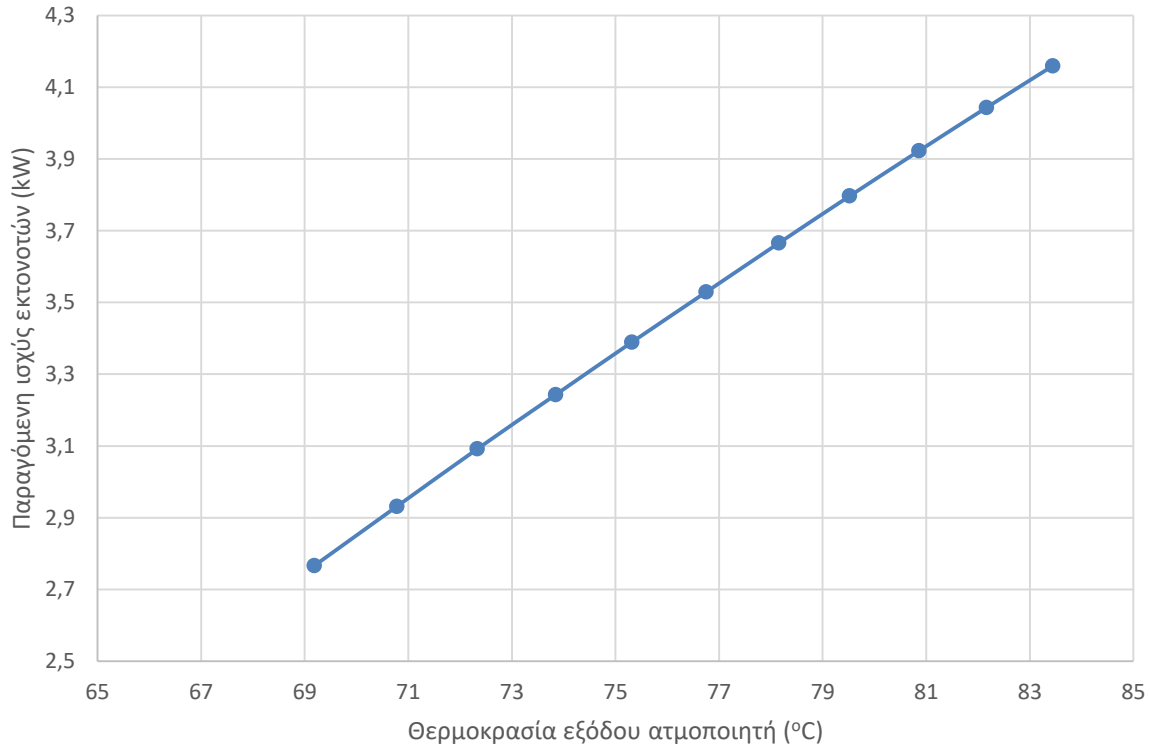


16,5	79,52	57,29	79,52	57,29	1,90	1,90	66,32	1,17	4,0%
17	80,86	57,63	80,86	57,63	1,96	1,96	66,60	1,23	4,0%
17,5	82,17	57,95	82,17	57,95	2,02	2,02	66,87	1,29	4,1%
18	83,45	58,25	83,45	58,25	2,08	2,08	67,13	1,35	4,2%

Με βάση τον Πίνακα 6 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή (TBTURB) με την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 26: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R227ea



Σχήμα 27: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R227ea

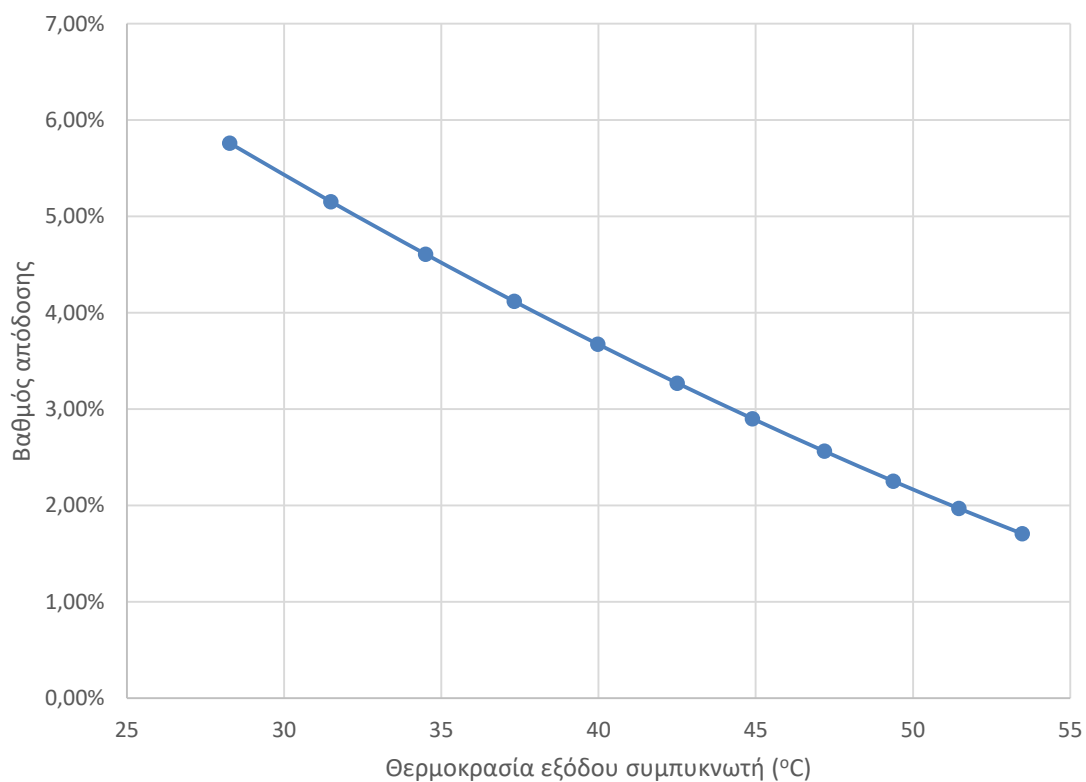
Για την ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την χαμηλή πίεση του κυκλώματος (και συνεπώς την θερμοκρασία συμπυκνώσεως) επιλέχθηκε εύρος πιέσεων 5-10 bar το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες συμπυκνώσεως 28,3-53,5 °C. Ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 7: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή για R227ea

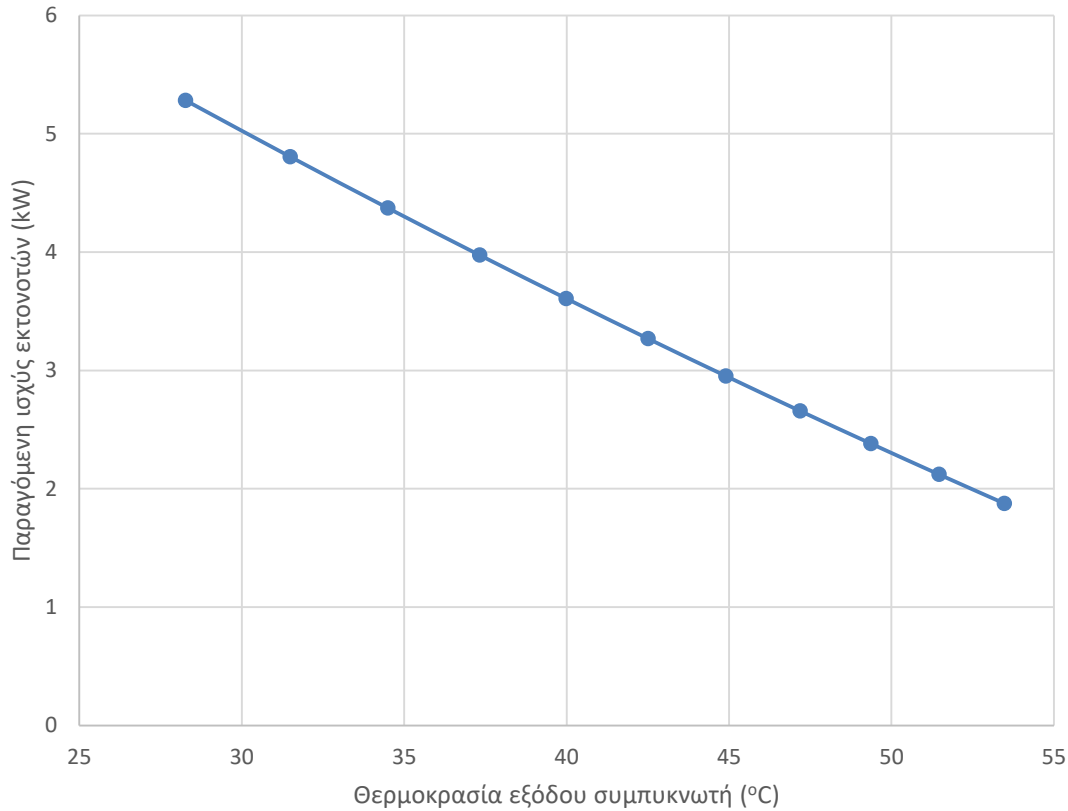
Pmin (bar)	T-OUTCOND (°C)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVPAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
5	28,27	85,00	60,54	85,00	60,54	2,64	2,64	70,43	1,23	5,8%
5,5	31,50	85,00	62,24	85,00	62,24	2,40	2,40	70,43	1,18	5,2%
6	34,50	85,00	63,85	85,00	63,85	-2,19	-2,19	-70,43	1,13	4,6%
6,5	37,32	85,00	65,36	85,00	65,36	1,99	1,99	70,43	1,07	4,1%
7	39,99	85,00	66,81	85,00	66,81	1,80	1,80	70,43	1,02	3,7%
7,5	42,51	85,00	68,19	85,00	68,19	1,63	1,63	70,43	0,97	3,3%
8	44,90	85,00	69,52	85,00	69,52	1,48	1,48	70,43	0,91	2,9%
8,5	47,19	85,00	70,80	85,00	70,80	1,33	1,33	70,43	0,85	2,6%
9	49,37	85,00	72,04	85,00	72,04	1,19	1,19	70,43	0,79	2,3%

9,5	51,47	85,00	73,25	85,00	73,25	1,06	1,06	70,43	0,73	2,0%
10	53,48	85,00	74,42	85,00	74,42	0,94	0,94	70,43	0,67	1,7%

Με βάση τον Πίνακα 7 Πίνακα 3 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή με την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 28: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R227ea



Σχήμα 29: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R227ea

### **3.6.4 R1234ze(E)**

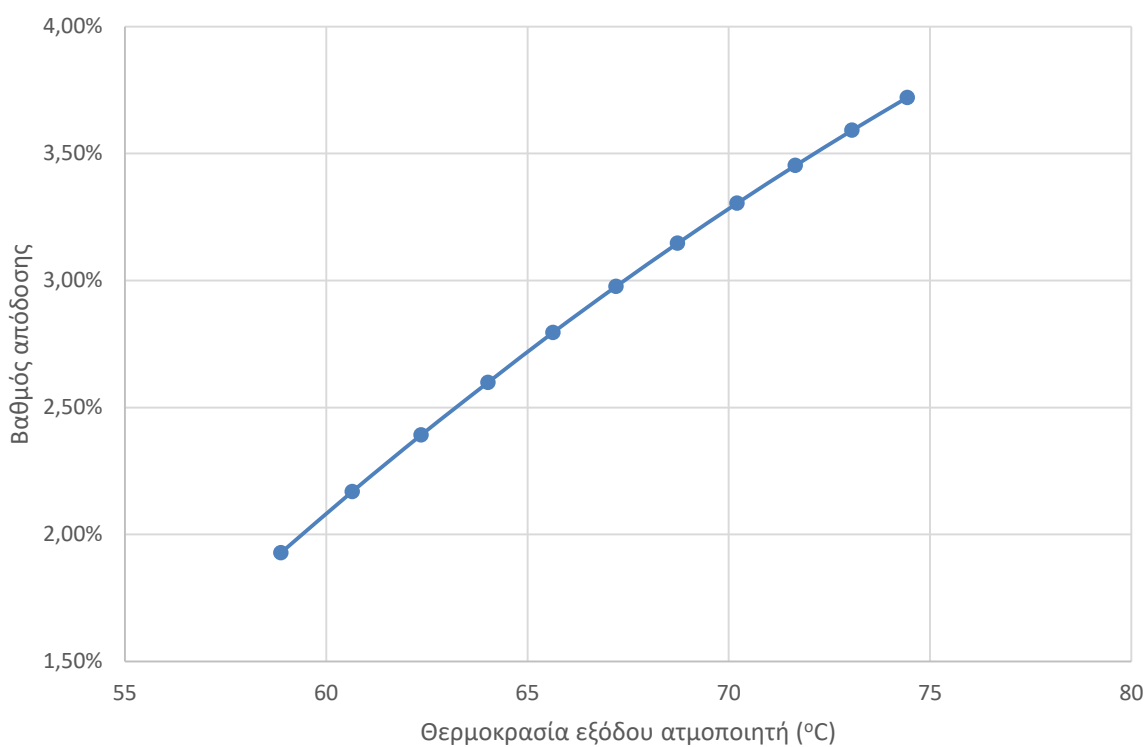
Το εύρος υψηλής πίεσης που επιλέχθηκε ήταν 11-16 bar, από το οποίο προέκυψαν θερμοκρασίες ατμοποίησης 58,9-74,4 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Θερμοκρασίες πριν και μετά τους εκτονωτές (T4, T5), ισχύς εκτονωτών, θερμική ισχύς ατμοποιητή, ισχύς αντλίας και βαθμός απόδοσης).

Πίνακας 8: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R1234ze

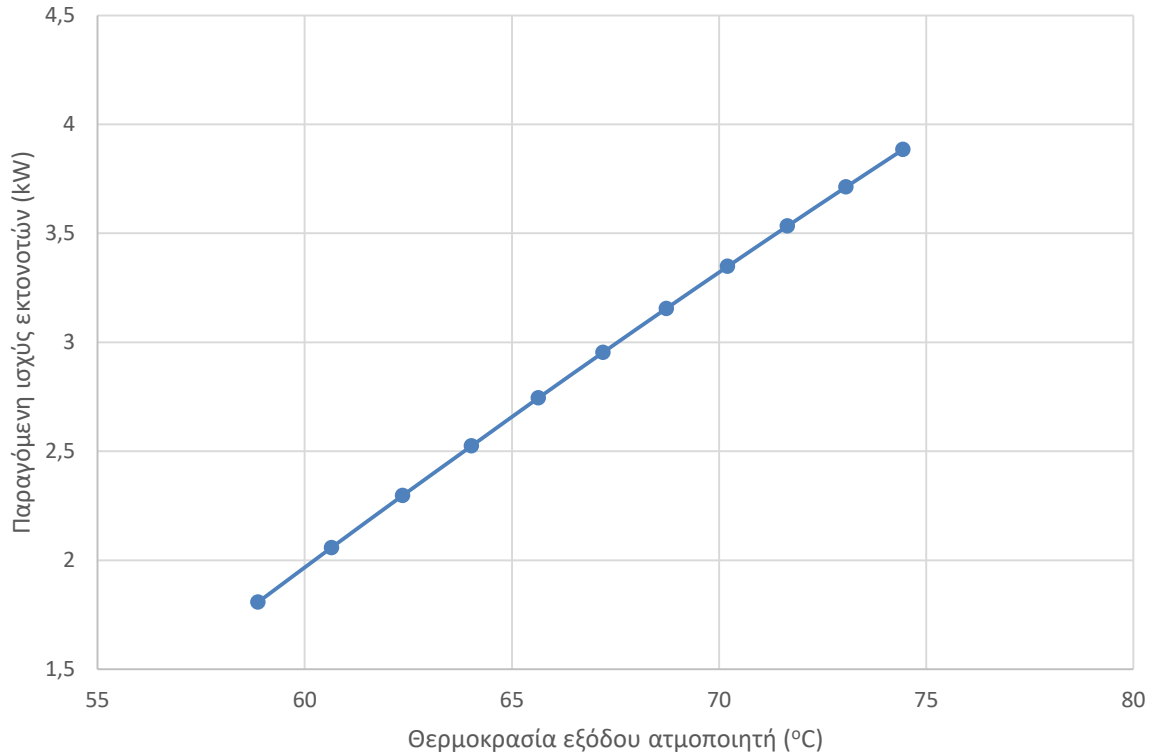
Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
11	58,88	49,60	58,88	49,60	0,90	0,90	74,72	0,37	1,9%
11,5	60,65	49,98	60,65	49,98	1,03	1,03	75,13	0,43	2,2%
12	62,36	50,34	62,36	50,34	1,15	1,15	75,52	0,49	2,4%
12,5	64,02	50,69	64,02	50,69	1,26	1,26	75,90	0,55	2,6%
13	65,64	51,00	65,64	51,00	1,37	1,37	76,25	0,61	2,8%

13,5	67,20	51,30	67,20	51,30	1,48	1,48	76,59	0,67	3,0%
14	68,73	51,58	68,73	51,58	1,58	1,58	76,91	0,74	3,1%
14,5	70,21	51,84	70,21	51,84	1,67	1,67	77,21	0,80	3,3%
15	71,65	52,08	71,65	52,08	1,77	1,77	77,50	0,86	3,5%
15,5	73,06	52,31	73,06	52,31	1,86	1,86	77,78	0,92	3,6%
16	74,44	52,51	74,44	52,51	1,94	1,94	78,04	0,98	3,7%

Με βάση τον Πίνακα 8 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή (TBTURB) με την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 30: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234ze



Σχήμα 31: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234ze

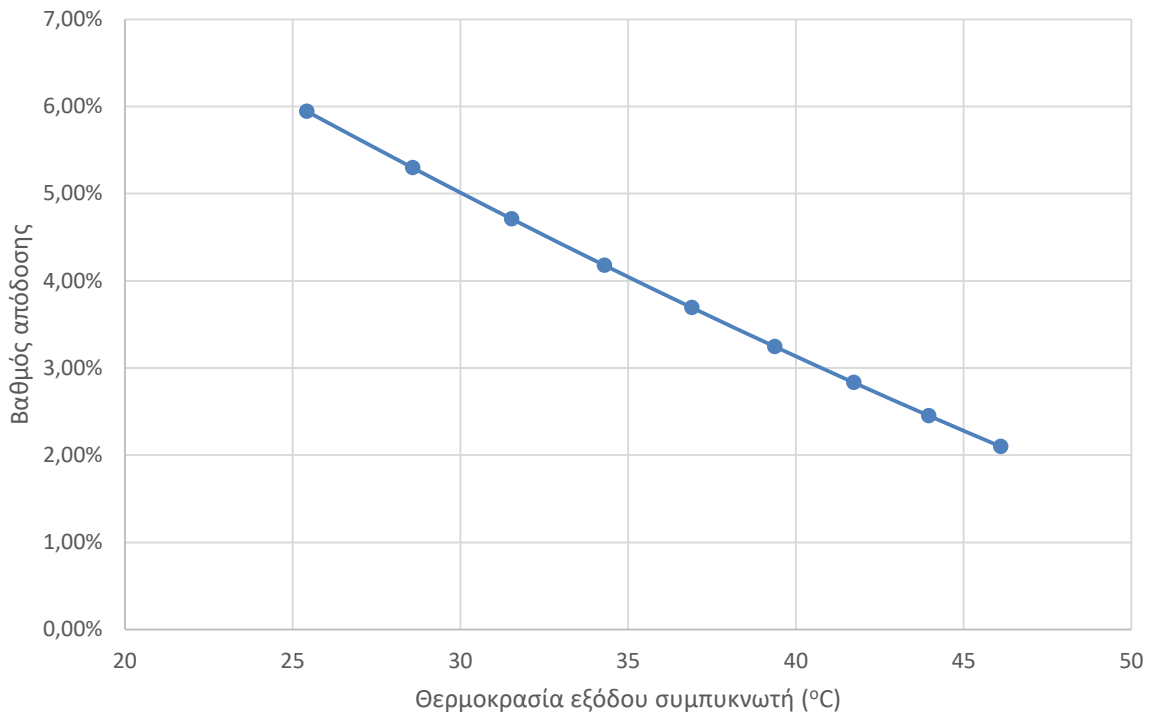
Για την ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την χαμηλή πίεση του κυκλώματος (και συνεπώς την θερμοκρασία συμπυκνώσεως) επιλέχθηκε εύρος πιέσεων 5-9 bar το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες συμπυκνώσεως 25,4-46,1 °C .Ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 9: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή για R1234ze

