



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ  
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ  
ΧΑΜΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**Αντίοχου Γεωργίας**

Επιβλέπων: **Βουτσάς Επαμεινώνδας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα  
Σεπτέμβριος 2023



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Επαμεινώνδα Βουτσά, Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για το θέμα που μου εμπιστεύθηκε και την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση αυτού. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μεταδιδακτορικό ερευνητή, κύριο Βασίλη Κουλοχέρη, που συνέβαλε εμπράκτως στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.





## Περίληψη

Στην σύγχρονη εποχή η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση έχει φτάσει σε πρωτόγνωρα επίπεδα. Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που απορρέουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και η ανάγκη συνετής αξιοποίησης των διαθέσιμων αποθεμάτων των συμβατικών πηγών ενέργειας επιβάλλουν τη μελέτη και ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης ενέργειας χαμηλής ποιότητας. Μία τέτοια τεχνολογία είναι και τα οργανικά κύκλα Rankine (ORC), που αποτελούν μία μέθοδο μετατροπής θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαφορά τους από τα συμβατικά είναι ότι λειτουργούν με οργανικά ρευστά αντί νερού, που εξατμίζονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η απαιτούμενη θερμότητα για την εξάτμιση παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η γεωθερμική και η ενέργεια της βιομάζας, ή από θερμικά υπόλοιπα βιομηχανικών μονάδων και μηχανών εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών που προκύπτουν από τη χρήση συμβατικών καυσίμων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση του οργανικού κύκλου Rankine και η προσομοίωσή του στο λογισμικό Aspen HYSYS, χρησιμοποιώντας ως πηγή ενέργειας, θερμότητα σε διάφορα θερμοκρασιακά επίπεδα, από 120 ως και 450°C. Ως εργαζόμενα μέσα, επιλέγονται τα ρευστά ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, τολουόλιο, R152a, R134a, R161, R1234yf R1233zd(e) και η μεθανόλη. Η πλειοψηφία των ουσιών αυτών συνδυάζουν εύκολη διαθεσιμότητα με σχετική ασφάλεια και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Για τη θερμοδυναμική μοντελοποίηση επιλέγεται το μοντέλο REFPROP και η καταστατική εξίσωση Peng-Robinson (PR), για την οποία εκτιμώνται οι τιμές της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης μέσα από προσαρμογή σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Η αξιολόγηση των μοντέλων γίνεται μέσω των αποκλίσεων των προβλέψεών τους από πειραματικές τιμές τάσης ατμών, όγκου κορεσμού, θερμοχωρητικότητας κορεσμού και ενθαλπίας εξάτμισης, που ανακτώνται από τη βάση δεδομένων του NIST. Τα σχετικά σφάλματα του REFPROP είναι μικρότερα από 2,5%, ενώ το μέγιστο της PR αγγίζει το 12%, υποδεικνύοντας ότι καταλληλότερο είναι το πρώτο μοντέλο. Για κάθε εργαζόμενο μέσο επιλέγονται οι λειτουργικές συνθήκες που μεγιστοποιούν το θερμικό και τον ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης του κύκλου για παραγωγή 100 kW ισχύος στον στρόβιλο, εξάτμιση από γεωθερμικό ρευστό στους 200°C και συμπύκνωση από νερό ψύξης στους 20°C. Τα ξηρά ρευστά, δηλαδή οι υδρογονάνθρακες, και τα ισεντροπικά, οι υδροφθοροολεφίνες, δεν απαιτούν υπερθέρμανση στον εξατμιστήρα. Το ισοπεντάνιο επιτυγχάνει υψηλή θερμική απόδοση, ικανοποιητική εξεργειακή, χαμηλή μαζική παροχή και μικρή απαίτηση νερού ψύξης. Υψηλότερη εξεργειακή απόδοση αλλά και διπλάσια παροχή σημειώνεται με το R1233zd(e), ενώ εξεργειακά προηγείται το ισοβουτάνιο, που έχει τη δεύτερη ελάχιστη μαζική παροχή και τον τρίτο μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης. Ελάχιστες αποδόσεις και μέγιστες παροχές έχουν τα R1234yf και R134a, ενώ η δημιουργία κενού στον συμπυκνωτήρα καθιστά το τολουόλιο και τη μεθανόλη πολύ καλές επιλογές ρευστών, με μοναδικό μειονέκτημα τις μέτριες εξεργειακές αποδόσεις. Η χρήση transcritical συνθηκών οδηγεί σε αυξημένες τιμές των αποδόσεων κατά περίπου 12%, αλλά και μειωμένες μαζικές παροχές, κατά 15%. Οι καθαρά υπερκρίσιμες συνθήκες επιφέρουν αποδόσεις χαμηλότερες από 5%, συνεπώς δεν μελετώνται περαιτέρω. Τα αποτελέσματα των δύο θερμοδυναμικών μοντέλων είναι πολύ κοντινά, επομένως οι υπόλοιπες προσομοιώσεις πραγματοποιούνται μόνο με το REFPROP. Η λειτουργία με transcritical συνθήκες απαιτεί την αξιοποίηση θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασίας. Μελετώνται, λοιπόν, εναλλακτικές πηγές στους 120, 150, 250°C για το γεωθερμικό ρευστό και στους 300, 400, 450°C για διαθέσιμα

καυσαέρια. Τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή το R1234yf, οι HFCs και το ισοβουτάνιο, συνδυάζονται αποδοτικότερα με πηγές στους 150-200°C. Το ισοπεντάνιο αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή εργαζόμενου μέσου με πηγές θερμότητας θερμοκρασίας στο εύρος 120-300°C και συνδυάζεται βέλτιστα με τους 250°C, όπως και το R1233zd(e), ενώ για θερμότερες πηγές προτιμάται η μεθανόλη, που, μαζί με το τολουόλιο, απαιτούν θερμότητα τουλάχιστον στους 400°C. Μελετώνται ως εργαζόμενα μέσα και μίγματα, που περιέχουν τα δύο αλκάνια, τις δύο υδροφθοροολεφίνες, ισοπεντάνιο και R134a και ισοβουτάνιο και R1234yf. Τα ζεοτροπικά μίγματα αναδεικνύονται πιο επωφελή από εξεργειακή σκοπιά σε σχέση με τα καθαρά ρευστά, με τη μαζική τους παροχή να είναι χαμηλότερη και την ενεργειακή απόδοση υψηλότερη από του πτητικότερου συστατικού τους, ενώ το αζεοτροπικό μίγμα R1234yf-ισοβουτανίου δεν επιφέρει κάποια βελτίωση. Στο απλό κύκλο προστίθεται ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας, που χρησιμοποιείται είτε για εσωτερική ανάκτηση είτε για προθέρμανση από την πηγή. Η πρώτη διάταξη επιφέρει σημαντικές μειώσεις της μαζικής παροχής του νερό ψύξης, περί του 17,5%, και ικανοποιητική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης, γύρω στο 20%. Η δεύτερη οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, υψηλότερη από 40%, με ελαφριά αύξηση των μαζικών παροχών. Μεγίστης σημασίας αναδεικνύεται και η επιλογή της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, με τη βέλτιστη πηγή να ενισχύει σημαντικά τα αποτελέσματα στην πρώτη διάταξη και τη μείωση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας να μειώνει τα ποσοστά βελτίωσης στη δεύτερη παραλλαγή του κύκλου σε σχέση με το απλό σύστημα.

**Φράσεις-Κλειδιά:** Οργανικό Κύκλο Rankine, REFPROP, Peng-Robinson, Transcritical Συνθήκες, Γεωθερμικό Ρευστό, Καυσαέρια, Μίγματα Οργανικών Ουσιών, Εναλλάκτης Ανάκτησης Θερμότητας, Προθερμαντήρας

## Abstract

Nowadays, global energy consumption has reached unprecedented levels. The environmental risks emerging from the use of fossil fuels and the need for prudent utilization of the available reserves of conventional energy sources make it necessary to study and develop technologies which exploit low quality energy. One such technology is Organic Rankine Cycles (ORC), which constitute a method of converting low temperature heat into electricity. Its difference from the conventional steam cycle is that it works with organic fluids instead of water, which evaporate at lower temperatures. The required heat for vaporization is supplied by renewable energy sources such as solar, geothermal and biomass energy, or by waste heat from industrial processes and internal combustion engines, resulting in a reduction in harmful emissions from the combustion of conventional fossil fuels.

This work is focused on modeling and simulating the organic Rankine cycle in Aspen HYSYS software, using as energy source heat at various temperature levels ranging from 120 to 450°C. Isobutane, isopentane, toluene, R152a, R134a, R161, R1234yf R1233zd(e) and methanol are selected as working fluids. The majority of these substances combine availability with relative safety and environmental friendliness. The modeling of the system is carried out via REFPROP model and the Peng-Robinson equation of state (PR), for which values of the volume translation parameter are estimated through fitting to corresponding experimental data. The models are evaluated through the deviation of their predictions from experimental values of vapor pressure, saturated volume, saturated heat capacity and enthalpy of vaporization retrieved from the NIST database. Relative errors of REFPROP are less than 2,5%, while the maximum of PR reaches 12%, indicating that the former model is more suitable. For each working fluid, the operating conditions that maximize the thermal and total exergy efficiency are chosen for the production of 100 kW of power in the turbine, vaporization by geothermal fluid at 200°C and condensation by cooling water at 20°C. Dry fluids, i.e. hydrocarbons, and isentropic fluids, hydrofluoroolefins, do not require superheating in the evaporator. Isopentane leads to high thermal efficiency, satisfactory exergy efficiency, low mass flow rate and low cooling water requirement. Higher exergy efficiency, but also twice the mass flow rate is obtained when using R1233zd(e), while isobutane attains the maximum exergy efficiency along with the second lowest flow rate and the third highest thermal efficiency. R1234yf and R134a lead to the lowest efficiencies and the highest mass flow rates, while the use of subatmospheric pressure in the condenser makes toluene and methanol very good options, with the only drawback of giving moderate exergy efficiencies. The use of transcritical conditions leads to efficiency values increased by approximately 12%, combined with mass flow rates reduced by 15%. Supercritical conditions lead to efficiencies lower than 5%, therefore they are not investigated any further. The two models provide very close results, so only REFPROP is used in the remaining simulations. Transcritical conditions require the exploitation of higher temperature heat, therefore alternative sources are studied at 120, 150, 250°C for the geothermal fluid and at 300, 400, 450°C for available waste heat. Low critical temperature fluids, ie R1234yf, HFCs and isobutane, are more efficiently combined with sources at 150-200°C. Isopentane is the best choice when exploiting heat in the temperature range of 120-300 °C and is evaporated optimally by heat at 250°C, along with R1233zd(e). For higher temperatures methanol is the best choice, which, together with toluene, require heat at least at 400°C. Mixtures are also studied as working fluids, containing the two alkanes, the two hydrofluoroolefins, isopentane and R134a and

isobutane and R1234yf. Zeotropic mixtures are more beneficial than pure substances from an exergy perspective, having lower mass flow rate and higher thermal efficiency compared to their most volatile component, while the azeotropic mixture of R1234yf-isobutane does not bring about any improvement. An additional heat exchanger is added to the basic cycle, used either for internal heat recovery or for preheating by the heat source. The first configuration leads to significant reduction of the cooling water mass flow rate, around 17,5%, and to a satisfactory increase in the thermal efficiency, around 20%. The second arrangement leads to a significant increase in energy efficiency, over 40%, along with a slight increase in mass flow rates. The choice of the temperature of the heat source is also of utmost importance, with the optimal one in the first architecture significantly enhancing the results and the lower one in the second arrangement reducing the improvement rates compared to the basic ORC.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle, REFPROP, Peng-Robinson, Transcritical Conditions, Geothermal Fluid, Waste Heat, Organic Mixtures, Recuperator, Preheater

# Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1. Κίνητρο Μελέτης Οργανικών Κύκλων Rankine .....	1
1.2. Μηχανές-Κύκλα Παραγωγής Ισχύος.....	3
1.3. Εξέργεια: Ισοζύγιο & Καταστροφή.....	5
1.4. Σύγκριση Οργανικού & Συμβατικού Κύκλου Rankine.....	6
1.5. Αγορά των Οργανικών Κύκλων Rankine.....	8
<b>2. Ανασκόπηση Οργανικού Κύκλου Rankine.....</b>	<b>13</b>
2.1. Εργαζόμενα Μέσα .....	13
2.2. Πηγές Θερμότητας .....	17
2.3. Παραλλαγές στη Διάταξη του Κύκλου.....	21
<b>3. Προσομοίωση &amp; Καθορισμός Συστήματος.....</b>	<b>30</b>
3.1. Σχεδιασμός Στοιχείων του Κύκλου .....	30
3.2. Θερμοδυναμικά Μοντέλα.....	32
3.3. Επιλογή Εργαζόμενων Μέσων .....	35
3.4. Επιλογή Πηγής Θερμότητας & Ψυκτικού Μέσου.....	40
3.5. Παραδοχές Ανάλυσης.....	41
3.6. Επιλογή Λογισμικού Προσομοίωσης.....	43
<b>4. Αξιολόγηση &amp; Σύγκριση Θερμοδυναμικών Μοντέλων .....</b>	<b>46</b>
4.1. Πειραματικά Δεδομένα.....	46
4.2. Προβλέψεις Θερμοδυναμικών Μοντέλων.....	49
4.3. Προσαρμογή Παραμέτρων Διόρθωσης Όγκου Υγρής Φάσης .....	51
4.4. Σφάλματα Θερμοδυναμικών Μοντέλων & Επιλογή Βέλτιστου .....	55
<b>5. Απλό Οργανικό Κύκλο Rankine με Καθαρές Ουσίες.....</b>	<b>61</b>
5.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών .....	61
5.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Απλού Κύκλου .....	70
<b>6. Υπερκρίσιμο Οργανικό Κύκλο Rankine με Καθαρές Ουσίες .....</b>	<b>81</b>
6.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών .....	81
6.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Transcritical & Υπερκρίσιμου Κύκλου .....	86
6.3. Σύγκριση Υποκρίσιμου & Transcritical Κύκλου .....	97
<b>7. Εναλλακτικές Πηγές Θερμότητας .....</b>	<b>103</b>
7.1. Επιλογή Πηγών Θερμότητας & Λειτουργικών Συνθηκών ανά Πηγή .....	103
7.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εναλλακτικών Πηγών Θερμότητας .....	107

7.2.1.	Αποτελέσματα ανά Πηγή Θερμότητας.....	107
7.2.2.	Αποτελέσματα ανά Οργανικό Ρευστό.....	117
7.2.3.	Συγκεντρωτικά Διαγράμματα.....	126
<b>8.</b>	<b>Απλό Οργανικό Κύκλο Rankine με Μίγματα .....</b>	<b>130</b>
8.1.	Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών.....	130
8.2.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης Απλού Κύκλου με Μίγματα.....	140
8.2.1.	Συνολική Αξιολόγηση Εργαζόμενων Μέσων .....	140
8.2.2.	Σύγκριση Μιγμάτων με τα Καθαρά Συστατικά τους .....	142
<b>9.</b>	<b>Σύνθετες Διατάξεις του Οργανικού Κύκλου Rankine.....</b>	<b>148</b>
9.1.	Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών.....	148
9.2.	Σύγκριση Απλής & Σύνθετων Διατάξεων .....	154
9.3.	Εξέταση Σύνθετων Διατάξεων με Εναλλακτικές Πηγές Θερμότητας .....	162
9.3.1.	Βέλτιστη Θερμοκρασία Γεωθερμικού Ρευστού στο Recuperated ORC .....	162
9.3.2.	Σταθερή Θερμοκρασία Γεωθερμικού Ρευστού στο Preheated ORC.....	168
<b>10.</b>	<b>Συνολική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων &amp; Σύγκριση με Βιβλιογραφικά Αποτελέσματα .....</b>	<b>173</b>
<b>11.</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>175</b>
<b>12.</b>	<b>Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία.....</b>	<b>178</b>
	<b>Παράρτημα Α: Ιδιότητες Συνήθων Οργανικών Ρευστών .....</b>	<b>180</b>
	<b>Παράρτημα Β: Μοντελοποίηση R161, R1234yf και R1233zd(e) μέσω Peng-Robinson .....</b>	<b>183</b>
	<b>Παράρτημα Γ: Εκτίμηση Παραμέτρου Διόρθωσης Όγκου Υγρής Φάσης μέσω του Λογισμικού .....</b>	<b>184</b>
	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές .....</b>	<b>186</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1.1.</b> Εξέλιξη παγκόσμιων εκπομπών CO <sub>2</sub> σε διάστημα εκατονταετίας ανά καύσιμο ή βιομηχανία.	1
<b>Σχήμα 1.1.2.</b> Εκπομπές CO <sub>2</sub> από την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου.....	1
<b>Σχήμα 1.2.1.</b> Διάγραμμα ροής και θερμοκρασίας-εντροπίας απλού κύκλου Rankine με ατμό. ....	4
<b>Σχήμα 1.4.1.</b> Διαφορές στη μορφή του διαγράμματος T-s μεταξύ του νερού και συνήθων οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενα μέσα στα οργανικά κύκλα Rankine.....	6
<b>Σχήμα 1.5.1.</b> Αριθμός νέων μονάδων ORC και συνολική δυναμικότητα αυτών σε παγκόσμια κλίμακα σε διάστημα ενός έτους για τις δεκαετίες 1975-2015. ....	9
<b>Σχήμα 1.5.2.</b> Διάκριση συνολικής δυναμικότητας ORC & γεωγραφική κατανομή της έως τις αρχές του έτους 2016 ανά κατηγορία θερμικής πηγής. ....	10
<b>Σχήμα 1.5.3.</b> Υφιστάμενες μονάδες ORC έως τον Αύγουστο του 2023. ....	10
<b>Σχήμα 1.5.4.</b> Μερίδιο της συνολικής δυναμικότητας και αριθμός εγκαταστάσεων ORC ανά κατασκευαστή (έως 2016).....	11
<b>Σχήμα 2.1.1.</b> Αποτύπωση διεργασιών απλού κύκλου Rankine σε διάγραμμα T-s και διαφορές στην μορφή των καμπυλών κορεσμένου ατμού για τις τρεις κατηγορίες ρευστών. ....	15
<b>Σχήμα 2.1.2.</b> Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας απλού ORC με ζεοτροπικό μίγμα οργανικών ρευστών ως εργαζόμενο μέσο.....	16
<b>Σχήμα 2.2.1.</b> Διαφορές στην μεταφορά θερμότητας από κλειστή και ανοιχτή θερμική πηγή σε ένα οργανικό κύκλο Rankine.....	17
<b>Σχήμα 2.3.1.</b> Διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας απλού: Α) υποκρίσιμου, Β) υποκρίσιμου με υπερθέρμανση, Γ) transcritical κύκλου Rankine.....	21
<b>Σχήμα 2.3.2.</b> Διεργασίες υποκρίσιμου, transcritical και υπερκρίσιμου ORC, όπως αποτυπώνονται σε ένα διάγραμμα T-s.....	22
<b>Σχήμα 2.3.3.</b> Διεργασία μεταφοράς θερμότητας στο λέβητα του υποκρίσιμου (κίτρινη καμπύλη) και transcritical (μπλε καμπύλη) ORC, όπως αποτυπώνονται σε ένα διάγραμμα T-Q. ....	23
<b>Σχήμα 2.3.4.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με recuperator.....	24
<b>Σχήμα 2.3.5.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με προθερμαντήρα.....	24
<b>Σχήμα 2.3.6.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με αναγέννηση.....	25
<b>Σχήμα 2.3.7.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση. ....	26
<b>Σχήμα 2.3.8.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με δύο επίπεδα πίεσης. ....	27
<b>Σχήμα 2.3.9.</b> Διάγραμμα ροής και T-s τριγωνικού οργανικού κύκλου Rankine . ....	27
<b>Σχήμα 2.3.10.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με δοχείο ισοροπίας.....	28
<b>Σχήμα 2.3.11.</b> Διάγραμμα ροής και T-s οργανικών κύκλων Rankine τύπου καταρράκτη.....	29
<b>Σχήμα 3.1.1.</b> Περιοχή βέλτιστης λειτουργίας τριών τύπων στροβίλων για τρεις πηγές θερμότητας σε συστήματα ORC.....	30
<b>Σχήμα 3.2.1.</b> Πρόβλεψη γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού μέσω PR και SRK για τρία αλκάνια διαφορετικού μοριακού βάρους.....	33
<b>Σχήμα 3.2.2.</b> Πρόβλεψη τάσης ατμών μέσω PR και SRK για τρία αλκάνια διαφορετικού μοριακού βάρους.....	34
<b>Σχήμα 3.3.1.</b> Επιλεγμένα καθαρά οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα στο οργανικό κύκλο Rankine με σειρά αυξανόμενης κρίσιμης θερμοκρασίας.....	38
<b>Σχήμα 3.3.2.</b> Κοινό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας επιλεγμένων καθαρών οργανικών ρευστών και νερού.....	38
<b>Σχήμα 3.3.3.</b> Κοινό διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας επιλεγμένων καθαρών οργανικών ρευστών και νερού..	39
<b>Σχήμα 3.6.1.</b> Μη δυνατότητα εισαγωγής αρνητικής τιμής στην παράμετρο διόρθωσης όγκου (VTHPR) μέσω Aspen Properties.....	45
<b>Σχήμα 3.6.2.</b> Δυνατότητα εισαγωγής αρνητικής τιμής στην παράμετρο διόρθωσης όγκου (Vol. Trans.) μέσω HYSYS.....	45
<b>Σχήμα 3.6.3.</b> Διαδικασία ανάκτησης πειραματικών δεδομένων του NIST μέσω του λογισμικού Aspen Plus και διαθέσιμες ιδιότητες.....	45
<b>Σχήμα 4.1.1.</b> Καμπύλες τάσης ατμών-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC..	47



<b>Σχήμα 4.1.2.</b> Καμπύλες θερμοκρασίας-γραμμομοριακού όγκου κορεσμού από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC.....	47
<b>Σχήμα 4.1.3.</b> Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC.....	48
<b>Σχήμα 4.1.4.</b> Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου ατμού-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 6 από τα 9 ρευστά του ORC.....	48
<b>Σχήμα 4.1.5.</b> Καμπύλες λανθάνουσας θερμότητας εξατμίσης-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC.....	49
<b>Σχήμα 4.2.1.</b> Καμπύλες τάσης ατμών-θερμοκρασίας μέσω REFPROP και PR για τα 9 ρευστά του ORC.....	50
<b>Σχήμα 4.2.2.</b> Καμπύλες θερμοκρασίας-γραμμομοριακού όγκου κορεσμού μέσω REFPROP και PR για τα 9 ρευστά του ORC.....	50
<b>Σχήμα 4.2.3.</b> Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού-θερμοκρασίας μέσω REFPROP και PR για τα 9 ρευστά του ORC.....	50
<b>Σχήμα 4.2.4.</b> Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου ατμού-θερμοκρασίας μέσω REFPROP και PR για τα 6 από τα 9 ρευστά του ORC.....	51
<b>Σχήμα 4.2.5.</b> Καμπύλες λανθάνουσας θερμότητας εξατμίσης-θερμοκρασίας μέσω REFPROP και PR για τα 9 ρευστά του ORC.....	51
<b>Σχήμα 4.3.1.</b> Τάση παραμέτρου διόρθωσης του όγκου κορεσμένου υγρού με χρήση της PR για εύρος θερμοκρασιών 0,45-0,9 της κρίσιμης τιμής ανά ρευστό.....	52
<b>Σχήμα 4.4.1.</b> %Μέσο, για όλα τα ρευστά, σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο για το θερμοκρασιακό εύρος από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.....	55
<b>Σχήμα 4.4.2.</b> %Μέσο, για όλα τα ρευστά, σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο για το εύρος θερμοκρασιών 10-200°C.....	56
<b>Σχήμα 5.1.1.</b> Διάγραμμα ροής απλού ORC.....	61
<b>Σχήμα 5.1.2.</b> Μείωση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα, ενδεικτικά για το R1233zd(e) μέσω REFPROP.....	62
<b>Σχήμα 5.1.3.</b> Κοινό διάγραμμα της τάσης του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα μέσω REFPROP.....	62
<b>Σχήμα 5.1.4.</b> Κοινό διάγραμμα της τάσης του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα μέσω REFPROP.....	63
<b>Σχήμα 5.1.5.</b> Μείωση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο του στροβίλου, ενδεικτικά για το R152a μέσω REFPROP.....	63
<b>Σχήμα 5.1.6.</b> Κοινό διάγραμμα της τάσης του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστήρα μέσω REFPROP.....	64
<b>Σχήμα 5.1.7.</b> Κοινό διάγραμμα της τάσης του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστήρα μέσω REFPROP.....	64
<b>Σχήμα 5.1.8.</b> Αύξηση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας, ενδεικτικά για το ισοπεντάνιο μέσω REFPROP.....	65
<b>Σχήμα 5.1.9.</b> Μείωση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας, ενδεικτικά για το ισοπεντάνιο μέσω REFPROP.....	65
<b>Σχήμα 5.1.10.</b> Βαθμός υπερθέρμανσης των οργανικών ρευστών από τις κορεσμένες συνθήκες στον εξατμιστήρα, ανάλογα με την κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα T-s.....	67
<b>Σχήμα 5.1.11.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με $\Delta T_{pinch}=8,1^{\circ}\text{C}$ για το R152a μέσω REFPROP.....	68
<b>Σχήμα 5.1.12.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με $\Delta T_{pinch}=4,1^{\circ}\text{C}$ για το R152a μέσω REFPROP.....	68
<b>Σχήμα 5.1.13.</b> Αποτύπωση διεργασιών υποκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.....	69
<b>Σχήμα 5.1.14.</b> Αποτύπωση διεργασιών υποκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.....	69
<b>Σχήμα 5.1.15.</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC συναρτήσει της κρίσιμης θερμοκρασίας των επιλεγμένων εργαζόμενων μέσων για κοινές λειτουργικές συνθήκες.....	70



<b>Σχήμα 5.2.1.</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	70
<b>Σχήμα 5.2.2.</b> Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	71
<b>Σχήμα 5.2.3.</b> Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	72
<b>Σχήμα 5.2.4.</b> Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού ανά ρευστό στο υποκρίσιμο απλό ORC μέσω REFPROP.....	73
<b>Σχήμα 5.2.5.</b> Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού ανά ρευστό στο υποκρίσιμο απλό ORC μέσω Peng-Robinson.....	74
<b>Σχήμα 5.2.6.</b> Δείκτης αντίστροφου ειδικού έργου ανά ρευστό και θερμοδυναμικό μοντέλο στο υποκρίσιμο απλό ORC.....	74
<b>Σχήμα 5.2.7.</b> Συνάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC και του λόγου πιέσεων στο κύκλο για όλα τα ρευστά ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	75
<b>Σχήμα 5.2.8.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο της αντλίας του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	76
<b>Σχήμα 5.2.9.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της αντλίας του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	76
<b>Σχήμα 5.2.10.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	77
<b>Σχήμα 5.2.11.</b> Μεταβολή της καταστροφής εξέργειας ανά συσκευή και της συνολικής στο υποκρίσιμο απλό ORC για το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο.....	79
<b>Σχήμα 6.1.1.</b> Διάγραμμα ροής υπερκρίσιμου ORC.....	81
<b>Σχήμα 6.1.2.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στο λέβητα του transcritical ORC με χρήση του ισοβουτανίου μέσω REFPROP.....	83
<b>Σχήμα 6.1.3.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον συμπυκνωτήρα του υπερκρίσιμου ORC με χρήση του ισοβουτανίου μέσω REFPROP.....	84
<b>Σχήμα 6.1.4.</b> Αποτύπωση διεργασιών transcritical απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.....	85
<b>Σχήμα 6.1.5.</b> Αποτύπωση διεργασιών transcritical απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.....	85
<b>Σχήμα 6.1.6.</b> Αποτύπωση διεργασιών υπερκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1234yf μέσω Peng-Robinson.....	85
<b>Σχήμα 6.1.7.</b> Αποτύπωση διεργασιών υπερκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1234yf μέσω Peng-Robinson.....	86
<b>Σχήμα 6.2.1.</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	87
<b>Σχήμα 6.2.2.</b> Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	87
<b>Σχήμα 6.2.3.</b> Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	88
<b>Σχήμα 6.2.4.</b> Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο transcritical απλό ORC μέσω REFPROP.....	89
<b>Σχήμα 6.2.5.</b> Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο transcritical απλό ORC μέσω Peng-Robinson.....	89
<b>Σχήμα 6.2.6.</b> Συνάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του transcritical απλού ORC και του λόγου πιέσεων για όλα τα ρευστά ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	90
<b>Σχήμα 6.2.7.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο της αντλίας του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	91
<b>Σχήμα 6.2.8.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της αντλίας του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	91
<b>Σχήμα 6.2.9.</b> Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	92

<b>Σχήμα 6.2.10</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	94
<b>Σχήμα 6.2.11.</b> Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	95
<b>Σχήμα 6.2.12.</b> Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	95
<b>Σχήμα 6.2.13.</b> Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο υπερκρίσιμο απλό ORC μέσω REFPROP. ....	96
<b>Σχήμα 6.3.1.</b> %Σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.. ....	98
<b>Σχήμα 6.3.2.</b> %Σχετική μείωση της εισερχόμενης θερμότητας στο transcritical κύκλο σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.. ....	98
<b>Σχήμα 6.3.3.</b> %Σχετική αύξηση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.. ....	99
<b>Σχήμα 6.3.4.</b> %Σχετική αύξηση του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο. ....	99
<b>Σχήμα 6.3.5.</b> %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	100
<b>Σχήμα 6.3.6.</b> %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του νερού ψύξης στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο. ....	100
<b>Σχήμα 6.3.7.</b> %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του γεωθερμικού ρευστού/των καυσαερίων στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.. ....	101
<b>Σχήμα 6.3.8.</b> %Σχετική μείωση της ολικής καταστροφής εξέργειας στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.. ....	102
<b>Σχήμα 7.1.1.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το R152a και θερμοκρασία πηγής 200°C.....	104
<b>Σχήμα 7.1.2.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το R152a και θερμοκρασία πηγής 250°C.....	104
<b>Σχήμα 7.2.2.1.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα μαζικών παροχών νερού γεωθερμίας και καυσαερίων με εργαζόμενο μέσο στο απλό ORC το i-C4. ....	118
<b>Σχήμα 7.2.2.2.</b> Τάση εξεργειακής απόδοσης εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας. ....	124
<b>Σχήμα 7.2.2.3.</b> Τάση καταστροφής εξέργειας στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας... ....	124
<b>Σχήμα 7.2.2.3.</b> Τάση συνολικής καταστροφής εξέργειας του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας... ....	124
<b>Σχήμα 7.2.2.5.</b> Παρουσίαση εξεταζόμενων πηγών θερμότητας για το ORC και οργανικών ρευστών κατάλληλων για καθεμία.....	125
<b>Σχήμα 7.2.3.1</b> Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.....	126
<b>Σχήμα 7.2.3.2.</b> Μεταβολή του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.. ....	127
<b>Σχήμα 7.2.3.3.</b> Μεταβολή του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.....	127
<b>Σχήμα 7.2.3.4.</b> Μεταβολή της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.....	128
<b>Σχήμα 7.2.3.5.</b> Μεταβολή της μαζικής παροχής του νερού ψύξης στο υποκρίσιμο απλό ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας... ....	128
<b>Σχήμα 7.2.3.6.</b> Μεταβολή της ολικής καταστροφής εξέργειας στο υποκρίσιμο απλό ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.....	129
<b>Σχήμα 8.1.1.</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα i-C4/i-C5 στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).....	130
<b>Σχήμα 8.1.2.</b> Εξάρτηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους δύο εναλλάκτες θερμότητας του υποκρίσιμου απλού ORC από την σύσταση του μίγματος i-C4/i-C5. ....	131

<b>Σχήμα 8.1.3.</b> Τάση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αλλαγή της σύστασης του μίγματος i-C4/i-C5. ....	131
<b>Σχήμα 8.1.4.</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα i-C4/i-C5 στην πίεση του συμπυκνωτήρα (163,4 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος.....	132
<b>Σχήμα 8.1.5.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα και στον συμπυκνωτήρα του υποκρίσιμου απλού ORC για το μίγμα i-C4/i-C5 στην βέλτιστη σύστασή του. ....	132
<b>Σχήμα 8.1.6.</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα i-C5/R134a στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).....	133
<b>Σχήμα 8.1.7.</b> Εξάρτηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους δύο εναλλάκτες θερμότητας του υποκρίσιμου απλού ORC από την σύσταση των μιγμάτων i-C5/R134a, R1234yf/i-C4 και R1234yf/R1233zd(e).....	133
<b>Σχήμα 8.1.8</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R134a/i-C5 στην πίεση του συμπυκνωτήρα (584,7 kPa)..	134
<b>Σχήμα 8.1.9.</b> Διάγραμμα φάσεων για το ζεοτροπικό μίγμα i-C4/R1234yf στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).....	135
<b>Σχήμα 8.1.10.</b> Διάγραμμα φάσεων για το ζεοτροπικό το μίγμα i-C4/R1234yf στην πίεση του συμπυκνωτήρα (450,9 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος.....	135
<b>Σχήμα 8.1.11.</b> Διάγραμμα φάσεων για το αζεοτροπικό μίγμα i-C4/R1234yf στην πίεση του συμπυκνωτήρα. (812,7 kPa).....	136
<b>Σχήμα 8.1.12.</b> Διάγραμμα T – Q στον εξατμιστήρα και στον συμπυκνωτήρα του υποκρίσιμου απλού ORC για το αζεοτροπικό μίγμα i-C4/R1234yf.....	136
<b>Σχήμα 8.1.13.</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R1233zd(e)/R1234yf στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar). ....	137
<b>Σχήμα 8.1.14.</b> Τάση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC με την αλλαγή της σύστασης του μίγματος R1234yf/ R1233zd(e).....	137
<b>Σχήμα 8.1.15.</b> Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R1233zd(e)/R1234yf στην πίεση του συμπυκνωτήρα (199,7 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος... ..	138
<b>Σχήμα 8.1.16.</b> Αποτύπωση διεργασιών απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το ζεοτροπικό μίγμα iC5/R134a 0,2/08 κατά μάζα μέσω Peng-Robinson.....	162
<b>Σχήμα 8.1.17.</b> Αποτύπωση διεργασιών απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το ζεοτροπικό μίγμα iC5/R134a 0,2/08 κατά μάζα μέσω Peng-Robinson.....	161
<b>Σχήμα 8.1.18.</b> Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο στο θερμικό βαθμό απόδοσης με μίγματα διαφόρων συστάσεων. ....	162
<b>Σχήμα 8.2.1.1.</b> Συνάρτηση εισερχομένης θερμότητας στον εξατμιστήρα και θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με καθαρά ρευστά και μίγματα.....	142
<b>Σχήμα 8.2.2.1.</b> Κοινά διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμοροής για τα μίγματα και τα καθαρά συστατικά τους.....	142
<b>Σχήμα 8.2.2.2.</b> Σχετική αλλαγή θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.....	143
<b>Σχήμα 8.2.2.3.</b> Σχετική αλλαγή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους... ..	143
<b>Σχήμα 8.2.2.4.</b> Σχετική αλλαγή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους. ....	144
<b>Σχήμα 8.2.2.5.</b> Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους... ..	145
<b>Σχήμα 8.2.2.6.</b> Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής νερού ψύξης με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους στο υποκρίσιμο απλό ORC... ..	145
<b>Σχήμα 8.2.2.7.</b> Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής γεωθερμικού ρευστού με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους στο υποκρίσιμο απλό ORC.....	146
<b>Σχήμα 8.2.2.8.</b> Σχετική αλλαγή ολικής καταστροφής εξέργειας στο υποκρίσιμο απλό ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους... ..	146
<b>Σχήμα 9.1.1.</b> Διάγραμμα ροής recuperated ORC. ....	148
<b>Σχήμα 9.1.2.</b> Αύξηση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του recuperator, ενδεικτικά για το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.....	149

<b>Σχήμα 9.1.3.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον recuperator με $\Delta T_{pinch}=9,51^{\circ}\text{C}$ με χρήση του ισοπεντανίου..	150
<b>Σχήμα 9.1.4.</b> Αποτύπωση διεργασιών recuperated ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP	150
<b>Σχήμα 9.1.5.</b> Αποτύπωση διεργασιών recuperated ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP..	151
<b>Σχήμα 9.1.6.</b> Διάγραμμα ροής preheated ORC...	151
<b>Σχήμα 9.1.7.</b> Αύξηση θερμοκράσις και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του προθερμαντήρα, ενδεικτικά για το ισοβουτανίο μέσω REFPROP..	152
<b>Σχήμα 9.1.8.</b> Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον προθερμαντήρα με $\Delta T_{pinch}=16^{\circ}\text{C}$ με χρήση του ισοβουτανίου..	153
<b>Σχήμα 9.1.9.</b> Αποτύπωση διεργασιών preheated ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R134a μέσω REFPROP..	153
<b>Σχήμα 9.1.10.</b> Αποτύπωση διεργασιών preheated ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R134a μέσω REFPROP..	153
<b>Σχήμα 9.2.1.</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC. ....	154
<b>Σχήμα 9.2.2.</b> Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC. ....	155
<b>Σχήμα 9.2.3.</b> Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.....	155
<b>Σχήμα 9.2.4.</b> Μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC..	157
<b>Σχήμα 9.2.5.</b> Μαζική παροχή νερού ψύξης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.....	157
<b>Σχήμα 9.2.6.</b> Μαζική παροχή γεωθερμικού νερού ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC..	158
<b>Σχήμα 9.2.7.</b> %Σχετική μείωση $Q_{in}$ συναρτήσει του λόγου $Q_{εναλλασσόμενη}/Q_{in}$ στο recuperated κύκλο .....	160
<b>Σχήμα 9.2.8.</b> %Σχετική μείωση $Q_{in}$ συναρτήσει του λόγου $Q_{εναλλασσόμενη}/Q_{in}$ στο preheated κύκλο... ..	160
<b>Σχήμα 9.2.9.</b> Αποδοτικότητα recuperator και preheater στις δύο μελετώμενες σύνθετες διατάξεις του ORC.....	162
<b>Σχήμα 9.3.1.1.</b> Θερμικός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.....	164
<b>Σχήμα 9.3.1.2.</b> Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.....	164
<b>Σχήμα 9.3.1.3.</b> Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.....	165
<b>Σχήμα 9.3.1.4.</b> Μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.....	166
<b>Σχήμα 9.3.1.5.</b> Μαζική παροχή νερού ψύξης στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό... ..	166
<b>Σχήμα 9.3.1.6.</b> Ολική καταστροφή εξέργειας στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό... ..	167
<b>Σχήμα 9.3.2.1.</b> %Σχετική μεταβολή θερμοκράσις βαθμού απόδοσης του preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C..	170
<b>Σχήμα 9.3.2.2.</b> %Σχετική μεταβολή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.....	170
<b>Σχήμα 9.3.2.3.</b> %Σχετική μεταβολή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.....	171
<b>Σχήμα 9.3.2.4.</b> %Σχετική μεταβολή μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.....	171
<b>Σχήμα 9.3.2.5.</b> %Σχετική μεταβολή μαζικής παροχής νερού ψύξης στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό νερό στους 120 και στους 200°C .....	172
<b>Σχήμα 9.3.2.6.</b> %Σχετική μεταβολή ολικής καταστροφής εξέργειας στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με νερό γεωθερμίας στους 120 και στους 200°C.....	172



## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.4.1.</b> Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του οργανικού κύκλου Rankine σε σχέση με το συμβατικό.....	8
<b>Πίνακας 1.5.1.</b> Εφαρμογές και κύριοι κατασκευαστές συστημάτων ORC .....	11
<b>Πίνακας 2.2.1.</b> Χαρακτηριστικά κύριων θερμικών πηγών στα οργανικά κύκλα Rankine .....	21
<b>Πίνακας 3.2.1</b> Γενικευμένες παράμετροι τροποποίησης του ελκτικού όρου του Twu ανάλογα με το αν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την κρίσιμη. ....	35
<b>Πίνακας 3.3.1.</b> Τελική επιλογή καθαρών οργανικών ρευστών ως εργαζόμενα μέσα στο σύστημα ORC...37	
<b>Πίνακας 3.4.1.</b> Τυπική σύσταση καυσαερίων MEK, που αποτελούν τη δεύτερη υπό εξέταση πηγή θερμότητας στο οργανικό κύκλο Rankine. ....	41
<b>Πίνακας 4.1.1.</b> Θερμοκρασιακό εύρος λήψης πειραματικών τιμών τάσης ατμού, γραμμομοριακού όγκου κορεσμού και γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμού από τη βάση δεδομένων του NIST. ....	46
<b>Πίνακας 4.3.1.</b> Τελικές τιμές διόρθωσης όγκου κορεσμένου υγρού για την PR με όλες τις εξεταζόμενες μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε πειραματικές δεδομένα... ..	53
<b>Πίνακας 4.3.2.</b> %Σχετικά σφάλματα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της απλής Peng-Robinson και με τις μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε εύρος θερμοκρασιών από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο... ..	53
<b>Πίνακας 4.3.3.</b> %Σχετικά σφάλματα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της απλής Peng-Robinson και με τις μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε εύρος θερμοκρασιών 10-200°C. ....	53
<b>Πίνακας 4.3.4.</b> %Σχετική βελτίωση πρόβλεψης όγκου κορεσμένου υγρού με χρήση των προσαρμοσμένων τιμών $c$ στο εύρος 10-200°C σε σχέση με τη μη διορθωμένη PR... ..	54
<b>Πίνακας 4.4.1</b> %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με το REFPROP για το θερμοκρασιακό εύρος από το κρίσιμο έως το τριπλό σημείο. ....	57
<b>Πίνακας 4.4.2.</b> %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με το REFPROP για το τυπικό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ενός ORC.....	57
<b>Πίνακας 4.4.3.</b> %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με την Peng-Robinson για το θερμοκρασιακό εύρος από το κρίσιμο έως το τριπλό σημείο... ..	58
<b>Πίνακας 4.4.4.</b> %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με την Peng-Robinson για το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ενός ORC.....	58
<b>Πίνακας 5.1.1.</b> Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό.. ..	67
<b>Πίνακας 5.2.1.</b> Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο. ....	77
<b>Πίνακας 5.2.2.</b> %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.....	79
<b>Πίνακας 6.1.1.</b> Διαφορές στις γραμμομοριακές θερμοχωρητικότητες καυσαερίων και ξηρού αέρα στις θερμοκρασίες εξόδου τους από τον εξατμιστήρα του υπερκρίσιμου ORC για κάποια ρευστά... ..	82
<b>Πίνακας 6.1.2</b> Τελική επιλογή συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC με μεθανόλη και το τολουόλιο, όταν η πηγή θερμότητας είναι καυσαέρια στους 400 °C... ..	82
<b>Πίνακας 6.1.3.</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης υποκρίσιμου απλού ORC με τη μεθανόλη και το τολουόλιο, όταν η πηγή θερμότητας είναι καυσαέρια στους 400 °C.....	82
<b>Πίνακας 6.1.4.</b> Τελική επιλογή συνθηκών στο transcritical και το υπερκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό....	84
<b>Πίνακας 6.2.1.</b> Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο... ..	92
<b>Πίνακας 6.2.2.</b> %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο .....	93
<b>Πίνακας 6.2.3.</b> Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του υπερκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό μέσω REFPROP.....	96
<b>Πίνακας 6.2.4.</b> %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του υπερκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό μέσω REFPROP.....	97
<b>Πίνακας 7.1.1.</b> Θερμοκρασία στην οποία το Pinch Point μεταξύ εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας μετατοπίζεται από το σημείο κορεσμένου υγρού στην είσοδο του εξατμιστήρα, ανά ρευστό... ..	103

<b>Πίνακας 7.1.2.</b> Τελική επιλογή συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό και ανά πηγή θερμότητας.....	106
<b>Πίνακας 7.2.1.1.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 120°C.....	107
<b>Πίνακας 7.2.1.2.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 120°C.....	108
<b>Πίνακας 7.2.1.3.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 150°C.....	109
<b>Πίνακας 7.2.1.4.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 150°C.....	110
<b>Πίνακας 7.2.1.5.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 250°C.....	111
<b>Πίνακας 7.2.1.6.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 250°C.....	112
<b>Πίνακας 7.2.1.7.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 300°C.....	113
<b>Πίνακας 7.2.1.8.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 300°C.....	114
<b>Πίνακας 7.2.1.9.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 400°C.....	115
<b>Πίνακας 7.2.1.10.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 400°C.....	115
<b>Πίνακας 7.2.1.11.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 450°C.....	116
<b>Πίνακας 7.2.1.12.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 450°C.....	117
<b>Πίνακας 7.2.2.1.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	118
<b>Πίνακας 7.2.2.2.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το i-C5 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	119
<b>Πίνακας 7.2.2.3.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το τολουόλιο για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	119
<b>Πίνακας 7.2.2.4.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R152a για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	120
<b>Πίνακας 7.2.2.5.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R134a για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	120
<b>Πίνακας 7.2.2.6.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R161 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	121
<b>Πίνακας 7.2.2.7.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R1234yf για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	122
<b>Πίνακας 7.2.2.8.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R1233zd(e) για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	122
<b>Πίνακας 7.2.2.9.</b> Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο τη μεθανόλη για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.....	123

<b>Πίνακας 7.2.2.10.</b> Βαθμός απόδοσης Carnot και λόγος του θερμικού προς αυτόν με τη βέλτιστη πηγή ανά ρευστό .....	125
<b>Πίνακας 8.2.1.1.</b> Σημαντικά μεγέθη αξιολόγησης αποτελεσμάτων ORC με καθαρές ουσίες και μίγματα, παροχή θερμότητας από γεωθερμικό ρευστό στους 200°C και συμπύκνωση από νερό ψύξης στους 20°C	140
<b>Πίνακας 8.2.2.1.</b> Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με μίγματα και τα καθαρά συστατικά τους.....	147
<b>Πίνακας 9.1.1.</b> Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο recuperated κύκλο ανά ρευστό.....	150
<b>Πίνακας 9.1.2.</b> Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο preheated ORC ανά ρευστό.....	152
<b>Πίνακας 9.2.1.</b> %Σχετική μεταβολή τριών βαθμών απόδοσης με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator στο απλό ORC.....	156
<b>Πίνακας 9.2.2</b> %Σχετική μεταβολή μαζικών παροχών εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού ρευστού με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator στο απλό ORC.....	158
<b>Πίνακας 9.2.3.</b> %Σχετική μεταβολή φορτίου εξατμιστήρα και συμπυκνωτήρα και θερμότητα εναλλαγής στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας ανά διάταξη και ανά ρευστό.. .....	160
<b>Πίνακας 9.2.4.</b> %Σχετική μεταβολή ολικής καταστροφής εξέργειας με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator και μεμονωμένη καταστροφή εξέργειας στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας.. .....	161
<b>Πίνακας 9.3.1.1.</b> Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο recuperated ORC για τη βέλτιστη αρχική θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού, ανά ρευστό.....	163
<b>Πίνακας 9.3.1.2.</b> %Σχετική μεταβολή τιμών των αποδόσεων του recuperated ORC με χρήση της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας σε σχέση με την κοινή.....	165
<b>Πίνακας 9.3.1.3.</b> %Σχετική μείωση μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου και νερού ψύξης στο recuperated ORC με χρήση της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας σε σχέση με την κοινή.....	167
<b>Πίνακας 9.3.2.1.</b> Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο preheated ORC με γεωθερμικό ρευστό στους 120°C ανά ρευστό... .....	168
<b>Πίνακας 9.3.2.2</b> Αποτελέσματα προσομοίωσης του preheated ORC με γεωθερμικό ρευστό στους 120°C ... .....	168

## Πίνακας Συμβόλων

A: επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  
ALT: ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής  
c: παράμετρος διόρθωσης όγκου κορεσμένου υγρού  
 $C_p$ : θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση  
 $C_v$ : θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο  
CFC: χλωροφθοράνθρακας  
CSD: Carnahan–Starling–DeSantis  
Elec.: ηλεκτρική ενέργεια  
 $e_f$ : ειδική φυσική, (δυναμική και κινητική) εξέργεια  
Ex: εξέργεια  
g: επιτάχυνση της βαρύτητας  
GWP: δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη  
h: ειδική ενθαλπία  
HBFC: υδροβρωμοφθοράνθρακας  
HCFC: υδροχλωροφθοράνθρακας  
HFC: υδροφθοράνθρακας  
HFO: υδροφθοροολεφίνη  
 $\dot{m}$ : μαζική παροχή  
MC: Mathias-Copeman  
n: βαθμός απόδοσης  
s: ειδική εντροπία  
SRK: Soave-Redlich-Kwong  
ODP: δυναμικό καταστροφής του όζοντος  
ORC: οργανικό κύκλο Rankine  
P: πίεση  
PFC: υπερφωθιωμένη ένωση  
PR: Peng-Robinson  
Preheat.: προθερμαντήρας  
Q: θερμότητα  
R: παγκόσμια σταθερά των αερίων  
Rec: recuperator-εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας  
REFPROP: REference Fluid Thermodynamic and Transport PROPERTIES  
T: θερμοκρασία  
U: ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητα  
u: ταχύτητα  
v: γραμμομοριακός όγκος  
W: μηχανικό έργο  
z: θέση ως προς ένα επίπεδο αναφοράς  
 $Z_{Ra}$ : συντελεστής συμπίεστότητας

## Ελληνικά Γράμματα

ΑΠΕ: ανανεώσιμη πηγή ενέργειας  
Δ: μεταβολή  
ΔT: θερμοκρασιακή διαφορά



ε: εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευής  
ΚΕ: καταστατική εξίσωση  
ΜΕΚ: μηχανή εσωτερικής καύσης  
ΟΕ: όγκος ελέγχου  
ΟΗΕ: Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών  
ρ: πυκνότητα  
ω: ακεντρικός παράγοντας

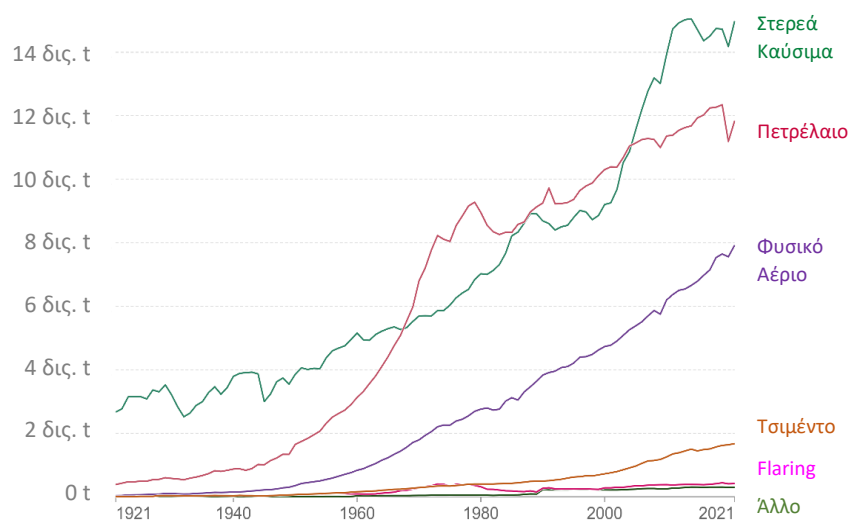
## Δείκτες

δυν.: δυναμική  
κιν.: κινητική  
a: πραγματικό  
air: καυσαέρια  
c: κρίσιμο σημείο  
cold: ψυχρό ρεύμα  
cond: συμπυκνωτήρας  
cool ή CF: ψυκτικό μέσο  
destr: καταστροφή  
evap: εξατμιστήρας  
ex: εξεργειακός  
exp: πειραματικό  
gen: γεννήτρια  
HTF: ρευστό μεταφοράς θερμότητας  
hot: θερμό ρεύμα  
in: είσοδος  
Im: μέση λογαριθμική  
loss: απώλεια  
model: θερμοδυναμικό μοντέλο  
net: καθαρό  
o: περιβάλλον  
out: έξοδος  
p: αντλία  
pinch: κόμβος ανάσχεσης  
r: ανηγμένο  
s: ισεντροπικό  
sat: κορεσμός  
source: πηγή θερμότητας  
sub: υποκρίσιμο  
t: στρόβιλος  
th: θερμικός  
trans: transcritical  
trip: τριπλό σημείο  
vap: εξατμισης  
WF: εργαζόμενο μέσο

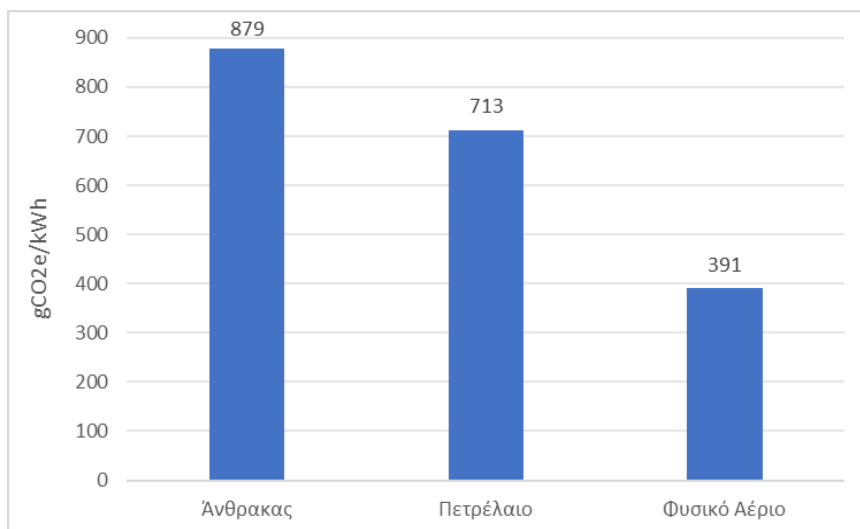
# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Κίνητρο Μελέτης Οργανικών Κύκλων Rankine

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση, λόγω της πληθυσμιακής αύξησης, της τεχνολογικής προόδου και του υψηλού βαθμού βιομηχανοποίησης των σύγχρονων κοινωνιών, έχει φτάσει σε πρωτόγνωρα επίπεδα. Η χρήση των ορυκτών καυσίμων συνδέεται άμεσα με την επιδείνωση περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως του φαινομένου του θερμοκηπίου, της αραίωσης της στιβάδας του όζοντος και της εντατικοποίησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω εκπομπής πληθώρας ρύπων, μεταξύ άλλων CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O και CH<sub>4</sub> [1-4]. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ο συνολικός αριθμός εκπομπών για το 2022 ξεπέρασε τους 36 Gt και παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα της εξέλιξης των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> [4].



Σχήμα 1.1.1. Εξέλιξη παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> σε διάστημα εκατονταετίας ανά καύσιμο ή βιομηχανία [4].



Σχήμα 1.1.2. Εκπομπές CO<sub>2</sub> από την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου [5].

Τα στερεά καύσιμα, που αξιοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ως πηγή ενέργειας τον τελευταίο αιώνα (Σχήμα 1.1.1), οδηγούν στην εκπομπή της μέγιστης ποσότητας CO<sub>2</sub> ανάμεσα στα συμβατικά καύσιμα (Σχήμα 1.1.2). Ακολουθεί το πετρέλαιο, ενώ ακόμη και το φυσικό αέριο, που θεωρείται το πιο καθαρό ορυκτό καύσιμο, ευθύνεται για την εκπομπή περίπου 8 δις. τόνων CO<sub>2</sub> κατά το έτος 2022.

Για τον περιορισμό των επιβλαβών εκπομπών έχουν συναφθεί διεθνείς συνθήκες. Η Σύμβαση – Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change) υπεγράφη το 1992, αλλά δεν έθεσε νομικά δεσμευτικές υποχρεώσεις, παρά μόνο τις βάσεις για περαιτέρω δράση στο μέλλον. Το Πρωτόκολλο του Κιότο (Kyoto Protocol) εγκρίθηκε το 1997 και τέθηκε σε ισχύ το 2005. Κατά την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012), οι συμμετέχουσες χώρες δεσμεύθηκαν να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, και συγκεκριμένα CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>, κατά 5% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Κατά τη δεύτερη περίοδο (2013-2020), οι χώρες συμφώνησαν να μειώσουν τις εκπομπές αυτές κατά τουλάχιστον 18% σε σχέση με τα επίπεδα της ίδιας χρονιάς. Ωστόσο, πολλά κράτη με μεγάλες ποσότητες ρύπων αρνήθηκαν να συμμετέχουν, με αποτέλεσμα το Πρωτόκολλο του Κιότο να καλύπτει μόλις το 12% των παγκόσμιων εκπομπών. Η Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement) είναι η πρώτη οικουμενική, νομικά δεσμευτική συμφωνία για το κλίμα. Στοχεύει στην μακροπρόθεσμη σταθεροποίηση της ανόδου της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα κάτω των 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα καθώς και στη μείωση των επιβλαβών εκπομπών κατά 55% σε σχέση με το 1990 έως το 2030 [6].

Πέρα από τις δυσμενείς συνέπειες στο περιβάλλον, δεν είναι αμελητέο το γεγονός ότι οι συμβατικές πηγές ενέργειας είναι πεπερασμένες και, λόγω της εξάντλησής τους αλλά και της αύξησης της παγκόσμιας ζήτησης, η τιμή τους βαίνει συνεχώς αυξανόμενη. Επομένως, είναι έντονη η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτιστοποίηση της χρήσης της [7]. Παράλληλα, ο πλανήτης σήμερα βιώνει μία ενεργειακή κρίση λόγω της Ρωσικής εισβολής στην Ουκρανία [4]. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία υπενθύμιση του πόσο εύθραυστο είναι το σύγχρονο ενεργειακό σύστημα και υποδεικνύει την ανάγκη στροφής προς έναν «καθαρότερο» δρόμο, μέσω βελτιστοποίησης των υπάρχοντων συστημάτων μετατροπής και μεταφοράς ενέργειας αλλά και αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία, η βιομάζα, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια και τα βιοκαύσιμα [2,4,7,8]. Η ωρίμανση των τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας χαμηλής ποιότητας αναμένεται να συμβάλει στη μείωση της συνολικά απορριπτόμενης θερμότητας και του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα προς την βιώσιμη ανάπτυξη [1,8,9]. Απαιτείται να αυξηθεί η αξιοπιστία και η σταθερότητα των ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών, να μειωθεί το κόστος της αξιοποίησής τους και να επεκταθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι εμπορικές εφαρμογές που τις αξιοποιούν [8,10].

Συνολικά, λοιπόν, οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που απορρέουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, η δυνατότητα εκμετάλλευσης ενέργειας που παραμένει αναξιοποίητη και προκαλεί θερμική ρύπανση, η συμμόρφωση με τις διεθνείς συνθήκες για το περιβάλλον, η συνετή αξιοποίηση των ενεργειακών αποθεμάτων και η ασφάλεια σε περιόδους κρίσης ολοκληρώνουν το κίνητρο πίσω από την μελέτη και ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Μία τέτοια τεχνολογία είναι και τα οργανικά κύκλα Rankine που μελετώνται στην παρούσα εργασία.

## 1.2. Μηχανές-Κύκλα Παραγωγής Ισχύος

Μηχανή ονομάζεται κάθε διάταξη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ισχύος. Η μηχανή προσδίδει θερμότητα σε ένα εργαζόμενο μέσο, που μπορεί να είναι ατμός ή αέρας, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ενεργειακής του κατάστασης. Ένα μέρος της θερμότητας αυτής αποδίδεται ως μηχανικό έργο, ενώ η υπόλοιπη αποβάλλεται ξανά ως θερμότητα στο περιβάλλον. Οι μηχανές λειτουργούν σύμφωνα με θερμοδυναμικούς κύκλους που ονομάζονται κύκλοι παραγωγής ισχύος [11].

Ανάλογα με τον τρόπο παροχής της θερμότητας, οι μηχανές διακρίνονται σε εσωτερικής και εξωτερικής καύσης. Στις πρώτες η καύση πραγματοποιείται εντός της μηχανής, με το καυσάεριο να αποτελεί το λειτουργούν μέσο, ενώ στις δεύτερες η θερμότητα προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο από κάποια εξωτερική πηγή σε μία ανεξάρτητη συσκευή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μηχανών εσωτερικής καύσης είναι οι βενζινοκινητήρες (κύκλος Otto), οι πετρελαιοκινητήρες (κύκλος Diesel) και οι αεριοστρόβιλοι (κύκλος Brayton), ενώ εξωτερικής καύσης οι μηχανές Stirling και Ericsson [12].

Ο κύκλος Carnot αποτελεί το πιο αποδοτικό κύκλο που μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ δύο δεδομένων θερμοκρασιακών ορίων. Είναι εσωτερικά αλλά και εξωτερικά αντιστρεπτός. Περιλαμβάνει μία ισοθερμοκρασιακή προσθήκη θερμότητας από ένα θερμοδοχείο σταθερής θερμοκρασίας  $T_H$ , μία ισεντροπική εκτόνωση, μία ισοθερμοκρασιακή απαγωγή θερμότητας σε ένα ψυχοδοχείο σταθερής  $T_L$  και μία ισεντροπική συμπίεση. Η θερμική απόδοση του κύκλου Carnot δίνεται από την εξίσωση:

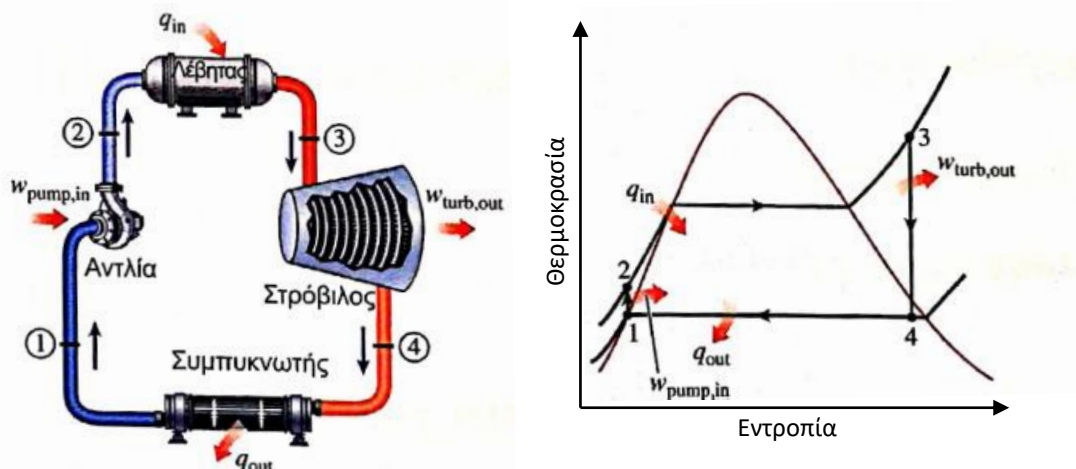
$$n_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (\text{Εξ. 1.2.1})$$

όπου οι θερμοκρασίες  $T_L$ ,  $T_H$  μετρούνται σε βαθμούς Kelvin.

Στην πραγματικότητα, δεν είναι πρακτική η κατασκευή μίας μηχανής εξωτερικής καύσης που θα προσέγγιζε τον κύκλο Carnot, αφού η ισοθερμοκρασιακή μεταφορά θερμότητας είναι δύσκολα επιτεύξιμη, καθώς θα απαιτούσε πολύ μεγάλες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας και μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης, η ισεντροπική εκτόνωση θα παρήγαγε ατμό χαμηλής ποιότητας, που θα καθίστατο επικίνδυνος για τον στρόβιλο λόγω υψηλής πιθανότητας διάβρωσης των μεταλλικών του τμημάτων, και η ισεντροπική συμπίεση θα ήταν δύσκολο να ελεγχθεί.

Η πραγματική αξία του κύκλου Carnot έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί ένα πρότυπο ως προς το οποίο μπορεί να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα ενός πραγματικού ή ιδανικού κύκλου. Ιδανικός κύκλος ονομάζεται ένας κύκλος που αποτελείται από εσωτερικά, όχι όμως και εξωτερικά, αντιστρεπτές διεργασίες. Τέτοιος είναι και ο κύκλος Rankine, που ξεπερνά τα πρακτικά προβλήματα του Carnot με υπερθέρμανση του ατμού και έπειτα πλήρη συμπύκνωσή του. Δηλαδή, ο κύκλος αυτός περιλαμβάνει μία ισεντροπική συμπίεση υγρού σε μία αντλία, μία ισοβαρή προσθήκη θερμότητας σε ένα λέβητα για μετατροπή του υπόψυκτου υγρού σε υπέρθερμο ατμό, μία ισεντροπική εκτόνωση του ατμού σε έναν στρόβιλο μέχρι να γίνει υγρός ατμός και μία ισοβαρή απαγωγή θερμότητας σε έναν συμπυκνωτήρα έως την κατάσταση κορεσμένου υγρού, με το κύκλο στην συνέχεια να επαναλαμβάνεται. Δίνεται το διάγραμμα ροής αλλά και το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας, που απεικονίζει την πορεία του απλού

κύκλου Rankine. Στο δεξί σκέλος του Σχήματος 1.2.1, η περιοχή (1234) αντιπροσωπεύει το καθαρό έργο που παράγεται σε δεδομένες συνθήκες [11,12].



Σχήμα 1.2.1. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και θερμοκρασίας-εντροπίας (δεξιά) απλού κύκλου Rankine με ατμό [11].

Η θερμική ή ενεργειακή απόδοση του κύκλου Rankine ορίζεται ως το ποσοστό της εισαγόμενης θερμότητας που τελικά μετατρέπεται σε έργο και δίνεται από την σχέση:

$$n_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{q}_{in}} \quad (\text{Εξ. 1.2.2})$$

όπου το  $W_{net}$  είναι η διαφορά του έργου της αντλία από το έργο του στρόβιλου.

Οι όροι της Εξίσωσης 1.2.2. προκύπτουν από το Α' Θερμοδυναμικό Αξίωμα (Ισοζύγιο Ενέργειας) όπως εφαρμόζεται σε ένα ανοιχτό σύστημα [11,12]:

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_{κιν.} + \Delta E_{δυν.} \quad \text{ή} \quad \dot{q} - \dot{w} = \Delta h + \Delta e_{κιν.} + \Delta e_{δυν.} \quad (\text{Εξ. 1.2.3})$$

Ο πραγματικός κύκλος Rankine διαφέρει από τον ιδανικό λόγω εσωτερικών αναντιστρεπτοτήτων, και συγκεκριμένα θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον και τριβής του ρευστού με τα τοιχώματα των σωληνώσεων και των συσκευών, που επιφέρει πτώση πίεσης. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι αναντιστρεπτότητες που εμφανίζονται στην αντλία και στον στρόβιλο, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα ο στρόβιλος να παράγει λιγότερο έργο από το αναμενόμενο και η αντλία να απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση για δεδομένη αύξηση της πίεσης του ρευστού. Οι αποκλίσεις των πραγματικών από τις ισεντροπικές διατάξεις μπορούν να ποσοτικοποιηθούν μέσω των ισεντροπικών βαθμών απόδοσης:

$$n_p = \frac{W_{p,s}}{W_{p,a}} \quad (\text{Εξ. 1.2.4}) \quad \text{και} \quad n_t = \frac{W_{t,a}}{W_{t,s}} \quad (\text{Εξ. 1.2.5})$$

Στην περίπτωση που στόχος είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτρια απόδοσης  $n_{gen}$ , το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από το γινόμενο αυτής της απόδοσης επί το καθαρό έργο του συστήματος [11]:

$$Elec. = W_{net} * n_{gen} \quad (\text{Εξ. 1.2.6})$$

### 1.3. Εξέργεια: Ισοζύγιο & Καταστροφή

Η εξέργεια ή διαθέσιμη ενέργεια αντιπροσωπεύει την ικανότητα ενός τύπου ενέργειας να παράγει ωφέλιμο έργο. Η τιμή της ισούται, όχι με το πραγματικό, αλλά με το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί χωρίς την παραβίαση των θερμοδυναμικών νόμων. Ένα σύστημα παρέχει το έργο αυτό, όταν οδηγηθεί με μία αντιστρεπτή διεργασία σε κατάσταση ηρεμίας, δηλαδή σε θερμική, χημική και μηχανική ισορροπία με το περιβάλλον του. Συνήθως, η κατάσταση αυτή ορίζεται σε συνθήκες 1 atm και 25°C.

Η εξέργεια διακρίνεται σε φυσική, χημική, κινητική και δυναμική. Από αυτές, η φυσική εξέργεια οφείλεται στο ότι η πίεση και η θερμοκρασία του συστήματος είναι διαφορετικές από αυτές του περιβάλλοντος (κατάσταση ηρεμίας), η χημική στο ότι η σύστασή του διαφέρει από του περιβάλλοντος, η δυναμική οφείλεται στη θέση του συστήματος στο βαρυτικό πεδίο και η κινητική στην ταχύτητά του.

Σε αντίθεση με την ενέργεια, η εξέργεια δεν διατηρείται. Το Ισοζύγιο Εξέργειας για έναν όγκο ελέγχου (OE), με τη μορφή ρυθμών, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{dEx_{OE}}{dt} = \sum_k \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W}_{OE} + \sum_i \dot{m}_{in} * e_{f,in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} * e_{f,out} - \dot{E}x_{destr} \quad (Eξ. 1.3.1)$$

όπου k: κάποιο σημείο του όγκου ελέγχου και η  $e_f$  δίνεται από την σχέση:

$$e_f = (h - T_o * s) + \frac{u^2}{2} + gz \quad (Eξ. 1.3.2)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από το Α΄ Θερμοδυναμικό Αξίωμα και δίνει μια εικόνα της αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας για την παραγωγή έργου από μια θερμική μηχανή, χωρίς ωστόσο να αναφέρεται στην ποιότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται και αποδίδεται [11]. Αντίθετα, το Β΄ Θερμοδυναμικό Αξίωμα λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας και ποσοτικοποιεί το πόσο αποδοτικά μετατρέπεται η εισερχόμενη θερμική ενέργεια σε μηχανική και τελικά ηλεκτρική. Ορίζεται, λοιπόν, και η απόδοση με βάση τον 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο, ως ο λόγος του πραγματικού έργου προς το μέγιστο δυνατό έργο που μπορεί να παραχθεί. Ο λόγος αυτός ονομάζεται εξεργειακός βαθμός απόδοσης και υπολογίζεται ως εξής:

$$n_{ex} = \frac{W_{net}}{E_{in,source}} \quad (Eξ. 1.3.3)$$

Αν η μηχανή λειτουργεί χωρίς αναντιστεπτότητες (μηχανή Carnot), τότε δεν καταστρέφεται εξέργεια και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ισούται με τη μονάδα. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται και το μέγιστο δυνατό έργο για τις δεδομένες συνθήκες συστήματος και περιβάλλοντος. Στα πραγματικά συστήματα, δεν είναι ποτέ δυνατή η παραγωγή του μέγιστου έργου. Συγκεκριμένα, σε ένα κύκλο Rankine το άθροισμα της καταστροφής εξέργειας στα διάφορα στοιχεία του κύκλου αντανakλά τη συνολική αναντιστεπτότητα του συστήματος αυτού. Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη και η αναντιστεπτότητα λόγω μεταφοράς θερμότητας με πεπερασμένα και όχι άπειρη θερμοκρασιακή διαφορά, ορίζεται και μία άλλη έκφραση εξεργειακής απόδοσης του συστήματος, που ονομάζεται εσωτερικός εξεργειακός



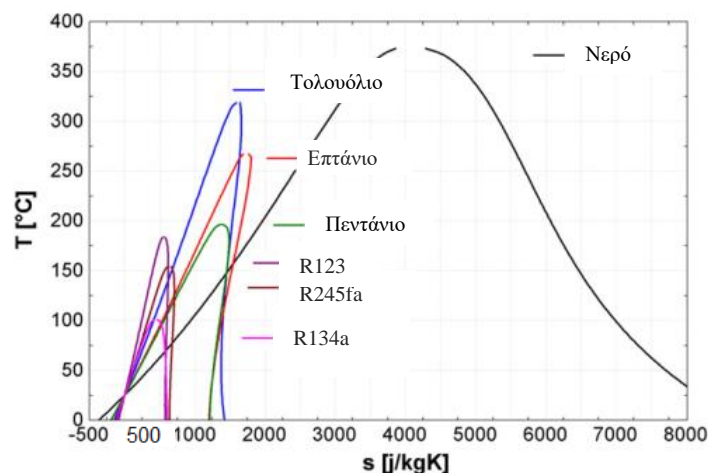
βαθμός απόδοσης και αποτελεί μία έκφραση του περιθωρίου που υπάρχει για ενεργειακή ολοκλήρωση του συστήματος, αφού λαμβάνει υπόψη την έξοδο του θερμού ρεύματος:

$$n_{\text{εξωσωτερικός}} = \frac{W_{\text{net}}}{E_{\text{in,source}} - E_{\text{out,source}}} \quad (\text{Εξ. 1.3.4})$$

Προκειμένου να γίνεται η διάκριση από τον Ορισμό 1.3.4, συχνά το μέγεθος της Εξίσωσης 1.3.3 καλείται ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης και αυτός ο συμβολισμός υιοθετείται και στην παρούσα μελέτη [1].

## 1.4. Σύγκριση Οργανικού & Συμβατικού Κύκλου Rankine

Τα οργανικά κύκλα Rankine (Organic Rankine Cycles-ORCs) αποτελούνται από τα ίδια στοιχεία μηχανολογικού εξοπλισμού με τα συμβατικά (Σχήμα 2.2.1), ωστόσο το λειτουργούν μέσο δεν είναι νερό αλλά μία οργανική ουσία. Παρατίθεται ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας κάποιων ενδεικτικών οργανικών ουσιών και του νερού [1,3].



Σχήμα 1.4.1. Διαφορές στη μορφή του διαγράμματος T-s μεταξύ του νερού και συνήθων οργανικών ουσιών που χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενα μέσα στα οργανικά κύκλα Rankine [3].

Οι κύριες διαφορές του συμβατικού και του οργανικού κύκλου Rankine είναι οι εξής:

- Σε περίπτωση θερμοκρασιών χαμηλότερων από 400°C, η απόδοση του συμβατικού κύκλου Rankine προκύπτει ιδιαίτερα χαμηλή και η χρήση νερού κρίνεται αντιοικονομική, καθώς οι πηγές δεν αρκούν για την απαιτούμενη υπερθέρμανση [2,5,6,11,13]. Στα ORCs η θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες λόγω των αρκετά χαμηλότερων σημείων ζέσεως των οργανικών ουσιών σε σχέση με του νερού [2,3]. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητη η χρήση συμβατικών καυσίμων για την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου. Υπάρχει, δηλαδή, ευελιξία ως προς τη δυνατότητα αξιοποίησης ποικίλων πηγών θερμότητας [12-15].
- Η διαφορά των τιμών εντροπίας κορεσμένου ατμού και κορεσμένου υγρού των οργανικών ουσιών («πλάτος της καμπάνας» του Σχήματος 1.4.1) είναι πολύ μικρότερη, με επακόλουθες μικρότερες τιμές ενθαλπίας εξάτμισης. Συνεπώς, για την πρόσληψη ισόποσης με το νερό θερμότητας από την πηγή, απαιτούνται αρκετά υψηλότερες

μαζικές παροχές των οργανικών ρευστών, με επακόλουθη αύξηση του έργου που καταναλώνεται στην αντλία [3].

- Η διαφορετική κλίση της καμπύλης του κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (Σχήμα 1.4.1) υποδεικνύει ότι τα οργανικά ρευστά, στην πλειονότητά τους, δεν χρειάζονται υπερθέρμανση στο λέβητα. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται επίσης ότι δεν υπάρχει το ενδεχόμενο συμπύκνωσης του μέσου στον στρόβιλο με επακόλουθη διάβρωση των πτερυγίων του, επομένως η διάρκεια ζωής του συστήματος επεκτείνεται σημαντικά σε σχέση με το συμβατικό κύκλο Rankine [2,3,8].
- Οι πυκνότητες της ατμώδους φάσης των περισσότερων οργανικών ουσιών είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτή του νερού στην ίδια θερμοκρασία. Οι μικρότερες ογκομετρικές παροχές, λόγω των μεγαλύτερων πυκνοτήτων, επιφέρουν μικρότερες πτώσεις πίεσης, κάτι που επιτρέπει τη μείωση της διαμέτρου των σωληνώσεων και του μεγέθους των εναλλακτών και του στροβίλου. Οι μεγάλες πτώσεις πίεσης που σημειώνονται στα συμβατικά κύκλα Rankine οδηγούν σε πολλά στάδια εκτόνωσης και άρα υψηλότερο πάγιο κόστος και λιγότερο συμπαγείς διατάξεις. Αντίθετα, συχνά στα ORCs η εκτόνωση είναι μονοβάθμια [3,7]. Λόγω των λιγότερων σταδίων εκτόνωσης, η λειτουργία των ORCs είναι σχεδόν αυτοματοποιημένη, είναι δηλαδή μη επανδρωμένα συστήματα, και έχουν χαμηλές ανάγκες συντήρησης [1,3,14].
- Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ενός μόνο εναλλάκτη θερμότητας, που θα παίζει τον ρόλο του προθερμαντήρα, του εξαμιστήρα και του υπερθερμαντήρα, αν απαιτείται, δηλαδή των τριών ξεχωριστών εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά κύκλα για την εξάτμιση του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρότερη διαφορά μεταξύ των πυκνοτήτων ατμώδους και υγρής φάσης των οργανικών ρευστών και επιφέρει μειωμένο πάγιο κόστος και απλότητα στο σύστημα [3,10,14,16].
- Οι πιέσεις που αναπτύσσονται στα ORCs είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με το συμβατικό κύκλο Rankine. Η μέγιστη τιμή μπορεί να φτάσει περίπου τα 40 bar στον εξαμιστήρα, που είναι κοντά στην κρίσιμη πίεση των περισσότερων οργανικών ρευστών, ενώ στα συμβατικά κύκλα η τιμή αυτή κυμαίνεται περίπου στα 70-80 bar, κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα, το κόστος καθώς και τις απαιτήσεις ασφαλείας του συστήματος [2,3]. Λόγω των χαμηλότερων πιέσεων, τα οργανικά ρευστά χρησιμοποιούνται σε μικρότερες κλίμακες και δυναμικότητες, λίγων kW έως λίγων MW [3,10,14,17]. Υπό αυτό το πρίσμα, θα μπορούσαν να δημιουργηθούν αποκεντρωμένα συστήματα ORC, που γενικά έχουν μειωμένη δυναμικότητα και επιτρέπουν στην αποφυγή του κόστους μεταφοράς της ενέργειας [3,10].
- Οι πιέσεις στον συμπυκνωτήρα, όπου η θερμοκρασία είναι περίπου ίση με αυτή του περιβάλλοντος, πρέπει να είναι υψηλότερες από την ατμοσφαιρική προς αποφυγή εισόδου αέρα στο σύστημα, κάτι που οδηγεί σε εκτόνωση μέρους του ατμού και άρα μείωση της απόδοσης, αλλά και εξόδου οργανικής ουσίας, που, σε αντίθεση με το νερό, ενδέχεται να είναι τοξική, εύφλεκτη, αρκετά κοστοβόρα ή επιβαρυντική για το περιβάλλον [14,17].
- Το νερό είναι φτηνό, ευκόλως διαθέσιμο, μη τοξικό, φιλικό προς το περιβάλλον, χημικώς σταθερό και με χαμηλό ιξώδες. Τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να εξασφαλιστούν και για τα επιλεγμένα οργανικά ρευστά, ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις είναι δύσκολος ο συνδυασμός όλων αυτών των ιδιοτήτων [2,14].



- Η απόδοση των συμβατικών κύκλων Rankine κυμαίνεται γύρω στο 30-35%, ενώ των ORCs δεν ξεπερνάει το 15-20% [10,11,13].
- Δεν απαιτείται στρατσωνισμός μέρους του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστήρα προς αποφυγή διάβρωσης από άλατα, όπως απαιτείται με το νερό [3].

Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οργανικών σε σύγκριση με τα συμβατικά κύκλα Rankine συνοψίζονται στον Πίνακα 1.4.1:

**Πίνακας 1.4.1.** Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του οργανικού κύκλου Rankine σε σχέση με το συμβατικό.

<b>Πλεονεκτήματα ORC σε σχέση με Κύκλο Ατμού</b>	<b>Μειονεκτήματα ORC σε σχέση με Κύκλο Ατμού</b>
Ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας → αποφυγή επιβλαβών εκπομπών από συμβατικά καύσιμα.	Ανάγκη διερεύνησης φιλικού προς το περιβάλλον και ασφαλούς εργαζόμενου μέσου.
Μικρότερες πτώσεις πίεσης → λιγότερα στάδια εκτόνωσης, πιο συμπαγείς κατασκευές.	Ανάγκη διερεύνησης φθηνού και ευκόλως διαθέσιμου εργαζόμενου μέσου.
Χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης, εκτεταμένη διάρκεια ζωής, αυτοματοποιημένο σύστημα.	Υψηλότερες μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου.
Ανάπτυξη χαμηλότερων πιέσεων στον εξατμιστήρα → μειωμένες απαιτήσεις ασφαλείας.	Απαίτηση τουλάχιστον ατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα προς αποφυγή διαρροών και εκτόνωσης.
Μη απαίτηση υπερθέρμανσης στον εξατμιστήρα → μείωση πάγιου κόστους.	Μειωμένη θερμική απόδοση.

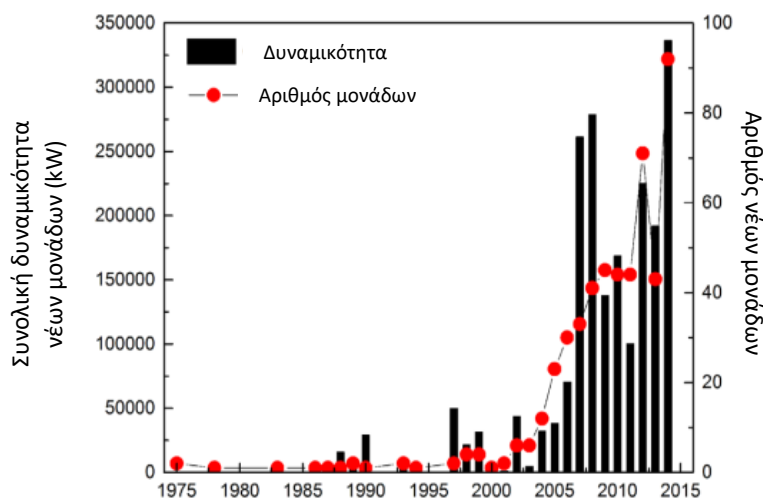
## 1.5. Αγορά των Οργανικών Κύκλων Rankine

Η ιδέα χρήσης ενός ρευστού διαφορετικού από το νερό για παραγωγή έργου αποτελεί μία πατέντα του T. Howard, που χρησιμοποίησε αιθέρα ως εργαζόμενο μέσο σε ένα κύκλο ισχύος το 1826. Από την ιδέα αυτή, ο F. Ofeldt το 1883 δημιούργησε ένα σύστημα που παρήγαγε ισχύ μέσω εξάτμισης νάφθας με χρήση ενός παλινδρομικού στροβίλου. Η γενική φιλοσοφία ήταν πως, λόγω της μικρότερης λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης της νάφθας, εάν προσδιδόταν θερμότητα ίση με αυτή που θα προσδιδόταν στο νερό, θα προέκυπτε περισσότερος ατμός νάφθας σε σύγκριση με του νερού, με αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερου έργου. Η επιλογή της νάφθας είχε να κάνει με το γεγονός ότι ταυτόχρονα έπαιζε το ρόλο καυσίμου για την παροχή της απαιτούμενης θερμότητας, λιπαντικού και εργαζόμενου μέσου. Η μηχανή αυτή επεκτάθηκε σημαντικά αλλά η χρήση της, ακόμα και όταν οι πιέσεις στον εξατμιστήρα ήταν σχετικά χαμηλές, επέφερε πολλαπλά ατυχήματα.

Το πρώτο παράδειγμα σύγχρονου ORC δημιουργήθηκε το 1936 από τον L. D' Amelio με πηγή θερμότητας την ηλιακή ενέργεια και μέσο το χλωροαιθάνιο. Για πρώτη φορά,

καταγράφηκαν οι βασικές αρχές του σχεδιασμού του στροβίλου και της επιλογής εργαζόμενου μέσου [15]. Ακολούθησαν μικρής κλίμακας συστήματα, με την πρώτη εμπορική εφαρμογή να λειτουργεί το έτος 1952 στο Κονγκό, όπου χρησιμοποιήθηκε θερμότητα από γεωθερμικό ρευστό στους 91°C για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που αξιοποιήθηκε από μία εταιρεία εξορύξεων [8,15].

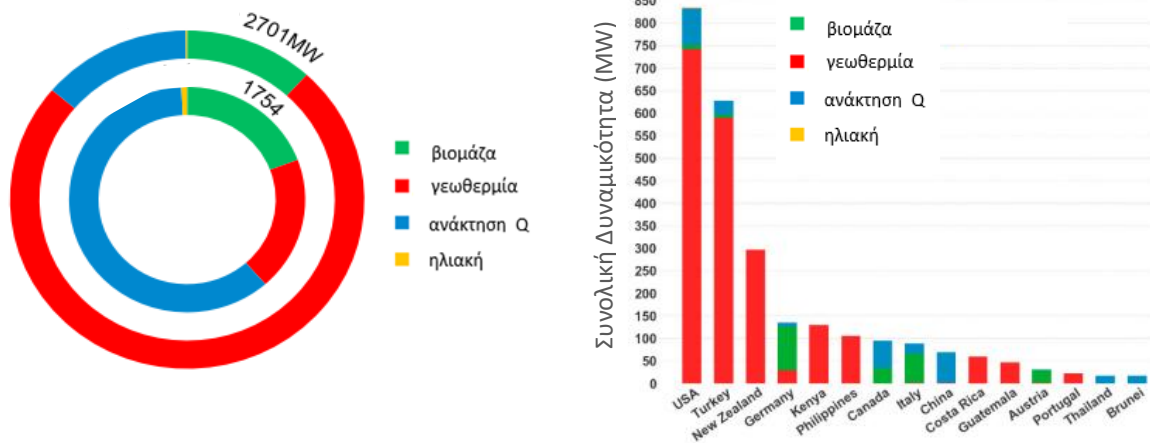
Η αύξηση της αγοράς των ORCs ήταν ραγδαία από το έτος 2005 και έπειτα, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα της χρονικής εξέλιξης του αριθμού των νέων μονάδων και της συνολικής δυναμικότητας αυτών παγκοσμίως στο διάστημα 1975-2015. Το διάστημα αυτό επιλέγεται με γνώμονα την πετρελαϊκή κρίση του 1970, που έθεσε τις βάσεις για διερεύνηση εναλλακτικών ενεργειακών πηγών [3]:



Σχήμα 1.5.1. Αριθμός νέων μονάδων ORC και συνολική δυναμικότητα αυτών σε παγκόσμια κλίμακα σε διάστημα ενός έτους για τις δεκαετίες 1975-2015 [3].

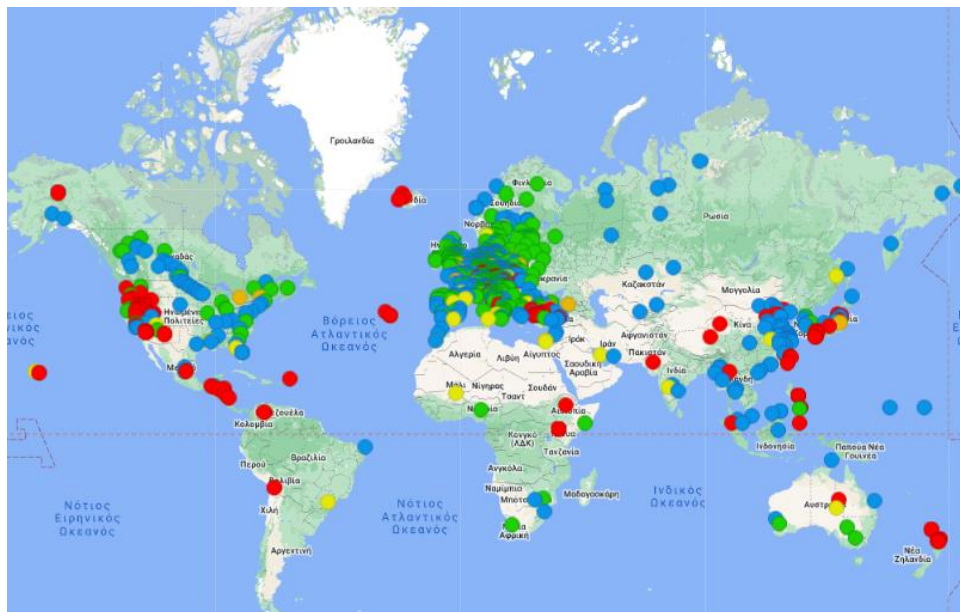
Έως το 2016 υπήρχαν συνολικά 1754 μονάδες (ολική δυναμικότητα 2701 MW) και πολλές ακόμα υπό κατασκευή. Οι μονάδες αυτές βρίσκονται κατά κύριο λόγο στις ΗΠΑ, την Τουρκία και τη Νέα Ζηλανδία, λόγω της πληθώρας γεωθερμικών πεδίων που υπάρχουν εκεί (Σχήμα 1.5.2), ωστόσο έχουν δημιουργηθεί εγκαταστάσεις σε αρκετές ακόμα χώρες. Σημαντική είναι η ύπαρξη μονάδων που χρησιμοποιούν ως πηγή θερμότητας τη βιομάζα στην Γερμανία, τον Καναδά και την Ιταλία [18].