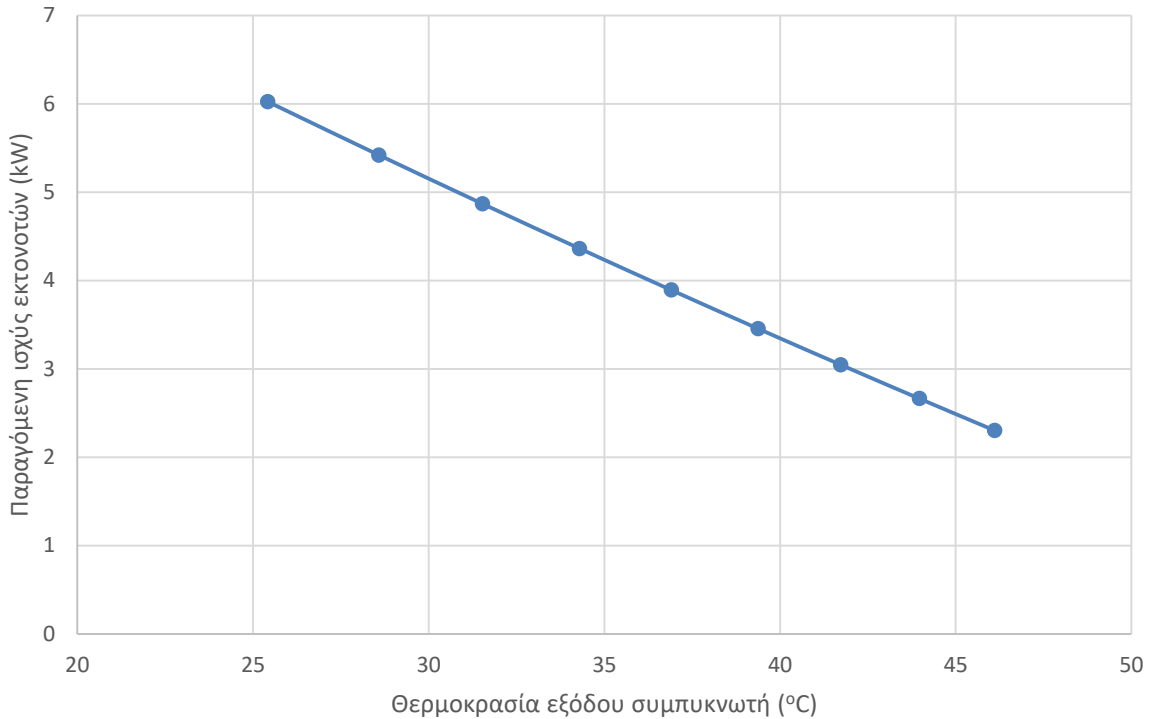
Pmin (bar)	T-OUTCOND (°C)	TBTURB 4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
5	25,42	85,00	59,90	85,00	59,90	3,01	3,01	85,00	0,97	5,9%
5,5	28,58	85,00	62,09	85,00	62,09	2,71	2,71	85,00	0,92	5,3%
6	31,53	85,00	64,13	85,00	64,13	2,43	2,43	85,00	0,86	4,7%
6,5	34,30	85,00	66,05	85,00	66,05	2,18	2,18	85,00	0,81	4,2%
7	36,91	85,00	67,86	85,00	67,86	1,95	1,95	85,00	0,75	3,7%
7,5	39,38	85,00	69,59	85,00	69,59	1,73	1,73	85,00	0,70	3,2%
8	41,73	85,00	71,25	85,00	71,25	1,52	1,52	85,00	0,64	2,8%
8,5	43,97	85,00	72,83	85,00	72,83	1,33	1,33	85,00	0,58	2,5%

9	46,11	85,00	74,35	85,00	74,35	1,15	1,15	85,00	0,52	2,1%
---	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	-------	------	------

Με βάση τον Πίνακα 9 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή με την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 32: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R1234ze



Σχήμα 33: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή για R1234ze

### 3.6.5 R1234yf

Το εύρος υψηλής πίεσης που επιλέχθηκε ήταν 11-16 bar, από το οποίο προέκυψαν θερμοκρασίες ατμοποίησης 48,1-63,8 °C. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Θερμοκρασίες πριν και μετά τους εκτονωτές (T4, T5), ισχύς εκτονωτών, θερμική ισχύς ατμοποιητή, ισχύς αντλίας και βαθμός απόδοσης).

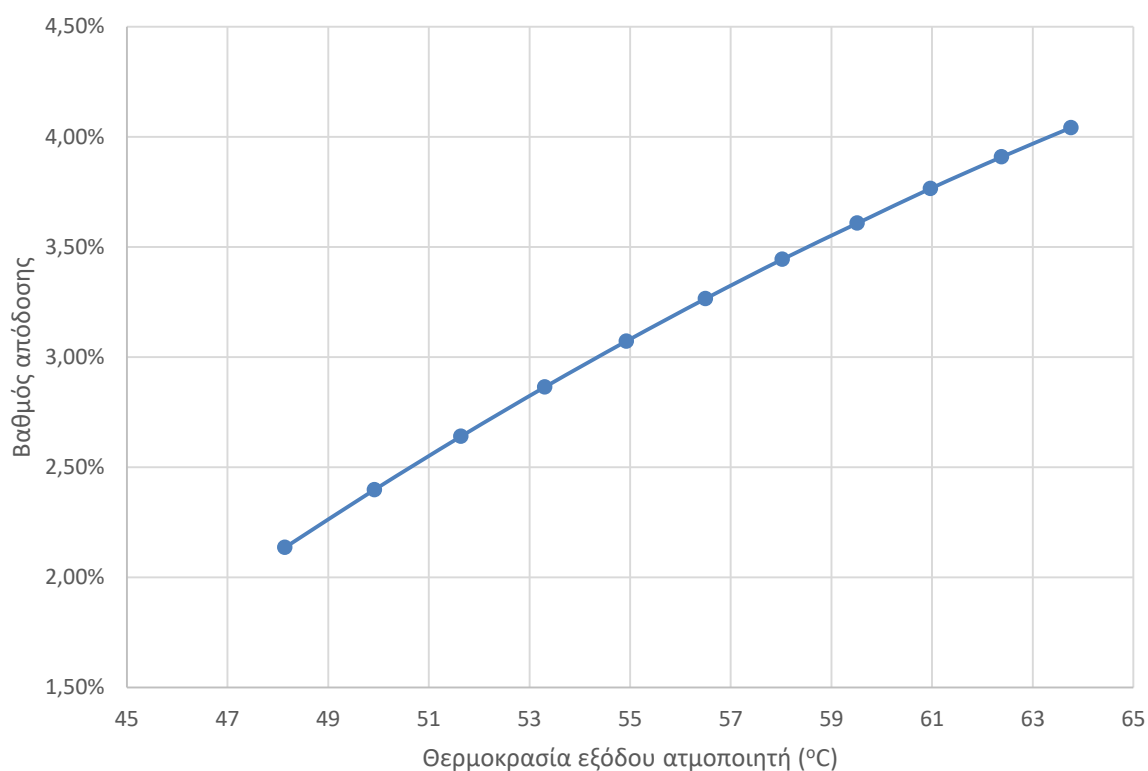
Πίνακας 10: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή (TBTURB) για R1234yf

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER 5 (kW)	QEVA (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
11	48,14	38,51	48,14	38,51	0,81	0,81	58,30	0,37	2,1%
11,5	49,92	38,85	49,92	38,85	0,92	0,92	58,66	0,43	2,4%
12	51,64	39,16	51,64	39,16	1,02	1,02	59,00	0,49	2,6%
12,5	53,31	39,46	53,31	39,46	1,13	1,13	59,32	0,55	2,9%
13	54,93	39,74	54,93	39,74	1,22	1,22	59,63	0,61	3,1%
13,5	56,50	39,99	56,50	39,99	1,32	1,32	59,92	0,68	3,3%

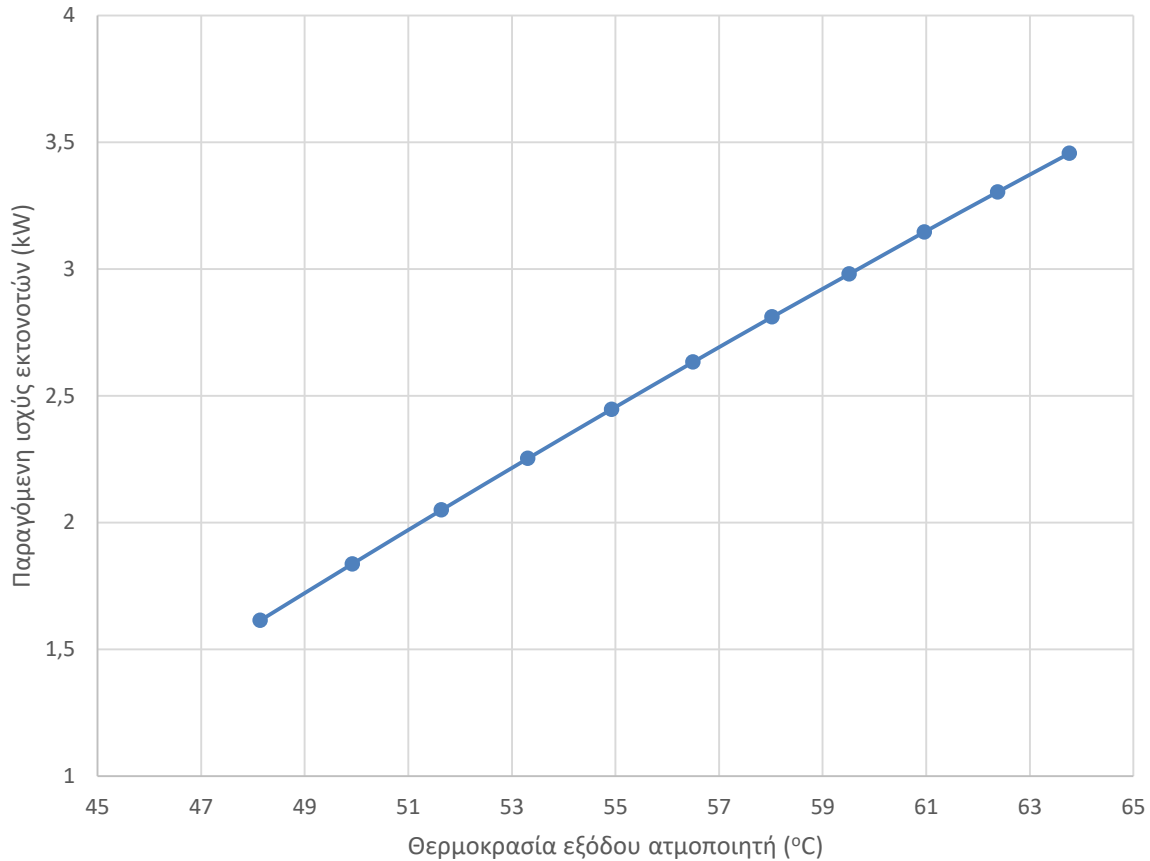


14	58,03	40,23	58,03	40,23	-1,41	-1,41	60,19	0,74	3,4%
14,5	59,52	40,45	59,52	40,45	1,49	1,49	60,46	0,80	3,6%
15	60,97	40,65	60,97	40,65	1,57	1,57	60,70	0,86	3,8%
15,5	62,38	40,83	62,38	40,83	1,65	1,65	60,94	0,92	3,9%
16	63,76	41,00	63,76	41,00	1,73	1,73	61,16	0,98	4,0%

Με βάση τον Πίνακα 10 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του ατμοποιητή (TBTURB) με την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 34: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234yf



Σχήμα 35: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή για R1234yf

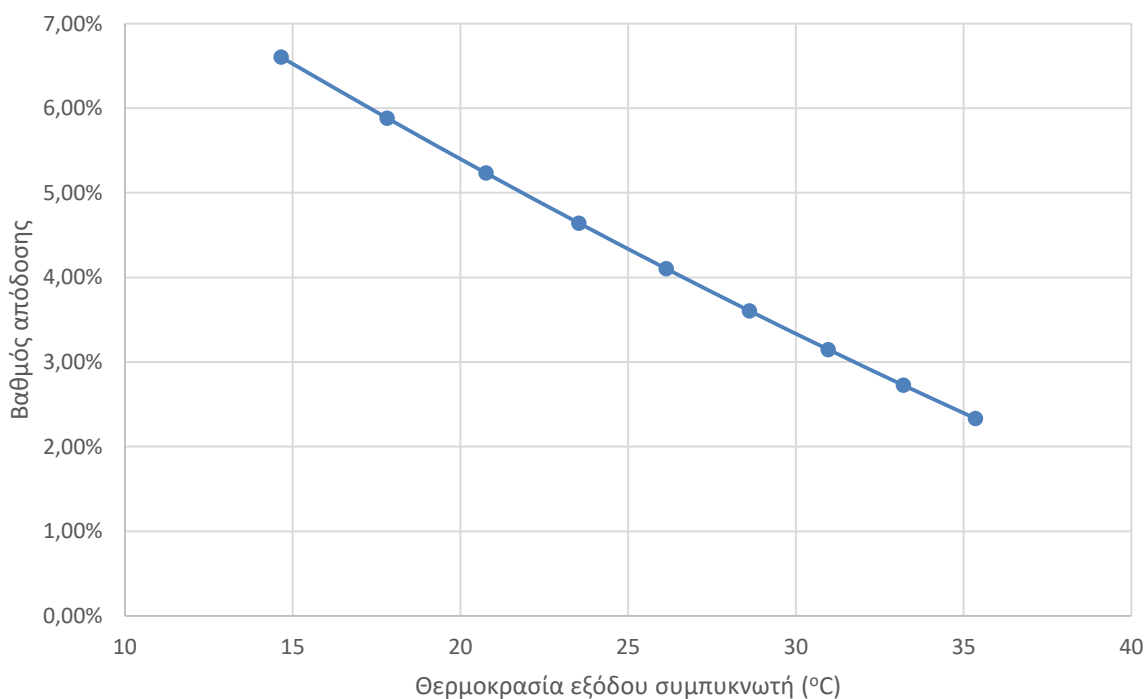
Για την ανάλυση ευαισθησίας με παράμετρο την χαμηλή πίεση του κυκλώματος (και συνεπώς την θερμοκρασία συμπυκνώσεως) επιλέχθηκε εύρος πιέσεων 5-9 bar το οποίο αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες συμπυκνώσεως 14,6-35,3 °C . Ακολουθεί πίνακας αποτελεσμάτων:

Πίνακας 11: Αποτελέσματα για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf

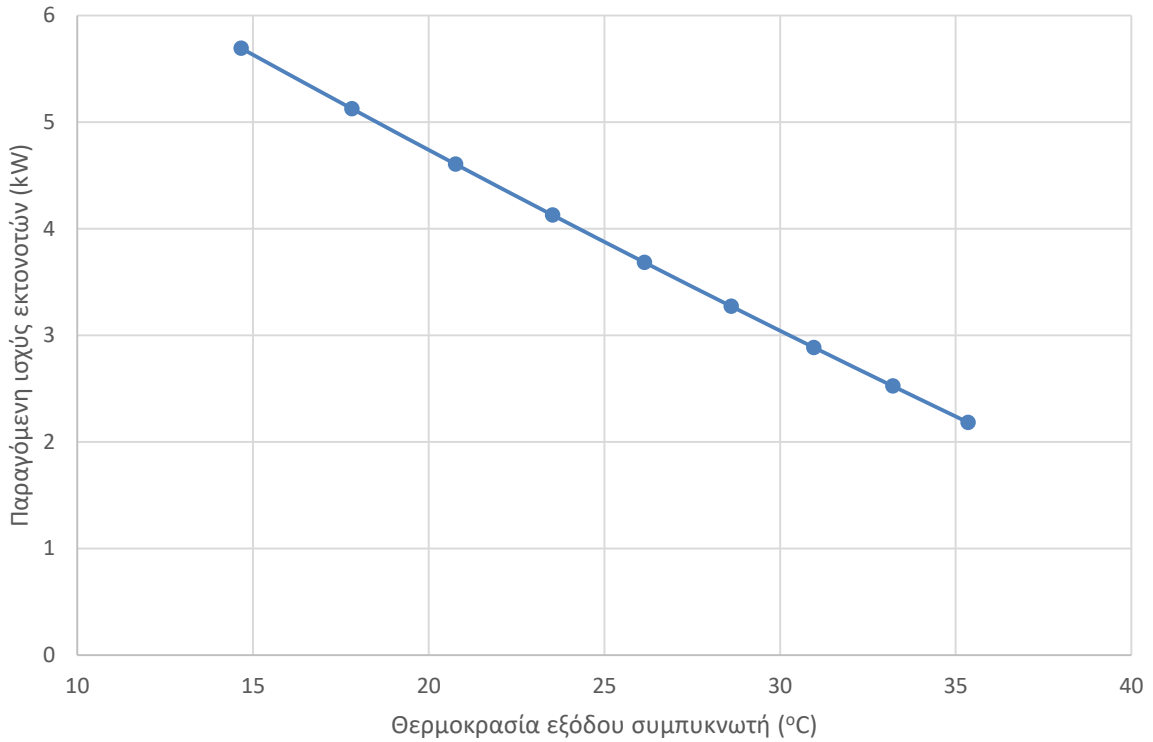
Pmin (bar)	T-OUTCOND (°C)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	POWER T4 (kW)	POWER T5 (kW)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
5	14,66	85,00	59,94	85,00	59,94	2,85	2,85	72,00	0,94	6,6%
5,5	17,82	85,00	62,15	85,00	62,15	2,56	2,56	72,00	0,89	5,9%
6	20,77	85,00	64,20	85,00	64,20	2,30	2,30	72,00	0,84	5,2%
6,5	23,53	85,00	66,14	85,00	66,14	2,06	2,06	72,00	0,78	4,6%
7	26,14	85,00	67,96	85,00	67,96	1,84	1,84	72,00	0,73	4,1%
7,5	28,62	85,00	69,70	85,00	69,70	1,64	1,64	72,00	0,68	3,6%
8	30,97	85,00	71,35	85,00	71,35	1,44	1,44	72,00	0,62	3,1%

8,5	33,21	85,00	72,93	85,00	72,93	1,26	1,26	72,00	0,56	2,7%
9	35,36	85,00	74,46	85,00	74,46	1,09	1,09	72,00	0,50	2,3%

Με βάση τον Πίνακα 11 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή με την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.



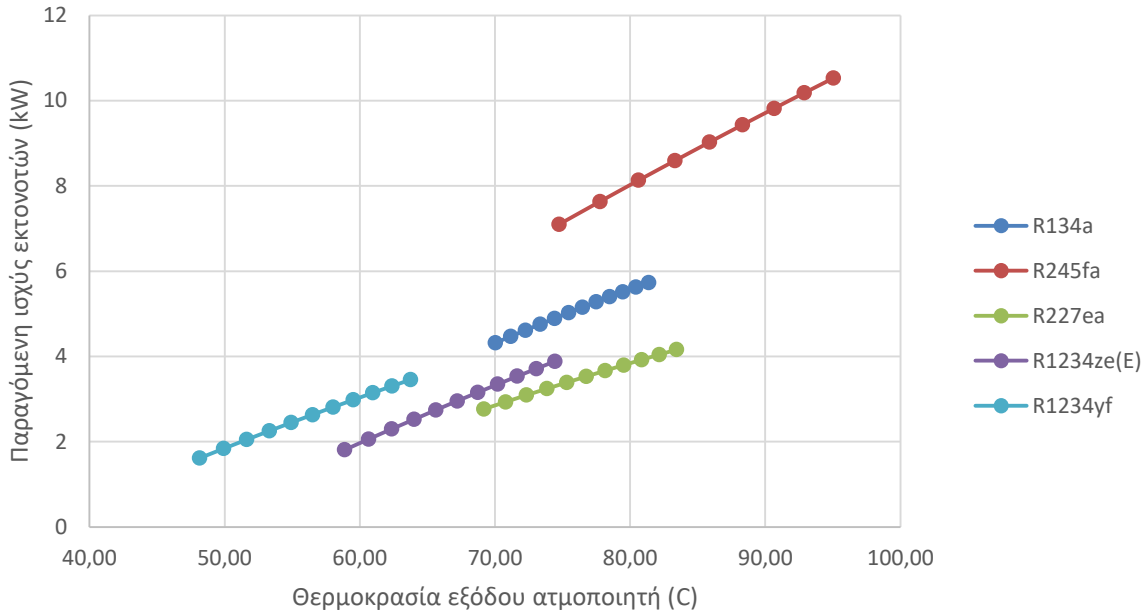
Σχήμα 36: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf



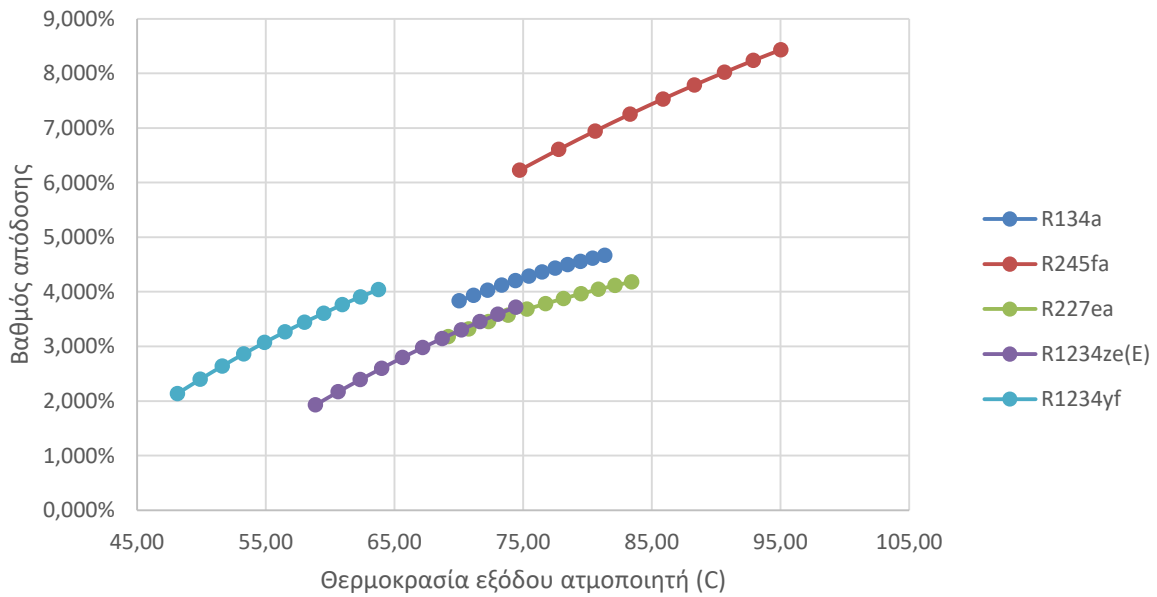
*Σχήμα 37: Παραγόμενη ισχύς εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου του συμπυκνωτή για R1234yf*

### **3.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα**

Παρακάτω παρουσιάζονται για όλα τα ρευστά, τα συγκεντρωτικά διαγράμματα παραγόμενης ισχύος και βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή, καθώς και τα αντίστοιχα συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή.

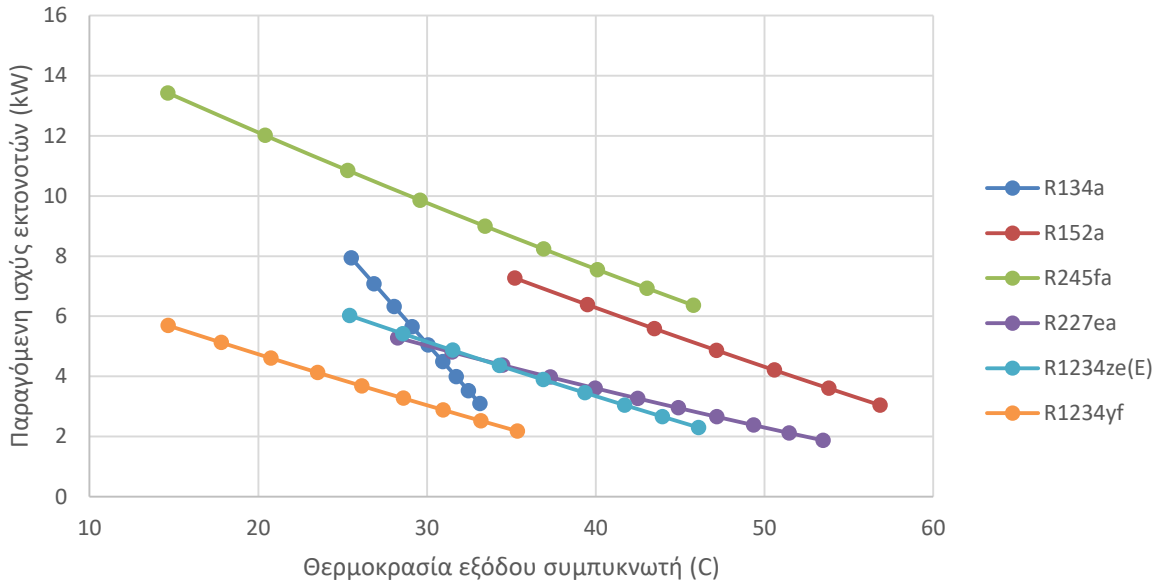


Σχήμα 38: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή

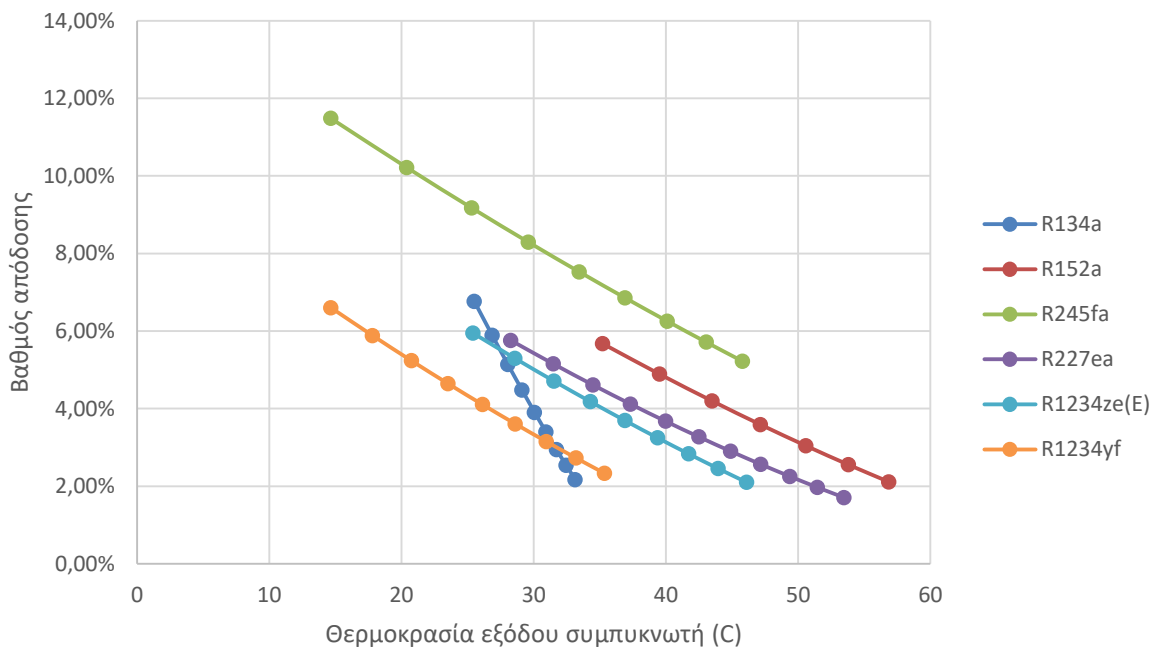


Σχήμα 39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου ατμοποιητή

Είναι εμφανές ότι το R245fa υπερέχει των υπόλοιπων ρευστών τόσο στο βαθμό απόδοσης όσο και στην παραγόμενη ισχύ που δίνει, για όλες τις θερμοκρασίες ατμοποίησης που λειτουργεί.



Σχήμα 40: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή



Σχήμα 41: Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εξόδου συμπυκνωτή

Είναι εμφανές ότι το R245fa υπερέχει των υπόλοιπων ρευστών τόσο στο βαθμό απόδοσης όσο και στην παραγόμενη ισχύ που δίνει, για όλες τις θερμοκρασίες συμπύκνωσης που λειτουργεί.

## **4.ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ ΜΕ ΜΙΓΜΑΤΑ**

Τα τελευταία χρόνια, η επιλογή εργαζόμενων μέσων για οργανικούς κύκλους Rankine εξετάζεται εκτενώς και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται ενδιαφέρον για τα πολυσυστατικά μίγματα λόγω των δυνατοτήτων τους να βελτιώσουν τη θερμοδυναμική απόδοση. Πολλοί ερευνητές έχουν διεξάγει μελέτες για να ανακαλύψουν και να ποσοτικοποιήσουν τα ωφέλη στην απόδοση που προσφέρουν τα μίγματα. Οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι τα μίγματα μπορούν να παρουσιάσουν αυξημένη θερμική συμβατότητα με την πηγή θερμότητας σε σχέση με τα μονοσυστατικά εργαζόμενα μέσα. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση των εξεργειακών απωλειών λόγω μετάδοσης θερμότητας και την αύξηση του θερμικού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης.[38]

### **4.1 Μεθοδολογία αντικατάστασης**

Επιλέχθηκαν πέντε δυαδικά μίγματα, τα οποία εξετάστηκαν για διάφορες μοριακές συστάσεις ως προς την παραγόμενη ισχύ και το βαθμό απόδοσης εγκατάστασης που προκύπτει. Τα μίγματα αυτά είναι τα R1234yf-R1234ze(E), R1234ze(E)-ισοβουτάνιο, R1234yf-ισοβουτάνιο, R1234ze(E)-προπάνιο, R1234yf-προπάνιο. Το ισοβουτάνιο ( $C_4H_{10}$ ) έχει κρίσιμη θερμοκρασία 134,5 °C και κρίσιμη πίεση 36,5 bar[39]. Το προπάνιο ( $C_3H_8$ ) έχει κρίσιμη θερμοκρασία 97 °C και κρίσιμη πίεση 42,5 bar[40]. Τα R1234yf και R1234ze(E) έχουν κρίσιμη θερμοκρασία 94,8 °C και 109,4 °C αντίστοιχα, καθώς και κρίσιμες πιέσεις 33,8 bar και 36,4 bar αντίστοιχα[41]. Με κριτήριο τις μικρές διαφορές σε κρίσιμες πιέσεις και θερμοκρασίες μεταξύ των παραπάνω ουσιών, έγινε η επιλογή των μιγμάτων. Για κάθε μίγμα εξετάστηκαν διάφορες μοριακές συστάσεις των περιεχομένων ουσιών του. Οι συστάσεις αυτές ήταν 0,2/0,8, 0,3/0,7, 0,8/0,2. Στην εκάστοτε σύσταση βρέθηκε η μικρότερη δυνατή “χαμηλή” πίεση του κυκλώματος με την οποία επιτυγχάνεται ομαλή λειτουργία της αντλίας (δηλαδή απουσία ατμώδους φάσης στην είσοδο της). Για λόγους συγκρισιμότητας οι θερμοκρασίες συμπυκνώσεως και ατμοποίησης κρατήθηκαν σταθερές στους 29 και 85 αντίστοιχα. Θέτοντας ως σταθερές την θερμοκρασία ατμοποίησης και συμπύκνωσης καθώς και την χαμηλή πίεση του κυκλώματος, ελέγχθηκαν διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης του κυκλώματος μέχρι και την υψηλότερη αποδεκτή. Σε κάθε περίπτωση καταγράφεται η παραγόμενη ισχύς εκτονωτών και ο βαθμός απόδοσης. Η μεγαλύτερη αποδεκτή υψηλή πίεση κυκλώματος πρέπει να δίνει πλήρως αέρια φάση στην είσοδο των εκτονωτών για την ομαλή λειτουργία τους.

### **4.2 Μίγμα R1234yf-R1234ze(E)**

Παρακάτω, για κάθε μοριακή σύσταση, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιλεγθείσες μικρότερες χαμηλές πιέσεις του κυκλώματος ORC, ώστε στους 29°C στην έξοδο του συμπυκνωτή (και είσοδο στην αντλία) να υπάρχει μόνο υγρή φάση.

Πίνακας 12: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος

Μοριακό κλάσμα R1234yf	Μοριακό κλάσμα R1234ze(E)	Χαμηλή πίεση κυκλώματος (bar)
0,2	0,8	6
0,3	0,7	7
0,4	0,6	7
0,5	0,5	7
0,6	0,4	7
0,7	0,3	7
0,8	0,2	8

Στη συνέχεια για κάθε σύσταση διερευνήθηκε, με δεδομένη χαμηλή πίεση του Πίνακας 12 η ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 13: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,2-0,8

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	52,14	85,00	52,14	78,99	1,47	6,1%	6,32
19	85	49,71	85,00	49,71	78,24	1,59	6,3%	6,52
20	85	47,22	85,00	47,22	77,43	1,72	6,4%	6,69
21	85	44,64	85,00	44,64	76,57	1,84	6,5%	6,82
22	85	41,93	85,00	41,93	75,62	1,96	6,6%	6,93
23	85	39,02	85,00	39,02	74,56	2,08	6,6%	7,00



Πίνακας 14: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,3-0,7

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	55,97	85,00	55,97	77,70	1,35	5,2%	5,39
19	85	53,57	85,00	53,57	76,97	1,47	5,4%	5,60
20	85	51,12	85,00	51,12	76,18	1,59	5,5%	5,78
21	85	48,58	85,00	48,58	75,33	1,72	5,6%	5,93
22	85	45,92	85,00	45,92	74,41	1,84	5,7%	6,04
23	85	43,09	85,00	43,09	73,39	1,96	5,7%	6,13

Πίνακας 15: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,4-0,6

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	56,02	85,00	56,02	76,44	1,35	5,3%	5,36
19	85	53,64	85,00	53,64	75,71	1,47	5,4%	5,57
20	85	51,20	85,00	51,20	74,95	1,59	5,5%	5,75
21	85	48,69	85,00	48,69	74,12	1,72	5,6%	5,90
22	85	46,07	85,00	46,07	73,23	1,84	5,7%	6,02
23	85	43,29	85,00	43,29	72,24	1,96	5,7%	6,11
		40,26	85,00	40,26	71,13	2,08	5,7%	6,17

Πίνακας 16: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,5-0,5

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	56,07	85,00	56,07	75,19	1,35	5,3%	5,34
19	85	53,70	85,00	53,70	74,48	1,47	5,5%	5,55
20	85	51,28	85,00	51,28	73,73	1,59	5,6%	5,73
21	85	48,80	85,00	48,80	72,93	1,72	5,7%	5,88
22	85	46,21	85,00	46,21	72,06	1,84	5,8%	6,00
23	85	43,47	85,00	43,47	71,11	1,96	5,8%	6,09

		40,52	85,00	40,52	70,04	2,08	5,8%	6,15
--	--	-------	-------	-------	-------	------	------	------

Πίνακας 17: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,6-0,4

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	56,12	85,00	56,12	73,96	1,35	5,4%	5,31
19	85	53,76	85,00	53,76	73,27	1,47	5,5%	5,52
20	85	51,36	85,00	51,36	72,54	1,59	5,7%	5,70
21	85	48,90	85,00	48,90	71,75	1,72	5,8%	5,86
22	85	46,34	85,00	46,34	70,91	1,84	5,8%	5,98
23	85	43,65	85,00	43,65	69,99	1,96	5,9%	6,08
		40,76	85,00	40,76	68,96	2,09	5,9%	6,14

Πίνακας 18: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,7-0,3

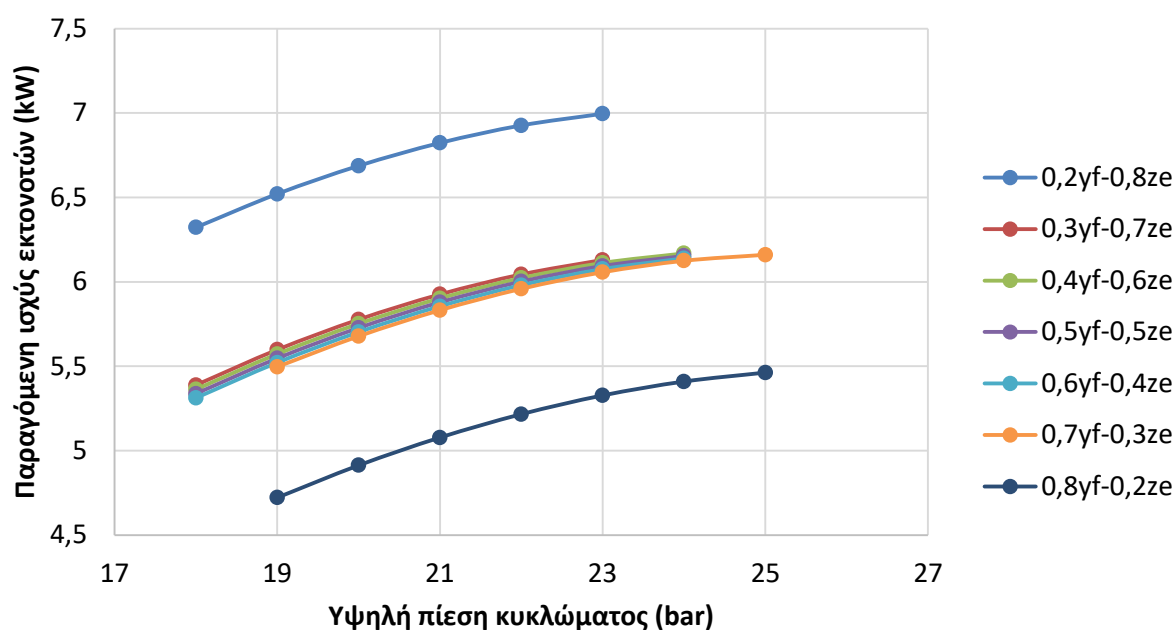
Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	53,82	85,00	53,82	72,07	1,47	5,6%	5,50
19	85	51,44	85,00	51,44	71,36	1,60	5,7%	5,68
20	85	49,00	85,00	49,00	70,60	1,72	5,8%	5,83
21	85	46,47	85,00	46,47	69,78	1,84	5,9%	5,96
22	85	43,82	85,00	43,82	68,88	1,96	5,9%	6,06
23	85	40,98	85,00	40,98	67,90	2,09	5,9%	6,12
		37,88	85,00	37,88	66,78	2,21	5,9%	6,16

Πίνακας 19: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-R1234ze(E) σύστασης 0,8-0,2

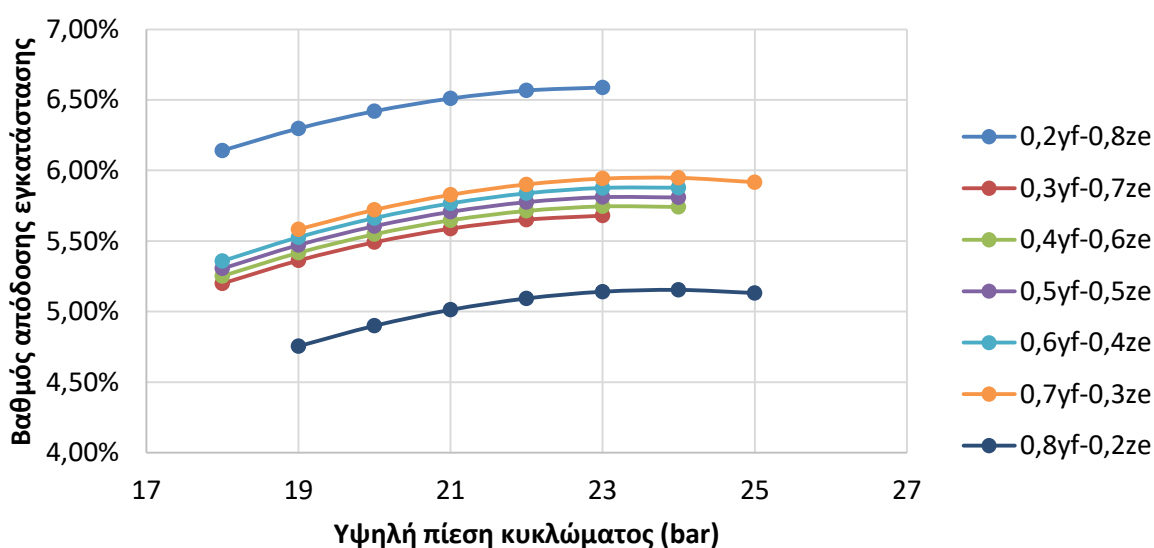
Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85	57,34	85,00	57,34	70,90	1,35	4,8%	4,72
19	85	54,99	85,00	54,99	70,20	1,47	4,9%	4,91
20	85	52,59	85,00	52,59	69,46	1,60	5,0%	5,08

21	85	50,11	85,00	50,11	68,66	1,72	5,1%	5,22
22	85	47,51	85,00	47,51	67,79	1,84	5,1%	5,33
23	85	44,76	85,00	44,76	66,84	1,96	5,2%	5,41
		41,76	85,00	41,76	65,77	2,09	5,1%	5,46

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα της ολικής ισχύος στροβίλων( εκτονωτών) και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για κάθε σύσταση συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος:



Σχήμα 42: Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-R1234ze(E)



Σχήμα 43: Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-R1234ze(E)

### 4.3 Μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου

Παρακάτω, για κάθε μοριακή σύσταση, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιλεχθείσες μικρότερες χαμηλές πιέσεις του κυκλώματος ORC, ώστε στους 29°C στην έξοδο του συμπυκνωτή (και είσοδο στην αντλία) να υπάρχει μόνο υγρή φάση.