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, παρόλο που το 75% της συνολικής δυναμικότητας προέρχεται από τη γεωθερμία, ο αριθμός των μονάδων που εκμεταλλεύονται την συγκεκριμένη πηγή είναι μόλις το 19% των συνολικών. Το γεγονός αυτό προκύπτει από το υψηλό κόστος επένδυσης που συνεπάγεται η αξιοποίηση αυτού του τύπου θερμότητας, με αποτέλεσμα οι λίγες μονάδες που υπάρχουν να έχουν δυναμικότητα της τάξης των MW, δηλαδή από τις υψηλότερες που επιλέγονται σε εμπορικές εφαρμογές των ORCs [18].



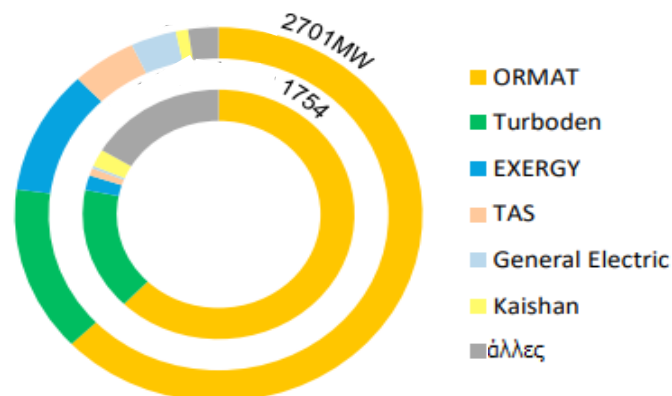
Σχήμα 1.5.2. Διάκριση συνολικής δυναμικότητας ORC (αριστερά) & γεωγραφική κατανομή της έως τις αρχές του έτους 2016 (δεξιά) ανά κατηγορία θερμικής πηγής [18].

Από το 2016 έως σήμερα οι εφαρμογές των ORCs συνεχίζουν να πολλαπλασιάζονται. Το 2020 η παγκόσμια αγορά έφτασε τα 41,9 εκ. δολάρια, το 2021 άγγιξε τα 185 εκ. δολάρια και το 2022 εκτοξεύτηκε στα 830 εκ. δολάρια, με τις προβλέψεις για την επόμενη δεκαετία να είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές, καθώς τα οικονομικά κίνητρα για την αξιοποίηση ανανεώσιμης ενέργειας, όπως επιδοτήσεις, feed-in-tariffs και φοροαπαλλαγές, αυξάνονται συνεχώς [20].



Σχήμα 1.5.3. Υφιστάμενες μονάδες ORC έως τον Αύγουστο του 2023. Με πράσινο συμβολίζονται οι μονάδες βιομάζας, με μπλε οι μονάδες απορριπτόμενης θερμότητας, με κόκκινο οι μονάδες γεωθερμίας, με κίτρινο οι μονάδες ηλιακής ενέργειας και με πορτοκαλί οι μονάδες αξιοποίησης αποβλήτων [21].

Οι κύριοι κατασκευαστές συστημάτων ORC είναι οι εταιρείες ORMAT, Turboden, EXERGY, Adoratec, TAS Energy Inc., ElectraTherm, General Electric, Kaishan, Tri-o-gen, και GMK. Έως το 2016, οι ORMAT και Turboden παρήγαγαν το 76% της συνολικής ισχύος από ORC σε παγκόσμιο επίπεδο [18].



Σχήμα 1.5.4. Μερίδιο της συνολικής δυναμικότητας και αριθμός εγκαταστάσεων ORC παγκοσμίως ανά κατασκευαστή (έως 2016) [18].

Πιο αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τις εφαρμογές που εξειδικεύονται κάποιες από αυτές τις εταιρείες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5.1:

Πίνακας 1.5.1. Εφαρμογές και κύριοι κατασκευαστές συστημάτων ORC [3,10,18].

Κατασκευαστής	Εφαρμογή	Ενδεικτική Θερμοκρασία Πηγής (°C)	Κύρια Εργαζόμενα Μέσα	Αριθμός Μονάδων (έως 2016)
ORMAT (ΗΠΑ)	Γεωθερμία, Ηλιακή Ενέργεια, Απορριπτόμενη Θερμότητα	150-300	κ-πεντάνιο, κυκλοπεντάνιο, ισοπεντάνιο	1102
Turboden (Ιταλία)	Βιομάζα (Συμπααραγωγή), Γεωθερμία, Απορριπτόμενη Θερμότητα	100-300	OMTS*, Solkatherm SES36*, R134a, ισοβουτάνιο	267
Electratherm (ΗΠΑ)	Ηλιακή Ενέργεια, Απορριπτόμενη Θερμότητα	>95	R245fa	55
Tri-o-gen (Ολλανδία)	Βιομάζα, Απορριπτόμενη Θερμότητα	>350	Τολουόλιο	37
Adoratec (Γερμανία)	Βιομάζα (Συμπααραγωγή)	300	OMTS*	23
GMK (Γερμανία)	Βιομάζα (Συμπααραγωγή), Γεωθερμία, Απορριπτόμενη Θερμότητα	120-350	- **	18

\*Το OMTS είναι το οκταμεθυλοτρισιλοζάνιο ( $C_8H_{24}O_2Si_3$ ) και το Solkatherm SES36 είναι αζεοτροπικό μίγμα R365mfc και υπερφθοροπολυαιθέρα (PFPE), ως ψευδοκαθαρό υλικό.

\*\* Έλλειψη δεδομένων.

Τα ORCs είναι μία τεχνολογία επίκαιρη που χρήζει περαιτέρω μελέτης και βελτιστοποίησης, δεδομένης της γενικότερης στροφής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα κύρια σημεία της έρευνας που διεξάγεται σήμερα έχουν να κάνουν με τη χρήση υπερκρίσιμων συνθηκών, την καταλληλότητα των οργανικών ουσιών τόσο καθαρών όσο και μιγμάτων τους, τα πολλαπλά επίπεδα πίεσης, την κλιμάκωση της δυναμικότητας και την μείωση του χρόνου απόσβεσης μίας τέτοιας μονάδας.

Η εφαρμογή που φαίνεται να έχει τα μεγαλύτερα περιθώρια ανάπτυξης είναι η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε ποικίλα επίπεδα θερμοκρασίας. Πολλαπλές μελέτες εξετάζουν την ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων σε επιβατικά οχήματα [15]. Καινοτόμες εφαρμογές αφορούν την εκμετάλλευση της ενέργειας και της θερμοκρασιακής βαθμίδας (τουλάχιστον 20°C) των ωκεανών (σε βάθος 600-1000 μέτρων), περιοχών στην τροπική ζώνη και κοντά στον Ισημερινό αλλά και την αξιοποίηση του καθαρού έργου ενός ORC στον συμπιεστή ενός ψυκτικού κύκλου [3,15]. Διερευνάται η αποδοτικότητα των ORCs όταν η θερμότητα είναι διαθέσιμη σε υψηλές θερμοκρασίες, παραδείγματος χάρη στη δημιουργία ενός αποκεντρωμένου συστήματος συμπαραγωγής θέρμανσης και ψύξης, με αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας σε περιοχές με έντονη ηλιοφάνεια. Δεν αποκλείεται ακόμη και η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας από το διάστημα, μέσω της ανάπτυξης ενός ειδικού συστήματος που να λειτουργεί με ηλιακή ή πυρηνική ενέργεια [15].

Όλα τα παραπάνω αποτελούν ιδέες που ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικά στις επόμενες δεκαετίες και αποδεικνύουν ότι τα ORCs είναι στο επίκεντρο της έρευνας που διεξάγεται σήμερα.

## 2. Ανασκόπηση Οργανικού Κύκλου Rankine

### 2.1. Εργαζόμενα Μέσα

Τα ORCs λειτουργούν ως επί το πλείστον με υδρογονάνθρακες ή συνήθη ψυκτικά μέσα [2,14,16,22,23]. Έχουν χρησιμοποιηθεί και κάποια σιλοξάνια, τα οποία, ωστόσο, δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς ώστε να είναι ανταγωνιστικά [19]. Προκειμένου ένα οργανικό ρευστό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ORC, απαιτείται να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, οι οποίες συνοψίζονται στα εξής:

- Ασφάλεια, δηλαδή να μην είναι τοξικό, εύφλεκτο και αναφλέξιμο [2,3,13,14,22,24-26].
- Μηδενικό δυναμικό καταστροφής του όζοντος (Ozone Depleting Potential-ODP), που αποτελεί έναν δείκτη της αραίωσης της στιβάδας του όζοντος που μπορεί να προκαλέσει η χρήση κάποιας ουσίας ως προς μία ουσία αναφοράς, συγκεκριμένα το R11 με ODP=1 [2,3,13,17,22,26-28].
- Αμελητέο δυναμικό αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη (Global Warming Potential-GWP), που αποτελεί έναν δείκτη της συμβολής μιας ουσίας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε περίοδο 100 ετών ως προς μία ουσία αναφοράς, συγκεκριμένα το CO<sub>2</sub> με GWP=1 [2,3,13,17,21,22,24,26-28]. Έχει καθιερωθεί το GWP να θεωρείται χαμηλό όταν δεν ξεπερνά την τιμή 300, μέτριο όταν κυμαίνεται στο εύρος 300-1000 και υψηλό όταν ξεπερνά το άνω όριο του εύρους αυτού [28].
- Μικρή ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής (Atmospheric Lifetime-ALT), δηλαδή να μην παραμένει στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την χρήση και έκλυσή του [2,3,28].
- Διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος [3,14,17,22,24,25]. Γενικά, τα ψυκτικά μέσα είναι πιο ακριβά από τους υδρογονάνθρακες [26].
- Χημική και θερμική σταθερότητα στις λειτουργικές συνθήκες του συστήματος, καθώς τα οργανικά ρευστά, σε αντίθεση με το νερό, ενδέχεται να υποστούν διάσπαση [3,14,17,22,24-26].
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα για να επιτυγχάνεται ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας στους χρησιμοποιούμενους εναλλάκτες [3,14,22,26].
- Χαμηλό ιξώδες ατμών και υγρής φάσης, ώστε οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας να είναι μεγάλοι και οι απώλειες μικρές [3,14,22,26].
- Θερμοκρασία τήξης χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, προκειμένου να αποφεύγεται η στερεοποίηση του ρευστού στον συμπυκνωτήρα [3,14,17,26].
- Μεγάλη πυκνότητα ή μικρό ειδικό όγκο ατμών φάσης, που οδηγεί σε μικρότερη ογκομετρική παροχή και συνεπώς χαμηλότερη πτώση πίεσης στις σωληνώσεις και μικρότερο μέγεθος εναλλακτών θερμότητας [3,14,16,24,26].
- Υψηλή, σχετικά, θερμοκρασία αυτανάφλεξης, με τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου στην έξοδο του εξατμιστήρα να πρέπει να είναι χαμηλότερη από αυτή [17].
- Να μην είναι διαβρωτικό και γενικά να είναι συμβατό με τα υλικά κατασκευής των διατάξεων και οποιαδήποτε λιπαντικά μπορεί να απαιτούνται [17,22,26].

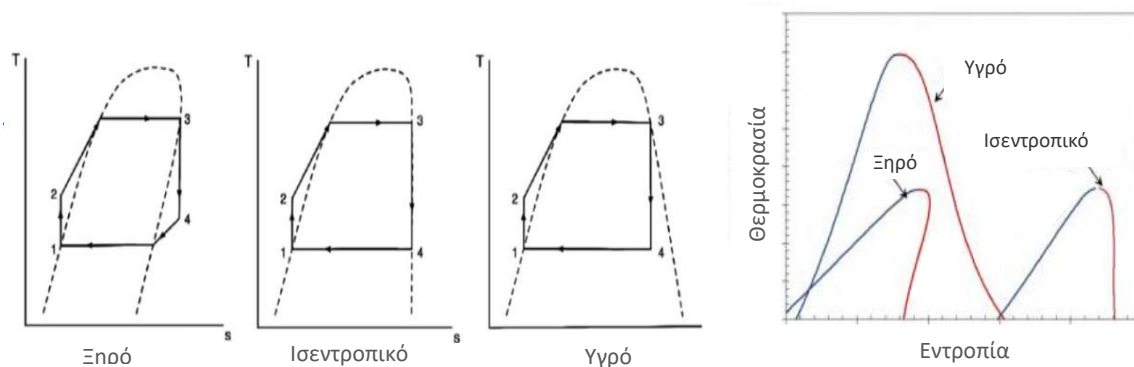


- Να εξασφαλίζει κατάλληλα επίπεδα τάσης ατμών στις επιλεγμένες θερμοκρασίες, δηλαδή όχι πολύ υψηλή πίεση στον εξατμιστήρα, ώστε να μην αυξάνεται σημαντικά το πάγιο κόστος, και πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική στον συμπυκνωτήρα, για να αποφεύγεται η είσοδος αέρα και οι διαρροές του εργαζόμενου μέσου [3,14,26].
- Σχετικά υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία, που αποτελεί τη μοναδική θερμοφυσική ιδιότητα των οργανικών ρευστών η οποία έχει ξεκάθαρη σχέση με την απόδοση του συστήματος, αφού όσο πιο κοντινή είναι στη θερμοκρασία της πηγής τόσο υψηλότερος αναμένεται ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης [8,14,26,27].
- Σχετικά υψηλή θερμοκρασία ζέσεως [8,27,29]. Η αύξησή της έχει παρατηρηθεί ότι μειώνει τις αναντιστρεπτότητες, δηλαδή την καταστροφή εξέργειας στο κύκλο [29].
- Μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, που οδηγεί σε υψηλότερη ενθαλπία στην έξοδο του εξατμιστήρα, κάτι το οποίο ευνοεί την παραγωγή έργου στον στρόβιλο [26].

Ως προς την ασφάλεια, τα ψυκτικά μέσα χωρίζονται από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού ASHRAE σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την τοξικότητα και τρεις ανάλογα με την ευφλεκτότητα. Η κατηγορία A περιέχει ρευστά χωρίς εμφανή τοξικότητα σε συγκεντρώσεις κάτω από 400 ppm, ενώ τα ρευστά της κατηγορίας B είναι τοξικά ακόμα και σε τόσο χαμηλές συγκεντρώσεις. Αντίστοιχα, η κατηγορία 1 αντιστοιχεί στα μη εύφλεκτα ενώ η κατηγορία 3 στα πολύ εύφλεκτα ρευστά, με κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας μικρότερο ή ίσο των  $0,1 \text{ kg/m}^3$  στη θερμοκρασία των  $21^\circ\text{C}$  και σε ατμοσφαιρική πίεση [2]. Ανάλογα με το αν η ταχύτητα καύσης ξεπερνά τα  $10 \text{ cm/s}$ , δηλαδή αν είναι εύκολη ή δύσκολη η πυροδότηση, η ενδιάμεση κατηγορία της κλίμακας ευφλεκτότητας χωρίζεται σε 2 και 2L αντιστοίχως. Για τον περιορισμό της ευφλεκτότητας υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης αντιπυρικών ουσιών και γενικά, απαιτείται ειδικός χειρισμός σύμφωνα με συγκεκριμένες οδηγίες ασφαλείας [16].

Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ τέθηκε σε ισχύ το 1989 και είναι μια παγκόσμια συμφωνία, επικυρωμένη από τα 197 κράτη-μέλη του ΟΗΕ, που αποσκοπεί στην προστασία της στιβάδας του όζοντος μέσω της κατάργησης των χημικών ουσιών που την καταστρέφουν. Οι ελεγχόμενες ουσίες είναι οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) και οι υδροβρωμοφθοράνθρακες (HBFCs) [30]. Οι CFCs, όπως τα ψυκτικά R11 και R113, έχουν ήδη απαγορευτεί από το 2010, ενώ από το 2020 έχει αρχίσει και ο περιορισμός των HCFCs, όπως το R123 και το R22, που αναμένεται να ολοκληρωθεί έως το 2030 [2,30]. Συνεπώς, από τα διαθέσιμα ψυκτικά μέσα προτιμώνται οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), που αποτελούν τους αντικαταστάτες των CFCs και των HCFCs, για τους οποίους, ωστόσο, επίσης θα επιβληθεί περιορισμός από το έτος 2024, λόγω επιβάρυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου [30]. Ενώ, λοιπόν, κάποια από τα διαθέσιμα ψυκτικά πληρούν την πλειονότητα των παραπάνω προϋποθέσεων, χαρακτηρίζονται είτε από υψηλό ODP είτε από υψηλό GWP και κρίνονται ακατάλληλα [28]. Υπό αυτό το πρίσμα, σήμερα εξετάζονται ιδιαίτερα τα ψυκτικά τέταρτης γενιάς, μεταξύ αυτών και οι υδροφθορολεφίνες (HFOs), που έχουν μηδενικό ODP και αμελητέο GWP. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα ψυκτικά R1234yf και R1233zd(e), που αποτελούν τους πιθανούς αντικαταστάτες των R134a και R123 αντίστοιχα [23,28].

Μία σημαντική κατηγοριοποίηση των ρευστών έχει να κάνει με την κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [2,8,9,14,27,29]. Αν η κλίση αυτή είναι θετική, το ρευστό χαρακτηρίζεται ως ξηρό, αν η κλίση είναι αρνητική ως υγρό, ενώ αν είναι σχεδόν άπειρη ως ισεντροπικό [2,8].



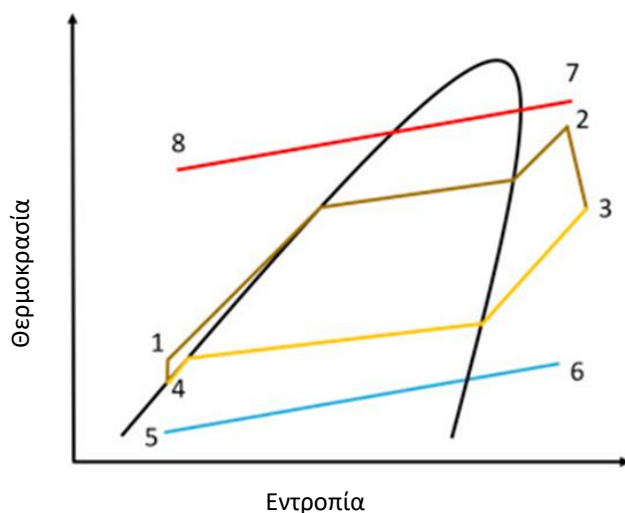
**Σχήμα 2.1.1.** Αποτύπωση διεργασιών απλού κύκλου Rankine σε διάγραμμα T-s (αριστερά) [14] και διαφορές στην μορφή των καμπυλών κορεσμένου ατμού (δεξιά) για τις τρεις κατηγορίες ρευστών [24].

Στο αριστερό σκέλος του Σχήματος 2.1.1 ο ατμός εξέρχεται από τον εξατμιστήρα (σημείο 3) σε κορεσμένη κατάσταση, με αποτέλεσμα μετά την εκτόνωση (σημείο 4) να προκύπτει υπέρθερμος ατμός, αν το ρευστό είναι ξηρό, κορεσμένος, αν είναι ισεντροπικό, και υγρός, αν είναι υγρό. Στο δεξί σκέλος του ίδιου Σχήματος, οι κόκκινες καμπύλες αντιστοιχούν στην κατάσταση κορεσμένου ατμού και οι μπλε στην κατάσταση κορεσμένου υγρού.

Γενικά, είναι προτιμότερο ένα ρευστό που χρησιμοποιείται σε ένα οργανικό κύκλο Rankine να είναι σχετικά ξηρό ή έστω ισεντροπικό, καθώς αυτά εξασφαλίζουν την απουσία σταγονιδίων στον στρόβιλο [3,8,14,24,27,29,31]. Δεν είναι, βέβαια, επιθυμητό ένα «πολύ ξηρό» ρευστό, δηλαδή με έντονα θετική κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού (Σχήμα 2.1.1), αφού θα αυξηθεί υπερβολικά το ψυκτικό φορτίο του συμπυκνωτήρα και επιπλέον, η περιοχή των βέλτιστων λόγων πιέσεων ενδέχεται να αντιστοιχεί σε θερμοκρασία στον συμπυκνωτήρα κάτω από το σημείο τήξης του εργαζόμενου μέσου, με αποτέλεσμα αυτό να στερεοποιηθεί [14,31]. Αντίθετα, η εκτόνωση υγρών ρευστών γίνεται εξ' ολοκλήρου στη διφασική περιοχή, με την ποιότητα του ρευστού να μειώνεται με την πάροδο της εκτόνωσης [24]. Προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση των περυγίων του στρόβιλου, συνήθως τα υγρά ρευστά υπερθερμαίνονται στον εξατμιστήρα [13,24]. Όμως η υπερθέρμανση δεν είναι πάντοτε εφικτή, δεδομένου ότι τα ORCs εκμεταλλεύονται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας [24].

Σημαντική έρευνα γίνεται και σχετικά με τη χρήση ζεοτροπικών μιγμάτων αντί για καθαρές ουσίες ως εργαζόμενα μέσα στα οργανικά κύκλα Rankine [2]. Η κύρια διαφορά σχετίζεται με την αλλαγή φάσης, κατά την οποία η θερμοκρασία των καθαρών ουσιών παραμένει σταθερή, ενώ αντίθετα το θερμοκρασιακό προφίλ των ζεοτροπικών μιγμάτων είναι μεταβλητό. Συνεπώς, εφόσον μεταβλητή είναι και η θερμοκρασία της πηγής και της δεξαμενής θερμότητας, οι θερμοκρασιακές διαφορές και άρα οι αναντιστρεπτότητες και η εξεργειακή καταστροφή περιορίζονται σε σχέση με την περίπτωση της καθαρής ουσίας [1,2,14]. Όλα τα παραπάνω αποτυπώνονται σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ενός ζεοτροπικού μίγματος. Με τα σημεία 1-4 αποτυπώνονται οι διεργασίες που περιλαμβάνει το κύκλο, με τα σημεία 5-6 η θέρμανση του ψυκτικού μέσου και με τα 7-8 η ψύξη της πηγής θερμότητας.





**Σχήμα 2.1.2.** Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας απλού ORC με ζεοτροπικό μίγμα οργανικών ρευστών ως εργαζόμενο μέσο [32].

Ωστόσο, ο έλεγχος του συστήματος γίνεται αρκετά δυσκολότερος, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας μειώνονται, σε σχέση με τις καθαρές ουσίες, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερα μεγέθη εναλλακτών θερμότητας, και αυξάνεται η πιθανότητα θερμικής διάσπασης υπό μεταβαλλόμενες λειτουργικές συνθήκες [1,14]. Επιπλέον, από τη βιβλιογραφία απουσιάζουν πειραματικά δεδομένα για την πρόβλεψη των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας και των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων ζεοτροπικών μιγμάτων, δυσχεραίνοντας τη μοντελοποίηση του συστήματος [1].

Σχετικά με τη χρήση αζεοτροπικών μιγμάτων, το σημείο δρόσου ταυτίζεται με το σημείο φυσαλίδας και συνεπώς δεν παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που περιεγράφηκαν και το μίγμα συμπεριφέρεται ως «ψευδοκαθαρό» συστατικό. Επιπλέον, ενδεχομένως να απαιτούνται υποατμοσφαιρικές πιέσεις. Για το λόγο αυτό, τα αζεοτροπικά μίγματα συνήθως αποφεύγονται σε συστήματα ORC [14].

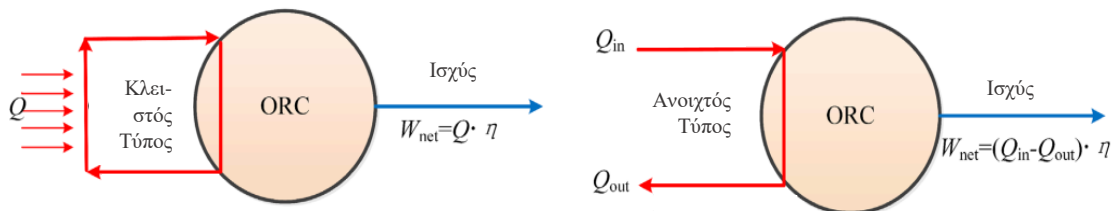
Γενικά, δεν υπάρχει κάποιο βέλτιστο ρευστό, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά σε όλες τις εφαρμογές [14,16,26]. Η επιλογή εργαζόμενου μέσου πρέπει να συνάδει με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας και του ψυκτικού μέσου [14,16,24]. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής, τόσο υψηλότερη είναι και η μέγιστη επιτρεπτή κρίσιμη θερμοκρασία των υποψήφιων οργανικών ρευστών. Συνολικά, η διαδικασία επιλογής εργαζόμενου μέσου είναι αρκετά επίπονη και πολύπλευρη. Προτείνονται διάφορες προκαταρκτικές μέθοδοι επιλογής, όπως το screening, δηλαδή η αναγνώριση λίγων καθοριστικών παραμέτρων και ο αποκλεισμός των ρευστών που δεν πληρούν τις προδιαγραφές σχετικά με αυτές, και η δημιουργία λειτουργικού χάρτη, δηλαδή ενός διαγράμματος που απεικονίζει την περιοχή αποδοτικής λειτουργίας κάθε ρευστού [14].

Στο Παράρτημα Α παρατίθεται πίνακας με τις σημαντικότερες ιδιότητες συνήθων οργανικών ρευστών που χρησιμοποιούνται ως εργαζόμενα μέσα σε συστήματα οργανικών κύκλων Rankine.

## 2.2. Πηγές Θερμότητας

Ο τύπος της πηγής θερμότητας είναι καθοριστικός για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου, των λειτουργικών συνθηκών, της κατάλληλης διάταξης, αλλά και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου ενός οργανικού κύκλου Rankine [24]. Προκειμένου να γίνει πλήρης αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας από θερμοδυναμική και τεχνοοικονομική άποψη, απαιτούνται αντισταθμίσεις και βελτιστοποίηση, αφού η κάθε πηγή έχει τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που επηρεάζουν την απόδοση και επιφέρουν επιπλέον κόστη, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό μιας μονάδας [2,7,13].

Η κατηγοριοποίηση των πηγών μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια. Αρχικά, οι πηγές θερμότητας διακρίνονται σε κλειστές/συνεχείς/ανακυκλούμενες και ανοιχτές/αισθητές/ένσπεράσματος, ανάλογα με το πώς συνδέονται με το ORC. Στις κλειστές πηγές, η θερμότητα μεταφέρεται στο κύκλο μέσω ενός ενδιάμεσου ρευστού (συνήθως θερμικού ελαίου), που απορροφά τη θερμότητα της πηγής και κυκλοφορεί σε ενδιάμεσο βρόχο. Δηλαδή, οι κλειστές πηγές, εφόσον δεν υπάρχουν σημαντικές απώλειες, δίνουν όλη τη διαθέσιμη ενέργειά τους. Αντίθετα, οι ανοιχτές πηγές προσφέρουν μέρος αυτής, αφού η τελική τους θερμοκρασία δεν είναι σταθερή. Για να αξιοποιηθεί η πηγή πλήρως, πρέπει η τελική της θερμοκρασία να εξισορροπηθεί με αυτή του περιβάλλοντος, κάτι που συνήθως δεν είναι εφικτό, λόγω περιορισμών που σχετίζονται με τις ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές σε εναλλάκτες θερμότητας πεπερασμένης επιφάνειας [1,10]. Η κατηγοριοποίηση των πηγών σε ανοιχτές και κλειστές δεν είναι πάντοτε ξεκάθαρη και έχει να κάνει με τον όγκο ελέγχου που θεωρείται ανά σύστημα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα κλειστών πηγών είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η καύση βιομάζας (αξιοποιώντας ενδιάμεσο ρευστό) και ανοιχτών η γεωθερμία [10]. Αυτοί οι δύο διαφορετικοί τρόποι μεταφοράς θερμότητας αναπαρίστανται ως εξής:



Σχήμα 2.2.1. Διαφορές στη μεταφορά θερμότητας από κλειστή (αριστερά) και ανοιχτή (δεξιά) θερμική πηγή σε ένα οργανικό κύκλο Rankine [10].

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της ανοιχτής πηγής, το  $Q_{out}$  (Σχήμα 2.2.1) δεν αφορά την θερμότητα που απάγεται από τον συμπυκνωτήρα, αλλά το μέρος της θερμότητας της πηγής που μένει ανεκμετάλλευτο λόγω των προαναφερθέντων περιορισμών.

Ένα δεύτερο κριτήριο κατηγοριοποίησης των πηγών έχει να κάνει με το επίπεδο θερμοκρασίας τους. Αν η θερμοκρασία κυμαίνεται στο εύρος 150-250°C χαρακτηρίζεται ως μέτρια, κάτω από αυτό το εύρος ως χαμηλή και πάνω από αυτό ως υψηλή. Επιπλέον, η τιμή της καθορίζει και τη μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου μετά την εξάτμιση [1,13,15].

Υπάρχουν και πηγές των οποίων το ενεργειακό περιεχόμενο δεν είναι πάντοτε σταθερό, κάτι που πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό των αντίστοιχων συστημάτων. Τέτοια παραδείγματα είναι η ηλιακή ακτινοβολία αλλά και τα θερμικά υπόλοιπα

βιομηχανικών διεργασιών, ενώ αντίθετα η ποσότητα της θερμότητας από νερό γεωθερμίας κινείται εντός ενός πολύ πιο συγκεκριμένου εύρους. Τα συστήματα που λειτουργούν με πηγές με έντονες διακυμάνσεις σχεδιάζονται συνήθως ώστε να είναι οικονομικώς αποδεκτά στον μέσο όρο της θερμότητας της πηγής, και όχι στη μέγιστη τιμή της [10].

Οι πηγές μπορεί να είναι σε μορφή αερίου ή ατμού, όπως τα καυσαέρια βιομηχανικών διεργασιών ή μηχανών εσωτερικής καύσης, ή σε υγρή μορφή, με την οποία επιτυγχάνονται καλύτεροι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και απαιτούνται μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές, της τάξης των 5-15 βαθμών. Αντίθετα, τα αέρια απαιτούν διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των 30 βαθμών, με επακόλουθο υψηλότερες μεν απώλειες θερμότητας, μικρότερες δε επιφάνειες εναλλαγής και άρα χαμηλότερο κόστος. Βέβαια, οι θερμοκρασιακές διαφορές επηρεάζονται και από τη σύσταση του μέσου, παραδείγματος χάρη η τελική θερμοκρασία του νερού γεωθερμίας πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τα άλατα που περιέχει να παραμένουν διαλυμένα και να μην δημιουργηθούν επικαθίσεις, ενώ η θερμοκρασία των καυσαερίων πρέπει να είναι υψηλότερη από το όξινο σημείο δρόσου τους προς αποφυγή σχηματισμού  $H_2SO_4$ , που κρίνεται υπεύθυνο για την όξινη βροχή [10].

Ακολουθεί μία πιο αναλυτική περιγραφή των κύριων πηγών θερμότητας, προκειμένου να διασαφηνιστούν τα χαρακτηριστικά καθεμίας που επηρεάζουν ένα σύστημα ORC.

#### ο Απορριπτόμενη Θερμότητα

Ως απορριπτόμενη θερμότητα ορίζεται η ενέργεια η οποία παραμένει αναξιοποίητη και διαχέεται στο περιβάλλον, επιβαρύνοντας τη θερμική ρύπανση [2,3,9]. Οι θερμοκρασίες της απορριπτόμενης ενέργειας ποικίλουν. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι βιομηχανίες κεραμικών, γυαλιού και χάλυβα αποβάλλουν θερμότητα περίπου στους 300-400°C, δηλαδή σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ η βιομηχανία τροφίμων στους 150°C, δηλαδή σε μέτρια. Συνήθως, προτιμάται η χρήση κάποιου ενδιάμεσου ρευστού προς αποφυγή διάσπασης των οργανικών ουσιών [1,10]. Η δυναμικότητα παραγωγής ισχύος από απορριπτόμενη θερμότητα βιομηχανιών κυμαίνεται από λίγα kW έως 10 MW περίπου [19].

Αν χρησιμοποιηθεί ως υποκείμενος κύκλος ένας οργανικός κύκλος Rankine σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η αποδοτικότητα αξιοποίησης του καυσίμου μπορεί να αυξηθεί έως και 10% και η ποσότητα των εκπεμπόμενων  $CO_2$  και  $NO_x$  μειώνεται αισθητά. Τα ORCs θα μπορούσαν να προσαρμοστούν ακόμη και στις μηχανές εσωτερικής καύσης πλοίων, όπου τα καυσαέρια είναι σε μεγάλη ποσότητα, ανοίγοντας το δρόμο για αξιοποίηση και σε άλλα οχήματα, μετά από μείωση των διαστάσεων [15]. Δηλαδή, υπάρχουν περιορισμοί ως προς το μέγιστο όγκο των συστημάτων αυτών, κάτι που ευνοεί τη χρήση οργανικών ρευστών έναντι νερού. Στην περίπτωση των αεριοστροβίλων, προτιμάται ο συνδυασμός με ORCs για παραγωγή ποσότητας ισχύος μικρότερης από 50 MW, καθώς οι θερμοκρασίες των καυσαερίων είναι χαμηλότερες σε αυτό το εύρος δυναμικότητας. Ως εργαζόμενα μέσα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς κάποιοι υδρογονάνθρακες και ψυκτικά μέσα, που προτιμώνται από τα σιλοξάνια, χάρη στις μικρότερες ογκομετρικές παροχές τους [10].

#### ο Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια της Γης. Η θερμοκρασία της Γης αυξάνεται με το βάθος, με τη μέση βαθμίδα θερμοκρασίας να ισούται με 30°C/km, και το γεγονός αυτό προκαλεί μία ροή θερμότητας προς την επιφάνεια της, ίση με

περίπου  $60 \text{ mW/m}^2$  [33]. Για να θεωρηθεί ότι ένα υπόγειο ρεύμα διαθέτει γεωθερμικό δυναμικό, πρέπει η θερμοκρασία του να υπερβαίνει τους  $30^\circ\text{C}$  [34]. Οι πηγές διακρίνονται σε αυτές που περιέχουν ατμό, οι οποίες συναντώνται σε βάθη έως  $1,5 \text{ km}$  και η θερμοκρασία μπορεί να φθάνει ακόμα και τους  $250^\circ\text{C}$ , και σε αυτές που περιέχουν κυρίως ή εξ' ολοκλήρου θερμό νερό. Οι τελευταίες συναντώνται σε βάθη έως  $3 \text{ km}$  και διακρίνονται σε υψηλής (θερμοκρασία πάνω από  $150^\circ\text{C}$ ), μέσης ( $90 - 150^\circ\text{C}$  και υπό πίεση) και χαμηλής ενθαλπίας (μικρότερη από  $90^\circ\text{C}$ ).

Τα γεωθερμικά ρευστά περιέχουν ποικίλα διαλυμένα άλατα και αέρια, συγκεκριμένα  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2$ , λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των πολλαπλών χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ του ρευστού και των πετρωμάτων του ταμιευτήρα [35]. Έτσι, ενδέχεται η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας να συνοδεύεται από σχηματισμό επικαθίσεων στις επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή το γεωθερμικό ρευστό, αλλά και από ορισμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, που έχουν να κάνουν με την πιθανότητα εκπομπής των αερίων συστατικών και τη διάθεση των ρευστών μετά την αξιοποίησή τους. Η περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδος διάθεσης είναι η επανεισαγωγή τους στον ταμιευτήρα, δικαιολογώντας την ταξινόμηση της γεωθερμικής στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [34].

Η θερμότητα του γεωθερμικού πεδίου λαμβάνεται με γεωτρήσεις μέσω των οποίων τα γεωθερμικά ρευστά φθάνουν θερμά στην επιφάνεια της Γης. Η ροή μπορεί να είναι αυθόρμητη, εξαιτίας της πίεσης που επικρατεί στον ταμιευτήρα, ή να προκαλείται με άντληση. Το κόστος αυξάνεται έντονα με το βάθος των γεωτρήσεων, γι' αυτό υπάρχει ένα οικονομικό όριο βάθους, πέρα από το οποίο το πεδίο δεν είναι εκμεταλλεύσιμο, αν και η γεώτρηση μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή. Τα γεωθερμικά ρευστά μπορούν να μεταφερθούν σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις μέσα σε θερμικά μονωμένους αγωγούς. Ωστόσο, το λειτουργικό κόστος είναι αρκετά υψηλό, συνεπώς η απόσταση μεταξύ του πεδίου και της εφαρμογής επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη [34].

#### ο Ηλιακή ενέργεια

Στη Γη φτάνουν ετησίως  $1,7 \times 10^{11} \text{ MW}$  ηλιακής ακτινοβολίας, ποσό 10000 φορές μεγαλύτερο από την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Για την εκμετάλλευσή της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή ηλεκτρικής, υπάρχει η επιλογή της συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων και αυτή των ηλιακών συλλεκτών σε συνδυασμό με ένα ORC. Εφόσον η θερμοκρασία της ηλιακής ακτινοβολίας είναι χαμηλότερη από  $400^\circ\text{C}$ , είναι πιο αποδοτικό η ενέργεια αυτή να αξιοποιηθεί στα οργανικά κύκλα, σε σχέση με τα κύκλα ατμού [10]. Ένα είδος ηλιακού συλλέκτη είναι ο παραβολικός, που θερμαίνει το ενδιάμεσο ρευστό σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες με καλή απόδοση. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας παραμένει σε σταθερή θερμοκρασία ακόμη και υπό μεταβλητά επίπεδα ηλιοφάνειας, συνεπώς το εργαζόμενο μέσο οδηγείται με σταθερή μαζική παροχή στον εξατμιστήρα του ORC, εξασφαλίζοντας την σταθερή λειτουργία του συστήματος ανεξάρτητα από την εποχιακή διακύμανση της πηγής [7,10]. Πέρα από τους παραβολικούς συλλέκτες, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση ηλιακών δεξαμενών ή λιμνών, δηλαδή αβαθών τεχνητών λιμνών με προοδευτική αύξηση της περιεκτικότητας σε  $\text{NaCl}$  με το βάθος [10,22]. Η βαθμίδα συγκέντρωσης δεν επιτρέπει τη φυσική κυκλοφορία του νερού, με αποτέλεσμα η μεταφορά θερμότητας να γίνεται μόνο με αγωγή, ενώ η μετάδοση με ακτινοβολία είναι αδύνατη μέσα στο νερό. Έτσι, το κατώτερο στρώμα νερού αποτελεί την αποθήκη θερμότητας, ενώ το ανώτερο μπορεί να παρέχει νερό ψύξης στον συμπυκνωτήρα [36].

Το πλεονέκτημα των ORCs έναντι των φωτοβολταϊκών είναι πως δεν είναι αναγκαία η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε συστοιχία μπαταριών για μεταγενέστερη χρήση, καθότι υπάρχει η δυνατότητα της αποδοτικότερης αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, το κόστος μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι αρκετά χαμηλότερο [10].

- ο Ενέργεια βιομάζας

Ως βιομάζα ορίζεται οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς (ξύλο, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων). Η βιομάζα αποτελεί την τέταρτη μαζικώς χρησιμοποιούμενη πηγή πρωτογενούς ενέργειας, παρέχοντας το 10% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς ουσιαστικά πρόκειται για αποθηκευμένη ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. Η βιομάζα καίγεται μέσω μιας διεργασίας παρόμοιας με εκείνη στους συμβατικούς λέβητες ατμού και η θερμότητα μεταφέρεται στο οργανικό κύκλο Rankine μέσω ενδιάμεσου ρευστού, εξασφαλίζοντας απλή και ασφαλή λειτουργία. Εναλλακτικά, η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε υγρό βιοκαύσιμο ή αέριο μέσω πυρόλυσης και αεριοποίησης, υπό τον κίνδυνο, ωστόσο, διάβρωσης λόγω των περιεχόμενων θειικών και χλωρικών ιόντων και του υψηλότερου κόστους σε σχέση με την καύση [10].

Οι πηγές βιομάζας είναι πολύ διασκορπισμένες, επομένως τα συστήματα είναι στην πλειονότητα τους μικρής κλίμακας και αποκεντρωμένα. Συχνά η πηγή αυτή χρησιμοποιείται σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Δεδομένου ότι η θερμότητα είναι σχετικά δύσκολο να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις, η δυναμικότητα των σταθμών συμπαραγωγής φτάνει έως τα 10 MW θερμικής ενέργειας, η οποία αντιστοιχεί σε 1-2 MW ηλεκτρικής [10].

Τέλος, υπάρχει και το ενδεχόμενο αξιοποίησης ποικίλων διαφορετικών πηγών θερμότητας σε ένα οργανικό κύκλο Rankine, κάτι που επιτυγχάνει καλύτερο συνδυασμό της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου με το θερμοκρασιακό προφίλ των πηγών και συνεπώς, μείωση της καταστροφής εξέργειας στον εξατμιστήρα [1,10,15,27]. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος θα ήταν να συνδυαστούν η ηλιακή ακτινοβολία με τη γεωθερμία, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, ανεξάρτητα από τη χρονική περίοδο και τις εποχιακές διακυμάνσεις της έντασης του ήλιου. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, εμφανίζουν δυσκολία στον έλεγχο και στη ρύθμιση και συνεπώς είναι υψηλά πάγια και λειτουργικά κόστη.

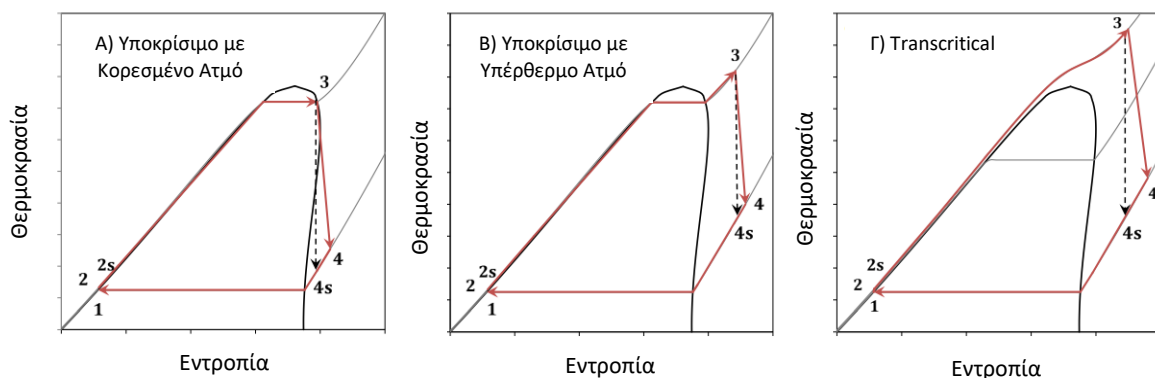
Στον Πίνακα 2.2.1 δίνεται μία σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων πηγών θερμότητας στα ORCs.

Πίνακας 2.2.1. Χαρακτηριστικά κύριων θερμικών πηγών στα οργανικά κύκλα Rankine [1,10,15].

Πηγή Θερμότητας	Επίπεδα Θερμοκρασίας (°C)	Χαρακτηριστικά	Κύριο Κόστος	Μέσο Μεταφοράς Θερμότητας
Γεωθερμία	70-350	ΑΠΕ	Γεώτρηση, Αντληση	Νερό
Καύση Βιομάζας	250-500	ΑΠΕ	Λέβητας	Θερμικό έλαιο
Ηλιακή ακτινοβολία	<400	ΑΠΕ	Κόστος συλλέκτη	Θερμικό έλαιο
Θερμικά υπόλοιπα από ΜΕΚ & αεριοστροβίλους	300-700 (καυσαέρια)	Απορριπτόμενη Θερμότητα	Μείωση μεγέθους εξοπλισμού	Αέρας
Θερμικά υπόλοιπα από βιομηχανία	200-300 (κυρίως) αλλά γενικά 80-500	Απορριπτόμενη Θερμότητα	-	Αέρας, Νερό, Ατμός

### 2.3. Παραλλαγές στη Διάταξη του Κύκλου

Ένα οργανικό κύκλο Rankine χαρακτηρίζεται ως υποκρίσιμο, αν η πίεση στην είσοδο του στροβίλου είναι μικρότερη από την κρίσιμη πίεση του εργαζόμενου μέσου, και ως υπερκρίσιμο, αν είναι μεγαλύτερη [2,19]. Δεδομένου ότι το κρίσιμο σημείο της πλειοψηφίας των οργανικών ρευστών παρουσιάζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, είναι σχετικά εύκολα επιτεύξιμη η λειτουργία ενός συστήματος ORC σε υπερκρίσιμες συνθήκες. Στα υποκρίσιμα κύκλα συνήθως επιλέγεται μία πίεση στον εξατμιστήρα στο εύρος 70-90% της κρίσιμης, λαμβάνοντας υπόψη το ενδεχόμενο συμπύκνωσης στον στρόβιλο, με επακόλουθη διάβρωση των μεταλλικών του τμημάτων [19]. Ο ατμός της οργανικής ουσίας στην έξοδο του εξατμιστήρα ενδέχεται να είναι είτε υπέρθερμος είτε κορεσμένος, κάτι που έχει να κάνει αφενός με τον τύπο του ρευστού, δηλαδή αν είναι ξηρό, ισεντροπικό ή υγρό, και αφετέρου με τον σχεδιασμό του συστήματος [2,22].

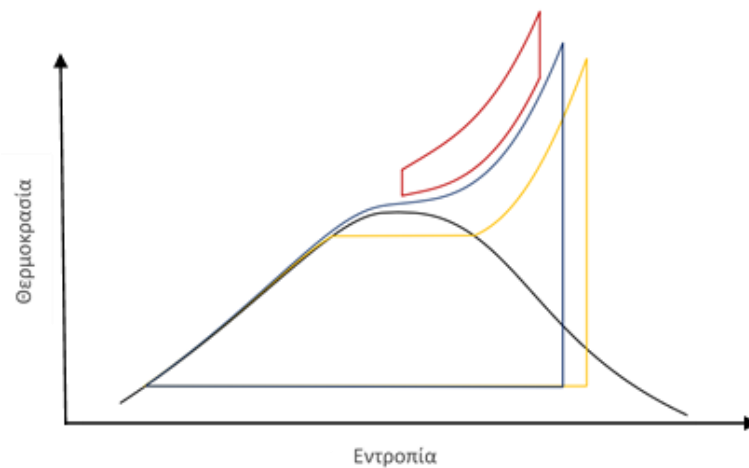


Σχήμα 2.3.1. Διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας απλού: Α) υποκρίσιμου, Β) υποκρίσιμου με υπερθέρμανση, Γ) transcritical οργανικού κύκλου Rankine [37].



Σε ένα transcritical κύκλο (Σχήμα 2.3.1.Γ) το εργαζόμενο μέσο παραμένει υγρό σε πίεση χαμηλότερη της κρίσιμης κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και μεταβαίνει σε υπερκρίσιμες συνθήκες κατά τη φάση της εκτόνωσης. Αντίθετα, στα υπερκρίσιμα (supercritical) κύκλα και οι δύο πιέσεις είναι υψηλότερες από την κρίσιμη, δηλαδή τόσο η συμπίεση όσο και η εκτόνωση λαμβάνουν χώρα σε υπερκρίσιμες συνθήκες [1,7,38]. Η διαφορά, ωστόσο, ανάμεσα στο transcritical και το supercritical κύκλο δεν είναι πάντοτε διακριτή και πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος υπερκρίσιμες και για τις δύο περιπτώσεις συνθηκών [7].

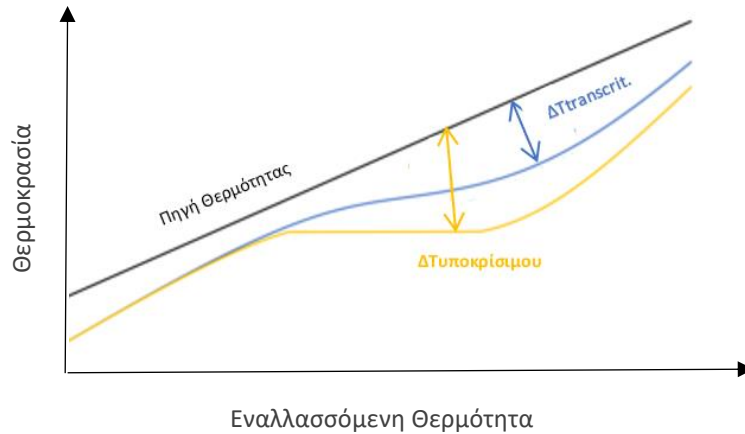
Στο Σχήμα 2.3.2 η διεργασία της συμπύκνωσης για το υποκρίσιμο και το transcritical κύκλο είναι κοινή. Η διεργασία της θέρμανσης γίνεται εκτός της «καμπάνας» της διφασικής περιοχής στην περίπτωση του transcritical κύκλου, κάτι που αποτελεί και τη διαφορά του από το υποκρίσιμο, ενώ για το υπερκρίσιμο όλη η κυκλική μεταβολή σημειώνεται στην ίδια περιοχή του διαγράμματος.



**Σχήμα 2.3.2.** Διεργασίες υποκρίσιμου (κίτρινη καμπύλη), transcritical (μπλε καμπύλη) και υπερκρίσιμου (κόκκινη καμπύλη) ORC, όπως αποτυπώνονται σε ένα διάγραμμα T-s [39].

Στο transcritical κύκλο, εφόσον τα ρευστά συμπιέζονται κατευθείαν σε υπερκρίσιμη πίεση και θερμαίνονται σε υπερκρίσιμη θερμοκρασία, μεταβαίνουν από την υγρή στην υπερκρίσιμη περιοχή, δηλαδή προσπερνούν τη διφασική περιοχή χωρίς να λάβει χώρα εξάτμιση. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερος συνδυασμός με το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής, κάτι που συνεπάγεται αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας. Λόγω της μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ πηγής και εργαζόμενου μέσου, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αναμένεται υψηλότερος σε σχέση με το υποκρίσιμο κύκλο [14].

Οι υπερκρίσιμες συνθήκες είναι καταλληλότερες για ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, τα οποία έχουν περαιτέρω δυνατότητα παραγωγής έργου με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο [1]. Πρέπει, βέβαια, να εξασφαλίζεται η χημική και θερμική τους σταθερότητα, αφού το ενδεχόμενο διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από το όριο της κρίσιμης τιμής [22].



**Σχήμα 2.3.3.** Διεργασία μεταφοράς θερμότητας στο λέβητα του υποκρίσιμου (κίτρινη καμπύλη) και transcritical (μπλε καμπύλη) ORC, όπως αποτυπώνονται σε ένα διάγραμμα T-Q [38].

Η επιλογή υπερκρίσιμων συνθηκών αναμένεται να επιφέρει αύξηση του παραγόμενου έργου αλλά και της προσδιδόμενης θερμότητας, η οποία μεταφέρεται σε υψηλότερη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης Carnot [19,40]. Βέβαια, λόγω της αυξημένης προσθήκης θερμότητας στο σύστημα, δεν είναι πάντα βέβαιο ότι οι υπερκρίσιμες συνθήκες συνεπάγονται και αυξημένη ενεργειακή απόδοση [19]. Στα υπερκρίσιμα κύκλα απαιτούνται μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στην αντλία. Οι πιέσεις λειτουργίας είναι αρκετά υψηλές, γεγονός που επιτάσσει τη χρήση υλικών με μεγαλύτερη αντοχή, που, σε συνδυασμό με τις μεγαλύτερες επιφάνειες, οδηγεί σε υψηλότερο πάγιο κόστος [1,19,22,23,37,40]. Πέρα από το αυξημένο κόστος, μία μεγάλη πρόκληση σχετικά με τη λειτουργία υπερκρίσιμων ORCs έχει να κάνει με την περιορισμένη γνώση γύρω από τον κατάλληλο σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας και των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας σε υπερκρίσιμες συνθήκες [40].

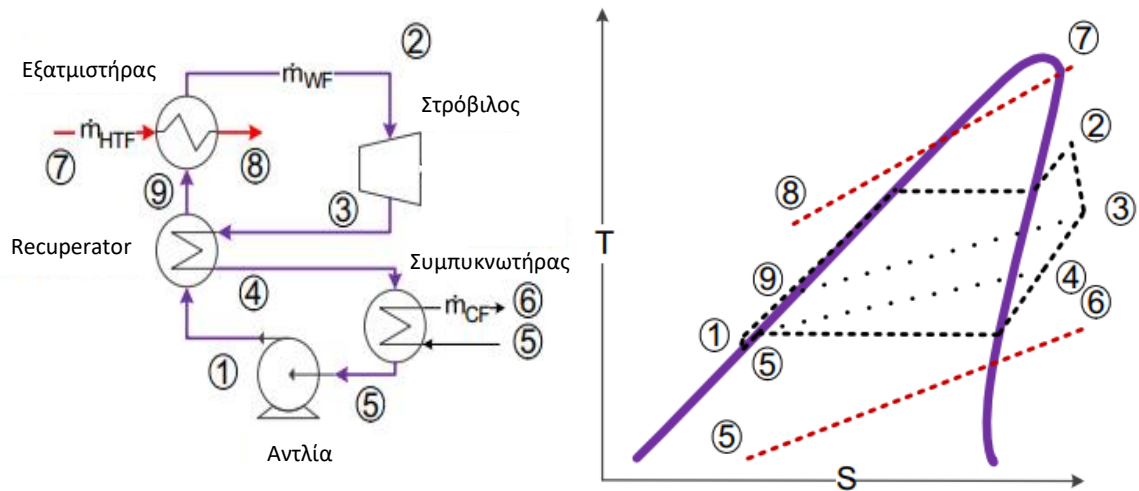
Για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, του καθαρού έργου ή της εξεργειακής απόδοσης διερευνάται η μεταβολή της απλής διάταξης του οργανικού κύκλου Rankine. Όπως και με το εργαζόμενο μέσο, έτσι και με τη διάταξη του κύκλου, δεν υπάρχει μία βέλτιστη επιλογή για όλα τα ρευστά και τις θερμικές πηγές, αλλά απαιτείται προσαρμογή στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος. Οποιαδήποτε προσθήκη στοιχείων στο κύκλο επιφέρει αύξηση του πάγιου κόστους, της πολυπλοκότητας, της δυσκολίας ελέγχου του συστήματος και της ευαισθησίας σε αλλαγή των λειτουργικών συνθηκών, τα οποία πρέπει να αντισταθμίζονται από τη θερμοδυναμική βελτιστοποίηση [1,31]. Δεν είναι πάντοτε βέβαιο ότι ένα πιο περίπλοκο σύστημα θα επιφέρει καλύτερη απόδοση, αφού ενδέχεται η διαθέσιμη θερμότητα να μην αξιοποιείται επαρκώς, κάτι που παρατηρείται ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες [31].

Παρακάτω παρατίθενται οι συνηθέστερες παραλλαγές του απλού οργανικού κύκλου Rankine. Καθεμία από αυτές έχει ξεχωριστό αντίκτυπο στην ενεργειακή απόδοση και στην ανάκτηση θερμότητας από τη θερμική πηγή [1].

- **Χρήση εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας (recuperator)**

Ως recuperator ορίζεται ένας εσωτερικός εναλλάκτης θερμότητας χωρίς ανάμειξη των εισερχόμενων ρευμάτων, όπου αξιοποιείται η θερμότητα του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του στροβίλου για την προθέρμανσή του πριν εισέλθει στον εξατμιστήρα [1,17,19,31]. Με αυτή τη διάταξη μειώνεται και η θερμότητα που λαμβάνεται από την πηγή και αυτή που απάγεται στο ψυκτικό μέσο, ενώ το καθαρό έργο παραμένει σταθερό [1,17,41]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα

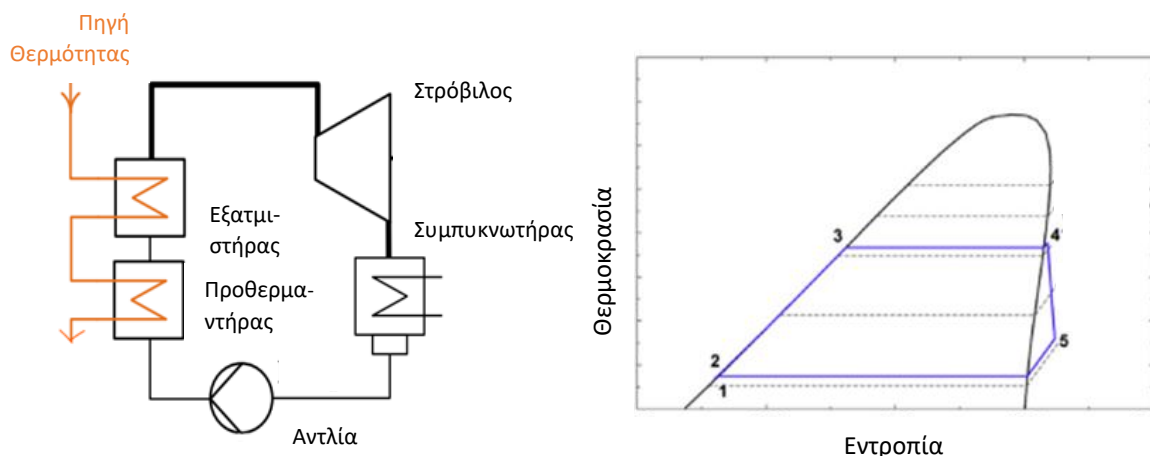
η θερμική απόδοση να αυξάνεται, ενώ η ολική καταστροφή εξέργειας αναμένεται μειωμένη, παρά την προσθήκη μίας επιπλέον συσκευής [1,19,38,41]. Όσο υψηλότερη είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου τόσο μεγαλύτερο είναι και το περιθώριο αξιοποίησης του recuperator, συνεπώς για μία τέτοια διάταξη κρίνονται κατάλληλες πηγές με σχετικά υψηλή θερμοκρασία, ενώ είναι απαραίτητη η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου στον εξατμιστήρα, ακόμη και αν είναι ξηρό ή ισεντροπικό [1,13]. Πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη το κόστος, η πτώση πίεσης και οι απώλειες θερμότητας στον επιπλέον εναλλάκτη [41]. Τα διαγράμματα ροής και θερμοκρασίας-εντροπίας έχουν την εξής μορφή:



Σχήμα 2.3.4. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικού κύκλου Rankine με recuperator [1].

Η προθέρμανση στο διάγραμμα T-s (δεξί σκέλος Σχήματος 2.3.4) είναι η διεργασία 1→9 και η ψύξη πριν τον συμπυκνωτήρα η διεργασία 3→4.

Εναλλακτικά, ο επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί ως προθερμαντήρας για την είσοδο του εργαζόμενου μέσου στον εξατμιστήρα με αξιοποίηση της εξόδου του θερμού ρεύματος (της θερμικής πηγής) από αυτόν. Το διάγραμμα ροής αυτής της διάταξης και το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας για έξοδο κορεσμένου ατμού από τον εξατμιστήρα δίνονται στο Σχήμα 2.3.5 [31,42-44]:



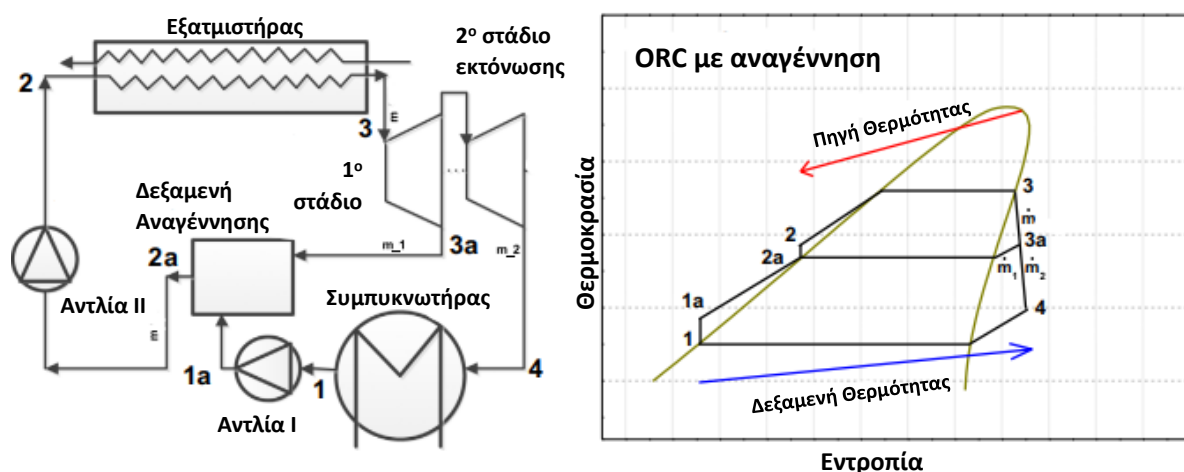
Σχήμα 2.3.5. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικού κύκλου Rankine με προθερμαντήρα [42,43].

Στα συμβατικά κύκλα Rankine υπάρχει ανάγκη χρήσης προθερμαντήρα και υπερθερμαντήρα, πέρα από το βασικό λέβητα, συνεπώς η εξεταζόμενη διάταξη (Σχήμα 2.3.5) θεωρείται αρκετά απλή [42,43]. Ωστόσο, στα οργανικά κύκλα η εξάτμιση μπορεί να λάβει χώρα σε έναν μοναδικό εναλλάκτη θερμότητας, δεδομένων των χαμηλότερων θερμοκρασιών, συνεπώς εξετάζεται η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης που επιφέρει η παραλλαγή αυτή στα πλαίσια της ενεργειακής ολοκλήρωσης του συστήματος, μιας και το θερμό ρεύμα δεν αναθερμαίνεται, αλλά αξιοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό του αρχικού του ενεργειακού περιεχομένου.

Οι δύο παραπάνω εναλλακτικές χρήσεις υποδεικνύουν ότι υπάρχουν πολλά πιθανά δίκτυα εναλλακτών τα οποία επιτυγχάνουν τη μεταφορά θερμότητας από την πηγή (θερμή βοηθητική παροχή) στο εργαζόμενο μέσο [31].

### ο Χρήση αναγέννησης

Στην περίπτωση αυτή, ένα μέρος της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου απομαστεύεται από τον στρόβιλο σε μία ενδιάμεση πίεση και αναμειγνύεται άμεσα σε ένα ανοιχτό δοχείο με το ψυχρό υγρό που εξέρχεται από την αντλία στην ίδια πίεση, έχοντας περάσει από τον συμπυκνωτήρα και το δεύτερο στάδιο της εκτόνωσης [1,17,19,38,41]. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κλειστός θερμομαντήρας και επιπλέον θάλαμος ανάμειξης. Ο κλειστός θερμομαντήρας είναι κατασκευαστικά πιο σύνθετος και επιτρέπει λιγότερο αποδοτική μεταφορά θερμότητας, ωστόσο δεν απαιτεί ξεχωριστή αντλία, σε αντίθεση με τον ανοιχτό [11]. Η αναγέννηση, με την έννοια της προθέρμανσης της εισόδου στον εξατμιστήρα, μειώνει την απαιτούμενη θερμότητα από την πηγή και συνεπώς, μπορεί να αυξήσει την απόδοση του συστήματος και να μειώσει την ολική αναντιστρεπτότητα, εφόσον φυσικά έχει γίνει προσεκτική επιλογή του εργαζόμενου μέσου [1,41]. Οι βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας αναγέννησης και ενδιάμεσης πίεσης είναι διαφορετικές ανά σύστημα [1].



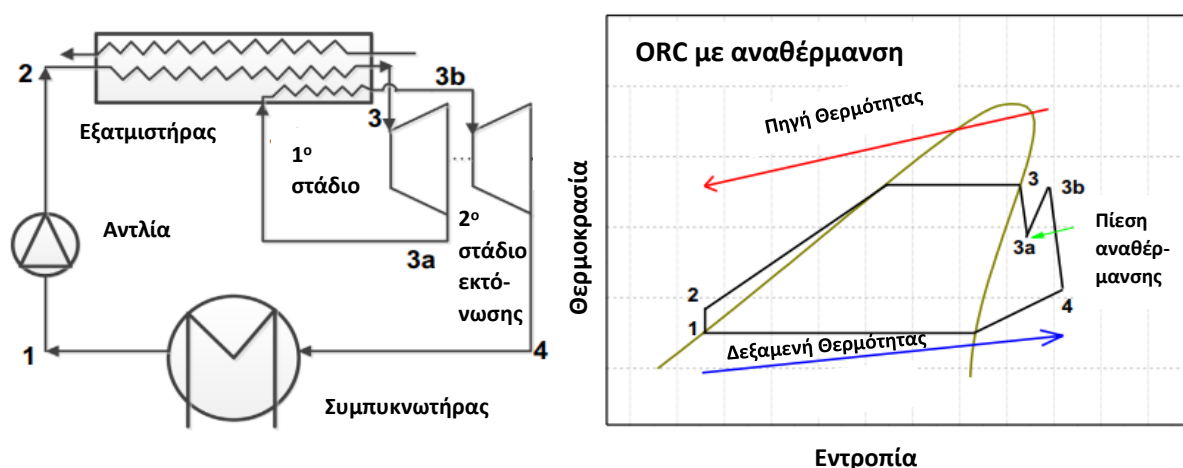
Σχήμα 2.3.6. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικού κύκλου Rankine με αναγέννηση [41].

Στο Σχήμα 2.3.6, με  $m_1$  συμβολίζεται το κλάσμα απομάστευσης, με  $m_2$  το κλάσμα που εκτονώνεται στη χαμηλή πίεση και με  $m$  η συνολική μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου.

Μπορεί να διερευνηθεί και η ταυτόχρονη χρήση recuperator και αναγέννησης, που είναι ευνοϊκότερη από θερμοδυναμική σκοπιά, σε σχέση με τις ξεχωριστές διατάξεις [1].

### ο Χρήση αναθέρμανσης

Ο σκοπός της αναθέρμανσης είναι η αποτροπή εμφάνισης σταγονιδίων κατά τις τελευταίες βαθμίδες της εκτόνωσης του εργαζόμενου μέσου, προστατεύοντάς τον στρόβιλο από πιθανή διάβρωση. Απαιτείται, συνεπώς, και δεύτερος στρόβιλος σε σειρά με τον πρώτο, κάτι που αυξάνει σημαντικά το πάγιο κόστος της εγκατάστασης [1,41]. Η έξοδος του πρώτου στρόβιλου αναθερμαίνεται στον εξατμιστήρα, αυξάνοντας έτσι το ποσό θερμότητας που παρέχεται από την πηγή, και εισάγεται στο δεύτερο, όπου τα επίπεδα πίεσης είναι χαμηλότερα. Με αυτόν τον τρόπο, η μεταφορά θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε υψηλές θερμοκρασίες [41]. Τα διαγράμματα ροής και θερμοκρασίας-εντροπίας έχουν την παρακάτω μορφή:



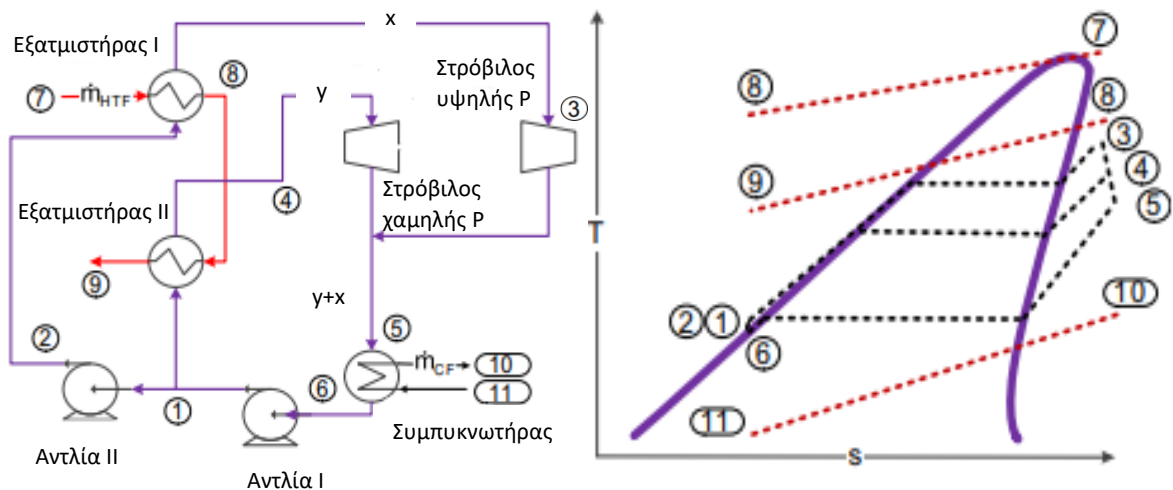
Σχήμα 2.3.7. Διάγραμμα ροής και T-s οργανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση [41].

Το μεγαλύτερο όφελος της διάταξης αυτής είναι η αποφυγή συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου κατά την εκτόνωση. Ωστόσο, στην περίπτωση χρήσης ενός ξηρού οργανικού ρευστού, με την πάροδο της εκτόνωσης ο ατμός γίνεται όλο και «πιο υπέρθερμος», συνεπώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος διάβρωσης. Επιπλέον, λόγω της ταυτόχρονης αύξησης της εισερχόμενης θερμότητας και του καθαρού έργου, δεν είναι ξεκάθαρη η τάση του θερμοκινητήρα απόδοσης, ενώ παράλληλα ενδεχομένως να αυξάνεται και η αθροιστική εξεργειακή καταστροφή [1,41].

Οι τρεις παραπάνω διατάξεις είναι οι συνηθέστερες παραλλαγές των κύκλων Rankine, οργανικών και συμβατικών. Παρατίθενται και κάποιες άλλες αρχιτεκτονικές που μελετώνται.

### ο Χρήση πολλαπλών επιπέδων πίεσης

Ένας τρόπος μείωσης της εξεργειακής καταστροφής στον εξατμιστήρα, δηλαδή των αναντιστρεπτοτήτων λόγω της μεταφοράς θερμότητας με πεπερασμένες θερμοκρασιακές διαφορές, είναι η εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου σε δύο διαφορετικά επίπεδα πίεσης. Στους βρόχους διαφορετικής πίεσης, στους οποίους κυκλοφορεί ένα καθορισμένο κλάσμα της ολικής μαζικής παροχής του οργανικού ρευστού, επιτυγχάνονται καλύτεροι θερμοκρασιακοί συνδυασμοί, δηλαδή μικρότερες θερμοκρασιακές διαφορές. Η παραγωγή καθαρής ισχύος αλλά και η θερμική απόδοση αναμένονται αυξημένες σε σχέση με το απλό κύκλο [1,43]. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει παραπάνω αντλίες και στρόβιλους και απαιτεί μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή έχει υψηλότερο πάγιο κόστος, επομένως χρήζει προσεκτικής επιλογής των λειτουργικών συνθηκών [1].

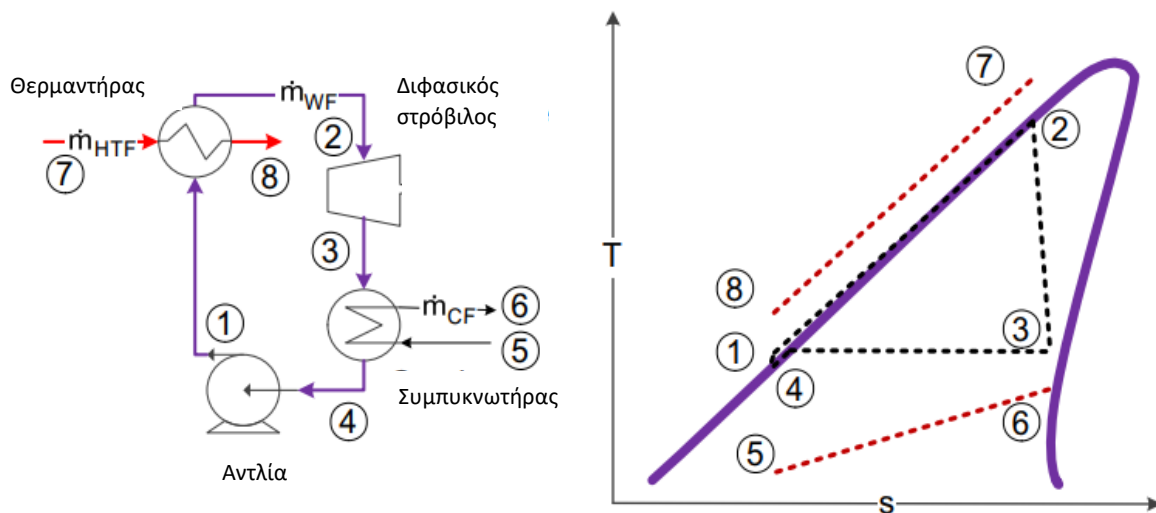


Σχήμα 2.3.8. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικού κύκλου Rankine με δύο επίπεδα πίεσης [1].

Το κλάσμα της συνολικής μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου που κυκλοφορεί στο βρόγχο υψηλής πίεσης (πίεση  $P_3$ ) συμβολίζεται με  $x$ , ενώ η υπόλοιπη μάζα συμβολίζεται με  $y$  και αντιστοιχεί στο ρευστό που κυκλοφορεί στο βρόγχο χαμηλής πίεσης (πίεση  $P_4$ ).

#### ο Τριγωνικό (Trilateral) κύκλο

Στο κύκλο αυτό χρησιμοποιείται διφασικός στρόβιλος, στον οποίο εισάγεται απευθείας υγρό, αποφεύγοντας την εξάτμιση. Ο σχεδιασμός αυτής της συσκευής είναι γενικά αρκετά πολύπλοκος [1,43]. Είναι πολύ σημαντική η ελαχιστοποίηση των απωλειών υγρού και θερμότητας, όπως και η επίτευξη μιας ικανοποιητικής ισεντροπικής απόδοσης. Το πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η δυνατότητα αποδοτικότερης απορρόφησης θερμότητας, μέσω αποδοτικότερου συνδυασμού του θερμοκρασιακού προφίλ της πηγής θερμότητας με το εργαζόμενο μέσο, κάτι που οδηγεί και σε βελτίωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης σε σχέση με το απλό κύκλο [1,43]. Επιπλέον, δεν απαιτείται χρήση εξωτερικού λιπαντικού στον στρόβιλο, μιας και η υγρή φάση λιπαίνει τις επιφάνειές του [45]. Τα διαγράμματα ροής και θερμοκρασίας-εντροπίας έχουν την παρακάτω μορφή:

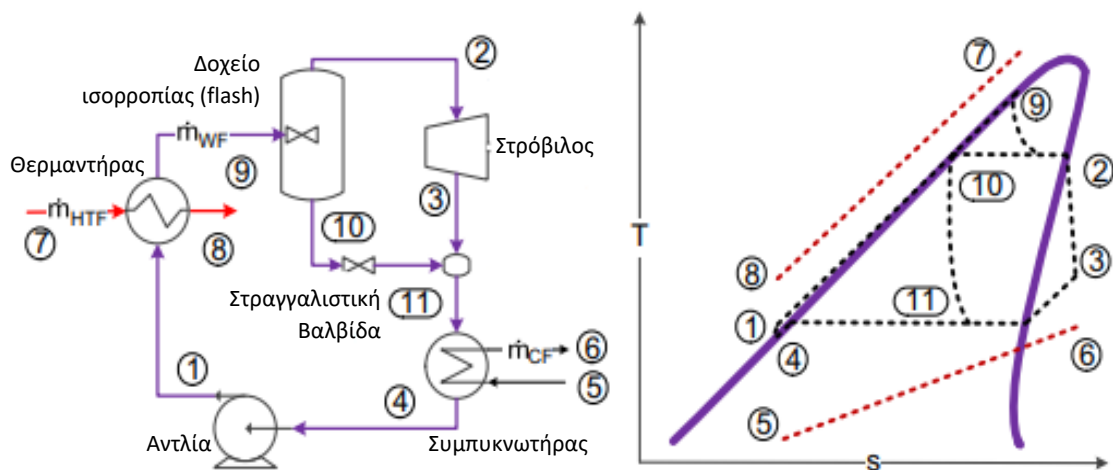


Σχήμα 2.3.9. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) τριγωνικού οργανικού κύκλου Rankine [1].



- **Κύκλο με εκτόνωση (Flash):**

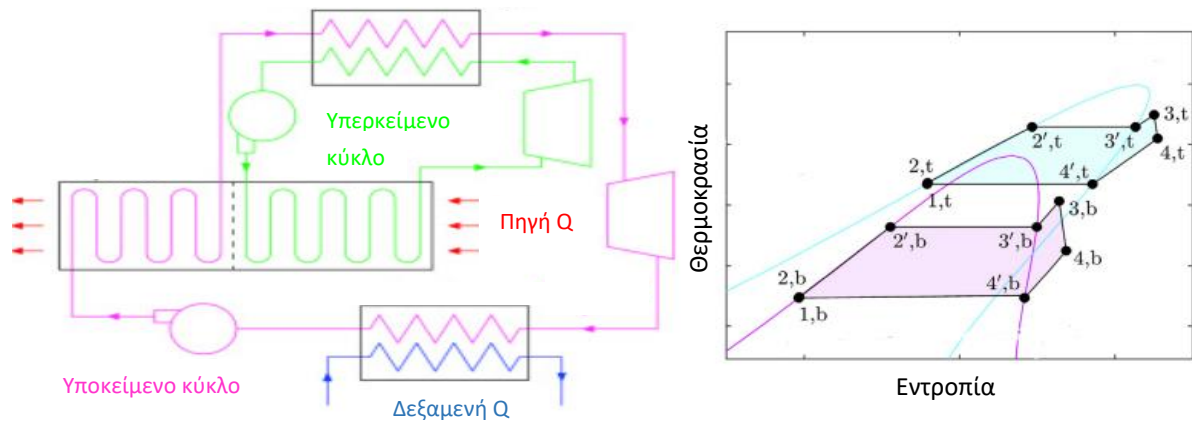
Ο κύκλος αυτός προσομοιάζει τον προηγούμενο, δηλαδή το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται στο λέβητα, χωρίς να λάβει χώρα εξάτμιση, και εξέρχεται από αυτόν ως κορεσμένο υγρό υψηλής πίεσης, επιτυγχάνοντας καλύτερο συνδυασμό με το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής. Η διαφορά είναι ότι το υγρό αυτό δεν εισάγεται κατευθείαν σε διαφασικό στρόβιλο, αλλά σε δοχείο ισορροπίας (flash), με το κλάσμα του κορεσμένου ατμού να οδηγείται τελικά προς εκτόνωση για παραγωγή ισχύος και το κλάσμα του υγρού σε μία βαλβίδα στραγγαλισμού. Για να αυξηθεί η ποσότητα του ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραπάνω δοχεία ισορροπίας σε σειρά. Στην περίπτωση υγρών ρευστών απαιτείται και πάλι ο στρόβιλος να είναι διαφασικός [1,43].



Σχήμα 2.3.10. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικού κύκλου Rankine με δοχείο ισορροπίας [1].

- **Κύκλα τύπου καταρράκτη (cascade) ή διπλού βρόχου (dual-loop):**

Στην περίπτωση αυτή, ο συμπυκνωτήρας του υπερκείμενου κύκλου αποτελεί τον εξατμιστήρα του υποκείμενου. Κάθε κύκλος αποτελεί ένα ξεχωριστό στάδιο που μπορεί να αξιοποιεί διαφορετικό εργαζόμενο μέσο, όμως η είσοδος θερμότητας καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το υπερκείμενο κύκλο, όπου σημειώνονται υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το υποκείμενο [1,43,46]. Για το υποκείμενο κύκλο επιλέγεται το πτητικότερο οργανικό ρευστό. Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία εκτόνωσης πραγματοποιείται σε δύο ξεχωριστά συστήματα, μειώνοντας τους λόγους πιέσεων και επιτρέποντας την αποδοτικότερη λειτουργία των στρόβιλων και την αποφυγή υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα [43,46]. Ο συνδυασμός δύο ORCs οδηγεί σε αύξηση του καθαρού έργου, ωστόσο απαιτούνται μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας και η πολυπλοκότητα και δυσκολία ρύθμισης του συστήματος αυξάνονται σημαντικά. Τα διαγράμματα ροής και θερμοκρασίας-εντροπίας για τον συνδυασμό δύο κύκλων έχουν την παρακάτω μορφή:



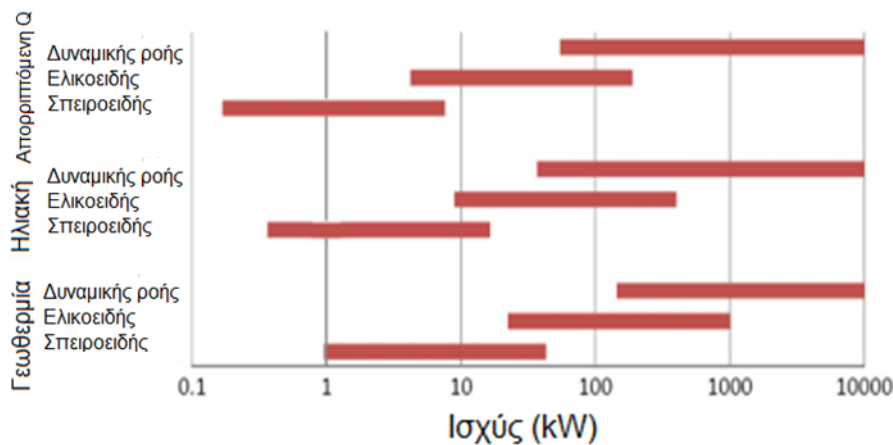
Σχήμα 2.3.11. Διάγραμμα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) οργανικών κύκλων Rankine τύπου καταρράκτη [46].

Το υπερκείμενο κύκλο υψηλής θερμοκρασίας σημειώνεται με πράσινο χρώμα στο διάγραμμα ροής (αριστερό σκέλος Σχήματος 2.3.11) και με γαλάζιο στο διάγραμμα T-s (δεξί σκέλος Σχήματος 2.3.11), ενώ συμβολίζεται με t (top cycle). Αντίστοιχα, το υποκείμενο κύκλο σημειώνεται με μωβ χρώμα και στα δύο διαγράμματα και συμβολίζεται με b (bottom cycle). Το σημείο 1 αντιστοιχεί στην είσοδο των αντλιών και στα δύο κύκλα, ενώ το σημείο 3 στην είσοδο των στροβίλων [46].

### 3. Προσομοίωση & Καθορισμός Συστήματος

#### 3.1. Σχεδιασμός Στοιχείων του Κύκλου

Σε ένα κύκλο Rankine περιλαμβάνονται τα στοιχεία μηχανολογικού εξοπλισμού του Σχήματος 2.2.1. Αρχικά, ο στρόβιλος μπορεί να είναι δυναμικής ροής (αξονικής και ακτινικής) ή θετικής εκτόπισης (σπειροειδής, ελικοειδής, εμβολοφόρος). Όπως και με τα εργαζόμενα μέσα, έτσι και με τον στρόβιλο, δεν μπορεί να αναγνωριστεί ένας τύπος ως βέλτιστος για όλες τις εφαρμογές. Οι στρόβιλοι δυναμικής ροής ενδείκνυνται για συστήματα ORC δυναμικότητας της τάξης των MW. Η δεύτερη κατηγορία προτιμάται για μικρότερες κλίμακες, στις οποίες οι ογκομετρικές παροχές και οι λόγοι πιέσεων έχουν χαμηλότερη τιμή. Συγκεκριμένα, οι ελικοειδείς αποτελούν την καλύτερη επιλογή για κλίμακες μεταξύ 100-1000 kW και οι σπειροειδείς για κλίμακες μικρότερες από 10 kW. Όλα αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω ενδεικτικό διάγραμμα για τη βέλτιστη περιοχή λειτουργίας ενός ORC ανά είδος στροβίλου και ανά πηγή θερμότητας [3,47].



Σχήμα 3.1.1. Περιοχή βέλτιστης λειτουργίας τριών τύπων στροβίλων για τρεις πηγές θερμότητας σε συστήματα ORC [3].

Οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως στα ORCs είναι κελύφους-αυλών για μεγάλης κλίμακας μονάδες και πλακών για μικρής. Είναι και οι δύο έμμεσης επαφής, δηλαδή υπάρχει διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρεύματος. Οι εναλλάκτες κελύφους-αυλών είναι πιο ογκώδεις κατασκευές και επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών και πιέσεων. Τα δύο ρευστά μπορούν να κινούνται κατ' ομορροή ή αντιρροή, ενώ υπάρχουν και άλλοι τύποι ροής, όπως η σταυρωτή. Προκειμένου να επιτευχθεί πιο ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας, το ψυχρό ρεύμα επιλέγεται να εισαχθεί στους αυλούς και το ρεύμα υψηλότερης πίεσης στο κέλυφος.

Τα ποσά θερμότητας που μεταφέρονται από το θερμό ρεύμα και λαμβάνονται από το ψυχρό δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω εξισώσεις, ενώ η διαφορά τους αναπαριστά τις πιθανές απώλειες από το σύστημα:

$$Q_{hot} = \dot{m}_{hot} * c_{p_{hot}} (T_{hot,in} - T_{hot,out}) \quad (Εξ. 3.1.1)$$

$$Q_{cold} = \dot{m}_{cold} * c_{p,cold} (T_{cold,out} - T_{cold,in}) \quad (\text{Εξ. 3.1.2})$$

$$Q_{hot} = Q_{cold} + Q_{loss} \quad (\text{Εξ. 3.1.3})$$

Αν δεν υπάρχουν απώλειες, δηλαδή το ποσό θερμότητας που απορροφά το ψυχρό ρεύμα είναι ίσο με αυτό που αποδίδει το θερμό, τότε το ποσό αυτό υπολογίζεται ως:

$$Q = U * A * \Delta T_{lm} \quad (\text{Εξ. 3.1.4})$$

με τη μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά να ισούται με:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_a - \Delta T_b)}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} \quad (\text{Εξ. 3.1.5})$$

Οι διαφορές  $\Delta T_a$  και  $\Delta T_b$  αναφέρονται στα δύο άκρα του εναλλάκτη θερμότητας και έχουν να κάνουν με το είδος της ροής των ρευστών. Στην περίπτωση της αντιρροής, που αποτελεί και τον αποδοτικότερο και συχνότερο τρόπο ροής:

$$\Delta T_a = T_{hot,in} - T_{cold,out} \quad (\text{Εξ. 3.1.6})$$

$$\Delta T_b = T_{hot,out} - T_{cold,in} \quad (\text{Εξ. 3.1.7})$$

Η επιλογή εναλλάκτη θερμότητας είναι αρκετά κρίσιμη όσον αφορά την σωστή αξιοποίηση της πηγής σε ένα οργανικό κύκλο Rankine. Πρέπει να αποφεύγονται, όσο είναι δυνατόν, πτώσεις πίεσης και να υπάρχει ανοχή στη διάβρωση, αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες, για τις περιπτώσεις δημιουργίας θερμών σημείων (hotspots) κατά τη λειτουργία του συστήματος [48]. Για τον σχεδιασμό ενός εναλλάκτη θερμότητας έχει καθιερωθεί η μεθοδολογία του Κόμβου Ανάσχεσης (Pinch Analysis). Οι καμπύλες των θερμών και των ψυχρών διαθέσιμων ρευμάτων προσεγγίζονται, μέχρι το πιο κοντινό τους σημείο να απέχει στον άξονα της θερμοκρασίας μία ελάχιστη απόσταση, που ονομάζεται ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ( $\Delta T_{min}$ ). Το σημείο αυτό ονομάζεται κόμβος ανασχεσης της διεργασίας (Pinch Point). Όσο αυξάνεται το  $\Delta T_{min}$ , τόσο μειώνεται το πάγιο κόστος λόγω των αυξημένων θερμοκρασιακών διαφορών, που επιφέρουν μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας (Εξίσωση 3.1.4). Από την άλλη μεριά, το λειτουργικό κόστος αυξάνεται, λόγω αύξησης της απαιτούμενης ενέργειας από βοηθητικές παροχές [49].