Πίνακας 20: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος

Μοριακό κλάσμα R1234ze(E)	Μοριακό κλάσμα ισοβουτανίου	Χαμηλή πίεση κυκλώματος (bar)
0,8	0,2	6
0,7	0,3	6
0,6	0,4	5
0,5	0,5	5
0,4	0,6	5
0,3	0,7	5
0,2	0,8	5

Στη συνέχεια για κάθε σύσταση διερευνήθηκε, με δεδομένη χαμηλή πίεση του Πίνακας 20 η ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 21: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,8-0,2

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
16	85	56,49	85,00	56,49	81,71	1,23	5,6%	5,77
17	85	54,00	85,00	54,00	80,97	1,35	5,8%	6,02
18	85	51,48	85,00	51,48	80,18	1,47	5,9%	6,24
19	85	48,89	85,00	48,89	79,34	1,60	6,1%	6,42
20	85	46,18	85,00	46,18	78,42	1,72	6,2%	6,57

Πίνακας 22: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,7-0,3

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
16	85	58,80	85,00	58,80	81,73	1,11	5,3%	5,43
17	85	56,29	85,00	56,29	81,02	1,23	5,5%	5,71
18	85	53,77	85,00	53,77	80,26	1,35	5,7%	5,95
19	85	51,18	85,00	51,18	79,45	1,47	5,9%	6,17
20	85	48,51	85,00	48,51	78,57	1,60	6,0%	6,34

Πίνακας 23: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,6-0,4

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
14	85	56,91	85,00	56,91	81,75	1,11	6,2%	6,16
15	85	54,35	85,00	54,35	81,06	1,23	6,5%	6,47
16	85	51,79	85,00	51,79	80,32	1,35	6,7%	6,73
17	85	49,20	85,00	49,20	79,54	1,48	6,9%	6,95
18	85	46,54	85,00	46,54	78,70	1,60	7,0%	7,14

Πίνακας 24: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,5-0,5

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
14	85	56,76	85,00	56,76	81,08	1,11	6,2%	6,10
15	85	54,17	85,00	54,17	80,38	1,23	6,4%	6,40
16	85	51,57	85,00	51,57	79,63	1,36	6,7%	6,66
17	85	48,91	85,00	48,91	78,82	1,48	6,8%	6,88
18	85	46,18	85,00	46,18	77,95	1,60	7,0%	7,06

Πίνακας 25: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,4-0,6

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
13	85,00	59,25	85,00	59,25	81,10	0,99	5,8%	5,71
14	85,00	56,61	85,00	56,61	80,42	1,11	6,1%	6,04
15	85,00	53,98	85,00	53,98	79,70	1,24	6,4%	6,34
16	85,00	51,33	85,00	51,33	78,93	1,36	6,6%	6,59
17	85,00	48,61	85,00	48,61	78,10	1,48	6,8%	6,80

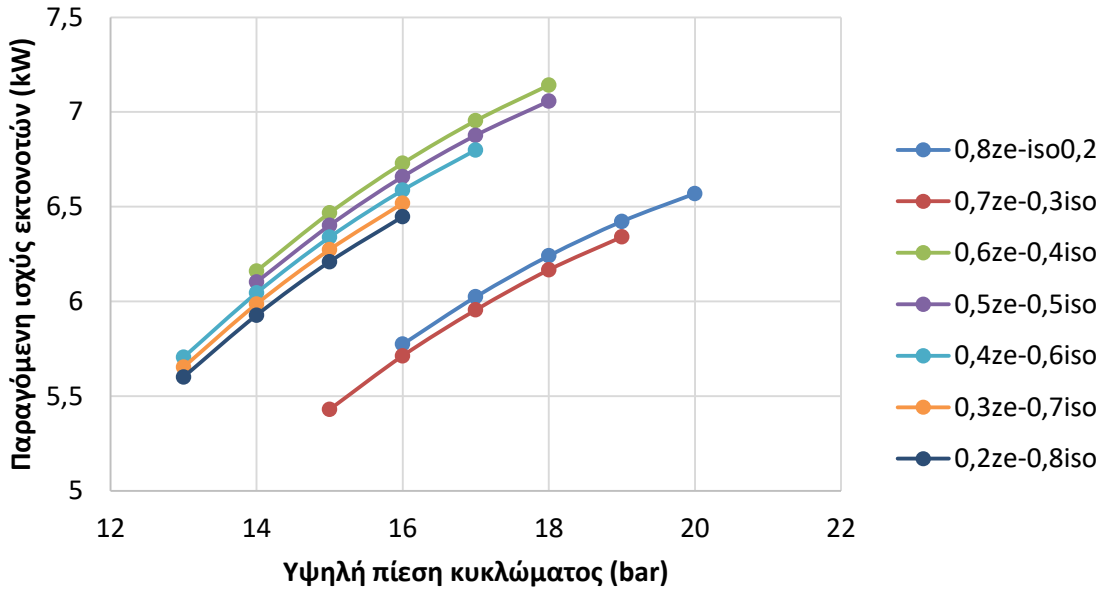
Πίνακας 26: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,3-0,7

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
13	85,00	59,13	85,00	59,13	80,45	0,99	5,8%	5,65
14	85,00	56,46	85,00	56,46	79,75	1,11	6,1%	5,99
15	85,00	53,79	85,00	53,79	79,02	1,24	6,4%	6,27
16	85,00	51,08	85,00	51,08	78,22	1,36	6,6%	6,52

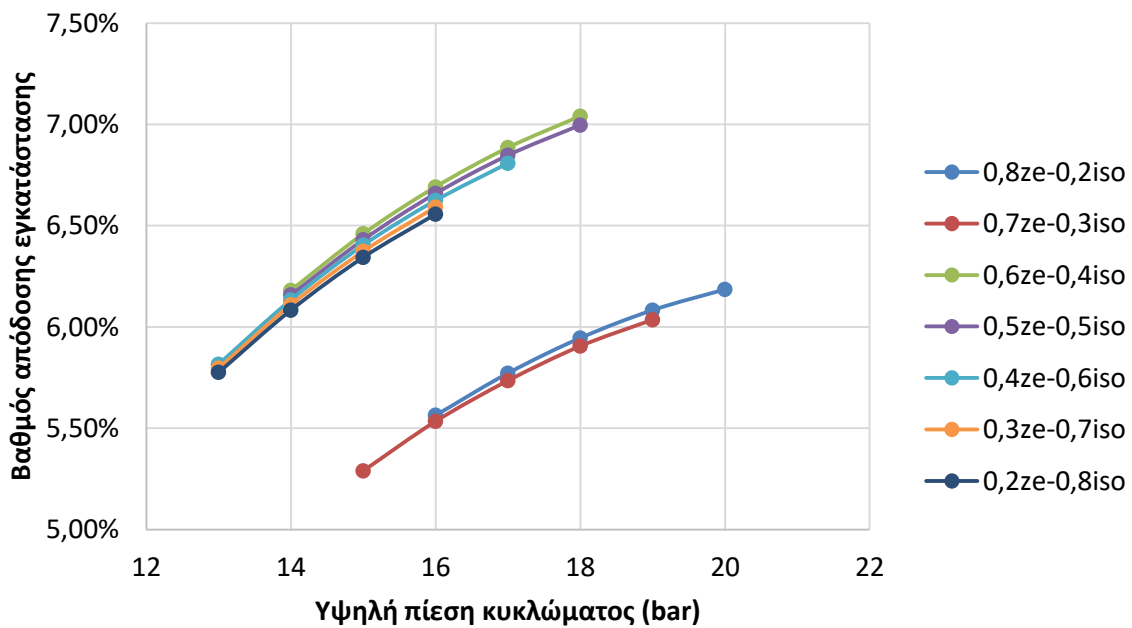
Πίνακας 27: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,2-0,8

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
13	85,00	59,00	85,00	59,00	79,80	0,99	5,8%	5,60
14	85,00	56,30	85,00	56,30	79,09	1,12	6,1%	5,93
15	85,00	53,58	85,00	53,58	78,33	1,24	6,3%	6,21
16	85,00	50,82	85,00	50,82	77,52	1,36	6,6%	6,45

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα της ολικής ισχύος στροβίλων (εκτονωτών) και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για κάθε σύσταση συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος:



Σχήμα 44: Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-ισοβουτανίου



Σχήμα 45: Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-ισοβουτανίου

#### 4.4 Μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου

Παρακάτω, για κάθε μοριακή σύσταση, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιλεγθείσες μικρότερες χαμηλές πιέσεις του κυκλώματος ORC, ώστε στους 29°C στην έξοδο του συμπυκνωτή (και είσοδο στην αντλία) να υπάρχει μόνο υγρή φάση.

Πίνακας 28: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος

Μοριακό κλάσμα R1234yf	Μοριακό κλάσμα ισοβουτανίου	Χαμηλή πίεση κυκλώματος (bar)
0,8	0,2	7
0,7	0,3	7
0,6	0,4	7
0,5	0,5	6
0,4	0,6	6
0,3	0,7	5
0,2	0,8	5

Στη συνέχεια για κάθε σύσταση διερευνήθηκε, με δεδομένη χαμηλή πίεση του Πίνακας 28 η ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 29: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,8-0,2

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
18	85,00	55,76	85,00	55,76	70,46	1,35	5,4%
19	85,00	53,32	85,00	53,32	69,76	1,47	5,5%
20	85,00	50,83	85,00	50,83	69,01	1,60	5,7%
21	85,00	48,25	85,00	48,25	68,20	1,72	5,8%
22	85,00	45,55	85,00	45,55	67,32	1,84	5,8%
23	85,00	42,66	85,00	42,66	66,34	1,96	5,8%
24	85,00	39,48	85,00	39,48	65,23	2,09	5,8%



Πίνακας 30: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,7-0,3

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
16	85,00	60,34	85,00	60,34	72,39	1,10	4,9%
17	85,00	57,91	85,00	57,91	71,73	1,23	5,1%
18	85,00	55,45	85,00	55,45	71,03	1,35	5,3%
19	85,00	52,94	85,00	52,94	70,29	1,47	5,4%
20	85,00	50,36	85,00	50,36	69,49	1,60	5,6%
21	85,00	47,65	85,00	47,65	68,62	1,72	5,6%
22	85,00	44,77	85,00	44,77	67,65	1,84	5,7%

Πίνακας 31: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,6-0,4

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
16	85,00	60,14	85,00	60,14	72,99	1,11	4,8%
17	85,00	57,66	85,00	57,66	72,30	1,23	5,0%
18	85,00	55,13	85,00	55,13	71,57	1,35	5,2%
19	85,00	52,53	85,00	52,53	70,78	1,47	5,3%
20	85,00	49,83	85,00	49,83	69,92	1,60	5,5%
21	85,00	46,97	85,00	46,97	68,98	1,72	5,5%

Πίνακας 32: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,5-0,5

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
15	85,00	58,62	85,00	58,62	74,25	1,11	5,5%
16	85,00	56,08	85,00	56,08	73,57	1,23	5,7%
17	85,00	53,51	85,00	53,51	72,85	1,35	6,0%
18	85,00	50,89	85,00	50,89	72,07	1,48	6,1%
19	85,00	48,17	85,00	48,17	71,23	1,60	6,2%

Πίνακας 33: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,4-0,6

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
15	85,00	58,43	85,00	58,43	74,84	1,11	5,4%
16	85,00	55,83	85,00	55,83	74,13	1,23	5,7%
17	85,00	53,20	85,00	53,20	73,37	1,36	5,9%
18	85,00	50,49	85,00	50,49	72,54	1,48	6,0%

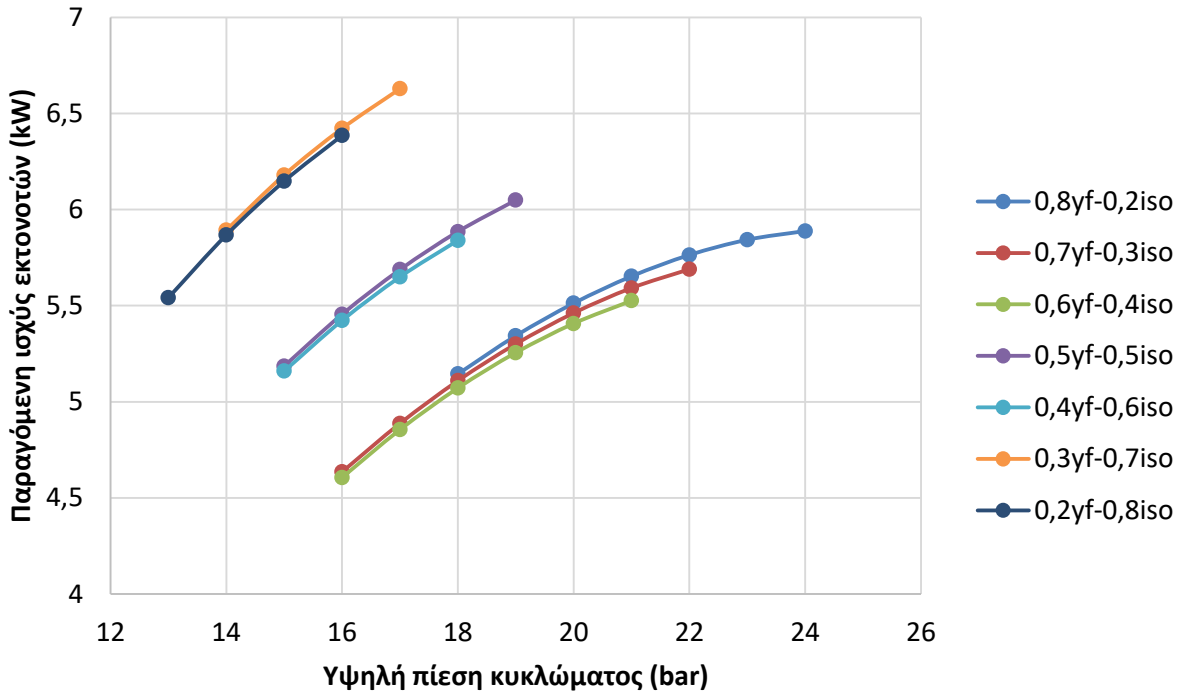
Πίνακας 34: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,3-0,7

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
14	85,00	56,52	85,00	56,52	76,10	1,11	6,3%
15	85,00	53,87	85,00	53,87	75,40	1,23	6,6%
16	85,00	51,21	85,00	51,21	74,66	1,36	6,8%
17	85,00	48,48	85,00	48,48	73,85	1,48	7,0%

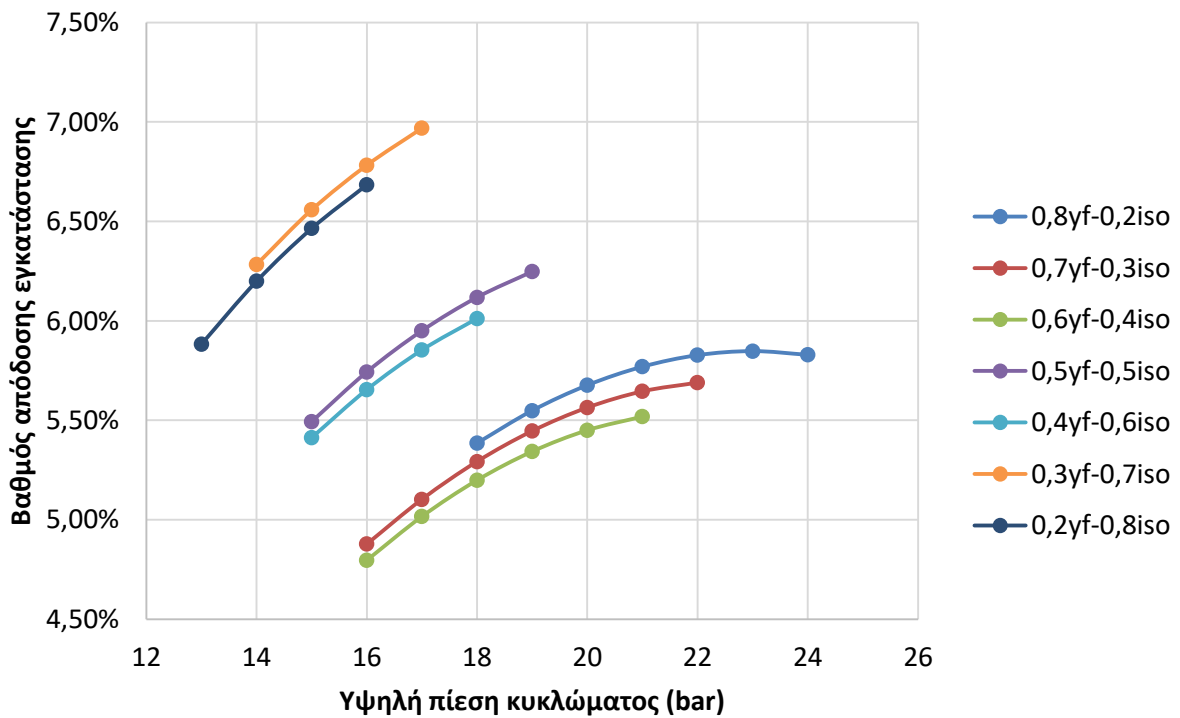
Πίνακας 35: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου σύστασης 0,2-0,8

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης
13	85,00	59,03	85,00	59,03	77,36	0,99	5,9%
14	85,00	56,34	85,00	56,34	76,67	1,11	6,2%
15	85,00	53,65	85,00	53,65	75,94	1,24	6,5%
16	85,00	50,91	85,00	50,91	75,16	1,36	6,7%

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα της ολικής ισχύος στροβίλων( εκτονωτών) και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για κάθε σύσταση συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος:



Σχήμα 46: Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-ισοβουτανίου



Σχήμα 47: Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-ισοβουτανίου

## 4.5 Μίγμα R1234ze(E)-προπανίου

Παρακάτω, για κάθε μοριακή σύσταση, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιλεγθείσες μικρότερες χαμηλές πιέσεις του κυκλώματος ORC, ώστε στους 29°C στην έξοδο του συμπυκνωτή(και είσοδο στην αντλία) να υπάρχει μόνο υγρή φάση.

Πίνακας 36: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος

Μοριακό κλάσμα R1234ze(E)	Μοριακό κλάσμα προπανίου	Χαμηλή πίεση κυκλώματος (bar)
0,8	0,2	7
0,7	0,3	7
0,6	0,4	8
0,5	0,5	8
0,4	0,6	9
0,3	0,7	9
0,2	0,8	10

Στη συνέχεια για κάθε σύσταση διερευνήθηκε, με δεδομένη χαμηλή πίεση του Πίνακας 36 η ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 37: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,8-0,2

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85,00	55,56	85,00	55,56	80,28	1,36	5,4%	5,67
19	85,00	53,18	85,00	53,18	79,57	1,48	5,5%	5,90
20	85,00	50,77	85,00	50,77	78,82	1,60	5,7%	6,09
21	85,00	48,30	85,00	48,30	78,02	1,73	5,8%	6,26
22	85,00	45,74	85,00	45,74	77,16	1,85	5,9%	6,39
23	85,00	43,06	85,00	43,06	76,22	1,97	5,9%	6,50

Πίνακας 38: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,7-0,3

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
18	85,00	55,37	85,00	55,37	79,55	1,36	5,5%	5,77
19	85,00	53,02	85,00	53,02	78,88	1,49	5,7%	6,01
20	85,00	50,65	85,00	50,65	78,17	1,61	5,9%	6,21
21	85,00	48,24	85,00	48,24	77,42	1,73	6,0%	6,39
22	85,00	45,76	85,00	45,76	76,62	1,86	6,1%	6,53
23	85,00	43,18	85,00	43,18	75,75	1,98	6,2%	6,65

Πίνακας 39: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,6-0,4

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
19	85,00	56,44	85,00	56,44	78,15	1,37	5,0%	5,29
20	85,00	54,12	85,00	54,12	77,48	1,49	5,2%	5,51
21	85,00	51,76	85,00	51,76	76,77	1,61	5,3%	5,70
22	85,00	49,35	85,00	49,35	76,02	1,74	5,4%	5,87
23	85,00	46,87	85,00	46,87	75,21	1,86	5,5%	6,01
24	85,00	44,29	85,00	44,29	74,34	1,99	5,6%	6,13

Πίνακας 40: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,5-0,5

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
19	85,00	56,25	85,00	56,25	77,38	1,37	5,2%	5,39
20	85,00	53,95	85,00	53,95	76,75	1,49	5,4%	5,62
21	85,00	51,62	85,00	51,62	76,08	1,62	5,5%	5,82
22	85,00	49,26	85,00	49,26	75,37	1,74	5,6%	6,00
23	85,00	46,85	85,00	46,85	74,62	1,87	5,7%	6,15
24	85,00	44,36	85,00	44,36	73,82	1,99	5,8%	6,27

Πίνακας 41: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,4-0,6

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
20	85,00	57,16	85,00	57,16	75,97	1,37	4,7%	4,98
21	85,00	54,88	85,00	54,88	75,34	1,50	4,9%	5,20
22	85,00	52,57	85,00	52,57	74,68	1,62	5,0%	5,39
23	85,00	50,23	85,00	50,23	73,97	1,75	5,2%	5,56
24	85,00	47,82	85,00	47,82	73,23	1,87	5,2%	5,71
25	85,00	45,34	85,00	45,34	72,43	2,00	5,3%	5,83

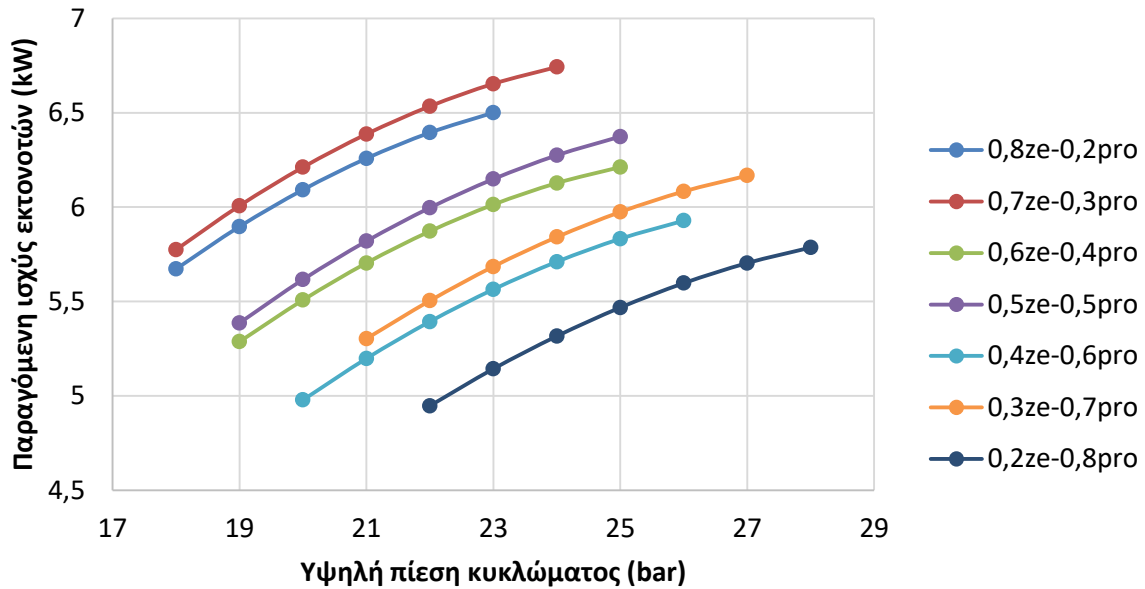
Πίνακας 42: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,3-0,7

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
21	85,00	54,68	85,00	54,68	74,56	1,50	5,1%	5,30
22	85,00	52,41	85,00	52,41	73,94	1,63	5,2%	5,50
23	85,00	50,10	85,00	50,10	73,28	1,75	5,4%	5,69
24	85,00	47,76	85,00	47,76	72,58	1,88	5,5%	5,84
25	85,00	45,35	85,00	45,35	71,84	2,00	5,5%	5,97
26	85,00	42,86	85,00	42,86	71,05	2,13	5,6%	6,08

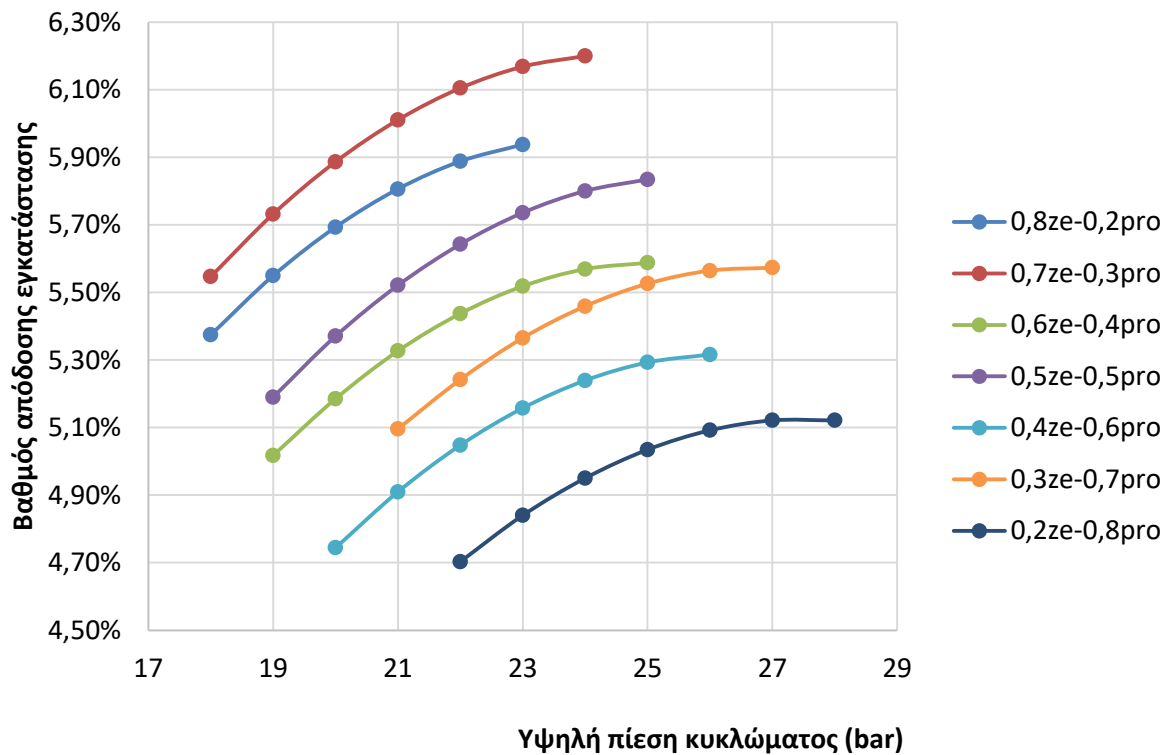
Πίνακας 43: Αποτελέσματα για μίγμα R1234ze(E)-προπανίου σύστασης 0,2-0,8

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	55,49	85,00	55,49	73,15	1,51	4,7%	4,95
23	85,00	53,23	85,00	53,23	72,53	1,63	4,8%	5,14
24	85,00	50,95	85,00	50,95	71,88	1,76	5,0%	5,32
25	85,00	48,61	85,00	48,61	71,19	1,88	5,0%	5,47
26	85,00	46,22	85,00	46,22	70,46	2,01	5,1%	5,60
27	85,00	43,75	85,00	43,75	69,68	2,14	5,1%	5,70

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα της ολικής ισχύος στροβίλων( εκτονωτών) και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για κάθε σύσταση συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος:



Σχήμα 48: Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-προπανίου



Σχήμα 49: Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234ze(E)-προπανίου

## 4.6 Μίγμα R1234yf-προπανίου

Παρακάτω, για κάθε μοριακή σύσταση, παρουσιάζεται ο πίνακας με τις επιλεγθείσες μικρότερες χαμηλές πιέσεις του κυκλώματος ORC, ώστε στους 29°C στην έξοδο του συμπυκνωτή(και είσοδο στην αντλία) να υπάρχει μόνο υγρή φάση.

*Πίνακας 44: Χαμηλές πιέσεις κυκλώματος ORC για την εκάστοτε σύσταση μίγματος*

Μοριακό κλάσμα R1234yf	Μοριακό κλάσμα προπανίου	Χαμηλή πίεση κυκλώματος (bar)
0,8	0,2	9
0,7	0,3	9
0,6	0,4	9
0,5	0,5	10
0,4	0,6	10
0,3	0,7	10
0,2	0,8	10

Στη συνέχεια για κάθε σύσταση διερευνήθηκε, με δεδομένη χαμηλή πίεση του Πίνακας 36 η ανταπόκριση του συστήματος σε διάφορες τιμές της υψηλής πίεσης. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα:

*Πίνακας 45: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,8-0,2*

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
20	85,00	58,12	85,00	58,12	68,74	1,36	4,5%	4,43
21	85,00	55,83	85,00	55,83	68,08	1,49	4,6%	4,62
22	85,00	53,49	85,00	53,49	67,39	1,61	4,7%	4,79
23	85,00	51,10	85,00	51,10	66,65	1,73	4,8%	4,93
24	85,00	48,61	85,00	48,61	65,85	1,86	4,8%	5,05
25	85,00	46,00	85,00	46,00	64,99	1,98	4,9%	5,14
26	85,00	43,21	85,00	43,21	64,04	2,11	4,8%	5,21
27	85,00	40,18	85,00	40,18	62,96	2,23	4,8%	5,24



Πίνακας 46: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,7-0,3

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
20	85,00	57,97	85,00	57,97	69,16	1,37	4,6%	4,54
21	85,00	55,69	85,00	55,69	68,52	1,49	4,7%	4,74
22	85,00	53,39	85,00	53,39	67,86	1,62	4,9%	4,91
23	85,00	51,03	85,00	51,03	67,15	1,74	4,9%	5,06
24	85,00	48,60	85,00	48,60	66,39	1,86	5,0%	5,19
25	85,00	46,07	85,00	46,07	65,57	1,99	5,0%	5,29
26	85,00	43,40	85,00	43,40	64,68	2,11	5,0%	5,36
27	85,00	40,52	85,00	40,52	63,69	2,24	5,0%	5,42

Πίνακας 47: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,6-0,4

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	53,25	85,00	53,25	68,33	1,62	5,0%	5,03
23	85,00	50,92	85,00	50,92	67,65	1,74	5,1%	5,19
24	85,00	48,54	85,00	48,54	66,92	1,87	5,2%	5,33
25	85,00	46,07	85,00	46,07	66,15	1,99	5,2%	5,44
26	85,00	43,49	85,00	43,49	65,31	2,12	5,2%	5,53
27	85,00	40,75	85,00	40,75	64,39	2,24	5,2%	5,59
28	85,00	37,78	85,00	37,78	63,36	2,37	5,1%	5,62

Πίνακας 48: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,5-0,5

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	56,24	85,00	56,24	68,81	1,50	4,4%	4,54
23	85,00	53,97	85,00	53,97	68,16	1,62	4,5%	4,71
24	85,00	51,64	85,00	51,64	67,46	1,75	4,6%	4,86
25	85,00	49,24	85,00	49,24	66,72	1,87	4,7%	4,99

26	85,00	46,76	85,00	46,76	65,93	2,00	4,7%	5,10
27	85,00	44,15	85,00	44,15	65,07	2,12	4,7%	5,18
28	85,00	41,36	85,00	41,36	64,12	2,25	4,7%	5,24

Πίνακας 49: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,4-0,6

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	56,07	85,00	56,07	69,30	1,50	4,5%	4,65
23	85,00	53,81	85,00	53,81	68,67	1,63	4,7%	4,84
24	85,00	51,51	85,00	51,51	68,01	1,75	4,8%	5,00
25	85,00	49,16	85,00	49,16	67,30	1,88	4,8%	5,13
26	85,00	46,73	85,00	46,73	66,55	2,00	4,9%	5,25
27	85,00	44,20	85,00	44,20	65,74	2,13	4,9%	5,34
28	85,00	41,53	85,00	41,53	64,85	2,26	4,9%	5,41

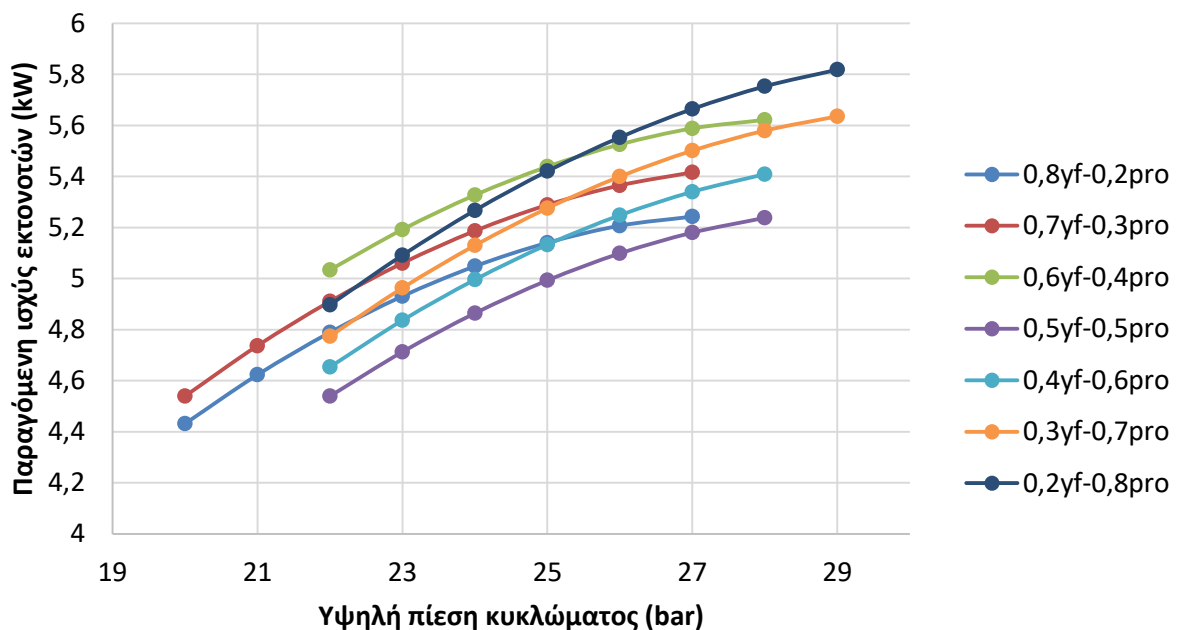
Πίνακας 50: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,3-0,7

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	55,85	85,00	55,85	69,81	1,51	4,7%	4,77
23	85,00	53,61	85,00	53,61	69,20	1,63	4,8%	4,96
24	85,00	51,34	85,00	51,34	68,56	1,76	4,9%	5,13
25	85,00	49,02	85,00	49,02	67,89	1,88	5,0%	5,28
26	85,00	46,64	85,00	46,64	67,17	2,01	5,0%	5,40
27	85,00	44,18	85,00	44,18	66,40	2,13	5,1%	5,50
28	85,00	41,61	85,00	41,61	65,57	2,26	5,1%	5,58
29	85,00	38,87	85,00	38,87	64,67	2,39	5,0%	5,64

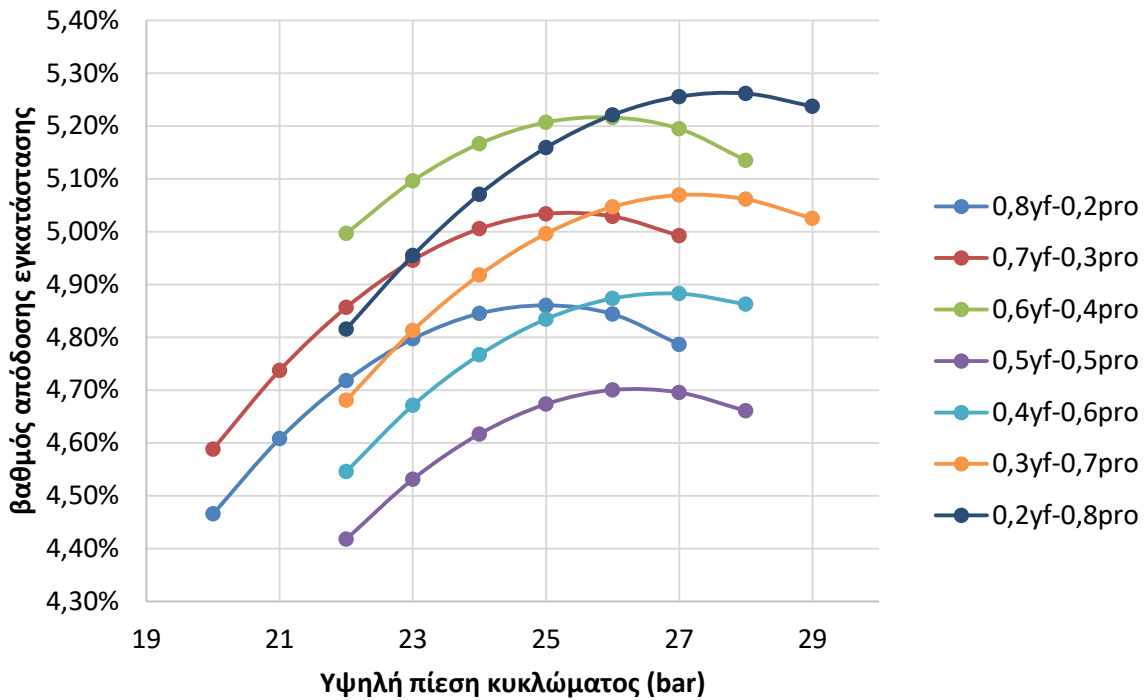
Πίνακας 51: Αποτελέσματα για μίγμα R1234yf-προπανίου σύστασης 0,2-0,8

Pmax (bar)	TBTURB4 (°C)	TATURB4 (°C)	TBTURB5 (°C)	TATURB5 (°C)	QEVAP (kW)	POWER PUMP (kW)	Βαθμός απόδοσης	Συνολ. Ισχύς εκτονωτών (kW)
22	85,00	55,60	85,00	55,60	70,34	1,51	4,8%	4,90
23	85,00	53,37	85,00	53,37	69,75	1,64	5,0%	5,09
24	85,00	51,12	85,00	51,12	69,13	1,76	5,1%	5,27
25	85,00	48,83	85,00	48,83	68,49	1,89	5,2%	5,42
26	85,00	46,49	85,00	46,49	67,80	2,01	5,2%	5,55
27	85,00	44,08	85,00	44,08	67,07	2,14	5,3%	5,66
28	85,00	41,58	85,00	41,58	66,29	2,27	5,3%	5,75
29	85,00	38,96	85,00	38,96	65,44	2,39	5,2%	5,82

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα της ολικής ισχύος στροβίλων (εκτονωτών) και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για κάθε σύσταση συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος:



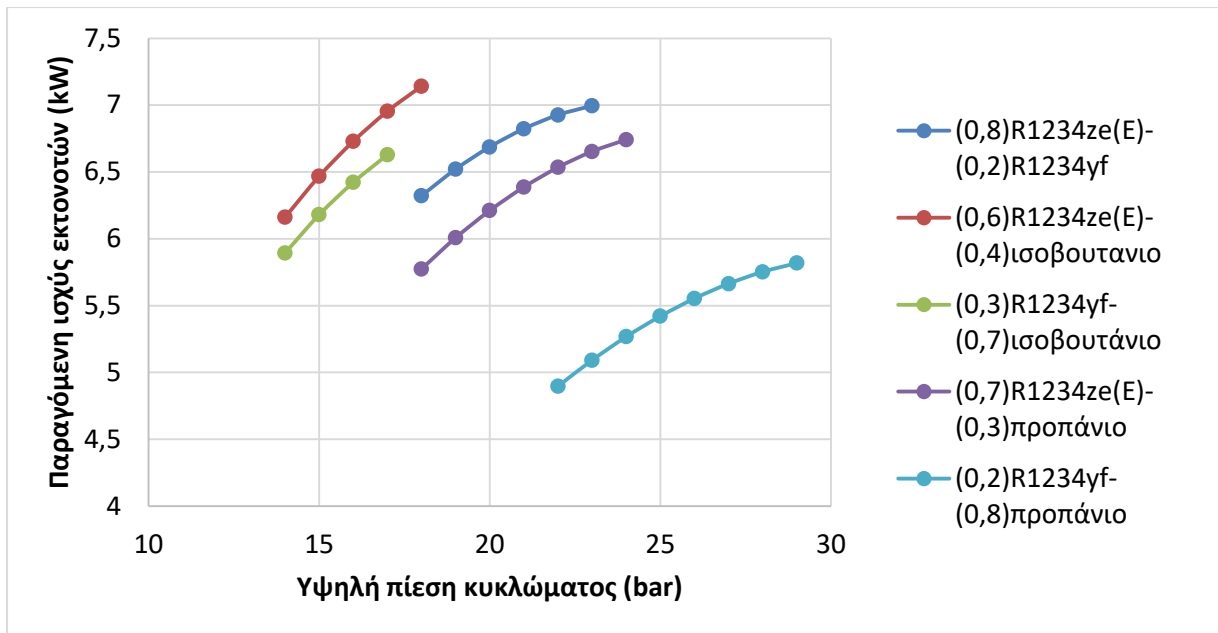
Σχήμα 50: Σύγκριση παραγόμενης ισχύος για διάφορες συστάσεις μίγματος R1234yf-προπανίου



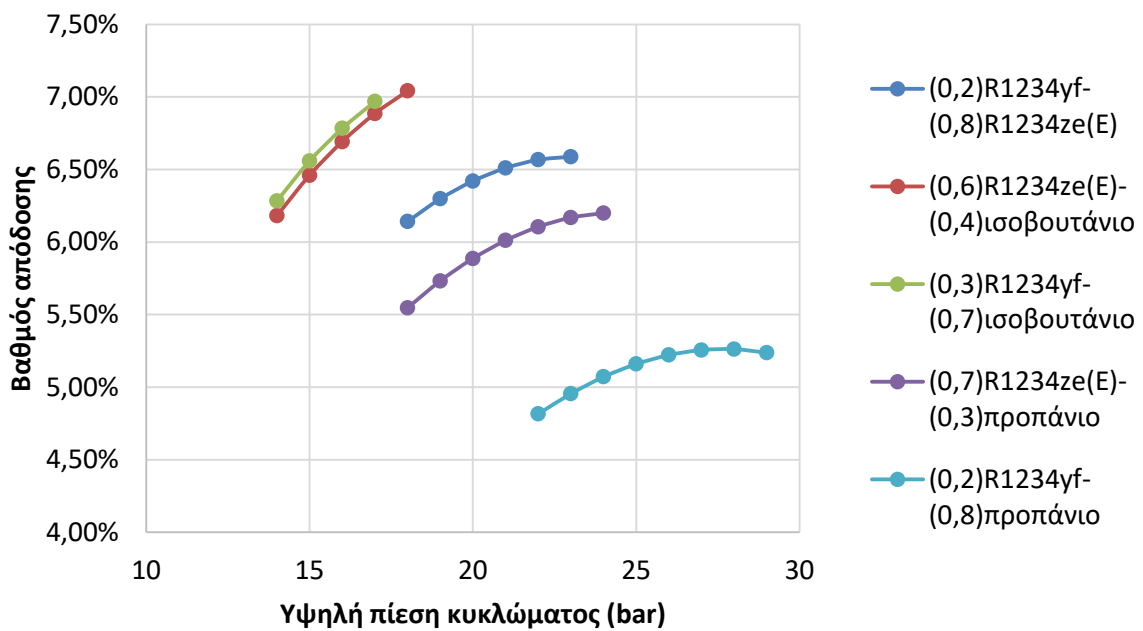
Σχήμα 51: Σύγκριση βαθμού απόδοσης για διάφορες μοριακές συστάσεις μίγματος R1234yf-προπανίου

#### **4.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα**

Παρακάτω παρουσιάζονται για όλα τα μίγματα, τα συγκεντρωτικά διαγράμματα παραγόμενης ισχύος και βαθμού απόδοσης συναρτήσει της υψηλής πίεσης του κυκλώματος. Οι θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης είναι 29 °C και 85 °C αντίστοιχα σε όλες τις περιπτώσεις. Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί για κάθε μίγμα, η σύσταση η οποία δίνει την υψηλότερη παραγόμενη ισχύ και τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 52: Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραγόμενης ισχύος εκτονωτών συναρτήσει της υψηλής πίεσης κυκλώματος



Σχήμα 53: Συγκεντρωτικό διάγραμμα βαθμού απόδοσης συναρτήσει της υψηλής πίεσης κυκλώματος

Είναι εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα ότι το μίγμα R1234ze(E)-ισοβουτανίου σε μοριακή σύσταση 0,6-0,4 υπερέρχει των υπόλοιπων μιγμάτων τόσο σε βαθμό απόδοσης όσο και σε παραγόμενη ισχύ που δίνει.