Οι αντλίες, με βάση την αρχή λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δυναμικές (φυγοκεντρικές/ακτινικής ροής και αξονικής ροής) και θετικής εκτόπισης (παλινδρομικές και περιστροφικές). Οι πρώτες μετατρέπουν το μηχανικό έργο σε κινητική ενέργεια και μετέπειτα σε ενέργεια πίεσης και στις δεύτερες η μεταβίβαση μηχανικού έργου στο ρευστό γίνεται με άσκηση δύναμης, που το ωθεί να κινηθεί [47]. Στα οργανικά κύκλα Rankine επιλέγονται συνήθως αντλίες θετικής εκτόπισης ή φυγοκεντρικές, με τις δεύτερες να προτιμώνται σε μονάδες υψηλότερης δυναμικότητας.

Στην παρούσα μελέτη δεν είναι στόχος ο αναλυτικός σχεδιασμός των στοιχείων μηχανολογικού εξοπλισμού του κύκλου. Η μοντελοποίηση των μηχανημάτων συμπίεσης και εκτόνωσης γίνεται αγνοώντας την εσωτερική τους δομή, ενώ για τους εναλλάκτες θερμότητας υπολογίζονται μόνο τα θερμικά φορτία, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και οι επιφάνειες εναλλαγής και όχι οι αναλυτικές διαστάσεις αυτών.

### 3.2. Θερμοδυναμικά Μοντέλα

Για τη μοντελοποίηση των ORCs συχνά χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων REFPROP (REference Fluid Thermodynamic and Transport PROPERTIES), η οποία δημιουργήθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας των ΗΠΑ (National Institute of Standards and Technology-NIST) [27,31]. Στην βάση αυτή περιέχονται θερμοφυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες για μία ποικιλία βιομηχανικώς σημαντικών ρευστών και των μιγμάτων τους. Το ακρωνύμιο REFPROP αρχικά αναφερόταν μόνο στις ιδιότητες ψυκτικών ρευστών (REFrigerant PROPERTIES), όμως σήμερα περιέχει, μεταξύ άλλων, και ιδιότητες υδρογονανθράκων, συστατικών φυσικού αερίου, διαλυτών, λιπαντικών και αλκοολών. Η βάση δεδομένων αποτελεί αυτόνομο πρόγραμμα, ενώ συμπεριλαμβάνεται και σε εμπορικά πακέτα προσομοίωσης [50].

Η πρώτη έκδοση της κυκλοφόρησε το 1989 και περιείχε τα ψυκτικά που θα αντικαθιστούσαν τους επιβλαβείς CFCs. Οι ιδιότητες υπολογίζονταν μέσω μίας καταστατικής εξίσωσης (KE), εξασφαλίζοντας έτσι συνέπεια μεταξύ τους. Συχνή εφαρμογή στα ψυκτικά ρευστά έβρισκε η KE των Martin-Hou, που, ωστόσο, υπόκειται σε αρκετούς περιορισμούς, κυρίως στο ότι δεν είναι έγκυρη στην υγρή φάση. Το NIST προτίμησε την τροποποιημένη KE Carnahan–Starling–DeSantis (CSD), η οποία είναι έγκυρη και στην υγρή φάση και μπορεί να εφαρμοστεί και σε μίγματα. Η CSD περιλαμβάνει μόνο 6 παραμέτρους, που προκύπτουν από προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα τάσης ατμών και όγκου. Λόγω της απουσίας ορισμένων δεδομένων, προστέθηκαν στο REFPROP και οι εκτεταμένες αντίστοιχες καταστάσεις (extended corresponding states-ECS), που δεν αποτελούν KE, αλλά ενσωματώνουν ένα «ρευστό αναφοράς», δηλαδή ένα ρευστό του οποίου οι ιδιότητες είναι ορθώς υπολογισμένες από μία καταστατική εξίσωση. Τυπικά, το ρευστό αυτό ήταν το R134a για τα ψυκτικά και το προπάνιο για τους απλούς υδρογονάνθρακες. Η προσέγγιση αυτή έχει αντικατασταθεί από πιο ακριβείς πολυπαραμετρικές KE, όμως χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα, όπως στην περίπτωση των υδροφθορολεφινών. Το τρίτο μοντέλο που προστέθηκε στο REFPROP είναι η τροποποιημένη KE Benedict–Webb–Rubin (MBWR) το 1993. Είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την CSD, καθώς περιέχει 32 παραμέτρους που προκύπτουν από πολυπληθείς προσαρμογές σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Μπορεί να εφαρμοστεί σε πολικές ουσίες και η αβεβαιότητα των προβλέψεών της είναι περίπου ίδια με αυτή των πειραματικών τιμών [50].

Χρησιμοποιήθηκε και η προσέγγιση της θεμελιώδους KE, που μπορεί να αναπτυχθεί με όρους ενέργειας Helmholtz, ενέργειας Gibbs, ενθαλπίας ή εσωτερικής ενέργειας. Πιο συχνή είναι η χρήση της ενέργειας Helmholtz, καθώς με αυτή μπορεί να προβλεφθεί η διφασική περιοχή [50]. Το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης όρων ενέργειας Helmholtz στις καταστατικές εξισώσεις είναι η ικανότητα αναπαράστασης πολλαπλών ιδιοτήτων ( $T$ ,  $P$ ,  $\rho$ , ταχύτητα ήχου,  $C_p$ ,  $C_v$ , τάση ατμών, όγκοι κορεσμένου υγρού και ατμού, ενθαλπία εξάτμισης, συντελεστής Joule-Thomson) με αβεβαιότητα αντίστοιχη με αυτή που υπεισέρχεται στις πειραματικές μετρήσεις. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητάς τους, είναι υπολογιστικά πιο αργές σε σχέση με απλούστερες καταστατικές εξισώσεις και απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό πειραματικών τιμών. Οι KE Helmholtz είναι ανώτερες από τα μοντέλα MBWR και ECS [50].

Το REFPROP περιέχει συνολικά 145 καθαρά ρευστά. Για τη μοντελοποίηση της

πλειοψηφίας αυτών προτείνονται ΚΕ τύπου Helmholtz, πέρα από τα F<sub>3</sub>N, R13, R123 και R152a, για τα οποία προτιμάται το μοντέλο MBWR [50]. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι έγκυρες και σε υπερκρίσιμες καταστάσεις. Το άνω θερμοκρασιακό όριο εφαρμογής τους είναι περίπου η θερμοκρασία θερμικής διάσπασης του εκάστοτε ρευστού [51].

Για τη μοντελοποίηση των ORCs έχουν χρησιμοποιηθεί και εξισώσεις τύπου SAFT (Statistical Associating Fluid Theory), όπως και οι κλασικές κυβικές, ως προς τον όγκο, καταστατικές εξισώσεις Peng-Robinson (PR) και Soave-Redlich-Kwong (SRK) [11,13,19,22]. Γενικά, η ακρίβεια των κυβικών ΚΕ πρέπει να ελέγχεται, ειδικά όταν απουσιάζουν πειραματικά δεδομένα. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται η Peng-Robinson, αφενός για αξιολόγηση της ακρίβειάς της στο εύρος λειτουργίας ενός οργανικού κύκλου Rankine και αφετέρου, για σύγκριση με τα αποτελέσματα του REFPROP.

Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις περιέχουν έναν απωστικό όρο, που είναι κοινός για όλες, και έναν ελκτικό, ο οποίος διαφέρει ανάλογα με την ΚΕ [52]. Η Peng-Robinson περιγράφεται από την εξίσωση:

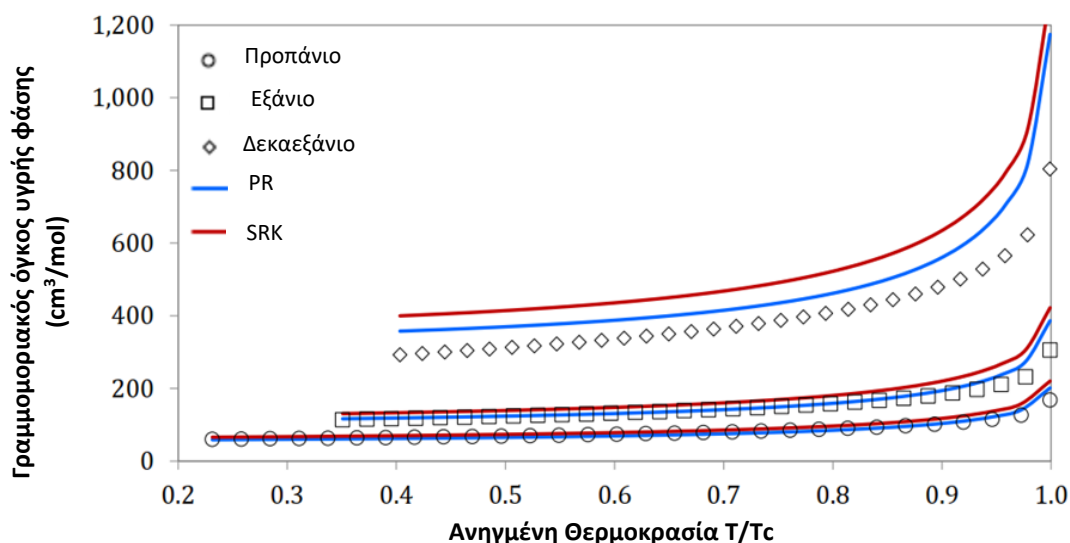
$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (\text{Εξ. 3.2.2})$$

όπου:

$$a(T) = 0.45724 \left( \frac{R^2 T_c^2}{P_c^2} \right) \left\{ 1 + k \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^{0.5} \right] \right\}^2 \quad (\text{Εξ. 3.2.3}) \text{ και}$$

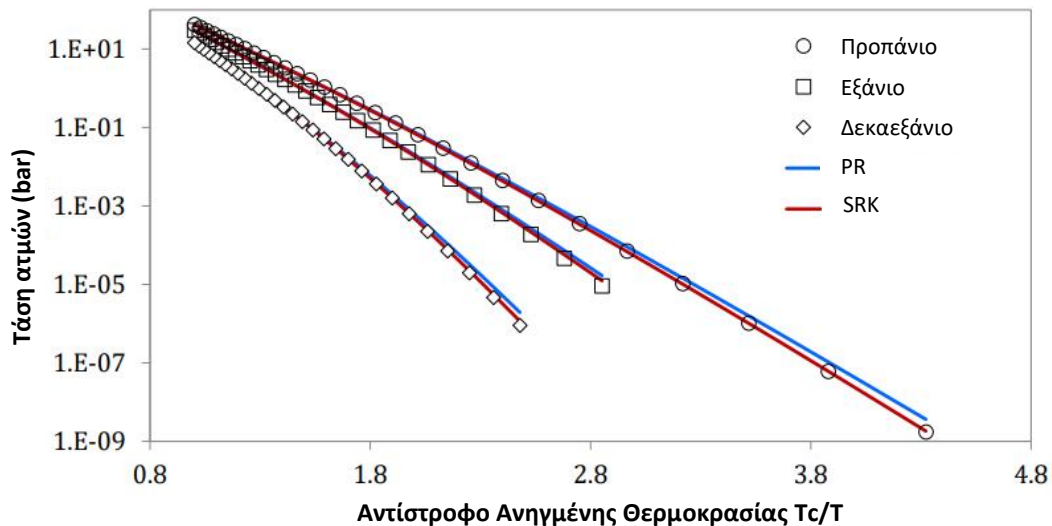
$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \quad (\text{Εξ. 3.2.4})$$

Γενικά, η χρήση των κυβικών καταστατικών εξισώσεων επιφέρει κάποιες αποκλίσεις στην πρόβλεψη των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση του μοριακού βάρους μιας ουσίας και με την προσέγγιση του κρίσιμου ή του τριπλού σημείου. Μεγαλύτερες αποκλίσεις σημειώνονται στην πρόβλεψη της ογκομετρικής συμπεριφοράς με την SRK (Σχήμα 3.2.1) της τάσης ατμών με την PR (Σχήμα 3.2.2) [52].



Σχήμα 3.2.1. Πρόβλεψη γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού μέσω PR και SRK για τρία αλκάνια διαφορετικού μοριακού βάρους [52].





Σχήμα 3.2.2. Πρόβλεψη τάσης ατμών μέσω PR και SRK για τρία αλκάνια διαφορετικού μοριακού βάρους [52].

Για τον περιορισμό αυτών των αποκλίσεων, έχουν προταθεί κάποιες εμπειρικές τροποποιήσεις των καταστατικών εξισώσεων, μεταξύ άλλων η διόρθωση όγκου (Volume Translation), για καλύτερη πρόβλεψη της ογκομετρικής συμπεριφοράς, και η προσαρμογή της θερμοκρασιακής εξάρτησης της ενεργειακής παραμέτρου  $a(T)$  σε πειραματικά δεδομένα τάσης ατμών (εξίσωση 3.2.3), για ορθότερη πρόβλεψή της [52].

Οι Peneloux et al. [52] πρότειναν μία μέθοδο βελτίωσης των προβλέψεων του γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού, χωρίς να επηρεάζεται η ισορροπία φάσεων υγρού-ατμού. Από το Σχήμα 3.2.1 προκύπτει ότι γενικά γίνεται υπερεκτίμηση των όγκων από την PR, συνεπώς οι προβλέψεις μετατοπίζονται κατά μία σταθερή τιμή  $c$ , που συνήθως υπολογίζεται σε μία θερμοκρασία ίση με το 70% της κρίσιμης, η οποία, για τις περισσότερες ουσίες, είναι κοντινή στο κανονικό σημείο βρασμού τους.

$$v_{translated} = v_{EOS} - c \quad (\text{Εξ. 3.2.5})$$

όπου  $v_{EOS}$ : η αρχική πρόβλεψη του όγκου της υγρής φάσης μέσω της KE και  $v_{translated}$ : η πρόβλεψη μετά τη διόρθωση του όγκου.

Οι τιμές του μοριακού όγκου κορεσμένου ατμού ουσιαστικά δεν επηρεάζονται από την εισαγωγή της διόρθωσης του όγκου, αφού η τάξη μεγέθους του  $c$  είναι πολύ μικρότερη, μιας και είναι ίδια με τον όγκο του υγρού. Έχουν προταθεί ποικίλες εκφράσεις για τον υπολογισμό του  $c$ , μεταξύ άλλων η συσχέτιση των Peneloux et al. [52]:

$$c = \frac{RTc}{Pc} (0.1154 - 0.4406 Z_{RA}) \quad (\text{Εξ. 3.2.6})$$

όπου:

$$Z_{RA} = 0.29056 - 0.08775\omega \quad (\text{Εξ. 3.2.7})$$

Όσον αφορά την συνάρτηση  $a(T)$  της Peng-Robinson, ενώ είναι επαρκής για υδρογονάνθρακες και άπολες ουσίες, δεν είναι αρκετά ακριβής για πολικά συστατικά. Για την ορθή πρόβλεψη των ιδιοτήτων των πολικών μορίων έχουν προταθεί διάφορες εκφράσεις της θερμοκρασιακής εξάρτησης του όρου  $a(T)$ , όπως η έκφραση Mathias-Copeman (MC) (Εξ. 3.2.8.) και η Twu (Εξ. 3.2.9.) [52]:

$$\alpha(T) = \left[ 1 + c_1 \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) + c_2 \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right)^2 + c_3 \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right)^3 \right]^2 \quad (\text{Εξ. 3.2.8})$$

$$\alpha(T) = T_r^{N(M-1)} e^{L(1-Tr^{NM})} \quad (\text{Εξ. 3.2.9})$$

όπου οι παράμετροι  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  και  $L$ ,  $M$ ,  $N$  προσαρμόζονται σε πειραματικά δεδομένα τάσης ατμών, ενώ μπορούν να γενικευτούν και συναρτήσει του ακεντρικού παράγοντα:

$$c_1 = 0.396 + 1.3644\omega \quad (\text{Εξ. 3.2.10})$$

$$c_2 = -0.0964 + 0.6593\omega - 1.0794\omega^2 \quad (\text{Εξ. 3.2.11})$$

$$c_3 = 0.1656 - 0.0609\omega + 1.1139\omega^2 \quad (\text{Εξ. 3.2.12}) \text{ για την } MC$$

Η Εξ. 3.2.9 γίνεται:  $\alpha(T) = \alpha^{(0)}(T) + \omega[\alpha^{(1)}(T) - \alpha^{(0)}(T)]$  (Εξ. 3.2.13) με τις παραμέτρους ανάλογα με τη θερμοκρασία να παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.1 [52].

**Πίνακας 3.2.1.** Γενικευμένες παράμετροι τροποποίησης του ελκτικού όρου του  $T_{wu}$ , ανάλογα με το αν η θερμοκρασία είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την κρίσιμη [52].

Παράμετρος	$Tr \leq 1$		$Tr \geq 1$	
	$\alpha^{(0)}$	$\alpha^{(1)}$	$\alpha^{(0)}$	$\alpha^{(1)}$
L	0.125283	0.511614	0.401219	0.024955
M	0.911807	0.784054	4.963075	1.248088
N	1.948153	2.812522	-0.200000	-8.000000

### 3.3. Επιλογή Εργαζόμενων Μέσων

Η επιλογή των εργαζόμενων μέσων για ένα οργανικό κύκλο Rankine είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία. Αρχικά, το ρευστό πρέπει να είναι ασφαλές, κάτι που αντικατοπτρίζεται στην ταξινόμηση της ASHRAE. Αποκλείονται ρευστά που είναι τοξικά σε συγκεντρώσεις κάτω από 400 ppm (κατηγορία Β), όμως ρευστά που είναι εύφλεκτα (κατηγορία 3) δεν μπορούν να αποκλειστούν, μιας και σ' αυτήν την κατηγορία υπάγονται οι περισσότεροι υδρογονάνθρακες.

Προτιμώνται ρευστά ξηρά η ισεντροπικά, για προστασία του στροβίλου από πιθανή διάβρωση. Αν όμως ένα υγρό ρευστό διαθέτει όλες τις υπόλοιπες επιθυμητές ιδιότητες, μπορεί να συμπεριληφθεί στη λίστα των εργαζόμενων μέσων και να υπερθερμανθεί στον εξατμιστήρα.

Κρίσιμες παράμετροι είναι και οι περιβαλλοντικοί δείκτες ODP και GWP. Ολόκληρη η κατηγορία των CFCs και των HCFCs απορρίπτεται, λόγω υψηλού ODP, και αποφεύγονται ρευστά με τιμή GWP υψηλότερη από 1000.

Σημαντικά είναι και κάποια πρακτικά ζητήματα, όπως η θερμοκρασία τήξης των ρευστών να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκειμένου να αποφεύγεται η στερεοποίησή τους στον συμπυκνωτήρα, και η πυκνότητα της ατμάδους φάσης να είναι υψηλή (ή ο ειδικός όγκος των ατμών μικρός), ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλότερες ογκομετρικές παροχές. Επιπλέον, τα ρευστά πρέπει να είναι θερμικώς σταθερά, δηλαδή να έχουν υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης. Η κρίσιμη πίεσή τους δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα

υψηλή, ώστε στα υπερκρίσιμα κύκλα ο εξατμιστήρας να μην είναι υπερβολικά κοστοβόρος, και η πίεση κορεσμού τους στη θερμοκρασία συμπύκνωσης (25-35°C) ενδείκνυται να είναι υψηλότερη από την ατμοσφαιρική, προκειμένου να μην εισέρχεται αέρας και ούτε να διαρρέει το οργανικό ρευστό από το σύστημα.

Συνοπτικά, λοιπόν, τα επιλεχθέντα ρευστά επιδιώκεται να πληρούν τις παρακάτω προδιαγραφές:

1. Κατηγορία A κατά ASHRAE (και επιθυμητή κατηγορία 1 ή 2L).
2. Κατά προτίμηση ξηρό ή ισεντροπικό.
3. ODP=0.
4. GWP χαμηλό ή μέτριο, δηλαδή μικρότερο από 1000.
5. Θερμοκρασία τήξης σε ατμοσφαιρική πίεση χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
6. Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης.
7. Όχι πολύ υψηλή κρίσιμη πίεση.
8. Τάση ατμών στη θερμοκρασία συμπύκνωσης υψηλότερη από την ατμοσφαιρική.
9. Μικρές τιμές ειδικού όγκου ατμώδους φάσης.

Η τελική λίστα των εργαζόμενων μέσων περιλαμβάνει ρευστά που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε εμπορικές εφαρμογές οργανικών κύκλων Rankine ή διερευνώνται προς εφαρμογή και έχουν, επίσης, μελετηθεί σε ποικίλες προσομοιώσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας. Για κάθε ρευστό έχει γίνει προσπάθεια να πληρούνται όσο το δυνατόν περισσότερες από τις παραπάνω προδιαγραφές.

Ο Πίνακας 3.3.1 περιλαμβάνει τρεις υδρογονάνθρακες, τρεις υδροφθοράνθρακες, δύο υδροφθοροολεφίνες και μία αλκοόλη. Στην παρακάτω λίστα δεν συμπεριλαμβάνονται σιλοξάνια, τα οποία απορρίπτονται λόγω αρκετά μεγάλων τιμών όγκου ατμώδους φάσης, δηλαδή λόγω μη τήρησης του τελευταίου κριτηρίου επιλογής ρευστών. Μεταξύ των επιλεγμένων ουσιών, το ισοβουτάνιο, το ισοπεντάνιο, το R1234yf και το R1233zd(e) πληρούν το σύνολο των προϋποθέσεων που τέθηκαν. Το R152a, επίσης, έχει τις επιθυμητές ιδιότητες, με εξαίρεση ότι είναι υγρό, συνεπώς πρέπει να εξέλθει από τον εξατμιστήρα σε υπέρθερμη κατάσταση. Το R134a είναι και αυτό υγρό ρευστό και επιπλέον, έχει σχετικά υψηλή τιμή δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη. Υγρό είναι και το R161, ενώ παράλληλα έχει και σχετικά υψηλή κρίσιμη πίεση. Το τολουόλιο έχει αρκετά χαμηλή τάση ατμών στη θερμοκρασία συμπύκνωσης και σχετικές μεγάλους όγκου ατμώδους φάσης, κάτι που ισχύει και για τη μεθανόλη, η οποία είναι υγρό ρευστό και έχει πολύ υψηλή κρίσιμη πίεση, δηλαδή αποτελεί το ρευστό που πληροί τις λιγότερες προδιαγραφές.

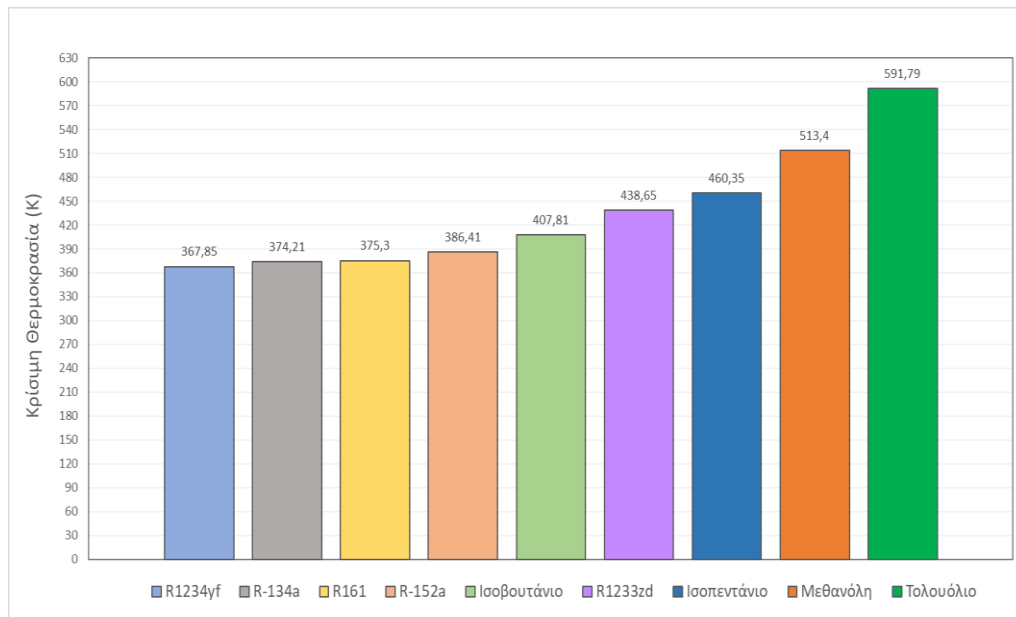
Πίνακας 3.3.1. Τελική επιλογή καθαρών οργανικών ρευστών ως εργαζόμενα μέσα στο σύστημα ORC [53-58].

Καθαρό Ρευστό	Μοριακός Τύπος	Αριθμός CAS	Κρίσιμη Πίεση (MPa)	Κρίσιμη Θερμοκρασία (°C)	Τύπος	ODP	GWP	ASHRAE	Θερμοκρασία Αυτανάφλεξης (°C)	Θερμοκρασία Τήξης (°C)	Τάση ατμών 30°C (kPa)*	Ανεκπλήρωτο κριτήριο
Ισοβουτάνιο	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	75-28-5	4,22	134,66	Ξηρό	0	4	A3	460	-160	405	-
Ισοπεντάνιο	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	78-78-4	3,37	187,20	Ξηρό	0	4	A3	420	-160	109	-
Τολουόλιο	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	108-88-3	4,13	318,64	Ξηρό	0	20	A3	480	-95	4,9	(8), (9)
R152a	C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	75-37-6	4,52	113,26	Υγρό	0	124	A2	454	-117	690	(2)
R134a	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	811-97-2	4,06	101,06	Υγρό	0	1370	A1	750	-103,3	770	(2), (4)
R161	C <sub>2</sub> FH <sub>5</sub>	353-36-6	5,09	102,20	Υγρό	0	12	A3	n.a.**	-143	1057	(2), (7)
R1234yf	C <sub>3</sub> F <sub>4</sub> H <sub>2</sub>	754-12-1	3,38	94,70	Ισεντροπικό	0	4	A2L	405	-152,2	784	-
R1233zd(e)	C <sub>3</sub> ClF <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	102687-65-0	3,62	166,45	Ισεντροπικό	0	1	A1	380	-78	155	-
Μεθανόλη	CH <sub>3</sub> OH	67-56-1	8,22	240,25	Υγρό	n.a.**	n.a.**	n.a.**	440	-98	22	(2), (7), (8), (9)

\*Μέσω του θερμοδυναμικού μοντέλου REFPROP.

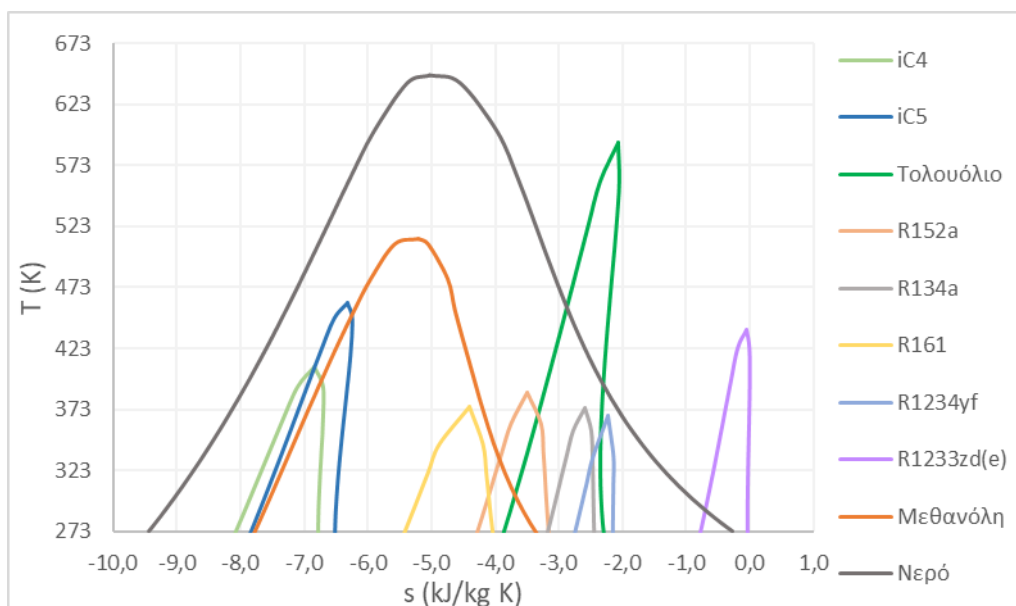
\*\* Έλλειψη δεδομένων.

Στο Σχήμα 3.3.1 τα επιλεγμένα οργανικά ρευστά ταξινομούνται με σειρά αυξανόμενης κρίσιμης θερμοκρασίας.



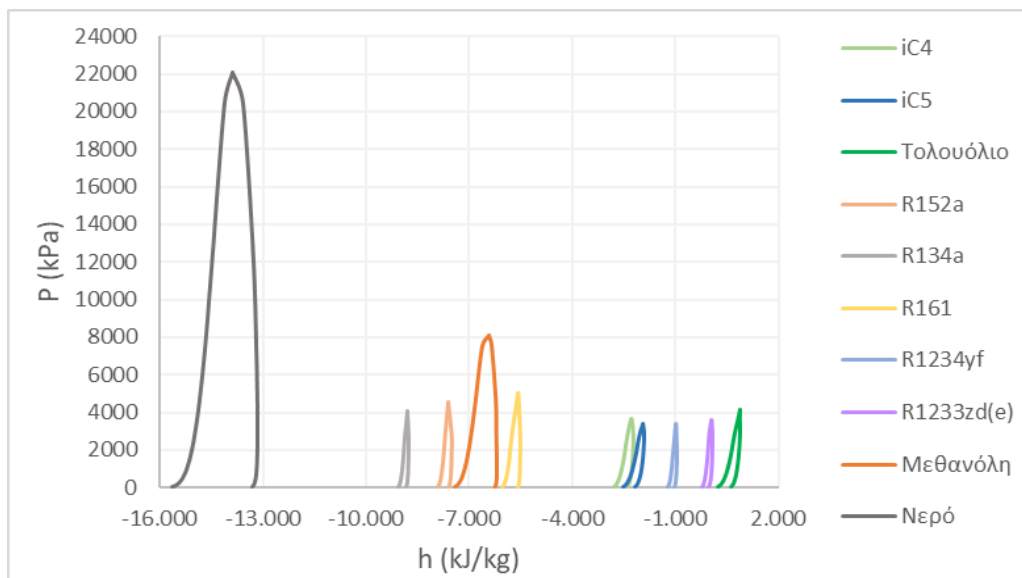
**Σχήμα 3.3.1.** Επιλεγμένα καθαρά οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα στο οργανικό κύκλο Rankine με σειρά αυξανόμενης κρίσιμης θερμοκρασίας.

Στα Σχήματα 3.3.2 και 3.3.3 παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας και πίεσης-ενθαλπίας για τα 9 οργανικά ρευστά και το νερό. Η μοντελοποίηση όλων των ρευστών γίνεται με χρήση του REFPROP, προκειμένου η κατάσταση αναφοράς για τον προσδιορισμό της ενθαλπίας και της εντροπίας να είναι κοινή. Για το διάγραμμα T-s, η λήψη των θερμοκρασιών ξεκινά από το τριπλό σημείο του νερού, δηλαδή τους 273,15 K, που αποτελεί και την υψηλότερη θερμοκρασία τριπλού σημείου ανάμεσα σε όλα τα ρευστά.



**Σχήμα 3.3.2.** Κοινό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας επιλεγμένων καθαρών οργανικών ρευστών και νερού.

Στο Σχήμα 3.3.2 είναι εμφανής η διαφοροποίηση, ανάλογα με την κατηγορία του ρευστού, της κλίσης της καμπύλης του κορεσμένου ατμού, δηλαδή θετικής για τα υγρά ρευστά (νερό, μεθανόλη, R152a, R134a, R161), αρνητικής για τα ξηρά (ισοπεντάνιο, ισοβουτάνιο, τολουόλιο) και μηδενικής για τα ισεντροπικά (R1234yf, R1233zd(e)). Επιπλέον, είναι ξεκάθαρο το διαφορετικό εύρος κατάλληλων θερμοκρασιών εφαρμογής των δύο τύπων κύκλου, λόγω της μεγάλης διαφοράς της κρίσιμης θερμοκρασίας του νερού από τα οργανικά ρευστά, με εξαίρεση το τολουόλιο. Στο διάγραμμα φαίνεται η μεγαλύτερη διαφορά των τιμών των ιδιοτήτων κορεσμένου υγρού και ατμού του νερού («πλάτος της καμπάνας») σε σχέση με την πλειοψηφία των οργανικών ρευστών, με τη μεθανόλη να έχει τη μέγιστη απόκλιση μεταξύ τους.



Σχήμα 3.3.3. Κοινό διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας επιλεγμένων καθαρών οργανικών ρευστών και νερού.

Στο Σχήμα 3.3.3 φαίνεται η μεγάλη διαφορά του εύρους πιέσεων που χρησιμοποιούνται στα οργανικά και στα συμβατικά κύκλα Rankine, λόγω της σημαντικά υψηλότερης κρίσιμης πίεσης του νερού. Η διαφορά αυτή επιφέρει μειωμένο πάγιο κόστος στο οργανικό κύκλο, λόγω μικρότερων αναγκών για λήψη μέτρων ασφαλείας και μικρότερων πτώσεων πίεσης.

Ήδη αναφέρθηκε ότι η βασική διαφορά ενός ζεοτροπικού μίγματος από τα καθαρά ρευστά είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την αλλαγή φάσης, που ονομάζεται θερμοκρασιακή ολίσθηση. Το μέγεθός της αποτελεί ισχυρή συνάρτηση της σύστασης του μίγματος. Η ολίσθηση στον εξάτμιστήρα είναι μικρότερη σε σχέση με τον συμπυκνωτήρα για όλες τις συστάσεις, δηλαδή η τιμή της μειώνεται με την αύξηση της πίεσης. Γενικά η αύξηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης ενός μίγματος αναμένεται να αυξήσει τη θερμική απόδοση του οργανικού κύκλου Rankine, ενώ ένα σχεδόν αζεοτροπικό μίγμα, δηλαδή με θερμοκρασιακή ολίσθηση μικρότερη των 5°C, ενδέχεται να επιφέρει απόδοση ακόμη και χαμηλότερη από αυτή των καθαρών ουσιών. Από την άλλη μεριά, μία πολύ μεγάλη τιμή θερμοκρασιακής ολίσθησης είναι πιθανό να οδηγήσει σε θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου υψηλότερη από της θερμικής πηγής μετά από πλήρη εξάτμιση, καθώς και σε μεταβολή της σύστασης, λόγω κλασμάτωσης του μίγματος στα συστατικά του κατά τις διαδοχικές αλλαγές φάσης. Προς αποφυγή αυτών των φαινομένων, ορίζεται μία μέγιστη τιμή θερμοκρασιακής ολίσθησης και επιλέγεται ως βέλτιστη σύσταση κάθε μίγματος αυτή που οδηγεί στην επιλεγμένη τιμή [59,60].



Ως εργαζόμενα μέσα, εξετάζονται συνδυασμοί των ρευστών του Πίνακα 3.3.1, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μία ουσιαστική σύγκριση των καθαρών ουσιών με τα μίγματα. Συγκεκριμένα, οι συνδυασμοί είναι:

- Ισοβουτάνιο & Ισοπεντάνιο
- Ισοπεντάνιο & R134a
- Ισοβουτάνιο & R1234yf
- R1234yf & R1233zd(e)

Ο καθορισμός της βέλτιστης σύστασης των επιλεγμένων μιγμάτων γίνεται σε μεταγενέστερο σημείο της ανάλυσης.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των ζεοτροπικών μιγμάτων είναι η δυνατότητα μεταβολής κάποιων ιδιοτήτων, φυσικών και θερμοδυναμικών. Ειδικότερα, ο συνδυασμός υδρογονανθράκων, που γενικά αποτελούν φθηνές και διαθέσιμες πρώτες ύλες αλλά αρκετά εύφλεκτες, με ένα ψυκτικό μέσο, που περιέχει άτομα φθορίου, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ευφλεκτότητας και συνεπώς, την επίτευξη μεγαλύτερης ασφάλειας. Η ανάμειξη δύο ρευστών με παρόμοιες τιμές κρίσιμων ιδιοτήτων να μην μπορεί να μεταβάλλει την περιβαλλοντική επίδραση και την τοξικότητα, ωστόσο δεν ενδείκνυται από θερμοδυναμική σκοπιά, μιας και δεν πρόκειται να επιφέρει κάποια σημαντική αύξηση στην απόδοση του κύκλου. Βέβαια, η διαφορά ανάμεσα στις κρίσιμες θερμοκρασίες των συστατικών ενός μίγματος δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλη, αφού σε αυτή την περίπτωση, η ολίσθηση στον συμπυκνωτήρα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές της σύστασης. Από την ανάμειξη δύο ξηρών ρευστών προκύπτει ένα ξηρό ζεοτροπικό μίγμα. Ωστόσο, σε περίπτωση που το ένα συστατικό είναι ξηρό και το άλλο υγρό, η συμπεριφορά του τελικού μίγματος εξαρτάται από την ποσότητα κάθε συστατικού και το μίγμα μπορεί να προκύψει υγρό, ξηρό αλλά και ισηντροπικό σε διαφορετικές συστάσεις [60]. Με άλλα λόγια, υπάρχει δυνατότητα εκπλήρωσης των κριτηρίων που τέθηκαν για την επιλογή εργαζόμενων μέσων με τη χρήση μιγμάτων, μέσα από την προσεκτική επιλογή συστατικών και συστάσεων.

### **3.4. Επιλογή Πηγής Θερμότητας & Ψυκτικού Μέσου**

Οι κρίσιμες θερμοκρασίες των επιλεγμένων οργανικών ουσιών κινούνται σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα, μεταξύ 94 και 319°C (Σχήμα 3.3.1). Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο ορθός σχεδιασμός ενός οργανικού κύκλου Rankine προϋποθέτει το εργαζόμενο μέσο να συνδυάζεται αποδοτικά με το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής θερμότητας. Γίνεται κατανοητό ότι ένα τόσο μεγάλο εύρος θερμοκρασιών δεν μπορεί να συνδυαστεί με μία μοναδική πηγή. Επομένως, επιλέγεται ένα επίπεδο θερμοκρασίας, που να μπορεί να συνδυαστεί με την πλειοψηφία των ρευστών. Με εξαίρεση το τολουόλιο και τη μεθανόλη, τα υπόλοιπα εργαζόμενα μέσα έχουν τιμές κρίσιμης θερμοκρασίας που δεν ξεπερνούν τους 190°C. Συνεπώς, μία λογική επιλογή είναι η θερμοκρασία της πηγής να ισούται με 200°C, δηλαδή να είναι μέτρια. Από τον Πίνακα 2.2.1 επιλέγεται η θερμική πηγή στους 200°C να προσομοιωθεί ως γεωθερμικό ρευστό υψηλής ενθαλπίας, μιας και η θερμοκρασία αυτή είναι αρκετά κοντινή στη μέση τιμή του αντιπροσωπευτικού εύρους. Το νερό γεωθερμίας φτάνει υπό πίεση στο σύστημα ORC και η πίεσή του κρατείται σίγουρα πάνω από την τιμή κορεσμού, για να εξασφαλιστεί η παντελής απουσία ατμών, που θα περιέπλεκε σημαντικά τον σχεδιασμό του εξατμιστήρα. Για θερμοκρασία ίση με 200°C, η τάση ατμών του καθαρού νερού ισούται με 1553 kPa. Για να

εξασφαλιστεί, λοιπόν, η παντελής απουσία ατμών, θεωρείται ότι το γεωθερμικό ρευστό εισάγεται στον εξατμιστήρα στα 1600 kPa. Ούτως ή άλλως, οι ιδιότητες του υπόψυκτου υγρού προσομοιάζουν αυτές του κορεσμένου, δηλαδή η επιλογή της πίεσης δεν επηρεάζει σημαντικά τις υπόλοιπες ιδιότητες της πηγής θερμότητας.

Προκειμένου να συνδυαστούν πιο αποδοτικά και τα ρευστά υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας με τη θερμική πηγή, θεωρείται και η διαθεσιμότητα απορριπτόμενης θερμότητας από μηχανές εσωτερικής καύσης σε θερμοκρασία 400°C και ατμοσφαιρική πίεση. Μία τυπική σύσταση που μπορεί να ληφθεί για τα καυσαέρια είναι:

**Πίνακας 3.4.1.** Τυπική σύσταση καυσαερίων ΜΕΚ, που αποτελούν τη δεύτερη υπό εξέταση πηγή θερμότητας στο οργανικό κύκλο Rankine [61].

Συστατικό	%Μολαρικό κλάσμα
O <sub>2</sub>	14,83
CO <sub>2</sub>	4,36
H <sub>2</sub> O	6,20
N <sub>2</sub>	74,61

Όσον αφορά το ψυκτικό μέσο για τη συμπύκνωση του οργανικού ρευστού, θεωρείται ότι υφίσταται πύργος ψύξης, ο οποίος ψύχει το νερό από τους 31 στους 20°C, που αποτελεί και το δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος του νερού ψύξης για όλες τις περιπτώσεις. Η πίεσή του είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

### 3.5. Παραδοχές Ανάλυσης

Οι παραδοχές που πραγματοποιούνται κατά την ανάλυση του οργανικού κύκλου Rankine είναι:

- Έχει επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση σε κάθε συσκευή των εξεταζόμενων κύκλων.
- Ισχύει η σύμβαση για τα πρόσημα της θερμότητας και του μηχανικού έργου, δηλαδή η θερμότητα που εισέρχεται στο σύστημα έχει θετικό πρόσημο και αυτή που εξέρχεται από αυτό αρνητικό. Τα αντίθετα ισχύουν για το έργο.
- Η μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι αμελητέα σε όλα τα στοιχεία των διατάξεων.
- Η εξέργεια ταυτίζεται με τη φυσική εξέργεια, αγνοείται, δηλαδή, η δυναμική και η κινητική όπως και η χημική, αφού πρόκειται για μη αντιδρόν σύστημα.
- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης είναι 70% για τον στρόβιλο και 65% για την αντλία. Η λειτουργία τους δεν είναι εσωτερικά αντιστρεπτή, είναι όμως αδιαβατική.
- Τα οργανικά ρευστά εισέρχονται σε όλες τις αντλίες ως κορεσμένα υγρά, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος σπηλαίωσης, αγνοώντας, δηλαδή, την απαίτηση υπόψυξης.
- Οι εναλλάκτες θερμότητας λειτουργούν ισοβαρώς. Μηδενική πτώση πίεσης σημειώνεται και στις σωληνώσεις.
- Οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον είναι αμελητέες σε όλα τα στοιχεία και τις σωληνώσεις. Όση θερμότητα προσφέρεται από την πηγή, τόση απορροφά το ρευστό στον εξατμιστήρα και αντίστοιχα, όση θερμότητα απάγεται από το ρευστό, τόση απορροφά το νερό ψύξης στον συμπυκνωτήρα.

- Το σύστημα είναι τελείως στεγανό, δεν υπάρχουν διαρροές και η μαζική παροχή του ρευστού παραμένει σταθερή.
- Οι ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές στον εξατμιστήρα και στον συμπυκνωτήρα ορίζονται περίπου ίσες με  $\Delta T_{\text{evap}}=9-10^\circ\text{C}$  και  $\Delta T_{\text{cond}}=4-5^\circ\text{C}$ .
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα της θερμικής πηγής είναι σταθερή, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία.
- Στην έξοδο του στροβίλου η ποιότητα του εργαζόμενου μέσου ισούται με 100% προς αποφυγή διάβρωσης των μεταλλικών του τμημάτων.
- Οι χρησιμοποιούμενοι εναλλάκτες θερμότητας είναι κελύφους-αυλών και λειτουργούν κατ' αντιρροή. Το γεωθερμικό ρευστό/τα καυσαέρια και το νερό ψύξης κυκλοφορούν στους αυλούς, αφού έχουν χαμηλότερη πίεση από το εργαζόμενο μέσο.
- Το γεωθερμικό ρευστό προσομοιώνεται ως καθαρό νερό, αγνοώντας τα άλατα και τα διαλυμένα αέρια, συνεπώς οι συνολικοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες διατηρούνται σταθεροί.
- Το γεωθερμικό ρευστό φτάνει στον εξατμιστήρα σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, αγνοώντας τα προηγούμενα στάδια (εξόρυξη, άντληση, μεταφορά).
- Τα θερμικά υπόλοιπα βιομηχανικών διεργασιών προσομοιώνονται ως ξηρός αέρας τυπικής σύστασης 21% v/v σε  $\text{O}_2$  και 79% v/v σε  $\text{N}_2$ . Ο αέρας συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, συνεπώς αναλογία όγκων είναι και αναλογία moles.
- Η τιμή της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους εναλλάκτες θερμότητας όταν χρησιμοποιούνται ζεοτροπικά μίγματα δεν μπορεί να ξεπερνά τους  $15^\circ\text{C}$ , προς αποφυγή κλασμάτωσης του μίγματος στα συστατικά του.
- Τα μαζικά κλάσματα των συστατικών των μιγμάτων δεν μπορούν να είναι μικρότερα από 10%.

Με βάση τις παραδοχές αυτές, μπορούν να απλοποιηθούν οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και συγκεκριμένα:

- Η Εξ. 1.2.3 γίνεται:  $Q - W = \Delta H$  (Εξ. 3.5.1), αφού η μεταβολή της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας είναι αμελητέα.
- Η Εξ. 1.3.1 γίνεται:  $0 = -\dot{W}_{OE} + \sum_i \dot{m}_i * e_{f,i} - \sum_j \dot{m}_j * e_{f,j} - \dot{E}x_{destr}$  (Εξ. 3.5.2), αφού έχει επιτευχθεί μόνιμη κατάσταση στο σύστημα.
- Η Εξ. 1.3.2 γίνεται:  $e_f = h - T_o * s$  (Εξ. 3.5.3), αφού αγνοείται η δυναμική και η κινητική εξέργεια.

Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί η Εξ. 3.5.2 σε συνδυασμό με την Εξ. 3.5.3, προκειμένου να προσδιοριστεί η καταστροφή εξέργειας στις επιμέρους συσκευές του κύκλου, όπως αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.2.1. Με την ίδια λογική, ορίζεται και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης κάθε συσκευής, που εκφράζει πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί αυτή:

$$\varepsilon_{\text{συσκευής}} = \frac{\text{Εξερχόμενη Εξέργεια}}{\text{Εισερχόμενη Εξέργεια}} \quad (\text{Εξ. 3.5.4})$$

- **Αντλία:** οι Εξ. 3.5.2 και Εξ. 3.5.4 γίνονται αντίστοιχα:

$$\dot{E}x_{destr,p} = -\dot{W}_p + \dot{m}_{WF}(e_{f,1} - e_{f,2}) \quad (\text{Εξ. 3.5.5})$$

$$\varepsilon_p = \frac{\overset{\text{και}}{e_{f,2} - e_{f,1}}}{-\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}_{WF}}} \quad (\text{Εξ. 3.5.6})$$

Η Εξ. 3.5.6 εκφράζει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπει η αντλία το μηχανικό έργο σε αύξηση της ροής εξέργειας.

- **Εξατμιστήρας:**

$$\dot{E}x_{destr, evap} = \dot{m}_{source}(e_{fin, source} - e_{fout, source}) + \dot{m}_{WF}(e_{f,2} - e_{f,3}) \quad (\text{Εξ. 3.5.7})$$

$$\varepsilon_{evap} = \frac{\overset{\text{και}}{\dot{m}_{WF}(e_{f,3} - e_{f,2})}}{\dot{m}_{source}(e_{fin, source} - e_{fout, source})} \quad (\text{Εξ. 3.5.8})$$

Η Εξ. 3.5.8 εκφράζει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπει ο εξατμιστήρας τη μείωση ροής εξέργειας της πηγής (είσοδος) σε αύξηση ροής εξέργειας του εργαζόμενου μέσου (έξοδος).

- **Στρόβιλος:**

$$\dot{E}x_{destr, t} = -\dot{W}_t + \dot{m}_{WF}(e_{f,3} - e_{f,4}) \quad (\text{Εξ. 3.5.9})$$

$$\varepsilon_t = \frac{\overset{\text{και}}{\dot{W}_t}}{e_{f,3} - e_{f,4}} \quad (\text{Εξ. 3.5.10})$$

Η τιμή του  $\varepsilon_{exp}$  δείχνει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπει ο στρόβιλος τη μείωση της ροής εξέργειας σε μηχανικό έργο.

- **Συμπυκνωτήρας:**

$$\dot{E}x_{destr, cond} = \dot{m}_{cool}(e_{fin, cool} - e_{fout, cool}) + \dot{m}_{WF}(e_{f,4} - e_{f,1}) \quad (\text{Εξ. 3.5.11})$$

$$\varepsilon_{cond} = \frac{\overset{\text{και}}{\dot{m}_{cool}(e_{fout, cool} - e_{fin, cool})}}{\dot{m}_{WF}(e_{f,4} - e_{f,1})} \quad (\text{Εξ. 3.5.12})$$

Το μέγεθος  $\varepsilon_{cond}$  εκφράζει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπει ο συμπυκνωτήρας την μείωση ροής εξέργειας του εργαζόμενου μέσου (είσοδος) σε αύξηση ροής εξέργειας του ψυκτικού (έξοδος).

### 3.6. Επιλογή Λογισμικού Προσομοίωσης

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης του οργανικού κύκλου Rankine επιλέγεται το εμπορικό λογισμικό Aspen HYSYS (έκδοση V11) από την AspenTech. Τα συστατικά και τα θερμοδυναμικά μοντέλα στο λογισμικό χωρίζονται σε αυτά μέσω HYSYS και αυτά μέσω Aspen Properties. Το REFPROP παρέχεται μέσω Aspen Properties, όπου περιλαμβάνονται

όλες οι επιλεγμένες οργανικές ουσίες. Για τον υπολογισμό της ενθαλπίας, της εντροπίας και της ελεύθερης ενέργειας Gibbs χρησιμοποιείται στο λογισμικό ως κατάσταση αναφοράς το ιδανικό αέριο στους 298,15 K και 1 atm, ενώ στο REFPROP ως ανεξάρτητο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται διαφορετικές καταστάσεις αναφοράς.

Η κυβική καταστατική εξίσωση Peng-Robinson παρέχεται μέσω HYSYS. Χρησιμοποιείται, πέρα από τα οργανικά ρευστά, και για τα καυσαέρια, αφενός λόγω της απλότητας των συστατικών τους και αφετέρου, λόγω του μεγάλου εύρους συνθηκών στο οποίο είναι εφαρμόσιμη η εξίσωση. Για το νερό ψύξης και το νερό γεωθερμίας χρησιμοποιείται το πακέτο NBS Steam μέσω HYSYS, που αξιοποιεί πίνακες ατμού (1984). Η κατάσταση αναφοράς για όλες τις ιδιότητες είναι το τριπλό σημείο, για το οποίο η ειδική εντροπία, η ειδική ενθαλπία και η ειδική εσωτερική ενέργεια έχουν οριστεί ίσες με μηδέν. Βέβαια, οι διαφορετικές καταστάσεις αναφοράς δεν επηρεάζουν τις διαφορές ενθαλπίας, εντροπίας και εξέργειας που εμφανίζονται στις Εξ. 3.5.5-3.5.12.

Από τη λίστα συστατικών του HYSYS απουσιάζουν τα ρευστά R161, R1234yf και R1233zd(e). Επιλέγεται για αυτά το μοντέλο Aspen Properties HYSYS Peng-Robinson. Λεπτομέρειες δίνονται στο Παράρτημα Β.

Για χρήση της PR μέσω HYSYS δίνονται αρκετές επιλογές για την εκτίμηση της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου κορεσμένου υγρού. Οι τιμές της διόρθωσης μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του επιλεγμένου μοντέλου με τις μεθόδους Peneloux, RACKETT και COSTALD, καθώς και μέσω των ανεξάρτητων μοντέλων COSTALD και RACKETT. Όταν η εκτίμηση γίνεται μέσω του επιλεγμένου θερμοδυναμικού μοντέλου, ισχύει ότι:

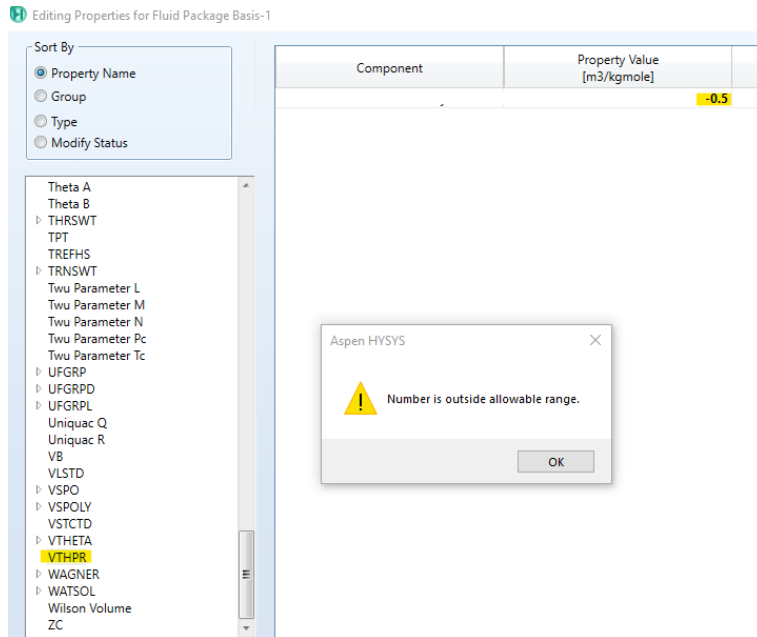
$$v = v_{EOS} + c \quad (\text{Εξ. 3.6.1})$$

δηλαδή, τα πρόσημα εισάγονται στο λογισμικό αντίθετα από αυτά της Εξ.3.2.5.

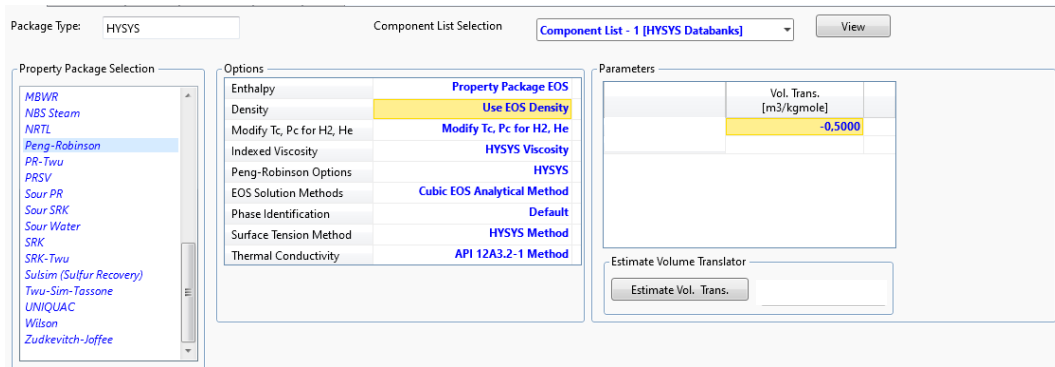
Πέρα από τις επιλογές του λογισμικού, υπάρχει και η δυνατότητα προσδιορισμού τιμών για τη διόρθωση του όγκου με προσαρμογή σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές αυτές μπορεί να προκύψουν είτε αρνητικές είτε θετικές. Σημειώνεται εδώ ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής αρνητικής τιμής στην παράμετρο διόρθωσης του όγκου (VTHPR) μέσω Aspen Properties (Σχήμα 3.6.1), κάτι που ωστόσο είναι εφικτό μέσω HYSYS (Σχήμα 3.6.2).

Χρησιμοποιείται και το Aspen Plus (έκδοση V11), μέσω του οποίου ανακτώνται πειραματικά δεδομένα από το NIST για τα ρευστά R161, R1234yf και R1233zd(e), τα οποία δεν είναι διαθέσιμα στη βάση δεδομένων του. Οι ιδιότητες για τις οποίες είναι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6.3. Για κάθε σει πειραματικών δεδομένων παρατίθεται παραπομπή, το ποσοστό αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στη μέτρηση και αν γίνεται αποδεκτό ή αποκλείεται ως ακραία τιμή (outlier). Επιπλέον, από το Aspen Plus λαμβάνονται διαγράμματα φάσεων για τα υπό εξέταση δυαδικά μίγματα στα δύο επίπεδα πίεσης του κύκλου, προκειμένου να ξεκαθαριστεί αν είναι ζεοτροπικά ή αν προκύπτει αζεότροπο σε κάποιες αναλογίες των συστατικών τους.

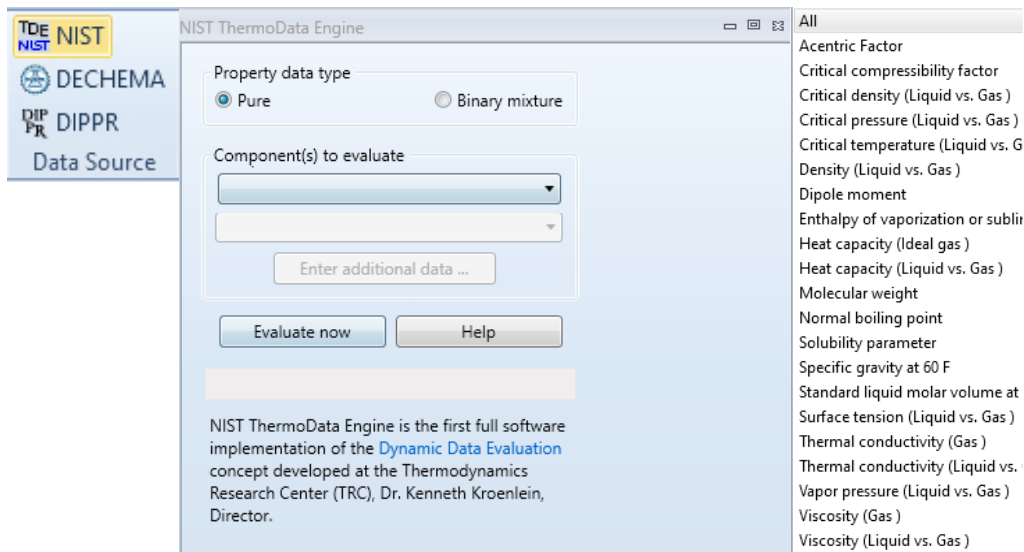
Σημειώνεται ότι, ενδεχομένως ο τρόπος που συγκλίνει το συγκεκριμένο λογισμικό να μην αναπαράγει πλήρως την ισότητα των τάσεων διαφυγής στο κρίσιμο σημείο.



Σχήμα 3.6.1. Μη δυνατότητα εισαγωγής αρνητικής τιμής στην παράμετρο διόρθωσης όγκου (VTHPR) μέσω Aspen Properties.



Σχήμα 3.6.2. Δυνατότητα εισαγωγής αρνητικής τιμής στην παράμετρο διόρθωσης όγκου (Vol. Trans.) μέσω HYSYS.



Σχήμα 3.6.3. Διαδικασία ανάκτησης πειραματικών δεδομένων του NIST μέσω του λογισμικού Aspen Plus και διαθέσιμες ιδιότητες.



## 4. Αξιολόγηση & Σύγκριση Θερμοδυναμικών Μοντέλων

### 4.1. Πειραματικά Δεδομένα

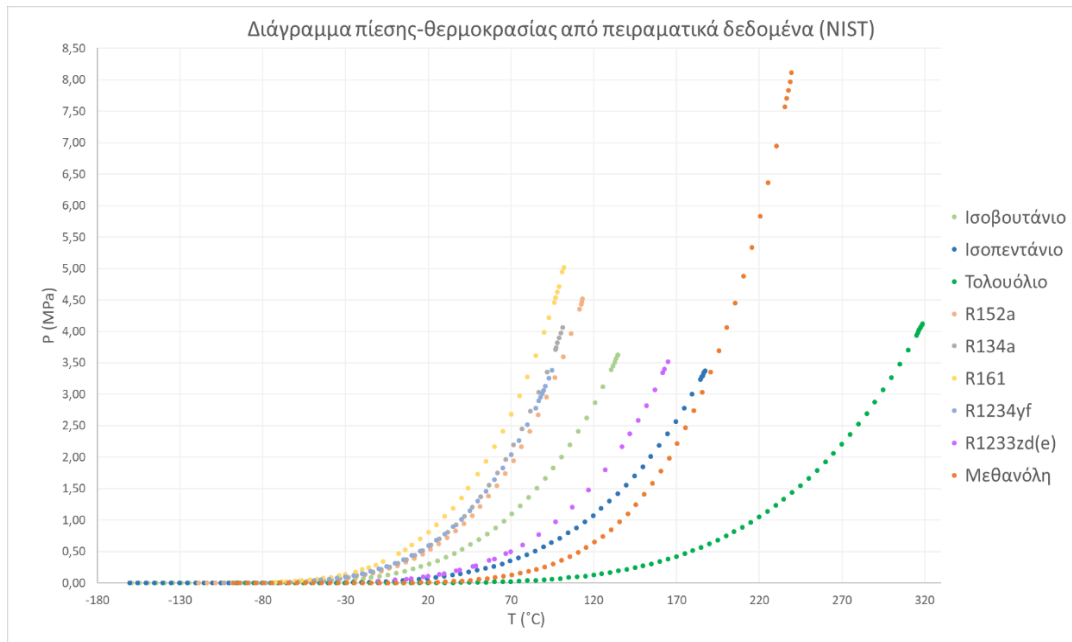
Για την αξιολόγηση των επιλεγμένων θερμοδυναμικών μοντέλων, μελετήθηκε η εγγύτητα των προβλέψεών τους σε πειραματικά δεδομένα. Από τη βάση δεδομένων του NIST αντλήθηκαν πειραματικές τιμές τάσης ατμών, γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού και ατμού και γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού και ατμού για τα έξι εκ των εννέα επιλεγμένων οργανικών ρευστών. Οι ιδιότητες αυτές για τα υπόλοιπα ρευστά (R161, R1234yf, R1233zd(e)) και η λανθάνουσα θερμότητα εξατμησης για όλες τις ουσίες ανακτήθηκαν μέσω Aspen Plus. Αποφεύχθηκε η αξιολόγηση των τιμών της ενθαλπίας και της εντροπίας, λόγω της χρήσης διαφορετικών καταστάσεων αναφοράς. Η λήψη πειραματικών τιμών από το NIST έγινε από την θερμοκρασία του τριπλού σημείου έως την κρίσιμη, με βήμα πέντε βαθμών, με το βήμα να μειώνεται κοντά στο κρίσιμο σημείο (μισός ή ένας βαθμός). Να σημειωθεί ότι στο Aspen Plus δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα θερμοχωρητικότητας και όγκου ατμών φάσης (Σχήμα 3.6.3).

Παρόλο που η μελέτη των ιδιοτήτων έγινε στο εύρος της διαφασικής περιοχής (τριπλό έως κρίσιμο σημείο), το εύρος αυτό δεν αφορά εξ' ολοκλήρου ένα οργανικό κύκλο Rankine. Εφόσον το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται στον συμπυκνωτήρα είναι συνήθως νερό, το κατώτερο όριο θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου είναι περίπου 10°C, δηλαδή πολύ υψηλότερο από το τριπλό σημείο και των εννέα ρευστών. Επιπλέον, στόχος των οργανικών κύκλων Rankine είναι η εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής ποιότητας, επομένως η μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου λαμβάνεται ίση με 200°C, θερμοκρασία που είναι κοντινή ή και μεγαλύτερη της κρίσιμης αρκετών εκ των υποψήφιων ρευστών. Συνεπώς, μελετήθηκε ξεχωριστά και το εύρος θερμοκρασιών 10-200°C, ως το τυπικό εύρος λειτουργίας ενός ORC.

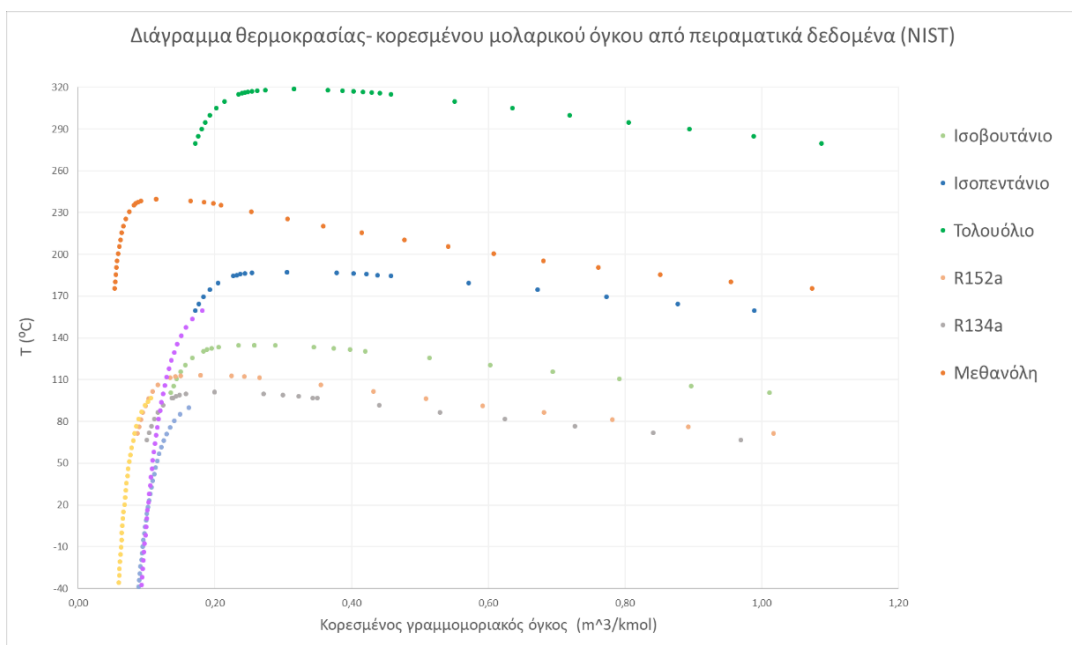
**Πίνακας 4.1.1.** Θερμοκρασιακό εύρος λήψης πειραματικών τιμών τάσης ατμού, γραμμομοριακού όγκου κορεσμού και γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμού από τη βάση δεδομένων του NIST [63].

Ρευστό	Θερμοκρασία Τριπλού Σημείου (°C)	Θερμοκρασία Κρίσιμου Σημείου (°C)
Ισοβουτάνιο	-159,4	134,7
Ισοπεντάνιο	-160,5	187,2
Τολουόλιο	-95,1	318,6
R134a	-103,3	101,1
R152a	-118,6	113,3
R161	-143,2	102,1
R1234yf	-151,6	94,7
R1233zd(e)	-78,0	165,5
Μεθανόλη	-97,7	239,9

Δημιουργούνται διαγράμματα των πειραματικών τιμών συναρτήσεως της θερμοκρασίας ανά μεταβλητή για όλα τα ρευστά, με εξαίρεση τον όγκο και τη θερμοχωρητικότητα κορεσμένου ατμού των R161, R1234yf και R1233zd(e) λόγω έλλειψης δεδομένων.



Σχήμα 4.1.1. Καμπύλες τάσης ατμών-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC [63].



Σχήμα 4.1.2. Καμπύλες θερμοκρασίας-γραμμομοριακού όγκου κορεσμού από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC [63].

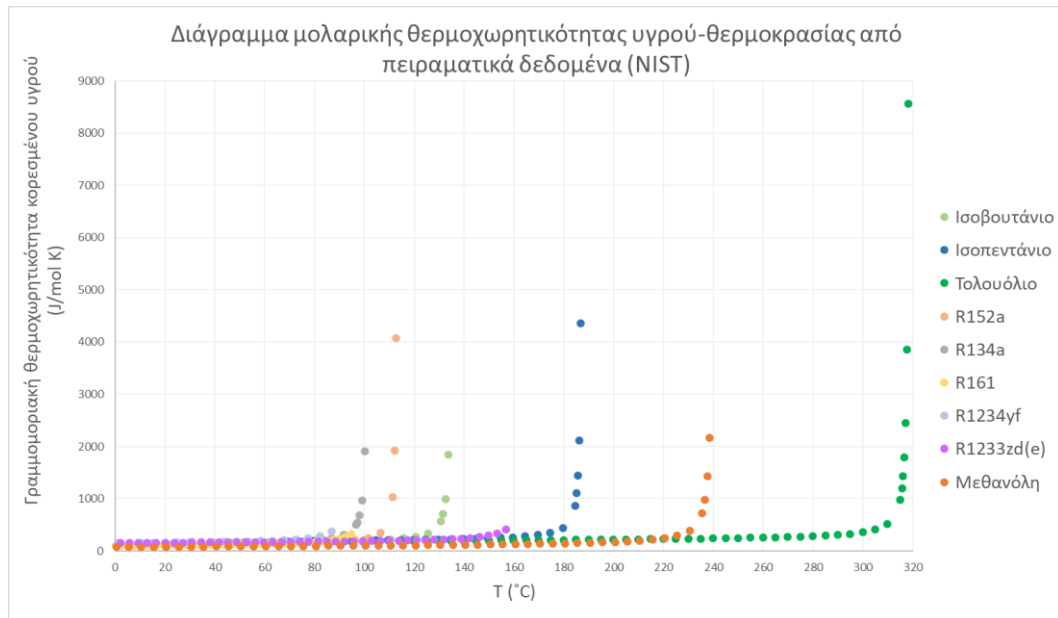
Οι καμπύλες του Σχήματος 4.1.1 έχουν την αναμενόμενη μορφή, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση της πίεσης κορεσμού για όλες τις ουσίες, ακολουθώντας μία εξίσωση τύπου Antoine:

$$\log(P) = A - \frac{B}{T + C} \quad (\text{Εξ. 4.1.1})$$

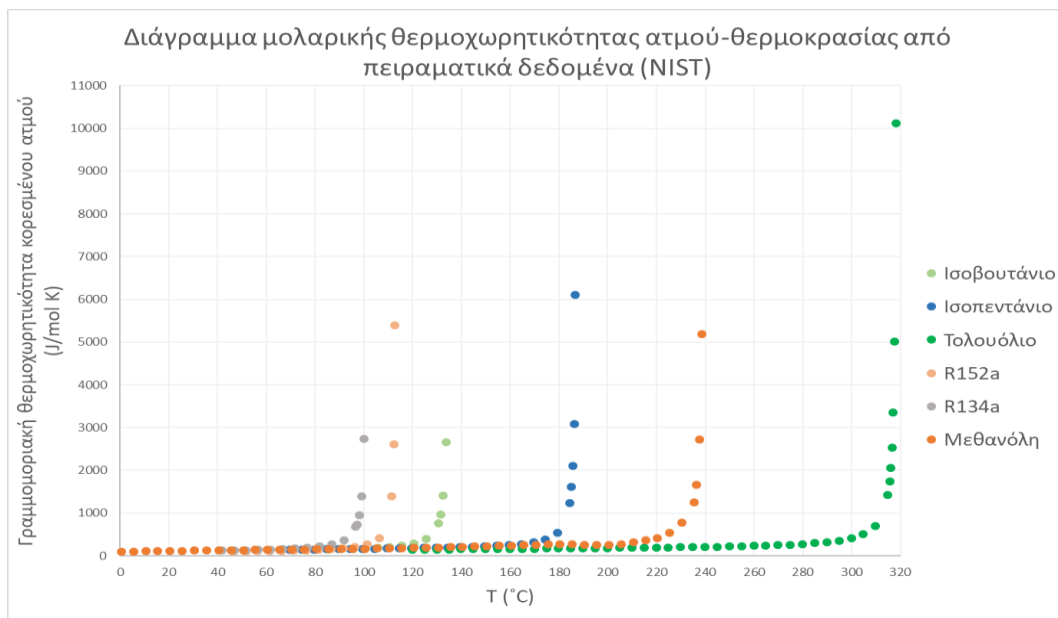
όπου A, B, C σταθερές, των οποίων η τιμή διαφέρει ανά ρευστό.

Το διάγραμμα θερμοκρασίας-όγκου έχει το χαρακτηριστικό σχήμα «καμπάνας» με

ανώτερο σημείο το κρίσιμο, που αντιστοιχεί στη μέγιστη πίεση και θερμοκρασία όπου συνυπάρχουν η υγρή με την ατμώδη φάση. Οι τιμές που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.2 αφορούν θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από το τριπλό σημείο για λόγους σύγκρισης των γραμμομοριακών όγκων των δύο φάσεων, αφού κοντά στη θερμοκρασία αυτή ο όγκος κορεσμένου ατμού λαμβάνει πολύ υψηλή τιμή, της τάξης του  $10^3$ - $10^8$  m<sup>3</sup>/kmol.



Σχήμα 4.1.3. Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC [63].

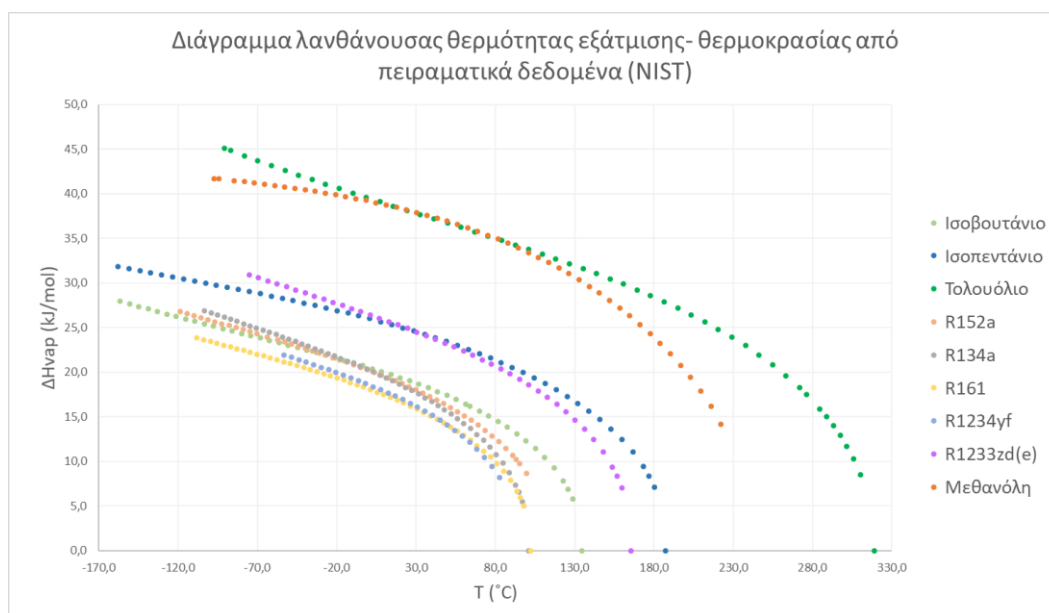


Σχήμα 4.1.4. Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου ατμού-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 6 από τα 9 ρευστά του ORC [63].

Η θερμοχωρητικότητα τόσο της υγρής όσο και της ατμώδους φάσης αυξάνεται με τη θερμοκρασία και η ευθεία της κρίσιμης θερμοκρασίας είναι κατακόρυφη ασύμπτωτη της συνάρτησης της θερμοχωρητικότητας, η οποία περιγράφεται από την εμπειρική εξίσωση:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (\text{Εξ. 4.1.2})$$

όπου  $a, b, c, d$  σταθερές διαφορετικές ανά ουσία.



**Σχήμα 4.1.5.** Καμπύλες λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης-θερμοκρασίας από πειραματικά δεδομένα για τα 9 ρευστά του ORC [63].

Τέλος, η ενθαλπία εξάτμισης κάθε ρευστού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως προβλέπεται από την εξίσωση Clausius-Clapeyron:

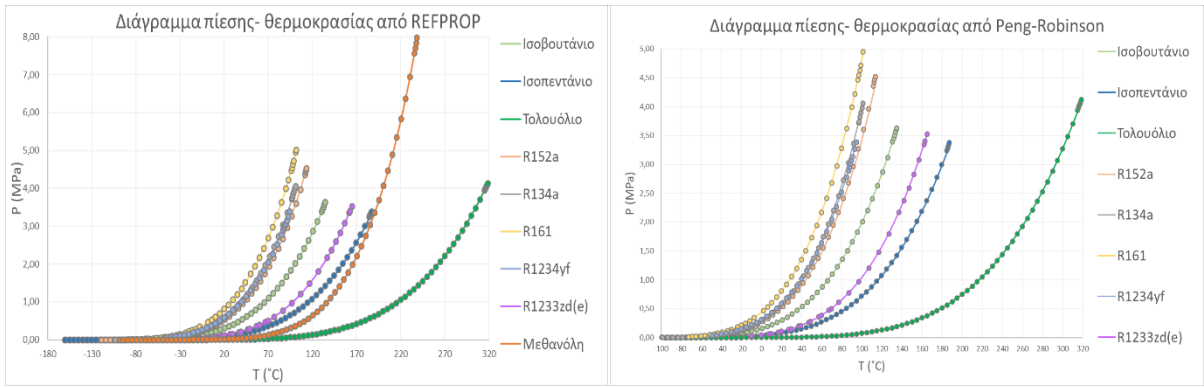
$$\ln(P) = -\frac{\Delta H_{vap}}{RT} + c \quad (\text{Εξ. 4.1.3})$$

όπου  $c$  σταθερά.

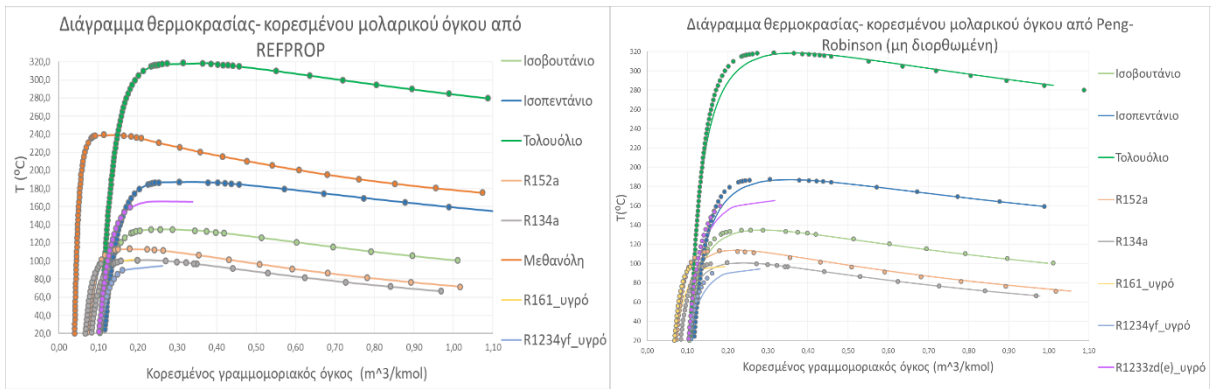
## 4.2. Προβλέψεις Θερμοδυναμικών Μοντέλων

Η μοντελοποίηση της μεθανόλης μέσω Peng-Robinson απαιτεί τροποποίηση της ενεργειακής παραμέτρου  $a(T)$  του ελκτικού όρου (Εξ. 3.2.3), λόγω του πολικού χαρακτήρα της αλκοόλης. Η τροποποίηση αυτή μπορεί να γίνει μέσω της έκφρασης των Mathias-Corpean (Εξ. 3.2.8), κάτι που ωστόσο δεν έχει πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία, συνεπώς η μεθανόλη αποτελεί το μοναδικό από τα εργαζόμενα μέσα που μοντελοποιείται μόνο μέσω REFPROP. Το ίδιο ισχύει και για τα εξεταζόμενα ζεοτροπικά μίγματα, χωρίς να έχει γίνει προσαρμογή των δυαδικών παραμέτρων αλληλεπίδρασης.

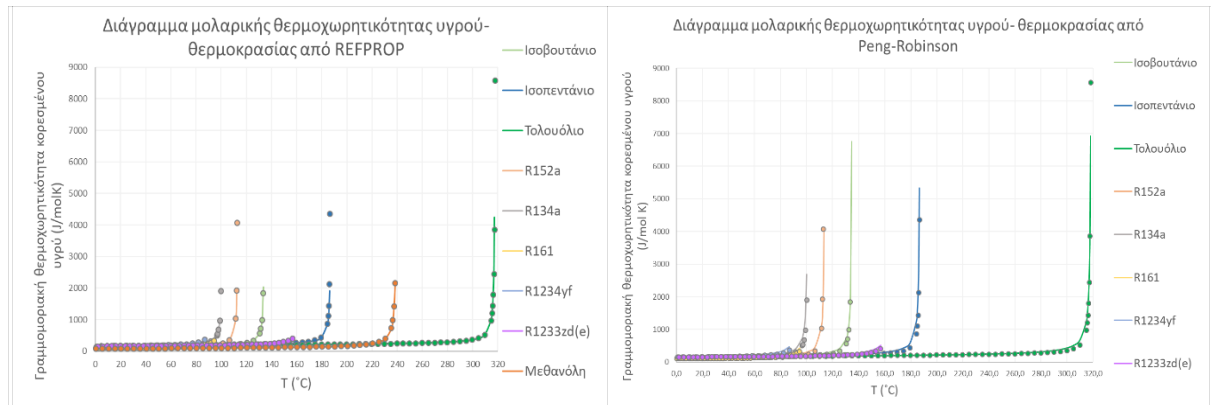
Τα αποτελέσματα του REFPROP και της PR απεικονίζονται σε διαγράμματα αντίστοιχα με τα Σχήματα 4.1.1-4.1.6. Για λόγους σύγκρισης, συμπεριλαμβάνονται και τα πειραματικά δεδομένα, που απεικονίζονται ως σημεία αντίστοιχου χρώματος ανά ρευστό.



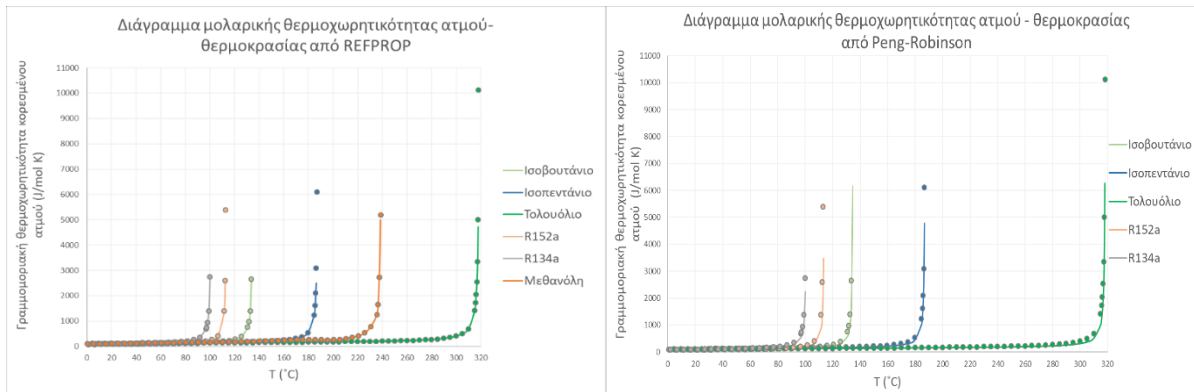
Σχήμα 4.2.1. Καμπύλες τάσης ατμών-θερμοκρασίας μέσω REFPROP (αριστερά) και PR (δεξιά) για τα 9 ρευστά του ORC.



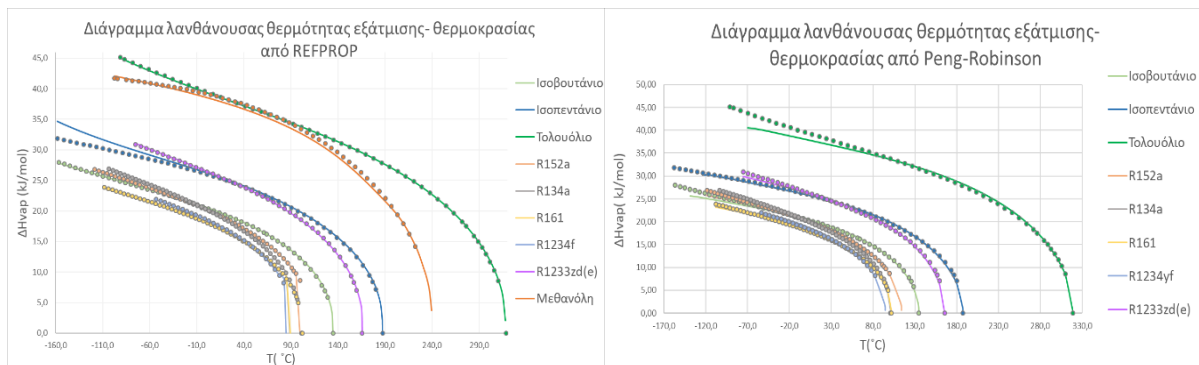
Σχήμα 4.2.2. Καμπύλες θερμοκρασίας-γραμμομοριακού όγκου κορεσμού μέσω REFPROP (αριστερά) και PR (δεξιά) για τα 9 ρευστά του ORC.



Σχήμα 4.2.3. Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού-θερμοκρασίας μέσω REFPROP (αριστερά) και PR (δεξιά) για τα 9 ρευστά του ORC.



Σχήμα 4.2.4. Καμπύλες γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου ατμού-θερμοκρασίας μέσω REFPROP (αριστερά) και PR (δεξιά) για τα 6 από τα 9 ρευστά του ORC.



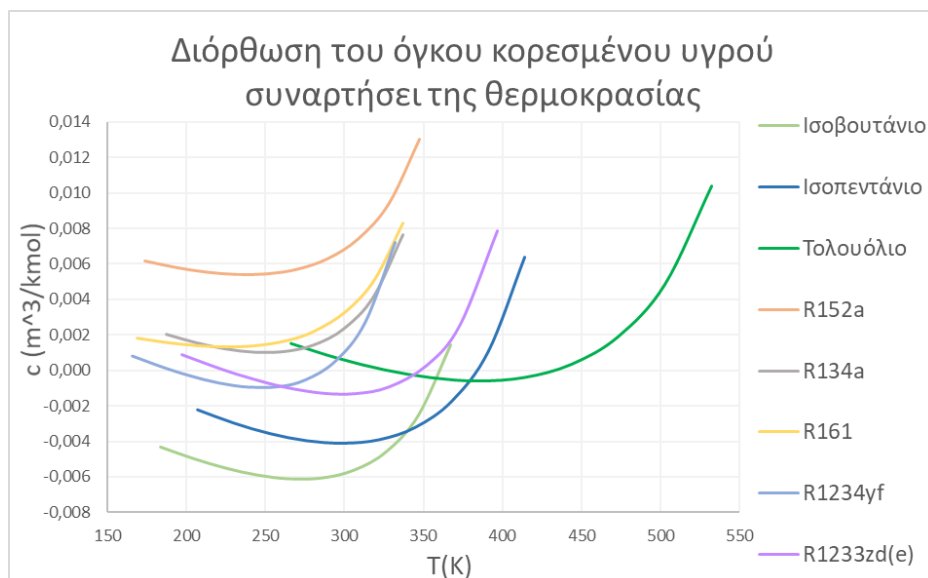
Σχήμα 4.2.5. Καμπύλες λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης-θερμοκρασίας μέσω REFPROP (αριστερά) και PR (δεξιά) για τα 9 ρευστά του ORC.

Τα διαγράμματα αυτά παρατίθενται προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Πράγματι, οι καμπύλες της πίεσης κορεσμού, του μοριακού όγκου, της μοριακής θερμοχωρητικότητας και της ενθαλπίας εξάτμισης ακολουθούν τάσεις αντίστοιχες με αυτές των πειραματικών δεδομένων (Σχήματα 4.1.1-4.1.6). Από το Σχήμα 4.2.2 δίνεται η εντύπωση ότι η Peng-Robinson αστοχεί ελαφρώς στην πρόβλεψη του κρίσιμου σημείου (μέγιστο καμπύλης όγκου). Επιπλέον, από το Σχήμα 4.2.5, είναι αρκετά έντονη η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης της ενθαλπίας εξάτμισης μέσω REFPROP για ορισμένα ψυκτικά, η οποία ωστόσο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά των ρευστών και οφείλεται στην ανάγκη λήψης περισσότερων ενδιάμεσων τιμών.

### 4.3. Προσαρμογή Παραμέτρων Διόρθωσης Όγκου Υγρής Φάσης

Μέχρι το παρόν σημείο της ανάλυσης, δεν έχει χρησιμοποιηθεί κάποια διόρθωση των προβλέψεων του όγκου της υγρής φάσης από την PR (Εξ. 3.2.5). Ήδη αναφέρθηκαν (Κεφ. 3.6) οι δυνατότητες εκτίμησης της παραμέτρου αυτής που δίνει η έκδοση V11 του λογισμικού, οι οποίες αναλύονται στο Παράρτημα Γ. Στο σημείο αυτό διερευνάται η βελτίωση των προβλέψεων του όγκου κορεσμένου υγρού με προσαρμογή των παραμέτρων σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, αρχικά σε σταθερή θερμοκρασία ίση με το 70% της κρίσιμης και έπειτα σε ένα εύρος θερμοκρασιών 45-90% της κρίσιμης, με βήμα  $0,05 \cdot T_c$  ή 5%.





**Σχήμα 4.3.1.** Τάση παραμέτρου διόρθωσης του όγκου κορεσμένου υγρού με χρήση της PR για εύρος θερμοκρασιών 0,45-0,9 της κρίσιμης τιμής ανά ρευστό.

Για όλα τα ρευστά, η τιμή του  $c$  εμφανίζει ένα ελάχιστο για θερμοκρασία περίπου ίση με το 65% της κρίσιμης και έπειτα αυξάνεται μέχρι το κρίσιμο σημείο. Για τους τρεις υδρογονάνθρακες και τις δύο υδροφθοροολεφίνες, οι τιμές της διόρθωσης του όγκου παίρνουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές, σε αντίθεση με τους τρεις HFCs, για τους οποίους η ΚΕ υπερεκτιμά τους όγκους κορεσμένου υγρού σε όλες τις θερμοκρασίες. Για θερμοκρασία ίση με το 70% της κρίσιμης τιμής, η διόρθωση είναι αρνητική για τους υδρογονάνθρακες και τις υδροφθοροολεφίνες, κάτι που σημαίνει ότι η Peng-Robinson προβλέπει τιμές μικρότερες από τις πειραματικές. Ωστόσο, ειδικά στην περίπτωση του τολουολίου, μόλις στα 3 από τα 10 σημεία του θερμοκρασιακού εύρους γίνεται υποτίμηση του όγκου από το μοντέλο, κάτι που αποτυπώνεται και στον μέσο όρο για όλες τις θερμοκρασίες που είναι θετικός, δηλαδή δείχνει υπερεκτίμηση. Το Σχήμα 4.3.1 κάνει εμφανές το γεγονός ότι η διόρθωση σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν είναι αντιπροσωπευτική. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται ανά ρευστό, μέσω του εργαλείου Solver του Excel, η τιμή της διόρθωσης που οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των σχετικών αποκλίσεων των όγκων που προβλέπει το μοντέλο από τους πειραματικούς. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε θερμοκρασίες από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο, αλλά και στο εύρος 10-200°C για όλα τα ρευστά. Οι τελικές τιμές της σταθεράς  $c$  με όλες τις μεθόδους προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.1. Επίσης, υπολογίζονται, μέσω της Εξ. 4.2.1, οι αποκλίσεις των τιμών του όγκου κορεσμού της υγρής φάσης από τα πειραματικά δεδομένα για τα δύο διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών με όλες τις μεθόδους διόρθωσης και με την ΚΕ χωρίς διόρθωση. Οι αποκλίσεις αυτές παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3.2 και 4.3.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3.1. Τελικές τιμές διόρθωσης όγκου κορεσμένου υγρού για την PR με όλες τις εξεταζόμενες μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε πειραματικές δεδομένα.

Παράμετρος Διόρθωσης Όγκου $c$ ( $m^3/kmol$ )								
	i-C4	i-C5	Τολουόλιο	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)
<b>0,7*Tc</b>	0,006074	0,003924	0,000392	-0,005730	-0,001085	-0,001655	0,000929	0,001314
<b>0,45-0,9* Tc</b>	0,0044194	0,0018296	-0,0018377	-0,0070461	-0,0025166	-0,0028027	-0,0007958	-0,0006702
<b>Ttrip-Tc</b>	0,0043296	0,0016726	-0,0016227	-0,0061254	-0,0018462	-0,00200	-0,0003153	-0,0005196
<b>10-200°C</b>	0,002905	0,00178767	0,000092171	-0,009578	-0,006070	-0,0058513	-0,0040235	-0,00007126

Οι τιμές παρουσιάζονται με αντίθετο πρόσημο, όπως δηλαδή πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό.

Πίνακας 4.3.2. %Σχετικά σφάλματα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της απλής Peng-Robinson και με τις μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε εύρος θερμοκρασιών από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

Τριπλό-Κρίσιμο Σημείο									
	i-C4	i-C5	Τολουόλιο	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	Μέσος Όρος
<b>Μη διορθωμένη PR</b>	5,61	7,89	5,10	12,32	6,82	6,20	2,90	2,88	6,22
<b>0,7*Tc</b>	4,54	8,22	5,28	4,62	5,58	3,80	3,35	3,42	4,85
<b>0,45-0,9 Tc</b>	3,99	7,68	4,81	4,85	5,39	5,57	3,24	3,06	4,82
<b>Ttrip-Tc</b>	3,97	7,68	4,81	4,53	5,24	3,72	2,87	2,85	4,46

Πίνακας 4.3.3. %Σχετικά σφάλματα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της απλής Peng-Robinson και με τις μεθόδους προσαρμογής της διόρθωσης σε εύρος θερμοκρασιών 10-200°C.

Τυπικό Εύρος Λειτουργίας ORC: 10-200°C									
	i-C4	i-C5	Τολουόλιο	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	Μέσος Όρος
<b>Μη διορθωμένη PR</b>	6,04	6,80	0,44	15,43	11,48	11,28	6,23	4,30	7,76
<b>T=0,7*Tc</b>	6,43	6,90	0,48	9,11	10,51	9,16	7,03	4,51	6,77
<b>0,45-0,9 Tc</b>	5,84	6,66	1,48	7,93	9,38	6,91	6,91	4,33	6,18
<b>10-200°C</b>	5,73	6,66	0,43	7,19	8,51	6,71	5,26	4,29	5,60

Αρχικά, το γεγονός ότι οι αποκλίσεις στο πιο περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το ολικό εύρος της διαφασικής περιοχής για όλα τα ρευστά με κρίσιμη θερμοκρασία χαμηλότερη από 200°C υποδεικνύει ότι τα σφάλματα κοντά στο κρίσιμο σημείο είναι υψηλά. Επιβεβαιώνεται ότι η διόρθωση σε μία μεμονωμένη θερμοκρασία δεν είναι αντιπροσωπευτική, αφού τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα από την απλή ΚΕ όταν χρησιμοποιείται η διόρθωση σε θερμοκρασία ίση με 70% της κρίσιμης για όλα τα ρευστά, με εξαίρεση τα R161, R1234yf και R1233zd(e), για τα οποία οι τιμές του *c* έχουν το ίδιο πρόσημο ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία (Σχήμα. 4.3.1). Η λήψη της μέσης διόρθωσης σε θερμοκρασίες μεταξύ 45% και 90% της κρίσιμης οδηγεί σε μικρότερα σφάλματα σε σχέση με τη διόρθωση σε σταθερή θερμοκρασία. Προφανώς, η μέγιστη βελτίωση στις προβλέψεις του γραμμομοριακού όγκου κορεσμένου υγρού επιτυγχάνεται με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των σφαλμάτων. Μεταξύ των δύο ευρών θερμοκρασίας, ως τελικές τιμές της διόρθωσης επιλέγονται αυτές στην πιο χαρακτηριστική περιοχή λειτουργίας των συστημάτων ORC (τελευταία γραμμή Πίνακα 4.3.1).

Υπολογίζεται η μείωση των σχετικών αποκλίσεων των προβλέψεων από τα πειραματικά δεδομένα με εισαγωγή των τελικών τιμών διόρθωσης του όγκου ως εξής:

$$\text{Σχετ. Βελτίωση} = \frac{\text{Σφάλμα μη διορθωμένης PR} - \text{Σφάλμα διορθωμένης PR}}{\text{Σφάλμα μη διορθωμένης PR}} \quad (\text{Εξ 4.3.1})$$

**Πίνακας 4.3.4.** %Σχετική βελτίωση πρόβλεψης όγκου κορεσμένου υγρού με χρήση των προσαρμοσμένων τιμών *c* στο εύρος 10-200°C σε σχέση με τη μη διορθωμένη PR.

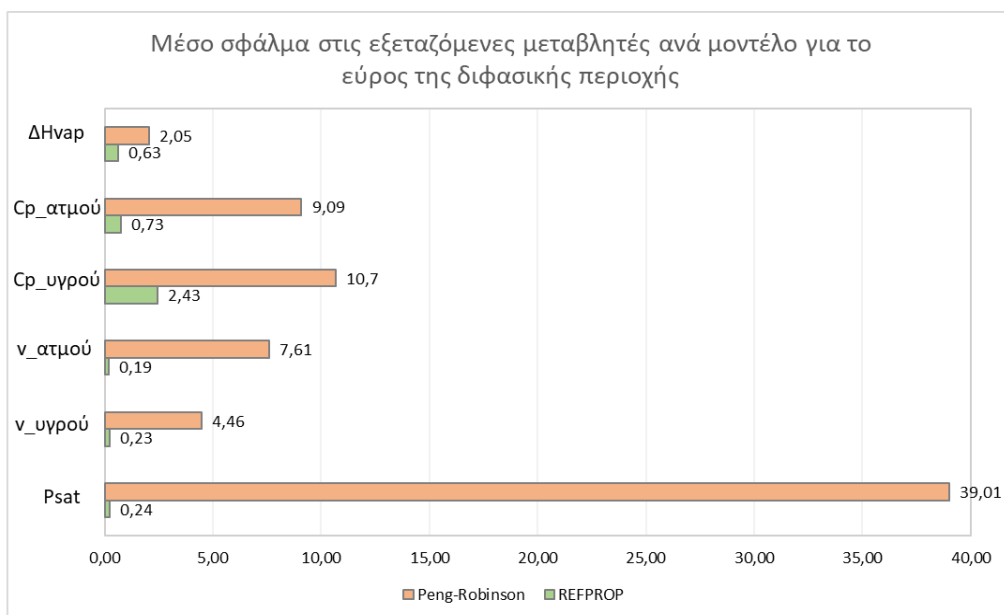
<b>i-C4</b>	5,3%
<b>i-C5</b>	2,1%
<b>Τολουόλιο</b>	0,6%
<b>R152a</b>	53,4%
<b>R134a</b>	25,9%
<b>R161</b>	40,5%
<b>R1234yf</b>	15,6%
<b>R1233zd(e)</b>	0,05%

Στην περίπτωση του τολουολίου δεν απαιτείται καν διόρθωση, αφού η απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα ούτως ή άλλως είναι αμελητέα, ίση με 0,44%. Στην περίπτωση του R1233zd(e), η σχετική βελτίωση δεν ξεπερνά το 0,05%, δηλαδή η χρήση της δεν είναι ουσιαστική. Για τα υπόλοιπα ρευστά η χρήση της διόρθωσης του όγκου επιφέρει σημαντική βελτίωση στις προβλέψεις, και ειδικά στην περίπτωση των HFCs, για τους οποίους οι αποκλίσεις ξεπερνούν το 10% (Πίνακες 4.3.2, 4.3.3). Από τον Πίνακα 4.3.1 προκύπτει ότι η τιμή του *c* εισάγεται στο λογισμικό με θετικό πρόσημο για τα αλκάνια και αρνητικό για τους HFCs και το R1234yf. Ωστόσο, στο Σχήμα 3.6.1 φαίνεται ότι κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στο λογισμικό όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο Aspen Properties HYSYS Peng Robinson, συνεπώς τελικά η διόρθωση όγκου χρησιμοποιείται μόνο για τα ρευστά ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, R152a και R134a. Οι τιμές της είναι αυτές που περιέχονται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 4.3.1.

#### 4.4. Σφάλματα Θερμοδυναμικών Μοντέλων & Επιλογή Βέλτιστου

Για την αξιολόγηση του REFPROP και της Peng-Robinson υπολογίζεται το μέσο σχετικό σφάλμα που υπεισέρχεται στην πρόβλεψη των εξεταζόμενων μεταβλητών. Υπολογίζεται, επιπλέον, το μέσο σφάλμα, αγνοώντας το τριπλό ή το κρίσιμο σημείο, προκειμένου να διερευνηθεί αν υπάρχει αβεβαιότητα και αστοχίες στην πρόβλεψη των άκρων της διφασικής περιοχής ισορροπίας, εξαιρώντας τα ρευστά R161, R1234yf και R1233zd(e), για τα οποία η θερμοκρασία του τριπλού σημείου δεν περιέχεται στο εύρος των πειραματικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα μέσω Aspen Plus.

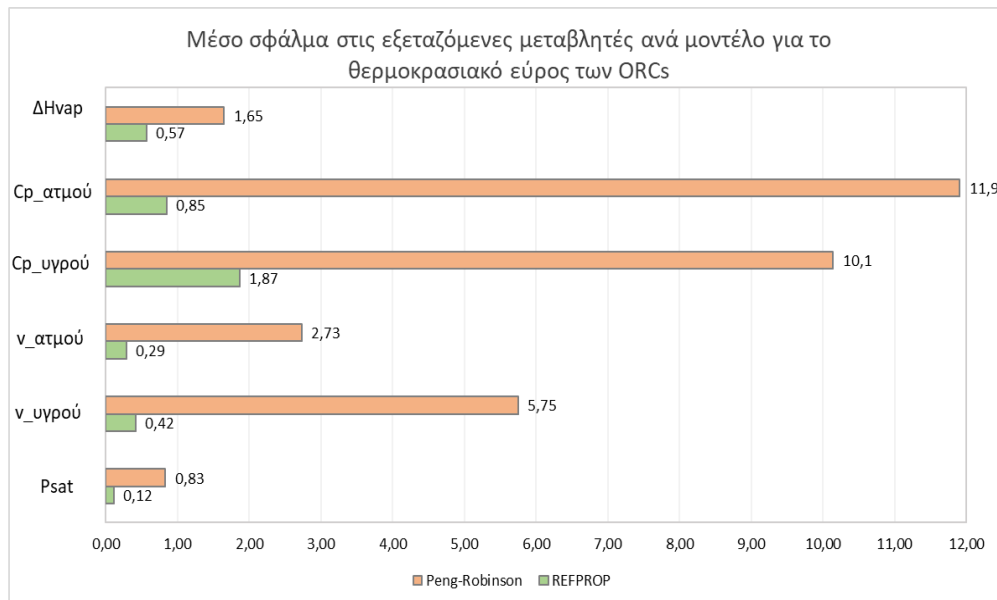
Προτού παρατεθούν οι συνολικοί πίνακες των σφαλμάτων, απεικονίζονται σε διαγράμματα τα μέσα σφάλματα των δύο μοντέλων στο ολικό θερμοκρασιακό εύρος και στο τυπικό εύρος λειτουργίας ενός ORC. Το εύρος αυτό δεν περιέχει το τριπλό σημείο κανενός εκ των ρευστών, αλλά περιέχει το κρίσιμο σημείο της πλειοψηφίας αυτών. Η μεθανόλη έχει συμπεριληφθεί ξεχωριστά μόνο στους πίνακες του REFPROP, όχι όμως και στα διαγράμματα, προκειμένου η σύγκριση να είναι άμεση με την ΚΕ. Ο όγκος της υγρής φάσης υπολογίζεται από την PR με χρήση της επιλεγμένης παραμέτρου διόρθωσης ανά ρευστό.



Σχήμα 4.4.1. %Μέσο, για όλα τα ρευστά, σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο για το θερμοκρασιακό εύρος από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

Από το Σχήμα 4.4.1 γίνεται αντιληπτό ότι οι προβλέψεις του REFPROP είναι αρκετά πιο κοντινές στα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με της Peng-Robinson. Η μέγιστη διαφορά αφορά την τάση ατμών, όπως ήταν αναμενόμενο και από το Σχήμα 3.2.2. Η Peng-Robinson αστοχεί σημαντικά στην εκτίμηση της πίεσης κορεσμού, με το μέσο σφάλμα για όλα τα ρευστά να είναι περίπου 40%. Σημαντικό είναι και το σφάλμα που υπεισέρχεται στην πρόβλεψη της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας και των δύο φάσεων, που κυμαίνεται περίπου στο 10%. Η ελάχιστη απόκλιση των προβλέψεων της κυβικής ΚΕ από τα πειραματικά σημειώνεται στην περίπτωση της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης και ισούται περίπου με 2%. Όσον αφορά το REFPROP, το μέγιστο σφάλμα δεν ξεπερνά το 2,5% και σημειώνεται στην πρόβλεψη της μοριακής θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης. Στις υπόλοιπες μεταβλητές, η μέση, για όλα

τα ρευστά, σχετική απόκλιση είναι μικρότερη από 1%, και μάλιστα μικρότερη από 0,25% στην πίεση κορεσμού και στον γραμμομοριακό όγκο. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι το REFPROP είναι καταλληλότερο για την μοντελοποίηση του οργανικού κύκλου Rankine σε σχέση με κλασικές καταστατικές εξισώσεις, με βάση την απόκλιση από τις πειραματικές τιμές της βάσης δεδομένων του NIST.



**Σχήμα 4.4.2.** %Μέσο, για όλα τα ρευστά, σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο για το εύρος θερμοκρασιών 10-200°C.

Σε σύγκριση με το Σχήμα 4.4.1, οι προβλέψεις του REFPROP είναι ακριβέστερες στην πίεση κορεσμού, τη μοριακή θερμοχωρητικότητα της υγρής φάσης και τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, όταν περιορίζεται το εύρος των θερμοκρασιών. Τα σφάλματα είναι ελαφρώς αυξημένα στην εκτίμηση του όγκου των δύο φάσεων και στην θερμοχωρητικότητα του ατμού. Το μέγιστο σφάλμα εμφανίζεται στην ίδια μεταβλητή με το ολικό εύρος και ισούται με 1,9% και το ελάχιστο και πάλι στην τάση ατμών, ίσο με 0,1%, και ακολούθως στον όγκο της ατμώδους και της υγρής φάσης. Όσον αφορά την PR, οι προβλέψεις της είναι αρκετά πιο κοντινές στα πειραματικά δεδομένα της τάσης ατμών, του μοριακού όγκου της ατμώδους φάσης και της ενθαλπίας εξάτμισης. Αντίθετα, οι αποκλίσεις της είναι ελαφρώς υψηλότερες στην πρόβλεψη των ιδιοτήτων του υγρού και στην θερμοχωρητικότητα του ατμού. Η πίεση κορεσμού αποτελεί την μεταβλητή με τις πιο κοντινές στα πειραματικά δεδομένα εκτιμήσεις, με το σφάλμα να μην ξεπερνά το 1%. Το μέγιστο σφάλμα παρατηρείται στην θερμοχωρητικότητα της ατμώδους φάσης και αγγίζει το 12%. Επομένως, παρόλο που η PR δεν αποτελεί την καλύτερη επιλογή για την μοντελοποίηση ενός οργανικού κύκλου Rankine, στα συνήθη επίπεδα θερμοκρασιών λειτουργίας του δεν είναι απαγορευτική, δεδομένου ότι οι αποκλίσεις της είναι μικρότερες από 15%.

Παρατίθενται τα αναλυτικά σφάλματα των μοντέλων ανά ρευστό και ανά θερμοκρασιακό εύρος. Στο ολικό εύρος θερμοκρασιών (Πίνακες 4.4.1 και 4.4.3) περιέχονται και οι αποκλίσεις της τάσης ατμών και του γραμμομοριακού όγκου, αγνοώντας το τριπλό και το κρίσιμο σημείο, ενώ στο τυπικό εύρος λειτουργίας των ORCs (Πίνακες 4.4.2 και 4.4.4) παραλείποντας μόνο το κρίσιμο.

Πίνακας 4.4.1. %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με το REFPROP για το θερμοκρασιακό εύρος από το κρίσιμο έως το τριπλό σημείο.

REFPROP: Τριπλό Σημείο-Κρίσιμο Σημείο												
Όλες οι θερμοκρασίες	$P_{sat}$	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος +MeOH
		$v_{υγρού}$	0,01	0,003	0,01	0,002	0,003	0,43	0,93	0,55	0,01	0,24
$v_{ατμού}$	0,09	0,18	0,36	0,02	0,28	0,65	0,12	0,17	0,48	0,23	0,26	
$C_{p,υγρού}$	0,09	0,19	0,37	0,03	0,29	-	-	-	0,49	0,19	0,24	
$C_{p,ατμού}$	0,27	0,82	1,54	0,79	0,31	3,70	10,6	1,40	0,05	2,43	2,16	
$\Delta H_{vap}$	0,08	1,08	0,96	1,07	0,47	-	-	-	0,08	0,73	0,62	
	0,45	2,07	0,40	0,15	0,19	0,64	0,64	0,51	1,62	0,63	0,74	
Αγνόηση τριπλού σημείου	$P_{sat}$	0,01	0,003	0,01	0,003	0,003	-	-	-	0,01	0,005	0,005
	$v_{υγρού}$	0,09	0,19	0,37	0,15	0,29	-	-	-	0,49	0,22	0,26
	$v_{ατμού}$	0,09	0,19	0,38	0,16	0,29	-	-	-	0,50	0,22	0,27
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	-	-	-	0,002	0,002	0,002
	$v_{υγρού}$	0,02	0,01	0,03	0,02	0,003	-	-	-	0,003	0,02	0,01
	$v_{ατμού}$	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	-	-	-	0,01	0,02	0,02

Με «-» σημειώνεται η έλλειψη πειραματικών δεδομένων και συνεπώς, η μη πραγματοποίηση υπολογισμών από τα μοντέλα.

Πίνακας 4.4.2. %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με το REFPROP για το τυπικό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ενός ORC.

REFPROP: 10-200°C												
Όλες οι θερμοκρασίες	$P_{sat}$	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH	Μέσος Όρος	Μέσος Όρος +MeOH
		$v_{υγρού}$	0,01	0,004	0,001	0,006	0,005	0,37	0,04	0,49	0,001	0,12
$v_{ατμού}$	0,19	0,33	0,002	0,30	0,56	1,49	0,27	0,19	0,000	0,42	0,37	
$C_{p,υγρού}$	0,19	0,34	0,001	0,34	0,57	-	-	-	0,001	0,29	0,24	
$C_{p,ατμού}$	0,48	1,36	0,51	1,12	0,29	3,81	5,84	1,55	0,01	1,87	1,66	
$\Delta H_{vap}$	0,15	1,75	0,70	1,27	0,38	-	-	-	0,01	0,85	0,71	
	0,71	0,68	0,14	0,21	0,36	0,83	1,05	0,58	2,28	0,57	0,76	
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$	0,003	0,003	-	0,003	0,002	-	-	-	-	0,002	-
	$v_{υγρού}$	0,04	0,02	-	0,03	0,01	-	-	-	-	0,03	-
	$v_{ατμού}$	0,03	0,04	-	0,07	0,01	-	-	-	-	0,04	-

Με «-» σημειώνεται η έλλειψη πειραματικών δεδομένων και συνεπώς, η μη πραγματοποίηση υπολογισμών από τα μοντέλα.



Πίνακας 4.4.3. %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με την Peng-Robinson για το θερμοκρασιακό εύρος από το κρίσιμο έως το τριπλό σημείο.

Peng-Robinson: Τριπλό Σημείο-Κρίσιμο Σημείο										
Όλες οι θερμοκρασίες	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού $C_{p,υγρού}$ $C_{p,ατμού}$ $\Delta H_{vap}$	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	Μέσος Όρος
		Αγνόηση τριπλού σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	14,6 3,97 7,64	275 7,68 12,9	14,5 4,81 9,20	4,67 4,53 5,81	1,44 5,24 2,54	0,91 3,72 -	0,01 2,87 -
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	11,5 8,02 2,45	15,6 6,78 2,71	9,16 7,80 2,72	10,0 12,1 1,52	12,9 10,7 1,45	8,76 -	10,7 -	6,71 -	10,7 9,09 2,05
Αγνόηση τριπλού σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	8,74 3,90 6,51	150 6,32 11,7	11,1 4,68 8,45	4,18 5,02 5,92	1,23 5,44 2,37	- - -	- - -	- - -	35,0 5,07 6,99
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	14,8 3,97 7,56	279 7,61 12,8	14,67 4,72 9,09	4,67 4,51 5,81	1,47 5,02 2,15	- - -	- - -	- - -	62,9 5,12 7,48

Με «-» σημειώνεται η έλλειψη πειραματικών δεδομένων και συνεπώς, η μη πραγματοποίηση υπολογισμών από τα μοντέλα.

Πίνακας 4.4.4. %Μέσο σχετικό σφάλμα ανά μεταβλητή και ανά ρευστό με την Peng-Robinson για το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ενός ORC.

Peng-Robinson: 10-200°C										
Όλες οι θερμοκρασίες	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού $C_{p,υγρού}$ $C_{p,ατμού}$ $\Delta H_{vap}$	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	Μέσος Όρος
		Αγνόηση τριπλού σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	0,39 5,73 1,78	0,74 6,66 1,37	2,37 0,43 2,31	1,09 7,19 5,87	0,30 8,51 2,34	0,67 6,71 -	0,41 5,26 -
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	9,27 10,9 1,90	10,11 7,54 1,75	4,01 2,08 1,36	13,2 21,5 1,18	19,8 17,5 1,65	10,4 -	7,70 -	6,65 -	10,1 11,9 1,65
Αγνόηση κρίσιμου σημείου	$P_{sat}$ υγρού (διορθ.) ατμού	0,39 5,90 1,41	0,72 6,52 0,97	- - -	1,07 7,34 5,00	0,31 8,29 1,53	- - -	- -	- -	0,62 7,01 2,23

Με «-» σημειώνεται η έλλειψη πειραματικών δεδομένων και συνεπώς, η μη πραγματοποίηση υπολογισμών από τα μοντέλα.

Στο ολικό θερμοκρασιακό εύρος, το μέγιστο σφάλμα του REFPROP στην πρόβλεψη της θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης οφείλεται πρωτίστως στο R1234yf, για το οποίο η απόκλιση ισούται με 10,6%. Το αμέσως επόμενο σφάλμα εμφανίζεται στο R161 και είναι ίσο με 3,7%. Για τα υπόλοιπα ρευστά η ακρίβεια είναι αρκετά ικανοποιητική, αφού τα σφάλματα δεν ξεπερνούν το 1,5%, οδηγώντας στην σχετικά χαμηλή τιμή του μέσου όρου. Το μέσο σφάλμα κατά την πρόβλεψη της ενθαλπίας εξάτμισης ισούται με 0,74%, με την πρόβλεψη του ισοπεντανίου να αποκλίνει από την πειραματική τιμή κατά 2,1% και της μεθανόλης κατά 1,6%. Τα σφάλματα για τα υπόλοιπα ρευστά είναι μικρότερα από 0,7%.

Με την αγνόηση του τριπλού και του κρίσιμου σημείου, οι προβλέψεις της τάσης ατμών από το REFPROP σχεδόν ταυτίζονται με τις πειραματικές τιμές. Η εκτίμηση του μολαρικού όγκου σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από την κρίσιμη επίσης είναι πολύ ακριβής, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο αστοχεί ελαφρώς στην πρόβλεψη του κρίσιμου σημείου. Τα σφάλματα στις θερμοχωρητικότητες με την αγνόηση του τριπλού σημείου δεν εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις.

Στο τυπικό εύρος λειτουργίας ενός ORC, η μέγιστη απόκλιση κατά την πρόβλεψη της θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης μέσω REFPROP παρατηρείται και πάλι στο R1234yf και ισούται με περίπου 6%, ακολουθεί το R161 με 3,8% και τα υπόλοιπα ρευστά με σφάλματα έως 1,5%. Το σφάλμα στην εκτίμηση της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας της ατμώδους φάσης αυξάνεται λόγω των προβλέψεων των τιμών για το ισοπεντάνιο, με την απόκλιση να είναι ίση με 1,75%, και για το R152a, με απόκλιση στο 1,27%.

Στο πιο περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος η αγνόηση του κρίσιμου σημείου και πάλι ουσιαστικά εκμηδενίζει τις αποκλίσεις των προβλέψεων από τις πειραματικές τιμές, τόσο για την τάση ατμών όσο και για το μολαρικό όγκο και των δύο φάσεων.

Στο εύρος θερμοκρασιών από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο, η Peng-Robinson αποτυγχάνει να προβλέψει την πίεση κορεσμού του ισοπεντανίου, ενός αρκετά συνήθους οργανικού ρευστού. Το αμέσως επόμενο μέγιστο σφάλμα δεν ξεπερνά το 15% και αφορά το ισοβουτάνιο και το τολουόλιο, δηλαδή τους υπόλοιπους εξεταζόμενους υδρογονάνθρακες. Τα σφάλματα στην περίπτωση των HFCs και των υδροφθοροολεφινών είναι ιδιαίτερα χαμηλά συγκριτικά με τις υπόλοιπες ουσίες, οδηγώντας το μέσο σφάλμα στην τιμή του 40%. Σημαντικά είναι και τα σφάλματα στην πρόβλεψη της μολαρικής θερμοχωρητικότητας. Η απόκλιση στην περίπτωση του ισοπεντανίου είναι 15,6% για την υγρή φάση και 6,8% για την ατμώδη. Ακολουθεί το R134a με 12,9% για το υγρό και 10,7% για τον ατμό, ενώ το R152a έχει απόκλιση 10% και 12,1% αντιστοίχως. Υψηλά, σχετικά, είναι και τα σφάλματα στη μοντελοποίηση του ισοβουτανίου.

Με την αγνόηση του τριπλού σημείου, μειώνεται σχεδόν στο μισό το σφάλμα στην πρόβλεψη της τάσης ατμών του ισοπεντανίου. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι κλασικές κυβικές καταστατικές εξισώσεις αστοχούν σημαντικά στην πρόβλεψη της περιοχής κοντά στο τριπλό σημείο, και όχι μόνο στο σημείο καθ' αυτό. Οι υπόλοιπες διακυμάνσεις είναι αρκετά μικρότερες. Όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το κρίσιμο σημείο, το σφάλμα αυξάνεται σημαντικά στην εκτίμηση της τάσης ατμών, κάτι που ωστόσο έχει να κάνει με την έλλειψη δεδομένων για τρία ρευστά, με αποτέλεσμα η απόκλιση του ισοπεντανίου να επηρεάζει πιο πολύ το μέσο όρο. Η ΚΕ αποκλίνει περισσότερο στην πρόβλεψη του τριπλού σημείου, σε σχέση με το κρίσιμο.

Στο εύρος θερμοκρασιών 10-200 °C, στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται το τριπλό σημείο, η εκτίμηση της τάσης ατμών μέσω της PR εμφανίζει τις ελάχιστες αποκλίσεις ανάμεσα σε όλες τις μεταβλητές, και βελτιώνεται περαιτέρω με την αγνόηση του κρίσιμου σημείου. Τα σφάλματα στην μολαρική θερμοχωρητικότητα του ατμού είναι αρκετά σημαντικά στους δύο HFCs, με το σφάλμα στην περίπτωση του R152a να ξεπερνά το 20% και για το R134a να

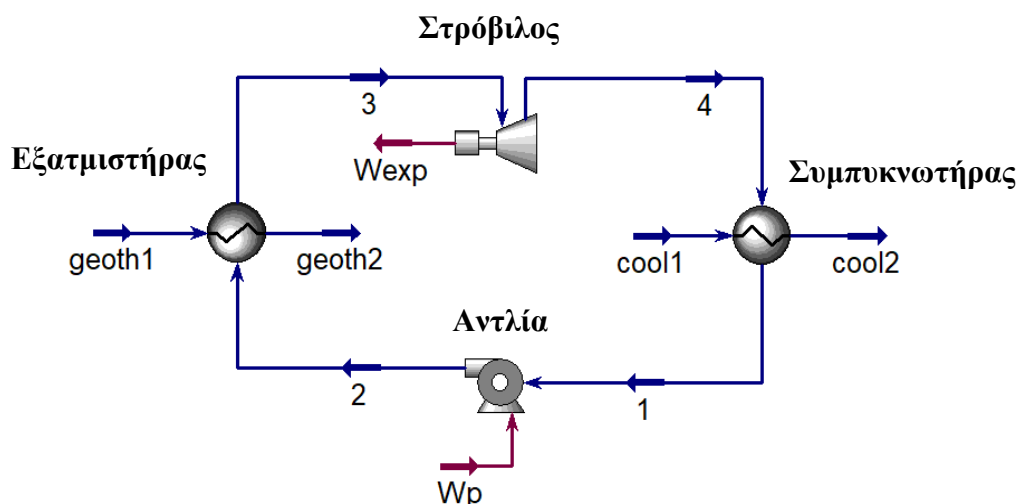
αγγίζει το 18%. Η απόκλιση στην μεταβλητή αυτή ελαχιστοποιείται στην περίπτωση του τολουολίου για το οποίο ισούται με περίπου 2%. Η πρόβλεψη της θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης του R134a επίσης αποκλίνει σημαντικά από τα πειραματικά δεδομένα, κατά περίπου 20%. Η αύξηση του σφάλματος στο μοριακό όγκο της υγρής φάσης με την αγνόηση του κρίσιμου σημείου στο τυπικό εύρος λειτουργίας των ORCs είναι πλασματική και οφείλεται στην υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία του τολουολίου, του οποίου το σφάλμα είναι το ελάχιστο και μειώνει το μέσο όρο στο ολικό εύρος θερμοκρασιών.

Συνολικά, λοιπόν, η αξιολόγηση των θερμοδυναμικών μοντέλων ξεκαθαρίζει ότι το REFPROP υπερτερεί της Peng-Robinson και προβλέπει τιμές πολύ κοντινές στις πειραματικές όλων των βασικών ιδιοτήτων των οργανικών ρευστών, είτε πρόκειται για υδρογονάνθρακες, συνήθη ψυκτικά ρευστά ή αλκοόλες. Από την άλλη μεριά, η κλασική καταστατική εξίσωση εμφανίζει συνολικά μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά την πρόβλεψη κάποιων ιδιοτήτων, ιδιαίτερα της τάσης ατμών σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά στο τυπικό εύρος λειτουργίας ενός οργανικού κύκλου Rankine, συνεπώς η προσομοίωση του συστήματος στο λογισμικό γίνεται και με τα δύο μοντέλα, προκειμένου να εξεταστούν οποιεσδήποτε διαφορές προκύψουν στα αποτελέσματά τους.

## 5. Απλό Οργανικό Κύκλο Rankine με Καθαρές Ουσίες

### 5.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών

Το διάγραμμα ροής του υποκρίσιμου απλού οργανικού κύκλου Rankine δημιουργείται στο λογισμικό.



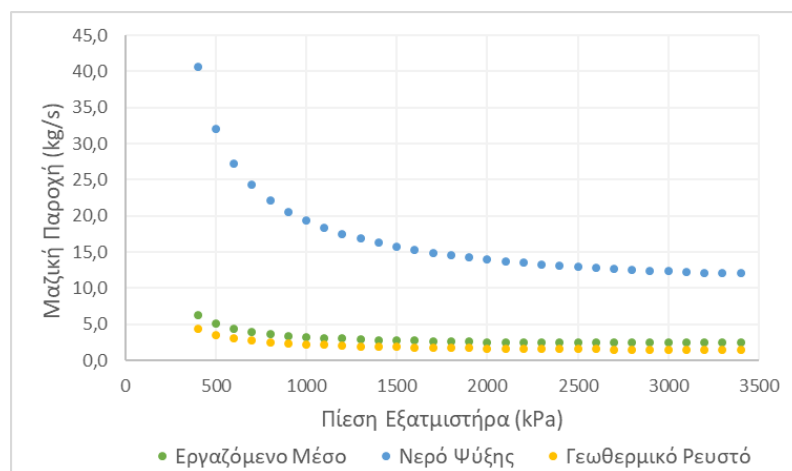
Σχήμα 5.1.1. Διάγραμμα ροής απλού ORC. Τα σημεία 1-4 αφορούν το εργαζόμενο μέσο, τα geoth1, geoth2 την πηγή θερμότητας και τα cool1, cool2 το νερό ψύξης.

Γνώμονας της παρούσας εργασίας είναι η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση. Το διαθέσιμο εργαλείο “Optimizer” του Aspen HYSYS μπορεί να μεταβάλλει τις μεταβλητές εισόδου προς μεγιστοποίηση μίας μοναδικής μεταβλητής-στόχου. Συνεπώς, ο καθορισμός των λειτουργικών συνθηκών γίνεται χειροκίνητα, επιδιώκοντας την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ενεργειακής και της εξεργειακής απόδοσης του κύκλου. Η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στο σημείο 1 (Σχήμα 5.1.1) είναι άμεση συνέπεια της επιλεγμένης θερμοκρασιακής διαφοράς στον συμπυκνωτήρα και η πίεση στο ίδιο σημείο είναι η τάση ατμών στη θερμοκρασία αυτή. Αντιθέτως, στο σημείο 3 η θερμοκρασία και η πίεση πρέπει να οριστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση. Η τελική θερμοκρασία του νερού γεωθερμίας δεν είναι σταθερή, αλλά επιλέγεται έτσι ώστε να πληρείται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστήρα. Τέλος, η δυναμικότητα του συστήματος επιλέγεται να είναι μικρή, δηλαδή στο εύρος 0,5 έως 500 kW, και συγκεκριμένα 100 kW. Συνολικά, λοιπόν, οι σχεδιαστικές επιλογές αφορούν τη θερμοκρασία στα σημεία 1, 3 και geoth2 και την πίεση στο σημείο 3. Οι επιλογές αυτές είναι διαφορετικές ανά εργαζόμενο μέσο, μιας και, αφενός διερευνώνται οι βέλτιστες συνθήκες και αφετέρου, τα υποψήφια οργανικά ρευστά έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες. Για τον καθορισμό των συνθηκών πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, από τις οποίες εξάγονται ποιοτικά συμπεράσματα.

Αρχικά, διερευνάται η επίδραση της μεταβολής της πίεσης στο σημείο 3 του κύκλου. Χρησιμοποιείται, ενδεικτικά, το R1233zd(e) μέσω REFPROP, το οποίο έχει χαμηλή τάση ατμών στη θερμοκρασία συμπύκνωσης και άρα μελετάται ένα μεγαλύτερο εύρος πιέσεων. Η πίεση μεταβάλλεται από τα 400 έως τα 3400 kPa με βήμα 100 kPa, με την κρίσιμη πίεση να ανέρχεται στα 36,2 bar, και οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι οι μαζικές παροχές του οργανικού ρευστού, του νερού γεωθερμίας και του ψυκτικού μέσου καθώς και ο ενεργειακός

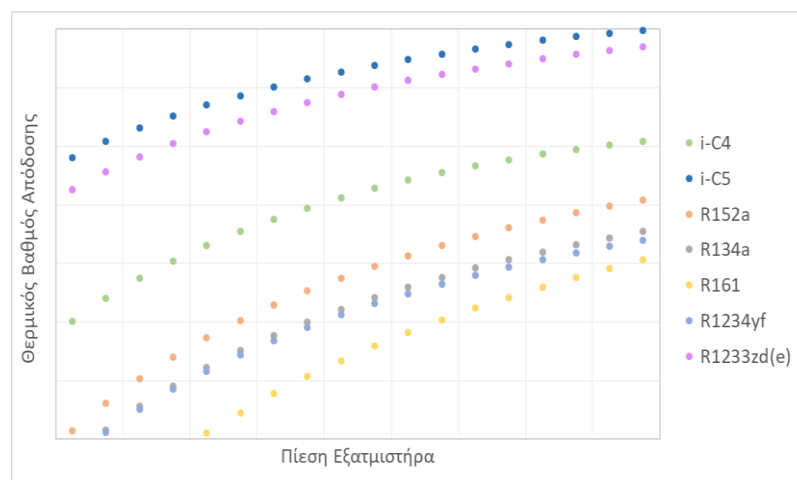
και ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου. Εφόσον το έργο που παράγει ο στρόβιλος είναι σταθερό στα 100 kW, το καθαρό έργο του κύκλου ακολουθεί αντίθετη τάση από αυτό που καταναλώνεται στην αντλία. Ωστόσο, η μικρότερη τάξη μεγέθους του έργου της αντλίας καθιστά την επίδρασή του στη μεταβολή του καθαρού έργου σχεδόν αμελητέα.

Η μαζική παροχή του νερού ψύξης μειώνεται με την αύξηση της πίεσης στον εξατμιστήρα, στην αρχή απότομα και σε υψηλότερες πιέσεις με μικρότερο ρυθμό. Οι παροχές του εργαζόμενου μέσου και του γεωθερμικού ρευστού επίσης μειώνονται, αρχικά απότομα και έπειτα πιο σταδιακά, μέχρι που φτάνουν σε ένα «πλατό». Η μαζική παροχή του νερού ψύξης είναι μεγαλύτερη από του οργανικού ρευστού και της πηγής θερμότητας, συνεπώς μεγαλύτερη είναι και η απόλυτη μείωσή της. Οι σχετικές μειώσεις και για τις τρεις ουσίες με την αύξηση της πίεσης στη μέγιστη εξεταζόμενη τιμή κυμαίνονται περί του 60-70%.

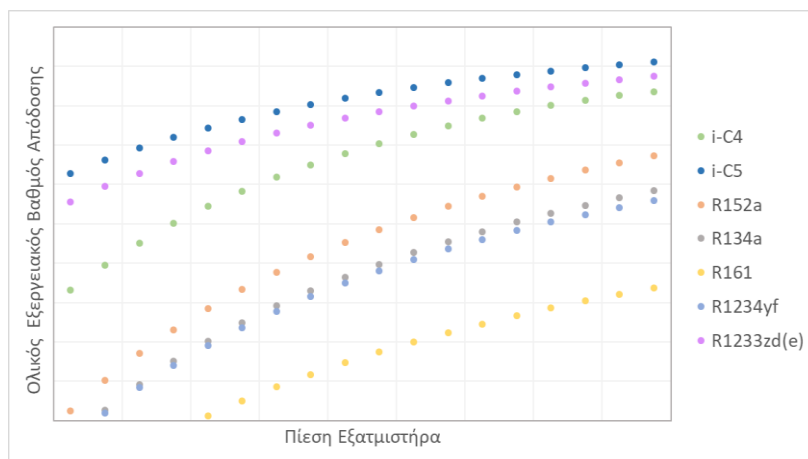


**Σχήμα 5.1.2.** Μείωση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα, ενδεικτικά για το R1233zd(e) μέσω REFPROP.

Για τη μεταβολή του θερμικού και του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης με την πίεση στο σημείο 3, δημιουργούνται κοινά διαγράμματα που απεικονίζουν ποιοτικά τη μεταβολή των δύο εκφράσεων της απόδοσης για όλα τα ρευστά, εξαιρούμενου του τολουολίου και της μεθανόλης λόγω του ύψους της κρίσιμης θερμοκρασίας τους. Οι επιλεγμένες συνθήκες ανά ρευστό εξασφαλίζουν την έξοδο υπέρθερμου ατμού από τον εξατμιστήρα, ενώ μελετάται το κοινό εύρος πιέσεων 800-2500 kPa.



**Σχήμα 5.1.3.** Κοινό διάγραμμα της τάσης του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα μέσω REFPROP.

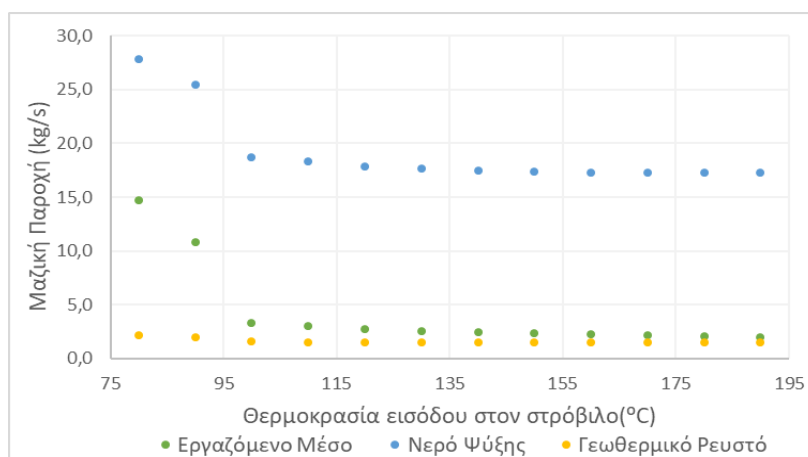


**Σχήμα 5.1.4.** Κοινό διάγραμμα της τάσης του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα μέσω REFPROP.

Τα διαγράμματα αυτά είναι ποιοτικά, μιας και, πέρα από την πίεση του εξατμιστήρα, απαιτείται σε κάθε περίπτωση και η αλλαγή και υπόλοιπων μεταβλητών εισόδου. Οι τιμές και των δύο εκφράσεων της απόδοσης αυξάνονται με την αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο, ιδιαίτερα σε χαμηλότερες πιέσεις. Η απόλυτη αύξηση είναι μεγαλύτερη για τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή τους HFCs και το R1234yf. Η σειρά των ρευστών είναι ίδια στον ενεργειακό και στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης.

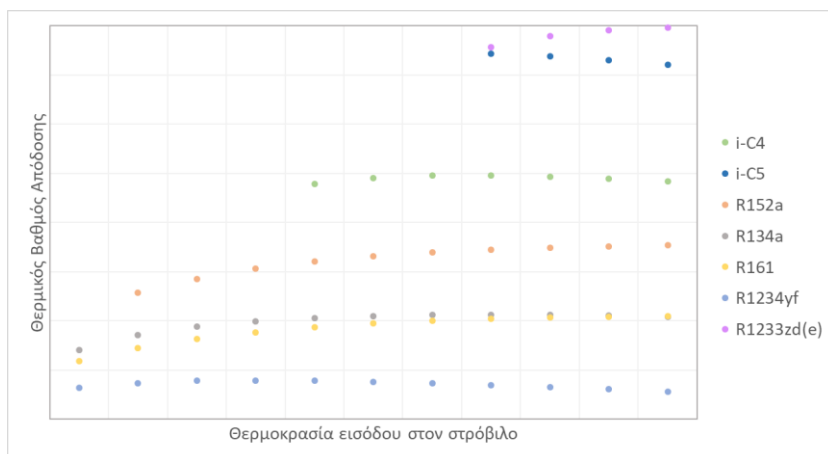
Από τα Σχήματα 5.1.2-5.1.4 προκύπτει ότι, τόσο από θερμοδυναμική όσο και από οικονομική σκοπιά, είναι ευνοϊκότερες οι υψηλότερες τιμές πιέσεων στον εξατμιστήρα, καθώς αυξάνονται και η θερμική και η εξεργειακή απόδοση, ενώ παράλληλα μειώνονται οι μαζικές παροχές της θερμής και της ψυχρής βοηθητικής παροχής, που αντανακλούν το λειτουργικό κόστος, και του εργαζόμενου μέσου, που είναι μέρος του πάγιου. Γίνεται η σχεδιαστική επιλογή ότι η μέγιστη πίεση του κύκλου δεν μπορεί να ξεπερνά την κρίσιμη πίεση μειωμένη κατά 5 bar, ώστε να έχει νόημα και η μελέτη των transcritical συνθηκών.

Έπειτα, μεταβάλλεται η τιμή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στρόβιλου από τους 80 έως τους 190°C, με βήμα 10 βαθμών. Το ρευστό που μελετάται ενδεικτικά είναι το R152a μέσω REFPROP. Οι μεταβλητές είναι κοινές με την προηγούμενη ανάλυση ευαισθησίας, με τις μαζικές παροχές και των τριών ουσιών να μειώνονται μέχρι μία ελάχιστη τιμή. Η τιμή αυτή ισούται με 18,8 kg/s νερού ψύξης, 1,97 kg/s γεωθερμικού ρευστού και 2,1 kg/s R152a.

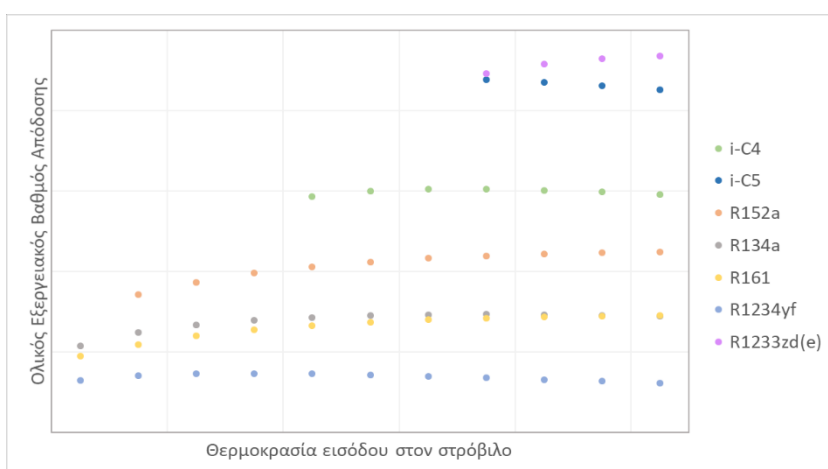


**Σχήμα 5.1.5.** Μείωση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο του στρόβιλου, ενδεικτικά για το R152a μέσω REFPROP.





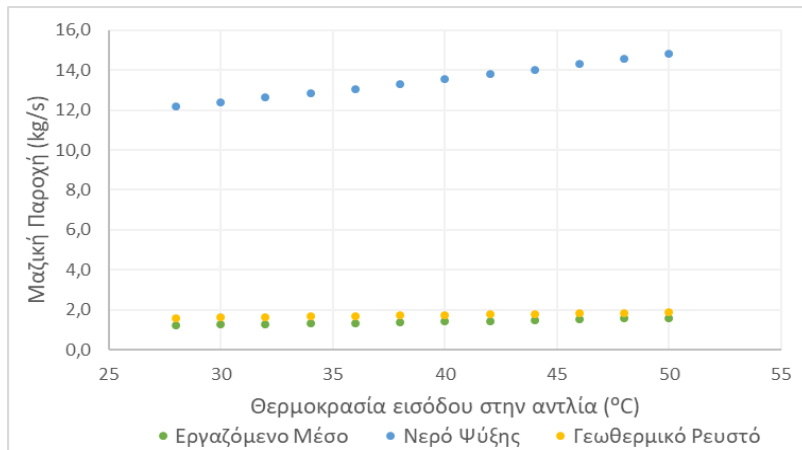
**Σχήμα 5.1.6.** Κοινό διάγραμμα της τάσης του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστήρα μέσω REFPROP.



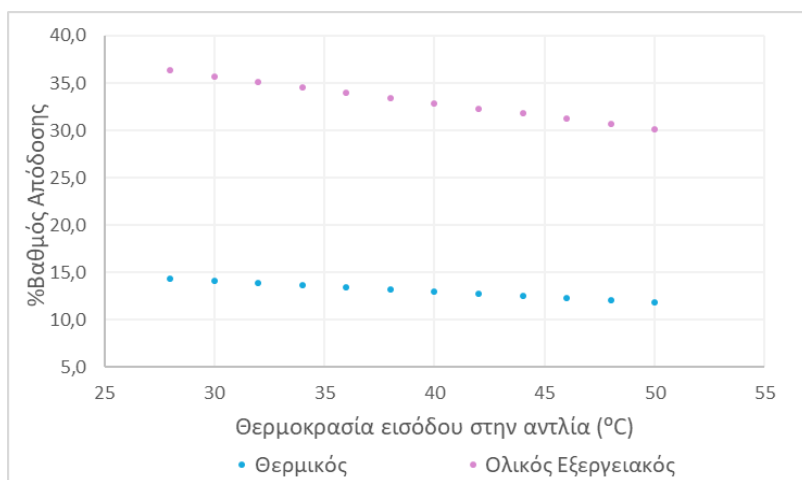
**Σχήμα 5.1.7.** Κοινό διάγραμμα της τάσης του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστήρα μέσω REFPROP.

Στα Σχήματα 5.1.6-5.1.7 περιλαμβάνονται αποκλειστικά συνθήκες για τις οποίες οι οργανικές ουσίες είναι σε ατμώδη και όχι σε υγρή κατάσταση. Τα ρευστά ακολουθούν την ίδια σειρά και στους δύο βαθμούς απόδοσης, ενώ οι μεταβολές των τιμών τους είναι πολύ μικρές και μπορεί είτε να αυξάνονται, όπως στην περίπτωση των HFCs και του R1233zd(e), είτε να μειώνονται, όπως στην περίπτωση του ισοπεντανίου, είτε να εμφανίζουν μία μέγιστη τιμή, όπως τα ισοβουτάνιο και R1234yf. Συνεπώς, εξετάζεται η θερμοκρασία στην είσοδο του στρόβιλου να είναι επαρκώς υψηλή ανά ρευστό, αλλά παράλληλα να ισχύει η επιλεγμένη ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά με το γεωθερμικό νερό.

Μεταβάλλεται και η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στην αντλία. Επιλέγεται το ισοπεντάνιο μέσω του REFPROP για θερμοκρασία κορεσμένου υγρού από τους 28 έως τους 50°C, με βήμα 2 βαθμών. Άμεση συνέπεια της μεταβολής αυτής είναι η αύξηση της πίεσης του συμπυκνωτήρα (χαμηλή πίεση του κύκλου), όπως επιβάλλει η εξίσωση Antoine (Εξίσωση 4.1.1). Όσον αφορά τις μαζικές παροχές των ουσιών, και οι τρεις αυξάνονται με τη αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας, με τη μέγιστη σχετική αύξηση να ισούται με 30% για το εργαζόμενο μέσο. Εξετάζεται και η τάση των τιμών των δύο εκφράσεων της απόδοσης, οι οποίες βγαίνουν μειούμενες με την αύξηση της θερμοκρασίας αυτής, με τη σχετική μείωση να ισούται με περίπου 17% και για τις δύο.



**Σχήμα 5.1.8.** Αύξηση μαζικής παροχής νερού ψύξης, γεωθερμικού ρευστού και εργαζόμενου μέσου με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας, ενδεικτικά για το ισοπεντάνιο μέσω REFPROP.



**Σχήμα 5.1.9.** Μείωση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην είσοδο της αντλίας, ενδεικτικά για το ισοπεντάνιο μέσω REFPROP.

Είναι ξεκάθαρο από τα Σχήματα 5.1.8-5.1.9 ότι η όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία ψύξης του εργαζόμενου μέσου στον συμπυκνωτήρα οδηγεί σε χαμηλότερες μαζικές παροχές και υψηλότερες αποδόσεις. Πρέπει, βέβαια, σε κάθε περίπτωση να ισχύει η επιλεγμένη θερμοκρασιακή διαφορά για τον ορθό σχεδιασμό του εναλλάκτη θερμότητας.

Η μεταβολή των παραπάνω μεταβλητών επηρεάζει και τα φορτία του εξατμιστήρα και του συμπυκνωτήρα, τα οποία ακολουθούν παρόμοια τάση με τις μαζικές παροχές του γεωθερμικού ρευστού και του νερού ψύξης αντίστοιχως. Ενώ η τιμή του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταβάλλεται, η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας παραμένει σταθερή και εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό των κελυφών σε σειρά και των περασμάτων των αυλών. Για το υποκρίσιμο κύκλο, επιλέγονται τέσσερα κελύφη σε σειρά στον εξατμιστήρα και ένα κέλυφος στον συμπυκνωτήρα. Οι επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, όταν υπάρχουν δύο περάσματα στους αυλούς και ένα στο κέλυφος, είναι 241,3 m<sup>2</sup> και 60,3 m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κελυφών ενός εναλλάκτη θερμότητας, τόσο αυξάνεται το πάγιο κόστος της εγκατάστασης, αλλά και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του θερμού και του ψυχρού ρεύματος, χωρίς να αλλάζουν οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευμάτων.

Από τα εξεταζόμενα οργανικά ρευστά, τα υγρά, δηλαδή οι HFCs και η μεθανόλη, απαιτούν υπερθέρμανση στον εξατμιστήρα καθώς, σε αντίθετη περίπτωση, προκύπτουν

σταγονίδια που βλάπτουν τα πτερύγια του στροβίλου. Τα υπόλοιπα ρευστά και ειδικά τα ξηρά, δηλαδή οι τρεις υδρογονάνθρακες, δεν απαιτούν υπερθέρμανση, καθώς ο κορεσμένος ατμός που εισάγεται στον στρόβιλο εξέρχεται από αυτόν σε υπέρθερμη κατάσταση. Παρόλα αυτά, γίνεται διερεύνηση και για τα ξηρά και τα ισεντροπικά ρευστά, σχετικά με το αν η μέγιστη θερμοδυναμική απόδοση επέρχεται με την κορεσμένη κατάσταση ή την υπέρθερμη στην έξοδο του εξατμιστήρα. Ο βαθμός υπερθέρμανσης υπολογίζεται ως:

$$\text{Βαθμός υπερθέρμανσης} = T_3 - T_{sat}^{P_3} [=] K \text{ ή } ^\circ C \text{ (Εξ. 5.1.1)}$$

Για το ισοβουτάνιο, επιλέγεται στον εξατμιστήρα η μέγιστη πίεση των 3150 kPa. Με δοκιμές προκύπτει ότι η θερμοκρασία των 160°C στην είσοδο του στροβίλου μεγιστοποιεί τη θερμική απόδοση, ενώ η θερμοκρασία κορεσμού, ίση με 126°C, μεγιστοποιεί την εξεργειακή, η οποία, ωστόσο, είναι πολύ ικανοποιητική και με την υψηλότερη θερμοκρασία. Συνεπώς, επιλέγεται υπερθέρμανση κατά περίπου 35°C. Για το ισοπεντάνιο, η μέγιστη πίεση των 28,8 bar μειώνει σημαντικά την εξεργειακή απόδοση του κύκλου, αφού δεν επιτρέπει τη ψύξη του νερού γεωθερμίας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επομένως, επιλέγεται μία χαμηλότερη πίεση στα 2150 kPa, που ναι μεν αναμένεται να μειώσει ελαφρώς την ενεργειακή απόδοση, όμως αυξάνει σημαντικά την εξεργειακή. Με δοκιμές προκύπτει ευνοϊκή η κατάσταση κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας 158,5°C και επιλέγεται υπερθέρμανση δύο βαθμών για προστασία της τουρμπίνας.

Στην περίπτωση του τολουολίου, προκειμένου να αποφευχθούν υποατμοσφαιρικές πιέσεις στον συμπυκνωτήρα, αυξάνεται σημαντικά η θερμοκρασία εισόδου στην αντλία. Η θερμοκρασία κορεσμού για πίεση ίση με 101,3 kPa ισούται με 110,5°C. Αν, λοιπόν, το νερό ψύξης κινείται στο δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος (20-31°C), η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτήρα ξεπερνά τους 80°C και ο σχεδιασμός του κρίνεται αντικοινομικός και ασύμφορος. Αν χρησιμοποιηθεί νερό σε υψηλότερη θερμοκρασία για να μειωθεί αυτή η διαφορά, απαιτείται η κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανσή του μετά τον πύργο ψύξης. Αν χρησιμοποιηθεί εναλλακτικό ψυκτικό μέσο, δεν αλλάζει η απόδοση του κύκλου, όμως μειώνεται σημαντικά η μαζική παροχή του ψυκτικού και το φορτίο του συμπυκνωτήρα και αυξάνεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυτής της συσκευής, μιας και πλέον η έξοδος της είναι σε θερμοκρασία αρκετά υψηλότερη από την περιβαλλοντική. Όσον αφορά την υψηλή πίεση του κύκλου, αυτή επιλέγεται ίση με μόλις 213 kPa, στην οποία η θερμοκρασία κορεσμού του τολουολίου ισούται με 139°C και χρησιμοποιείται υπερθέρμανση ενός βαθμού. Για το συγκεκριμένο εργαζόμενο μέσο, εξετάζεται, επίσης, υποατμοσφαιρική πίεση στον συμπυκνωτήρα ίση με μόλις 5,8 kPa, που ναι μεν ικανοποιεί την επιλεγμένη ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά, αυξάνει δε το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Ο ατμός εξέρχεται και πάλι από τον εξατμιστήρα σχεδόν κορεσμένος ή ελαφρώς υπέρθερμος.

Η πίεση στον εξατμιστήρα όταν χρησιμοποιείται το R152a επιλέγεται στα 33 bar, δηλαδή χαμηλότερη από τη μέγιστη των 40 bar. Ο βαθμός υπερθέρμανσης επιλέγεται ίσος με 60°C, με τη θερμοκρασία κορεσμού να είναι 97 °C. Ακόμα μικρότερη ορίζεται η πίεση για το R134a, και συγκεκριμένα στα 3100 kPa, δηλαδή 400 kPa χαμηλότερα από τη μέγιστη, και επιλέγεται αντίστοιχος βαθμός υπερθέρμανσης από τη θερμοκρασία κορεσμού των 88°C. Στην περίπτωση του R161 επιλέγεται η μέγιστη πίεση των 36,2 bar και υπερθέρμανση του ρευστού στον εξατμιστήρα κατά 80 βαθμούς, με τη θερμοκρασία στην έξοδό του να ισούται με 165°C. Για το R1234yf, και πάλι η πίεση είναι χαμηλότερη από την μέγιστη δυνατή, και συγκεκριμένα επιλέγεται στα 2535 kPa. Η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου λαμβάνεται ίση με 127 °C. Κατά την διερεύνηση των κορεσμένων συνθηκών, επιλέγεται η ίδια πίεση, για την οποία η

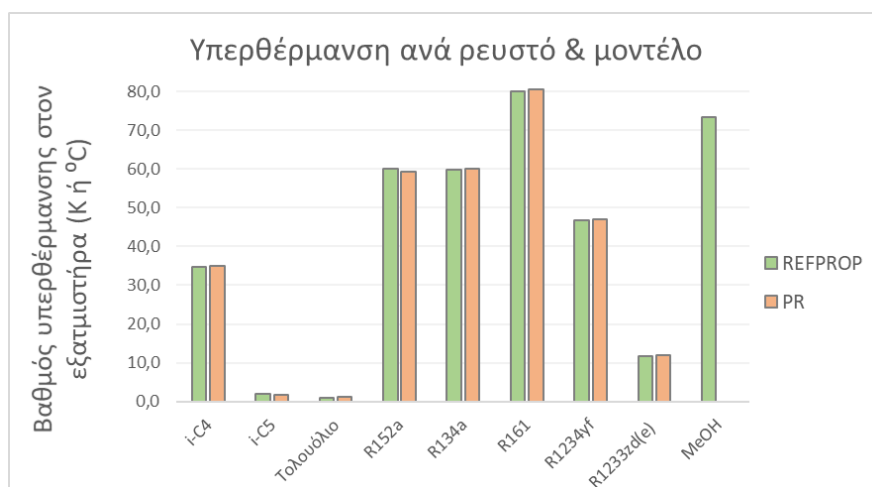
θερμοκρασία κορεσμού ισούται με 80,4°C. Αντίστοιχα με το ισοβουτάνιο, η θερμική απόδοση προκύπτει ελαφρώς μειωμένη, το ίδιο όμως ισχύει και για την εξεργειακή, υποδεικνύοντας την απαίτηση μίας πηγής θερμότητας σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Συνεπώς, διατηρείται ο βαθμός υπερθέρμανσης των 47 βαθμών. Όσον αφορά το R1233zd(e), επιλέγεται η μέγιστη δυνατή πίεση στα 3150 kPa και ελαφρώς υπέρθερμος ατμός, με το βαθμό υπερθέρμανσης να μην ξεπερνά τους 12 βαθμούς.

Η κρίσιμη πίεση της μεθανόλης ισούται με 81 bar, συνεπώς η μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο υποκρίσιμο κύκλο δεν μπορεί να ξεπερνά τα 76 bar. Η θερμοκρασία κορεσμού για αυτή την πίεση ισούται με 235,5°C, δηλαδή είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία της πηγής. Η μέγιστη θερμοκρασία στο κύκλο δεν μπορεί να ξεπερνά τους 190°C, τιμή που αντιστοιχεί σε τάση ατμών περίπου ίση με 34 bar. Ωστόσο, δεν μπορεί να επιλεγεί μία τόσο υψηλή πίεση και παράλληλα να ισχύει η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστήρα, οπότε επιλέγεται μία πίεση μόλις στα 600 kPa, με υπερθέρμανση ίση με περίπου 73°C. Αντίστοιχα με το τολουόλιο, σημαντική είναι και η αποφυγή υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα. Η θερμοκρασία κορεσμού για ατμοσφαιρική πίεση είναι 64,5°C, ενώ η τάση ατμών για να ισχύει η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτήρα είναι ίση με 27,4 kPa.

Πίνακας 5.1.1. Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό.

	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	P <sub>3</sub> (kPa)	T <sub>geoth2</sub> (°C)
<b>i-C4</b>	32	161	3150	59
<b>i-C5</b>	32,5	160,5	2150	105
<b>Τολουόλιο*</b>	110,6/33,5	140/140	213/213	139/116
<b>R152a</b>	32,5	157	3300	57
<b>R134a</b>	32	147,5	3100	49,5
<b>R161</b>	32	165	3620	62
<b>R1234yf</b>	32	127	2535	41,5
<b>R1233zd(e)</b>	33	170	3150	97
<b>MeOH*</b>	64,5/34,5	191/191	600/600	115/110

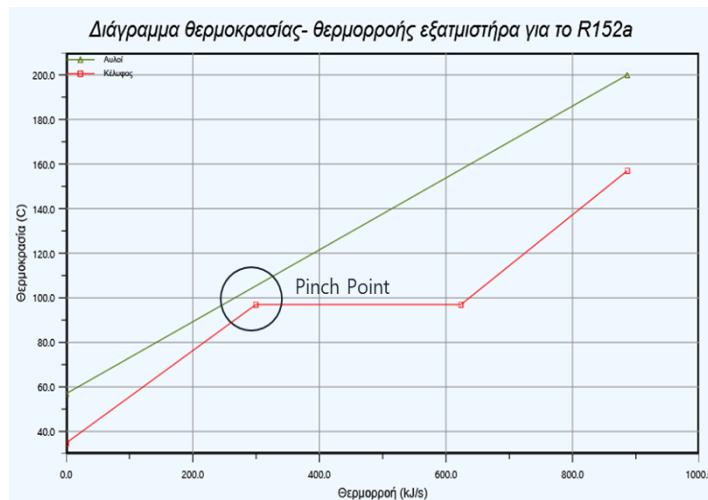
\*Εξέταση υποατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα.



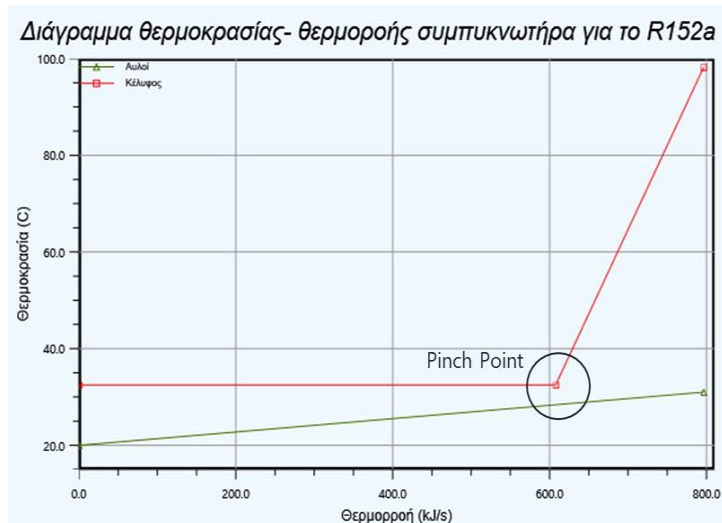
Σχήμα 5.1.10. Βαθμός υπερθέρμανσης των οργανικών ρευστών από τις κορεσμένες συνθήκες στον εξατμιστήρα, ανάλογα με την κλίση της καμπύλης κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα T-s.

Η διόρθωση του όγκου δεν επιδρά στην πρόβλεψη της τάσης ατμών, συνεπώς ο βαθμός υπερθέρμανσης για την απλή και τη διορθωμένη Peng-Robinson είναι κοινός. Οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων έχουν να κάνουν με την πρόβλεψη της χαμηλής πίεσης του κύκλου, δηλαδή της τάσης ατμών στη θερμοκρασία εισόδου στην αντλία, καθώς η υψηλή πίεση αποτελεί μεταβλητή εισόδου (Πίνακας 5.1.1).

Δημιουργούνται διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμορροής στους δύο εναλλάκτες θερμότητας.

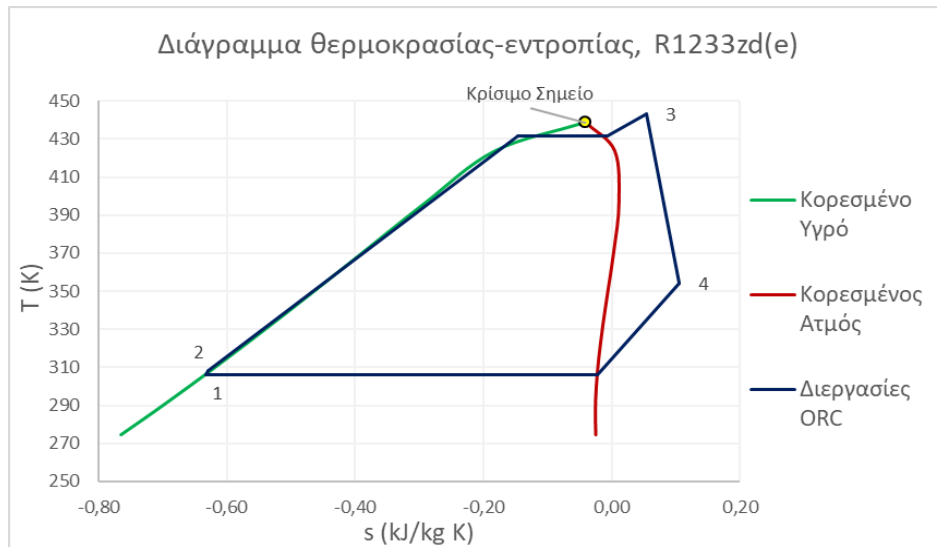


**Σχήμα 5.1.11.** Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με  $\Delta T_{pinch}=8,1^{\circ}\text{C}$  για το R152a μέσω REFPROP.

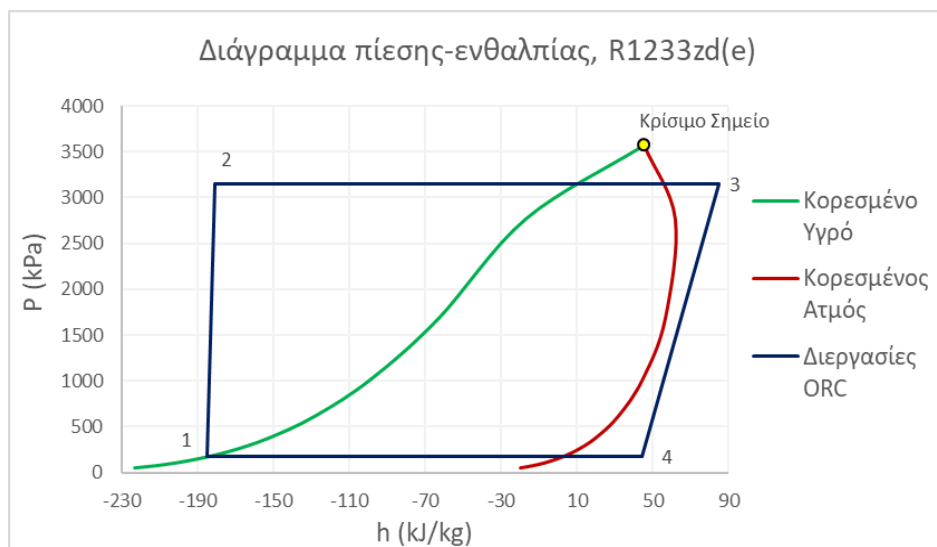


**Σχήμα 5.1.12.** Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με  $\Delta T_{pinch}=4,1^{\circ}\text{C}$  για το R152a μέσω REFPROP.

Η κυκλική διεργασία αποτυπώνεται και σε διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας και πίεσης-ενθαλπίας. Τα διαγράμματα είναι πανομοιότυπα για όλα τα ρευστά. Ενδεικτικά, παρατίθενται για το R1233zd(e), όταν ως θερμοδυναμικό μοντέλο επιλέγεται το REFPROP.



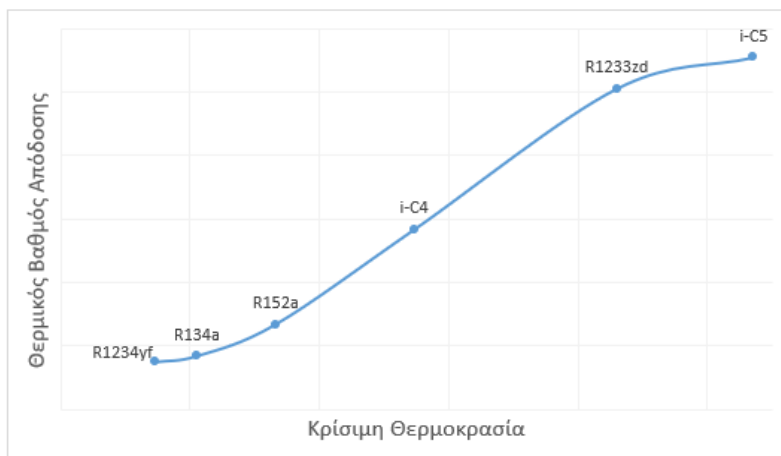
**Σχήμα 5.1.13.** Αποτύπωση διεργασιών υποκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.



**Σχήμα 5.1.14.** Αποτύπωση διεργασιών υποκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.

Τέλος, χρησιμοποιώντας κοινές συνθήκες για όλα τα ρευστά, και συγκεκριμένα σταθερή θερμοκρασία εισόδου στην αντλία και κοινή πίεση και θερμοκρασία στον εξατμιστήρα, επιβεβαιώνεται ότι, όσο αυξάνεται η κρίσιμη θερμοκρασία των οργανικών ουσιών, τόσο αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου. Το διάγραμμα αυτό είναι ποιοτικό, μιας και οι κοινές συνθήκες δεν είναι σε καμία περίπτωση οι βέλτιστες και επιπλέον, δεν είναι εφικτή η μελέτη όλων των ρευστών στο ίδιο εύρος συνθηκών, δεδομένων των διαφορετικών ιδιοτήτων και της φύσης κάθε ουσίας. Για το λόγο αυτό, από το Σχήμα 5.1.15 παραλείπεται το τολουόλιο και το R161.



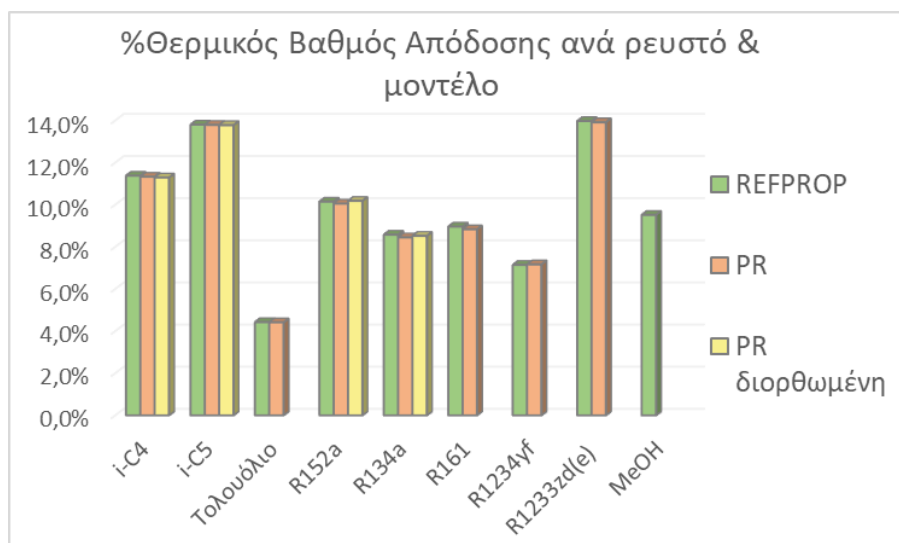


Σχήμα 5.1.15. Θερμικός βαθμός απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC συναρτήσει της κρίσιμης θερμοκρασίας των επιλεγμένων εργαζόμενων μέσων για κοινές λειτουργικές συνθήκες.

## 5.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Απλού Κύκλου

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του απλού οργανικού κύκλου Rankine παρουσιάζονται σε πίνακες και διαγράμματα.

### ο Απόδοση

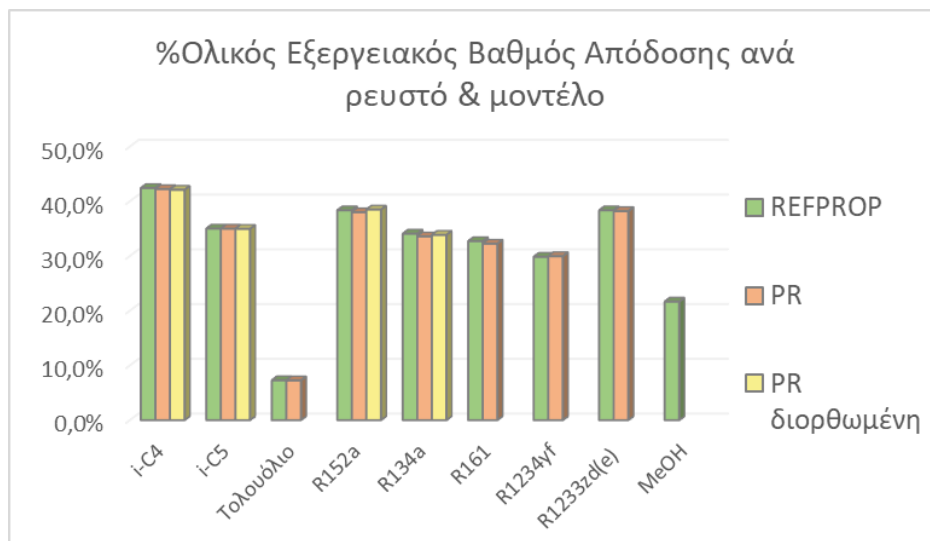


Σχήμα 5.2.1. Θερμικός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Με μια πρώτη ματιά στο Σχήμα 5.2.1, είναι προφανές ότι οι διαφορές των θερμοδυναμικών μοντέλων είναι αμελητέες και μπορεί να εξαχθεί ένα κοινό συμπέρασμα για την σειρά των ρευστών. Με εξαίρεση το R1234yf, το REFPROP προβλέπει ελαφρώς υψηλότερες τιμές θερμικής απόδοσης σε σχέση με την Peng-Robinson, με την απόλυτη διαφορά να μεγιστοποιείται για τα R134a και R161 και να ισούται με 0,13%. Ανάμεσα στην απλή PR και τη διορθωμένη, η πρώτη προβλέπει μεγαλύτερες αποδόσεις για τους δύο υδρογονάνθρακες και μικρότερες για τους δύο HFCs, για τους οποίους τα αποτελέσματα της

διορθωμένης ΚΕ είναι πιο κοντινά στο REFPROP από ότι στην απλή PR.

Ανάμεσα στα ρευστά, τη μέγιστη θερμική απόδοση επιφέρει η χρήση του R1233zd(e) με 13,9% και ακολουθεί το ισοπεντάνιο με 13,8%. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης με το ισοβουτάνιο αγγίζει το 11,3% και με το R152a το 10,1%. Οι τιμές αυτές, στο εύρος 10-15%, αποτελούν και το αναμενόμενο εύρος αποδόσεων ενός οργανικού κύκλου Rankine. Παρά την σχετικά υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία της, η επιλογή της μεθανόλης οδηγεί σε θερμική απόδοση ίση με 9,5%. Στην περίπτωση δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτήρα, η τιμή αυτή αυξάνεται στο 14,2%, είναι δηλαδή η υψηλότερη ανάμεσα σε όλα τα ρευστά. Το R161 επιφέρει απόδοση ίση με 8,9% και το R134a με 8,5%. Τα αποτελέσματα με το R1234yf δεν είναι πολύ ενθαρρυντικά, με την τιμή να αγγίζει μόλις το 7,2%. Τέλος, το τολουόλιο, με χρήση τουλάχιστον ατμοσφαιρικής πίεσης, κρίνεται ακατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή, με την απόδοση να προκύπτει μικρότερη από 5%. Ωστόσο, με τη δημιουργία κενού στον συμπυκνωτήρα, η τιμή αυτή ανυψώνεται στο 14,9%, ξεπερνώντας ακόμη και τη μεθανόλη. Απαιτείται, βέβαια, αντιστάθμιση του κόστους δημιουργίας και διατήρησης του κενού αυτού, καθώς και της επιπλέον δυσκολίας ελέγχου του συστήματος.

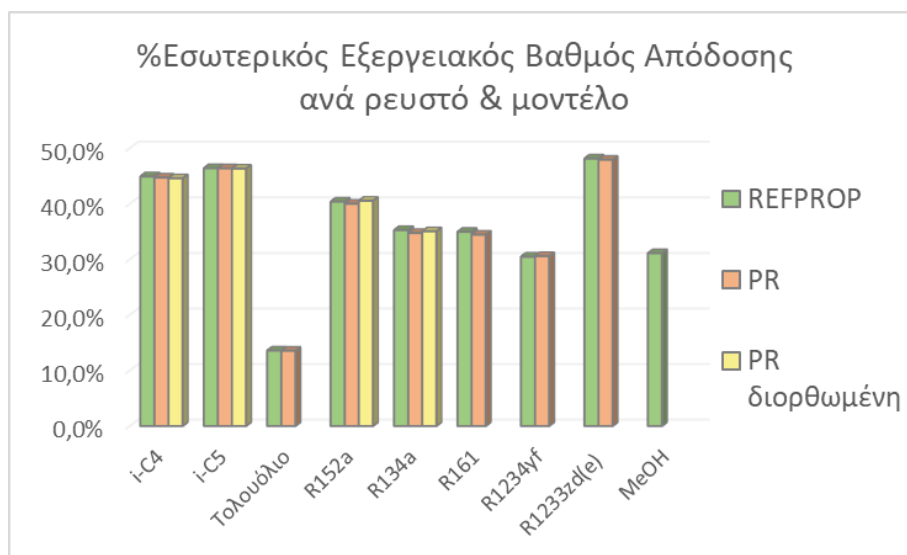


**Σχήμα 5.2.2.** Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Στην περίπτωση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, οι απόλυτες αποκλίσεις ανάμεσα στα μοντέλα είναι μεγαλύτερες και αγγίζουν το 0,5% για το R134a, μεταξύ REFPROP και απλής ΚΕ, και για το R152a, μεταξύ των δύο εκφράσεων της ΚΕ. Αντίστοιχα με το θερμικό βαθμό απόδοσης, το REFPROP προβλέπει ελαφρώς υψηλότερες τιμές για όλα τα ρευστά, εκτός από το R1234yf, ενώ η διορθωμένη PR οδηγεί σε χαμηλότερες αποδόσεις για τους υδρογονάνθρακες και υψηλότερες για τους HFCs σε σχέση με την απλή. Η ταξινόμηση των ρευστών κατ' αύξουσα σειρά εξεργειακής απόδοσης είναι κοινή μεταξύ των μοντέλων.

Ανάμεσα στα ρευστά, η σειρά είναι διαφορετική σε σύγκριση με το θερμικό βαθμό απόδοσης. Καλύτερο εξεργειακά αποδεικνύεται το ισοβουτάνιο, με την απόδοση να ξεπερνά το 42%. Ακολουθεί το R1233zd(e) και πολύ κοντά το R152a με τιμές περί του 38%. Το ισοπεντάνιο επιφέρει ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης στο 35% και το R134a στο 33,8%. Το R161 οδηγεί σε απόδοση περίπου στο 32,5% και το R1234yf και πάλι δεν επιφέρει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, με την απόδοση σε αυτήν την περίπτωση να μην ξεπερνά το 30%. Όσον αφορά τη μεθανόλη και το τολουόλιο, ο περιορισμός της πίεσης σε τουλάχιστον

ατμοσφαιρικό επίπεδο μειώνει σημαντικά την εξεργειακή απόδοση, ειδικά στην περίπτωση του τολουόλιου. Ωστόσο, η δημιουργία κενού οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες αποδόσεις, 34,3% για τη μεθανόλη και 33,6% για το τολουόλιο, τιμές κοντινές στο μέσο όρο των υπόλοιπων ρευστών, που ισούται με 35,7%.



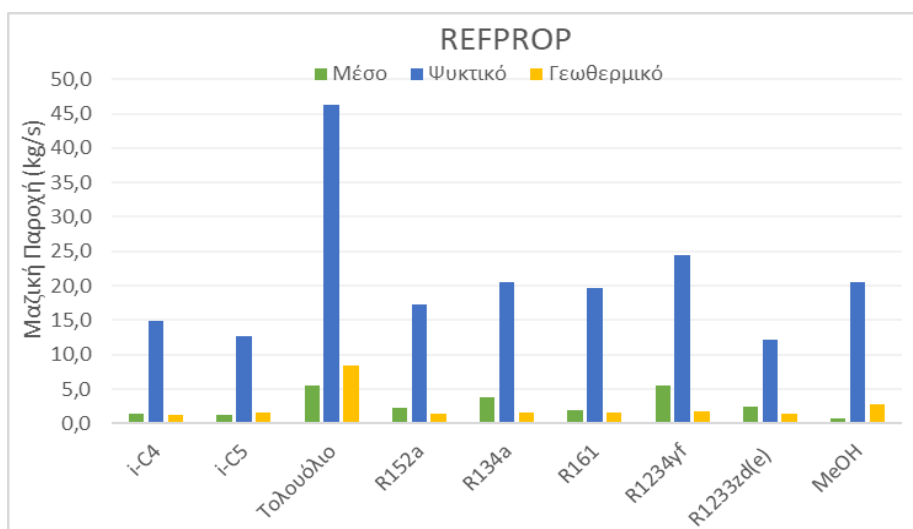
Σχήμα 5.2.3. Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Ανάμεσα στα θερμοδυναμικά μοντέλα ισχύουν τα ίδια με τις προηγούμενες εκφράσεις της απόδοσης, δηλαδή το REFPROP προβλέπει γενικά υψηλότερες τιμές από την ΚΕ, με εξαίρεση το R1234yf, και επιπλέον, η εισαγωγή της διόρθωσης του όγκου αυξάνει τις τιμές των προβλέψεων για τα R152a και R134a και τις μειώνει για τα αλκάνια. Επιπροσθέτως, οι μέγιστες απόλυτες αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων σημειώνονται στους HFCs και κυμαίνονται περί του 0,5%. Γενικά, τα θερμοδυναμικά μοντέλα προβλέπουν τις ίδιες τάσεις, δηλαδή υποδεικνύουν τα ίδια ρευστά για μέγιστη ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση.

Η σειρά των ρευστών ως προς τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης είναι πανομοιότυπη με αυτή του θερμικού. Μέγιστη τιμή σημειώνεται με τη χρήση του R1233zd(e) και ισούται με περίπου 48%. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο με 46,4%, που προηγείται του ισοβουτανίου με 44,7%. Ικανοποιητική είναι και η απόδοση που επιφέρει η χρήση του R152a, η οποία ισούται με 40,3%. Η διαφορά από το θερμικό βαθμό απόδοσης είναι ότι προηγείται το R134a του R161, με 35% και 34,7% αντιστοίχως. Η μεθανόλη, παρά τη μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτήρα, οδηγεί σε απόδοση 31,1%, η οποία φτάνει στο 47,2% με δημιουργία κενού στον εναλλάκτη. Το R1234yf έχει απόδοση μόλις ίση με 30,5% και τέλος, το τολουόλιο από το 13,6% αγγίζει το 48,7%, δηλαδή ξεπερνά και το R1233zd(e), όταν η πίεση του συμπυκνωτήρα είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής.

Η σειρά που προβλέπεται ως προς τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης δεν ταυτίζεται με αυτή του ολικού, κάτι που οφείλεται στο ότι η θερμοκρασία εξόδου του γεωθερμικού ρευστού από τον εξατμιστήρα μεταβάλλεται από ρευστό σε ρευστό, για καλύτερο συνδυασμό με την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου. Από όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της θερμικής και της ολικής εξεργειακής απόδοσης δεν συνεπάγεται ότι καθεμία έκφραση έχει και την μέγιστη τιμή που θα είχε ανεξάρτητα από την άλλη.