## 5.ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο επιλέχθηκαν όλα τα ρευστά και τα βέλτιστα μίγματα που διερευνήθηκαν και εξετάστηκε η οικονομική τους απόδοση στις βέλτιστες συνθήκες όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης και την παραγόμενη ισχύ που δίνουν. Στις συνθήκες αυτές καταγράφηκε η παραγόμενη ισχύς των εκτονωτών και η απαιτούμενη θερμική ισχύς του ατμοποιητή σε kW. Προσδιορίστηκαν τα κόστη των εξεταζόμενων ρευστών διαδικτυακά σε ευρώ/λίτρο. Όσον αφορά τα μίγματα, το κόστος σε ευρώ/λίτρο προέκυψε αναλογικά, με βάση τη σύσταση τους και πολλαπλασιάστηκε με έναν συντελεστή 20% που θεωρήθηκε ως πρόσθετο κόστος ανάμιξης.

### 5.1 Χρήση Φυσικού αερίου

Εξετάζονται τέσσερα σενάρια λειτουργίας 1200, 2400, 4800 και 7200 ώρες/έτος και στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε ότι η θερμική ισχύς του ατμοποιητή προέρχεται από καύση φυσικού αερίου με βαθμό απόδοσης 100%. Βρέθηκαν με βάση τα στοιχεία της Eurostat οι τιμές του φυσικού αερίου και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για οικιακή και μη οικιακή χρήση για το πρώτο εξάμηνο του 2019 (που ήταν η πιο πρόσφατη τιμή καταγραφής από το συγκεκριμένο φορέα)[42]. Εφόσον η εγκατάσταση υπάρχει ήδη αμελήθηκε το αρχικό κόστος της και το μοναδικό κόστος αρχικής επένδυσης που ελήφθη υπόψη ήταν η αντικατάσταση του οργανικού ρευστού. Εκτιμήθηκε ότι η εγκατάσταση απαιτεί περίπου 100 λίτρα για να λειτουργήσει.

*Πίνακας 52: Κόστος και safety group του εκάστοτε ρευστού, παραγόμενη ισχύς και θερμική ισχύς ατμοποιητή που δίνει[43-48]*

Ρευστό	Τιμή (€/lt)	Q <sub>evap</sub> (kW)	Παραγόμενη ισχύς (kW)	ASHRAE 34 safety group
R134a	22,34	84,96	5,97	A1
R245fa	29,20	113	15	B1
R152a	4,75	99,3	7,26	A2
R227ea	120,00	67,4	5,78	A1
R1234ze	48,52	78,3	6,62	A2L
R1234yf	94,48	61,2	5,9	A2L
Isobutane (R600a)	10,03			A3
R290 (Propane)	1,23			A3
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	69,25	74,5	7	-
(0,3)R1234yf-(0,7)isobutane	57,64	73,8	6,62	-
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	46,67	78,7	7,14	-

(0,2)R1234yf-(0,8)propane	45,12	65,4	5,8	-
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	49,71	74,8	6,74	-

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις τιμές ρεύματος και φυσικού αερίου σε Ελλάδα και Γερμανία:

*Πίνακας 53: Κόστη ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου σε Ελλάδα και Γερμανία*

	<b>Κατηγορία</b>	<b>Γερμανία</b>	<b>Ελλάδα</b>
<b>Κόστος ηλεκτρισμού (€/kWh)</b>	<b>Οικιακό</b>	0,3088	0,1650
	<b>Βιομηχανικό</b>	0,1557	0,1059
<b>Κόστος φυσικού αερίου (€/kWh)</b>	<b>Οικιακό</b>	0,0632	0,0550
	<b>Βιομηχανικό</b>	0,0318	0,0299

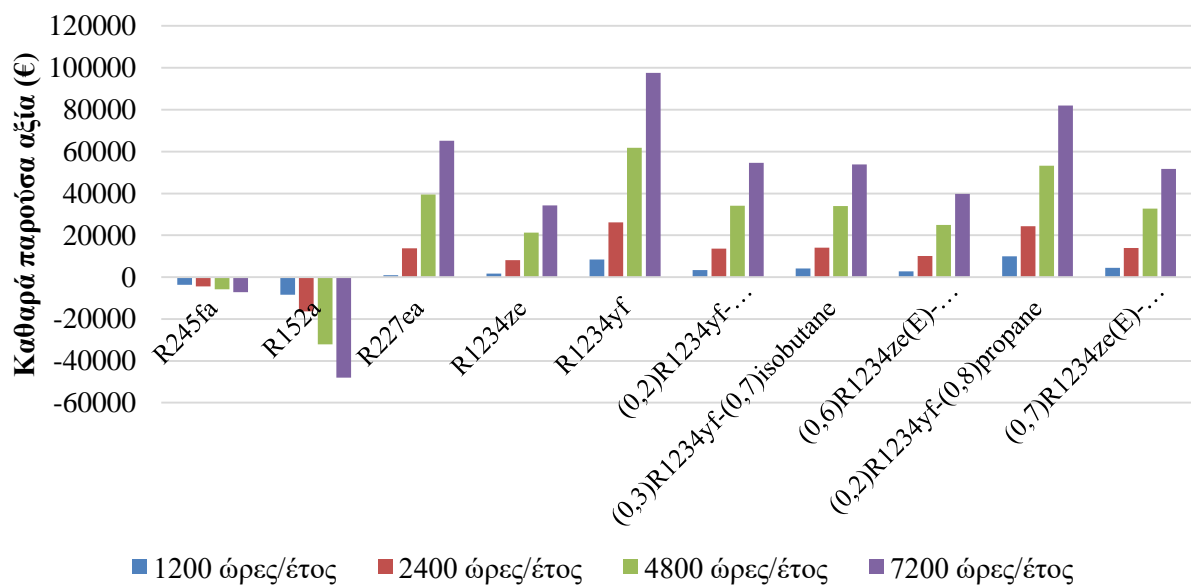
Όπως προαναφέρθηκε η αρχική επένδυση που γίνεται είναι το κόστος αντικατάστασης του οργανικού ρευστού (100 λίτρα του εκάστοτε ρευστού). Παρακάτω φαίνεται για κάθε ρευστό το κόστος αυτό:

*Πίνακας 54: Αρχική επένδυση για αντικατάσταση ρευστού*

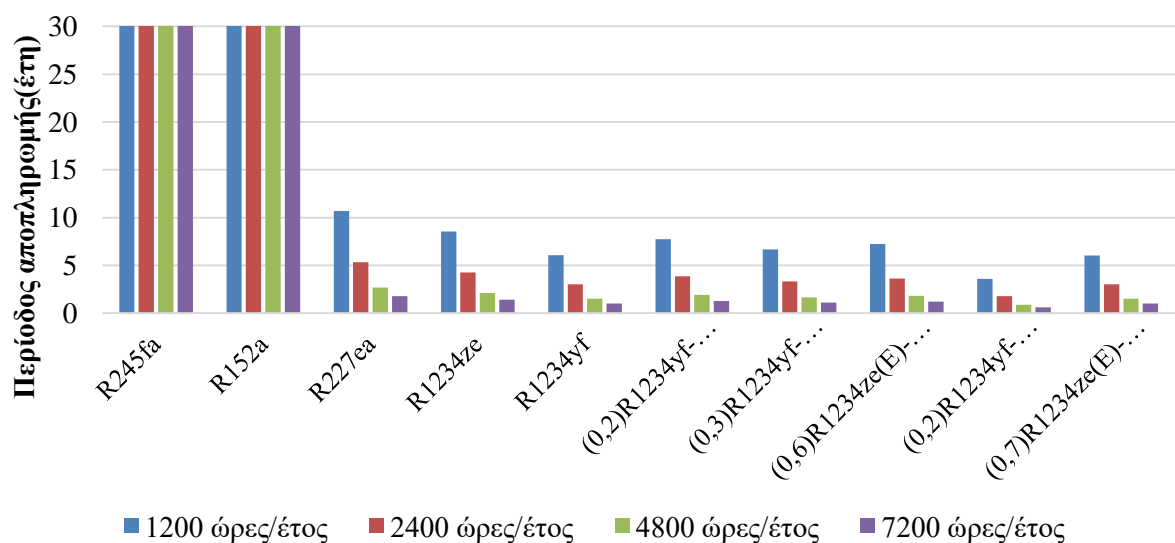
<b>Ρευστό</b>	<b>Αρχική επένδυση (€)</b>
R134a	n/a
R245fa	2919,5
R152a	475,4
R227ea	12000,0
R1234ze	4851,6
R1234yf	9448,0
(0,2)R1234yf-(0,8)R1234ze(E)	6925,1
(0,3)R1234yf-(0,7)isobutane	5763,8
(0,6)R1234ze(E)-(0,4)isobutane	4667,3
(0,2)R1234yf-(0,8)propane	4511,8
(0,7)R1234ze(E)-(0,3)propane	4970,8



Η χρηματική ροή που προκύπτει θα είναι η διαφορά των εσόδων απο την ηλεκτρική παραγωγή με το κόστος για το φυσικό αέριο. Εφόσον σε αυτό το σενάριο χρησιμοποιείται φυσικό αέριο είναι λογικό η διαφορά αυτή να είναι αρνητική. Αλλά τον ενδιαφέρον της παρούσας εργασίας είναι στο όφελος της αντικατάστασης του R134a συνεπώς η χρηματική ροή θα συγκρίνεται με την αντίστοιχη που θα υπήρχε εαν χρησιμοποιούταν το R134a. Η διαφορά των δύο αυτών χρηματικών ροών δίνει επι της ουσίας το κέρδος που υπάρχει σε ευρώ ανα έτος, ανάλογα με τις ώρες λειτουργίας ανα έτος. Με βάση το κέρδος και με μία απλή διαίρεση της αρχικής επένδυσης με αυτό προκύπτει ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης μας σε χρόνια. Εγινε επίσης και ανάλυση καθαρής παρούσας αξίας (NPV) σε βάθος 20ετίας θεωρώντας ως εισόδημα το κέρδος της αντικατάστασης ανα έτος και επιτόκιο 6%. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για οικιακή χρήση:



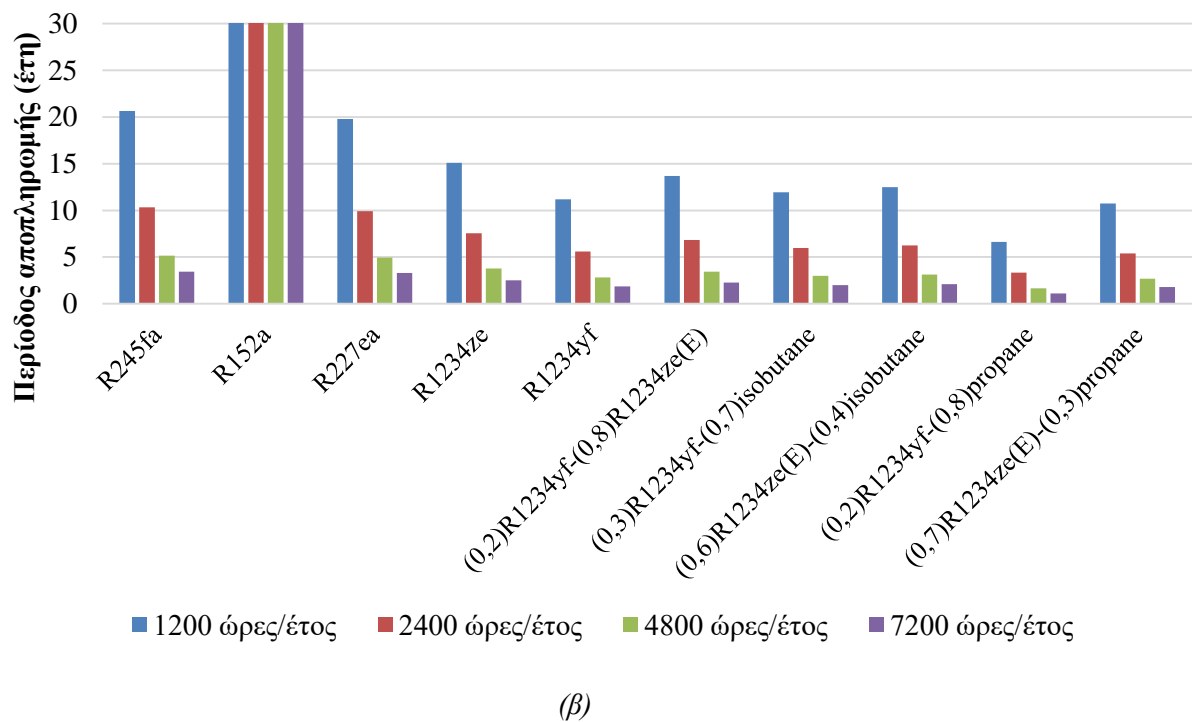
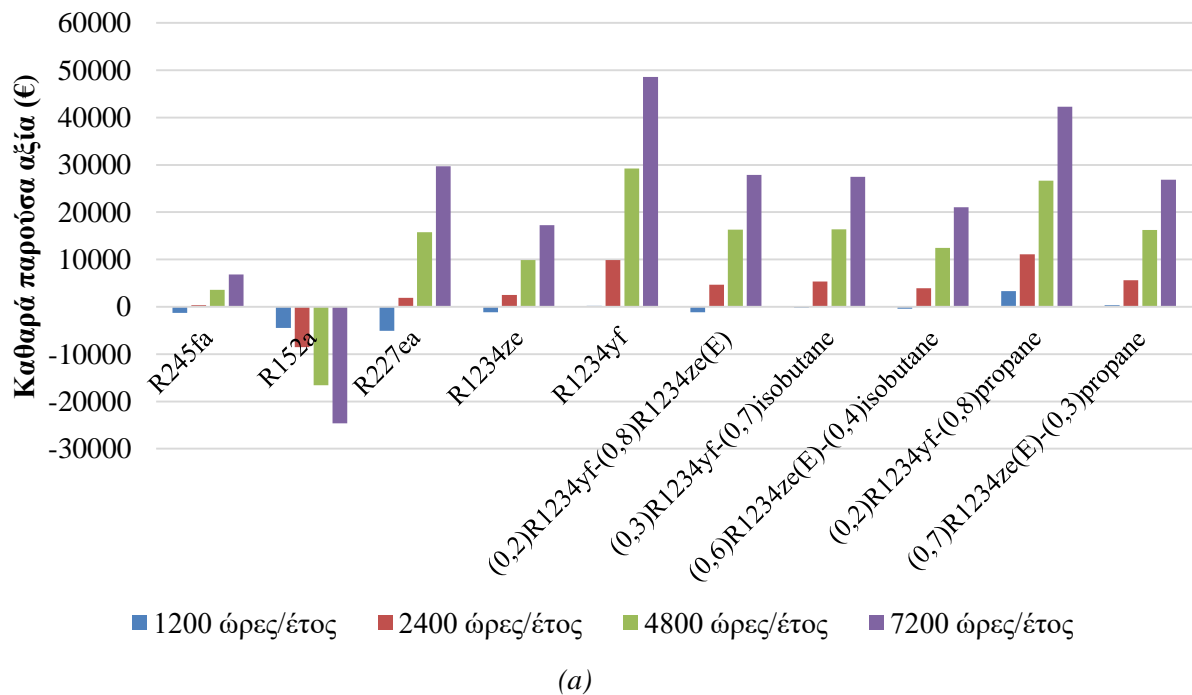
(α)



(β)

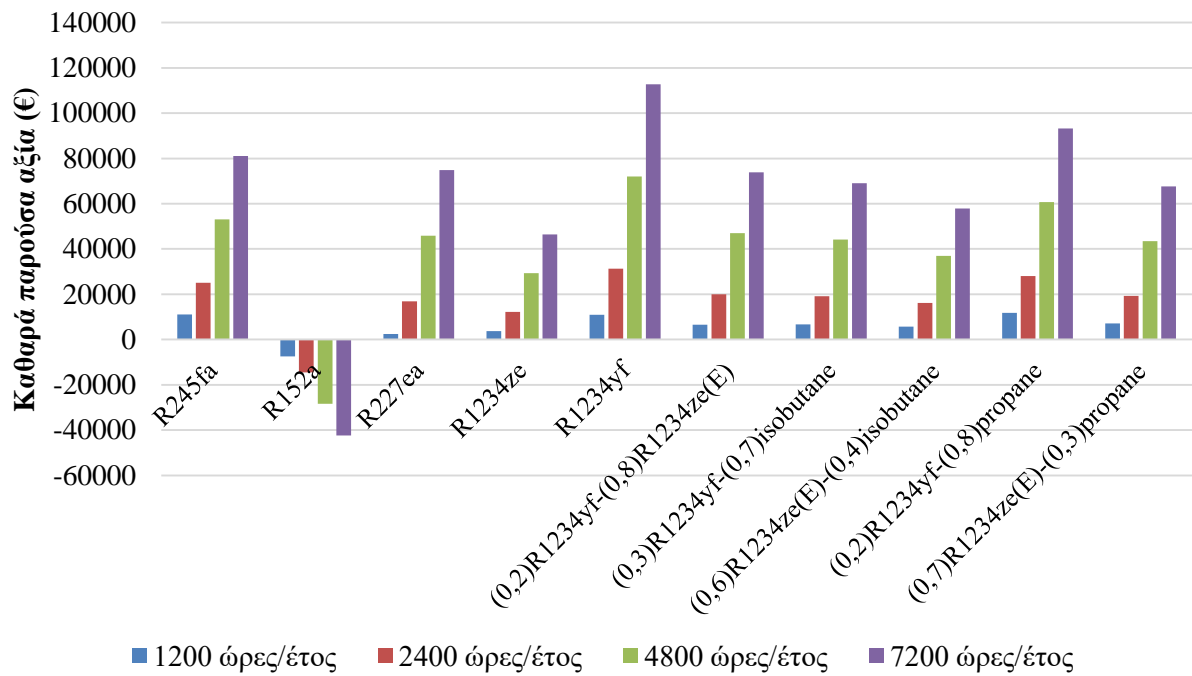
Σχήμα 54: Οικιακή χρήση- Ελλάδα, Καθαρά παρούσα αξία(α), Περίοδος αποπληρωμής (β)

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι σαφές πως όσο αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας/έτος μειώνεται η περίοδος αποπληρωμής και αυξάνεται η καθαρά παρούσα αξία. Για οικιακή χρήση στην Ελλάδα με βάση την περίοδο αποπληρωμής συμφέρει το μίγμα R1234yf-προπανίου σε μοριακή σύσταση 0,2-0,8. Με βάση την καθαρά παρούσα αξία συμφέρει το R1234yf.

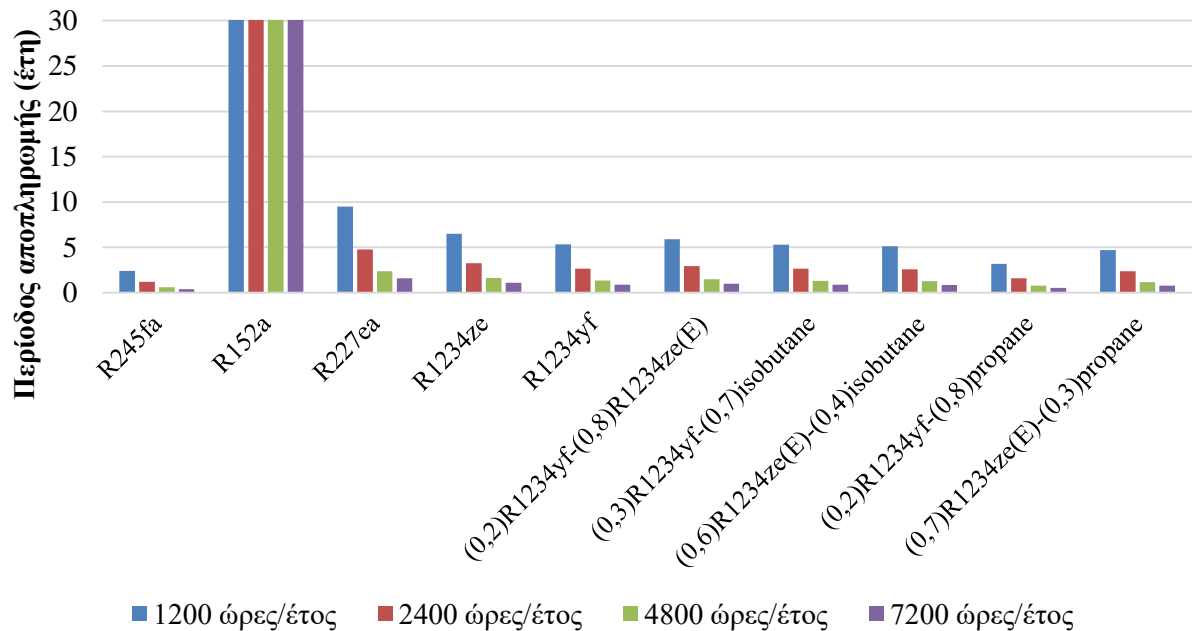


Σχήμα 55: Βιομηχανική χρήση-Ελλάδα, Καθαρά παρούσα αξία (α), Περίοδος αποπληρωμής (β)

Στην βιομηχανική χρήση συμφέρει και πάλι η χρήση του μίγματος R1234yf-προπανίου που προαναφέρθηκε, παρατηρούμε όμως ότι αυξάνονται οι χρόνοι αποπληρωμής και μειώνεται η καθαρά παρούσα αξία σε σχέση με την οικιακή χρήση γεγονός που οφείλεται στην μειωμένη τιμή του ρεύματος.