ο Μαζικές Παροχές

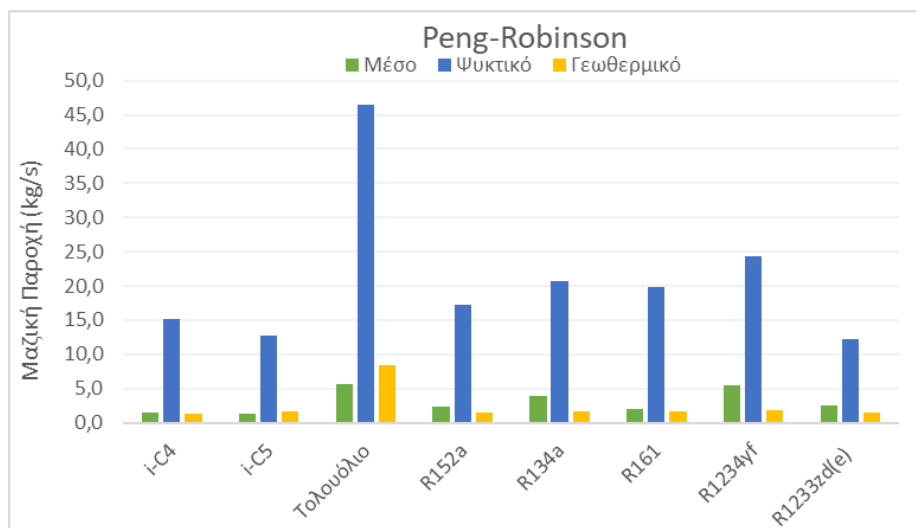


**Σχήμα 5.2.4.** Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού ανά ρευστό στο υποκρίσιμο απλό ORC μέσω REFPROP.

Για όλα τα ρευστά η μαζική παροχή του νερού ψύξης είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με του εργαζόμενου μέσου και του γεωθερμικού ρευστού. Το γεγονός αυτό προκύπτει και από την Εξίσωση 3.1.2, λόγω της μικρής θερμοκρασιακής διαφοράς (διαφορά δυναμικού για δεδομένο φορτίο) στον πύργο ψύξης. Γίνεται αντιληπτό ότι με το τολουόλιο, η μαζική παροχή του νερού ψύξης είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα εργαζόμενα μέσα, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω της υψηλής θερμοκρασιακής διαφοράς στον συμπυκνωτήρα. Με τη δημιουργία κενού, η τιμή αυτή μειώνεται στα 12,3 kg/s. Αντίστοιχα, η απαίτηση νερού ψύξης, όταν η μεθανόλη είναι το εργαζόμενο μέσο και η πίεση υποατμοσφαιρική, μειώνεται από τα 20,5 στα 13 kg/s. Ανάμεσα στα υπόλοιπα ρευστά, η σειρά της μαζικής παροχής του ψυκτικού μέσου είναι εντελώς αντίστοιχη με του θερμικού βαθμού απόδοσης, δηλαδή η ελάχιστη σημειώνεται με το R1233zd(e) και η μέγιστη με το R1234yf. Το ψυκτικό μέσο αντανakλά ένα σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.

Γενικά, δεν παρατηρείται ξεκάθαρη συσχέτιση της μαζικής παροχής των οργανικών ρευστών με το θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου, αν και, σε γενικές γραμμές, χαμηλές παροχές σημειώνονται στα ρευστά με τους υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Μεταξύ των εργαζόμενων μέσων, μέγιστη μαζική παροχή έχει το τολουόλιο. Ακολουθεί το R1234yf και το R134a. Τα υπόλοιπα ρευστά έχουν παροχές μικρότερες από 2,5 kg/s. Την ελάχιστη παροχή την έχουν η μεθανόλη και το ισοπεντάνιο. Η παροχή του τολουολίου μειώνεται στα 1,22 kg/s και της μεθανόλης μόλις στα 0,5 kg/s με τη δημιουργία κενού στον συμπυκνωτήρα. Γενικά, οι υψηλές μαζικές παροχές του εργαζόμενου μέσου αυξάνουν το μέγεθος όλων των συσκευών του κύκλου και άρα το συνολικό πάγιο κόστος της εγκατάστασης.

Τα μοναδικά ρευστά στα οποία η μαζική παροχή του γεωθερμικού νερού είναι χαμηλότερη από του ίδιου του μέσου είναι το ισοπεντάνιο και το τολουόλιο. Για τα υπόλοιπα ρευστά απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητά τους ανά μονάδα της θερμικής πηγής. Στο τολουόλιο παρατηρείται η μέγιστη παροχή του νερού γεωθερμίας, η οποία μειώνεται στα 1,83 kg/s με τη χρήση υποατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα. Ακολουθούν η μεθανόλη και το R1234yf. Αντίστοιχα με το τολουόλιο, στην περίπτωση της μεθανόλης, η απαίτηση μειώνεται στα 1,79 kg/s. Η υψηλή παροχή του ρευστού γεωθερμίας υποδεικνύει ότι ενδεχομένως να μην είναι τόσο αποδοτικός ο θερμοκρασιακός συνδυασμός του με το εργαζόμενο μέσο.



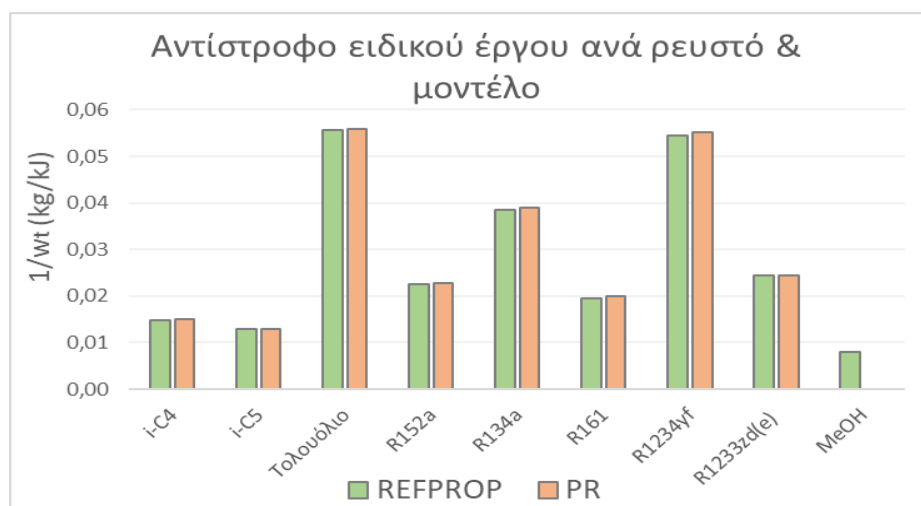
Σχήμα 5.2.5. Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού ανά ρευστό στο υποκρίσιμο απλό ORC μέσω Peng-Robinson.

Η εισαγωγή της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου δεν επηρεάζει τις προβλέψεις των μαζικών παροχών, μόνο των ογκομετρικών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, το REFPROP προβλέπει ελαφρώς χαμηλότερες τιμές παροχών και για τις τρεις ουσίες. Οι απόλυτες αποκλίσεις είναι υψηλότερες για το νερό ψύξης, ωστόσο δεν ξεπερνούν τα 222 g/s.

Υπολογίζεται ως επιπλέον δείκτης ο παρακάτω:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{W}_t} [=] \frac{kg}{kJ} \text{ ή } \frac{kg}{s \cdot kW}$$

Όσο μικρότερη προκύπτει η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη, τόσο λιγότερη μάζα ρευστού απαιτείται ανά kW ισχύος που παράγεται στον στρόβιλο στην μονάδα του χρόνου. Εφόσον η ποσότητα του παραγόμενου έργου είναι κοινή για όλα τα ρευστά, το ύψος του συγκεκριμένου δείκτη αντικατοπτρίζει το ύψος της μαζικής παροχής του εκάστοτε ρευστού.



Σχήμα 5.2.6. Δείκτης αντίστροφου ειδικού έργου ανά ρευστό και θερμοδυναμικό μοντέλο στο υποκρίσιμο απλό ORC.

Μόλις 0,008 kg/s ή 8 g/s μεθανόλης απαιτούνται για την παραγωγή ενός kW ισχύος από τον στρόβιλο. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο με σχεδόν διπλάσια τιμή από την μεθανόλη, αφού

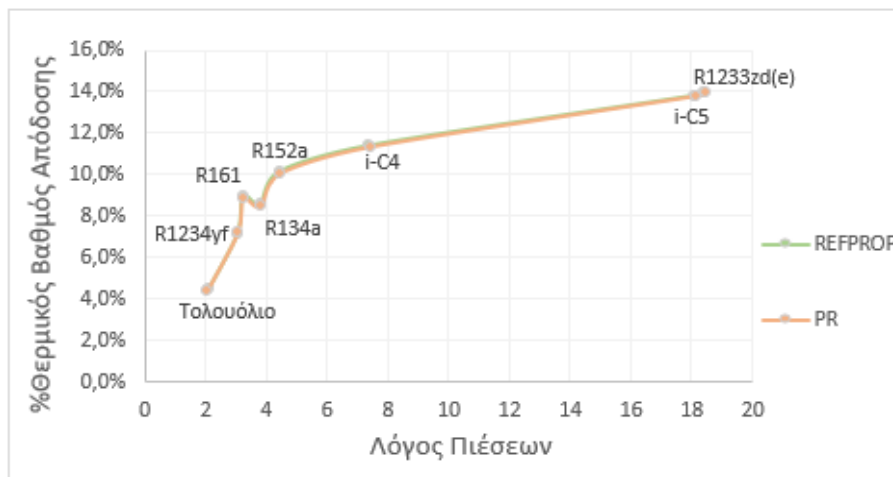
απαιτούνται 12,8g/s ισοπεντανίου ανά kW. Το R1233zd(e) απαιτεί διπλάσια ποσότητα από τον υδρογονάνθρακα για την ίδια παραγωγή έργου. Μέγιστη τιμή στον υπό εξέταση δείκτη εμφανίζει η χρήση του R1234yf και του τολουολίου.

ο Λόγος Πιέσεων

Ο λόγος πιέσεων στο κύκλο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Λόγος πιέσεων} = \frac{P_{\text{evap}}}{P_{\text{cond}}} \quad (\text{Εξ. 5.2.1})$$

Η διαφορά μεταξύ των μοντέλων οφείλεται στις προβλέψεις της χαμηλής πίεσης του κύκλου. Η PR προβλέπει ελαφρώς υψηλότερους λόγους πιέσεων στα περισσότερα ρευστά, με εξαίρεση το τολουόλιο, όμως οι απόλυτες αποκλίσεις είναι μικρότερες από 0,1. Ο λόγος πιέσεων ακολουθεί πανομοιότυπη τάση με το θερμικό βαθμό απόδοσης, με εξαίρεση ότι είναι μικρότερος για το R161 σε σχέση με το R134a. Αυτό αποτυπώνεται και στο Σχήμα 5.2.7, όπου, με εξαίρεση την εμφάνιση μίας μικρής αλλαγής κλίσης, η συνάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης και του λόγου πιέσεων είναι αύξουσα.



Σχήμα 5.2.7. Συνάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC και του λόγου πιέσεων στο κύκλο για όλα τα ρευστά ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

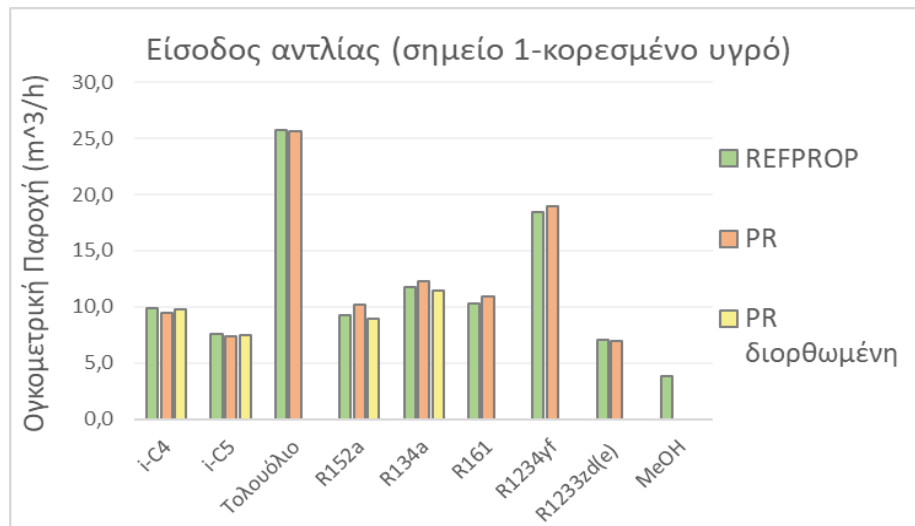
ο Ογκομετρικές Παροχές

Μελετώνται κυρίως οι ογκομετρικές παροχές της υγρής φάσης στην είσοδο (Σχήμα 5.2.8) και στην έξοδο (Σχήμα 5.2.9) της αντλίας. Στους δύο υδρογονάνθρακες οι τιμές της διόρθωσης του όγκου είναι αρνητικές, για αυτό οι ογκομετρικές παροχές προβλέπονται υψηλότερες με τη διόρθωση, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.2.5, ενώ στους δύο HFCs το αντίθετο. Σε κάθε περίπτωση, η διορθωμένη Peng-Robinson προβλέπει τιμές πιο κοντινές στις προβλέψεις του REFPROP, κάτι που επιβεβαιώνει την ορθότητα των τιμών της διόρθωσης. Στα δύο ρευστά όπου δεν μπορεί να εισαχθεί αρνητική τιμή της διόρθωσης λόγω περιορισμών του λογισμικού (Σχήμα 3.6.1), δηλαδή στο R161 και στο R1234yf, η απλή Peng-Robinson προβλέπει υψηλότερες παροχές από το REFPROP.

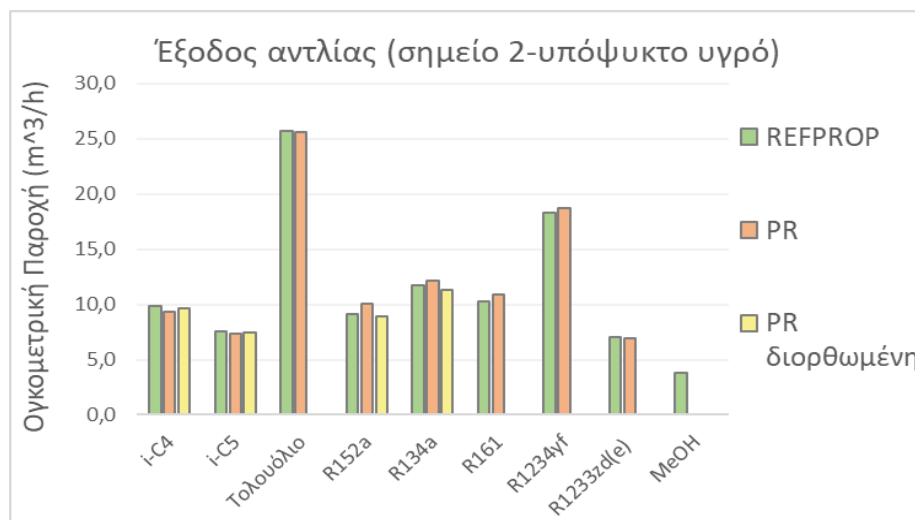
Σε συνάρτηση με την ελάχιστη μαζική της παροχή, ελάχιστη ογκομετρική ροή ανάμεσα στα εργαζόμενα μέσα έχει η μεθανόλη. Ακολουθούν το R1233zd(e) και το ισοπεντάνιο, έπειτα το R152a και το ισοβουτάνιο. Μέγιστη ογκομετρική παροχή έχει το R1234yf και το τολουόλιο.

Με δημιουργία κενού στον συμπυκνωτήρα η παροχή της μεθανόλης υποδιπλασιάζεται και του τολουολίου γίνεται μικρότερη από του R1233zd(e).

Από την είσοδο στην έξοδο της αντλίας, οι ογκομετρικές παροχές μεταβάλλονται ελάχιστα, μιας και οι ιδιότητες του υπόψυκτου υγρού ουσιαστικά προσεγγίζουν αυτές του κορεσμένου και οι τιμές τους δεν αποτελούν ισχυρή συνάρτηση της πίεσης. Ισχύουν τα ίδια με την είσοδο της αντλίας για τα 4 ρευστά για τα οποία διορθώνεται ο όγκος της υγρής φάσης.



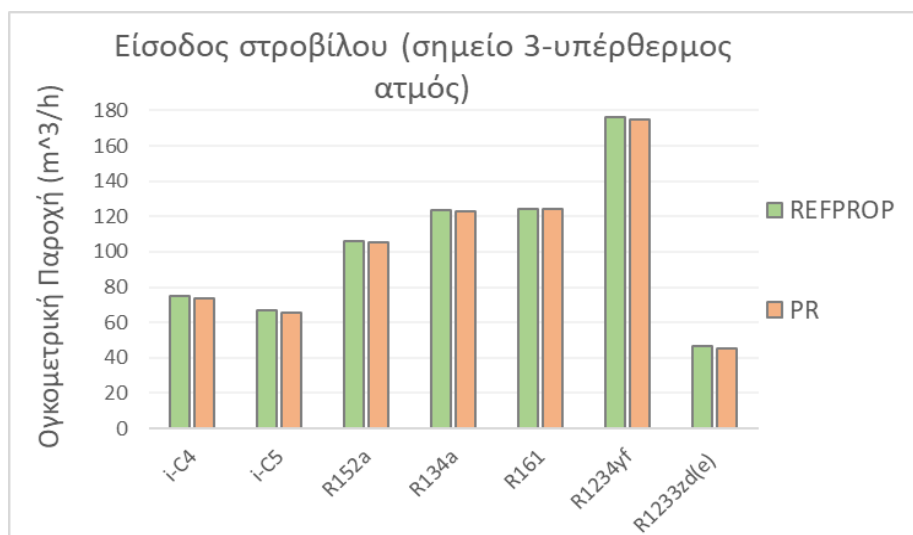
Σχήμα 5.2.8. Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο της αντλίας του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.



Σχήμα 5.2.9. Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της αντλίας του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Στην περίπτωση του τολουολίου και της μεθανόλης στην είσοδο του στροβίλου, όπου είναι σε υπέρθερμη κατάσταση, η ογκομετρική παροχή είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από των υπόλοιπων ρευστών, για αυτό παραλείπονται από το Σχήμα 5.2.10. Το γεγονός αυτό επιφέρει μεγαλύτερες πτώσεις πίεσης και υψηλότερο πάγιο κόστος λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των διατάξεων. Επιπλέον, παραλείπεται η διόρθωση της KE, μιας και, λόγω της μεγαλύτερης τάξης μεγέθους των ογκομετρικών παροχών της ατμώδους σε σχέση με την υγρή φάση, τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ταυτόσημα με της απλή PR.





Σχήμα 5.2.10. Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

ο Εξεργειακή Ανάλυση

Σε κάθε συσκευή του κύκλου λαμβάνει χώρα καταστροφή εξέργειας. Τα ποσά αυτής της καταστροφής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.1. Γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων είναι αρκετά κοντινά. Οι διαφορές ανάμεσα στην απλή και τη διορθωμένη ΚΕ αφορούν μόνο την αντλία και τον εξατμιστήρα, όπου το εργαζόμενο μέσο είναι σε υγρή κατάσταση. Στις υπόλοιπες συσκευές οι τιμές ταυτίζονται. Τα θερμοδυναμικά μοντέλα ταξινομούν τα ρευστά με την ίδια αύξουσα σειρά ολικής καταστροφής εξέργειας.

Πίνακας 5.2.1. Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

		Καταστροφή Εξέργειας (kW)								
		i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
<b>R E F P R O P</b>	Αντλία	3,9	2,3	0,3	3,4	3,9	3,8	6,4	3,1	0,3
	Εξατμ.	32,6	42,7	118,0	57,3	74,4	77,6	57,2	36,0	71,0
	Στροβ.	34,5	35,6	32,2	35,1	34,4	33,5	40,8	37,1	35,0
	Συμπ.	36,4	26,4	480,8	35,6	48,3	49,3	33,5	20,9	112,1
	<b>Ολική</b>	<b>107,4</b>	<b>107,0</b>	<b>631,3</b>	<b>131,5</b>	<b>161,0</b>	<b>164,1</b>	<b>137,8</b>	<b>97,1</b>	<b>218,3</b>
<b>PR</b>	Αντλία	3,8	2,2	0,3	3,8	4,1	4,0	6,6	3,0	-
	Εξατμ.	34,4	42,6	118,4	58,6	77,7	81,3	58,4	36,6	-
	Στροβ.	34,5	35,5	32,2	35,2	34,4	33,6	41,0	36,9	-
	Συμπ.	36,2	27,1	475,6	34,4	47,5	47,7	33,4	21,5	-
	<b>Ολική</b>	<b>108,9</b>	<b>107,4</b>	<b>626,5</b>	<b>132,0</b>	<b>163,8</b>	<b>166,6</b>	<b>139,3</b>	<b>98,1</b>	-
<b>PR διορθ.</b>	Αντλία	4,1	2,3	-	2,6	3,3	-	-	-	-
	Εξατμ.	34,3	42,6	-	58,8	77,9	-	-	-	-
	Στροβ.	34,5	35,5	-	35,2	34,4	-	-	-	-
	Συμπ.	36,2	27,1	-	34,4	47,5	-	-	-	-
	<b>Ολική</b>	<b>109,1</b>	<b>107,4</b>	-	<b>131,0</b>	<b>163,2</b>	-	-	-	-

Στην περίπτωση του ισοβουτανίου, η μέγιστη καταστροφή εξέργειας σημειώνεται με όλα τα μοντέλα στον συμπυκνωτήρα και, μεταξύ των μοντέλων, ελάχιστη προκύπτει στη διορθωμένη Peng-Robinson. Ακολουθεί ο στρόβιλος, όπου το REFPROP προβλέπει την μικρότερη καταστροφή εξέργειας. Βέβαια, τόσο στους εναλλάκτες θερμότητας όσο και στον στρόβιλο οι διαφορές ανάμεσα στα μοντέλα είναι αρκετά μικρές και όλες οι τιμές κινούνται στο εύρος 32-36 kW. Για το ισοπεντάνιο, η μέγιστη καταστροφή εξέργειας σημειώνεται στον εξατμιστήρα, με τα μοντέλα να προβλέπουν ουσιαστικά την ίδια τιμή, περί των 43 kW. Ακολουθεί ο στρόβιλος με περίπου 35,5 kW από όλα τα μοντέλα, και έπειτα ο συμπυκνωτήρας με 27 kW. Στο τολουόλιο, λόγω της απαίτησης εναλλακτικού ψυκτικού μέσου, η μέγιστη καταστροφή εξέργειας παρατηρείται στον συμπυκνωτήρα. Η τιμή μειώνεται δραστικά στα 21 kW με τη δημιουργία κενού. Ακολουθεί ο εξατμιστήρας, με καταστροφή ίση με 118 kW εξέργειας έναντι 47 kW με υποατμοσφαιρική πίεση, και μετά ο στρόβιλος, ο οποίος δεν επηρεάζεται από το ύψος της πίεσης λόγω της σταθερότητας της ισχύος που παράγει στα 100 kW. Το έργο της αντλίας σε αυτήν την περίπτωση είναι ελάχιστο, κάτι που εξηγείται και από τη μικρή διαφορά πιέσεων, επιφέροντας την ελάχιστη καταστροφή ανάμεσα σε όλα τα ρευστά.

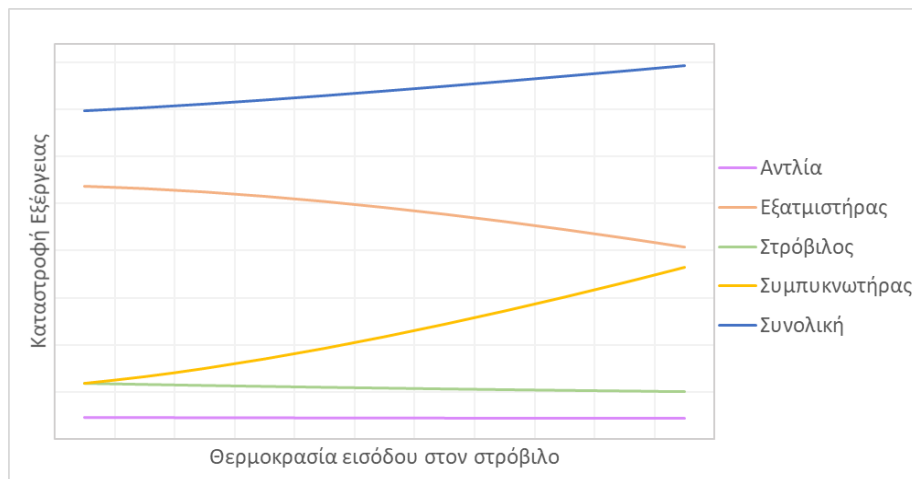
Για το R152a, η καταστροφή στον εξατμιστήρα προηγείται μεταξύ των συσκευών, με μία τιμή γύρω στα 58 kW, και ακολουθούν ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτήρας, με τιμές περί των 35 kW. Στον στρόβιλο και τον συμπυκνωτήρα τα δύο μοντέλα προβλέπουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές καταστροφής εξέργειας και στην αντλία ελάχιστη καταστροφή σημειώνεται με τη διορθωμένη Peng-Robinson. Στην περίπτωση του R134a, ο εξατμιστήρας είναι υπεύθυνος για το 47% της ολικής εξεργειακής καταστροφής. Ακολουθεί ο συμπυκνωτήρας με καταστροφή γύρω στα 48 kW και έπειτα ο στρόβιλος, για τον οποίο οι προβλέψεις των δύο μοντέλων είναι σχεδόν ίσες. Για το R161, τόσο η σειρά των συσκευών όσο και η απόλυτη τιμή της καταστροφής ανά συσκευή είναι πανομοιότυπες με του R134a. Και στα δύο ρευστά, το REFPROP προβλέπει μικρότερες καταστροφές στον εξατμιστήρα και μεγαλύτερες στον συμπυκνωτήρα σε σχέση με την ΚΕ.

Στην περίπτωση του R1234yf, η μέγιστη εξεργειακή καταστροφή συμβαίνει στον εξατμιστήρα και ισούται με περίπου 58 kW, με υπερεκτίμηση από την PR σε σχέση με το REFPROP. Ακολουθεί ο στρόβιλος, με 41 kW και πολύ κοντινές προβλέψεις από τα δύο μοντέλα, και ο συμπυκνωτήρας με 33,5 kW και εξίσου κοντινές προβλέψεις. Για το R1233zd(e) οι τιμές της καταστροφής στον στρόβιλο και στον εξατμιστήρα είναι πολύ κοντινές και κυμαίνονται περί των 37 kW. Αξιοσημείωτο είναι ότι με το συγκεκριμένο ρευστό σημειώνεται η ελάχιστη ολική καταστροφή εξέργειας και η ελάχιστη μερική στον συμπυκνωτήρα. Τέλος, για τη μεθανόλη τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με του τολουολίου, δηλαδή η μέγιστη εξεργειακή καταστροφή παρατηρείται στον συμπυκνωτήρα και μειώνεται στα 18,2 kW με μείωση της χαμηλής πίεσης του κύκλου. Ακολουθεί ο εξατμιστήρας, με την αντίστοιχη μείωση να ισούται με 20 kW όταν δημιουργείται κενό, ενώ η καταστροφή στην αντλία είναι η ελάχιστη μαζί με του τολουολίου.

Εξαιρώντας το τολουόλιο και τη μεθανόλη, μέγιστη συνολική καταστροφή εξέργειας σημειώνεται με τη χρήση του R161. Ακολουθεί πολύ κοντά το R134a, έπειτα το R1234yf, το R152a, το ισοβουτάνιο, το ισοπεντάνιο και τέλος το R1233zd(e). Μεταξύ του REFPROP και της Peng-Robinson, οι ολικές καταστροφές εξέργειας έχουν κοντινές τιμές, με την μέγιστη απόκλιση να παρατηρείται στο τολουόλιο, όπου το REFPROP προβλέπει μεγαλύτερη καταστροφή κατά περίπου 5 kW. Γενικά, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η καθαρή τιμή της καταστροφής εξέργειας τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόκλιση των δύο μοντέλων. Μετά το τολουόλιο, ακολουθούν τα R134a και R161, όπου το REFPROP προβλέπει κατά 2,5-3 kW χαμηλότερη καταστροφή, ενώ στις τελευταίες θέσεις βρίσκονται τα ισοπεντάνιο και

R152a, με την απόκλιση να είναι μικρότερη από 1 kW.

Πραγματοποιείται και μία ποιοτική ανάλυση ευαισθησίας της μεταβολής της καταστροφής εξέργειας ανά συσκευή καθώς και της συνολικής στο οργανικό κύκλο Rankine με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον στρόβιλο από τους 80-180°C με βήμα 10 βαθμών, ενδεικτικά του ισοβουτανίου μέσω REFPROP. Η καταστροφή εξέργειας στην αντλία, στον εξατμιστήρα και στον στρόβιλο μειώνεται, με την μεγαλύτερη πτώση να σημειώνεται στον εναλλάκτη θερμότητας λόγω της μεγαλύτερης τάξης μεγέθους της. Αντίθετα, στον συμπυκνωτήρα η καταστροφή εξέργειας αυξάνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα η συνολική καταστροφή στο κύκλο να αυξάνεται ελαφρώς με κάθε βήμα αύξησης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.2.11. Μεταβολή της καταστροφής εξέργειας ανά συσκευή και της συνολικής στο υποκρίσιμο απλό ORC για το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο.

Δημιουργείται πίνακας και με τους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης κάθε συσκευής. Σε γενικές γραμμές, όταν καταστρέφεται μεγάλη ποσότητα εξέργειας σε μία συσκευή, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσής της είναι χαμηλός. Έχει, βέβαια, άμεση σχέση και η θερμοκρασία εξόδου των ρευμάτων από την εκάστοτε συσκευή.

Πίνακας 5.2.2. %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του υποκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

		%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης								
		i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
<b>REF-PROP</b>	Αντλία	65,8%	65,9%	72,8%	65,8%	65,7%	65,8%	65,9%	65,9%	69,1%
	Εξατμ.	83,4%	78,8%	83,8%	74,3%	70,4%	69,5%	74,1%	80,9%	77,8%
	Στροβ.	74,4%	73,7%	75,6%	74,0%	74,4%	74,9%	71,0%	72,9%	74,1%
	Συμπ.	2,9%	3,3%	0,7%	3,4%	3,0%	2,8%	5,2%	4,0%	1,3%
<b>PR</b>	Αντλία	65,6%	65,8%	72,8%	65,8%	65,6%	65,7%	65,8%	65,8%	-
	Εξατμ.	82,7%	78,9%	83,7%	73,6%	69,3%	68,3%	73,7%	80,7%	-
	Στροβ.	74,3%	73,8%	75,6%	74,0%	74,4%	74,9%	70,9%	73,0%	-
	Συμπ.	2,9%	3,3%	0,7%	3,5%	3,0%	2,9%	5,2%	3,9%	-
<b>PR διορθ.</b>	Αντλία	63,9%	64,8%	-	74,0%	70,2%	-	-	-	-
	Εξατμ.	82,7%	78,9%	-	73,6%	69,3%	-	-	-	-
	Στροβ.	74,3%	73,8%	-	74,0%	74,4%	-	-	-	-
	Συμπ.	2,9%	3,3%	-	3,5%	3,0%	-	-	-	-

Όσον αφορά την αντλία ο βαθμός απόδοσής της με όλα τα ρευστά, εκτός από το τολουόλιο και τη μεθανόλη, κυμαίνεται περί του 65% μέσω REFPROP και PR. Στο τολουόλιο αγγίζει το 73% και στη μεθανόλη το 69%. Η εισαγωγή της διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης επιφέρει μειωμένη απόδοση της συσκευής αυτής στα αλκάνια και αυξημένη στους HFCs. Στα περισσότερα ρευστά, μέγιστη εξεργειακή απόδοση έχει ο εξατμιστήρας, ενώ στα R152a, R134a και R161 ο στρόβιλος. Στο τολουόλιο ο εξατμιστήρας έχει τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση ανάμεσα στα ρευστά, όταν η πίεση είναι τουλάχιστον ατμοσφαιρική, ενώ μειώνεται στο 77% με χαμηλότερη πίεση στον συμπυκνωτήρα. Μείωση σημειώνεται και στην απόδοση της αντλίας, που κινείται στο 65%, ενώ αύξηση σημειώνεται στον συμπυκνωτήρα. Τα ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και στην περίπτωση της μεθανόλης. Από τον συμπυκνωτήρα, το νερό ψύξης εξέρχεται στους 31°C. Η εξέργεια του είναι οριακά αμελητέα, αφού προσομοιάζει τη νεκρή κατάσταση, κάτι που δικαιολογεί τον ελάχιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης αυτής της συσκευής, που δεν ξεπερνά το 5%.

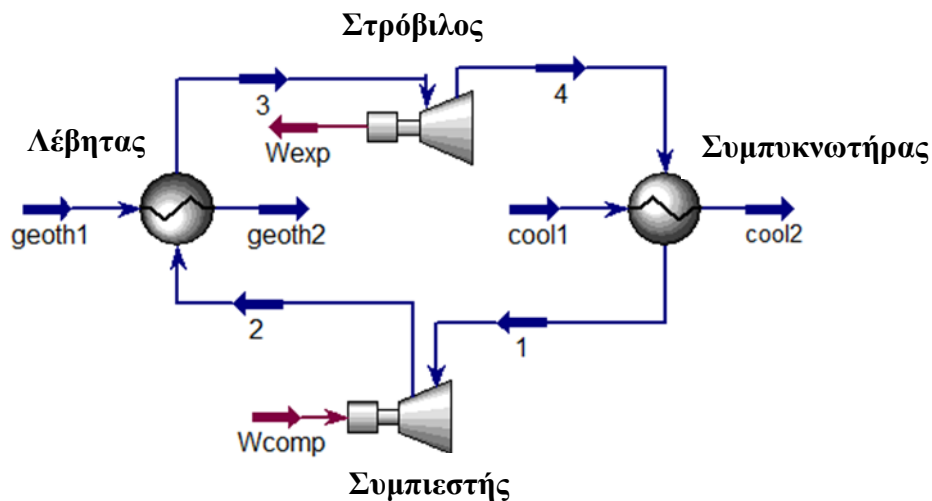
Σε γενικές γραμμές τα ρευστά ακολουθούν παρόμοιες τάσεις στους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης των τεσσάρων συσκευών του απλού υποκρίσιμου ORC. Κατά μέσο όρο, πιο αποδοτικός φαίνεται να είναι ο εξατμιστήρας, ακολουθεί ο στρόβιλος, έπειτα η αντλία και τέλος ο συμπυκνωτήρας. Όσον αφορά τον συμπυκνωτήρα, εφόσον η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του νερού ψύξης είναι δεδομένες, οι μεταβλητές μέσω των οποίων αξιολογείται η συσκευή αυτή είναι η μαζική παροχή του νερού ψύξης και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσής της. Γενικά, δεν παρατηρείται ξεκάθαρη συσχέτιση μεταξύ τους. Σίγουρα η χειρότερη περίπτωση είναι του τολουολίου, όπου η απόδοση είναι η ελάχιστη και η παροχή η μέγιστη. Η ελάχιστη μαζική παροχή των 12,2 kg/s αντιστοιχεί σε υψηλό σχετικά βαθμό απόδοσης για το R1233zd(e) (4,0%), όμως η μέγιστη απόδοση (5,2%) αντιστοιχεί στη δεύτερη υψηλότερη παροχή των 24,5 kg/s όταν χρησιμοποιείται το R1234yf.

Συνοψίζοντας, η βέλτιστη επιλογή ρευστού είναι συνάρτηση τόσο των αποδόσεων όσο και της μαζικής παροχής του. Το R1233zd(e), ενώ επιφέρει πολύ υψηλές θερμοδυναμικές αποδόσεις στο κύκλο, έχει σχεδόν διπλάσια μαζική παροχή από το ισοπεντάνιο. Ωστόσο, και οι δύο βοηθητικές παροχές εμφανίζουν ελάχιστη τιμή όταν επιλέγεται η υδροφθορολεφίνη. Απαιτείται, συνεπώς, τεchnοοικονομική ανάλυση, προκειμένου να γίνει ξεκάθαρο ποια από τα υποψήφια εξεταζόμενα ρευστά είναι τα καταλληλότερα για την εξεταζόμενη εφαρμογή. Από θερμοδυναμική σκοπιά, υποσχόμενα φαίνονται τα ρευστά ισοπεντάνιο, R1233zd(e), ισοβουτάνιο και R152a, όπως και το τολουόλιο και η μεθανόλη, εφόσον δημιουργηθεί και διατηρηθεί κενό στον συμπυκνωτήρα.

## 6. Υπερκρίσιμο Οργανικό Κύκλο Rankine με Καθαρές Ουσίες

### 6.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών

Το διάγραμμα ροής του transcritical κύκλου ταυτίζεται με αυτό του υποκρίσιμου (Σχήμα 5.1.1). Λόγω της διαφορετικής φάσης που υφίσταται συμπίεση, στα καθαρά υπερκρίσιμα κύκλα (supercritical) η αντλία αντικαθίσταται από έναν συμπιεστή.



Σχήμα 6.1.1. Διάγραμμα ροής υπερκρίσιμου ORC.

Στα transcritical κύκλα δεν είναι ζητούμενη η διερεύνηση πολύ μακριά από το κρίσιμο σημείο, συνεπώς η μέγιστη πίεση επιλέγεται να ξεπερνά την κρίσιμη κατά μόλις 5 bar. Οι θερμοκρασίες στο σημείο 3 (Σχήμα 5.1.1) πρέπει να ξεπερνούν τις κρίσιμες τιμές (Πίνακας 4.1.1) και, παράλληλα, να είναι χαμηλότερες από 192°C για να πληρείται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά από το γεωθερμικό ρευστό στον εξατμιστήρα. Ωστόσο, η κρίσιμη θερμοκρασία της μεθανόλης και του τολουολίου ξεπερνούν τους 200°C. Επιπλέον, στην περίπτωση των υπερκρίσιμων κύκλων (Σχήμα 6.1.1), πρέπει και η θερμοκρασία στην είσοδο του συμπιεστή, που είναι η ελάχιστη στο κύκλο, να είναι υψηλότερη από την κρίσιμη. Συνεπώς, ρευστά με κρίσιμη θερμοκρασία σχετικά κοντινή στη θερμοκρασία του νερού γεωθερμίας, όπως το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), δεν αφήνουν μεγάλο περιθώριο για αύξηση της θερμοκρασίας στο λέβητα. Προκειμένου, λοιπόν, να χρησιμοποιηθούν αυτά τα ρευστά, αξιοποιείται η διαθέσιμη πηγή των καυσαερίων, τα οποία προσομοιώνονται τόσο ως ξηρός αέρας ογκομετρικής σύστασης 21% σε οξυγόνο και 79% σε άζωτο, όσο και με την τυπική σύσταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.4.1, για να διερευνηθούν οποιεσδήποτε διαφορές στα αποτελέσματα. Οι διαφορές αυτές αφορούν αποκλειστικά τα καυσαέρια και τον σχεδιασμό του εξατμιστήρα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την σύσταση του Πίνακα 3.4.1, προκύπτει μία ελαφριά μείωση της μαζικής παροχής των καυσαερίων και μία μικρή διαφοροποίηση του ολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς στον εναλλάκτη θερμότητας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα, λόγω της ελαφρώς υψηλότερης τιμής της μοριακής θερμοχωρητικότητας των καυσαερίων σε σχέση με του αέρα. Στον Πίνακα 6.1.1 περιέχονται οι τιμές αυτές σε κάποιες θερμοκρασίες εξόδου του θερμού ρεύματος από τον εξατμιστήρα.

**Πίνακας 6.1.1.** Διαφορές στις γραμμομοριακές θερμοχωρητικότητες καυσαερίων και ξηρού αέρα στις θερμοκρασίες εξόδου τους από τον εξατμιστήρα του υπερκρίσιμου ORC για κάποια ρευστά.

T (°C)	C <sub>p,αέρα</sub> (J/mol K)	C <sub>p,καυσαερίων</sub> (J/mol K)
200	31,41	32,45
108 (MeOH)	29,70	30,46
47 (i-C5, R1233zd(e))	29,33	30,04

Πράγματι, λοιπόν, η θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων είναι ελαφρώς υψηλότερη σε σχέση με αυτή του αέρα, κάτι που εξηγεί τη χαμηλότερη μαζική τους παροχή για δεδομένη θερμοκρασιακή διαφορά (Εξίσωση 3.1.1). Η σχετική διαφορά της μαζικής παροχής των καυσαερίων από αυτή του αέρα είναι μικρότερη από 3,5%. Εφόσον οι διαφορές είναι σχεδόν αμελητέες, τα καυσαέρια προσομοιώνονται με τον απλούστερο τρόπο, δηλαδή ως ξηρός αέρας.

Στην περίπτωση του τολουόλιου και της μεθανόλης, τόσο στο υποκρίσιμο όσο και στο transcritical κύκλο, χρησιμοποιούνται ως πηγή θερμότητας τα καυσαέρια στους 400°C, και όχι το γεωθερμικό ρευστό, προκειμένου να είναι ουσιαστική η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συνθηκών. Έχουν αποφευχθεί υποατμοσφαιρικές τιμές πίεσης στον συμπυκνωτήρα, με την επιλογή των τελικών υποκρίσιμων συνθηκών να παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1.2. Οι επιλεγμένες συνθήκες στο transcritical κύκλο περιέχονται στον Πίνακα 6.1.4.

**Πίνακας 6.1.2.** Τελική επιλογή συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC με τη μεθανόλη και το τολουόλιο, όταν η πηγή θερμότητας είναι καυσαέρια στους 400°C.

	Τολουόλιο	Μεθανόλη
T <sub>1</sub> (°C)	110,6	64,5
T <sub>3</sub> (°C)	312	319
P <sub>3</sub> (kPa)	3600	7600
T <sub>air2</sub> (°C)	140,5	113

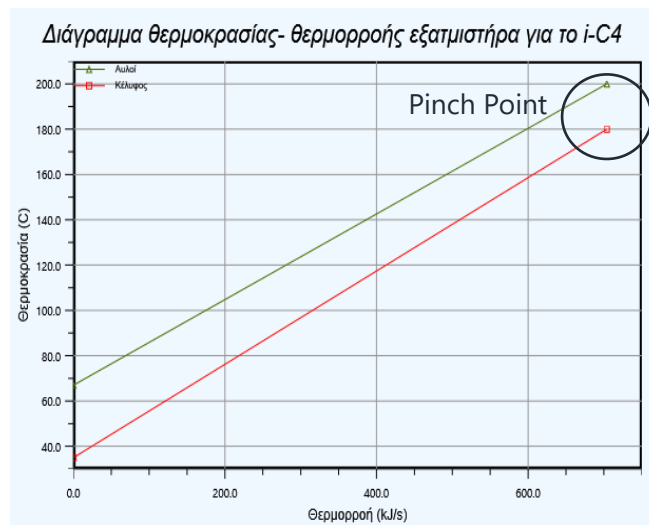
**Πίνακας 6.1.3.** Αποτελέσματα προσομοίωσης υποκρίσιμου απλού ORC με τη μεθανόλη και το τολουόλιο, όταν η πηγή θερμότητας είναι καυσαέρια στους 400°C.

	Τολουόλιο	Μεθανόλη
%n <sub>th</sub>	14,7	19,9
%n <sub>ex</sub>	28,9	43,2
%εσωτερικός n <sub>ex</sub>	33,3	47,0
$\dot{m}$ (kg/s)	1,02	0,33
$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	11,7	8,30
$\dot{m}_{air}$ (kg/s)	2,29	1,57
E <sub>xdestr,ολική</sub> (kW)	187,1	106,6
$\dot{Q}_{in}$ (kW)	632,2	476,8

Στην περίπτωση των υπερκρίσιμων κύκλων, αν η πίεση διατηρηθεί στο εύρος των transcritical, δηλαδή μόλις 5 bar πάνω από την κρίσιμη, ο λόγος πιέσεων αναμένεται χαμηλός. Έχει αποδειχτεί (Σχήμα 5.2.7) ότι υψηλός λόγος πιέσεων συνεπάγεται και υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης. Συνεπώς, στα υπερκρίσιμα κύκλα η υψηλή πίεση επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε ο λόγος πιέσεων τουλάχιστον να ξεπερνά τη μονάδα. Οι υψηλές πιέσεις αυξάνουν το πάγιο κόστος του εξοπλισμού, καθώς τα υλικά κατασκευής πρέπει να έχουν μεγαλύτερη αντοχή. Για λόγους ασφαλείας, οι πιέσεις περιορίζονται στα 100 bar, λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη τιμή της μεθανόλης, που ξεπερνά τα 80 bar. Επιπλέον, η χαμηλή πίεση του κύκλου επιλέγεται ελάχιστα υψηλότερη από την κρίσιμη για κάθε περίπτωση εργαζόμενου μέσου,

αφού πλέον δεν ορίζεται αυτόματα από τη θερμοκρασία εισόδου στην αντλία.

Προκειμένου το πάγιο κόστος του εξατμιστήρα να μην αυξηθεί υπερβολικά, ο αριθμός των κελυφών σε σειρά για τις transcritical συνθήκες τίθεται ίσος με πέντε, κάτι που αναγκαστικά αυξάνει την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εργαζόμενου μέσου και γεωθερμικού ρευστού. Η επιφάνεια εναλλαγής ισούται με 301,6 m<sup>2</sup>. Στην περίπτωση των υπερκρίσιμων κύκλων, η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά έχει πολύ υψηλότερη τιμή λόγω της υπερκρίσιμης θερμοκρασίας σε όλα τα σημεία του κύκλου. Ο αριθμός των κελυφών του εξατμιστήρα ορίζεται στα έξι, οδηγώντας σε επιφάνεια εναλλαγής ίση με 361,9 m<sup>2</sup>. Η επιφάνεια του συμπυκνωτήρα διατηρείται στα 60,3 m<sup>2</sup> ανεξάρτητα από τις συνθήκες. Τόσο στα transcritical όσο και στα υπερκρίσιμα κύκλα, το εργαζόμενο μέσο στο λέβητα περνάει από την υγρή φάση κατευθείαν στην υπερκρίσιμη. Λόγω της απουσίας εξάτμισης, το Pinch Point σημειώνεται στην έξοδο του εναλλάκτη.



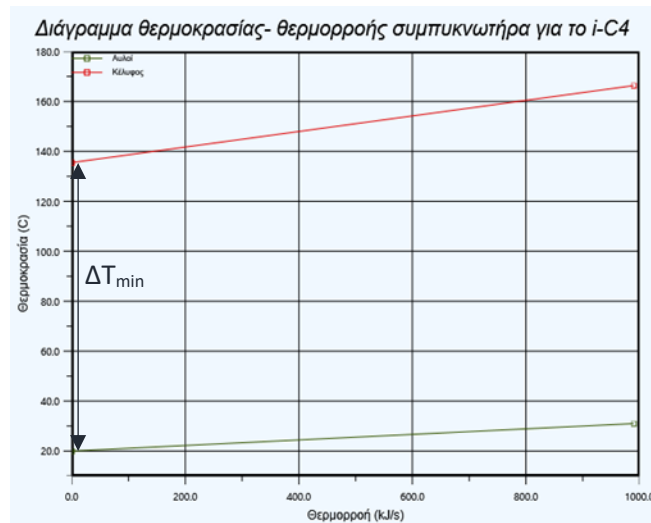
**Σχήμα 6.1.2.** Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στο λέβητα του transcritical ORC με χρήση του ισοβουτανίου μέσω REFPROP. Αντίστοιχη μορφή σημειώνεται και στα υπερκρίσιμα κύκλα.

Η μορφή της καμπύλης θερμοκρασίας-θερμορροής στον συμπυκνωτήρα του transcritical κύκλου είναι κοινή με του υποκρίσιμου (Σχήμα 5.1.12), καθώς το εργαζόμενο μέσο συμπυκνώνεται από την υπερκρίσιμη κατάσταση μέχρι να γίνει κορεσμένο υγρό. Αντίθετα, στα υπερκρίσιμα κύκλα, το αντίστοιχο διάγραμμα του συμπυκνωτήρα είναι παρόμοιο με του εξατμιστήρα (Σχήμα 6.1.2), καθώς το ρευστό εξακολουθεί να είναι σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 6.1.3, το νερό ψύξης δεν είναι το κατάλληλο ψυκτικό μέσο, μιας και στα υπερκρίσιμα κύκλα η ελάχιστη θερμοκρασία των ρευστών ξεπερνά την κρίσιμη τιμή. Ο σχεδιασμός του συμπυκνωτήρα κρίνεται ασύμφορος λόγω της υψηλής τιμής της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς, που σημειώνεται στην είσοδό του.

Για την προσομοίωση των υπερκρίσιμων κύκλων επιλέγεται υψηλότερη ισεντροπική απόδοση των μηχανημάτων συμπίεσης και εκτόνωσης σε σχέση με τα υποκρίσιμα και τα transcritical κύκλα. Για τον συμπίεστή η τιμή ορίζεται στο 75% και για τον στρόβιλο στο 80%. Οι αποδόσεις αυτές δεν είναι επιτεύξιμες στην πράξη, ωστόσο τα υπερκρίσιμα κύκλα ούτως ή άλλως δεν αναμένονται ως η βέλτιστη και πλέον εφαρμόσιμη περίπτωση. Με την ίδια λογική, η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστήρα μειώνεται στους 5°C, συνεπώς, εφόσον από το Σχήμα 6.1.2 η διαφορά αυτή συναντάται στην έξοδό του, η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στο σημείο 3 μπορεί να τεθεί έως και τους 195°C. Η μοντελοποίηση των



συνθηκών αυτών γίνεται μέσω REFPROP και PR, με τη διόρθωση του όγκου της υγρής φάσης να χρησιμοποιείται μόνο στα transcritical κύκλα.



Σχήμα 6.1.3. Ενδεικτικό διάγραμμα T- $\dot{Q}$  στον συμπυκνωτήρα του υπερκρίσιμου ORC με χρήση του ισοβουτανίου μέσω REFPROP.

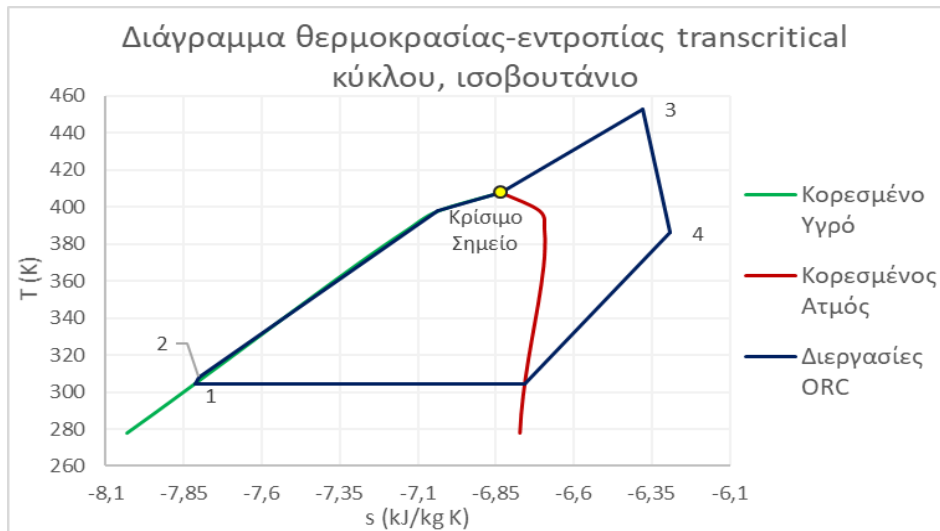
Πίνακας 6.1.4. Τελική επιλογή συνθηκών στο transcritical και το υπερκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό.

	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	P <sub>3</sub> (kPa)	T <sub>geoth2/air2</sub> (°C)	P <sub>1</sub> (kPa)	P <sub>3</sub> /P <sub>1</sub>
<b>Transcritical Κύκλο</b>						
<b>i-C4</b>	31,5	180	4150	67	422,1	9,83
<b>i-C5*</b>	32	192	3500	89,3	116,8	30,0
<b>Τολουόλιο**</b>	110,6	337	4650	143	101,3	45,9
<b>R152a</b>	32,5	185	5100	75,3	740,5	6,89
<b>R134a</b>	31	183	4550	71	803,9	5,66
<b>R161</b>	31,5	186	5510	77	1099	5,01
<b>R1234yf</b>	30,5	166	3850	53	794,2	4,85
<b>R1233zd(e)*</b>	33,5	184	3850	74	174,3	22,1
<b>MeOH**</b>	64,5	335,5	8600	108	101,3	84,9
<b>Υπερκρίσιμο Κύκλο</b>						
<b>i-C4</b>	135,5	195	6400	165	3680	1,74
<b>i-C5*</b>	188,5	367	6850	273	3400	2,01
<b>Τολουόλιο**</b>	321	391,5	6650	354,5	4200	1,58
<b>R152a</b>	115,5	195	6950	154	4550	1,53
<b>R134a</b>	102	195	6400	142,5	4100	1,56
<b>R161</b>	103	195	6550	139	5050	1,3
<b>R1234yf</b>	95	195	6330	143	3400	1,86
<b>R1233zd(e)*</b>	168,9	335	7400	212	3700	2,0
<b>MeOH**</b>	240	345	9740	259	8150	1,2

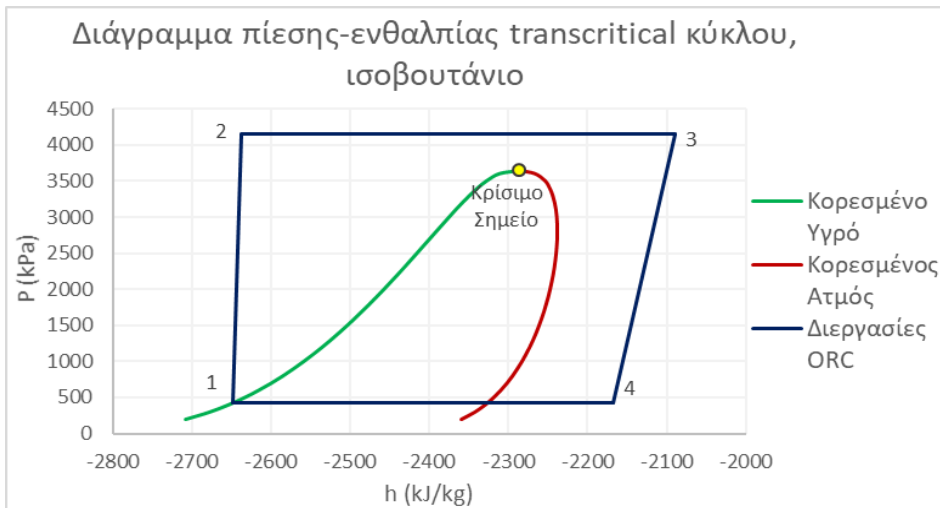
\*Ρευστά στα οποία τα καυσάερια χρησιμοποιούνται μόνο στο υπερκρίσιμο κύκλο.

\*\*Ρευστά στα οποία τα καυσάερια χρησιμοποιούνται στο transcritical & στο υπερκρίσιμο κύκλο.

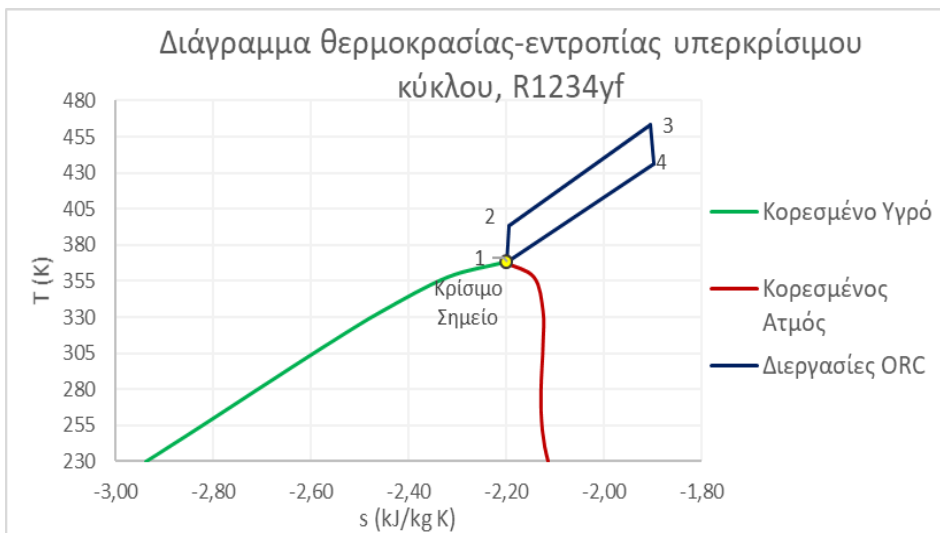
Αντίστοιχα με τις υποκρίσιμες συνθήκες, η κυκλική διεργασία αποτυπώνεται σε διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας και πίεσης-ενθαλπίας, με το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP για τις transcritical συνθήκες και το R1234yf μέσω PR για τις υπερκρίσιμες.



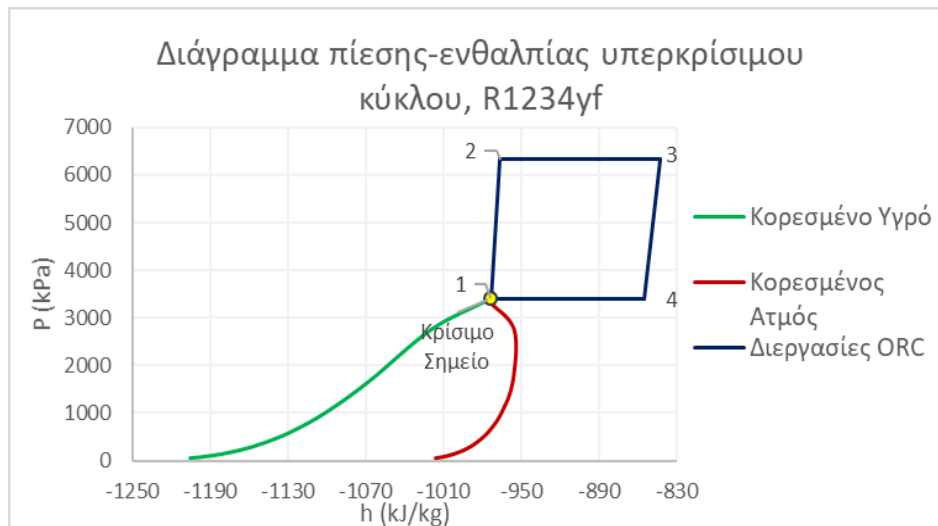
Σχήμα 6.1.4. Αποτύπωση διεργασιών transcritical απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.



Σχήμα 6.1.5. Αποτύπωση διεργασιών transcritical απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.



Σχήμα 6.1.6. Αποτύπωση διεργασιών υπερκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1234yf μέσω Peng-Robinson.



Σχήμα 6.1.7. Αποτύπωση διεργασιών υπερκρίσιμου απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1234yf μέσω Peng-Robinson.

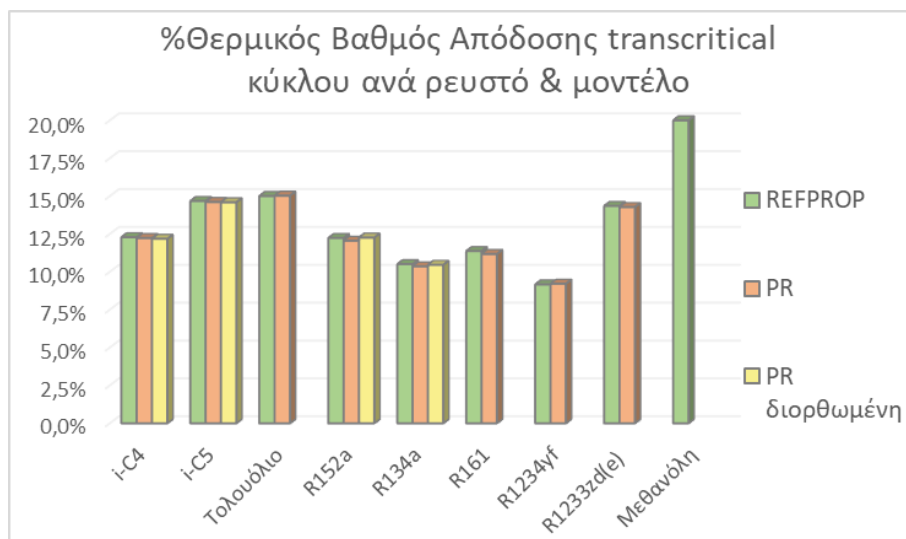
Η θερμοκρασία στο σημείο 3 του Σχήματος 6.1.4 ξεπερνά την κρίσιμη, ενώ στο σημείο 4 το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται από τον στρόβιλο ως υπέρθερμος ατμός. Στο Σχήμα 6.1.5 αποτυπώνεται η διαφορά των δύο επιπέδων πίεσης. Από το Σχήμα 6.1.6 είναι εμφανές πόσο περιοριστική είναι η θερμοκρασία της επιλεγμένης πηγής, που αποτελεί ένα τυπικό επίπεδο θερμοκρασίας της θερμότητας που αξιοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ORC, ως προς τις υπερκρίσιμες συνθήκες. Με άλλα λόγια, δεν ενδείκνυται η επιλογή καθαρά υπερκρίσιμων συνθηκών για εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Μεταξύ των Σχημάτων 6.1.5 και 6.1.7 φαίνεται η διαφορά των λόγων πιέσεων στα transcritical και τα υπερκρίσιμα κύκλα.

## 6.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Transcritical & Υπερκρίσιμου Κύκλου

Αρχικά, πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των θερμοδυναμικών μοντέλων για τις transcritical συνθήκες. Στα διαγράμματα που ακολουθούν το τολουόλιο και η μεθανόλη λαμβάνουν θερμότητα από ξηρό αέρα στους 400°C και τα υπόλοιπα ρευστά από γεωθερμικό νερό στους 200°C. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπερκρίσιμων κύκλων, για τα οποία, πέρα από τη μεθανόλη και το τολουόλιο, και το ισοπεντάνιο με το R1233zd(e) αξιοποιούν την ίδια εναλλακτική πηγή θερμότητας.

### ο Απόδοση

Από το Σχήμα 6.2.1 γίνεται εμφανές ότι τα θερμοδυναμικά μοντέλα προβλέπουν κοντινές μεταξύ τους τιμές, ακόμα και για πιέσεις ελαφρώς μεγαλύτερες από την κρίσιμη. Η εγγύτητα των αποτελεσμάτων είναι αντίστοιχη με τις υποκρίσιμες συνθήκες, δηλαδή οι μέγιστες απόλυτες αποκλίσεις σημειώνονται στην περίπτωση των HFCs και δεν ξεπερνούν το 0,2%. Οι αποδόσεις μέσω REFPROP είναι ελαφρώς χαμηλότερες από της PR μόνο στην περίπτωση του τολουολίου και του R1234yf. Ίδια τάση με τα υποκρίσιμα κύκλα παρατηρείται και με την εισαγωγή της παραμέτρου της διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης, η οποία επιφέρει αύξηση των προβλέψεων των αποδόσεων στα ψυκτικά ρευστά και μείωση στα αλκάνια.



Σχήμα 6.2.1. Θερμικός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Μεταξύ των ρευστών, η θερμική απόδοση με χρήση της μεθανόλης ξεπερνά το 20%, συναγωνιζόμενη τις αποδόσεις ενός κύκλου Rankine με ατμό. Το ρευστό αυτό έχει τη μέγιστη κρίσιμη πίεση ανάμεσα στα εργαζόμενα μέσα, συνεπώς η επίτευξη των υψηλών αποδόσεων με transcritical συνθήκες συνεπάγεται την ανάγκη λήψης μέτρων ασφαλείας. Ακολουθεί το τολουόλιο με ενεργειακή απόδοση στο 15%, πολύ κοντά το ισοπεντάνιο με 14,7% και το R1233zd(e) με περίπου 14,3%. Η σειρά των υπόλοιπων ρευστών είναι αντίστοιχη με το υποκρίσιμο κύκλο, δηλαδή προηγείται το ισοβουτάνιο των R152a, R161, R134a και του R1234yf. Η υδροφθορολεφίνη αποτελεί το μοναδικό ρευστό με απόδοση χαμηλότερη από 10%, και συγκεκριμένα ίση με 9,2%.

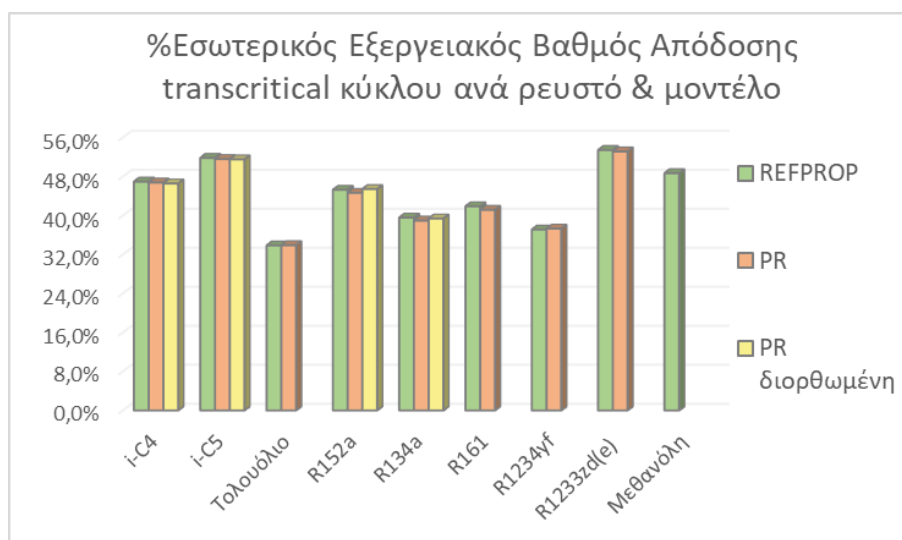


Σχήμα 6.2.2. Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Τα θερμοδυναμικά μοντέλα έχουν αντίστοιχη συμπεριφορά και στον υπολογισμό της εξεργειακής απόδοσης του κύκλου. Οι απόλυτες αποκλίσεις τους δεν ξεπερνούν το 0,7% και οι μέγιστες αφορούν και πάλι τους HFCs. Η καταστατική εξίσωση προβλέπει υψηλότερο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης για το τολουόλιο και το R1234yf. Η χρήση της διόρθωσης του

όγκου προβλέπει απόδοση κοντινότερη σε αυτή του REFPROP μόνο για τα ρευστά R152a και R134a. Ειδικά για το R152a, η μέγιστη εξεργειακή απόδοση μεταξύ όλων των μοντέλων προβλέπεται από τη διορθωμένη Peng-Robinson.

Ανάμεσα στα ρευστά, μέγιστη τιμή εξεργειακής απόδοσης επιφέρει η χρήση του R1233zd(e). Ακολουθεί η μεθανόλη με 45,2%, παρά τη χρήση πίεσης ίσης με την ατμοσφαιρική στον συμπυκνωτήρα. Η επιλογή αυτή, ωστόσο, για το τολουόλιο οδηγεί στη χαμηλότερη εξεργειακή απόδοση μεταξύ των ρευστών. Πολύ ικανοποιητική είναι και η απόδοση του κύκλου με χρήση των δύο αλκανίων, όπως και με το R152a. Η σειρά των υπόλοιπων ρευστών είναι αντίστοιχη με το θερμικό βαθμό απόδοσης (Σχήμα 6.2.1), δηλαδή το R161 προηγείται των R134a και R1234yf, με τις αποδόσεις και των τριών να ξεπερνούν το 35%.



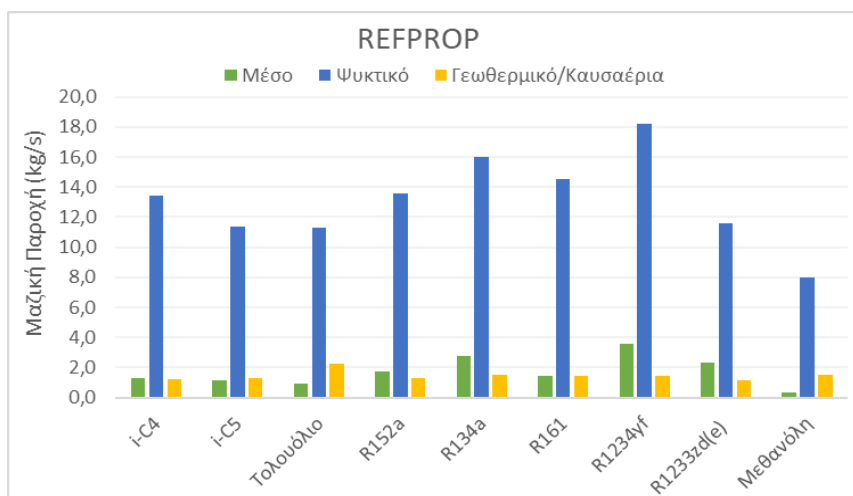
Σχήμα 6.2.3. Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης transcritical απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης του transcritical κύκλου. Οι απόλυτες αποκλίσεις αγγίζουν το 0,8% ανάμεσα στις δύο εκφράσεις της PR για το R152a. Η υπερεκτίμηση της εξεργειακής απόδοσης από την PR σε σχέση με το REFPROP αφορά τα ίδια ρευστά, δηλαδή το τολουόλιο και το R1234yf, και η επίδραση της εισαγωγής της διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης είναι αντίστοιχη με τις προηγούμενες εκφράσεις της απόδοσης.

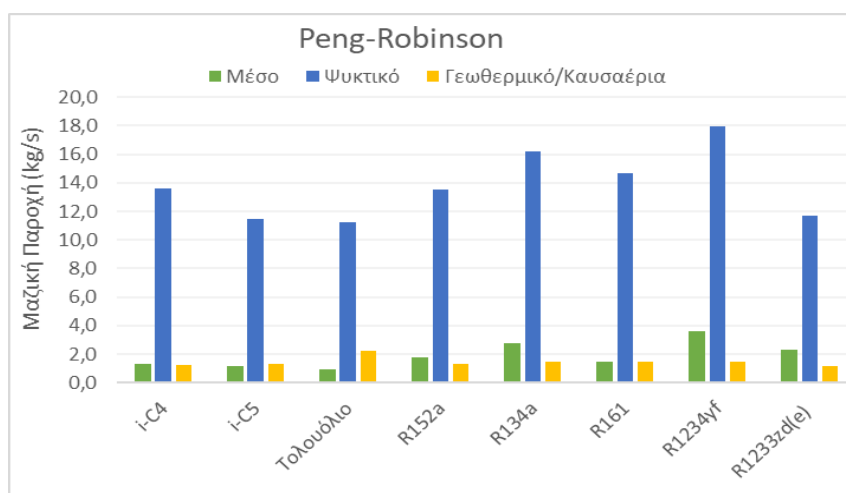
Πέρα από τον ολικό, το R1233zd(e) παρουσιάζει και το μέγιστο εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο, που προηγείται της μεθανόλης, ενώ η σειρά των υπόλοιπων ρευστών είναι κοινή με την ολικό βαθμό εξεργειακής απόδοσης. Το τολουόλιο επιφέρει και πάλι την ελάχιστη τιμή, υποδεικνύοντας την απαίτηση χρήσης διαφορετικού μέσου ψύξης στον συμπυκνωτήρα.

Εξαιρώντας το τολουόλιο και τη μεθανόλη, για τα οποία χρησιμοποιείται η εναλλακτική πηγή θερμότητας, τα δύο θερμοδυναμικά μοντέλα προβλέπουν την ίδια σειρά των ρευστών στις διαφορετικές εκφράσεις της απόδοσης, δηλαδή το ισοπεντάνιο να προηγείται στο θερμικό βαθμό και το R1233zd(e) στον εξεργειακό, σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα των υποκρισιμών κύκλων (Σχήματα 5.2.1-5.2.3).

ο Μαζικές Παροχές:



**Σχήμα 6.2.4.** Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο transcritical απλό ORC μέσω REFPROP.



**Σχήμα 6.2.5.** Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο transcritical απλό ORC μέσω Peng-Robinson.

Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων είναι εξίσου κοντινά και κατά τον υπολογισμό των μαζικών παροχών. Οι μέγιστες απόλυτες αποκλίσεις παρατηρούνται στο νερό ψύξης και αγγίζουν τα 0,15 kg/s, για το εργαζόμενο μέσο δεν ξεπερνούν τα 0,05 kg/s ενώ στην περίπτωση της πηγής θερμότητας είναι μικρότερες από 20 g/s. Το REFPROP προβλέπει τιμές ελαφρώς χαμηλότερες από την καταστατική εξίσωση, με εξαίρεση τις απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές με χρήση του τολουολίου και του R1234yf.

Μεταξύ των εργαζόμενων μέσων, μέγιστη μαζική παροχή έχει το R1234yf, ίση με περίπου 3,5 kg/s. Ακολουθεί το R134a με 2,8 kg/s, ενώ τα υπόλοιπα ρευστά έχουν παροχές μικρότερες από 2,5 kg/s. Ελάχιστη παροχή έχουν το τολουόλιο και η μεθανόλη, ωστόσο η σύγκριση με τα υπόλοιπα ρευστά δεν είναι άμεση, λόγω της διαφορετικής φύσης της πηγής θερμότητας. Με ανάκτηση θερμότητας από το γεωθερμικό ρευστό, ελάχιστη είναι η παροχή του ισοπεντανίου.

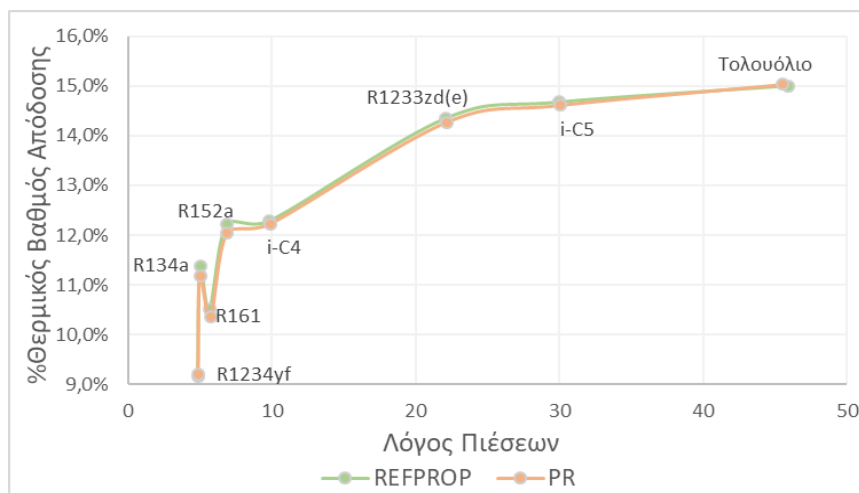
Στην περίπτωση του R1234yf παρουσιάζεται και η μέγιστη μαζική παροχή του νερού ψύξης, με επόμενο το R134a. Η ελάχιστη σημειώνεται με την επιλογή της μεθανόλης ως εργαζόμενο μέσο, ακολουθούμενη από τα ρευστά τολουόλιο, ισοπεντάνιο και R1233zd(e).

Σε γενικές γραμμές, η μαζική παροχή των καυσαερίων είναι μεγαλύτερη από του γεωθερμικού νερού. Στην περίπτωση του τολουολίου, η απαιτούμενη παροχή των καυσαερίων ισούται με 2,2 kg/s, ενώ η απαίτηση για τη μεθανόλη είναι ίση με τη μέγιστη απαίτηση σε γεωθερμικό ρευστό, που επιβάλλει η χρήση του R134a.

Εφόσον η ισχύς που παράγει ο στρόβιλος διατηρείται σταθερή, ο δείκτης του αντίστροφου ειδικού έργου ακολουθεί εντελώς αντίστοιχη τάση με τη μαζική παροχή των εργαζόμενων μέσων. Η τιμή του ελαχιστοποιείται για τη μεθανόλη, από την οποία χρειάζονται μόλις 3 g για την παραγωγή ενός kJ μηχανικού έργου, και μεγιστοποιείται για το R1234yf, του οποίου η κατανάλωση για την ίδια ποσότητα έργου είναι δεκαπλάσια, ξεπερνώντας τα 3,5 kg.

#### ο Λόγος Πιέσεων

Εξ' ορισμού, στα transcritical κύκλα οι λόγοι πιέσεων είναι υψηλότεροι σε σχέση με τα υποκρίσιμα και έχει ήδη αποδειχθεί ότι όσο αυξάνεται ο λόγος πιέσεων τόσο αυξάνεται και ο θερμικός βαθμός απόδοσης, ανεξάρτητα από την πηγή θερμότητας.



**Σχήμα 6.2.6.** Συνάρτηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του transcritical απλού ORC και του λόγου πιέσεων για όλα τα ρευστά ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

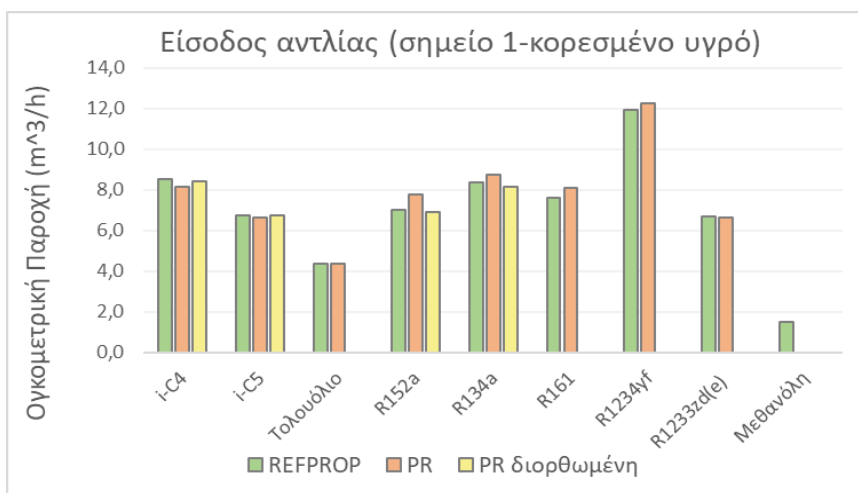
Το Σχήμα 6.2.6 έρχεται σε πλήρη αντιστοιχία με το Σχήμα 5.2.7, αφού εμφανίζεται η ίδια μικρή αλλαγή κλίσης στην περίπτωση των R161 και R134a. Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται ότι η προσθήκη της μεθανόλης στην καμπύλη του REFPROP, για την οποία ο λόγος πιέσεων ισούται με 85, επιφέρει τη μέγιστη θερμική απόδοση, επιβεβαιώνοντας την αύξουσα συνάρτηση με το πηλίκο των δύο πιέσεων του κύκλου.

#### ο Ογκομετρικές Παροχές

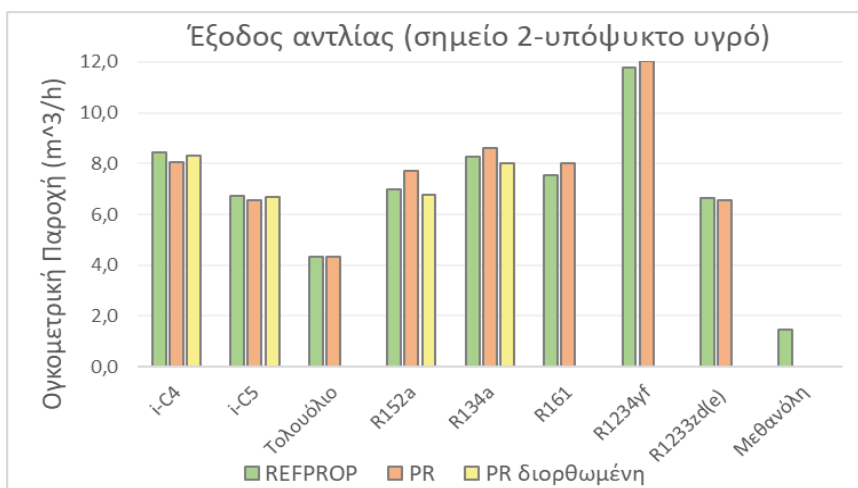
Με τις transcritical συνθήκες, στην είσοδο της αντλίας μέγιστη ογκομετρική παροχή, όπως και μαζική, έχει το R1234yf. Παρά τη μικρή του μαζική παροχή, δεύτερο στη φθίνουσα σειρά έρχεται το ισοβουτάνιο, ακολουθούμενο από τα R134a και R161. Ελάχιστες ογκομετρικές παροχές έχουν το τολουόλιο και η μεθανόλη.

Η ορθότητα των τιμών της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου επιβεβαιώνεται και στα transcritical κύκλα, μιας και η χρήση τους οδηγεί σε αποτελέσματα κοντινότερα σε αυτά του REFPROP. Η Peng-Robinson υπερεκτιμά την τιμή της ογκομετρικής παροχής των τριών HFCs και του R1234yf σε σχέση με το εναλλακτικό θερμοδυναμικό μοντέλο.





**Σχήμα 6.2.7.** Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο της αντλίας του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

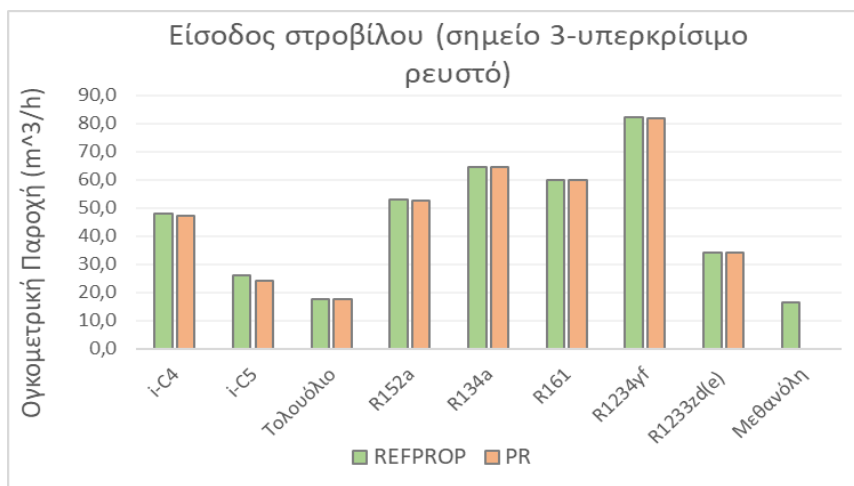


**Σχήμα 6.2.8.** Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην έξοδο της αντλίας του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Αντίστοιχα με τα υποκρίσιμα κύκλα (Σχήμα 5.2.9), από την είσοδο στην έξοδο της αντλίας, οι ογκομετρικές παροχές μεταβάλλονται ελάχιστα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ογκομετρικές παροχές στο σημείο 3, όπου τα ρευστά είναι σε υπερκρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 6.2.9). Στο σημείο 4 τα εργαζόμενα μέσα εξέρχονται από τον στρόβιλο ως υπέρθερμος ατμός και οι πιέσεις στον συμπυκνωτήρα είναι πολύ κοντινές με τα υποκρίσιμα κύκλα.

Συγκρίνοντας την τάξη μεγέθους των ογκομετρικών παροχών του υπέρθερμου ατμού στο σημείο 3 του Σχήματος 5.2.10, οι αντίστοιχες τιμές σε υπερκρίσιμη κατάσταση είναι αισθητά μικρότερες για όλα τα ρευστά. Επιβεβαιώνεται, και πάλι, ότι και τα δύο μοντέλα μπορούν να αξιοποιηθούν για την προσομοίωση υπερκρίσιμων συνθηκών κοντά στο κρίσιμο σημείο, μιας και τα αποτελέσματά τους είναι πολύ κοντινά, ανεξάρτητα από το εργαζόμενο μέσο και την πηγή θερμότητας.



Σχήμα 6.2.9. Ογκομετρική παροχή εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

ο Εξεργειακή Ανάλυση

Παρατίθεται ο Πίνακας 6.2.1, που περιέχει την ολική καταστροφή εξέργειας στο transcritical κύκλο και την κατανομή αυτής στις επιμέρους συσκευές του.

Πίνακας 6.2.1. Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

		Καταστροφή Εξέργειας (kW)								
		i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
<b>R E F P R O P</b>	Αντλία	4,6	3,3	2,3	4,5	4,6	4,9	5,4	3,6	1,7
	Εξατμ.	22,6	20,2	17,0	34,5	46,9	43,8	48,5	15,1	17,3
	Στροβ.	33,8	35,5	26,4	34,7	32,7	33,7	33,4	36,8	36,5
	Συμπ.	35,6	24,1	132,3	30,4	46,8	35,3	54,4	21,7	43,7
	<b>Ολική</b>	<b>96,6</b>	<b>83,0</b>	<b>178,0</b>	<b>104,0</b>	<b>131,0</b>	<b>117,7</b>	<b>141,7</b>	<b>77,1</b>	<b>99,1</b>
<b>PR</b>	Αντλία	4,5	3,3	2,3	5,0	4,8	5,3	5,4	3,5	-
	Εξατμ.	24,4	21,3	16,7	35,9	50,1	47,1	48,5	15,9	-
	Στροβ.	33,9	35,6	26,4	34,8	32,8	33,9	33,4	36,6	-
	Συμπ.	35,2	23,9	132,3	29,3	45,8	33,8	54,4	22,1	-
	<b>Ολική</b>	<b>98,0</b>	<b>84,0</b>	<b>177,6</b>	<b>104,9</b>	<b>133,5</b>	<b>120,0</b>	<b>141,7</b>	<b>78,2</b>	-
<b>PR διορθ.</b>	Αντλία	4,9	3,4	-	3,4	3,9	-	-	-	-
	Εξατμ.	24,4	21,3	-	36,3	50,1	-	-	-	-
	Στροβ.	33,9	35,6	-	34,8	32,8	-	-	-	-
	Συμπ.	35,2	23,9	-	29,3	45,8	-	-	-	-
	<b>Ολική</b>	<b>98,4</b>	<b>84,1</b>	-	<b>103,7</b>	<b>132,6</b>	-	-	-	-

Η κατανάλωση έργου στην αντλία είναι και πάλι αρκετά χαμηλή, με αποτέλεσμα η καταστροφή εξέργειας στην συγκεκριμένη συσκευή να κυμαίνεται στο εύρος 1,5-5,5 kW. Το άνω όριο του εύρους αυτού αφορά το R1234yf, ακολουθούμενο από τα ρευστά R161 και R134a, και το κάτω όριο τη μεθανόλη, με επόμενο το τολουόλιο. Ανάμεσα στις υπόλοιπες συσκευές υπάρχει γενικά διακύμανση. Η καταστροφή εξέργειας είναι μέγιστη στον συμπυκνωτήρα για το ισοβουτάνιο, το R1234yf, τη μεθανόλη και το τολουόλιο. Για τα τελευταία δύο ρευστά, η δημιουργία κενού θα μείωνε σημαντικά την καταστροφή στην

συγκεκριμένη συσκευή, αλλά και την αθροιστική στο κύκλο, μιας και ειδικά για το τολουόλιο, η καταστροφή στον συμπυκνωτήρα αποτελεί το 74% της συνολικής. Στις υπόλοιπες συσκευές του κύκλου, η καταστροφή εξέργειας με το τολουόλιο είναι από τις ελάχιστες ανάμεσα στα υπό μελέτη ρευστά. Με το ισοπεντάνιο, το R1233zd(e) και το R152a ο στρόβιλος ευθύνεται για τη μέγιστη ποσότητα απώλειας εξέργειας, ενώ με τα R134a και R161 ο εξατμιστήρας. Αντίθετα, στα ρευστά με τα οποία σημειώνονται υψηλότερες θερμικές αποδόσεις, δηλαδή στο ισοπεντάνιο, το R1233zd(e) και το ισοβουτάνιο, λαμβάνει χώρα μικρότερη καταστροφή εξέργειας στον εξατμιστήρα σε σχέση με τον συμπυκνωτήρα και τον στρόβιλο, κάτι που αντανakλά την ικανοποιητική πρόσληψη θερμότητας από την πηγή. Η ελάχιστη αθροιστική καταστροφή εξέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση του R1233zd(e) και ισούται μόλις με 77 kW, ενώ η μέγιστη, εξαιρώντας το τολουόλιο, είναι σχεδόν διπλάσια και αφορά την υδροφθοροολεφίνη R1234yf.

Η ταξινόμηση των ρευστών κατ' αύξουσα σειρά ολικής καταστροφής εξέργειας είναι κοινή με τα δύο θερμοδυναμικά μοντέλα. Οι μέγιστες απόλυτες αποκλίσεις μεταξύ τους αφορούν τους HFCs και εμφανίζονται στους δύο εναλλάκτες θερμότητας, και ειδικά στον εξατμιστήρα. Όσον αφορά τις τιμές που προβλέπονται από την PR, οι ελάχιστες διαφορές, όταν χρησιμοποιείται διόρθωση του όγκου της υγρής φάσης, αφορούν την καταστροφή στην αντλία και στον εξατμιστήρα, αφού στα υπόλοιπα στοιχεία του κύκλου οι τιμές είναι ακριβώς ίδιες με την απλή ΚΕ. Οι διαφορές αυτές μειοδοποιούνται στην αντλία στην περίπτωση των HFCs.

**Πίνακας 6.2.2.** %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του transcritical απλού ORC ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

		%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης								
		i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
<b>REF-PROP</b>	Αντλία	65,7%	65,7%	72,8%	65,8%	65,6%	65,7%	65,5%	66,0%	69,0%
	Εξατμ.	87,7%	87,8%	93,7%	82,0%	78,6%	78,6%	78,7%	91,0%	91,1%
	Στροβ.	74,7%	73,8%	79,1%	74,3%	75,4%	74,8%	75,0%	73,1%	73,2%
	Συμπ.	2,6%	3,3%	0,6%	3,1%	2,4%	2,9%	2,3%	3,7%	1,3%
<b>PR</b>	Αντλία	65,5%	65,7%	72,7%	65,7%	65,4%	65,6%	65,2%	65,9%	-
	Εξατμ.	86,9%	87,8%	93,8%	81,3%	77,3%	77,1%	77,8%	90,6%	-
	Στροβ.	74,7%	73,8%	79,1%	74,2%	75,3%	74,7%	75,1%	73,2%	-
	Συμπ.	2,7%	3,3%	0,6%	3,2%	2,5%	3,0%	2,5%	3,7%	-
<b>PR διόρθ.</b>	Αντλία	63,8%	64,7%	-	73,9%	70,0%	-	-	-	-
	Εξατμ.	86,9%	87,9%	-	81,1%	77,3%	-	-	-	-
	Στροβ.	74,7%	73,8%	-	74,2%	75,3%	-	-	-	-
	Συμπ.	2,7%	3,3%	-	3,2%	2,5%	-	-	-	-

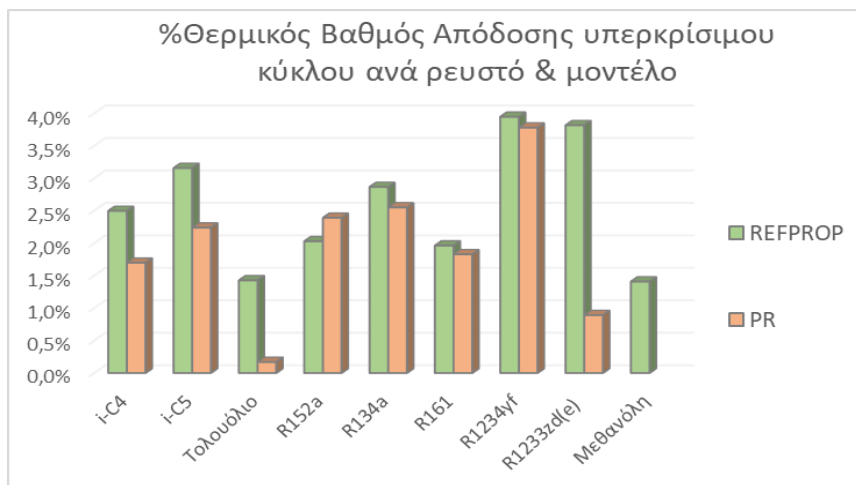
Με όλα τα ρευστά, ο εξατμιστήρας έχει τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση, με μία μέση τιμή (με εξαίρεση τη μεθανόλη) ίση με 84%, και ο συμπυκνωτήρας έχει την ελάχιστη, με τη μέση τιμή να ξεπερνά οριακά το 2,5%. Οι αποδόσεις στην αντλία κινούνται σε ένα αρκετά περιορισμένο εύρος γύρω από το 65% και μειοδοποιούνται για τη μεθανόλη και το τολουόλιο. Σχετικά περιορισμένο είναι και το εύρος των εξεργειακών αποδόσεων του στροβίλου, και συγκεκριμένα η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 72-75%, ενώ μειοδοποιείται για το τολουόλιο. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και στα υποκρίσιμα κύκλα (Πίνακας 5.2.2). Στην περίπτωση του τολουολίου παρατηρείται η μέγιστη εξεργειακή απόδοση μεταξύ όλων των ρευστών στην αντλία, στον εξατμιστήρα και στον στρόβιλο και η ελάχιστη στον συμπυκνωτήρα, αποτελέσματα που συμφωνούν με τις επιμέρους καταστροφές εξέργειας.

Μεταξύ των μοντέλων, σημειώνονται κάποιες διαφορές στις αποδόσεις των συσκευών

με χρήση της διορθωμένης Peng-Robinson, και συγκεκριμένα στην αντλία στην περίπτωση των δύο ψυκτικών ρευστών, για τα οποία οι τιμές προκύπτουν ελαφρώς αυξημένες. Ανάμεσα στο REFPROP και την απλή PR δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αποκλίσεις.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπερκρίσιμων κύκλων.

ο Απόδοση



Σχήμα 6.2.10. Θερμικός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

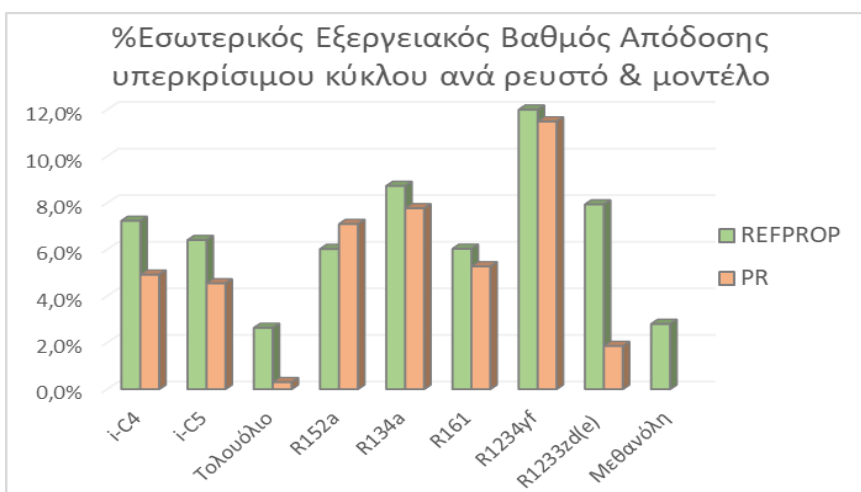
Είναι ξεκάθαρο από το Σχήμα 6.2.10 ότι δεν είναι ουσιαστικό να διερευνηθούν αναλυτικά οι καθαρά υπερκρίσιμες συνθήκες. Οι μειωμένες αποδόσεις οφείλονται σε πολλούς παράγοντες, όπως στην κατανάλωση μεγάλης ποσότητας έργου στον συμπιεστή, στα μικρά περιθώρια αύξησης της θερμοκρασίας λόγω της φύσης των πηγών θερμότητας και στα περιορισμένα εύρη αύξησης της πίεσης για λόγους ασφαλείας. Γενικά, η τάξη μεγέθους του θερμικού βαθμού απόδοσης για όλα τα ρευστά είναι η ίδια, με το εύρος των τιμών της να είναι 1,5 με 4%. Μέγιστη απόδοση με χρήση του REFPROP επιφέρει η χρήση του R1234yf, δηλαδή του ρευστού με την χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία, κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο μείωσης της θερμοκρασίας στην είσοδο του συμπιεστή. Ελάχιστο θερμικό βαθμό απόδοσης με το ίδιο μοντέλο επιφέρει η μεθανόλη και το τολουόλιο, που είναι τα ρευστά με τις μέγιστες κρίσιμες θερμοκρασίες.

Αυτό που γίνεται αντιληπτό με μία πρώτη ματιά στο Σχήμα 6.2.10 είναι ότι, σε αντίθεση με τα transcritical και τα υποκρίσιμα κύκλα, στα υπερκρίσιμα, όπου οι πιέσεις είναι αρκετά υψηλότερες από την κρίσιμη και όχι περιορισμένες κατά 5 bar, τα αποτελέσματα που προβλέπουν τα δύο θερμοδυναμικά μοντέλα δεν είναι κοντινά μεταξύ τους. Η ελάχιστη απόλυτη διαφορά σημειώνεται στην περίπτωση του R161 και ισούται με 0,13%. Η μέγιστη διαφορά αφορά το R1233zd(e) και είναι ίση με 2,9%, με το συγκεκριμένο ρευστό να κατατάσσεται από την ΚΕ ως το δεύτερο χειρότερο. Τα θερμοδυναμικά μοντέλα δεν έχουν εξεταστεί σε υπερκρίσιμες συνθήκες σε σχέση με πειραματικά δεδομένα, συνεπώς δεν είναι ξεκάθαρο ποιο από τα δύο είναι πιο ακριβές. Ωστόσο, η διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών έχει πραγματοποιηθεί χειροκίνητα μέσω του μοντέλου REFPROP και στην συνέχεια, οι ίδιες συνθήκες εξετάζονται για την Peng-Robinson. Ενδεχομένως, αν η πρωταρχική διερεύνηση είχε γίνει μέσω της PR, οι επιλεγμένες λειτουργικές συνθήκες να ήταν διαφορετικές και η Peng-Robinson να προέβλεπε μεγαλύτερες αποδόσεις από το REFPROP. Με άλλα λόγια, δεν είναι ασφαλής η σύγκριση των θερμοδυναμικών μοντέλων και η σύγκριση με τα transcritical και τα

υποκρίσιμα κύκλα είναι πιο ουσιαστική μόνο μέσω του REFPROP. Τέλος, δεν έχει νόημα η χρήση της παραμέτρου της διόρθωσης του όγκου, μιας και τα εργαζόμενα μέσα δεν διέρχονται από την υγρή φάση, αλλά παραμένουν διαρκώς σε υπερκρίσιμη κατάσταση.



**Σχήμα 6.2.11.** Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.



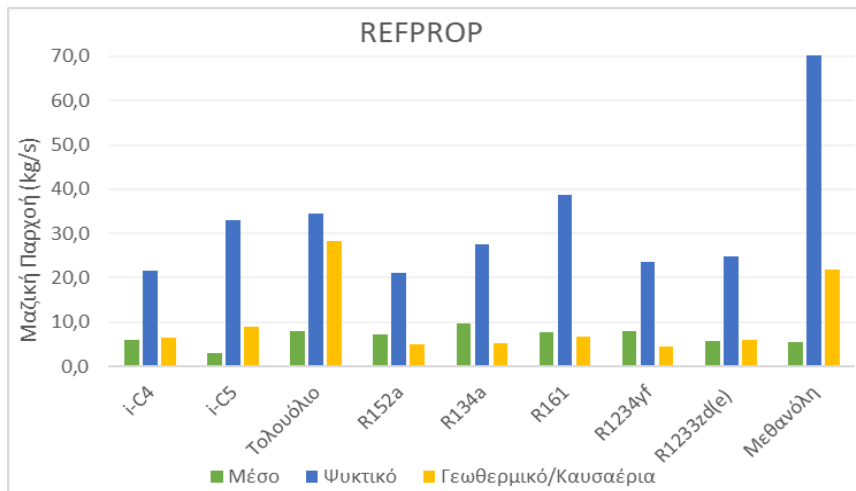
**Σχήμα 6.2.12.** Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υπερκρίσιμου απλού ORC ανά εργαζόμενο μέσο και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Η πτώση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης σε σχέση με τα υποκρίσιμα και τα transcritical κύκλα είναι ιδιαίτερα υψηλή. Μέγιστο ολικό και εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης επιφέρει η χρήση του R1234yf και με τα δύο μοντέλα, το οποίο αναδεικνύεται από θερμοδυναμική σκοπιά ως η βέλτιστη περίπτωση ρευστού στις υπερκρίσιμες συνθήκες, από εκεί που ήταν η χειρότερη στις υποκρίσιμες και στις transcritical. Το τολουόλιο επιφέρει τις μικρότερες τιμές και στις δύο εκφράσεις της απόδοσης και με τα δύο μοντέλα. Γενικά, οι τιμές του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης δεν ξεπερνούν το 6% και του εσωτερικού το 12%. Παρατηρούνται και πάλι μεγάλες αποκλίσεις ανάμεσα στα μοντέλα. Η ελάχιστη διαφορά αφορά και στις δύο εκφράσεις της απόδοσης το R1234yf και η μέγιστη το R1233zd(e). Προφανώς και πάλι η σειρά προτίμησης των ρευστών διαφέρει ανάλογα με το μοντέλο.

Η παρουσίαση των υπόλοιπων αποτελεσμάτων γίνεται μόνο μέσω REFPROP, μιας και δεν έχει νόημα η περαιτέρω σύγκριση με την PR. Οι αποκλίσεις είναι τέτοιες που δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Έτσι, ακόμα και αν οι αποδόσεις ήταν

βέλτιστες σε σχέση με τα υποκρίσιμα και τα transcritical κύκλα, η θερμοδυναμική μοντελοποίηση, αλλά και ο σχεδιασμός των υπερκρίσιμων ORCs απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

ο Μαζικές Παροχές



Σχήμα 6.2.13. Μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού νερού/καυσαερίων ανά ρευστό στο υπερκρίσιμο απλό ORC μέσω REFPROP.

Ανάμεσα στα εργαζόμενα μέσα, μέγιστη μαζική παροχή παρουσιάζει το R134a, ίση με 9,8 kg/s, και ελάχιστη το ισοπεντάνιο, στα 2,9 kg/s. Η χρήση της μεθανόλης απαιτεί τη μέγιστη παροχή νερού ψύξης, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από τις απαιτήσεις των υπόλοιπων ρευστών. Την ελάχιστη απαίτηση για ψύξη έχει το R152a, ενώ η ελάχιστη παροχή γεωθερμικού νερού σημειώνεται με το R1234yf. Το τολουόλιο και η μεθανόλη απαιτούν μεγάλη παροχή καυσαερίων, σε σχέση με το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), χωρίς αυτή να είναι άμεσα συγκρίσιμη με την παροχή του γεωθερμικού νερού.

ο Εξεργειακή Ανάλυση

Πίνακας 6.2.3. Κατανομή της εξεργειακής καταστροφής στις συσκευές του υπερκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό μέσω REFPROP.

REFPROP: Καταστροφή Εξέργειας (kW)									
	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
Συμπιεστής	12,9	7,6	9,6	14,3	11,7	12,2	10,5	8,6	7,6
Εξατμ.	10,6	39,4	9,3	17,5	34,6	57,5	33,2	46,1	130,3
Στροβ.	17,0	12,1	11,7	16,9	16,7	16,5	16,9	12,9	12,3
Συμπ.	283,2	660,9	703,3	264,4	328,1	465,9	264,7	454,8	1460,0
<b>Ολική</b>	<b>323,8</b>	<b>720,1</b>	<b>733,9</b>	<b>313,0</b>	<b>391,1</b>	<b>552,1</b>	<b>325,4</b>	<b>522,4</b>	<b>1610,2</b>

Με όλα τα ρευστά, η μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας λαμβάνει χώρα στον συμπυκνωτήρα. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει με το ύψος των θερμοκρασιών στο κύκλο, οι οποίες ξεπερνούν τις κρίσιμες, και άρα η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη αυτό ξεπερνά τους 100°C. Με ένα διαφορετικό ψυκτικό μέσο αναμένεται πολύ μικρότερη εξεργειακή καταστροφή. Η μέγιστη αθροιστική καταστροφή εξέργειας παρατηρείται με τη χρήση της μεθανόλης, που προκύπτει μία τάξη μεγέθους υψηλότερη από των υπόλοιπων ρευστών, και έπειτα του τολουολίου. Η ελάχιστη, με το R152a, ισούται με 313 kW και το

84,4% αυτής συμβαίνει στον συμπτυκνωτήρα. Η ελάχιστη εξεργειακή καταστροφή παρατηρείται στον συμπιεστή με όλα τα ρευστά, εκτός από το ισοβουτάνιο, για το οποίο παρατηρείται στον εξατμιστήρα.

**Πίνακας 6.2.4. %Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συσκευών του υπερκρίσιμου απλού ORC ανά ρευστό μέσω REFPROP.**

	%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης								
	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	MeOH
Συμπιεστής	82,7%	84,9%	88,0%	82,1%	81,3%	81,0%	81,0%	84,4%	85,8%
Εξατμ.	97,0%	94,9%	98,8%	94,8%	92,0%	90,3%	91,1%	91,9%	92,2%
Στροβ.	85,5%	89,2%	89,6%	85,6%	85,7%	85,9%	85,5%	88,6%	89,0%
Συμπ.	0,54%	0,36%	0,35%	0,57%	0,60%	0,59%	0,64%	0,39%	0,35%

Ανάμεσα στις συσκευές του κύκλου ο εξατμιστήρας έχει τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση, της τάξης του 90-98% για όλα τα ρευστά, και ο συμπτυκνωτήρας την ελάχιστη, που δεν φτάνει ούτε το 1%. Για να είναι αποδοτικά τα υπερκρίσιμα κύκλα, επιβάλλεται η διερεύνηση εναλλακτικών ψυκτικών μέσων. Η μέση εξεργειακή απόδοση είναι 83% για τον συμπιεστή και 87% για τον στρόβιλο.

### 6.3. Σύγκριση Υποκρίσιμου & Transcritical Κύκλου

Προκειμένου να δικαιολογείται το επιπλέον πάγιο κόστος, λόγω των μεγαλύτερων επιφανειών εναλλαγής θερμότητας και της μεγαλύτερης αντοχής υλικών στην πίεση, η χρήση transcritical συνθηκών πρέπει να αυξάνει σημαντικά τη θερμοδυναμική απόδοση του ORC σε σχέση με τις υποκρίσιμες συνθήκες. Η αξιολόγηση της βελτίωσης που επιφέρουν οι transcritical συνθήκες γίνεται μέσω της σχετικής μεταβολής των αποδόσεων, των μαζικών παροχών, της ολικής καταστροφής εξέργειας και των εξεργειακών αποδόσεων των συσκευών του συστήματος ως εξής:

$$\% \text{Σχετική Μεταβολή } x = \frac{|x_{sub} - x_{trans}|}{x_{sub}} * 100\% \text{ (Εξ. 6.3.1.)}$$

όπου x: η εκάστοτε μεταβλητή.

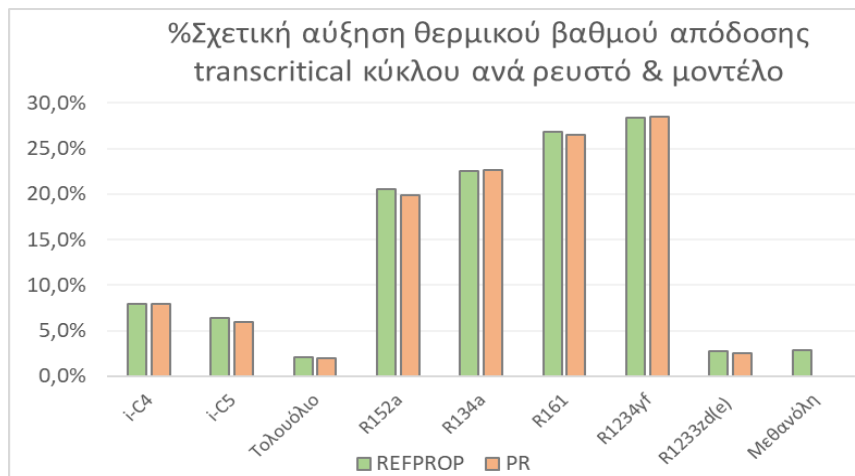
Επιπλέον, δεν είναι στόχος η μελέτη της επίδρασης της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης, συνεπώς παραλείπεται από την σύγκριση των δύο συνθηκών η διορθωμένη Peng-Robinson.

#### ο Απόδοση & Εισερχόμενη Θερμότητα

Για όλα τα ρευστά και με τα δύο θερμοδυναμικά μοντέλα προκύπτει ότι η επέκταση σε transcritical συνθήκες επιφέρει αύξηση του θερμοκινητικού βαθμού απόδοσης του κύκλου (Σχήμα 6.3.1). Μέγιστη αύξηση σημειώνεται στο R1234yf, το οποίο από 7,1% δίνει με transcritical συνθήκες απόδοση ίση με 9,2%. Ακολουθεί το R161 με απόλυτη αύξηση της ενεργειακής απόδοσης ίση με 2,4%, που ισοδυναμεί με σχετική αύξηση στο 26,7%, και το R134a, με απόλυτη αύξηση στο 1,93% και σχετική στο 22,5%. Η ελάχιστη σχετική αύξηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης σημειώνεται στο τολουόλιο, στο R1233zd(e) και στη μεθανόλη, ρευστά τα οποία και με υποκρίσιμες συνθήκες επιφέρουν υψηλές αποδόσεις, δεδομένου ότι έχουν χρησιμοποιηθεί καυσαέρια για την αλκοόλη και τον αρωματικό υδρογονάνθρακα.

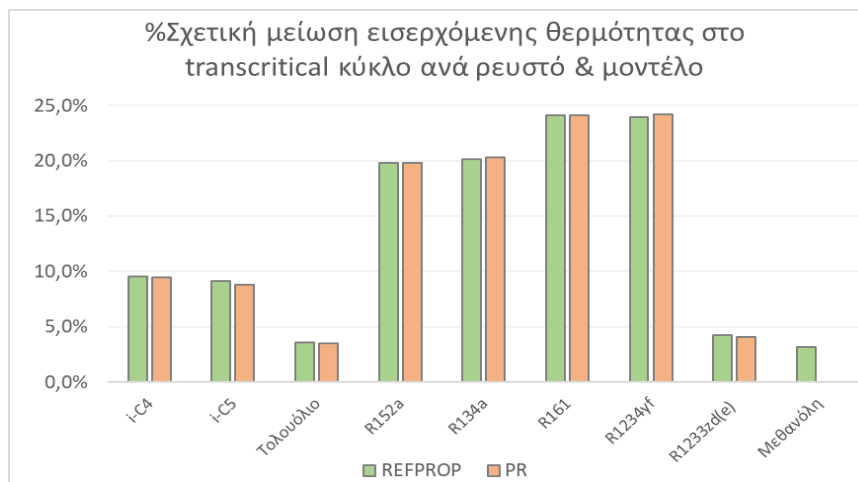


Γενικά, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης είναι πιο σημαντική στα ρευστά, τα οποία δεν είναι τόσο αποδοτικά σε υποκρίσιμες συνθήκες.



**Σχήμα 6.3.1.** %Σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Μεταξύ των μοντέλων, το REFPROP προβλέπει ελαφρώς υψηλότερη απόλυτη και σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης για όλα τα ρευστά, εξαιρώντας το R1234yf. Η μέγιστη απόκλιση των μοντέλων αφορά το R152a και ισούται με μόλις 0,65%.

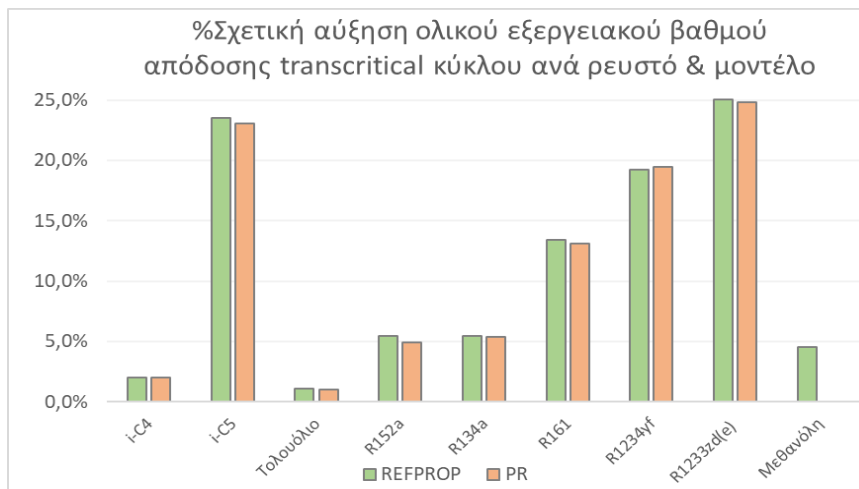


**Σχήμα 6.3.2.** %Σχετική μείωση της εισερχόμενης θερμότητας στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

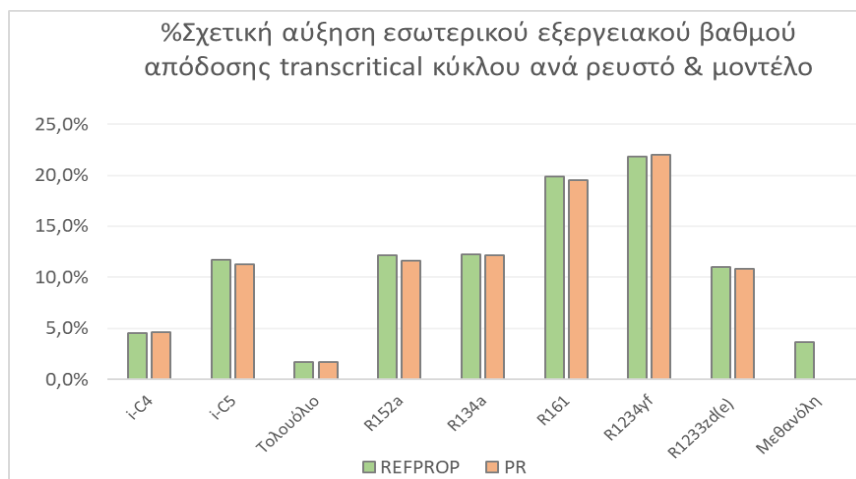
Η μείωση της εισερχόμενης θερμότητας δικαιολογεί την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης (Εξ. 1.2.2), δεδομένου ότι το καθαρό έργο που παράγεται στο κύκλο δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Όσον αφορά την σειρά των ρευστών, υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των R161 και R134a καθώς και της μεθανόλης σε σχέση με το Σχήμα 6.3.1. Η μέγιστη μείωση σημειώνεται στην περίπτωση του R161 από τα 992 στα 753 kW. Ακολουθεί το R1234yf με μεγαλύτερη απόλυτη μείωση, ίση με 290 kW, και σχετική ίση με 24%. Η ελάχιστη μείωση αφορά το τολουόλιο, τη μεθανόλη και το R1233zd(e), ρευστά τα οποία δεν απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα θερμότητας ούτε στο υποκρίσιμο κύκλο. Γενικά, η μείωση της απαίτησης σε θερμότητα είναι σημαντική σε ρευστά τα οποία έχουν αυξημένες απαιτήσεις στις υποκρίσιμες συνθήκες, σε πλήρη αντιστοιχία με τους σχετικά

χαμηλούς βαθμούς ενεργειακής απόδοσης.

Η συμπεριφορά των μοντέλων είναι εντελώς αντίστοιχη με το θερμικό βαθμό απόδοσης, δηλαδή το REFPROP προβλέπει ελαφρώς μεγαλύτερη σχετική μείωση της εισερχόμενης θερμότητας στο κύκλο για όλα τα εργαζόμενα μέσα, με εξαίρεση το R1234yf.



**Σχήμα 6.3.3.** %Σχετική αύξηση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.



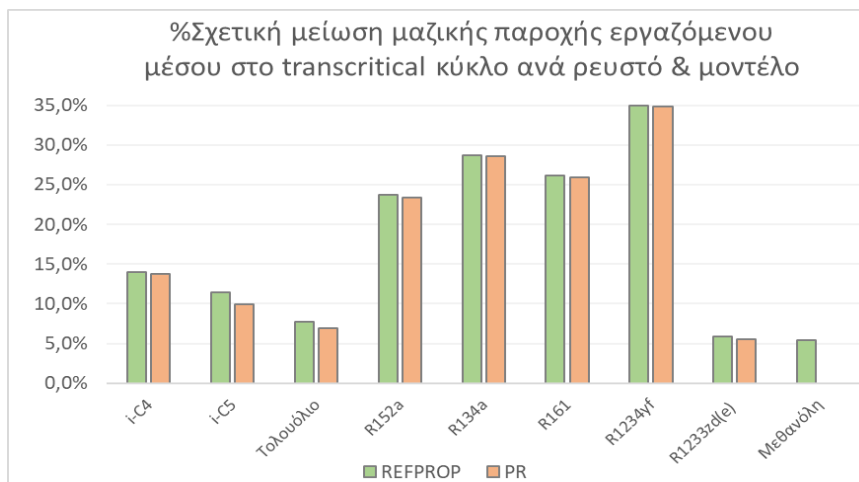
**Σχήμα 6.3.4.** %Σχετική αύξηση του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου ORC με αξιοποίηση transcritical συνθηκών ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Αντίστοιχα με το θερμικό, αύξηση παρατηρείται και στον ολικό και στον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης του ORC με transcritical συνθήκες σε σχέση με τις υποκρίσιμες για όλα τα ρευστά. Η μέγιστη αύξηση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης σημειώνεται στο R1233zd(e) από το 38,4% στο 47,9%. Πολύ σημαντική αύξηση σημειώνεται και στο ισοπεντάνιο, από το 35% στο 43%. Η ελάχιστη αύξηση σημειώνεται στο τολουόλιο, λόγω της αποφυγής υποατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα, και στο ισοβουτάνιο, που ήδη από τις υποκρίσιμες συνθήκες επιφέρει εξεργειακό βαθμό απόδοσης ίσο με 42,4%, μειώνοντας τα περιθώρια αύξησής του. Μεταξύ των μοντέλων, και πάλι η Peng-Robinson προβλέπει υψηλότερη σχετική αύξηση από το REFPROP για το R1234yf, και το ίδιο ισχύει και για το ισοβουτάνιο.

Όσον αφορά τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, η μέγιστη αύξηση παρατηρείται στο R1234yf, από το 30,5% στο 37,1%, και στους HFCs, ειδικά στο R161, όπως και στο θερμικό βαθμό απόδοσης. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη έκφραση της απόδοσης,

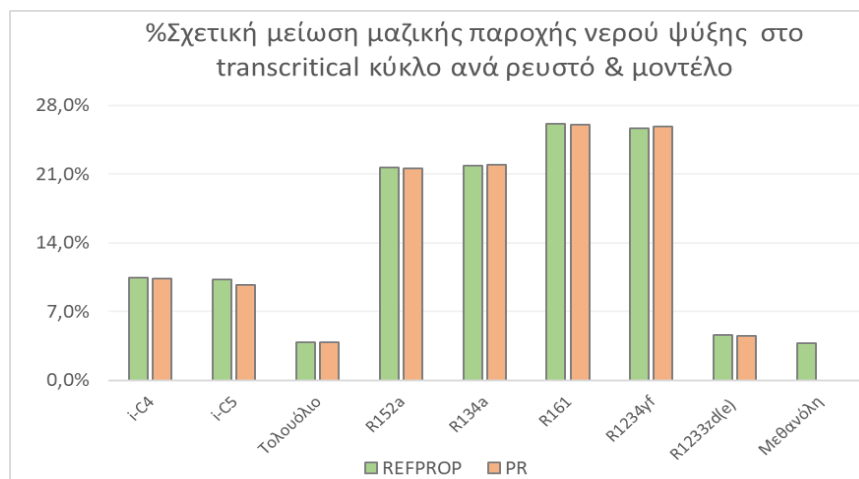
σημαντική αύξηση σημειώνεται και στην περίπτωση του ισοπεντανίου και του R1233zd(e), από το 46,4% στο 51,8% και από το 48,1% στο 53,5% αντιστοίχως. Η ελάχιστη αύξηση αφορά και πάλι το τολουόλιο και τη μεθανόλη, όπως και το ισοβουτάνιο, λόγω του υψηλού εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του σε υποκρίσιμες συνθήκες. Τέλος, τα ρευστά για τα οποία η PR υπερεκτιμά την σχετική βελτίωση από τις υποκρίσιμες συνθήκες σε σχέση με το REFPROP είναι τα ίδια με αυτά του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης.

ο Μαζικές Παροχές



**Σχήμα 6.3.5.** %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Ανάμεσα στις υποκρίσιμες και τις transcritical συνθήκες, οι δεύτερες επιφέρουν μείωση της μαζικής παροχής των οργανικών ρευστών. Η σχετική μείωση μεγιστοποιείται στην περίπτωση του R1234yf, για το οποίο αγγίζει το 35%, αφού από τα 5,45 kg/s πέφτει στα 3,54 kg/s. Εξίσου σημαντική είναι και η μειωμένη μαζική παροχή των τριών HFCs, με την απόλυτη μείωση να ξεπερνά τα 500 g στη μονάδα του χρόνου. Η ελάχιστη μείωση σημειώνεται στη μεθανόλη, της οποίας η παροχή ήδη από τις υποκρίσιμες συνθήκες είναι μιας τάξης μεγέθους μικρότερη από των υπόλοιπων ρευστών, και ακολούθως στο R1233zd(e), του οποίου η μείωση δεν θεωρείται ικανοποιητική, δεδομένων των θερμοδυναμικών αποδόσεων που επιτυγχάνονται με τη χρήση του. Για τη μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου, το REFPROP προβλέπει υψηλότερες τιμές σχετικής μείωσης για όλα τα ρευστά σε σχέση με την PR.



**Σχήμα 6.3.6.** %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του νερού ψύξης στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Οι transcritical συνθήκες επιφέρουν ελάττωση των απαιτήσεων ψύξης του οργανικού κύκλου Rankine. Η μέγιστη μείωση της μαζικής παροχής του νερού ψύξης σημειώνεται στην περίπτωση του R161 και του R1234yf, και ακολουθούν οι υπόλοιποι HFCs. Δηλαδή, η μέγιστη μείωση παρουσιάζεται στα ίδια ρευστά, των οποίων μειώνεται σημαντικά και η μαζική παροχή. Επιπλέον, οι ελάχιστες μεταβολές αφορούν και πάλι το τολουόλιο, τη μεθανόλη και το R1233zd(e). Η Peng-Robinson προβλέπει πιο σημαντική ελάττωση της μαζικής παροχής του νερού ψύξης σε σχέση με το REFPROP για το R134a και το R1234yf. Η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των μοντέλων ισούται μόλις με 0,5% και εμφανίζεται στο ισοπεντάνιο.



**Σχήμα 6.3.7.** %Σχετική μείωση της μαζικής παροχής του γεωθερμικού ρευστού/των καυσαερίων στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

Οι transcritical συνθήκες μειώνουν την ποσότητα του γεωθερμικού νερού και των καυσαερίων που απαιτούνται για τη μετάβαση από την υγρή στην υπερκρίσιμη κατάσταση. Μέγιστη μείωση της απαίτησης σε γεωθερμικό νερό παρατηρείται στην περίπτωση του ισοπεντανίου, από τα 1,65 kg/s στα 1,29 kg/s. Το γεγονός αυτό σχετίζεται και με τη μέγιστη αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης για το συγκεκριμένο ρευστό, που γενικά έχει να κάνει με την βέλτιστη αξιοποίηση της θερμικής πηγής. Η ίδια σχετική μείωση παρατηρείται και στο R1233zd(e) και ακολουθεί το R1234yf, για το οποίο η τιμή από τα 1,77 kg/s ελαττώνεται στα 1,45 kg/s. Οι ελάχιστες μειώσεις αφορούν το τολουόλιο και το ισοβουτάνιο. Παρά τη χαμηλή σχετική μείωση, η απαίτηση σε γεωθερμικό νερό στον εξατμιστήρα με εργαζόμενο μέσο το ισοβουτάνιο είναι ανάμεσα στις χαμηλότερες για transcritical συνθήκες. Αντίθετα, η μαζική παροχή των καυσαερίων με το τολουόλιο είναι μεγαλύτερη από της μεθανόλης και από όλες τις περιπτώσεις του γεωθερμικού ρευστού. Όσον αφορά τα θερμοδυναμικά μοντέλα, η PR προβλέπει υψηλότερη ελάττωση της απαίτησης σε θερμή βοηθητική παροχή για τα ίδια ρευστά με τη ψυχρή, δηλαδή το R134a και το R1234yf.

#### ο Εξεργειακή Ανάλυση

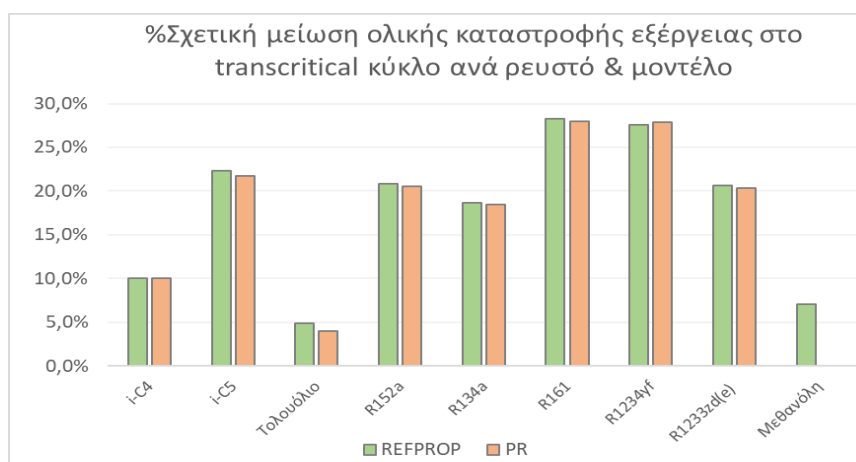
Η καταστροφή εξέργειας ανά συσκευή του κύκλου ακολουθεί την παρακάτω τάση:

- Στην αντλία, λόγω του υψηλότερου λόγου πιέσεων, καταστρέφεται μεγαλύτερη ποσότητα εξέργειας στα transcritical κύκλα σε σχέση με τα υποκρίσιμα για όλα τα ρευστά και για τα δύο θερμοδυναμικά μοντέλα.
- Στον εξατμιστήρα, ο συνδυασμός της θερμικής πηγής με τα οργανικά ρευστά είναι πιο αποδοτικός στα transcritical σε σχέση με τα υποκρίσιμα κύκλα, λόγω της απουσίας

εξάτμισης και της απευθείας μετάβασης σε υπερκρίσιμες συνθήκες, συνεπώς σημειώνεται σημαντική μείωση της καταστροφής εξέργειας.

- Στον στρόβιλο παρατηρείται ελαφριά μείωση της απώλειας εξέργειας, που δεν ξεπερνά τα 2 kW, με τη χρήση των transcritical συνθηκών για όλα τα ρευστά, εξαιρούμενου του R134a.
- Στον συμπυκνωτήρα η τάση είναι αντίστοιχη με τον στρόβιλο, με την απόλυτη μείωση της καταστροφής εξέργειας να κινείται στο εύρος 0,5-5 kW και να μεγιστοποιείται για το R134a στα 14 kW, ενώ το R1234yf αποτελεί την εξαίρεση, με αύξηση ίση με 3,5%.

Προκύπτει ότι για όλα τα ρευστά και με τα δύο μοντέλα η καταστροφή εξέργειας που λαμβάνει χώρα είναι χαμηλότερη στην περίπτωση επιλογής transcritical συνθηκών. Η μέγιστη μείωση παρατηρείται στο R1234yf και στο R161, ίση με 54 και 46,5 kW αντιστοίχως. Σημαντική μείωση σημειώνεται και στο ισοπεντάνιο, το R1233zd(e) και το R152a. Οι ελάχιστες μειώσεις εξεργειακής απώλειας αφορούν τη μεθανόλη και το τολουόλιο.



Σχήμα 6.3.8. %Σχετική μείωση της ολικής καταστροφής εξέργειας στο transcritical ORC σε σχέση με το υποκρίσιμο ανά ρευστό και ανά θερμοδυναμικό μοντέλο.

- Στην αντλία με τη μετάβαση σε transcritical συνθήκες παρατηρούνται πολύ μικρές μεταβολές της εξεργειακής απόδοσης. Για το R1233zd(e) η απόδοση αυξάνεται κατά 0,06%, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά μειώνεται μέχρι 0,2%, κάτι που συνάδει με την αύξηση της καταστροφής εξέργειας στην συγκεκριμένη συσκευή.
- Στον εξατμιστήρα η απόδοση αυξάνεται για όλα τα ρευστά. Μέγιστη απόλυτη αύξηση από το 64,8% στο 78,7% σημειώνεται με το R1234yf και ακολουθεί το R161, από το 69,5% στο 78,6%.
- Οι αποδόσεις του στρόβιλου αυξάνονται ελαφρώς για transcritical συνθήκες σε όλες τις περιπτώσεις εργαζόμενων μέσων, εξαιρούμενου του R161, με την μέγιστη αύξηση να παρατηρείται για το R134a, από το 74,4% στο 75,4%.
- Μείωση παρατηρείται στην εξεργειακή απόδοση του συμπυκνωτήρα των transcritical κύκλων, με εξαίρεση το R161. Η μέγιστη αφορά και πάλι το R134a, με την σχετική να αγγίζει το 23%.

Συνολικά, λοιπόν, πέρα από την αύξηση της ενεργειακής και της εξεργειακής απόδοσης, η αξιοποίηση transcritical συνθηκών σε ένα οργανικό κύκλο Rankine οδηγεί και στη μείωση της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου, του νερού ψύξης και της εκάστοτε πηγής θερμότητας, γεγονός που ελαττώνει και το λειτουργικό, αλλά και το πάγιο κόστος της εγκατάστασης, καθώς και σε μείωση της ολικής καταστροφής εξέργειας, λόγω αποδοτικότερης αξιοποίησης της θερμότητας.

## 7. Εναλλακτικές Πηγές Θερμότητας

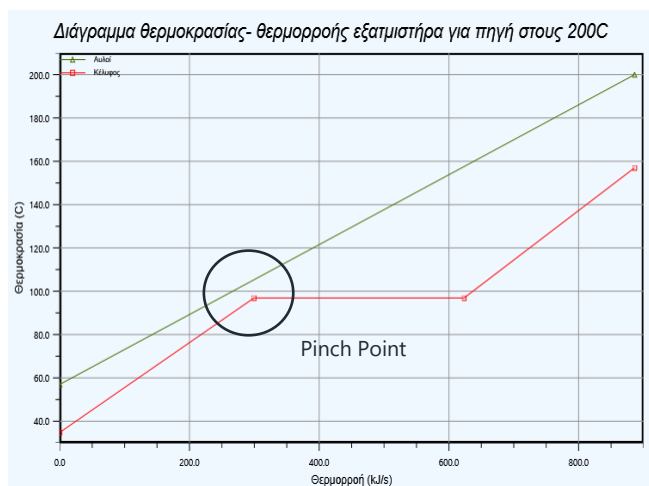
### 7.1. Επιλογή Πηγών Θερμότητας & Λειτουργικών Συνθηκών ανά Πηγή

Ήδη κατά τη μελέτη των υπερκρίσιμων οργανικών κύκλων Rankine προέκυψε η ανάγκη αξιοποίησης θερμότητας σε θερμοκρασία διαφορετική από τους 200°C της διαθέσιμης πηγής. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται εναλλακτικές πηγές θερμότητας, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας τους σε ένα ORC. Οι προσομοιώσεις γίνονται μόνο με χρήση του REFPROP. Οι πηγές θερμότητας που μελετώνται αντιστοιχούν σε γεωθερμικό ρευστό μέσης (120, 150°C) και υψηλής (200, 250°C) ενθαλπίας, ενώ οι θερμοκρασίες των 300, 400 και 450°C αντιστοιχούν σε απορριπτόμενη θερμότητα κάποιας βιομηχανίας ή μηχανής εσωτερικής καύσης. Η πίεση των καυσαερίων είναι ίση με την ατμοσφαιρική, ενώ οι πιέσεις του γεωθερμικού ρευστού αντιστοιχούν σε τιμές ελαφρώς υψηλότερες από την τάση ατμών του καθαρού νερού, δηλαδή 250 kPa για τους 120°C, με την τάση ατμών στα 198 kPa, 530 kPa για τους 150°C, από τα 478 kPa, και 4025 kPa για τους 250°C, με πίεση κορεσμού στα 3977 kPa.

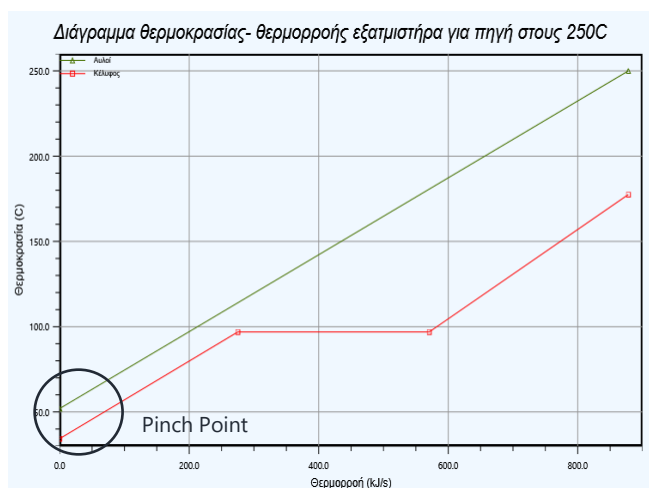
Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής, το Pinch Point στον εξατμιστήρα μετατοπίζεται από το σημείο του κορεσμένου υγρού στην είσοδο του εναλλάκτη θερμότητας, λόγω της ψύξης του νερού γεωθερμίας ή των καυσαερίων σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται στο ότι υπάρχει μία μέγιστη επιτρεπτή πίεση στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου κύκλου, στην οποία η βέλτιστη θερμοκρασία του ρευστού είναι δεδομένη και, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της πηγής, αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά από αυτή τη βέλτιστη θερμοκρασία. Αντί, λοιπόν, να αυξηθεί η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου, μειώνεται η τελική θερμοκρασία της πηγής στον εναλλάκτη αντιρροής, επιφέροντας βελτίωση στην εξεργειακή απόδοση του κύκλου. Σε γενικές γραμμές, όσο υψηλότερη είναι η κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται αυτή η μετατόπιση. Εξαιρεση αποτελεί η μεθανόλη, για την οποία το Pinch Point στον εξατμιστήρα παραμένει, ανεξάρτητα από τη φύση και τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, στο σημείο του κορεσμένου υγρού.

**Πίνακας 7.1.1.** Θερμοκρασία στην οποία το Pinch Point μεταξύ εργαζόμενου μέσου και πηγής θερμότητας μετατοπίζεται από το σημείο κορεσμένου υγρού στην είσοδο του εξατμιστήρα, ανά ρευστό.

Ρευστό	Θερμοκρασία Μετατόπισης Pinch Point στον Εξατμιστήρα (°C)
Ισοβουτάνιο	250
Ισοπεντάνιο	300
Τολουόλιο	450
R152a	250
R134a	250
R161	300
R1234yf	250
R1233zd(e)	300
Μεθανόλη	-



**Σχήμα 7.1.1.** Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το R152a και θερμοκρασία πηγής 200°C.



**Σχήμα 7.1.2.** Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το R152a και θερμοκρασία πηγής 250°C.

Ανά πηγή θερμότητας εξηγείται σύντομα η λογική πίσω από τις σχεδιαστικές επιλογές κατά τη διερεύνηση των βέλτιστων λειτουργικών συνθηκών.

- Νερό Γεωθερμίας στους 120°C

Η μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου ισούται με 110°C, για μία θερμοκρασιακή διαφορά περίπου 10 βαθμών στον εξατμιστήρα. Στη θερμοκρασία αυτή, οι τάσεις ατμών των περισσότερων ρευστών είναι πολύ χαμηλότερες από τις κρίσιμες πιέσεις τους, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του λόγου πιέσεων. Ωστόσο, η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά σημειώνεται στο σημείο του κορεσμένου υγρού και όχι στην έξοδο του εναλλάκτη (Πίνακας 7.1.1), με αποτέλεσμα να επιλέγονται θερμοκρασίες χαμηλότερες από τους 110°C. Η θερμοκρασία του τολουολίου στην είσοδο της αντλίας, για πίεση κορεσμού ίση με την ατμοσφαιρική, ισούται με 110,5°C, που είναι η μέγιστη επιτρεπτή στο κύκλο, συνεπώς το σύστημα δεν γίνεται να εξεταστεί με θερμική πηγή στους 120°C, χωρίς να υπάρχει ανάγκη δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτήρα και, ενδεχομένως, και στον εξατμιστήρα.



- Νερό Γεωθερμίας στους 150°C

Η μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του εξατμιστήρα δεν μπορεί να ξεπερνά τους 140°C, για την οποία η τάση ατμών των ρευστών με υψηλή, σχετικά, κρίσιμη θερμοκρασία (ισοβουτάνιο, R1233zd(e), ισοπεντάνιο, μεθανόλη, τολουόλιο) είναι αρκετά χαμηλότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή πίεσή τους. Επιπλέον, λόγω της θέσης του Pinch Point στο σημείο του κορεσμένου υγρού, η πίεση πρέπει να μειωθεί περαιτέρω. Η αποφυγή υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα μειώνει σημαντικά το λόγο πιέσεων στην περίπτωση της μεθανόλης και του τολουολίου.

- Νερό Γεωθερμίας στους 250°C

Εφόσον η θερμοκρασία της πηγής είναι σχετικά υψηλή, επιλέγεται η μέγιστη πίεση για την πλειοψηφία των ρευστών. Η μέγιστη επιτρεπτή πίεση του τολουολίου αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κορεσμού ίση με 307,5°C, συνεπώς επιλέγεται μία αρκετά μικρότερη πίεση και αυξάνεται, παράλληλα, και η τελική θερμοκρασία του νερού γεωθερμίας. Η ίδια λογική εφαρμόζεται και στην περίπτωση της μεθανόλης.

- Καυσαέρια στους 300°C

Παρόλο που υπάρχουν περαιτέρω περιθώρια αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου των ρευστών χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας στον στρόβιλο, επιλέγεται η βέλτιστη θερμοκρασία στη μέγιστη επιτρεπτή πίεση, που είναι κοινή με αυτή που επιλέχθηκε για πηγές θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας. Είναι επόμενο η τιμή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης να μειωθεί, αφού δεν αξιοποιείται εξ' ολοκλήρου το διαθέσιμο δυναμικό της πηγής. Η μέγιστη επιτρεπτή πίεση της μεθανόλης αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κορεσμού ίση με 235,5°C, δηλαδή χαμηλότερη από τους 300°C των καυσαερίων. Ωστόσο, απαιτείται η είσοδος υπέρθερμου ατμού στον στρόβιλο και όχι κορεσμένου, συνεπώς η πίεση πρέπει να μειωθεί για να υπερθερμανθεί η μεθανόλη στον εξατμιστήρα. Όσον αφορά το τολουόλιο, η θερμοκρασία κορεσμού για τη μέγιστη πίεση ξεπερνά την αρχική θερμοκρασία των καυσαερίων, συνεπώς απαιτείται μείωση της πίεσης αυτής.

- Καυσαέρια στους 400°C

Δεν αλλάζει κάτι σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη θερμική πηγή για τα περισσότερα ρευστά. Χρησιμοποιείται η μέγιστη επιτρεπτή πίεση για τη μεθανόλη, της οποίας οι ατμοί εξέρχονται από τον λέβητα στους 319°C, θερμοκρασία πολύ πιο κοντινή σε αυτή της πηγής σε σχέση με τα υπόλοιπα ρευστά. Το ίδιο ισχύει και για το τολουόλιο, το οποίο θερμαίνεται έως τους 312°C. Αντίθετα, η βέλτιστη θερμοκρασία στην μέγιστη επιτρεπτή πίεση του R1234yf είναι χαμηλή και υποδεικνύει ότι πηγές θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας δεν είναι ιδανικές για την εξάτμιση του συγκεκριμένου ρευστού.

- Καυσαέρια στους 450°C

Η χαμηλή, σχετικά, θερμοκρασία εισόδου των περισσότερων ρευστών στον στρόβιλο επιφέρει αυξημένη θερμοκρασιακή διαφορά στην έξοδο του εξατμιστήρα και μικρότερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης στο κύκλο. Εξαιρέση αποτελεί η μεθανόλη, για την οποία η μέγιστη πίεση του κύκλου είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση πηγής, ωστόσο, η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο αυξάνεται στους 347°C, επιτυγχάνοντας και πάλι υψηλή εξεργειακή απόδοση.

Οι τελικές λειτουργικές συνθήκες του οργανικού κύκλου Rankine ανά πηγή θερμότητας και ανά οργανικό ρευστό περιέχονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Πίνακας 7.1.2. Τελική επιλογή συνθηκών στο υποκρίσιμο απλό ORC ανά ρευστό και ανά πηγή θερμότητας.

		120°C	150°C	250°C	300°C	400°C	450°C
<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	i-C4	33,5	33	32	32	31,5	31,5
	i-C5	33,5	33	32	32	32	32
	Τολουόλιο	-	110,5	110,5	110,5	110,5	110,5
	Τολουόλιο*	34	34	33	32,5	32	32
	R152a	34,5	33	32	31	31	31
	R134a	33,5	32	31,5	31,5	31	31
	R161	34	33	31,5	31	31	31
	R1234yf	32,5	32	32	32	32	31,5
	R1233zd(e)	34	33,5	32	32	31,5	31,5
	Μεθανόλη	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5
	Μεθανόλη*	34,5	34,5	34,5	34	34,5	34
<b>P<sub>3</sub> (kPa)</b>	i-C4	1530	2700	3150	3150	3150	3150
	i-C5	500	860	2880	2880	2880	2880
	Τολουόλιο	-	140	680	1400	3600	3600
	Τολουόλιο*	40	90	580	900	3600	3600
	R152a	2800	3300	3300	3300	3300	3300
	R134a	3100	3100	3100	3100	3100	3100
	R161	3620	3620	3620	3620	3620	3620
	R1234yf	2535	2535	2535	2535	2535	2535
	R1233zd(e)	805	1200	3150	3150	3150	3150
	Μεθανόλη	198	280	1600	2900	7600	7600
	Μεθανόλη*	198	280	1600	2900	7600	7600
<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	i-C4	91	124,5	160	157	165	166
	i-C5	84	109	186	179	185	180
	Τολουόλιο	-	123	195	240	312	309
	Τολουόλιο*	82	107	187	212	312	309
	R152a	95,5	142	177,5	209	208	217
	R134a	107	134	162	163	167	167
	R161	101,5	135	184	192	204	214
	R1234yf	106	117	121	122	122	126
	R1233zd(e)	92	109,5	194	195	214	212
	Μεθανόλη	112	142	226	282	319	347
	Μεθανόλη*	112	142	226	282	319	347
<b>T<sub>geoth2/air2</sub> (°C)</b>	i-C4	78,5	91	45	43	42	41,5
	i-C5	78,5	90,5	56	44,5	42	41,5
	Τολουόλιο	-	127	172	168,5	140,5	129,5
	Τολουόλιο*	81	100,5	136	115	85	67
	R152a	81	78	52	56	41,5	41
	R134a	77	64	45,5	41	41	41
	R161	76,5	67	55	48	41	41
	R1234yf	67	53	41	41,5	41,5	41
	R1233zd(e)	84,5	88,5	61,5	49,5	43	41
	Μεθανόλη	88	96	138	146,5	113	113
	Μεθανόλη*	86,5	93	132	139	93	92,5

\*Εξέταση υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα.

## 7.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Εναλλακτικών Πηγών Θερμότητας

### 7.2.1. Αποτελέσματα ανά Πηγή Θερμότητας

Για τα διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας καθορίζεται το βέλτιστο εργαζόμενο μέσο στο οργανικό κύκλο Rankine. Για το τολουόλιο και τη μεθανόλη, επιλέγονται τουλάχιστον ατμοσφαιρικές πιέσεις στον συμπυκνωτήρα για όλες τις πηγές.

- ο Νερό Γεωθερμίας στους 120°C

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το τολουόλιο δεν μπορεί να εξατμιστεί από την συγκεκριμένη πηγή θερμότητας όταν δεν δημιουργείται κενό στους δύο εναλλάκτες, συνεπώς παραλείπεται από τους παρακάτω πίνακες με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

**Πίνακας 7.2.1.1.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 120°C.

	% $\eta_{th}$	% $\eta_{ex}$	%εσωτερικός $\eta_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	8,1%	26,9%	40,9%	2,86	22,4	6,41
<b>i-C5</b>	8,3%	27,3%	41,6%	2,83	23,5	6,73
<b>R152a</b>	8,2%	25,4%	40,6%	3,63	21,3	6,47
<b>R134a</b>	8,0%	27,5%	40,8%	5,01	21,2	5,85
<b>R161</b>	7,8%	27,2%	39,9%	2,90	21,4	5,83
<b>R1234yf</b>	7,0%	29,7%	38,9%	6,20	24,3	5,39
<b>R1233zd(e)</b>	8,8%	25,0%	42,9%	4,86	21,7	7,29
<b>MeOH</b>	3,6%	9,2%	17,2%	2,32	58,1	20,5

Μέγιστη ενεργειακή απόδοση επιφέρει η χρήση του R1233zd(e), ίση με 8,8%. Με εξαίρεση τη μεθανόλη, για την οποία είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη πηγή θερμότητας δεν είναι κατάλληλη, τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα ρευστά δεν εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις, ειδικά για τα αλκάνια, το R152a, και το R134a, μεταξύ των οποίων η μέγιστη απόλυτη απόκλιση ισούται με 0,3%. Χαμηλή, σχετικά, είναι η απόδοση του κύκλου με χρήση του R1234yf, ωστόσο η απόλυτη απόκλιση της είναι μόλις 1,8% από τη βέλτιστη απόδοση του R1233zd(e).

Μέγιστη τιμή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται όταν ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιείται το R1234yf, δηλαδή το ρευστό με την ελάχιστη κρίσιμη θερμοκρασία. Στην έκφραση του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης προηγείται το R1233zd(e). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το R1234yf εμφανίζει την ελάχιστη τιμή στον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ενώ το R1233zd(e) στον ολικό. Σχετικά καλά αποτελέσματα και στους δύο βαθμούς προκύπτουν με τη χρήση του R134a και του ισοπεντανίου. Το ισοβουτάνιο και το R152a δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ενώ το R161 επιφέρει σχετικά χαμηλές τιμές και στις δύο εκφράσεις. Επιβεβαιώνεται, και από εξεργειακή σκοπιά, ότι δεν έχει νόημα η χρήση της μεθανόλης με γεωθερμικό ρευστό στους 120°C.

Παρά τη φτωχή θερμοδυναμική απόδοση που επιφέρει, η μαζική παροχή της μεθανόλης είναι η ελάχιστη μεταξύ των ρευστών και ισούται με 2,32 kg/s. Ωστόσο, η χρήση της και πάλι κρίνεται ασύμφορη από τις απαιτήσεις σε νερό ψύξης και γεωθερμικό ρευστό, οι οποίες είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα ρευστά. Τη δεύτερη μικρότερη παροχή έχει το

ισοπεντάνιο, ίση με 2,83 kg/s, με τις απαιτήσεις σε νερό ψύξης και νερό γεωθερμίας να είναι ελαφρώς αυξημένες συγκριτικά με τους HFCs και το ισοβουτάνιο. Οι τρεις παροχές κινούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, όταν επιλέγεται το R161. Η παροχή του νερού γεωθερμίας ελαχιστοποιείται με επιλογή του R1234yf, ρευστό που ωστόσο έχει τη μέγιστη μαζική παροχή και τη δεύτερη μέγιστη απαίτηση για ψύξη. Η ελαχιστοποίηση της παροχής του νερού ψύξης προκύπτει με το ρευστό με τη δεύτερη μέγιστη παροχή, δηλαδή το R134a.

**Πίνακας 7.2.1.2. Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 120°C.**

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	3,0	56,8	39,4	30,9	130,0	66,0%	74,5%	71,8%	4,95%
<b>i-C5</b>	0,9	62,1	39,1	32,8	135,0	66,0%	73,4%	71,9%	4,89%
<b>R152a</b>	4,4	51,3	41,5	28,7	125,9	66,0%	76,1%	70,7%	5,05%
<b>R134a</b>	5,0	48,0	39,1	30,1	122,3	65,9%	77,0%	71,9%	4,82%
<b>R161</b>	5,5	50,2	40,8	28,2	124,6	66,0%	76,1%	71,0%	5,17%
<b>R1234yf</b>	5,2	54,0	37,5	40,1	136,8	65,8%	75,8%	72,7%	4,17%
<b>R1233zd(e)</b>	1,3	55,1	39,5	30,6	126,5	66,0%	75,4%	71,7%	4,84%
<b>MeOH</b>	0,1	128,8	36,4	310,7	476,0	69,1%	77,8%	73,3%	1,3%

Εξαιρώντας τη μεθανόλη, όλα τα ρευστά επιφέρουν παρόμοια τιμή ολικής καταστροφής εξέργειας. Η μέγιστη καταστροφή σημειώνεται με το R1234yf και ισούται με περίπου 137 kW, ενώ η ελάχιστη προκύπτει ίση με 122 kW όταν επιλέγεται το R134a. Συνεπώς, οι διαφορές μεταξύ των ρευστών δεν ξεπερνούν τα 15 kW. Όσον αφορά την κατανομή στις συσκευές του κύκλου, για όλα τα ρευστά η ελάχιστη καταστροφή σημειώνεται στην αντλία και η μέγιστη στον εξατμιστήρα, μεταξύ 48 και 62 kW. Λόγω της μεγαλύτερης τάξης μεγέθους της εξεργειακής καταστροφής στην συγκεκριμένη συσκευή, το γεγονός ότι αυτή ελαχιστοποιείται με το R134a οδηγεί και στην ελαχιστοποίηση της συνολικής στο κύκλο. Οι τιμές είναι κοντινές για τον στρόβιλο και τον συμπυκνωτήρα, κινούμενες στο εύρος 30-40 kW. Η χρήση της μεθανόλης επιφέρει πολύ υψηλές καταστροφές στους δύο εναλλάκτες θερμότητας και ειδικά στον συμπυκνωτήρα, ο οποίος ευθύνεται για το 65% της συνολικής εξεργειακής απώλειας.

Με όλα τα ρευστά, ανάμεσα στις συσκευές του κύκλου μέγιστη εξεργειακή απόδοση έχει ο εξατμιστήρας, με μία μέση τιμή ίση με 76%. Η απόδοση του συμπυκνωτήρα είναι η ελάχιστη. Στην περίπτωση της μεθανόλης, λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς, η απόδοση αυτής της συσκευής ισούται μόλις με 1,3%, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά κυμαίνεται περί του 4-5%. Μικρές διακυμάνσεις παρουσιάζει η απόδοση του στροβίλου, με τη μέση τιμή, για όλα τα ρευστά, να προκύπτει ίση με 72%. Σχετική σταθερότητα παρατηρείται και στην αντλία, με τη μέση τιμή να ισούται με 66%.

Κατά τη διερεύνηση του βέλτιστου ρευστού ανά θερμική πηγή, οι κυριότεροι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι οι τιμές των θερμοδυναμικών αποδόσεων καθώς και οι μαζικές παροχές, πρωτίστως των οργανικών ρευστών και δευτερευόντως των βοηθητικών παροχών. Για το γεωθερμικό νερό στους 120°C σίγουρα αποκλείεται η μεθανόλη. Το R1234yf και το R134a επίσης αποκλείονται, αφενός λόγω του χαμηλού θερμικού και εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, και αφετέρου, λόγω της υψηλής μαζικής τους παροχής (Πίνακας 7.2.1.1). Το R161, παρόλο που έχει σχετικά χαμηλή μαζική παροχή, δεν επιφέρει τις μέγιστες δυνατές θερμοδυναμικές αποδόσεις, ενώ το R152a έχει σχετικά υψηλή μαζική παροχή και επιφέρει χαμηλό ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης στο κύκλο. Απομένουν το δύο

αλκάνια. Οι μαζικές τους παροχές είναι πολύ κοντινές, με το ισοπεντάνιο να έχει κατά 31 g/s χαμηλότερη. Οι τιμές των τριών βαθμών απόδοσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στην περίπτωση του ισοπεντανίου. Από την άλλη μεριά, το ισοπεντάνιο απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες νερού ψύξης, κατά 1,1 kg/s, και γεωθερμικού ρευστού, κατά 0,32 kg/s. Η σχετική αύξηση των απαιτήσεων σε βοηθητικές παροχές δεν ξεπερνά το 5%, επομένως το **ισοπεντάνιο** ορίζεται ως βέλτιστο εργαζόμενο μέσο για εξάτμιση από νερό γεωθερμίας στους 120°C, με το ισοβουτάνιο να αποτελεί μία ικανοποιητική εναλλακτική επιλογή ρευστού.

ο Νερό γεωθερμίας στους 150°C

**Πίνακας 7.2.1.3.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 150°C.

	%n <sub>th</sub>	%n <sub>ex</sub>	%εσωτερικός n <sub>ex</sub>	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	10,6%	30,3%	43,9%	1,93	16,1	3,30
<b>i-C5</b>	10,8%	31,0%	44,7%	1,96	17,4	3,54
<b>Τολ.</b>	2,0%	2,3%	7,3%	13,1	105,1	50,1
<b>R152a</b>	9,9%	34,6%	43,5%	2,44	17,6	2,94
<b>R134a</b>	8,5%	35,4%	40,1%	4,11	20,5	2,83
<b>R161</b>	8,6%	34,4%	39,8%	2,28	20,2	2,89
<b>R1234yf</b>	7,1%	33,2%	35,6%	5,68	24,3	2,95
<b>R1233zd(e)</b>	10,7%	31,8%	44,7%	3,80	17,3	3,41
<b>MeOH</b>	5,5%	14,4%	22,3%	1,46	37,2	7,87

Στον Πίνακα 7.2.1.3 εμφανίζονται υψηλότερες τιμές αποδόσεων σε σχέση με τον Πίνακα 7.2.1.1, επιβεβαιώνοντας ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στην οποία παρέχεται θερμότητα στο κύκλο αυξάνει και το θερμικό βαθμό απόδοσης αυτού. Μέγιστη ενεργειακή απόδοση σημειώνεται με τα ρευστά ισοπεντάνιο, R1233zd(e) και ισοβουτάνιο, με τιμές μεγαλύτερες από 10,5%. Ακολουθούν οι HFCs με τιμές στο εύρος 8,5-10%. Τα υπόλοιπα ρευστά οδηγούν σε αρκετά χαμηλές τιμές, ειδικά η μεθανόλη και το τολουόλιο, που απαιτούν θερμότερες πηγές για να είναι αποδοτικά.

Ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται όταν το γεωθερμικό ρευστό στους 150°C εξατμίζει το R134a. Πολύ κοντά ακολουθεί το R152a, το R161 και το R1234yf. Εξαιρώντας τη μεθανόλη και το τολουόλιο, τα υπόλοιπα ρευστά εμφανίζουν τιμές υψηλότερες από 30%, δηλαδή αρκετά ικανοποιητικές. Όσον αφορά τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, η σειρά των ρευστών είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτή που προκύπτει στο θερμικό, δηλαδή προηγούνται το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), πολύ κοντά ακολουθούν το ισοβουτάνιο και το R152a, έπειτα οι υπόλοιποι HFCs, το R1234yf, η μεθανόλη και τέλος, το τολουόλιο.

Οι μέγιστες μαζικές παροχές προκύπτουν με χρήση του τολουολίου και είναι σημαντικά υψηλότερες από των υπόλοιπων ρευστών. Όσον αφορά τη θερμή και ψυχρή βοηθητική παροχή, ακολουθεί η μεθανόλη, η οποία ωστόσο, έχει την ελάχιστη μαζική παροχή, μικρότερη από 1,5 kg/s. Το ισοβουτάνιο έχει τη δεύτερη μικρότερη μαζική παροχή, ίση με 1,93 kg/s, μαζί με την ελάχιστη απαίτηση νερού ψύξης. Ανάλογα αποτελέσματα, με ελαφρώς αυξημένες απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές, παρουσιάζει και η χρήση του ισοπεντανίου και του R152a. Μετά το τολουόλιο, τη δεύτερη υψηλότερη μαζική παροχή έχει το R1234yf, ακολουθούμενο από το R134a και το R161.

Πίνακας 7.2.1.4. Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 150°C.

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	4,2	44,1	38,3	24,2	110,8	65,9%	77,9%	72,3%	4,55%
<b>i-C5</b>	1,3	52,0	37,8	27,1	118,2	65,9%	75,9%	72,5%	4,41%
<b>Τολ.</b>	0,2	148,4	32,9	1086,6	1268,1	77,1%	89,1%	75,3%	0,70%
<b>R152a</b>	3,7	43,4	36,7	30,4	114,3	65,9%	78,8%	73,1%	3,98%
<b>R134a</b>	4,2	50,4	35,8	39,3	129,7	65,7%	77,0%	73,6%	3,61%
<b>R161</b>	4,4	53,5	36,4	36,4	130,7	65,9%	75,6%	73,3%	3,82%
<b>R1234yf</b>	4,8	64,4	36,0	48,8	154,0	65,7%	73,4%	73,5%	3,45%
<b>R1233zd(e)</b>	1,6	51,5	39,1	24,4	116,6	66,0%	75,8%	71,9%	4,86%
<b>MeOH</b>	0,2	107,3	35,5	200,7	343,6	69,1%	75,9%	73,8%	1,3%

Εξαιρώντας τη μεθανόλη και το τολουόλιο, ρευστά για τα οποία η εξεργειακή καταστροφή στους εναλλάκτες θερμότητας, και ιδιαίτερα στον συμπυκνωτήρα, είναι αρκετά μεγάλη, η μέγιστη ολική καταστροφή εξέργειας παρουσιάζεται όταν επιλέγεται το R1234yf και η ελάχιστη με επιλογή του ισοβουτανίου. Μεταξύ των συσκευών, ελάχιστη εξέργεια καταστρέφεται στην αντλία, η οποία μεγιστοποιείται για το R1234yf. Για το ίδιο ρευστό, είναι αρκετά υψηλή και η εξεργειακή καταστροφή στον εξατμιστήρα και στον συμπυκνωτήρα. Η καταστροφή στον στρόβιλο κινείται στο εύρος 32-39 kW, με το κάτω όριο να αντιστοιχεί στο τολουόλιο και το άνω στο R1233zd(e).

Με εξαίρεση το R1234yf, η μέγιστη εξεργειακή απόδοση μεταξύ των συσκευών του ORC παρατηρείται στον εξατμιστήρα. Ακολουθεί ο στρόβιλος, η μέγιστη τιμή της απόδοσης του οποίου ισούται με 75,3% για το τολουόλιο. Η αντλία, για όλα τα ρευστά, εμφανίζει βαθμό απόδοσης περί του 66%, εξαιρούμενου του τολουολίου, για το οποίο ισούται με 77%, ανεβάζοντας έτσι τη μέση τιμή. Με το τολουόλιο και τη μεθανόλη οι αποδόσεις του συμπυκνωτήρα είναι πολύ χαμηλές, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά κινούνται στο εύρος 3-4%.

Κατά την αναζήτηση βέλτιστου ρευστού για την συγκεκριμένη πηγή θερμότητας, αποκλείεται το τολουόλιο και η μεθανόλη. Το R1234yf, παρόλο που οδηγεί σε ικανοποιητική τιμή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, επιφέρει χαμηλή τιμή θερμικού και εσωτερικού εξεργειακού, όπως και μεγάλη μαζική παροχή (Πίνακας 7.2.1.3). Το R134a, ενώ συνδυάζεται αποδοτικά με την πηγή θερμότητας, με αποτέλεσμα υψηλές τιμές των δύο εκφράσεων της εξεργειακής απόδοσης, έχει υψηλή μαζική παροχή και σχετικά χαμηλό θερμικό βαθμό απόδοσης. Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για το R161. Το R1233zd(e), ενώ παρουσιάζει πολύ καλές τιμές των θερμοδυναμικών αποδόσεων, έχει πολύ υψηλή παροχή, σχεδόν διπλάσια αυτής του ισοβουτανίου, κάτι το οποίο το αποκλείει από ιδανική επιλογή εργαζόμενου μέσου. Μεταξύ των τριών εναπομεινάντων ρευστών, βέλτιστο φαίνεται να είναι και πάλι το **ισοπεντάνιο**. Σε σχέση με το ισοβουτάνιο, εμφανίζει υψηλότερες τιμές και στις τρεις εκφράσεις της απόδοσης, την ίδια σχεδόν μαζική παροχή και ελαφρώς αυξημένες απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές. Φυσικά, αν στόχος του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, θα προτιμηθεί το ισοβουτάνιο έναντι του ισοπεντανίου. Καλή επιλογή θεωρείται και το R152a, το οποίο έχει σημαντικά υψηλότερο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης σε σχέση με το ισοπεντάνιο, ωστόσο η μαζική του παροχή είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 0,5 kg/s και ο θερμικός βαθμός απόδοσης μικρότερος κατά 0,8%.



ο Νερό Γεωθερμίας στους 200°C

Τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη πηγή θερμότητας έχουν ήδη παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5, δεν έχει όμως καθοριστεί η βέλτιστη επιλογή εργαζόμενου μέσου. Το τολουόλιο και η μεθανόλη απαιτούν περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής, καθώς οδηγούν σε πολύ χαμηλές ενεργειακές και εξεργειακές αποδόσεις (Σχήματα 5.2.1-5.2.3). Το R1234yf και το R134a απορρίπτονται, αφενός λόγω χαμηλών θερμοδυναμικών αποδόσεων και αφετέρου, λόγω υψηλών μαζικών παροχών (Σχήμα 5.2.4). Επιπλέον, το R161 έχει κατά 5% χαμηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης από το μέγιστο, αφήνοντας αρκετά μεγάλο περιθώριο βελτίωσης. Το R152a έχει και υψηλότερη μαζική παροχή και χαμηλότερες τιμές αποδόσεων σε σχέση με το ισοβουτάνιο. Ανάμεσα στα τρία εναπομείναντα ρευστά, το **ισοβουτάνιο** πετυχαίνει το μέγιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης και την ελάχιστη απαίτηση σε νερό γεωθερμίας, αλλά και τον ελάχιστο θερμικό και εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης και τη μέγιστη απαίτηση νερού ψύξης. Το **ισοπεντάνιο** έχει την ελάχιστη μαζική παροχή, αλλά και τον ελάχιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, μαζί με τη μέγιστη απαίτηση σε νερό γεωθερμίας. Το **R1233zd(e)** επιφέρει το μέγιστο θερμικό και εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, αλλά και τη μέγιστη μαζική παροχή. Η επιλογή του βέλτιστου ρευστού δεν είναι ξεκάθαρη και εξαρτάται από τα αποτελέσματα μιας αναγκαίας τεχνοοικονομικής ανάλυσης.

ο Νερό Γεωθερμίας στους 250°C

**Πίνακας 7.2.1.5.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 250°C.

	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	11,4%	39,5%	40,6%	1,50	15,0	0,87
<b>i-C5</b>	14,5%	47,7%	49,6%	1,12	11,8	0,75
<b>Τολ.</b>	10,0%	13,8%	26,1%	2,04	19,1	2,75
<b>R152a</b>	10,3%	34,7%	36,0%	2,05	17,1	1,02
<b>R134a</b>	8,7%	30,0%	30,8%	3,60	20,4	1,15
<b>R161</b>	9,1%	30,1%	31,3%	1,81	19,5	1,16
<b>R1234yf</b>	7,1%	25,3%	25,8%	5,62	24,3	1,32
<b>R1233zd(e)</b>	14,3%	46,0%	48,3%	2,12	12,0	0,78
<b>MeOH</b>	13,9%	27,2%	38,7%	0,52	13,2	1,41

Μέγιστη θερμική απόδοση, όταν η πηγή είναι γεωθερμικό ρευστό στους 250°C, επιτυγχάνεται με επιλογή του ισοπεντανίου και δευτερευόντως του R1233zd(e). Τρίτη στη σειρά είναι η μεθανόλη, με πολύ ικανοποιητική απόδοση, ίση με 13,9%. Ακολουθεί το ισοβουτάνιο με 11,4% και το R152 με 10,3%. Σημαντική είναι και η βελτίωση για το τολουόλιο, το οποίο οδηγεί σε θερμικό βαθμό απόδοσης ίσο με 10%. Η ελάχιστη ενεργειακή απόδοση, περί του 7%, σημειώνεται με χρήση του R1234yf, όπως και με τις προηγούμενες πηγές θερμότητας.

Το ισοπεντάνιο προηγείται και στις δύο εκφράσεις της εξεργειακής απόδοσης, ακολουθεί το R1233zd(e) και έπειτα το ισοβουτάνιο. Η μεθανόλη στον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης προηγείται των HFCs, ενώ στον ολικό έπεται αυτών. Προτελευταίο και στις δύο εκφράσεις είναι το R1234yf, επιβεβαιώνοντας ότι η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας δεν είναι ευνοϊκή από εξεργειακή σκοπιά. Τις ελάχιστες τιμές εξεργειακής απόδοσης επιφέρει η χρήση του τολουολίου.

Μέγιστη μαζική παροχή έχει το R1234yf, το οποίο απαιτεί και τη μέγιστη ποσότητα



νερού ψύξης στον συμπυκνωτήρα. Ακολουθεί το R134a με παροχή ίση με 3,6 kg/s και απαίτηση σε ψυκτικό μέσο ίση με 20,4 kg/s. Η ελάχιστη παροχή εργαζόμενου μέσου ισούται με 0,5 kg/s και αντιστοιχεί στη μεθανόλη. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο με 1,1 kg/s και παράλληλα, τις ελάχιστες απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές. Πολύ μικρές απαιτήσεις σε γεωθερμικό ρευστό και νερό ψύξης έχει και το R1233zd(e), του οποίου, ωστόσο, η μαζική παροχή είναι από τις σχετικά υψηλές μεταξύ των οργανικών ουσιών, ξεπερνώντας τα 2 kg/s.

**Πίνακας 7.2.1.6. Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με νερό γεωθερμίας στους 250°C.**

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	4,0	54,2	34,6	35,8	128,6	65,8%	75,1%	74,3%	2,92%
<b>i-C5</b>	2,7	26,0	34,2	29,7	92,6	65,8%	86,0%	74,5%	2,78%
<b>Τολ.</b>	0,6	44,0	30,3	203,4	278,3	73,1%	88,3%	76,7%	0,68%
<b>R152a</b>	3,2	79,8	33,2	44,4	160,5	65,8%	68,4%	75,1%	2,69%
<b>R134a</b>	3,7	105,0	33,0	56,8	198,6	65,7%	63,7%	75,2%	2,52%
<b>R161</b>	3,5	100,6	31,9	59,3	195,2	65,7%	64,9%	75,8%	2,31%
<b>R1234yf</b>	4,8	154,3	35,8	50,6	245,4	65,7%	53,7%	73,7%	3,34%
<b>R1233zd(e)</b>	2,7	32,1	34,1	28,8	97,6	65,8%	83,2%	74,6%	2,90%
<b>MeOH</b>	0,5	46,6	36,8	71,2	155,0	69,1%	81,7%	73,1%	1,32%

Το άθροισμα της καταστροφής εξέργειας στο κύκλο με χρήση τολουολίου ισούται με 278 kW, με το 74% αυτής να λαμβάνει χώρα στον συμπυκνωτήρα. Ακολουθεί το R1234yf με 245 kW, το οποίο, από τον Πίνακα 7.2.1.5, έχει και τη δεύτερη χαμηλότερη τιμή εξεργειακής απόδοσης. Έπονται τα R134a και R161 με περίπου 200 kW. Η ελάχιστη εξεργειακή καταστροφή σημειώνεται με το ισοπεντάνιο και με το R1233zd(e) και είναι μικρότερη από 100 kW. Στην περίπτωση της μεθανόλης, το 46% της ολικής καταστροφής εξέργειας λαμβάνει χώρα στον συμπυκνωτήρα λόγω της αποφυγής υποατμοσφαιρικών πιέσεων, ενώ με τα υπόλοιπα ρευστά η καταστροφή στην συσκευή αυτή κινείται στο εύρος 30-60 kW. Η καταστροφή στην αντλία είναι πολύ μικρή για όλα τα ρευστά, και ειδικά για το τολουόλιο και τη μεθανόλη, ενώ στον στρόβιλο εμφανίζει μία σταθερότητα, κινούμενη στο εύρος 30-36 kW. Για ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, όπως τα R1234yf, R161 και R134a, ο εξατμιστήρας ευθύνεται για τουλάχιστον το 50% της αθροιστικής καταστροφής εξέργειας.

Η εξεργειακή απόδοση του συμπυκνωτήρα για τη μεθανόλη και το τολουόλιο έχει περίπου την ίδια τιμή ανεξάρτητα από τη φύση της πηγής θερμότητας. Για τα υπόλοιπα ρευστά, η απόδοση του εναλλάκτη εμφανίζεται ελαφρώς μειωμένη, κινούμενη στο εύρος 2-3%, και της αντλίας σταθερή περί του 66%. Περίπου ίδιες τιμές με τις υπόλοιπες θερμικές πηγές παρουσιάζει και ο στρόβιλος, με τη μέση τιμή για όλα τα ρευστά να ισούται με 75%. Για τους υδρογονάνθρακες, τη μεθανόλη και το R1233zd(e), ο εξατμιστήρας παρουσιάζει τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση μεταξύ των συσκευών του κύκλου, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη, σε ένα εύρος 54-68%.

Όταν η εξάτμιση του οργανικού ρευστού στο λέβητα γίνεται με γεωθερμικό ρευστό στους 250°C, βέλτιστη επιλογή ρευστού είναι το **ισοπεντάνιο**. Η χρήση του οδηγεί στη μεγιστοποίηση του θερμικού, του ολικού και του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης και στην ελαχιστοποίηση της απαίτησης σε θερμή και ψυχρή βοηθητική παροχή. Επιπλέον, η

μαζική του παροχή είναι η δεύτερη μικρότερη μετά της μεθανόλης, η χρήση της οποίας, ωστόσο, δεν επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα από θερμοδυναμική σκοπιά. Πολύ υψηλές αποδόσεις και μικρές απαιτήσεις νερού ψύξης και γεωθερμίας παρουσιάζει και η χρήση του R1233zd(e), με μειονέκτημα την σχετικά υψηλή μαζική του παροχή, σχεδόν διπλάσια της παροχής του ισοπεντανίου.

ο Καυσαέρια στους 300°C

**Πίνακας 7.2.1.7.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 300°C.

	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	11,4%	36,3%	36,5%	1,52	14,9	2,90
<b>i-C5</b>	14,4%	45,8%	46,2%	1,17	11,8	2,38
<b>Τολ.</b>	11,1%	20,2%	27,7%	1,75	17,0	5,72
<b>R152a</b>	10,6%	32,0%	32,6%	1,81	16,9	3,41
<b>R134a</b>	8,7%	27,9%	28,0%	3,58	20,4	3,81
<b>R161</b>	9,2%	28,8%	29,1%	1,74	19,3	3,72
<b>R1234yf</b>	7,1%	22,9%	23,0%	5,59	24,3	4,48
<b>R1233zd(e)</b>	14,4%	44,7%	45,2%	2,11	12,0	2,46
<b>MeOH</b>	16,9%	32,5%	42,7%	0,40	10,5	3,58

Με εξαίρεση τη μεθανόλη και το τολουόλιο, τα περισσότερα ρευστά επιφέρουν θερμικό βαθμό απόδοσης παρόμοιο με την προηγούμενη πηγή (Πίνακας 7.2.1.5). Η μεθανόλη παρουσιάζει σημαντική αύξηση, αφού πλέον με 16,9% αποτελεί το ρευστό με τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Ακολουθούν το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), με κοντινές μεταξύ τους τιμές, και στην συνέχεια το ισοβουτάνιο, το τολουόλιο και το R152a. Τα υπόλοιπα τρία ρευστά δεν εμφανίζουν κάποια βελτίωση.

Ο μέγιστος ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης με τα καυσαέρια στους 300°C προκύπτει όταν ως λειτουργούν μέσο επιλέγεται το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e). Ακολουθούν η μεθανόλη και το ισοβουτάνιο, ενώ ικανοποιητική είναι και η εξεργειακή απόδοση με χρήση του R152a. Τον ελάχιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης επιφέρει η χρήση τολουολίου και έπειτα R1234yf, ενώ στον εσωτερικό ισχύει το αντίστροφο.

Το R1234yf έχει τη μέγιστη μαζική παροχή και τη μέγιστη απαίτηση για ψύξη, ενώ η μεθανόλη έχει την ελάχιστη, όπως και την ελάχιστη απαίτηση ψυκτικού. Πολύ καλά αποτελέσματα παρουσιάζει και το ισοπεντάνιο, καθώς έχει τη δεύτερη μικρότερη παροχή, ίση με 1,2 kg/s, τη δεύτερη ελάχιστη απαίτηση σε ψυχρή παροχή και την ελάχιστη σε θερμή. Αρκετά ικανοποιητικά είναι και τα αποτελέσματα με το τολουόλιο, το οποίο οδηγεί σε μικρότερες τιμές από το R134a, ωστόσο απαιτεί τη μέγιστη ποσότητα καυσαερίων. Το R1233zd(e) απαιτεί πολύ μικρές ποσότητες βοηθητικών παροχών, όμως έχει αρκετά υψηλή μαζική παροχή, τουλάχιστον πενταπλάσια σε σχέση με τη μεθανόλη.

Στην αντλία καταστρέφεται η ελάχιστη εξέργεια και στον στρόβιλο η καταστροφή κινείται στα συνήθη επίπεδα (Πίνακας 7.2.1.8). Μέγιστη ολική εξεργειακή απώλεια, ίση με 286 kW, παρατηρείται με το R1234yf, που προηγείται του τολουολίου με 255 kW. Η ελάχιστη αθροιστική καταστροφή εξέργειας σημειώνεται με το ισοπεντάνιο, έπειτα με το R1233zd(e) και τη μεθανόλη. Όσο χαμηλότερη είναι η κρίσιμη θερμοκρασία του εξεταζόμενου οργανικού ρευστού, τόσο μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει στον εξατμιστήρα, κάτι που γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση των ρευστών R1234yf, R134a, R161 και R152a.

Πίνακας 7.2.1.8. Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 300°C.

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	4,0	79,5	34,9	33,9	152,4	65,8%	67,1%	74,1%	3,1%
<b>i-C5</b>	2,8	42,8	35,3	25,2	106,2	65,8%	78,5%	73,9%	3,3%
<b>Τολ.</b>	0,7	41,9	29,7	183,0	255,4	73,0%	88,1%	77,1%	0,7%
<b>R152a</b>	2,8	96,2	30,6	58,9	188,5	65,7%	65,8%	76,5%	2,0%
<b>R134a</b>	3,7	133,9	33,0	57,6	228,1	65,7%	58,0%	75,2%	2,5%
<b>R161</b>	3,4	121,0	31,3	62,5	218,2	65,7%	60,9%	76,2%	2,2%
<b>R1234yf</b>	4,7	194,3	35,7	51,5	286,2	65,7%	48,1%	73,7%	3,3%
<b>R1233zd(e)</b>	2,7	45,2	34,0	29,2	111,1	65,8%	77,8%	74,6%	2,9%
<b>MeOH</b>	0,7	36,3	35,4	58,1	130,4	69,1%	84,1%	73,9%	1,3%

Τα ρευστά για τα οποία ο εξατμιστήρας έχει τη μέγιστη εξεργειακή απόδοση είναι το ισοπεντάνιο, το τολουόλιο, η μεθανόλη και το R1233zd(e), δηλαδή αυτά με την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία. Ίδια περίπου απόδοση σημειώνεται ανά ρευστό στην αντλία και στον στρόβιλο, ανεξάρτητα από την χρησιμοποιούμενη πηγή θερμότητας. Ελαφρώς μειωμένες τιμές εμφανίζονται στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συμπυκνωτήρα, δηλαδή 0,7% για το τολουόλιο, 1,3% για τη μεθανόλη και 2-3% για τα υπόλοιπα ρευστά.

Τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή το R1234yf και οι HFCs, αποκλείονται, αφενός καθώς δεν συνδυάζονται τόσο αποδοτικά με τα καυσαέρια στους 300 °C και αφετέρου, λόγω χαμηλών θερμικών βαθμών απόδοσης και υψηλών μαζικών παροχών (Πίνακας 7.2.1.7). Το τολουόλιο εξεργειακά δεν επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ανάμεσα στο ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), το πρώτο δίνει υψηλότερες τιμές των τριών βαθμών απόδοσης και σχεδόν τη μισή μαζική παροχή, συνεπώς η υδροφθορολεφίνη απορρίπτεται. Η **μεθανόλη** παρουσιάζει υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης από το **ισοπεντάνιο** κατά 2,4%, μαζική παροχή χαμηλότερη κατά 0,78 kg/s και μικρότερη απαίτηση σε νερό ψύξης κατά 1,34 kg/s. Από την άλλη μεριά, εξεργειακά το ισοπεντάνιο αποδίδει καλύτερα, με τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό να είναι υψηλότερος κατά 3,5% και τον ολικό κατά 13,4%, ενώ η απαίτηση σε καυσαέρια είναι μικρότερη από της μεθανόλης κατά 1,2 kg/s. Ο καθορισμός του βέλτιστου ρευστού για την συγκεκριμένη πηγή θερμότητας δεν είναι ξεκάθαρος, ειδικά χωρίς τη διεξαγωγή τεχνοοικονομικής ανάλυσης. Τα δύο ρευστά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εξίσου, αφού καμία μεταβλητή δεν κυμαίνεται σε επίπεδα εκτός των επιθυμητών ορίων.