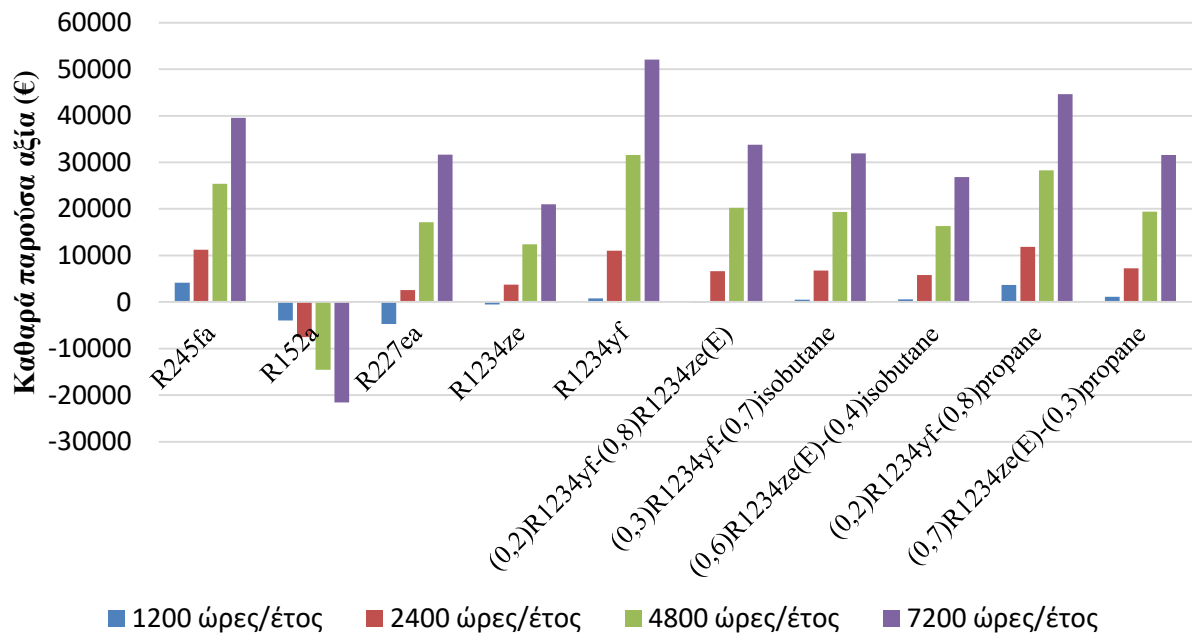
(α)



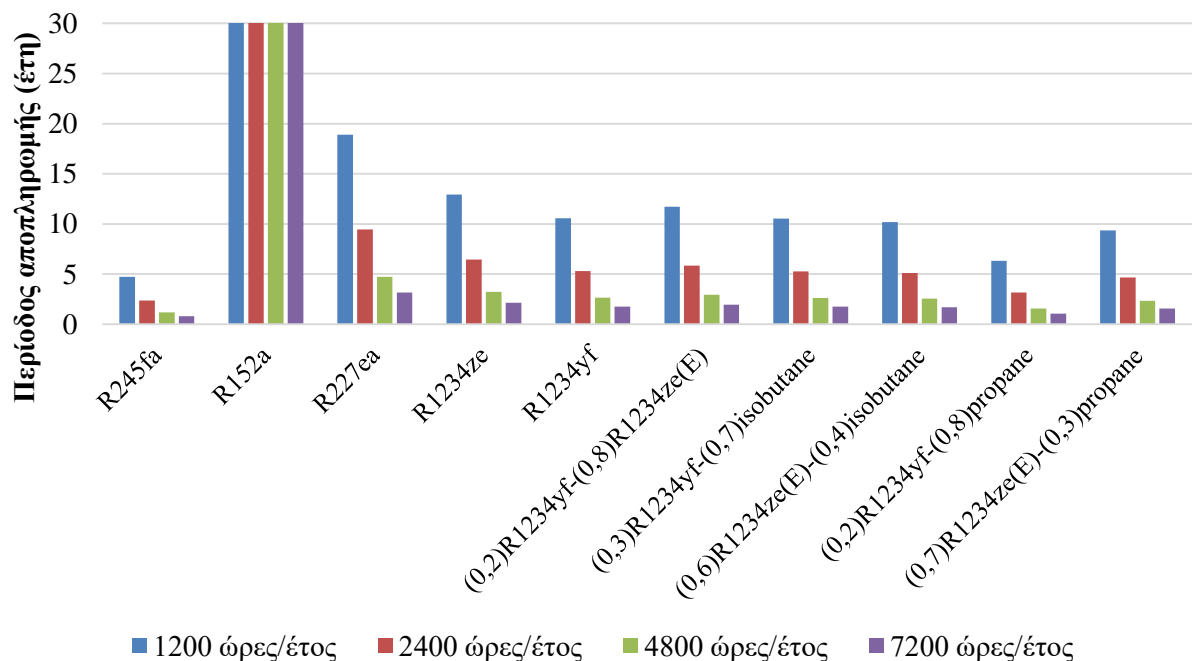
(β)

Σχήμα 56: Οικιακή χρήση-Γερμανία, Καθαρά παρούσα αξία (α), Περίοδος αποπληρωμής (β)

Στην οικιακή χρήση στη Γερμανία παρατηρούμε ότι με βάση την καθαρά παρούσα αξία συμφέρει όπως και στην Ελλάδα το R1234yf το οποίο όμως δίνει υψηλότερη αξία από την Ελλάδα λόγω της αυξημένης τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση την περίοδο αποπληρωμής συμφέρει όπως και στην Ελλάδα το μίγμα R1234yf-προπανίου το οποίο έχει μικρότερη περίοδο αποπληρωμής σε σχέση με την Ελλάδα λόγω της τιμής του ρεύματος.



(α)

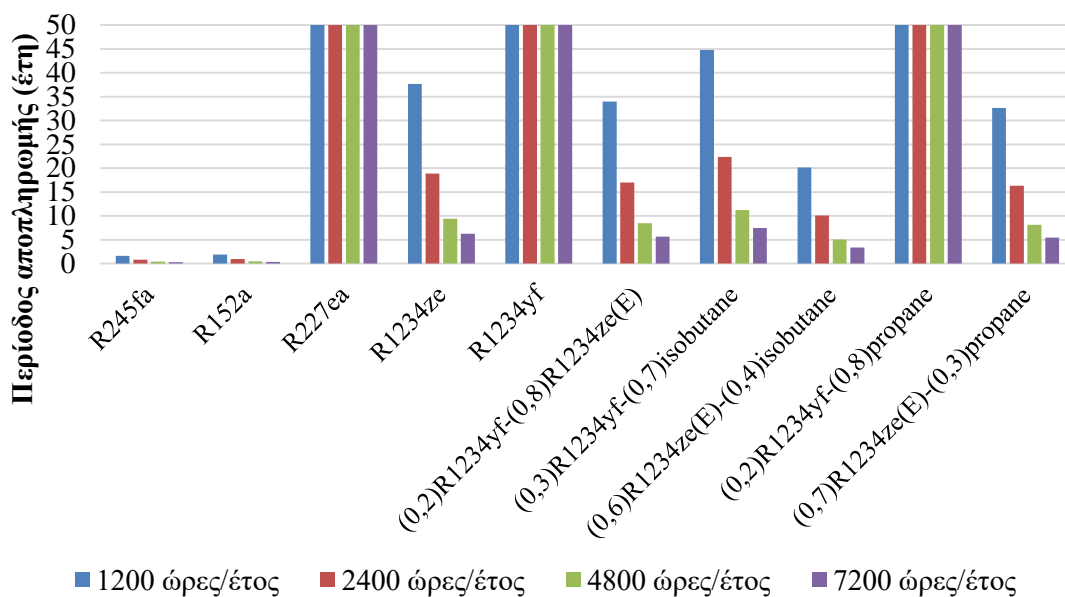


(β)

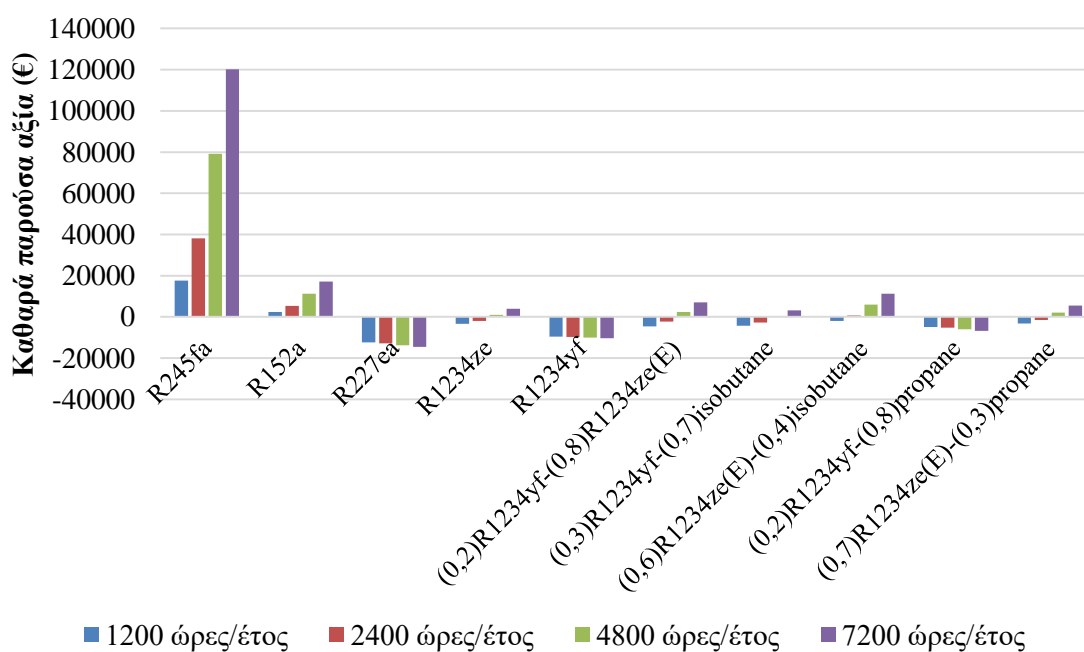
Σχήμα 57: Βιομηχανική χρήση-Γερμανία, Καθαρά παρούσα αξία (α), Περίοδος αποπληρωμής (β)

## 5.2 Χρήση απορριπτόμενης θερμότητας

Στο επόμενο σενάριο οικονομικής ανάλυσης η πηγή θερμότητας θεωρείται απορριπτόμενη θερμότητα απο κάποια εφαρμογή όπως για παράδειγμα ψυκτικό νερό κινητήρα Diesel που είναι και η πραγματική χρήση του υπό μελέτη συστήματος. Αυτό συνεπάγεται ότι το κόστος λειτουργίας στους προηγούμενους υπολογισμούς γίνεται πλέον μηδενικό, συνεπώς η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε ευρώ/έτος των προηγούμενων πινάκων, ταυτίζεται πλέον με τη χρηματική ροή. Το αρχικό κόστος επένδυσης παραμένει το ίδιο συνεπώς θα προκύψουν νέοι χρόνοι αποπληρωμής, κέρδη αντικατάστασης και καθαρά παρούσα αξία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για οικιακή χρήση.



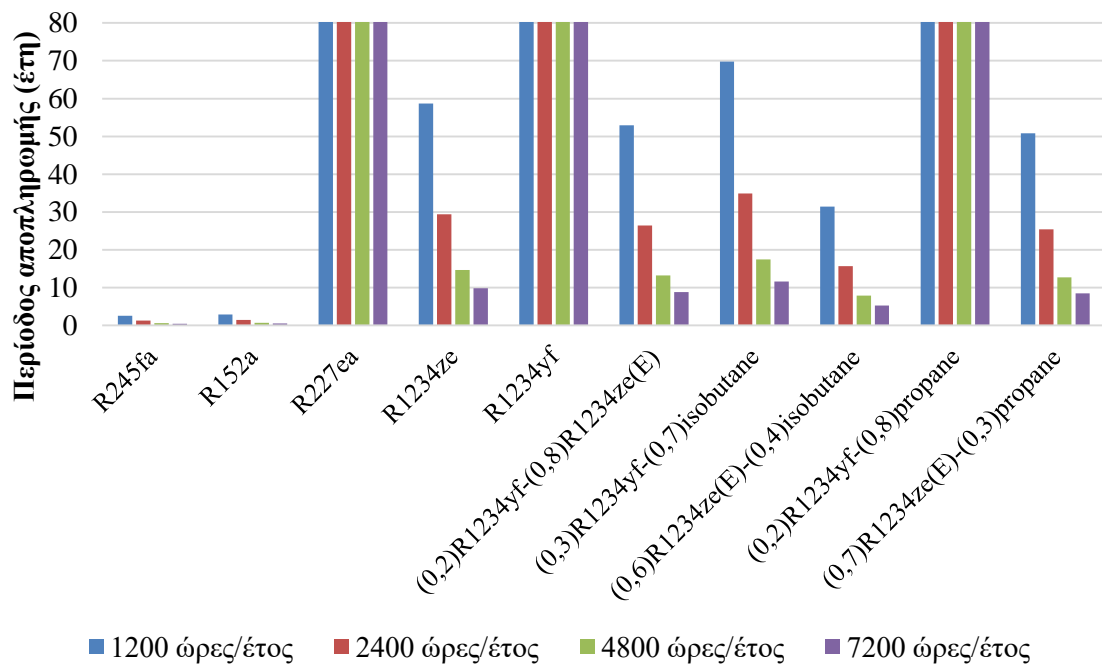
(α)



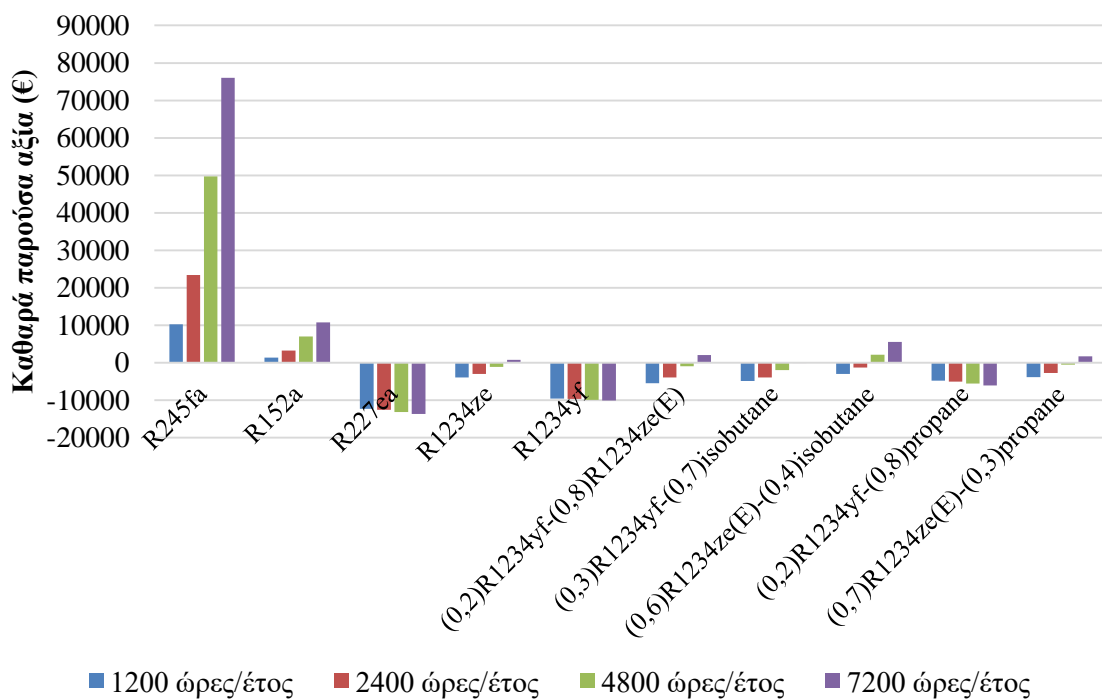
(β)

Σχήμα 58: Οικιακή χρήση-Ελλάδα. Περίοδος αποπληρωμής (α), Καθαρά παρούσα αξία (β)

Είναι εμφανές ότι το R245fa είναι η καλύτερη επιλογή τόσο με βάση την καθαρά παρούσα αξία όσο και με το χρόνο αποπληρωμής εφόσον το κόστος της πηγής θερμότητας είναι μηδενικό αφού σαν ρευστό δίνει την μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ απο τα υπόλοιπα.



(α)



(β)

Σχήμα 59: Βιομηχανική χρήση-Ελλάδα, Περίοδος αποπληρωμής (α), Καθαρά παρούσα αξία (β)

Το R245fa συμφέρει και στη βιομηχανική χρήση, όμως παρατηρείται ότι λόγω της χαμηλότερης τιμής του ρεύματος στη βιομηχανία έχει χαμηλότερη καθαρά παρούσα αξία και μεγαλύτερη περίοδο αποπληρωμής από την οικιακή χρήση.





## **6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πέντε ρευστά με σκοπό την αντικατάσταση του R134a. Για κάθε ρευστό μελετήθηκε μία βασική υπόθεση, όσον αφορά θερμοκρασίες και πιέσεις λειτουργίας και στη συνέχεια έγινε ανάλυση ευαισθησίας με παραμέτρους τις θερμοκρασίες συμπυκνώσεως και ατμοποίησης. Το ζητούμενο της ανάλυσης αυτής είναι η επίδραση των θερμοκρασιών αυτών στην παραγόμενη ισχύ εκτονωτών και τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Όσον αφορά τα καθαρά ρευστά, όπως φαίνεται στην Ενότητα 3.7 :

- Η παραγόμενη ισχύς εκτονωτών και ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης παρουσιάζει αύξηση σε όλα τα ρευστά, όσο αυξάνει η θερμοκρασία εξόδου ατμοποιητή
- Η παραγόμενη ισχύς εκτονωτών και ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης παρουσιάζει μείωση σε όλα τα ρευστά, όσο αυξάνει η θερμοκρασία εξόδου συμπυκνωτή
- Το R245fa δείχνει να υπερέχει όλων των υπόλοιπων ρευστών τόσο στο βαθμό απόδοσης εγκατάστασης όσο και στην παραγόμενη ισχύ εκτονωτών που δίνει.

Το βασικό σενάριο του R245fa ήταν η λειτουργία στα 2-8 bar με 29 °C – 85 °C θερμοκρασίες συμπυκνώσεως και ατμοποίησης, αντίστοιχα. Η παραγόμενη ισχύς ήταν 8,99 kW με βαθμό απόδοσης 7,5%. Στη συνέχεια αλλάχθηκε η χαμηλή πίεση στο 1 bar με θερμοκρασία συμπυκνώσεως 14,6 °C. Προέκυψε ισχύς εκτονωτών 13,4 kW με βαθμό απόδοσης 11%. Η ανάλυση ευαισθησίας στην υψηλή πίεση του κυκλώματος και τη θερμοκρασία ατμοποίησης έδωσε για 10bar και 95,1°C, ολική ισχύ 10,5 kW και βαθμό απόδοσης 8,4%.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν πεντε μίγματα τα οποία εξετάστηκαν για διάφορες συστάσεις, σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες συμπυκνώσεως-ατμοποίησης (29°C-85°C) για λόγους συγκρισιμότητας. Στο κάθε μίγμα βρέθηκε η σύσταση που δίνει την υψηλότερη παραγόμενη ισχύ και τον βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Όσον αφορά τα μίγματα, όπως φαίνεται στην Ενότητα 4.7 προκύπτει το εξής συμπέρασμα:

- Η παραγόμενη ισχύς εκτονωτών και ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης μεγιστοποιείται με τη χρήση μίγματος R1234ze(E)-ισοβουτανίου σύστασης 0,6-0,4.
- Τα χρησιμοποιηθέντα μίγματα δεν έδωσαν αξιοσημείωτη αύξηση στην παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης σε σχέση με τα καθαρά οργανικά ρευστά.

Ένα συνολικό συμπέρασμα, με κριτήριο την παραγόμενη ισχύ και τον βαθμό απόδοσης, είναι ότι το R245fa δείχνει να υπερέχει όλων των μιγμάτων και των υπόλοιπων ρευστών. Πρέπει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη μελέτη περιορίστηκε σε συνθήκες που μπορούν να υλοποιηθούν από την υπάρχουσα εγκατάσταση. Ωστόσο το R245fa λόγω της κρίσιμης θερμοκρασίας του έχει περιθώρια για περαιτέρω αύξηση της απόδοσής του, εφόσον αυξηθεί περαιτέρω η θερμοκρασία ατμοποίησης του κύκλου.

Με βάση την οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, αν χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο ως πηγή θερμότητας:

- Για οικιακή χρήση με βάση το χρόνο αποπληρωμής συμφέρει το μίγμα (0,2)R1234yf-(0,8)προπανίου στις 7200 ώρες λειτουργίας/έτος με αποπληρωμή στα 0,6 χρόνια. Με βάση την καθαρά παρούσα αξία συμφέρει το R1234yf με 97518,19 € αξία.

- Για βιομηχανική τα αποτελέσματα ταυτίζονται με την οικιακή με τη διαφορά ότι υπάρχει αποπληρωμή σε 1,11 χρόνια και η καθαρά παρούσα αξία είναι 48609,06 €.

Αν χρησιμοποιηθεί απορριπτόμενη θερμότητα τότε:

- Για οικιακή χρήση με βάση το χρόνο αποπληρωμής συμφέρει το R245fa στις 7200 ώρες λειτουργίας/έτος με 0,27 χρόνια αποπληρωμής. Το ίδιο ρευστό συμφέρει και με βάση την καθαρά παρούσα αξία η οποία είναι 120125,6 €.
- Για βιομηχανική χρήση τα αποτελέσματα ταυτίζονται με την οικιακή με τη διαφορά ότι υπάρχει αποπληρωμή σε 0,4 χρόνια και η καθαρά παρούσα αξία είναι 76053,1 €.

Με βάση όλα τα κριτήρια προκύπτει ότι η επιλογή του R245fa ως μέσου στην υπάρχουσα μονάδα ORC αξιοποίησης απορριπτόμενης θερμότητας είναι η βέλτιστη λύση.

Οι προτάσεις για μελλοντική εργασία, με βάση την συγκεκριμένη, αυτές θα μπορούσαν να είναι οι εξής:

- Διερεύνηση των εξεργειακών βαθμών απόδοσης του κάθε ρευστού-μίγματος. Η παρούσα μελέτη περιορίστηκε στην ενεργειακή και οικονομική μελέτη του κύκλου και των υποψηφίων ρευστών, οπότε μια επέκταση της παρούσας εργασίας θα ήταν η ανάλυση ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης.
- Διερεύνηση διαφορετικών μίγμάτων και ρευστών. Στην παρούσα εργασία τα συστατικά ρευστα των μιγμάτων επιλέχθηκαν με κριτήριο τις κοντινές τιμές της κρίσιμης θερμοκρασίας τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε να εξετασθεί η μίξη ρευστών με αισθητά διαφορετικές κρίσιμες θερμοκρασίες όπως για παράδειγμα το MDM και στο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
- Διερεύνηση της μέγιστης δυναμικότητας των ρευστών ως προς το βαθμό απόδοσης και την παραγόμενη ισχύ. Αυτό μπορεί να γίνει φτάνοντας τα μέγιστα δυνατά όρια πιέσεων και θερμοκρασιών λειτουργίας, γεγονός που δεν είναι εφικτό στην παρούσα εργασία λόγω των περιορισμών της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι πίνακες με τις τιμές των υπολογισμών που εμφανίζονται στο κεφάλαιο 5 και στα σχετικά διαγράμματα του κεφαλαίου.

### Α.1 Χρήση Φυσικού αερίου

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει την κατανάλωση φυσικού αερίου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε kWh/έτος αναλόγως με το σχετικό σενάριο ωρών λειτουργίας:

	Κατανάλωση Φυσικού αερίου (kWh/y)				Παραγωγή ηλεκτρισμού (kWh/y)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	101952	203904	407808	611712	7164	14328	28656	42984
R245fa	135600	271200	542400	813600	18000	36000	72000	108000
R152a	119160	238320	476640	714960	8712	17424	34848	52272
R227ea	80880	161760	323520	485280	6936	13872	27744	41616
R1234ze	93960	187920	375840	563760	7944	15888	31776	47664
R1234yf	73440	146880	293760	440640	7080	14160	28320	42480
<b>Μίγματα</b>								
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	89400	178800	357600	536400	8400	16800	33600	50400
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	88560	177120	354240	531360	7944	15888	31776	47664
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	94440	188880	377760	566640	8568	17136	34272	51408
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	78480	156960	313920	470880	6960	13920	27840	41760
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	89760	179520	359040	538560	8088	16176	32352	48528

Με βάση τις τιμές φυσικού αερίου και ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα από τον άνω πίνακα μπορεί να εκτιμηθεί το κόστος του φυσικού αερίου ανα έτος καθώς και τα έσοδα από την ηλεκτρική παραγωγή. Τα αποτελέσματα για οικιακή χρήση φαίνονται παρακάτω:

Ρευστό	Κατανάλωση Φυσικού αερίου (€/y)				Παραγωγή ηλεκτρισμού (€/y)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	5607	11214	22429	33644	1182	2364	4728	7092
R245fa	7458	14916	29832	44748	2970	5940	11880	17820
R152a	6553	13108	26215	39323	1437	2875	5750	8625
R227ea	4448	8897	17794	26690	1144	2289	4578	6867
R1234ze	5168	10336	20671	31007	1311	2622	5243	7865
R1234yf	4039	8078	16157	24235	1168	2336	4673	7009
<b>Μίγματα</b>								
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E) )	4917	9834	19668	29502	1386	2772	5544	8316
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	4871	9742	19483	29225	1311	2622	5243	7865
(0,6)R1234ze(E) )-(0,4)isobutane	5194	10388	20777	31165	1414	2827	5655	8482
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	4316	8632	17266	25898	1148	2297	4594	6890
(0,7)R1234ze(E) )-(0,3)propane	4937	9874	19747	29621	1335	2669	5338	8007

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για βιομηχανική χρήση παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Ρευστό	Κατανάλωση Φυσικού αερίου (€/y)				Παραγωγή ηλεκτρισμού (€/y)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	3048	6097	12194	18290	759	1517	3035	4552
R245fa	4054	8109	16218	24327	1906	3812	7625	11437
R152a	3563	7126	14252	21377	923	1845	3690	5536
R227ea	2418	4837	9673	14510	735	1469	2938	4407
R1234ze	2809	5619	11238	16856	841	1683	3365	5048

R1234yf	2196	4392	8783	13175	750	1500	2999	4499
<b>Μίγματα</b>								
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	2673	5346	10692	16038	890	1779	3558	5337
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	2648	5296	10592	15888	841	1683	3365	5048
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	2824	5648	11295	16943	907	1815	3629	5444
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	2347	4693	9386	14079	737	1474	2948	4422
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	2684	5368	10735	16103	857	1713	3426	5139

Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για οικιακή χρήση:

Ρευστό	Χρηματική ροή (€/y)				Κέρδος αντικατάστασης (€/y)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	-4425	-8851	-17701	-26552	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	-4488	-8976	-17952	-26928	-63	-125	-251	-376
R152a	-5116	-10233	-20465	-30698	-691	-1382	-2764	-4146
R227ea	-3304	-6608	-13216	-19824	1121	2243	4485	6728
R1234ze	-3857	-7714	-15428	-23142	568	1137	2273	3410
R1234yf	-2871	-5742	-11484	-17226	1554	3109	6217	9326
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	-3531	-7062	-14124	-21186	894	1789	3577	5366
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	-3560	-7120	-14240	-21360	865	1731	3461	5192
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	-3780	-7561	-15122	-22683	645	1290	2579	3869
(0,2)R1234yf-	-3168	-6336	-12672	-19008	1257	2515	5029	7544

(0,8)propane								
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	-3602	-7205	-14409	-21614	823	1646	3292	4938

Ρευστό	Αποπληρωμή (yrs)				NPV (€)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	-46,6	-23,3	-11,6	-7,8	-3639	-4358	-5796	-7235
R152a	-0,7	-0,3	-0,2	-0,1	-8401	-16327	-32179	-48031
R227ea	10,7	5,4	2,7	1,8	862	13723	39447	65170
R1234ze	8,5	4,3	2,1	1,4	1666	8184	21220	34256
R1234yf	6,1	3,0	1,5	1,0	8380	26207	61863	97518
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	7,7	3,9	1,9	1,3	3332	13590	34105	54620
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	6,7	3,3	1,7	1,1	4161	14085	33934	53783
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	7,2	3,6	1,8	1,2	2729	10125	24917	39709
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	3,6	1,8	0,9	0,6	9909	24330	53173	82015
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	6,0	3,0	1,5	1,0	4469	13909	32789	51669

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για βιομηχανική χρήση:

Ρευστό	Χρηματική ροή (€/y)				Κέρδος αντικατάστασης (€/y)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	-2290	-4579	-9159	-13738	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	-2148	-4296	-8593	-12889	141	283	566	849
R152a	-2640	-5281	-10561	-15842	-351	-701	-1402	-2104

R227ea	-1684	-3368	-6735	-10103	606	1212	2424	3635
R1234ze	-1968	-3936	-7873	-11809	322	643	1286	1929
R1234yf	-1446	-2892	-5784	-8677	844	1687	3374	5062
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	-1784	-3567	-7134	-10701	506	1012	2025	3037
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	-1807	-3613	-7227	-10840	483	966	1932	2898
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	-1916	-3833	-7666	-11498	373	747	1493	2240
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	-1609	-3219	-6438	-9657	680	1360	2721	4081
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	-1827	-3655	-7309	-10964	462	925	1850	2774

Ρευστό	Αποπληρωμή (yrs)				NPV (€)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	20,6	10,3	5,2	3,4	-1297	325	3570	6815
R152a	-	-	-	-	-4497	-8518	-16560	-24603
R227ea	19,8	9,9	5,0	3,3	-5050	1899	15799	29698
R1234ze	15,1	7,5	3,8	2,5	-1163	2525	9902	17278
R1234yf	11,2	5,6	2,8	1,9	228	9904	29257	48609
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	13,7	6,8	3,4	2,3	-1119	4687	16299	27911
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	11,9	6,0	3,0	2,0	-224	5317	16397	27478
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	12,5	6,3	3,1	2,1	-386	3896	12459	21023
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	6,6	3,3	1,7	1,1	3290	11092	26696	42300
(0,7)R1234ze(E)-	10,8	5,4	2,7	1,8	333	5636	16244	26851

(0,3)propane								
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--

## **A.2 Χρήση απορριπτόμενης θερμότητας**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για οικιακή χρήση.

Ρευστό	Κέρδος αντικατάστασης (€/y)				Αποπληρωμή (yrs)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	1788	3576	7152	10728	1,6	0,8	0,4	0,3
R152a	255	511	1022	1533	1,9	0,9	0,5	0,3
R227ea	-38	-75	-150	-226	-	-	-	-
R1234ze	129	257	515	772	37,7	18,9	9,4	6,3
R1234yf	-14	-28	-55	-83	-	-	-	-
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	204	408	816	1224	34,0	17,0	8,5	5,7
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	129	257	515	772	44,8	22,4	11,2	7,5
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	232	463	927	1390	20,2	10,1	5,0	3,4
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	-34	-67	-135	-202	-	-	-	-
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	152	305	610	915	32,6	16,3	8,2	5,4

Ρευστό	NPV (€)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	17588	38096	79111	120126
R152a	2454	5384	11243	17102



R227ea	-12432	-12863	-13726	-14589
R1234ze	-3375	-1899	1053	4006
R1234yf	-9607	-9766	-10084	-10402
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	-4586	-2247	2432	7110
(0,3)R1234yf-(0,7)isobutane	-4288	-2812	141	3093
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	-2010	647	5961	11275
(0,2)R1234yf-(0,8)propane	-4898	-5284	-6056	-6828
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	-3222	-1473	2024	5521

Στους επόμενους πίνακες φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για βιομηχανική χρήση:

Ρευστό	Κέρδος αντικατάστασης (€/y)				Αποπληρωμή (yrs)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	1148	2295	4590	6885	2,5	1,3	0,6	0,4
R152a	164	328	656	984	2,9	1,5	0,7	0,5
R227ea	-24	-48	-97	-145	-	-	-	-
R1234ze	83	165	330	496	58,7	29,4	14,7	9,8
R1234yf	-9	-18	-36	-53	-	-	-	-
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	131	262	524	785	52,9	26,5	13,2	8,8
(0,3)R1234yf- (0,7)isobutane	83	165	330	496	69,8	34,9	17,4	11,6
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	149	297	595	892	31,4	15,7	7,8	5,2
(0,2)R1234yf- (0,8)propane	-22	-43	-86	-130	-	-	-	-
(0,7)R1234ze(E)-	98	196	391	587	50,8	25,4	12,7	8,5

(0,3)propane								
--------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Περιοχή	NPV (€)			
	1200 hrs/y	2400 hrs/y	4800 hrs/y	7200 hrs/y
R134a	n/a	n/a	n/a	n/a
R245fa	10243	23405	49729	76053
R152a	1405	3285	7046	10806
R227ea	-12277	-12554	-13108	-13662
R1234ze	-3904	-2957	-1062	833
R1234yf	-9550	-9652	-9856	-10060
(0,2)R1234yf- (0,8)R1234ze(E)	-5424	-3922	-920	2083
(0,3)R1234yf-(0,7)isobutane	-4816	-3869	-1974	-79
(0,6)R1234ze(E)- (0,4)isobutane	-2962	-1257	2154	5565
(0,2)R1234yf-(0,8)propane	-4760	-5007	-5503	-5999
(0,7)R1234ze(E)- (0,3)propane	-3848	-2726	-481	1763

## Βιβλιογραφία

1. Castelluci, S., S. Cocchi, and C.B. Celma, *Energy Characterization of Residual Biomass in Mediterranean Area for Small Biomass Gasifiers in According to the European Standards*. Applied Mathematical Sciences, 2014. **8**: p. 6621-6633.
2. [https://www.eia.gov/pressroom/presentations/capuano\\_07242018.pdf](https://www.eia.gov/pressroom/presentations/capuano_07242018.pdf).
3. *World Energy Resources*. 2016.
4. Skjærseth, J.B. and J. Wettestad, *EU emissions trading: initiation, decision-making and implementation*. 2016: Routledge.
5. Κουρεμένος, Α., *Θερμοδυναμική Ι*. 1999, Εκδόσεις Συμείων.
6. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. 2015.
7. Χ.Θωμά, *Ενεργειακή και εξεργειακή μελέτη διατάξεων σύζευξης οργανικού κύκλου Rankine και ψυκτικού κύκλου προσρόφησης*.
8. G.Urlich, E.S., *Πίνακες ιδιοτήτων νερού ατμού*. Εκδόσεις Φούντας.
9. Κ.Μαθιουδάκης, *Λειτουργία αεριοστροβίλων & ατμοστροβίλων*. 2007, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
10. W.Black, *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ* 1995.
11. Κακαράς, Ε.α. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική τεχνολογία θερμικών σταθμών*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Σεπτέμβριος, 2008: p. 27-29.
12. Χαραλαμπίδης, Α., *Σύζευξη συστήματος ORC μικρής ισχύος με οικιακό ηλιακό σύστημα και σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης*. 2018.
13. Braimakis, K., et al., *Comparison of environmentally friendly working fluids for organic Rankine cycles*, in *Advances in New Heat Transfer Fluids*. 2017, CRC Press. p. 377-426.
14. Quoilin, S., et al., *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 168-186.
15. Lion, S., et al., *A review of waste heat recovery and Organic Rankine Cycles (ORC) in on-off highway vehicle Heavy Duty Diesel Engine applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 691-708.
16. Vélez, F., et al., *A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(6): p. 4175-4189.
17. Tartière, T. and M. Astolfi, *A world overview of the organic Rankine cycle market*. Energy Procedia, 2017. **129**: p. 2-9.
18. Roumpedakis, T.C., et al., *Experimental Investigation and CFD Analysis of Heat Transfer in Single Phase Subcooler of a Small Scale Waste Heat Recovery ORC*. Energy Procedia, 2017. **129**: p. 487-494.
19. Karellas, S. and A. Schuster, *Supercritical fluid parameters in organic Rankine cycle applications*. International journal of Thermodynamics, 2008. **11**(3): p. 101-108.
20. Nguyen, T., J. Slawwhite, and K.G. Boulama, *Power generation from residual industrial heat*. Energy Conversion and Management, 2010. **51**(11): p. 2220-2229.
21. Bao, J. and L. Zhao, *A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **24**: p. 325-342.

22. Song, J. and C.-w. Gu, *Analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) systems with pure hydrocarbons and mixtures of hydrocarbon and retardant for engine waste heat recovery*. Applied Thermal Engineering, 2015. **89**: p. 693-702.
23. Wang, J., L. Zhao, and X. Wang, *A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle*. Applied Energy, 2010. **87**(11): p. 3366-3373.
24. Quoilin, S., et al. *Working fluid selection and operating maps for Organic Rankine Cycle expansion machines*. in *Proceedings of the 21st international compressor conference at Purdue*. 2012.
25. Braimakis, K., *Multi-scale thermo-economic optimization and thermodynamic assessment of energetic and exergetic efficiency improvement concepts of Organic Rankine Cycle*. 2018.
26. Ρουμπεδάκης, Τ.Χ., *Μελέτη της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος τριπαραγωγής μικρής κλίμακας με χρήση υπερκρίσιμου κύκλου ORC*. 2014.
27. Gao, H., et al., *Performance analysis and working fluid selection of a supercritical organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery*. Energies, 2012. **5**(9): p. 3233-3247.
28. Chen, H., et al., *A supercritical Rankine cycle using zeotropic mixture working fluids for the conversion of low-grade heat into power*. Energy, 2011. **36**(1): p. 549-555.
29. Yuksek, E.L. and P. Mirmobin. *Waste heat utilization of main propulsion engine jacket water in marine application*. in *Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems, Bruxelles, Belgium*. 2015.
30. Allouache, A., et al., *Simulation of organic Rankine cycle power generation with exhaust heat recovery from a 15 liter diesel engine*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2015. **8**(2): p. 227-238.
31. Song, J., Y. Song, and C.-w. Gu, *Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines*. Energy, 2015. **82**: p. 976-985.
32. Peris, B., J. Navarro-Esbrí, and F. Molés, *Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery*. Applied Thermal Engineering, 2013. **61**(2): p. 364-371.
33. Bause, T., et al. *Cogeneration with ORC at elbe-stahlwerke feralpi EAF shop*. in *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference and Exposition, Indianapolis, IN, USA*. 2014.
34. Vaja, I. and A. Gambarotta, *Internal combustion engine (ICE) bottoming with organic Rankine cycles (ORCs)*. Energy, 2010. **35**(2): p. 1084-1093.
35. Leontaritis, A.-D., et al. *Experimental study on a low temperature ORC unit for onboard waste heat recovery from marine diesel engines*. in *3rd International Seminar on ORC Power Systems*. 2015.
36. Kang, S.H., *Design and experimental study of ORC (organic Rankine cycle) and radial turbine using R245fa working fluid*. Energy, 2012. **41**(1): p. 514-524.
37. Borsukiewicz-Gozdur, A., *Experimental investigation of R227ea applied as working fluid in the ORC power plant with hermetic turbogenerator*. Applied Thermal Engineering, 2013. **56**(1-2): p. 126-133.
38. Oyewunmi, O.A. and C.N. Markides, *Effect of working-fluid mixtures on organic Rankine cycle systems: Heat transfer and cost analysis*. 2015.
39. Alberty, R.A., *Chemical thermodynamic properties of isomer groups*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1983. **22**(3): p. 318-321.
40. Bhattacharyya, S., et al., *Optimization of a CO<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> cascade system for refrigeration and heating*. International Journal of Refrigeration, 2005. **28**(8): p. 1284-1292.

41. Mota-Babiloni, A., et al., *Drop-in energy performance evaluation of R1234yf and R1234ze (E) in a vapor compression system as R134a replacements*. Applied Thermal Engineering, 2014. **71**(1): p. 259-265.
42. <https://ec.europa.eu/eurostat/news/themes-in-the-spotlight/energy-prices-2019>.
43. <http://www.eurorefrigerant.com/5-r134a-r134-refrigerant-gas-cylinders>.
44. [www.hariomenterprises.in.net](http://www.hariomenterprises.in.net).
45. <http://www.igsd.org/wp-content/uploads/2016/07/SL-MAC-18-July-as-Delivered1.pdf>.
46. <https://www.mytub.co.uk/a-gas-r1234ze-refrigerant-rental-cylinder-14kg-product-728363>.
47. <http://www.eurorefrigerant.com/17-r1234yf-refrigerant-gas-cylinders-honeywell>.
48. [www.eurorefrigerant.com/18-r600a-r290-refrigerant-gas-propane-isobutane](http://www.eurorefrigerant.com/18-r600a-r290-refrigerant-gas-propane-isobutane).