ο Καυσαέρια στους 400 °C

Για αυτή την πηγή θερμότητας, τα ρευστά που επιφέρουν τη μέγιστη θερμική απόδοση (Πίνακας 7.2.1.9) είναι η μεθανόλη και έπειτα το τολουόλιο. Ακολουθούν το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), με τιμές που είναι ίδιες με προηγούμενες θερμικές πηγές. Έπονται το ισοβουτάνιο, το R152a και τα τρία τελευταία ρευστά με τιμές χαμηλότερες από 10%.

Ο εσωτερικός και ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιούνται όταν τα καυσαέρια στους 400 °C εξατμίζουν τη μεθανόλη. Και στις δύο εκφράσεις, τη μεθανόλη διαδέχεται το ισοπεντάνιο, το R1233zd(e), το ισοβουτάνιο και το τολουόλιο. Οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται με το R1234yf και ξεφεύγουν από τα αποδεκτά όρια για το ORC.

**Πίνακας 7.2.1.9.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενο μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 400°C.

	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	11,4%	30,8%	30,9%	1,45	14,9	2,06
<b>i-C5</b>	14,5%	38,9%	39,0%	1,12	11,8	1,69
<b>Τολ.</b>	14,7%	28,9%	33,3%	1,02	11,7	2,29
<b>R152a</b>	10,6%	28,4%	28,5%	1,82	16,9	2,30
<b>R134a</b>	8,7%	23,6%	23,6%	3,49	20,3	2,71
<b>R161</b>	9,2%	24,8%	24,9%	1,68	19,4	2,60
<b>R1234yf</b>	7,1%	19,2%	19,3%	5,59	24,3	3,20
<b>R1233zd(e)</b>	14,5%	38,8%	38,9%	1,95	11,9	1,71
<b>MeOH</b>	19,9%	43,2%	47,0%	0,32	8,3	1,57

Μέγιστη μαζική παροχή και απαίτηση σε νερό ψύξης και γεωθερμικό ρευστό σημειώνεται με εργαζόμενο μέσο το R1234yf, και ακολουθεί το R134a. Η μεθανόλη έχει την ελάχιστη μαζική παροχή, όπως και τις ελάχιστες απαιτήσεις σε ψυχρή και θερμή βοηθητική παροχή. Το τολουόλιο έχει τη δεύτερη ελάχιστη μαζική παροχή και τη δεύτερη ελάχιστη απαίτηση ψυκτικού. Πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα προκύπτουν και με την επιλογή του ισοπεντάνιου, ενώ η παροχή του R1233zd(e) αγγίζει τα 2 kg/s, έχοντας την τρίτη μέγιστη τιμή.

**Πίνακας 7.2.1.10.** Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 400°C.

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	3,8	122,3	34,1	37,7	197,9	65,7%	57,5%	74,6%	2,77%
<b>i-C5</b>	2,7	76,9	34,4	29,1	143,0	65,8%	67,4%	74,4%	2,8%
<b>Τολ.</b>	1,9	21,9	27,1	136,3	187,1	72,8%	92,2%	78,7%	0,6%
<b>R152a</b>	2,8	137,1	30,7	58,3	228,9	65,7%	57,4%	76,5%	2,04%
<b>R134a</b>	3,6	192,7	32,6	58,7	287,6	65,6%	49,1%	75,4%	2,43%
<b>R161</b>	3,3	167,1	30,3	70,6	271,3	65,7%	54,0%	76,7%	1,93%
<b>R1234yf</b>	4,7	266,9	35,7	51,5	358,8	65,7%	40,2%	73,7%	3,29%
<b>R1233zd(e)</b>	2,5	73,9	32,2	36,3	144,9	65,8%	69,0%	75,6%	2,3%
<b>MeOH</b>	1,5	23,2	37,0	44,9	106,6	69,0%	88,5%	73,0%	1,3%

Τα αποτελέσματα για την αντλία και τον στρόβιλο είναι τα αναμενόμενα. Αξιοσημείωτο είναι ότι η καταστροφή εξέργειας στον εξατμιστήρα έχει αυξηθεί σημαντικά για αρκετά ρευστά, από το R1234yf και το R134a έως το R152a και το ισοβουτάνιο. Αντίθετα, για τη μεθανόλη η καταστροφή στην συσκευή αυτή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στον στρόβιλο και τον συμπυκνωτήρα. Με το συγκεκριμένο ρευστό σημειώνεται και η ελάχιστη ολική καταστροφή εξέργειας, ίση με 107 kW, και ακολουθεί το ισοπεντάνιο, με αρκετά υψηλότερη τιμή στα 143 kW. Με το R1234yf μεγιστοποιείται η αθροιστική καταστροφή στα 359 kW. Το τολουόλιο επιφέρει εξεργειακή καταστροφή ίση με 187 kW, με τον συμπυκνωτήρα να ευθύνεται για το 73% αυτής..

Αντίστοιχα με την καταστροφή εξέργειας, οι τιμές των εξεργειακών αποδόσεων της αντλίας, του στρόβιλου και του συμπυκνωτήρα κινούνται στα ίδια επίπεδα με τις υπόλοιπες πηγές θερμότητας (Πίνακες 7.2.1.2, 7.2.1.4, 7.2.1.6, 7.2.1.8). Ο εξατμιστήρας έχει τη μέγιστη απόδοση ανάμεσα στις συσκευές μόνο για το τολουόλιο και τη μεθανόλη, με τιμή πάνω από

88%. Για το R1234yf, τους HFCs και το ισοβουτάνιο η απόδοση του εξατμιστήρα κινείται στο εύρος 40-57%, δηλαδή είναι αρκετά χαμηλή.

Για αυτή την πηγή θερμότητας, ο καθορισμός της βέλτιστης επιλογής ρευστού είναι ξεκάθαρος. Η χρήση της μεθανόλης επιφέρει τη μέγιστη τιμή θερμικού, ολικού και εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Παράλληλα, τόσο η μαζική της παροχή όσο και η απαίτηση σε καυσαέρια και νερό ψύξης είναι οι ελάχιστες ανάμεσα σε όλα τα ρευστά. Συνεπώς, η **μεθανόλη** αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή. Ως εναλλακτικό οργανικό ρευστό, το τολουόλιο απορρίπτεται λόγω της σχετικά χαμηλής εξεργειακής απόδοσης του κύκλου. Αντί της μεθανόλης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν το ισοπεντάνιο, με υψηλές τις τιμές και των τριών βαθμών απόδοσης, χαμηλή μαζική παροχή και χαμηλές απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές, και ακολούθως το R1233zd(e).

ο Καυσαέρια στους 450°C

**Πίνακας 7.2.1.11.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και πηγής απλού ORC με καυσαέρια στους 450°C.

	%n <sub>th</sub>	%n <sub>ex</sub>	%εσωτερικός n <sub>ex</sub>	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{m}_{source}$ (kg/s)
<b>i-C4</b>	11,4%	28,8%	28,9%	1,44	14,9	1,80
<b>i-C5</b>	14,5%	36,4%	36,5%	1,16	11,8	1,47
<b>Τολ.</b>	14,7%	29,3%	32,1%	1,05	11,7	1,85
<b>R152a</b>	10,6%	26,6%	26,7%	1,77	16,9	2,01
<b>R134a</b>	8,7%	22,1%	22,1%	3,49	20,3	2,37
<b>R161</b>	9,2%	23,2%	23,3%	1,63	19,4	2,28
<b>R1234yf</b>	7,2%	18,2%	18,2%	5,41	24,2	2,77
<b>R1233zd(e)</b>	14,5%	36,5%	36,6%	1,97	11,9	1,48
<b>MeOH</b>	20,6%	43,0%	46,0%	0,30	8,02	1,29

Η χρήση της μεθανόλης επιφέρει θερμικό βαθμό απόδοσης υψηλότερο από 20%, συνεπώς ξεπερνά τα αναμενόμενα όρια του οργανικού κύκλου Rankine και προσεγγίζει τα όρια του συμβατικού. Ακολουθεί το τολουόλιο με 14,7%, πολύ κοντά το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e) και στην συνέχεια το ισοβουτάνιο, με 11,4%, και το R152a, με 10,6%.

Αντίστοιχα με τα καυσαέρια στους 400°C, μέγιστος ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης προκύπτει με χρήση της μεθανόλης. Ακολουθεί το R1233zd(e) και το ισοπεντάνιο. Οι εξεργειακές αποδόσεις με το R1234yf και το R134a είναι αρκετά χαμηλές και δεν θεωρούνται αποδεκτές.

Τα ρευστά με τη μέγιστη μαζική παροχή και υψηλές απαιτήσεις σε νερό ψύξης και καυσαέρια είναι τα ίδια με τις προηγούμενες πηγές θερμότητας, δηλαδή το R1234yf και το R134a. Η μαζική παροχή της μεθανόλης είναι η ελάχιστη μεταξύ όλων των ρευστών, ενώ ιδιαίτερη χαμηλή είναι και η παροχή του νερού ψύξης που απαιτεί για την συμπύκνωσή της. Αρκετά χαμηλή είναι και η μαζική παροχή του τολουολίου και έπεται το ισοπεντάνιο.

Η καταστροφή εξέργειας στον εξατμιστήρα, στην περίπτωση των ρευστών χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, είναι αρκετά υψηλή και αποτελεί ένα ποσοστό μεταξύ 62-73% της συνολικής στο κύκλο (Πίνακας 7.2.1.12). Η ελάχιστη ολική καταστροφή εξέργειας προκύπτει όταν χρησιμοποιείται η μεθανόλη. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e). Η καταστροφή στην αντλία και στον στρόβιλο έχουν ανάλογες τιμές για όλα τα ρευστά, ενώ η καταστροφή στον συμπυκνωτήρα μεγιστοποιείται για το τολουόλιο και έπειτα για το R161.



Πίνακας 7.2.1.12. Καταστροφή εξέργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με καυσαέρια στους 450°C.

	Καταστροφή Εξέργειας (kW)					%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Σύνολο	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	3,8	141,5	34,0	38,3	217,6	65,7%	54,0%	74,6%	2,73%
<b>i-C5</b>	2,8	95,0	35,2	25,9	158,9	65,8%	62,2%	74,0%	3,17%
<b>Τολ.</b>	2,0	32,7	27,4	134,6	196,7	72,9%	88,7%	78,5%	0,63%
<b>R152a</b>	2,7	154,9	30,0	63,6	251,3	65,7%	55,0%	76,9%	1,88%
<b>R134a</b>	3,6	219,0	32,6	58,7	313,9	65,6%	45,9%	75,4%	2,43%
<b>R161</b>	3,2	187,1	29,6	77,5	297,3	65,7%	52,0%	77,1%	1,77%
<b>R1234yf</b>	4,6	293,4	35,3	53,0	386,2	65,6%	38,2%	73,9%	3,18%
<b>R1233zd(e)</b>	2,5	89,9	32,4	35,5	160,2	65,8%	64,6%	75,5%	2,36%
<b>MeOH</b>	1,4	29,6	35,1	45,3	111,4	69,0%	85,7%	74,0%	1,25%

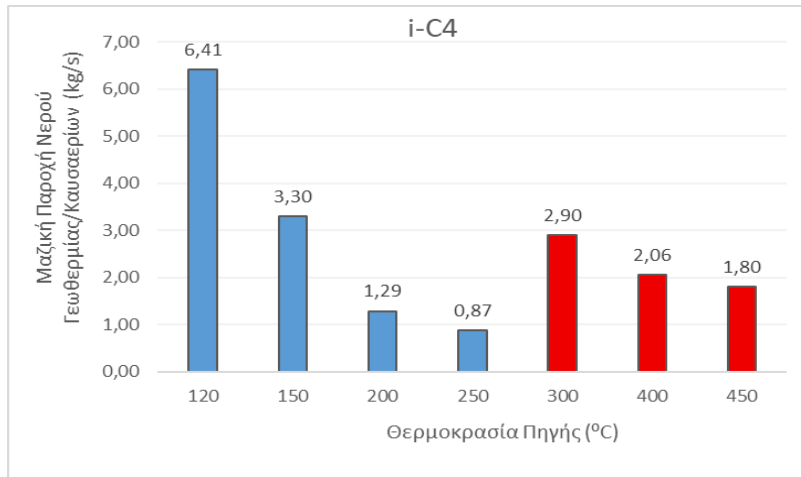
Ο συμπυκνωτήρας, η αντλία και ο στρόβιλος παρουσιάζουν εντελώς ανάλογες τιμές εξεργειακής απόδοσης με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όσον αφορά τον εξατμιστήρα, τα μοναδικά ρευστά για τα οποία έχει υψηλή εξεργειακή απόδοση είναι το τολουόλιο και η μεθανόλη. Η μέση τιμή της απόδοσης για τις υπόλοιπες ουσίες ισούται με μόλις 53%, επιδεικνύοντας ότι μία τόσο θερμή πηγή δεν είναι ιδανική για όλα τα οργανικά ρευστά.

Η **μεθανόλη** μεγιστοποιεί τη θερμοδυναμική απόδοση και ελαχιστοποιεί τις μαζικές παροχές, το ισοπεντάνιο αποτελεί μία πολύ καλή εναλλακτική, όπως και το R1233zd(e) που, σε αυτήν την περίπτωση πηγής, επιφέρει παρόμοιες τιμές αποδόσεων με αυτές του ισοπεντανίου, έχοντας ωστόσο παροχή σχεδόν διπλάσια αυτής του υδρογονάνθρακα.

Από όλα τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι το ισοπεντάνιο είναι ένα πολύ ικανοποιητικό εργαζόμενο μέσο για ένα οργανικό κύκλο Rankine, αφού αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή ρευστού σε εφαρμογές με πηγές θερμότητας θερμοκρασίας στο εύρος 120-300°C. Σε εφαρμογές στις οποίες αξιοποιείται θερμότητα υψηλότερης θερμοκρασίας, η μεθανόλη αποτελεί την καλύτερη επιλογή μεταξύ των εξεταζόμενων οργανικών ρευστών.

### 7.2.2. Αποτελέσματα ανά Οργανικό Ρευστό

Για κάθε υποψήφιο οργανικό ρευστό επιλέγεται η βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας. Παρατίθενται πίνακες που περιέχουν το θερμικό, τον ολικό εξεργειακό και τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης του οργανικού κύκλου Rankine, όπως και τις μαζικές παροχές των ρευστών και του νερού ψύξης για τις επτά διαφορετικές θερμικές πηγές ανά εργαζόμενο μέσο. Οι μαζικές παροχές των καυσαερίων και του γεωθερμικού νερού μειώνονται με την αύξηση της αρχικής τους θερμοκρασίας, όπως προκύπτει και από την Εξίσωση 3.1.1, ανεξάρτητα από το εργαζόμενο μέσο που επιλέγεται. Η μείωση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 7.2.2.1.



Σχήμα 7.2.2.1. Ενδεικτικό διάγραμμα μαζικών παροχών νερού γεωθερμίας και καυσαερίων με εργαζόμενο μέσο στο απλό ORC το i-C4.

ο Ισοβουτάνιο

Πίνακας 7.2.2.1. Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	8,1%	26,9%	40,9%	2,86	22,4
150	10,6%	30,3%	43,9%	1,93	16,1
200	11,4%	42,4%	44,9%	1,49	15,0
250	11,4%	39,5%	40,6%	1,50	15,0
300	11,4%	36,3%	36,5%	1,52	14,9
400	11,4%	30,8%	30,9%	1,45	14,9
450	11,4%	28,8%	28,9%	1,44	14,9

Με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, αυξάνεται η τιμή του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης με το ισοβουτάνιο φτάνει σχεδόν στη μέγιστη τιμή του, ίση με 11,4%, για θερμοκρασία της πηγής στο εύρος 200-450°C. Από την άλλη μεριά, οι τιμές των εξεργειακών αποδόσεων δεν παρουσιάζουν ανοδική τάση με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής, αλλά μεγιστοποιούνται όταν χρησιμοποιείται νερό γεωθερμίας στους 200°C. Δεν παρατηρείται εντελώς αντίστοιχη τάση στον ολικό και στον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, λόγω του ότι τα καυσαέρια ψύχονται σε θερμοκρασίες κοντινές στην νεκρή κατάσταση των 25°C, με αποτέλεσμα ο ολικός και ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης σχεδόν να ταυτίζονται, για θερμοκρασίες από τους 300 έως τους 450°C. Αντίστοιχα με το θερμικό βαθμό απόδοσης, η μαζική παροχή του ισοβουτανίου βαίνει μειούμενη με την αύξηση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας. Παρόμοια τάση σημειώνεται και στο νερό ψύξης, του οποίου η παροχή παραμένει σταθερή στα 14,9 kg/s στο εύρος θερμοκρασιών της πηγής 200-450°C. Για πηγή θερμότητας στους 200°C, η μαζική παροχή του ισοβουτανίου ισούται με 1,49 kg/s, με την ελάχιστη τιμή της να είναι ίση με 1,44 kg/s. Η απαίτηση νερού ψύξης είναι επίσης κοντά στα κατώτατα όρια. Συνεπώς, η βέλτιστη πηγή για το ισοβουτάνιο είναι νερό γεωθερμίας στους 200°C.



ο Ισοπεντάνιο

**Πίνακας 7.2.2.2.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το i-C5 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	8,3%	27,3%	41,6%	2,83	23,5
150	10,8%	31,0%	44,7%	1,96	17,4
200	13,8%	35,0%	46,4%	1,28	12,7
250	14,5%	47,7%	49,6%	1,12	11,8
300	14,4%	45,8%	46,2%	1,17	11,8
400	14,5%	39,0%	39,2%	1,12	11,8
450	14,5%	36,4%	36,5%	1,16	11,8

Η θερμική απόδοση του κύκλου μεγιστοποιείται όταν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας κινείται στο εύρος 250-450°C και ισούται με 14,5%. Τόσο ο ολικός όσο και ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιούνται με χρήση γεωθερμικού νερού στους 250°C. Με την αξιοποίηση των καυσαερίων, οι τιμές των δύο εκφράσεων σχεδόν ταυτίζονται. Για πηγή θερμότητας στους 250°C, η μαζική παροχή του ισοπεντανίου ελαχιστοποιείται στην τιμή των 1,12 kg/s, ενώ η απαίτηση του ψυκτικού μέσου έχει σταθεροποιηθεί στα 11,8 kg/s. Συνεπώς, βέλτιστη πηγή για το ισοπεντάνιο είναι το **νερό γεωθερμίας στους 250°C**.

ο Τολουόλιο

**Πίνακας 7.2.2.3.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το τολουόλιο για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
150	2,0%	2,3%	7,3%	13,1	105,1
200	4,4%	7,3%	13,6%	5,56	46,3
250	10,0%	13,8%	26,1%	2,04	19,1
300	12,6%	18,8%	30,1%	1,42	16,3
400	14,7%	28,9%	33,3%	1,02	11,7
450	14,7%	29,3%	32,1%	1,05	11,7

Από τον Πίνακα 7.2.2.3 προκύπτει ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου, όταν επιλέγεται το τολουόλιο, αυξάνεται σημαντικά, μέχρι που σταθεροποιείται στο 14,7% με χρήση καυσαερίων στους 400 και 450°C. Ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται για την πηγή των 450°C και ο εσωτερικός για αυτή των 400°C. Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση του Pinch Point στην είσοδο του εναλλάκτη θερμότητας και στη ψύξη των καυσαερίων σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Με αυτές τις δύο πηγές θερμότητας, η μαζική παροχή του τολουολίου κυμαίνεται περί του 1 kg/s, από 13 kg/s που ήταν για νερό γεωθερμίας στους 150°C. Η μαζική παροχή του νερού ψύξης μειώνεται κατά 89% με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής στο ίδιο διάστημα. Παρατηρείται μία τάση σταθεροποίησης της παροχής του ψυκτικού μέσου περί των 11,7 kg/s. Μεταξύ των πηγών στους 400 και 450 °C, δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στις μαζικές παροχές. Και οι δύο πηγές θεωρούνται ικανοποιητικές και ενδεχομένως

η βέλτιστη επιλογή να είναι μία θερμοκρασία μεταξύ των ορίων αυτών. Από εξεργειακή σκοπιά, προτιμώνται **τα καυσαέρια στους 400°C**.

ο **R152a**

**Πίνακας 7.2.2.4.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R152a για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	8,2%	25,4%	40,6%	3,63	21,3
150	9,9%	34,6%	43,5%	2,44	17,6
200	10,1%	38,3%	40,4%	2,25	17,3
250	10,3%	34,7%	36,0%	2,05	17,1
300	10,6%	32,0%	32,6%	1,81	16,9
400	10,6%	28,4%	28,5%	1,82	16,9
450	10,6%	26,6%	26,7%	1,77	16,9

Για το συγκεκριμένο ρευστό η επιλογή της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας δεν είναι τόσο ξεκάθαρη. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται μέχρι την τιμή του 10,6% για θερμοκρασίες στο εύρος 300-450°C. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο και για την εξεργειακή απόδοση, αφού η μεν ολική μεγιστοποιείται με γεωθερμικό νερό στους 200°C και η δε εσωτερική στους 150°C. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία της πηγής, και ειδικά με τη χρήση καυσαερίων, οι τιμές των δύο εκφράσεων είναι αρκετά κοντινές και, επιπλέον, λόγω της διατήρησης της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο σε σταθερό επίπεδο, αυξάνεται η απόκλιση από την πηγή θερμότητας. Η μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου μειώνεται κατά 0,67 kg/s ή κατά 27% με αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής από τους 150 στους 450 °C και κατά 0,48 kg/s ή 21% από τους 200 στους 450°C. Η απαίτηση για ψύξη είναι κατά 36% υψηλότερη με θερμότητα στους 120°C, σε σχέση με αυτή στους 450°C. Επιλέγεται ως βέλτιστη θερμοκρασία πηγής **το γεωθερμικό ρευστό στους 200°C**, λόγω του υψηλότερου θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, του σχετικά υψηλού εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης και των μικρότερων μαζικών παροχών, που βέβαια δεν είναι οι ελάχιστες δυνατές,.

ο **R134a**

**Πίνακας 7.2.2.5.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R134a για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	8,0%	27,5%	40,8%	5,01	21,2
150	8,5%	35,4%	40,1%	4,11	20,5
200	8,6%	34,1%	35,3%	3,86	20,5
250	8,7%	30,0%	30,8%	3,60	20,4
300	8,7%	27,9%	28,0%	3,58	20,4
400	8,7%	23,6%	23,6%	3,49	20,3
450	8,7%	22,1%	22,1%	3,49	20,3

Με τη μέγιστη πίεση και τη βέλτιστη θερμοκρασία στην πίεση αυτή, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου με το R134a παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή ίση με 8,7%. Η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής από τους 120 στους 250°C αυξάνει την ενεργειακή απόδοση κατά 0,7%, ενώ στο εύρος θερμοκρασιών 250-450°C η απόδοση παραμένει σταθερή. Ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι μέγιστος, όταν η θερμότητα παρέχεται από γεωθερμικό ρευστό στους 150°C. Αντίθετα, ο εσωτερικός βαίνει μειούμενος με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής, με τις τιμές του για τις δύο ψυχρότερες πηγές να είναι αρκετά κοντινές. Η ελάχιστη τιμή της μαζικής παροχής είναι 3,5 kg/s, δηλαδή αρκετά υψηλή σε σχέση με άλλα εργαζόμενα μέσα, και επιτυγχάνεται, όταν η θερμοκρασία της πηγής είναι η μέγιστη. Οι διακυμάνσεις της απαίτησης ψυκτικού μέσου είναι μικρές και παρατηρείται ένα «πλατό» περί των 20,3 kg/s νερού ψύξης. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η βέλτιστη πηγή θερμότητας για το οργανικό κύκλο Rankine με R134a είναι **το γεωθερμικό ρευστό στους 150°C**, καθώς η χρήση του επιφέρει θερμικό βαθμό απόδοσης χαμηλότερο μόλις κατά 0,1% από το μέγιστο, μέγιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, σχεδόν μέγιστη τιμή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού, μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου υψηλότερη κατά 14,9% από την ελάχιστη και απαίτηση ψυκτικού μόλις 0,8% υψηλότερη από τη χαμηλότερη

ο R161

**Πίνακας 7.2.2.6.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R161 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	7,8%	27,2%	39,9%	2,90	21,4
150	8,6%	34,4%	39,8%	2,28	20,2
200	9,0%	32,7%	34,9%	1,96	19,6
250	9,1%	30,1%	31,3%	1,81	19,5
300	9,2%	28,8%	29,1%	1,74	19,3
400	9,2%	24,8%	24,9%	1,68	19,4
450	9,2%	23,2%	23,3%	1,63	19,4

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης με το R161 για πηγή θερμότητας στους 200°C είναι κατά 0,6% χαμηλότερος από το μέγιστο, που σταθεροποιείται στο 9,2% με χρήση των διαθέσιμων καυσαερίων. Ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται με χρήση γεωθερμικού νερού στους 150°C, ενώ ο εσωτερικός ακολουθεί μία γνησίως φθίνουσα πορεία. Η μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου έχει αντίστοιχη συμπεριφορά, με την τιμή της να εμφανίζει τάση σταθεροποίησης γύρω στα 1,65 kg/s. Η μαζική παροχή του νερού ψύξης εμφανίζει μικρές διακυμάνσεις, κινούμενη σε ένα εύρος μεταξύ 21,5 και 19,5 kg/s, στο κάτω όριο του οποίου σταθεροποιείται. Η βέλτιστη επιλογή πηγής θερμότητας ενδεχομένως να βρίσκεται στο εύρος θερμοκρασιών 150-200°C. Όσο πιο κοντά είναι στο άνω όριο του εύρους αυτού, τόσο υψηλότερος αναμένεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης και χαμηλότερες οι παροχές, όμως χαμηλότερες αναμένονται και οι τιμές της εξεργειακής απόδοσης. Αντίθετα, κοντά στο κάτω όριο του εύρους αυτού, οι παροχές θα έχουν υψηλότερη τιμή, με καλύτερα, ωστόσο, εξεργειακά αποτελέσματα. Συνεπώς, η βέλτιστη επιλογή πηγής είναι **γεωθερμικό νερό θερμοκρασίας στο εύρος 150-200°C**. Για λόγους σύγκρισης, επιλέγεται η τιμή των 150°C.

ο R1234yf

**Πίνακας 7.2.2.7.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R1234yf για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	7,0%	29,7%	38,0%	6,20	24,3
150	7,1%	33,4%	35,7%	5,74	24,3
200	7,1%	29,9%	30,5%	5,45	24,5
250	7,1%	25,3%	25,8%	5,62	24,3
300	7,1%	22,9%	23,0%	5,59	24,3
400	7,1%	19,2%	19,3%	5,59	24,3
450	7,2%	18,2%	18,2%	5,41	24,2

Οι διακυμάνσεις του θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με το συγκεκριμένο ρευστό είναι αρκετά μικρές, με την μέγιστη απόλυτη αύξηση να ισούται με 0,17% και την σχετική με 2,5%. Ο σχετικά σταθερός θερμικός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζει τον καθορισμό της βέλτιστης πηγής. Το ίδιο ισχύει και για την απαίτηση σε νερό ψύξης, που παρουσιάζει μία σταθερότητα περί των 24,2,kg/s ανεξάρτητα από τη φύση της πηγής. Λόγω της κρίσιμης θερμοκρασίας του R1234yf, σίγουρα επιλέγεται ως πηγή το γεωθερμικό ρευστό και όχι τα καυσαέρια. Ανάμεσα στους 120 και τους 150°C, προτιμώνται οι **150°C του γεωθερμικού ρευστού**, καθώς η μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου είναι μόλις 6% υψηλότερη από την ελάχιστη, έναντι 15% που θα ήταν με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Επιπλέον, ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι σημαντικά υψηλότερος και ο εσωτερικός είναι μεν χαμηλότερος, όμως βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων. Ενδεχομένως να ήταν κατάλληλη και μία πηγή θερμότητας θερμοκρασίας μεταξύ 120 και 150°C.

ο R1233zd(e)

**Πίνακας 7.2.2.8.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο το R1233zd(e) για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	8,8%	25,0%	42,9%	4,86	21,7
150	10,7%	31,8%	44,7%	3,80	17,3
200	14,0%	38,4%	48,1%	2,45	12,2
250	14,3%	46,0%	48,3%	2,12	12,0
300	14,4%	44,7%	45,2%	2,11	12,0
400	14,5%	38,8%	38,9%	1,95	11,9
450	14,5%	36,5%	36,6%	1,97	11,9

Η μέγιστη αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης παρατηρείται για θερμοκρασία πηγής θερμότητας στο εύρος 120-200°C. Για τις υπόλοιπες πηγές, η αύξηση είναι πολύ μικρότερη και η μέγιστη τιμή που φτάνει ο θερμικός βαθμός απόδοσης ισούται με 14,5%. Τόσο ο ολικός όσο και ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης φτάνουν στη μέγιστη τιμή τους,

ίση με 46% και 48% αντίστοιχα, όταν η θερμότητα παρέχεται στο κύκλο από γεωθερμικό ρευστό στους 250°C. Η μαζική παροχή του R1233zd(e) μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής από τους 120 στους 250°C, με την σχετική μείωση να ξεπερνά το 55%. Η τιμή της σταθεροποιείται περίπου στα 2 kg/s. Σημειώνεται, επίσης, σημαντική μείωση στην απαίτηση σε ψυκτικό στον συμπυκνωτήρα. Με χρήση πηγών θερμότητας θερμοκρασιών 120 και 200°C, η μαζική παροχή του νερού ψύξης μειώνεται κατά 9,5 kg/s ή κατά 43,8%. Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές. Βέλτιστη θερμοκρασία πηγής για το συγκεκριμένο ρευστό φαίνεται να είναι **το νερό γεωθερμίας στους 250°C**. Παρόλο που η θερμική απόδοση δεν είναι η μέγιστη δυνατή, η απόλυτη απόκλιση της από αυτή είναι μόλις 0,2%. Για τη θερμοκρασία αυτή ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις σε ψυχρή βοηθητική παροχή και μεγιστοποιείται τόσο ο ολικός όσο και ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης.

ο Μεθανόλη

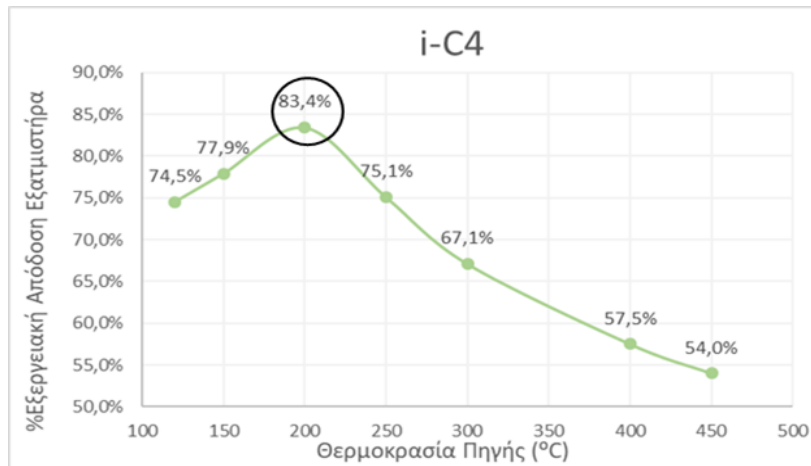
**Πίνακας 7.2.2.9.** Θερμικός, ολικός και εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ORC, μαζική παροχή οργανικού ρευστού και νερού ψύξης με μέσο τη μεθανόλη για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

Θερμοκρασία Πηγής	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)
120	3,6%	9,2%	17,2%	2,32	58,1
150	5,5%	14,4%	22,3%	1,46	37,2
200	9,5%	21,7%	31,1%	0,79	20,5
250	13,9%	27,2%	38,7%	0,52	13,2
300	16,9%	32,5%	42,7%	0,40	10,5
400	19,9%	43,2%	47,0%	0,32	8,3
450	20,6%	43,0%	46,0%	0,30	8,0

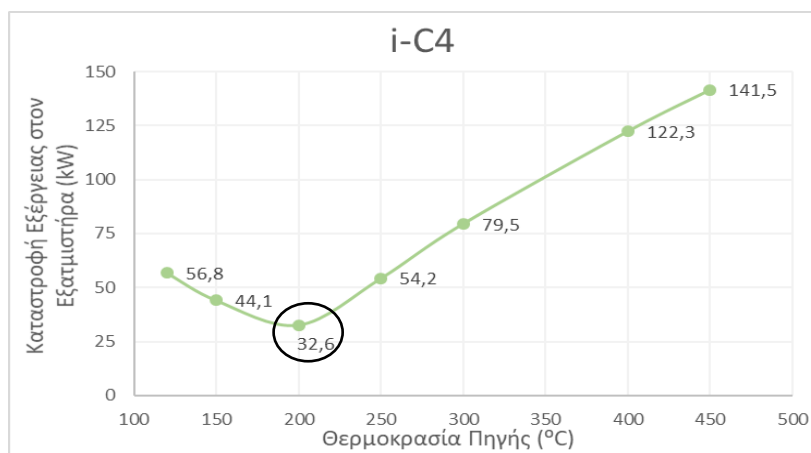
Οι χαμηλές αποδόσεις του ORC με μέσο την μεθανόλη για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας υποδεικνύουν ότι προτιμότερες είναι οι θερμότερες πηγές. Πράγματι, η μέγιστη ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνεται όταν η θερμότητα παρέχεται στους 450°C. Και οι δύο εκφράσεις του εξεργειακού βαθμού απόδοσης παρουσιάζουν αυξητική τάση με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής, και συγκεκριμένα μεγιστοποιούνται με χρήση καυσαερίων στους 400°C, με τις αποδόσεις στους 450°C να είναι εξίσου υψηλές. Η μαζική παροχή της μεθανόλης ελαχιστοποιείται στα 0,3 kg/s με χρήση καυσαερίων στους 450°C. Το νερό ψύξης ακολουθεί αντίστοιχη τάση με τη μαζική παροχή της μεθανόλης, δηλαδή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής και ελαχιστοποιείται για τη μέγιστη θερμοκρασία. Καθώς η σχετική μείωση του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης δεν ξεπερνά το 2,1%, ως βέλτιστη πηγή επιλέγονται **τα καυσαέρια στους 450°C**, ωστόσο ενδέχεται μία καλύτερη επιλογή να ήταν μία θερμοκρασία καυσαερίων ανάμεσα στους 400 και στους 450°C, ενδεχομένως πιο κοντά στο άνω όριο του εύρους αυτού.

Για τα περισσότερα ρευστά η βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας αντιστοιχεί στη μέγιστη εξεργειακή απόδοση και στην ελάχιστη καταστροφή εξέργειας στον εξατμιστήρα του κύκλου, αφού η καταστροφή στην συγκεκριμένη συσκευή αυξάνεται σημαντικά λόγω του μη αποδοτικού συνδυασμού της πηγής με το εργαζόμενο μέσο. Σε κάποιες περιπτώσεις, η μείωση της μεμονωμένης καταστροφής εξέργειας στον εξατμιστήρα επιφέρει και την ελαχιστοποίηση της αθροιστικής εξεργειακής απώλειας στο κύκλο, καθώς οι καταστροφές στις υπόλοιπες συσκευές εμφανίζουν μικρές διακυμάνσεις. Ενδεικτικά, για το ισοβουτάνιο, για το

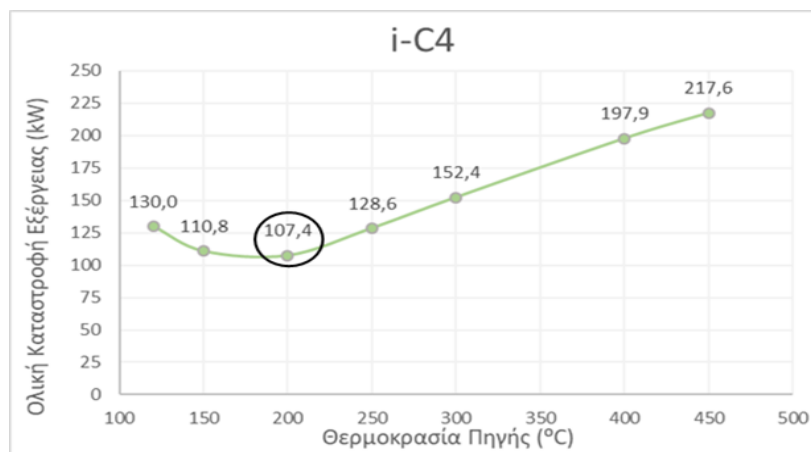
οποίο ως βέλτιστη θερμοκρασία πηγής επιλέχθηκαν οι 200°C, παρατίθενται τα διαγράμματα της τάσης του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του εξατμιστήρα (Σχήμα 7.2.2.2), της μεμονωμένης καταστροφής εξέργειας στην συσκευή αυτή (Σχήμα 7.2.2.3) καθώς και της ολικής καταστροφής στο κύκλο (Σχήμα 7.2.2.4) με την αύξηση της θερμοκρασίας της παρεχόμενης θερμότητας.



Σχήμα 7.2.2.2. Τάση εξεργειακής απόδοσης εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.

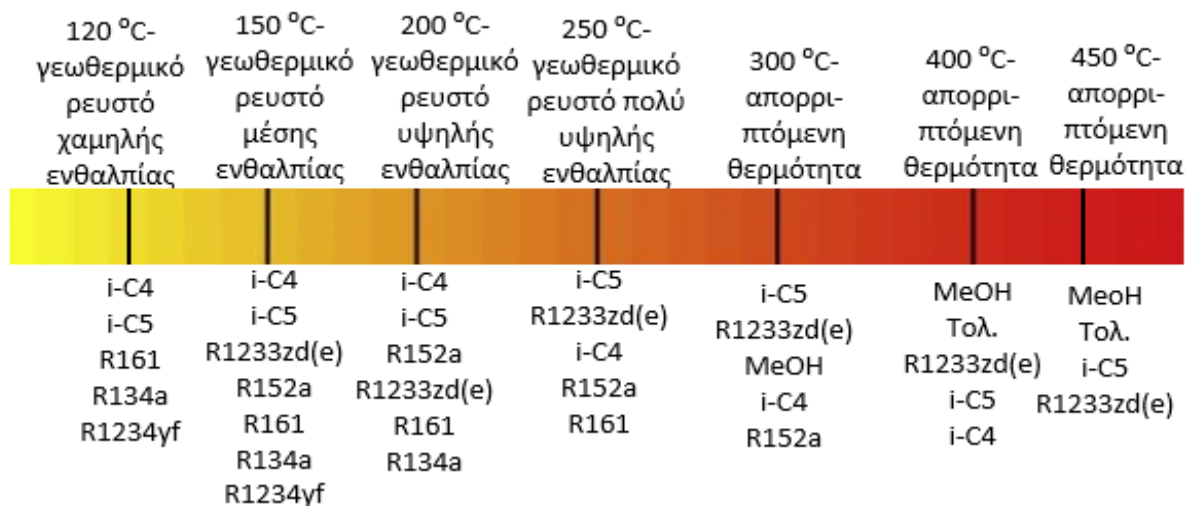


Σχήμα 7.2.2.3. Τάση καταστροφής εξέργειας στον εξατμιστήρα του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.



Σχήμα 7.2.2.4. Τάση συνολικής καταστροφής εξέργειας του υποκρίσιμου απλού ORC με μέσο το i-C4 για διαφορετικές θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας.





Σχήμα 7.2.2.5. Παρουσίαση εξεταζόμενων πηγών θερμότητας για το ORC και οργανικών ρευστών κατάλληλων για καθεμία.

Στο Σχήμα 7.2.2.5 για κάθε πηγή θερμότητας παρουσιάζονται τα ρευστά, τα οποία επιφέρουν ικανοποιητικές τιμές θερμικής και εξεργειακής απόδοσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το ισοπεντάνιο, ως εργαζόμενο μέσο στο οργανικό κύκλο Rankine, οδηγεί σε ικανοποιητικές αποδόσεις, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και τη φύση της θερμικής πηγής. Ακολουθεί το R1233zd(e), το οποίο, αν και έχει υψηλή μαζική παροχή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μία πληθώρα θερμικών πηγών, εξαιρούμενων αυτών με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το τολουόλιο και η μεθανόλη αποτελούν ρευστά κατάλληλα μόνο για πηγές θερμότητας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 300°C. Σε αρκετά μεγάλο εύρος εφαρμογών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ισοβουτάνιο, με θερμικές πηγές μέγιστης θερμοκρασίας περίπου στους 400°C. Το R152a παρουσιάζει ικανοποιητικές αποδόσεις, όταν συνδυάζεται με πηγές μέσης θερμοκρασίας, στο εύρος 150-300°C. Το R1234yf είναι κατάλληλο μόνο για εφαρμογές με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, έως 200°C, ενώ τα ρευστά R134a και R161 μπορούν να εξατμιστούν από θερμότητα χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, έως σχεδόν 300°C.

Τέλος, από την Εξίσωση 1.2.1, υπολογίζεται η απόδοση Carnot, δηλαδή η μέγιστη απόδοση που θα μπορούσε να επιτευχθεί με τις εξεταζόμενες πηγές και το διαθέσιμο ψυκτικό μέσο για παραγωγή ισχύος. Για κάθε ρευστό, υπολογίζεται ο λόγος του πραγματικού θερμικού βαθμού απόδοσης ως προς τον μέγιστο δυνατό, ανάλογα με τη βέλτιστη πηγή θερμότητας.

Πίνακας 7.2.2.10. Βαθμός απόδοσης Carnot και λόγος του θερμικού προς αυτόν με τη βέλτιστη πηγή θερμότητας ανά ρευστό.

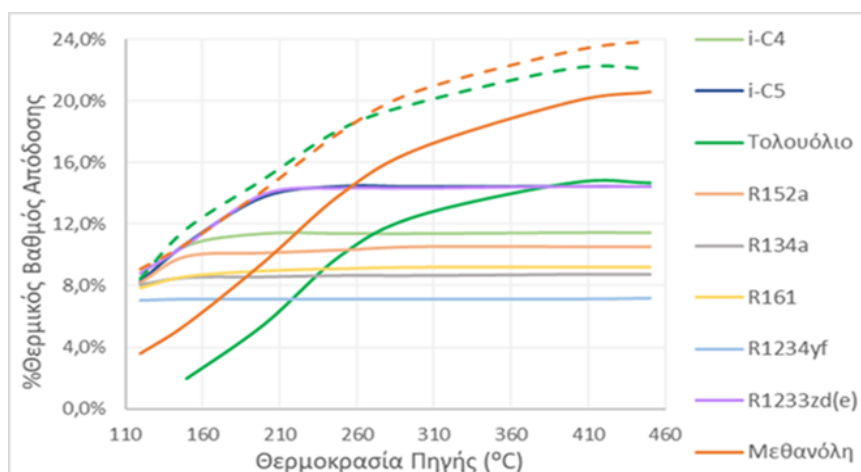
	Βέλτιστη Θερμοκρασία Πηγής (°C)	%Βαθμός Απόδοσης Carnot	Λόγος $\eta_{th}/\eta_{Carnot}$
i-C4	200	38,0%	29,9%
i-C5	250	44,0%	32,9%
Τολουόλιο	400	56,5%	26,0%
R152a	200	38,0%	26,7%
R134a	150	30,7%	27,8%
R161	150	30,7%	28,0%
R1234yf	150	30,7%	23,3%
R1233zd(e)	250	44,0%	32,6%
Μεθανόλη	450	59,5%	34,5%



Τα ρευστά που έχουν ήδη οριστεί ως οι βέλτιστες επιλογές ανάμεσα στα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα, δηλαδή η μεθανόλη, το ισοπεντάνιο, το R1233zd(e) και το ισοβουτάνιο, επιφέρουν τις μέγιστες τιμές του λόγου του θερμικού βαθμού απόδοσης προς την απόδοση Carnot, δηλαδή επιτυγχάνουν το 30-35% της μέγιστης δυνατής απόδοσης. Το R152a και το τολουόλιο επιτυγχάνουν το 26-27% αυτής, ενώ τα R134a και R161 περίπου το 28%. Το R1234yf οδηγεί και πάλι στη χαμηλότερη τιμή, επιτυγχάνοντας μόλις το 23% της μέγιστης απόδοσης που θα επέφερε η χρήση μιας εσωτερικά και εξωτερικά αντιστρεπτής μηχανής.

### 7.2.3. Συγκεντρωτικά Διαγράμματα

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα βασικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του οργανικού κύκλου με πηγές θερμότητας διαφορετικών θερμοκρασιών. Ειδικότερα για τη μεθανόλη και το τολουόλιο, απεικονίζονται, πέρα από τις επιλεγμένες λειτουργικές συνθήκες, και οι περιπτώσεις δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτήρα με διακεκομμένες γραμμές αντίστοιχου χρώματος.

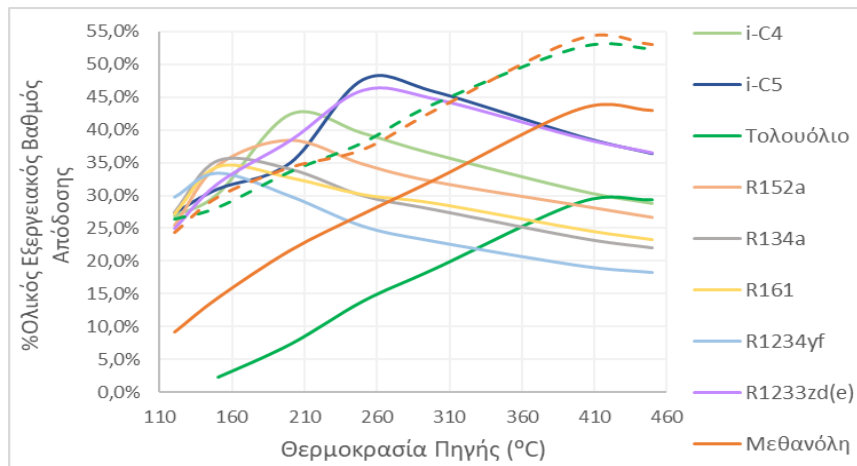


Σχήμα 7.2.3.1. Μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.

Με όλα τα ρευστά, και ειδικά με αυτά με την χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία, προκύπτει ένα «πλατό» στη θερμική απόδοση του κύκλου όταν αξιοποιούνται πηγές θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας. Οι αποδόσεις που επιφέρουν το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e) είναι πολύ κοντινές, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία της πηγής, όπως και αυτές των R161 και R134a. Ελάχιστη, σχεδόν αμελητέα, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η διακύμανση της απόδοσης με χρήση του R1234yf. Το τολουόλιο και η μεθανόλη εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη αύξηση, ξεκινώντας από πολύ χαμηλές τιμές και καταλήγοντας σε αρκετά υψηλές. Γίνεται αντιληπτό ότι και για τα δύο ρευστά η αξιοποίηση υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα επιφέρει αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου για όλες τις πηγές θερμότητας. Η αύξηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικότερη στην περίπτωση του τολουολίου, ενώ για τη μεθανόλη είναι μεγαλύτερη σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι φανερό ότι η δημιουργία κενού στον συμπυκνωτήρα καθιστά το τολουόλιο και τη μεθανόλη αξιόλογα υποψήφια εργαζόμενα μέσα για το ORC, με τις τιμές του θερμικού βαθμού απόδοσης με αυτά τα δύο ρευστά να είναι από τις υψηλότερες, ακόμη και για χαμηλές θερμοκρασίες της πηγής.

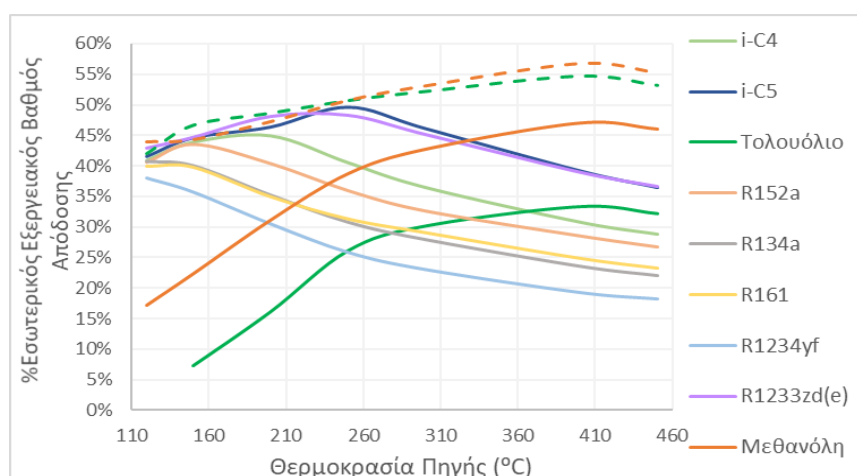
Το κάθε ρευστό εμφανίζει μέγιστο στον ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης (Σχήμα 7.2.3.2) για διαφορετική θερμοκρασία της θερμικής πηγής, η οποία, για τις περισσότερες

ουσίες, είναι η βέλτιστη που ορίστηκε παραπάνω. Για τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή το R1234yf και τους HFCs, ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται, όταν οι θερμικές πηγές έχουν θερμοκρασία χαμηλότερη από 200°C. Αντίθετα, για τη μεθανόλη και το τολουόλιο, οι τιμές των εξεργειακών αποδόσεων φτάνουν στα άνω όριά τους με παροχή θερμότητας στο ORC θερμοκρασίας υψηλότερης από 350°C.

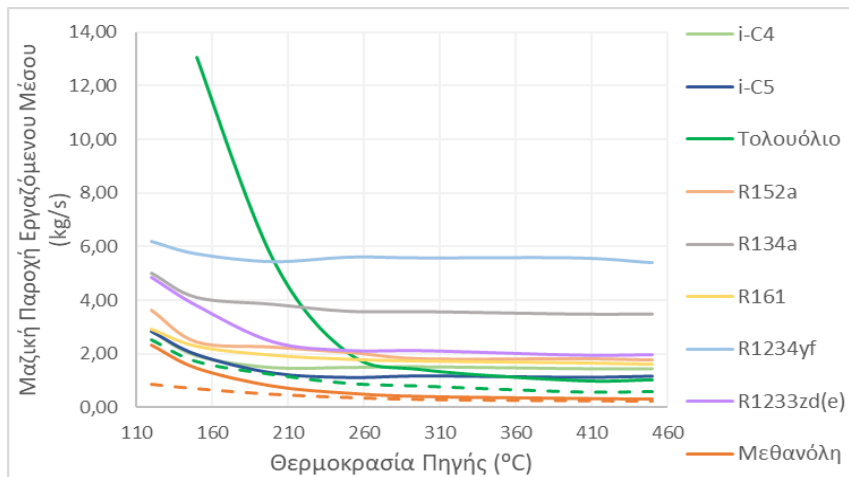


Σχήμα 7.2.3.2. Μεταβολή του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.

Με την ελεύθερη επιλογή πιέσεων στον συμπυκνωτήρα, οι εξεργειακές αποδόσεις του κύκλου, όταν χρησιμοποιείται το τολουόλιο και η μεθανόλη, είναι συγκρίσιμες με των υπόλοιπων ρευστών, ακόμη και για τις χαμηλότερες θερμοκρασίες της πηγής. Τα δύο αυτά ρευστά, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας τους, εμφανίζουν αυξημένες τιμές εξεργειακής απόδοσης με την άνοδο της θερμοκρασίας της πηγής, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ουσίες. Ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης (Σχήμα 7.2.3.3) ακολουθεί παρόμοια τάση με τον ολικό, δηλαδή μεγιστοποιείται για κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία, διαφορετική ανά ρευστό. Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο ότι οι δύο εκφράσεις της εξεργειακής απόδοσης υποδεικνύουν την ίδια τιμή θερμοκρασίας πηγής ως βέλτιστη. Οι αποδόσεις του τολουολίου και της μεθανόλης είναι από τις υψηλότερες, όταν η πίεση είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής, ακόμη και για χρήση γεωθερμικού νερού χαμηλής ενθαλπίας.



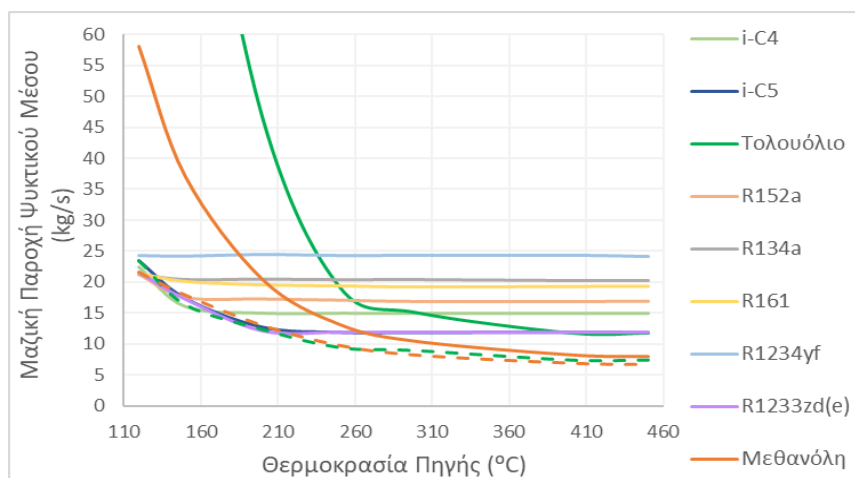
Σχήμα 7.2.3.3. Μεταβολή του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.



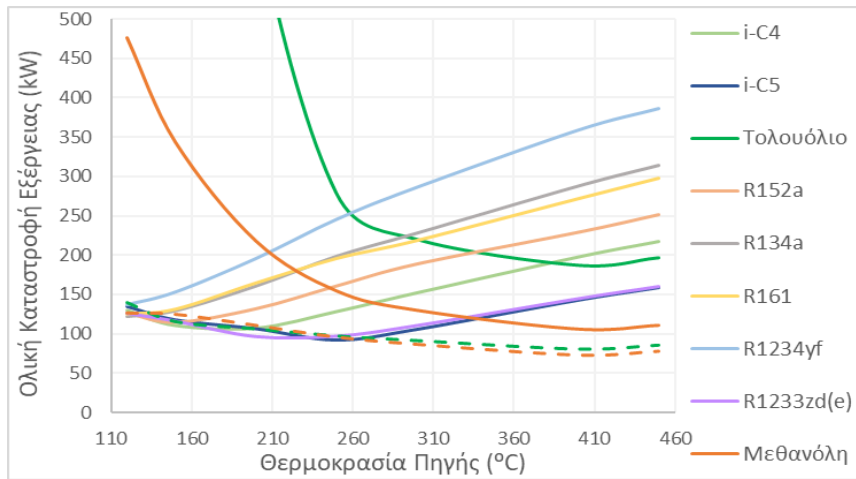
**Σχήμα 7.2.3.4.** Μεταβολή της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου του υποκρίσιμου απλού ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.

Για σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, το τολουόλιο έχει τη μέγιστη μαζική παροχή ανάμεσα στα ρευστά. Όταν η παροχή θερμότητας στο κύκλο γίνεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 200°C, το R1234yf έχει τη μέγιστη παροχή, που αποτελεί και ένα ρευστό με αρκετά μικρές διακυμάνσεις στην παροχή του με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της εισερχόμενης στο κύκλο θερμότητας. Η μεθανόλη έχει την ελάχιστη μαζική παροχή για όλες τις θερμοκρασίες της πηγής και ακολουθεί το ισοπεντάνιο. Η μεθανόλη και το τολουόλιο με υποατμοσφαιρικές πιέσεις έχουν τις ελάχιστες μαζικές παροχές μεταξύ όλων των ρευστών για όλες τις θερμοκρασίες της πηγής.

Η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας μειώνει την απαίτηση σε νερό ψύξης στον συμπυκνωτήρα (Σχήμα 7.2.3.5). Η μέγιστη μείωση παρατηρείται με χρήση των ρευστών υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή με τη μεθανόλη και το τολουόλιο. Για τα ρευστά χαμηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας, όπως το R1234yf και το R134a, η μείωση αυτή είναι σχεδόν αμελητέα. Εντελώς ανάλογη με του εργαζόμενου μέσου είναι και η συμπεριφορά του νερού ψύξης όταν οι πιέσεις είναι με επιλογή του τολουολίου και της μεθανόλης υποατμοσφαιρικές, δηλαδή η παροχή του μειώνεται, με τη μείωση να είναι σημαντικότερη για χαμηλές θερμοκρασίες πηγής.



**Σχήμα 7.2.3.5.** Μεταβολή της μαζικής παροχής του νερού ψύξης στο υποκρίσιμο απλό ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.



**Σχήμα 7.2.3.6.** Μεταβολή της ολικής καταστροφής εξέργειας στο υποκρίσιμο απλό ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας.

Η ολική καταστροφή εξέργειας στο οργανικό κύκλο Rankine εμφανίζει ελάχιστο για όλα τα ρευστά για διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας της πηγής. Η ελαχιστοποίηση της εξεργειακής καταστροφής σημειώνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες για ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και σε υψηλότερες για ρευστά υψηλής. Εντυπωσιακή είναι η μείωση της αθροιστικής καταστροφής εξέργειας στο κύκλο με την επιλογή υποατμοσφαιρικών πιέσεων για το τολουόλιο και τη μεθανόλη, ειδικά για χαμηλές θερμοκρασίες στις οποίες εισέρχεται η θερμότητα στον εξατμιστήρα. Η μείωση αυτή έχει να κάνει με την ελάττωση της θερμοκρασίας εισόδου του εργαζόμενου μέσου στην αντλία. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για το τολουόλιο με νερό γεωθερμίας στους 150°C, η καταστροφή εξέργειας στο κύκλο μειώνεται από τα 1268 στα 115 kW, δηλαδή κατά 91%, με την επιλογή υποατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα.

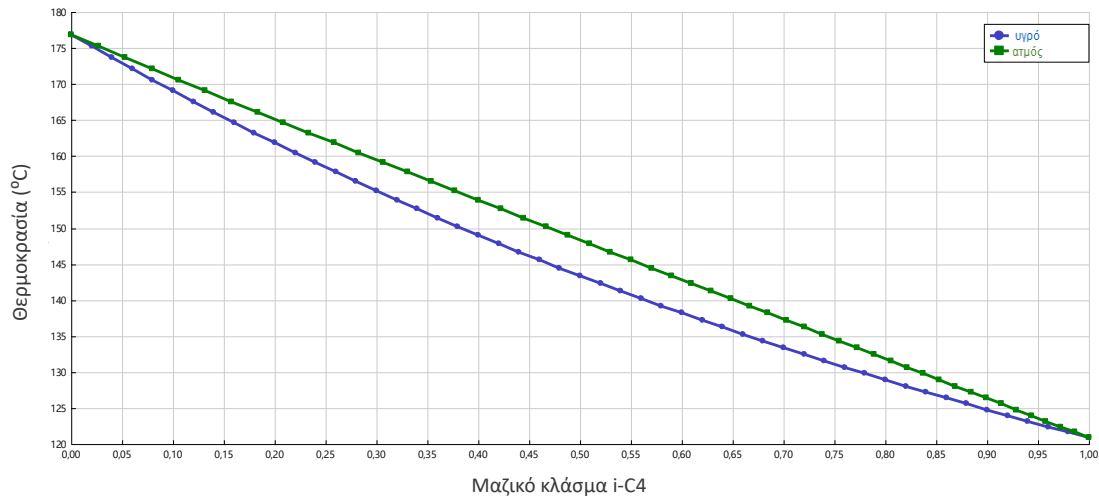
## 8. Απλό Οργανικό Κύκλο Rankine με Μίγματα

### 8.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών

Στο Κεφάλαιο 3 επιλέχθηκαν τα δυαδικά μίγματα που εξετάζονται ως εργαζόμενα μέσα στο οργανικό κύκλο Rankine. Στο σημείο αυτό καθορίζονται οι λειτουργικές συνθήκες καθώς και οι συστάσεις των επιλεγμένων μιγμάτων. Η πρώτη επιλογή της σύστασης είναι αυτή που οδηγεί στη μέγιστη τιμή της θερμοκρασιακής ολίσθησης στον συμπυκνωτήρα και στον εξατμιστήρα, χωρίς να ξεπερνά το άνω όριο που τέθηκε στις Παραδοχές (Κεφ. 3.5). Ωστόσο, εξετάζονται και άλλες πιθανές συστάσεις, ώστε να προσδιοριστούν αυτές που οδηγούν στη βέλτιστη θερμοδυναμική απόδοση. Η πηγή θερμότητας είναι αποκλειστικά το γεωθερμικό ρευστό στους 200°C. Τα μίγματα εξετάζονται σε υποκρίσιμες συνθήκες και η μέγιστη πίεση του κύκλου τίθεται ίση με την χαμηλότερη, εκ των δύο συστατικών, κρίσιμη πίεση, μειωμένη κατά 5 bar. Ο εξατμιστήρας έχει τέσσερα κελύφη σε σειρά, δηλαδή η επιφάνεια εναλλαγής είναι κοινή με την προσομοίωση των καθαρών ουσιών, ενώ ο συμπυκνωτήρας δύο, οδηγώντας σε επιφάνεια ίση με 120,6 m<sup>2</sup>.

#### ο Ισοβουτάνιο-Ισοπεντάνιο

Μεταξύ αυτών των δύο ρευστών, το ισοπεντάνιο έχει τη μικρότερη κρίσιμη πίεση. Συνεπώς, η μέγιστη πίεση στο κύκλο τίθεται ίση με 28,8 bar. Για την πίεση αυτή του εξατμιστήρα, το διάγραμμα φάσεων του μίγματος έχει την εξής μορφή:

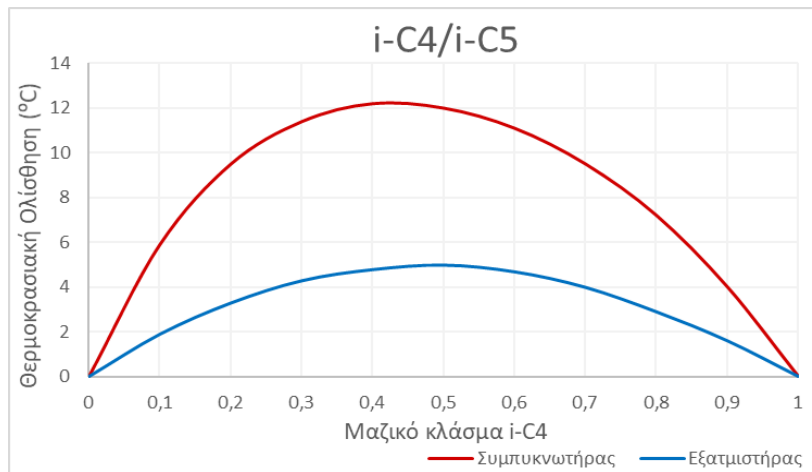


Σχήμα 8.1.1. Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα i-C4/i-C5 στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 8.1.1, για το συγκεκριμένο μίγμα δεν προκύπτει αζεότροπο στην επιλεγμένη πίεση.

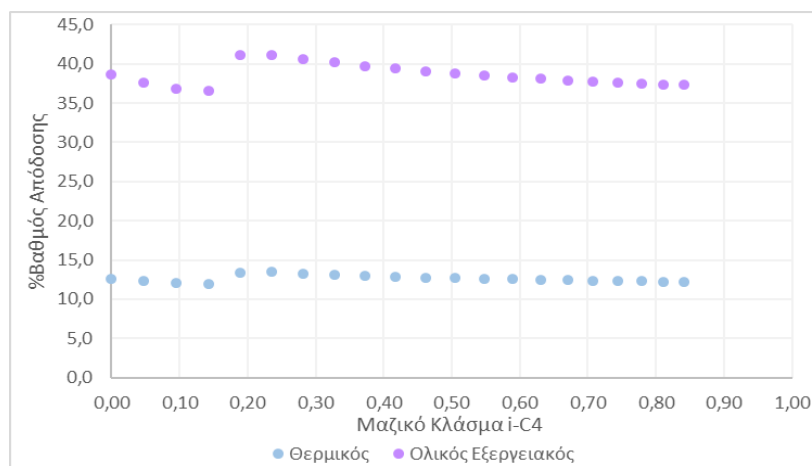
Η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στην αντλία είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις καθαρές ουσίες λόγω της θερμοκρασιακής ολίσθησης στον συμπυκνωτήρα, με το Pinch Point να παρατηρείται στην είσοδο του εναλλάκτη θερμότητας και όχι στο σημείο του κορεσμένου υγρού. Εφόσον, λοιπόν, η αρχική θερμοκρασία του νερού ψύξης ισούται με 20°C και η τιμή της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς τίθεται περίπου στους 4°C, η θερμοκρασία εισόδου του μίγματος στην αντλία ισούται με 24°C και η πίεση στον συμπυκνωτήρα με την

τάση ατμών στη θερμοκρασία αυτή. Ξεκινώντας από καθαρό ισοβουτάνιο και αυξάνοντας το κλάσμα μάζας του ισοπεντανίου με βήμα 10%, λαμβάνονται από το λογισμικό οι τιμές της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους δύο εναλλάκτες θερμότητας και δημιουργείται το παρακάτω διάγραμμα.



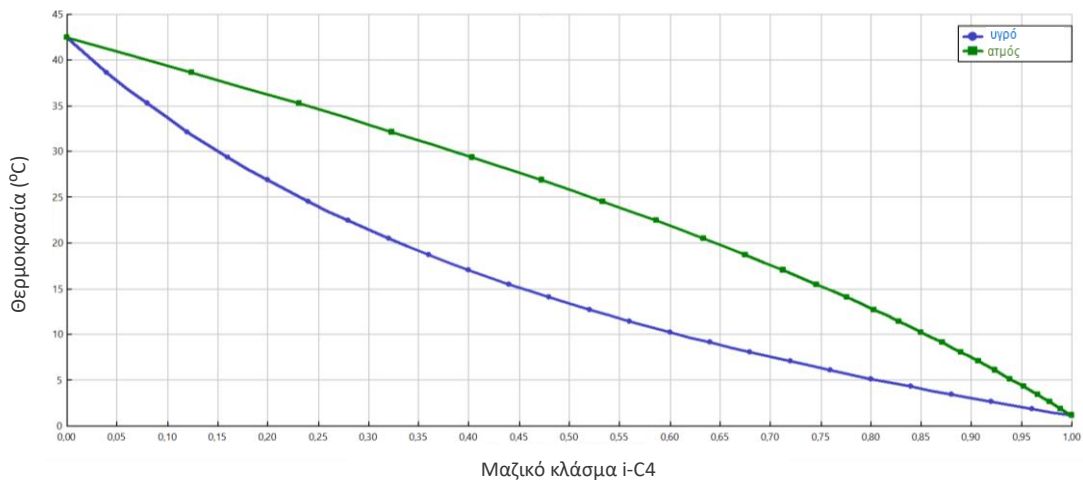
**Σχήμα 8.1.2.** Εξάρτηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους δύο εναλλάκτες θερμότητας του υποκρίσιμου απλού ORC από την σύσταση του μίγματος i-C4/i-C5.

Αρχικά, επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της πίεσης μειώνει την τιμή της θερμοκρασιακής ολίσθησης του μίγματος. Επιλέγεται, περίπου, η σύσταση που μεγιστοποιεί την ολίσθηση, δηλαδή 45% κατά μάζα σε ισοβουτάνιο. Για την σύσταση αυτή, η ολίσθηση στον συμπυκνωτήρα ισούται με 12,1°C και στον εξατμιστήρα με 4,9°C και η τάση ατμών στους 24°C ισούται με 215,7 kPa. Διαπιστώνεται, ωστόσο, ότι η επιλογή μαζικού κλάσματος ισοβουτανίου ίσου με 25% οδηγεί σε ελαφρώς αυξημένες τιμές ενεργειακής και εξεργειακής απόδοσης, με την σχετική αύξηση να αγγίζει το 5% και το 2% αντιστοίχως, όπως αποτυπώνεται στην ανάλυση ευαισθησίας του Σχήματος 8.1.3. Συνεπώς, παρόλο που η αύξηση είναι μικρή, η μαζική σύσταση σε ισοβουτάνιο επιλέγεται ίση με 25%. Να σημειωθεί ότι στο Σχήμα 8.1.3 φαίνεται ότι μία χαμηλότερη ποσότητα ισοβουτανίου μεγιστοποιεί τις αποδόσεις. Ωστόσο, η επιλογή αυτής επιβάλλει την αλλαγή των υπόλοιπων μεταβλητών εισόδου, με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης και άρα, να μην αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή σύστασης για το συγκεκριμένο μίγμα.



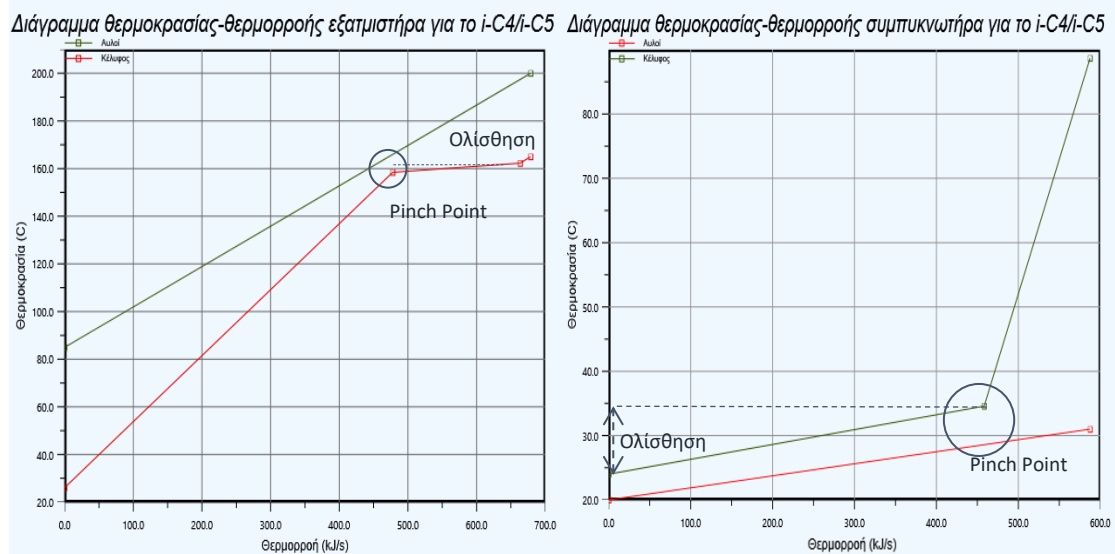
**Σχήμα 8.1.3.** Τάση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με την αλλαγή της σύστασης του μίγματος i-C4/i-C5.

Για την επιλεγμένη σύσταση, η ολίσθηση στον εξατμιστήρα προκύπτει ίση με 3,9°C και στον συμπυκνωτήρα με 10,6°C. Η τάση ατμών του μίγματος στους 24°C είναι ίση με 163,4 kPa και το διάγραμμα φάσεων στην πίεση αυτή έχει την παρακάτω μορφή:



**Σχήμα 8.1.4.** Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα *i*-C4/*i*-C5 στην πίεση του συμπυκνωτήρα (163,4 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος.

Απομένει ο ορισμός της θερμοκρασίας εισόδου του μίγματος στον στρόβιλο και της τελικής θερμοκρασίας του νερού γεωθερμίας. Σε αντιστοιχία με το καθαρό ισοπεντάνιο, το οποίο συμμετέχει στο μίγμα κατά μεγαλύτερο ποσοστό, είναι ευνοϊκή από θερμοδυναμική σκοπιά η είσοδος κορεσμένου και όχι υπέρθερμου ατμού στην τουρμπίνα. Με χρήση περίπου τριών βαθμών υπερθέρμανσης, η θερμοκρασία στο σημείο 3 του Σχήματος 5.1.1 ορίζεται στους 165°C. Για να ισχύει η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον εξατμιστήρα, το γεωθερμικό ρευστό ψύχεται στους 85°C. Για τις επιλεγμένες συνθήκες, παρατίθενται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμορροής στους δύο εναλλάκτες θερμότητας ώστε να γίνει αντιληπτή η θερμοκρασιακή ολίσθηση:



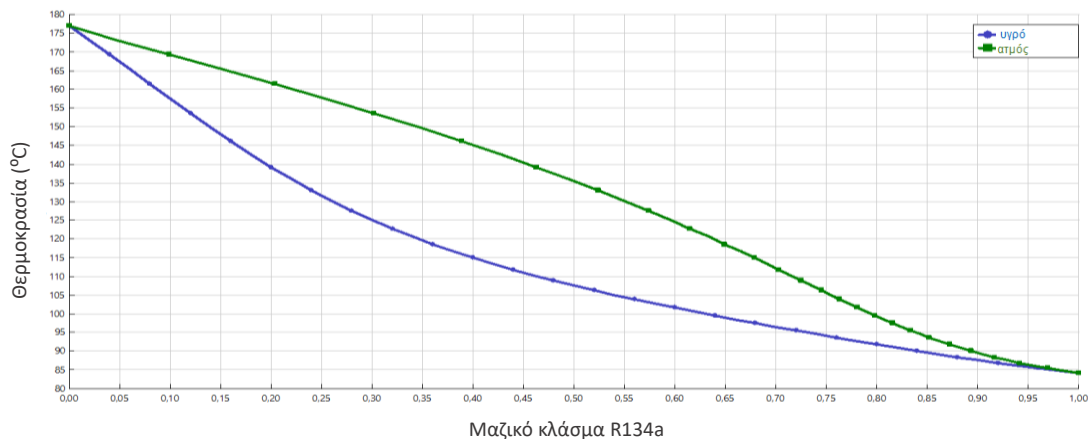
**Σχήμα 8.1.5.** Ενδεικτικό διάγραμμα  $T-Q$  στον εξατμιστήρα (αριστερά) και στον συμπυκνωτήρα (δεξιά) του υποκρίσιμου απλού ORC για το μίγμα *i*-C4/*i*-C5 στην βέλτιστη σύστασή του.



Στο Σχήμα 8.1.5 η θερμοκρασία του μίγματος στους δύο εναλλάκτες θερμότητας δεν παραμένει σταθερή κατά την αλλαγή φάσης, με τη μεταβολή στον συμπυκνωτήρα να είναι αρκετά πιο έντονη σε σχέση με τον εξατμιστήρα.

ο Ισοπεντάνιο-R134a:

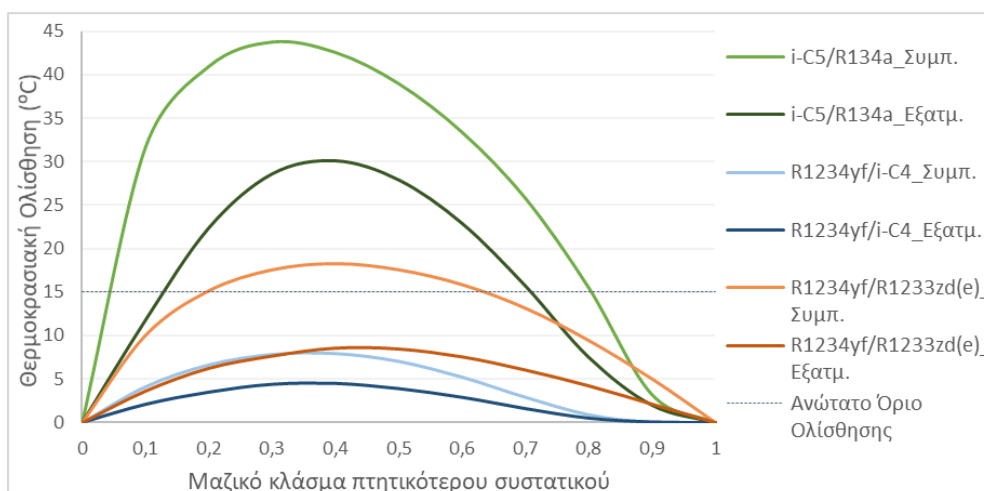
Το ισοπεντάνιο έχει και πάλι την ελάχιστη κρίσιμη πίεση, συνεπώς η μέγιστη επιτρεπτή πίεση στο κύκλο είναι κοινή με το πρώτο μίγμα. Στην πίεση αυτή, το διάγραμμα φάσεων του δυαδικού μίγματος έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 8.1.6. Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα *i*-C5/R134a στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).

Για το συγκεκριμένο μίγμα παρατηρείται ότι, για σύσταση υψηλότερη από 95% κατά μάζα σε R134a, προκύπτει αζεότροπο, συνεπώς τίθεται ο περιορισμός η σύσταση του μίγματος σε R134a να μην ξεπερνά το 90% κατά μάζα.

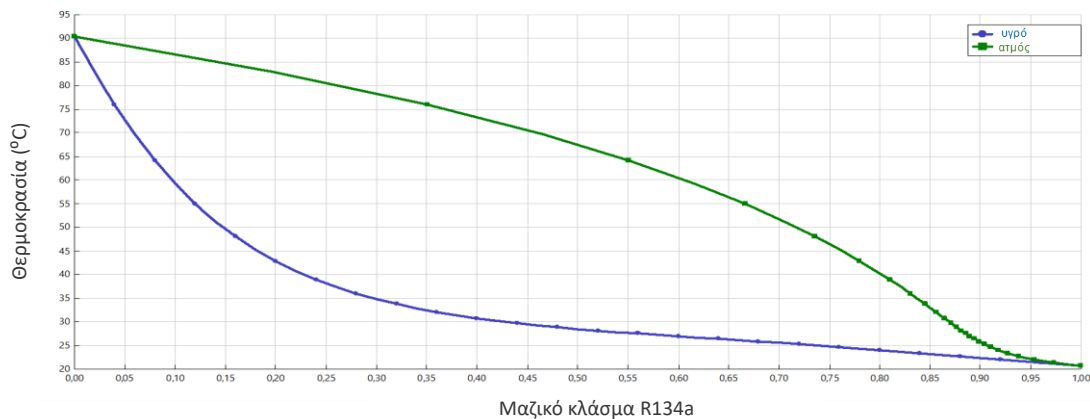
Για την επιλογή της σύστασης αυτού του μίγματος, όπως και των επόμενων, δηλαδή του μίγματος των δύο υδροφθορολεφινών και του ισοβουτανίου με το R1234yf, δημιουργείται κοινό διάγραμμα της τάσης της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους εναλλάκτες θερμότητας του κύκλου με μεταβολή του μαζικού κλάσματος το πιο πτητικού συστατικού, δηλαδή του R134a και του R1234yf αντίστοιχα.



Σχήμα 8.1.7. Εξάρτηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους δύο εναλλάκτες θερμότητας του υποκρίσιμου απλού ORC από την σύσταση των μιγμάτων *i*-C5/R134a, R1234yf/*i*-C4 και R1234yf/R1233zd(e).

Σε σύγκριση με το Σχήμα 8.1.2, οι τιμές της ολίσθησης είναι πολύ υψηλότερες για το μίγμα ισοπεντανίου/R134a. Συνεπώς, δεν επιλέγεται η σύσταση που μεγιστοποιεί την ολίσθηση, αλλά αυτή που οδηγεί σε τιμές ολίσθησης εντός του περιορισμού των 15 βαθμών. Οι συστάσεις αυτές είναι είτε σχεδόν καθαρό ισοπεντάνιο (με μαζικό κλάσμα του R134a μικρότερο από 5%) είτε 0,8/0,2 κατά μάζα σε R134a/i-C5. Από τις συστάσεις αυτές επιλέγεται η δεύτερη, που είναι μεν μακριά από το αζεότροπο, έχοντας δε ικανές ποσότητες και των δύο συστατικών. Για τη σύσταση αυτή, η ολίσθηση στον συμπυκνωτήρα ισούται με 15,5°C και στον εξατμιστήρα με 7,5°C.

Το Pinch Point σημειώνεται και πάλι στην είσοδο του συμπυκνωτήρα, με αποτέλεσμα η πίεση του εργαζόμενου μέσου να ισούται με την τάση ατμών του επιλεγμένου μίγματος στους 24°C, δηλαδή 584,7 kPa, για την οποία το διάγραμμα φάσεων έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 8.1.8. Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R134a/i-C5 στην πίεση του συμπυκνωτήρα (584,7 kPa).

Τα διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμορροής είναι αντίστοιχα με αυτά του Σχήματος 8.1.5, με τη διαφορά ότι η ολίσθηση, και άρα η κλίση κατά την αλλαγή φάσης είναι μεγαλύτερη και στους δύο εναλλάκτες θερμότητας. Όσον αφορά την επιλογή των υπόλοιπων λειτουργικών συνθηκών, η συμμετοχή του υγρού ρευστού, δηλαδή του HFC, οδηγεί στην ανάγκη υπερθέρμανσης του μίγματος στον εξατμιστήρα. Με δοκιμές, επιλέγεται θερμοκρασία ίση με 149°C στην είσοδο του στροβίλου, δηλαδή υπερθέρμανση ίση με 49,7 βαθμούς. Το γεωθερμικό ρευστό εξέρχεται από τον εξατμιστήρα στους 44°C και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά σημειώνεται στο σημείο του κορεσμένου υγρού.

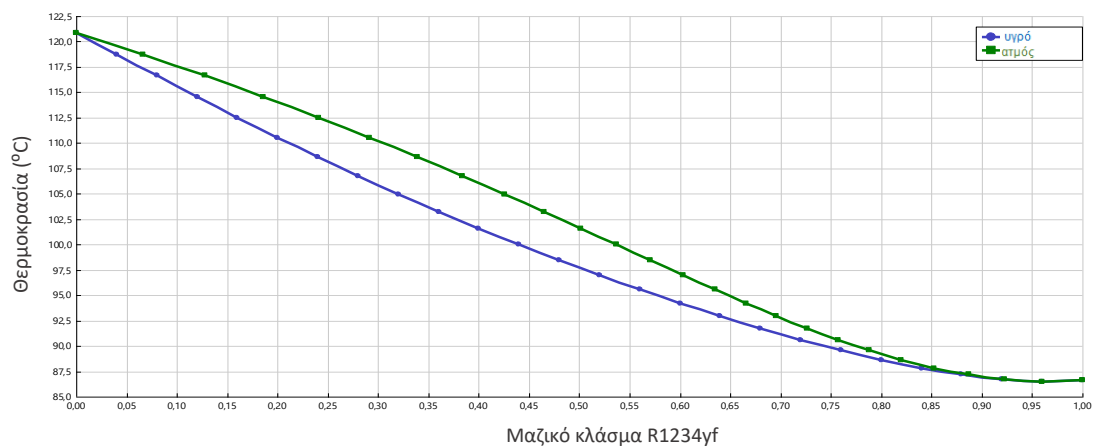
ο R1234yf-Ισοβουτάνιο:

Η μέγιστη πίεση του μίγματος είναι η κρίσιμη της υδροφθοροολεφίνης, μειωμένη κατά 5 bar, και ισούται με 2880 kPa. Από το διάγραμμα φάσεων στην πίεση αυτή (Σχήμα 8.1.9) γίνεται αντιληπτό ότι, όταν το R1234yf συμμετέχει στο μίγμα σε ποσότητες υψηλότερες από 85% κατά μάζα, προκύπτει αζεότροπο ελαχίστου σημείου βρασμού. Συνεπώς, τίθεται ο περιορισμός το μαζικό κλάσμα της υδροφθοροολεφίνης να μην ξεπερνά το 0,8, προκειμένου το μίγμα να είναι ζεοτροπικό.

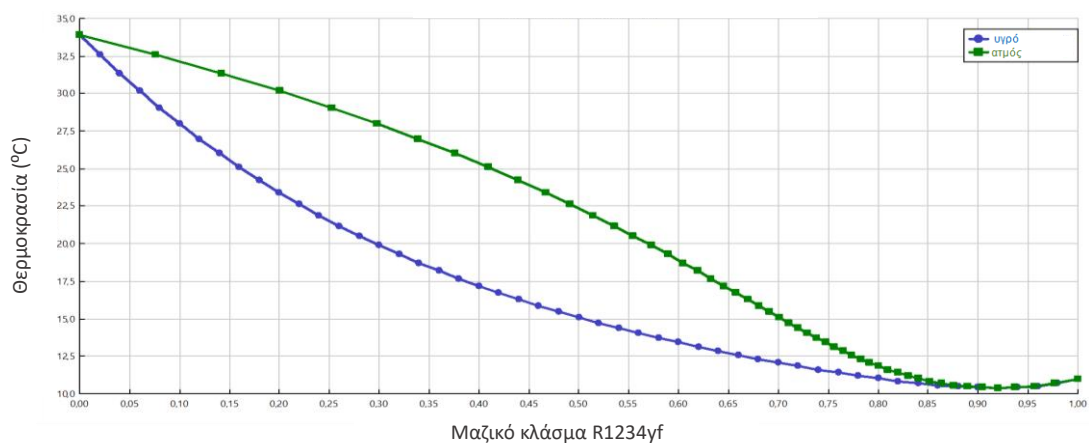
Στο Σχήμα 8.1.7, οι τιμές της θερμοκρασιακής ολίσθησης με το συγκεκριμένο μίγμα δεν ξεπερνούν τους 8°C στον συμπυκνωτήρα και τους 5°C στον εξατμιστήρα. Η σύσταση που μεγιστοποιεί τις τιμές αυτές είναι περίπου 40% κατά μάζα σε ισοβουτάνιο. Διερευνώνται και διαφορετικές συστάσεις του συγκεκριμένου δυαδικού μίγματος. Από τη μελέτη των καθαρών ρευστών, προέκυψε ότι το R1234yf επέφερε αρκετά χαμηλές θερμικές και εξεργειακές αποδόσεις (Σχήματα 5.2.1-5.2.3). Συνεπώς, η ανάμειξή του με άλλα ρευστά αναμένεται να

επιφέρει αποτελέσματα καλύτερα από αυτά της καθαρής υδροφθορολεφίνης, αλλά ενδεχομένως χειρότερα από του άλλου συστατικού του μίγματος. Πράγματι, η επιλογή μίας σύστασης 0,9/0,1 σε ισοβουτάνιο/R1234yf κατά μάζα οδηγεί σε σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης ίση με 9,6% και του εξεργειακού ίση με 7,4%, παρόλο που δεν είναι μέγιστη η θερμοκρασιακή ολίσθηση. Επομένως, αποτελεί τη βέλτιστη σύσταση, με την τιμή της ολίσθησης να προκύπτει μόλις 4,1°C στον συμπυκνωτήρα και 2,1°C στον εξατμιστήρα. Η τάση ατμών του μίγματος αυτού στους 24°C ισούται με 450,9 kPa και το διάγραμμα φάσεων στην πίεση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1.10.

Η θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο τίθεται ίση με 145°C, δηλαδή το μίγμα υπερθερμαίνεται κατά 27 βαθμούς. Το γεωθερμικό νερό ψύχεται από τους 200°C στους 45,5°C.

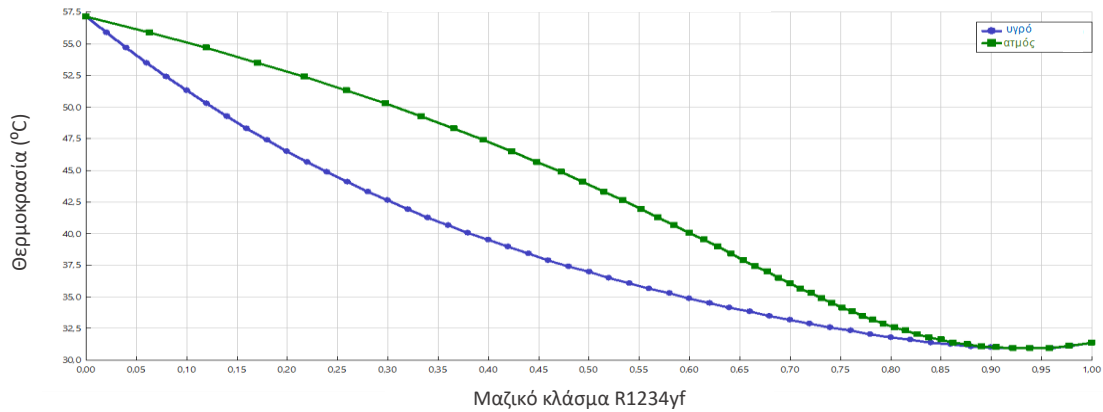


**Σχήμα 8.1.9.** Διάγραμμα φάσεων για το ζεοτροπικό μίγμα *i*-C4/R1234yf στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).



**Σχήμα 8.1.10.** Διάγραμμα φάσεων για το ζεοτροπικό μίγμα *i*-C4/R1234yf στην πίεση του συμπυκνωτήρα (450,9 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος.

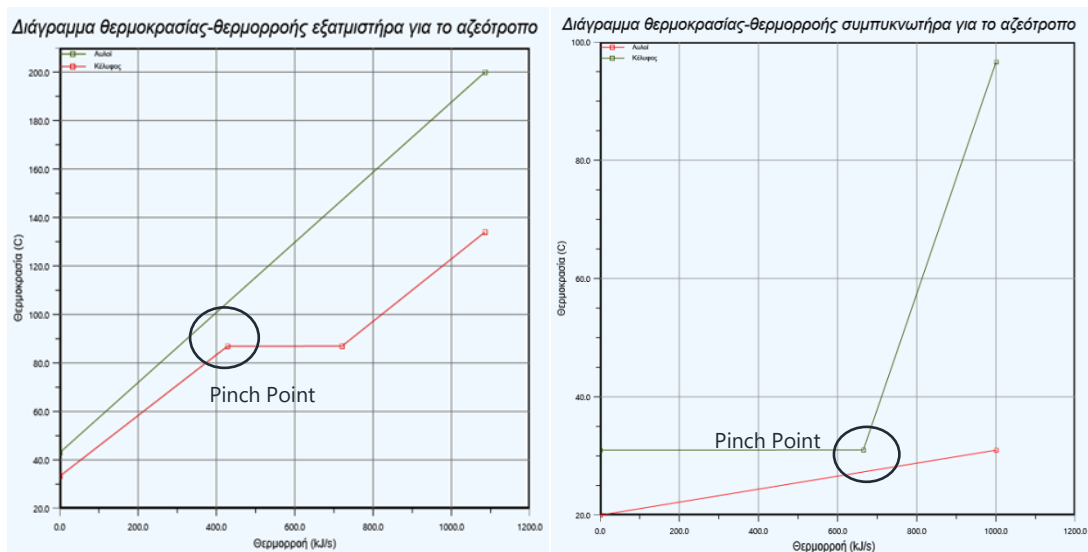
Μελετάται, επίσης, μίγμα αναλογίας 90% σε R1234yf και 10% σε ισοβουτάνιο κατά μάζα για σύγκριση του αζεοτροπικού με το ζεοτροπικό μίγμα των ίδιων συστατικών. Για να ισχύει η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτήρα, η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στην αντλία τίθεται ίση με 31°C, έχοντας μία σημαντικά υψηλότερη τιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα μίγματα λόγω της απουσίας του φαινομένου της θερμοκρασιακής ολίσθησης. Για τη θερμοκρασία αυτή, το συγκεκριμένο μίγμα έχει τάση ατμών ίση με 812,7 kPa και το διάγραμμα φάσεων αποτυπώνεται στο Σχήμα 8.1.11.



Σχήμα 8.1.11. Διάγραμμα φάσεων για το αζεotropικό μίγμα  $i\text{-C4/R1234yf}$  στην πίεση του συμπυκνωτήρα (812,7 kPa).

Το μίγμα υπερθερμαίνεται στον εξατμιστήρα κατά  $47^\circ\text{C}$  και εισάγεται στον στρόβιλο σε θερμοκρασία ίση με  $134^\circ\text{C}$ . Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά του εργαζόμενου μέσου και του γεωθερμικού ρευστού εμφανίζεται στην είσοδο του εναλλάκτη θερμότητας και όχι στο σημείο του κορεσμένου υγρού, σε αντίθεση με τα ζεotropικά μίγματα. Το νερό γεωθερμίας εξέρχεται από τον εξατμιστήρα στους  $43^\circ\text{C}$ .

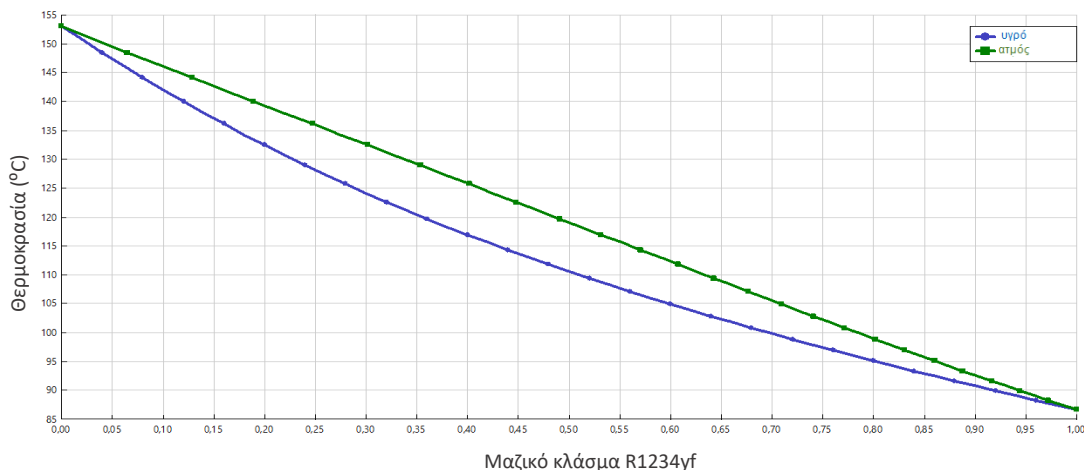
Από το Σχήμα 8.1.12, είναι προφανές ότι η θερμοκρασία κορεσμού του αζεotropικού μίγματος είναι ουσιαστικά σταθερή και στις δύο πιέσεις. Αναφέρεται ότι στον εξατμιστήρα η θερμοκρασία αυξάνεται μόλις κατά  $0,06^\circ\text{C}$  και στον συμπυκνωτήρα κατά  $0,03^\circ\text{C}$ .



Σχήμα 8.1.12. Διάγραμμα  $T - \dot{Q}$  στον εξατμιστήρα (αριστερά) και στον συμπυκνωτήρα (δεξιά) του υποκρίσιμου απλού ORC για το αζεotropικό μίγμα  $i\text{-C4/R1234yf}$

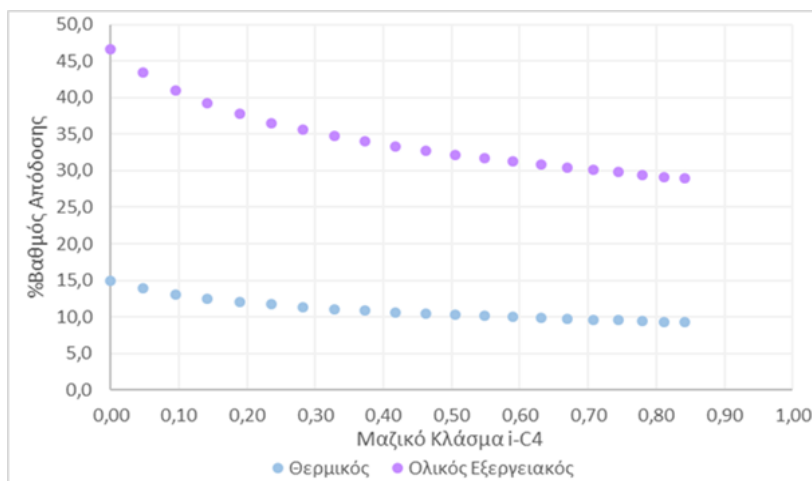
ο R1234yf-R1233zd(e):

Το τελευταίο μίγμα που εξετάζεται αποτελείται από τις δύο υδροφθοροολεφίνες. Και πάλι η μέγιστη επιτρεπτή πίεση του μίγματος ισούται με 2880 kPa, δηλαδή 5 bar χαμηλότερη από την κρίσιμη πίεση του R1234yf. Το συγκεκριμένο μίγμα δεν εμφανίζει αζεότροπο (Σχήμα 8.1.13). Από την μελέτη των καθαρών ουσιών προέκυψε ότι το R1233zd(e) επιφέρει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το R1234yf (Σχήματα 5.2.1-5.2.5). Συνεπώς, αναμένεται η βέλτιστη σύσταση να περιέχει αρκετά μικρή ποσότητα R1234yf.



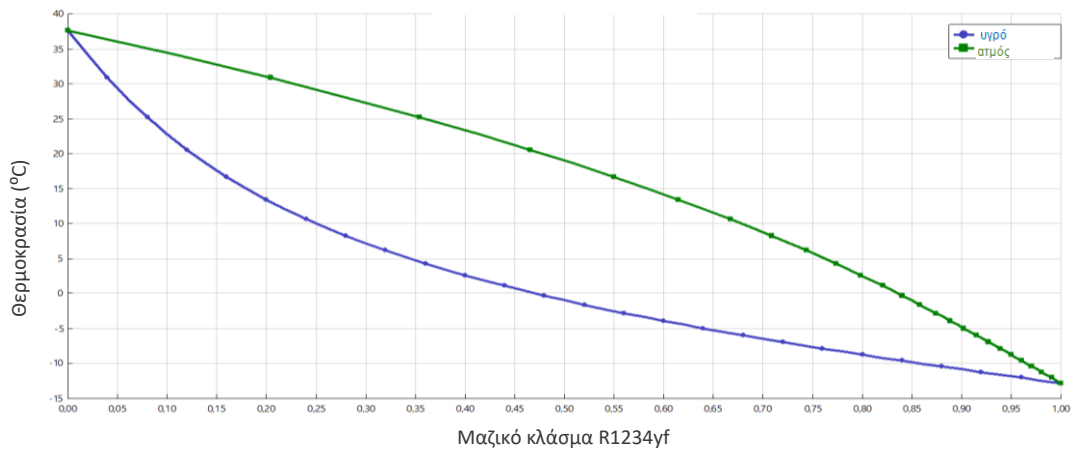
Σχήμα 8.1.13. Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R1233zd(e)/R1234yf στην πίεση του εξατμιστήρα (28,8 bar).

Όσον αφορά τη θερμοκρασιακή ολίσθηση, οι συστάσεις που οδηγούν στη μέγιστη τιμή των 15°C στον συμπυκνωτήρα (Σχήμα 8.1.7) είναι 20% και 60% σε R1234yf κατά μάζα. Για την πρώτη σύσταση και θερμοκρασία ίση με 24°C, η πίεση κορεσμού ισούται με 264,4 kPa. Ωστόσο, μειώνοντας περαιτέρω την ποσότητα του R1234yf, και συγκεκριμένα για μαζικό κλάσμα 10%, αυξάνονται οι τιμές των αποδόσεων, με την σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης να ισούται με 8,8% και του ολικού εξεργειακού με 2,8%, όπως προκύπτει και από την ανάλυση ευαισθησίας στο Σχήμα 8.1.14. Επομένως, αυτή είναι η βέλτιστη σύσταση του μίγματος και η τάση ατμών στην θερμοκρασία εισόδου στην αντλία ισούται με 199,7 kPa. Οι τιμές της θερμοκρασιακής ολίσθησης είναι 10,4°C στον συμπυκνωτήρα και 3,6°C στον εξατμιστήρα.



Σχήμα 8.1.14. Τάση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης υποκρίσιμου απλού ORC με την αλλαγή της σύστασης του μίγματος R1234yf/ R1233zd(e).

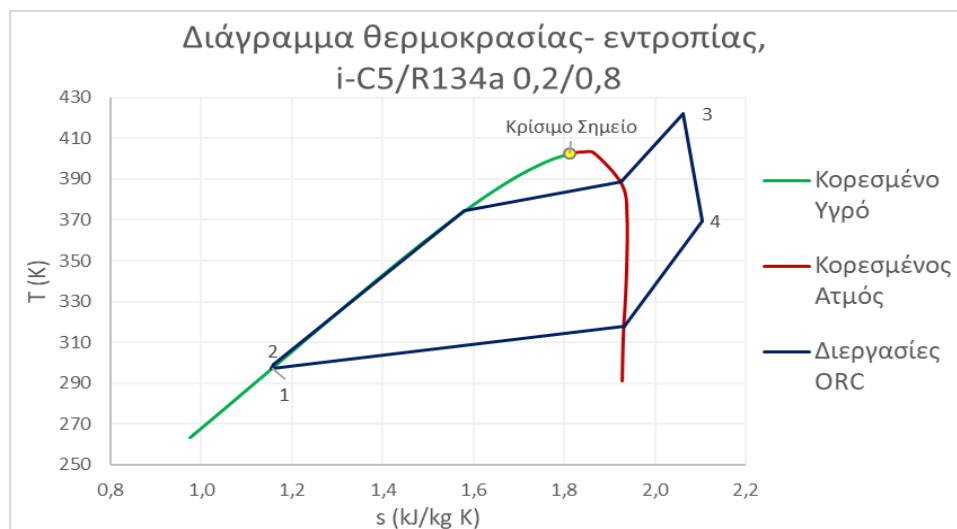
Το μίγμα εισάγεται στον στρόβιλο στους 170°C, δηλαδή 23,7 βαθμούς θερμότερο από τη θερμοκρασία κορεσμού στην πίεση του εξατμιστήρα. Το νερό γεωθερμίας ψύχεται μέχρι τους 82°C.



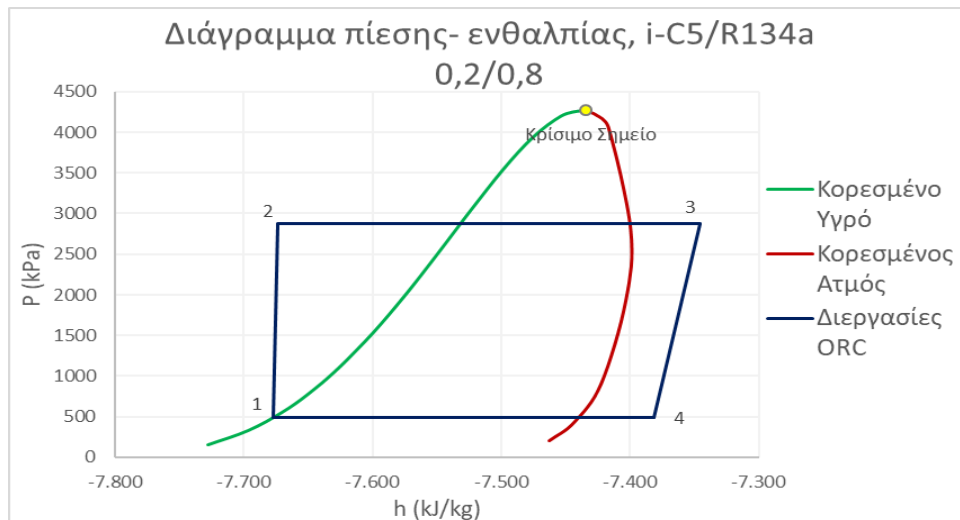
**Σχήμα 8.1.15.** Διάγραμμα φάσεων για το μίγμα R1233zd(e)/R1234yf στην πίεση του συμπυκνωτήρα (199,7 kPa) με τη βέλτιστη σύσταση του μίγματος.

Η μοντελοποίηση στο λογισμικό μέσω Aspen Properties δεν έχει την επιλογή πρόβλεψης των κρίσιμων ιδιοτήτων των ουσιών. Για πληρότητα των αποτελεσμάτων και λόγους σύγκρισης με τα καθαρά ρευστά, η απεικόνιση της κυκλικής διεργασίας του ORC σε διαγράμματα T-s (Σχήμα 8.1.16) και P-h (Σχήμα 8.1.17) γίνεται με την Peng-Robinson μέσω HYSYS. Ενδεικτικά, για το μίγμα ισοπεντανίου-R134a, η ΚΕ προβλέπει κρίσιμη πίεση ίση με 4269,9 kPa και κρίσιμη θερμοκρασία ίση με 129,3°C.

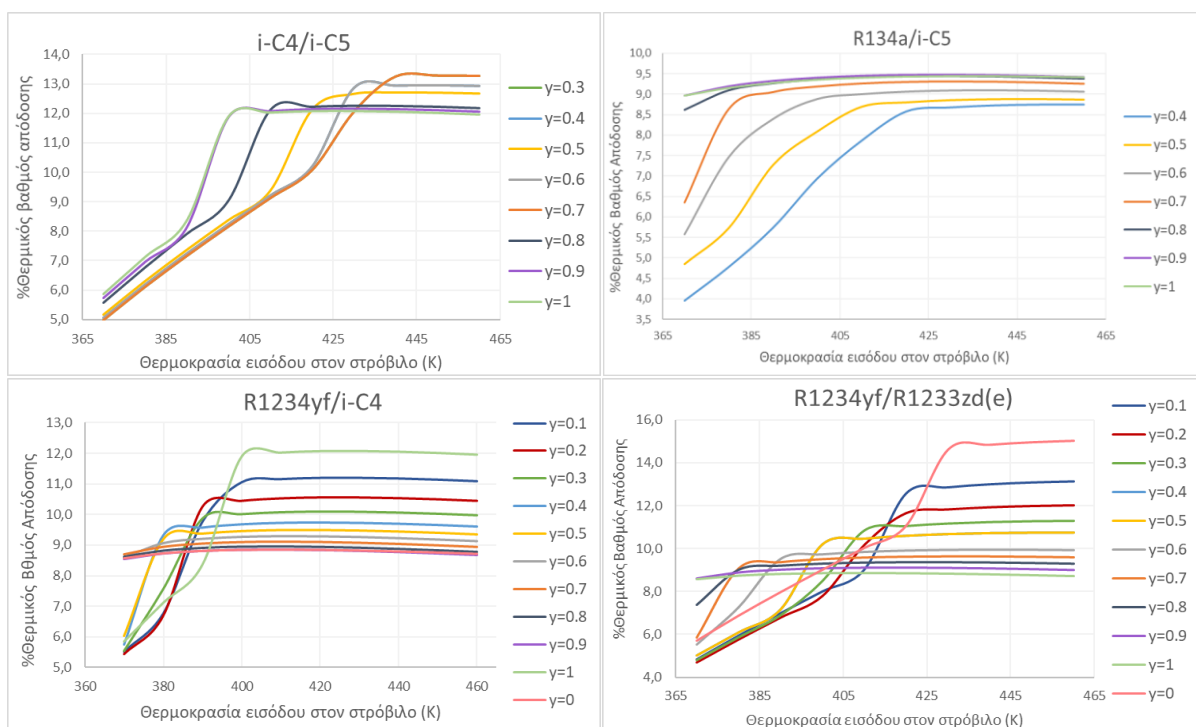
Τέλος, πραγματοποιήθηκαν και κάποιες αναλύσεις ευαισθησίας για τη μελέτη της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον στρόβιλο στο θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου, με διαφορετικές συστάσεις των εξεταζόμενων μιγμάτων (Σχήμα 8.1.18). Μιας και δεν προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες λειτουργικές συνθήκες για κάθε σύσταση, κάποιες συστάσεις πιο πλούσιες στα βαρύτερα συστατικά οδηγούσαν στην είσοδο υγρού στον στρόβιλο και δεν συμπεριλήφθηκαν στα διαγράμματα.



**Σχήμα 8.1.16.** Αποτύπωση διεργασιών απλού ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το ζεοτροπικό μίγμα i-C5/R134a 0,2/08 κατά μάζα μέσω Peng-Robinson.



**Σχήμα 8.1.17.** Αποτύπωση διεργασιών απλού ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το ζεοτροπικό μίγμα i-C5/R134a 0,2/0,8 κατά μάζα μέσω Peng-Robinson.



**Σχήμα 8.1.18.** Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο στο θερμικό βαθμό απόδοσης με μίγματα διαφόρων συστάσεων, όπου  $\gamma$  η σύσταση ως προς το πιο πτητικό συστατικό, δηλαδή: (α) i-C4, (β) R134a, (γ, δ) R1234yf.

Για το (α): τα αποτελέσματα των συστάσεων με τις μεγαλύτερες ποσότητες ισοβουτανίου, μέχρι και το καθαρό συστατικό, οδηγούν στην ίδια τιμή ενεργειακής απόδοσης περί του 12% για θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο από 140°C και άνω. Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται για μαζικό κλάσμα ισοβουτανίου 60-70%. Για τις επιλεγμένες συνθήκες, το καθαρό ισοπεντάνιο, όπως και μεγάλες ποσότητες αυτού, θα επέφεραν την εμφάνιση επιβλαβών σταγονιδίων στην τουρμπίνα, συνεπώς δεν περιέχονται στο διάγραμμα αυτό.

Για το (β): ισχύουν τα ίδια για την υγρή φάση στον στρόβιλο με μεγάλες ποσότητες υδρογονάνθρακα. Εδώ παρατηρούνται αντίθετα αποτελέσματα από το (α), δηλαδή, για τις επιλεγμένες συνθήκες, η αύξηση του κλάσματος του R134a αυξάνει τη μέγιστη τιμή της



θερμικής απόδοσης και μειώνει το εύρος των διακυμάνσεων. Οι αποδόσεις προκύπτουν μικρότερες από 10%, ανεξαρτήτως σύστασης.

Για το (γ): η αύξηση της ποσότητας της υδροφθοροολεφίνης στο μίγμα μειώνει αισθητά τη θερμική απόδοση του κύκλου, από το 12% για καθαρό ισοβουτάνιο στπ 8,7% περίπου για καθαρό R1234yf.

Για το (δ): παρατηρείται εντελώς αντίστοιχη συμπεριφορά με το (γ), με μεγαλύτερες όμως τιμές θερμικής απόδοσης για καθαρό R1233zd(e) και μεγάλες ποσότητες αυτού του συστατικού στο μίγμα.

## 8.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Απλού Κύκλου με Μίγματα

### 8.2.1. Συνολική Αξιολόγηση Εργαζόμενων Μέσων

Τα μίγματα αποτελούν και αυτά εναλλακτικές επιλογές εργαζόμενων μέσων, συνεπώς γίνεται μία άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα των καθαρών ουσιών. Παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των βασικών μεγεθών αξιολόγησης ενός κύκλου Rankine.

**Πίνακας 8.2.1.1.** Σημαντικά μεγέθη αξιολόγησης αποτελεσμάτων ORC με καθαρές ουσίες και μίγματα, παροχή θερμότητας από γεωθερμικό ρευστό στους 200°C και συμπύκνωση από νερό ψύξης στους 20°C.

Ρευστό	Σύσταση κατά μάζα	$W_{net}$ (kW)	$Q_{in}$ (kW)	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτ. $n_{ex}$	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{E}x_{destr}$ (kW)
<b>i-C4</b>	1	88,5	777,7	11,4%	42,4%	44,9%	1,49	15,0	107,4
<b>i-C5</b>	1	93,4	676,7	13,8%	35,0%	46,4%	1,28	12,7	107,0
<b>Τολουόλιο*</b>	1	98,8	2231,2	4,43%	7,3%	13,6%	19,6	46,3	631,3
<b>R152a</b>	1	89,9	886,2	10,1%	38,3%	40,4%	2,25	17,3	131,5
<b>R134a</b>	1	88,5	1031,8	8,6%	34,1%	35,3%	3,86	20,5	161,0
<b>R161</b>	1	88,9	992,2	9,0%	32,7%	34,9%	1,96	19,6	164,1
<b>R1234yf</b>	1	86,6	1211,6	7,1%	29,9%	30,5%	5,45	24,5	195,7
<b>R1233zd(e)</b>	1	91,0	651,2	14,0%	38,4%	48,1%	2,45	12,2	97,1
<b>Μεθανόλη*</b>	1	99,2	1042,2	9,5%	21,7%	31,3%	0,79	20,5	218,3
<b>i-C4/i-C5</b>	0,25/0,75	91,1	678,6	13,4%	41,0%	48,1%	1,28	12,8	97,4
<b>R134a/i-C5</b>	0,2/0,8	89,3	945,3	9,4%	38,9%	39,8%	2,98	18,6	136,2
<b>R1234yf/i-C4</b>	0,1/0,9	88,5	828,1	10,7%	43,6%	44,7%	1,77	16,1	108,1
<b>R1234yf/ R1233zd(e)</b>	0,1/0,9	91,8	705,4	13,0%	40,8%	47,1%	2,47	13,3	102,1
<b>R1234yf/i-C4 (αζεοτροπικό)</b>	0,9/0,1	85,5	1085,7	7,9%	32,6%	33,3%	4,39	21,7	169,3

\* Χρήση τουλάχιστον ατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα.

Το εύρος στο οποίο κινείται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC είναι μεταξύ 7-14%. Την ελάχιστη απόδοση μεταξύ των 14 εργαζόμενων μέσων επιφέρουν το τολουόλιο, το R1234yf, το αζεοτροπικό μίγμα R1234yf/i-C4, το R134a και το R161. Ακολουθεί το μίγμα R134a/i-C5 με 9,4%, η μεθανόλη με 9,5%, το R152a με 10,1%, το ζεοτροπικό μίγμα R1234yf/i-C4 με 10,7% και το ισοβουτάνιο με 11,4%. Μέγιστες αποδόσεις σημειώνονται με τα καθαρά ρευστά R1233zd(e) και ισοπεντάνιο, ενώ ακολουθούν τα μίγματα i-C4/i-C5 και R1234yf/R1233zd(e), όλα με ενεργειακή απόδοση τουλάχιστον 13%, που θεωρείται πολύ ικανοποιητική για ένα οργανικό κύκλο Rankine.

Εξαιρώντας τη μεθανόλη και το τολουόλιο, οι τιμές του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης κυμαίνονται μεταξύ 30 και 44%. Οι ελάχιστες τιμές παρατηρούνται με τα καθαρά ρευστά R1234yf και R161 και το αζεοτροπικό μίγμα της υδροφθοροολεφίνης με το ισοβουτάνιο, ενώ αρκετά χαμηλή είναι και η εξεργειακή απόδοση όταν επιλέγεται το R134a. Το ισοπεντάνιο, παρόλο που ενεργειακά είναι από τις βέλτιστες επιλογές, εξεργειακά αποτελεί μία μέτρια λύση, με τιμή περί του 35%, σε αντίθεση με το ισοβουτάνιο, που επιφέρει τη δεύτερη μέγιστη εξεργειακή απόδοση. Τα ζεοτροπικά μίγματα μαζί με το ισοβουτάνιο αποτελούν τις πρώτες επιλογές εργαζόμενων μέσων από εξεργειακή σκοπιά. Δηλαδή, η χρήση ενός ζεοτροπικού μίγματος πράγματι επιτρέπει τον πιο αποδοτικό συνδυασμό της πηγής και της δεξαμενής θερμότητας με το λειτουργούν μέσο, με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης του κύκλου.

Μέγιστη μαζική παροχή έχει το R1234yf και το αζεοτροπικό του μίγμα με το ισοβουτάνιο, και έπειτα το R134a. Υψηλή είναι και η μαζική παροχή του μίγματος R134a/i-C5. Παρά τις πολύ ικανοποιητικές τους αποδόσεις, το R1233zd(e) και το μίγμα του με το R1234yf έχουν σχετικά υψηλή παροχή, της τάξης των 2,5 kg/s. Αντίθετα, τα αλκάνια και τα μίγματα i-C4/i-C5 και i-C4/R1234yf έχουν παροχές μικρότερες από 2 kg/s, αποτελώντας, από οικονομικής άποψης, τις καλύτερες επιλογές εργαζόμενων μέσων για το σύστημα.

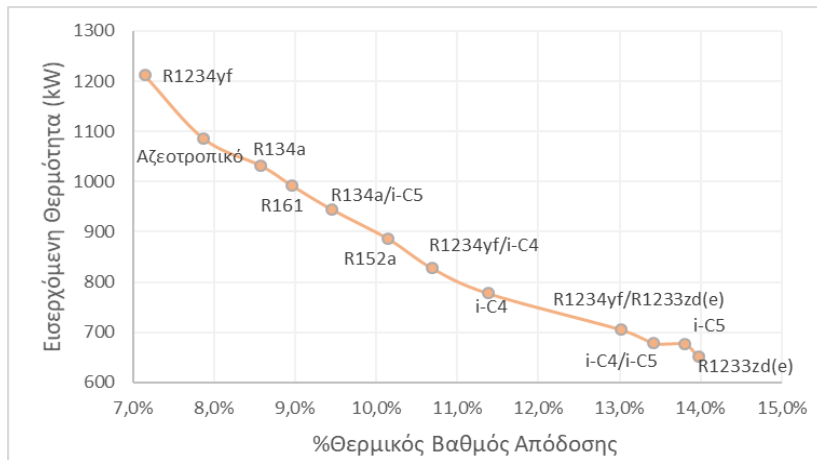
Την μέγιστη απαίτηση σε ψυκτικό μέσο επιφέρει η χρήση του R1234yf, του αζεοτροπικού του μίγματος με το ισοβουτάνιο, του R134a, του R161 και του ζεοτροπικού μίγματος R134a/i-C5. Τα μίγματα i-C4/i-C5 και R1234yf/R1233zd(e) έχουν απαιτήσεις κοντινές στα κατώτατα όρια του εύρους της μαζικής παροχής του νερού ψύξης, ενώ την ελάχιστη απαίτηση ανάμεσα στα 14 εργαζόμενα μέσα έχει το R1233zd(e), και έπειτα το ισοπεντάνιο.

Η αθροιστική καταστροφή εξέργειας στις συσκευές του κύκλου μεγιστοποιείται με χρήση του R1234yf και του αζεοτροπικού μίγματος, με επόμενα τα ρευστά R161 και R134a. Το μοναδικό ζεοτροπικό μίγμα που επιφέρει καταστροφή εξέργειας υψηλότερη από 110 kW είναι αυτό του R134a με το ισοπεντάνιο. Το μίγμα αυτό επιφέρει και τον ελάχιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης μεταξύ των ζεοτροπικών μιγμάτων. Τα υπόλοιπα μίγματα, εκτός από υψηλούς εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης, επιφέρουν και μικρές συνολικές καταστροφές εξέργειας, με το μίγμα των δύο αλκανίων να οδηγεί στη δεύτερη ελάχιστη εξεργειακή απώλεια ανάμεσα στα εργαζόμενα μέσα, μετά το R1233zd(e).

Τέλος, παρατίθεται το διάγραμμα που απεικονίζει την τάση της θερμότητας που προσφέρεται από το γεωθερμικό ρευστό στο λέβητα για εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου συναρτήσει του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου (Σχήμα 8.2.1.1). Το διάγραμμα έχει την αναμενόμενη φθίνουσα συμπεριφορά (Εξίσωση 1.2.2), αφού όσο αυξάνεται η ποσότητα της θερμότητας που προσφέρεται στο σύστημα, τόσο μειώνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτού, μιας και το καθαρό έργο εμφανίζει πολύ μικρές διακυμάνσεις, στο εύρος 85-94 kW.

Γίνεται και μία σύγκριση μόνο μεταξύ των μιγμάτων, όπως έχει ήδη πραγματοποιηθεί για τις καθαρές ουσίες. Το αζεοτροπικό μίγμα εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές αποδόσεων, τις μέγιστες μαζικές παροχές εργαζόμενου μέσου και νερού ψύξης και τη μέγιστη καταστροφή εξέργειας στο κύκλο. Έπειτα, ακολουθεί το R134a/i-C5, συνεπώς, μεταξύ των εξεταζόμενων ζεοτροπικών μιγμάτων, δεν αποτελεί την καλύτερη επιλογή, παρά την παρουσία του ισοπεντανίου στο μίγμα, που ως καθαρό ρευστό αποτελεί ένα από τα πιο αποδοτικά. Βέβαια, ενδεχομένως χωρίς τον περιορισμό της μέγιστης τιμής της θερμοκρασιακής ολίσθησης και με μεγαλύτερη ποσότητα του υδρογονάνθρακα, το μίγμα αυτό να επέφερε πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Μεταξύ των υπόλοιπων μιγμάτων, η καλύτερη επιλογή αναδεικνύεται το i-C4/i-C5, το οποίο εμφανίζει το μέγιστο θερμικό βαθμό απόδοσης, την ελάχιστη μαζική παροχή

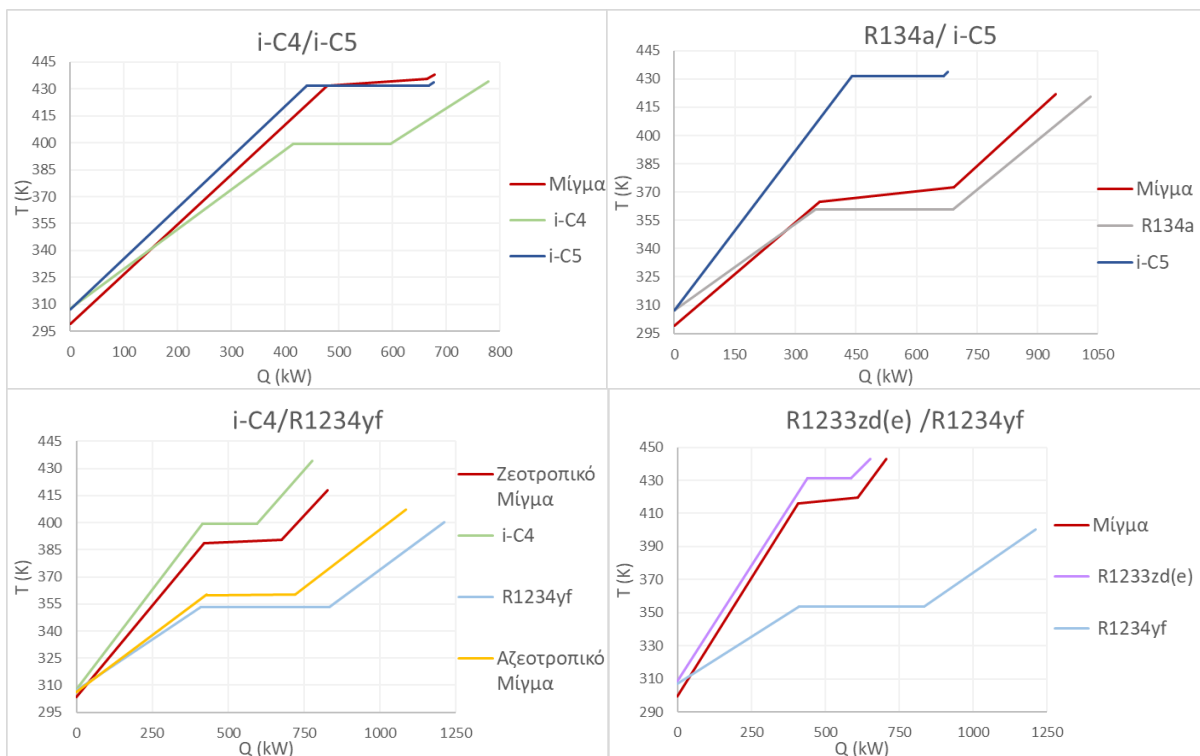
και απαίτηση σε νερό ψύξης, τη μέγιστη τιμή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης καθώς και μία πολύ ικανοποιητική τιμή ολικής εξεργειακής απόδοσης, ίσης με 41%.



Σχήμα 8.2.1.1. Σνάρτηση εισερχόμενης θερμότητας στον εξατμιστήρα και θερμικού βαθμού απόδοσης του ORC με καθαρά ρευστά και μίγματα.

### 8.2.2. Σύγκριση Μιγμάτων με τα Καθαρά Συστατικά τους

Αρχικά, η διεργασία της εξαίτησης αποτυπώνεται σε κοινά διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμορροής για κάθε δυαδικό μίγμα και τα συστατικά του.



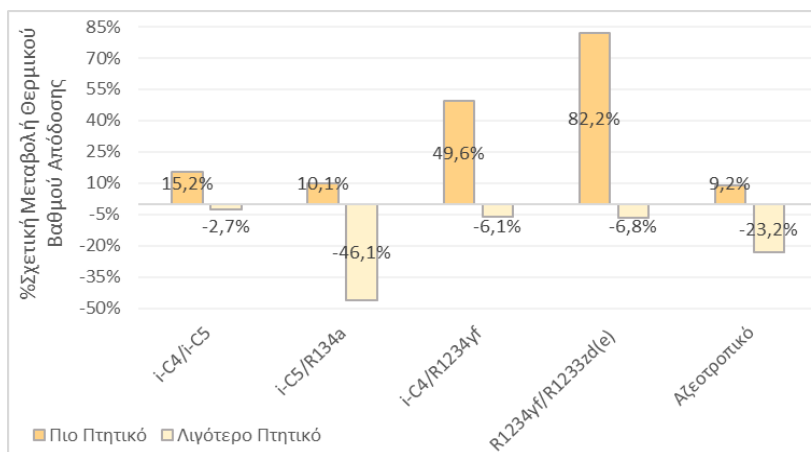
Σχήμα 8.2.2.1. Κοινά διαγράμματα θερμοκρασίας-θερμορροής για τα μίγματα και τα καθαρά συστατικά τους.

Με την πρώτη ματιά στο Σχήμα 8.2.2.1 γίνεται εμφανές ποιο συστατικό συμμετέχει κατά μεγαλύτερο ποσοστό στο μίγμα, αφού η καμπύλη του μίγματος προσομοιάζει αυτή του συγκεκριμένου συστατικού. Η απόκλιση των δύο αυτών καμπυλών αναδεικνύει το μέγεθος της θερμοκρασιακής ολίσθησης στον εξατμιστήρα, με τη μέγιστη να παρατηρείται στο μίγμα

R134a/i-C5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά των καμπυλών αλλαγής φάσης του ζεοτροπικού και του αζεοτροπικού μίγματος ισοβουτανίου-R1234yf, με τη δεύτερη να είναι σχεδόν παράλληλη με την καμπύλη της καθαρής υδροφθοροολεφίνης.

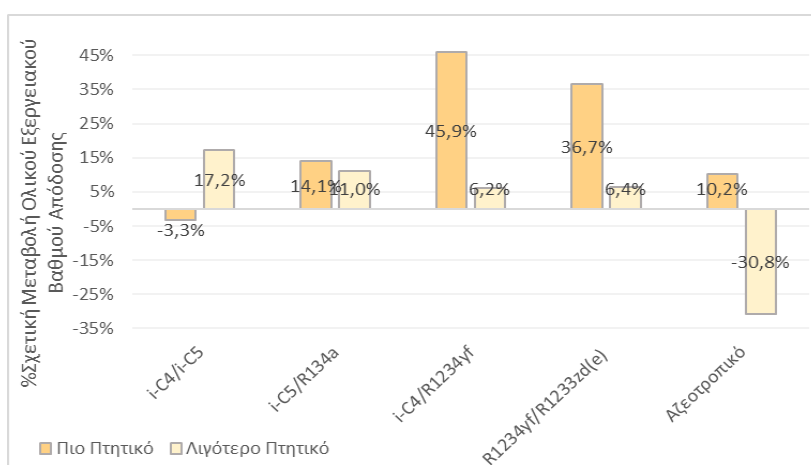
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η σχετική αύξηση ή μείωση των αποδόσεων, των μαζικών παροχών και της εξεργειακής καταστροφής στο ORC. Η σύγκριση γίνεται ανάλογα με την πτητικότητα των συστατικών κάθε μίγματος. Από τον Πίνακα Α.1 του αντίστοιχου παραρτήματος προκύπτει ότι η φθίνουσα σειρά πτητικότητας των οργανικών ρευστών που συμμετέχουν στα μίγματα είναι:

$$R1234yf > R134a > i - C4 > R1233zd(e) > i - C5$$



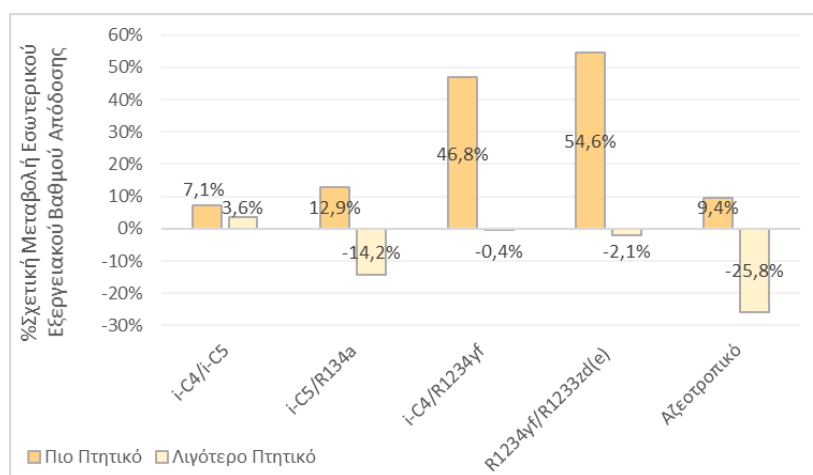
Σχήμα 8.2.2.2. Σχετική αλλαγή θερμικού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου με χρήση του μίγματος είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τη χρήση του πιο πτητικού από τα συστατικά του και μικρότερος σε σχέση με το λιγότερο πτητικό. Η μέγιστη αύξηση παρατηρείται για το R1234yf στα δύο ζεοτροπικά μίγματα που συμμετέχει, και ειδικά στο μίγμα με το R1233zd(e), με την απόδοση από το 7,1% να φτάνει στο 13%, δηλαδή σχεδόν να διπλασιάζεται. Οι μειώσεις στα λιγότερο πτητικά συστατικά είναι γενικά μικρές, με εξαίρεση το ισοπεντάνιο στο μίγμα του με το R134a, του οποίου η απόδοση από το 13,8% πέφτει στο 9,5%.



Σχήμα 8.2.2.3. Σχετική αλλαγή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.

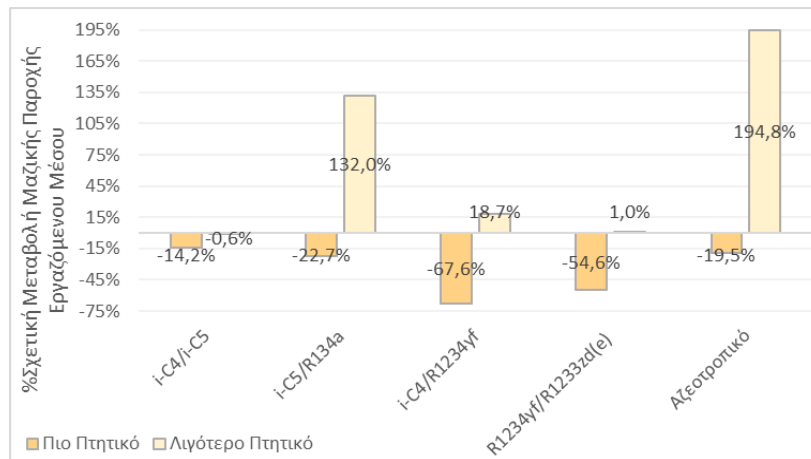
Η τιμή του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης αυξάνεται σχεδόν για όλα τα καθαρά ρευστά, όταν συμμετέχουν σε κάποιο μίγμα. Εξάιρεση αποτελεί το ισοβουτάνιο, το οποίο συνδυάζεται πολύ αποδοτικά με την πηγή θερμότητας στους 200°C, με την απόλυτη μείωση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης στο μίγμα του με το ισοπεντάνιο να είναι ίση με 1,2%. Γενικά, η χρήση των ζεοτροπικών μιγμάτων σε ένα οργανικό κύκλο Rankine προτείνεται για βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης μέσω καλύτερου συνδυασμού του εργαζόμενου μέσου με τη πηγή θερμότητας και το ψυκτικό μέσο, λόγω της ολίσθησης κατά την αλλαγή φάσης. Συνεπώς, το γεγονός ότι στο Σχήμα 8.2.2.3. σχεδόν όλες οι εξεργειακές αποδόσεις αυξάνονται επιβεβαιώνει την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, με εξαίρεση το μίγμα των δύο αλκανίων, η σχετική αύξηση αυτού του μεγέθους είναι μεγαλύτερη για το πιο πτητικό συστατικό. Όσον αφορά το αζεοτροπικό μίγμα, η απουσία της θερμοκρασιακής ολίσθησης οδηγεί σε έναν εξεργειακό βαθμό απόδοσης ελαφρώς αυξημένο από του καθαρού R1234yf, αλλά σημαντικά μειωμένο από του ισοβουτανίου.



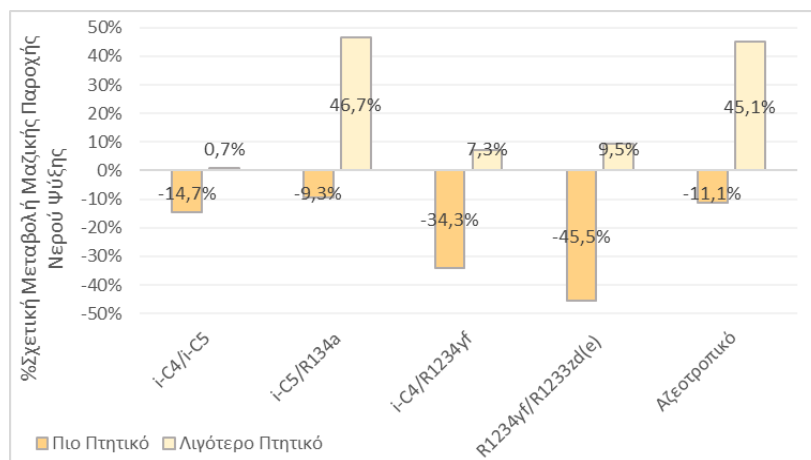
Σχήμα 8.2.2.4. Σχετική αλλαγή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.

Ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ακολουθεί παρόμοια τάση με το θερμικό (Σχήμα 8.2.2.2). Η τιμή της απόδοσης του μίγματος είναι μεγαλύτερη από αυτή του πιο πτητικού συστατικού του. Όσον αφορά τα πιο βαριά συστατικά, οδηγούν σε υψηλότερους εσωτερικούς εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης, με εξαίρεση το ισοπεντάνιο στο μίγμα με το ισοβουτάνιο. Εξαιρώντας το αζεοτροπικό μίγμα, γενικά οι σχετικές μειώσεις ως προς το λιγότερο πτητικό συστατικό είναι μικρότερες από τις σχετικές αυξήσεις ως προς το ελαφρύτερο.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα μίγματα έχουν μικρότερες μαζικές παροχές από τα καθαρά συστατικά τους (Σχήμα 8.2.2.5). Εξάιρεση αποτελεί το ισοπεντάνιο στο μίγμα του με το R134a, με το μίγμα να έχει παροχή τουλάχιστον διπλάσια από του καθαρού ισοπεντανίου. Επιπλέον, και το ισοβουτάνιο έχει μικρότερη μαζική παροχή από το ζεοτροπικό του μίγμα με το R1234yf κατά 0,3 kg/s και από το αζεοτροπικό κατά 2,9 kg/s. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η συγκεκριμένη υδροφθορολεφίνη έχει πολύ μεγαλύτερη παροχή σε σχέση με τα υπόλοιπα καθαρά ρευστά (Σχήμα 5.2.4) και συμμετέχει στο αζεοτροπικό μίγμα σε ποσοστό 90% κατά μάζα.



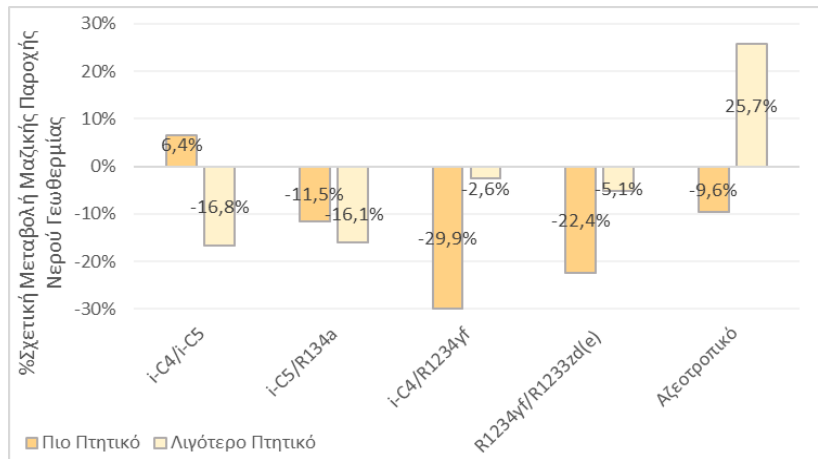
**Σχήμα 8.2.2.5.** Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου του υποκρίσιμου απλού ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.



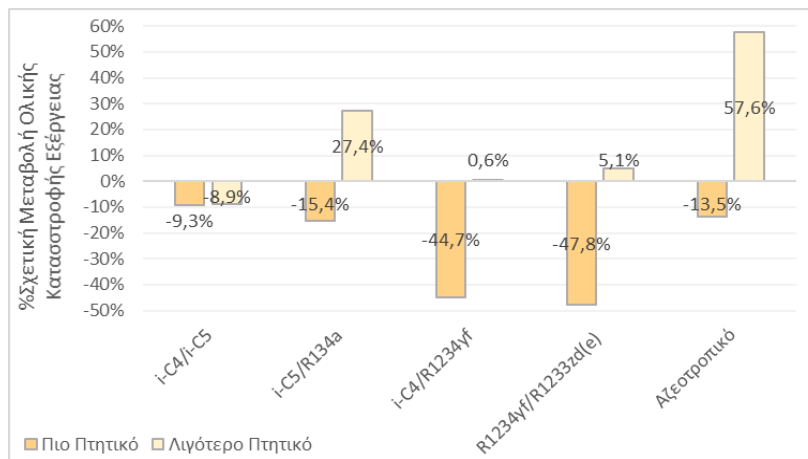
**Σχήμα 8.2.2.6.** Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής νερού ψύξης με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους στο υποκρίσιμο απλό ORC.

Οι απαιτήσεις σε νερό ψύξης ακολουθούν παρόμοια τάση με τις μαζικές παροχές των εργαζόμενων μέσων. Για όλες τις περιπτώσεις μιγμάτων, οι μαζικές παροχές του νερού ψύξης είναι χαμηλότερες από αυτές με χρήση του πτητικότερου συστατικού και υψηλότερες με χρήση του βαρύτερου. Τα μίγματα με το R1234yf απαιτούν αρκετά χαμηλότερες ποσότητες νερού από την καθαρή υδροφθορολεφίνη. Αντίθετα, το καθαρό ισοπεντάνιο απαιτεί τη χρήση σχεδόν της μισής ποσότητας νερού ψύξης σε σχέση με το μίγμα του με R134a. Το ίδιο ισχύει και για το ισοβουτάνιο, όταν αναμειγνύεται σε ποσοστό 10% με το R1234yf.

Η ποσότητα του νερού γεωθερμίας που απαιτείται στον εξατμιστήρα είναι κατά κύριο λόγο μικρότερη όταν χρησιμοποιούνται μίγματα (Σχήμα 8.2.2.7). Αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της μεγαλύτερης μείωσης της τελικής θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας που επιτρέπουν τα μίγματα, τα οποία εισέρχονται στον εξατμιστήρα σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τα καθαρά ρευστά λόγω της θερμοκρασιακής ολίσθησης στον συμπυκνωτήρα. Εξαιρέση αποτελεί το ισοβουτάνιο, το οποίο απαιτεί μικρότερη ποσότητα θερμής βοηθητικής παροχής συγκριτικά με το μίγμα του με το ισοπεντάνιο και το αξεοτροπικό του μίγμα με το R1234yf.



**Σχήμα 8.2.2.7.** Σχετική αλλαγή μαζικής παροχής γεωθερμικού ρευστού με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους στο υποκρίσιμο απλό ORC.



**Σχήμα 8.2.2.8.** Σχετική αλλαγή ολικής καταστροφής εξέργειας στο υποκρίσιμο απλό ORC με χρήση μιγμάτων αντί των καθαρών συστατικών τους.

Στην πλειοψηφία τους τα καθαρά ρευστά επιφέρουν μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας αθροιστικά στις συσκευές του κύκλου, σε σχέση με τα μίγματα. Εξάιρεση αποτελούν τα ισοπεντάνιο, στο μίγμα με το R134a, και το R1233zd(e), στο μίγμα με το R1234yf. Τα τα δύο αυτά ρευστά είχαν ως αποτέλεσμα την ελάχιστη εξεργειακή καταστροφή, μεταξύ των εξεταζόμενων (Πίνακας 5.2.1). Το ισοβουτάνιο και το ζεοτροπικό μίγμα του με το R1234yf οδηγούν περίπου στην ίδια εξεργειακή απώλεια, ενώ η ανάμειξή του με την υδροφθορολεφίνη στην αζεοτροπική αναλογία επιφέρει αύξηση της ολικής καταστροφής κατά περίπου 62 kW.

Για το μίγμα i-C4/i-C5, η μείωση της ολικής καταστροφής εξέργειας (Σχήμα 8.2.2.8) σε σχέση με τα καθαρά συστατικά οφείλεται στον συμπυκνωτήρα (Πίνακας 8.2.2.1). Η καταστροφή εξέργειας στην αντλία έχει παρόμοια τιμή για τα καθαρά ρευστά και το μίγμα, αλλά ούτως ή άλλως η τάξη μεγέθους της είναι πολύ μικρή για είναι καθοριστική. Στον στρόβιλο, οι τιμές των τριών ουσιών είναι πολύ κοντινές. Στον εξατμιστήρα η εξεργειακή καταστροφή είναι μεν χαμηλότερη από του ισοπεντανίου, αλλά υψηλότερη από του ισοβουτανίου. Αντίθετα, στον συμπυκνωτήρα η σχετική μείωση της εξεργειακής καταστροφής με το μίγμα είναι 20,5% από το ισοπεντάνιο και 42,4% από το ισοβουτάνιο.



Πίνακας 8.2.2.1. Καταστροφή εξέρργειας και εξεργειακή απόδοση συσκευών του απλού ORC με μίγματα και τα καθαρά συστατικά τους.

	Καταστροφή Εξέρργειας (kW)				%Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης			
	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.	Αντλία	Εξατμ.	Στρόβ.	Συμπ.
<b>i-C4</b>	3,9	32,6	34,5	36,4	65,8%	83,4%	74,4%	2,9%
<b>i-C5</b>	2,3	42,7	35,6	26,4	65,9%	78,8%	73,7%	3,3%
<b>R134a</b>	3,9	74,4	34,4	48,3	65,7%	70,4%	74,4%	3,0%
<b>R1234yf</b>	4,6	99,9	35,0	56,2	65,7%	64,8%	74,1%	3,0%
<b>R1233zd(e)</b>	3,1	36,0	37,1	20,9	65,9%	80,9%	72,9%	4,0%
<b>i-C4/i-C5</b>	3,1	37,1	36,2	21,0	64,9%	80,4%	73,4%	4,2%
<b>i-C5/R134a</b>	3,8	61,3	34,5	36,7	64,8%	72,7%	74,3%	3,8%
<b>i-C4/R1234yf</b>	4,0	38,1	35,7	30,3	65,3%	80,7%	73,7%	3,7%
<b>R1234yf/ R1233zd(e)</b>	2,9	39,3	35,7	24,2	64,9%	79,8%	73,7%	3,8%
<b>Αζεοτροπικό</b>	5,0	80,0	34,9	49,3	65,6%	68,8%	74,1%	3,1%

Για το μίγμα R134a/i-C5, η καταστροφή εξέρργειας αυξάνεται σε σχέση με του καθαρού ισοπεντανίου σε όλες τις συσκευές, εκτός από τον στρόβιλο, όπου παραμένει σταθερή. Η μέγιστη αύξηση σημειώνεται στον εξατμιστήρα και ισούται με 43,6%, και έπειτα στον συμπυκνωτήρα, ίση με 37,9%. Αντίθετα, η καταστροφή που συμβαίνει στην αντλία και στον στρόβιλο όταν χρησιμοποιείται R134a είναι παρόμοια με του μίγματος, αλλά στον εξατμιστήρα υψηλότερη κατά 17,6% και στον συμπυκνωτήρα κατά 24%.

Για τα άλλα δύο ζεοτροπικά μίγματα σημειώνεται πολύ σημαντική μείωση της εξεργειακής καταστροφής στον εξατμιστήρα, της τάξης του 60-65%, αλλά και στον συμπυκνωτήρα, της τάξης του 50%, σε σχέση με αυτή που επιφέρει η χρήση του καθαρού R1234yf. Μικρές διαφορές σημειώνονται και συγκριτικά με το δεύτερο συστατικό των μιγμάτων αυτών, δηλαδή του ισοβουτανίου και του R1233zd(e) αντίστοιχα. Όσον αφορά το αζεοτροπικό μίγμα, η καταστροφή εξέρργειας που λαμβάνει χώρα σε κάθε συσκευή έχει αρκετά κοντινή τιμή με αυτή που προκύπτει με χρήση της υδροφθοροολεφίνης. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της εξεργειακής απώλειας στον εξατμιστήρα με χρήση του αζεοτροπικού μίγματος συγκριτικά με το καθαρό R1234yf, που αγγίζει το 20%.

Μία σημαντική παρατήρηση σχετικά με τις εξεργειακές αποδόσεις των συσκευών του οργανικού κύκλου Rankine έχει να κάνει με τον συμπυκνωτήρα. Με εξαίρεση το R1233zd(e), η απόδοση αυτού του στοιχείου του κύκλου είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται ζεοτροπικό μίγμα σε σχέση με τα καθαρά συστατικά του. Το εντελώς αντίθετο συμπέρασμα προκύπτει για την αντλία. Οι τιμές του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του στρόβιλου είναι πολύ κοντινές και στα πέντε μίγματα ως προς τα δύο καθαρά συστατικά τους και οι διακυμάνσεις είναι σχεδόν αμελητέες. Η απόδοσή του εξατμιστήρα είναι ενδιάμεσα των τιμών τη απόδοσης που προκύπτουν με χρήση των καθαρών συστατικών του μίγματος και πιο κοντινή στο όριο που αντιστοιχεί στο συστατικό με τη μεγαλύτερη αναλογία.

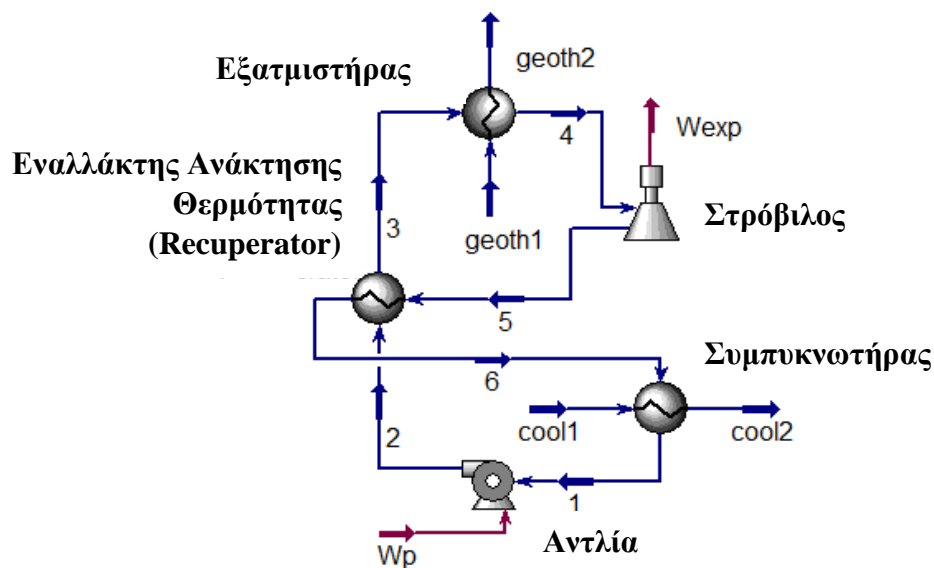
## 9. Σύνθετες Διατάξεις του Οργανικού Κύκλου Rankine

### 9.1. Επιλογή Λειτουργικών Συνθηκών

Κατά την εξέταση σύνθετων διατάξεων του οργανικού κύκλου Rankine, ζητούμενο είναι η επιπλέον πολυπλοκότητα και το πρόσθετο πάγιο κόστος να αντισταθμίζονται από την αυξημένη θερμοδυναμική απόδοση. Η μοντελοποίηση των παρακάτω παραλλαγών της διάταξης γίνεται μέσω REFPROP, μόνο για τις καθαρές ουσίες και αρχικά για σταθερή θερμοκρασία πηγής θερμότητας ίση με 200°C.

- Κύκλο με Εναλλάκτη Ανάκτησης Θερμότητας (Recuperator)

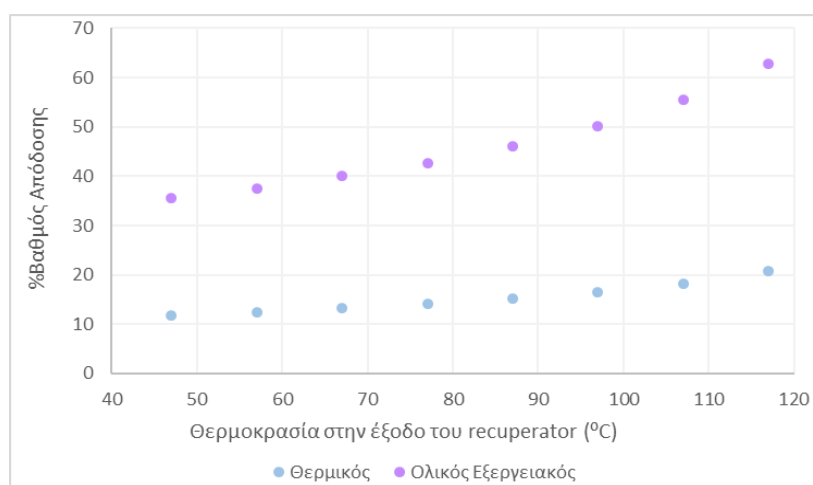
Στην διάταξη του Σχήματος 5.1.1 προστίθεται ένας εσωτερικός εναλλάκτης θερμότητας, στον οποίο προθερμαίνεται η είσοδος του εξατμιστήρα και προψύχεται η είσοδος του συμπυκνωτήρα, μειώνοντας έτσι το φορτίο και των δύο εναλλακτών θερμότητας. Για να χρησιμοποιηθεί recuperator, είναι απαραίτητη η υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου στον εξατμιστήρα και η έξοδος υπέρθερμου ατμού από τον στρόβιλο, ακόμα και για τα ξηρά ρευστά. Το διάγραμμα ροής του recuperated κύκλου δημιουργείται στο λογισμικό:



Σχήμα 9.1.1. Διάγραμμα ροής recuperated ORC. Τα σημεία 1-6 αφορούν το εργαζόμενο μέσο, τα geoth1, geoth2 την πηγή θερμότητας και τα cool1, cool2 το νερό ψύξης.

Σε αντιστοιχία με το απλό κύκλο (Σχήμα 5.1.4) είναι ευνοϊκή από θερμοδυναμική σκοπιά η αύξηση της πίεσης του εξατμιστήρα. Η μέγιστη πίεση στο κύκλο τίθεται και πάλι ίση με την κρίσιμη, μειωμένη κατά 5 bar. Για να ισχύουν οι επιλογές των ελάχιστων θερμοκρασιακών διαφορών στους εναλλάκτες θερμότητας, πρέπει η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στην αντλία και η τελική θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού να είναι υψηλότερες στο recuperated κύκλο σε σχέση με το απλό. Η επιλογή των λειτουργικών συνθηκών γίνεται με γνώμονα την αύξηση του θερμικού και του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης της απλής διάταξης, σε κάποιες περιπτώσεις με μικρή μείωση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, ο οποίος, για κοινή πηγή θερμότητας και δεδομένη ισχύ στρόβιλου, εξαρτάται ουσιαστικά από τη μαζική παροχή της πηγής.

Ως επιπλέον μεταβλητή εισόδου, ορίζεται η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στο σημείο 3 (Σχήμα 9.1.1), δηλαδή στην έξοδο του recuperator, προκειμένου στην συσκευή αυτή η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά να ισούται με 9-10°C. Η διαφορά αυτή σημειώνεται πάντα στην είσοδο του εναλλάκτη, μεταξύ των σημείων 2 και 6. Στους αυλούς εισάγεται το θερμό ρεύμα, λόγω της αρκετά χαμηλότερης πίεσής του. Ο αριθμός των κελυφών σε σειρά του recuperator ορίζεται στα τρία, που αντιστοιχεί σε επιφάνεια εναλλαγής ίση με 181 m<sup>2</sup>, δηλαδή μικρότερη από του εξατμιστήρα, αλλά μεγαλύτερη από του συμπυκνωτήρα. Η επιφάνεια των υπόλοιπων εναλλακτών θερμότητας είναι κοινή με του απλού κύκλου. Δεν λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης του εργαζόμενου μέσου στον recuperator, δηλαδή το θερμό ρεύμα εισέρχεται και εξέρχεται απ' αυτόν σε ατμώδη κατάσταση, ενώ το ψυχρό σε υγρή. Η επίδραση της θερμοκρασίας του σημείου 3 στην απόδοση του συστήματος μελετάται μέσα από ανάλυση ευαισθησίας. Ενδεικτικά για το ισοβουτάνιο, μεταβάλλεται η θερμοκρασία αυτή από τους 47 έως τους 117°C, εξασφαλίζοντας ότι το μέσο παραμένει σε υγρή κατάσταση.



**Σχήμα 9.1.2.** Αύξηση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του recuperator, ενδεικτικά για το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.

Συνεπώς, επιδιώκεται η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του μέσου στον εξατμιστήρα, καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός προθέρμανσης.

Ένα εναλλακτικό κριτήριο σχεδιασμού του recuperator είναι η αποδοτικότητά του, που ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{m_{cold} * C_{p,cold} * (T_{cold,out} - T_{cold,in})}{m_{min} * C_{p,min} * (T_{hot,in} - T_{cold,in})} \quad (Εξ. 9.1.1)$$

όπου  $m_{min}$  και  $C_{p,min}$  είναι οι ιδιότητες του ρεύματος, είτε του ψυχρού είτε του θερμού, με το ελάχιστο γινόμενο μαζικής παροχής και θερμοχωρητικότητας.

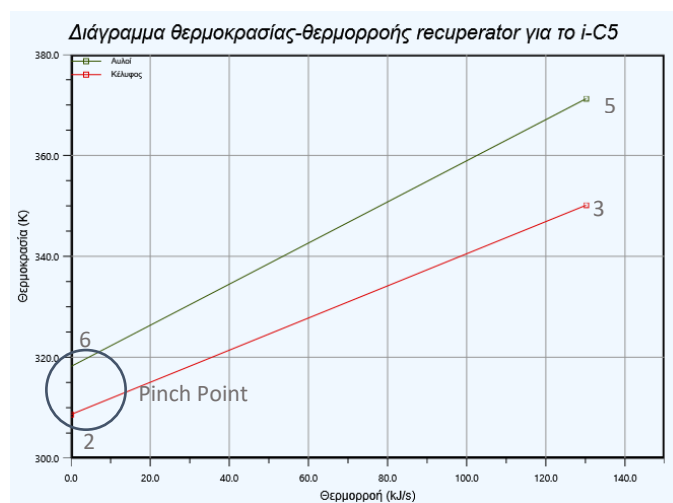
Οι τελικές επιλογές λειτουργικών συνθηκών στο recuperated ORC ανά ρευστό συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1.1.

Η μορφή των διαγραμμάτων θερμοκρασίας-θερμοροής στον εξατμιστήρα και τον συμπυκνωτήρα είναι κοινή με το απλό κύκλο (Σχήματα 5.1.11, 5.1.12). Ενδεικτικά, παρατίθεται και το διάγραμμα θερμοκρασίας-θερμοροής στον recuperator με χρήση ισοπεντανίου (Σχήμα 9.1.3).

Πίνακας 9.1.1. Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο recuperated ORC ανά ρευστό.

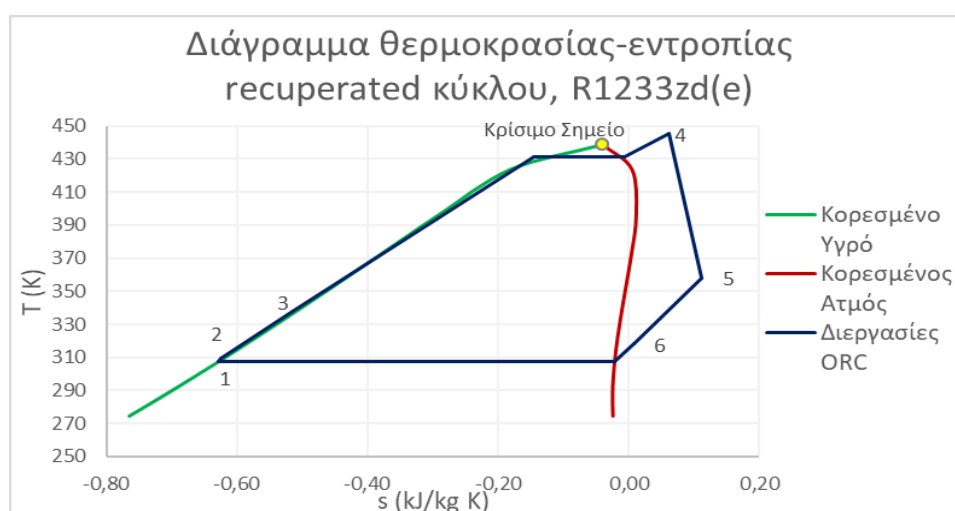
	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	P <sub>3</sub> (kPa)	T <sub>geoth2</sub> (°C)
<b>i-C4</b>	34	77	155,5	3150	86
<b>i-C5</b>	34	77	163	2150	122,5
<b>Τολουόλιο*</b>	110,6	117	140	213	139
<b>R152a</b>	34	74,5	160	3300	86
<b>R134a</b>	34	79	153	3100	86,5
<b>R161</b>	34	72	147,5	3620	79
<b>R1234yf</b>	33,5	78	138	2535	85
<b>R1233zd(e)</b>	34	64,5	172	3150	110,5
<b>Μεθανόλη*</b>	64,5	87	190	600	123,5

\*Εξέταση τουλάχιστον ατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα.

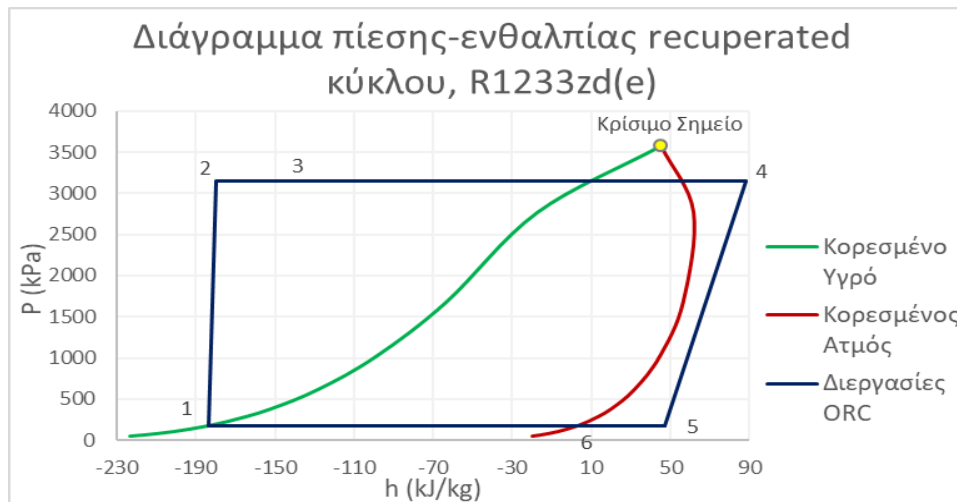


Σχήμα 9.1.3. Ενδεικτικό διάγραμμα T-Q στον recuperator με  $\Delta T_{pinch}=9,51^{\circ}\text{C}$  με χρήση του ισοπεντανίου.

Η διεργασία του ORC με τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας αποτυπώνεται σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας και πίεσης-ενθαλπίας:



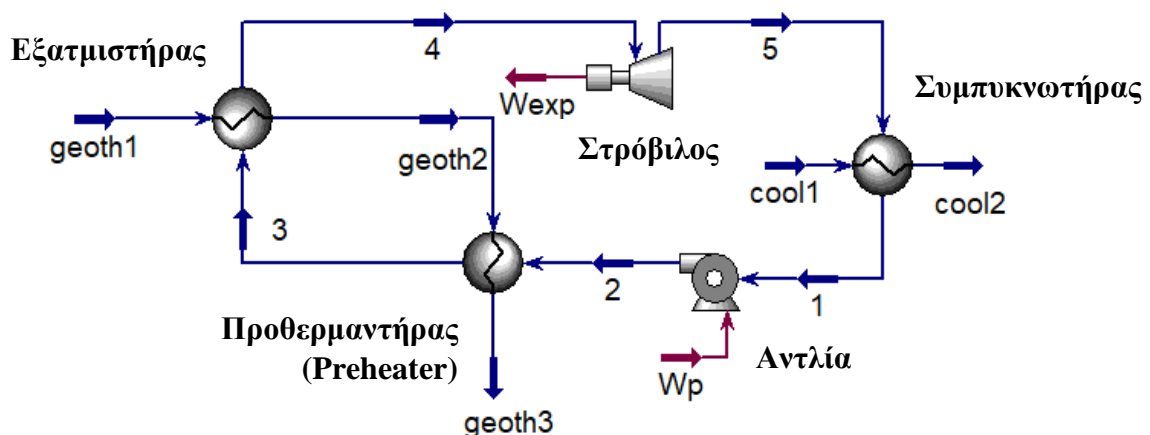
Σχήμα 9.1.4. Αποτύπωση διεργασιών recuperated ORC σε διάγραμμα T-s με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.



Σχήμα 9.1.5. Αποτύπωση διεργασιών recuperated ORC σε διάγραμμα P-h με μέσο το R1233zd(e) μέσω REFPROP.

ο Κύκλο με Προθερμαντήρα (Preheater)

Στη διάταξη του Σχήματος 5.1.1 προστίθεται ένας προθερμαντήρας, στον οποίο εισάγεται το γεωθερμικό νερό που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα για να προθερμάνει το εργαζόμενο μέσο που εξέρχεται από την αντλία. Το γεωθερμικό ρευστό δεν αναθερμαίνεται, συνεπώς η θερμική απόδοση του κύκλου αναμένεται αυξημένη, αφού στον παρονομαστή της Εξίσωσης 1.2.2 εισάγεται μόνο το φορτίο του εξατμιστήρα. Το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1.6.

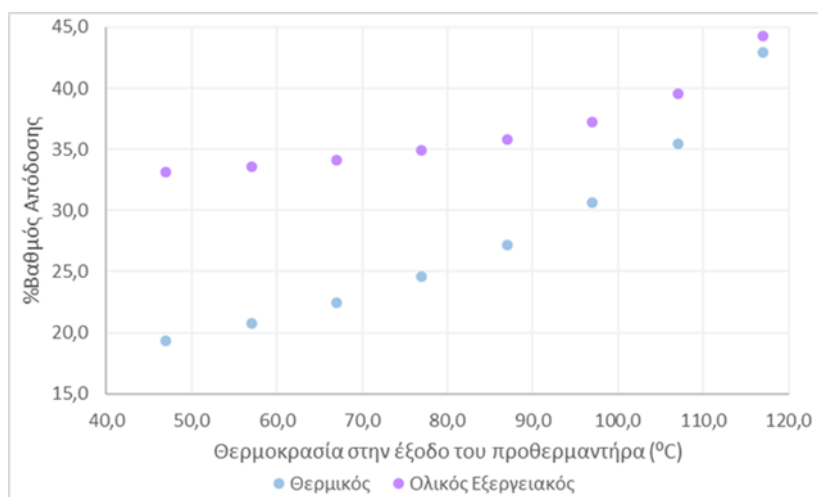


Σχήμα 9.1.6. Διάγραμμα ροής preheated ORC. Τα σημεία 1-5 αφορούν το εργαζόμενο μέσο, τα geoth1, geoth2, geoth3 την πηγή θερμότητας και τα cool1, cool2 το νερό ψύξης.

Ως επιπλέον μεταβλητή εισόδου στην διάταξη αυτή, επιλέγεται η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον προθερμαντήρα. Όσον αφορά το γεωθερμικό ρευστό, επιλέγεται η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του από τον εξατμιστήρα, και όχι η τελική θερμοκρασία του. Στον προθερμαντήρα δεν λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης, δηλαδή το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται σε υγρή κατάσταση στον εξατμιστήρα, και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά είναι τουλάχιστον 9-10°C. Η διαφορά με την recuperated διάταξη είναι ότι ο επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας έχει τέσσερα και όχι τρία κελύφη σε σειρά, με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας εναλλαγής στα 241,3 m<sup>2</sup>.

Κατά τη διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών ανά οργανικό ρευστό, στον εξατμιστήρα

επιλέγεται η μέγιστη επιτρεπτή πίεση, με εξαίρεση τα ρευστά υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή τη μεθανόλη, το τολουόλιο και το ισοπεντάνιο, για τα οποία επιλέγεται χαμηλότερη τιμή για να ισχύουν οι ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές. Επιπλέον, για τα τρία ξηρά ρευστά, είναι ευνοϊκή η έξοδος κορεσμένου και όχι υπέρθερμου ατμού από τον εξατμιστήρα. Η επίδραση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον προθερμαντήρα μελετάται με ανάλυση ευαισθησίας, από την οποία προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της τόσο αυξάνεται η θερμική και η εξεργειακή απόδοση του κύκλου, δηλαδή είναι ευνοϊκή η κατάσταση κορεσμένου και όχι υπόψυκτου υγρού. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται από τους 47°C μέχρι τους 117°C με βήμα 10 βαθμών για το ισοβουτάνιο.



Σχήμα 9.1.7. Αύξηση θερμικού και ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του ORC με την αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του προθερμαντήρα, ενδεικτικά για το ισοβουτάνιο μέσω REFPROP.

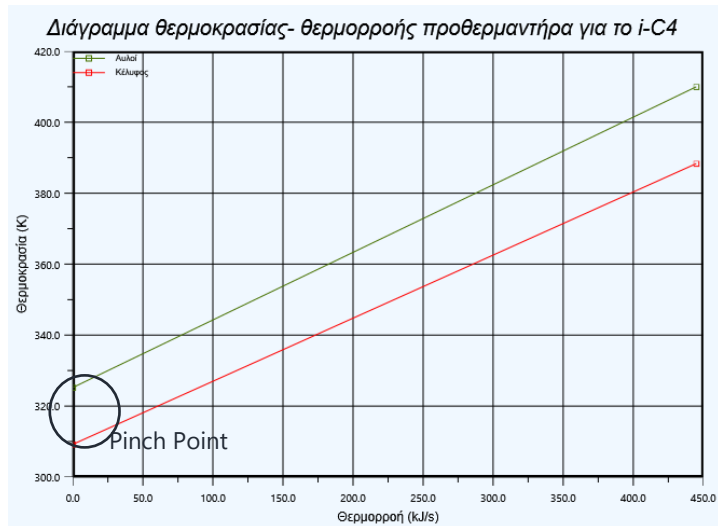
Οι τελικές επιλογές λειτουργικών συνθηκών στο preheated κύκλο ανά ρευστό συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1.2.

Πίνακας 9.1.2. Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο preheated ORC ανά ρευστό.

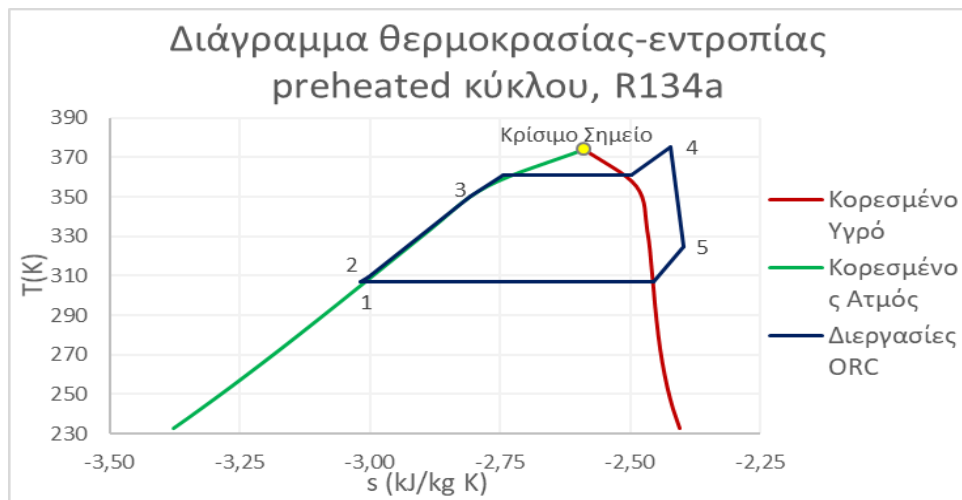
	$T_1$ (°C)	$T_3$ (°C)	$T_4$ (°C)	$P_3$ (kPa)	$T_{\text{geoth2}}$ (°C)
<b>i-C4</b>	33,5	115,2	127	3150	136,9
<b>i-C5</b>	32,5	122	142,5	1600	133,5
<b>Τολουόλιο*</b>	110,6	132	148	260	149,5
<b>R152a</b>	33	96	135,5	3300	106,5
<b>R134a</b>	34	77	102	3100	95
<b>R161</b>	32,5	82	137	3620	92
<b>R1234yf</b>	32,5	79	107	2535	100,1
<b>R1233zd(e)</b>	33,5	98	160	3150	110,5
<b>Μεθανόλη*</b>	64,5	110	190,5	1000	136,9

\*Εξέταση τουλάχιστον ατμοσφαιρικής πίεσης στον συμπυκνωτήρα.

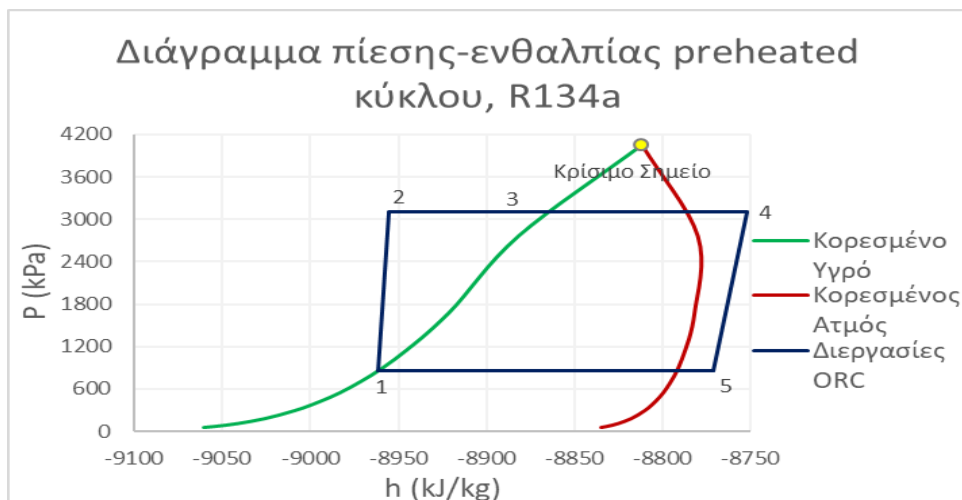
Η μορφή των διαγραμμάτων θερμοκρασίας-θερμορροής στον εξατμιστήρα και τον συμπυκνωτήρα είναι κοινή με το απλό και το recuperated κύκλο (Σχήματα 5.1.11, 5.1.12). Ενδεικτικά, παρατίθεται και το διάγραμμα θερμοκρασίας-θερμορροής στον προθερμαντήρα με χρήση ισοβουτανίου (Σχήμα 9.1.8). Τέλος, δημιουργούνται και πάλι διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (Σχήμα 9.1.9) και πίεσης-ενθαλπίας (Σχήμα 9.1.10), ενδεικτικά για το R134a.



**Σχήμα 9.1.8** Ενδεικτικό διάγραμμα  $T-Q$  στον προθερμαντήρα με  $\Delta T_{pinch}=16^{\circ}C$  με χρήση του ισοβουτανίου.



**Σχήμα 9.1.9.** Αποτύπωση διεργασιών preheated ORC σε διάγραμμα  $T-s$  με μέσο το R134a μέσω REFPROP.

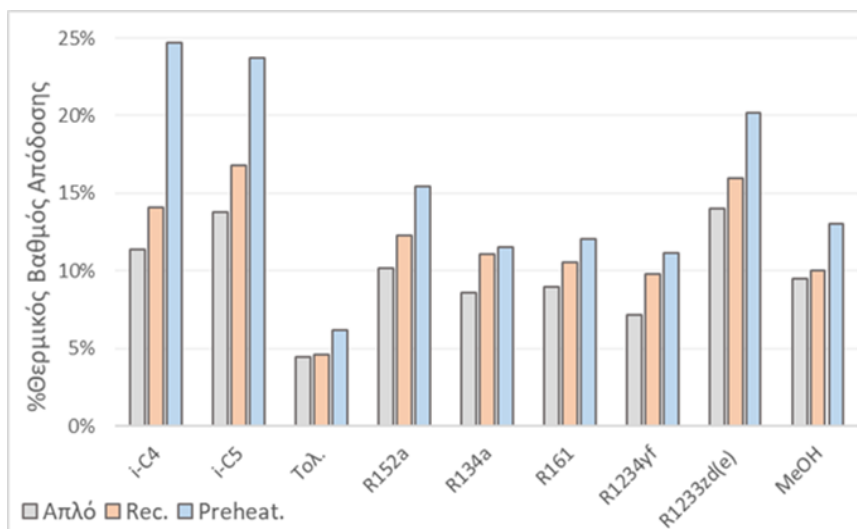


**Σχήμα 9.1.10.** Αποτύπωση διεργασιών preheated ORC σε διάγραμμα  $P-h$  με μέσο το R134a μέσω REFPROP.



## 9.2. Σύγκριση Απλής & Σύνθετων Διατάξεων

Παρατίθενται διαγράμματα που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα της απλής διάταξης και των δύο σύνθετων ώστε, αφενός να γίνει σύγκριση μεταξύ των ρευστών για καθεμία από τις περίπλοκες διατάξεις και αφετέρου, να απεικονιστεί η βελτίωση που αυτές επιφέρουν ως προς το απλό ORC.



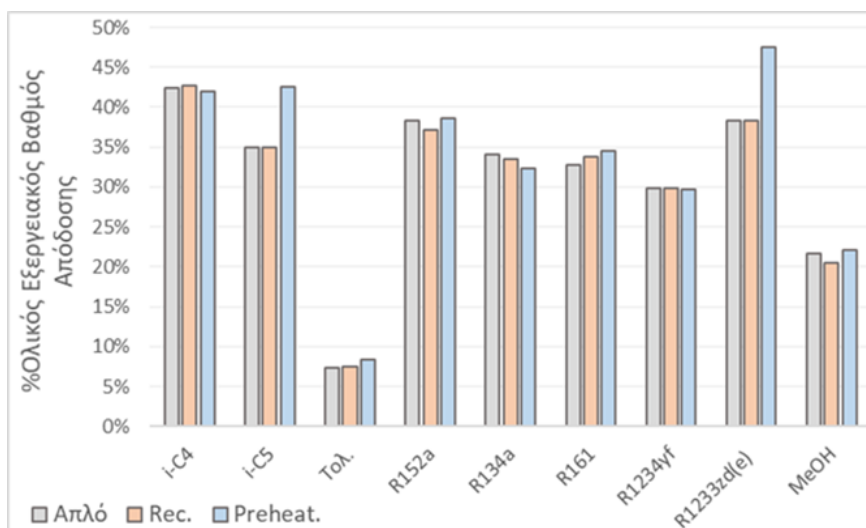
Σχήμα 9.2.1. Θερμικός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.

Μέγιστη απόδοση στο recuperated κύκλο επιτυγχάνεται με χρήση του ισοπεντανίου και ισούται με 16,8%. Ακολουθεί το R1233zd(e) με 16% και το ισοβουτάνιο με 14,1%. Το R134a με 11,1% προηγείται του R161 με 10,5% και της μεθανόλης με 10%. Στο τέλος της φθίνουσας κατάταξης των οργανικών ρευστών βρίσκεται το R1234yf με 9,8% και το τολουόλιο, με 4,6%.

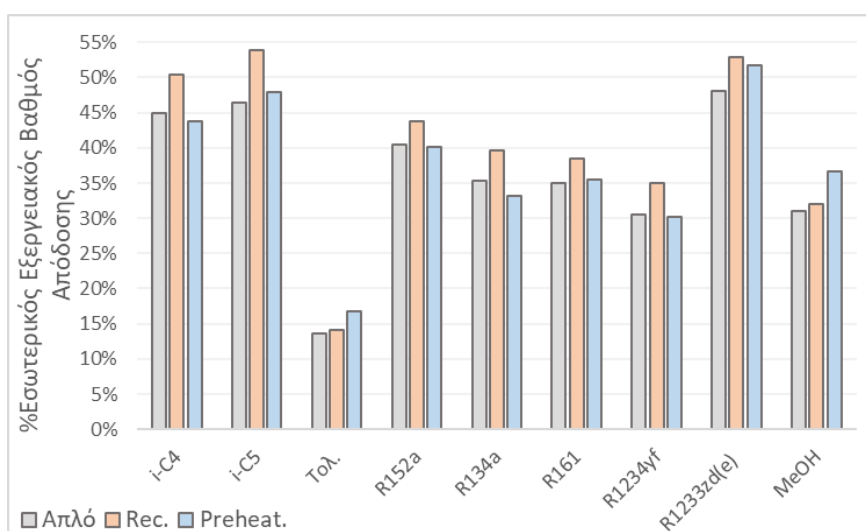
Με χρήση του προθερμαντήρα, το ισοβουτάνιο και το ισοπεντάνιο επιφέρουν αποδόσεις που προσεγγίζουν τις αναμενόμενες τιμές ενός συμβατικού κύκλου Rankine, ξεπερνώντας το 23%. Το ίδιο ισχύει και με το R1233zd(e), με απόδοση στο 20,2%. Στην συνέχεια, το R152a με 15,4% είναι μία πολύ καλή επιλογή, ενώ ακόμη και το R1234yf ξεπερνά το όριο του 10%. Παρά τον περιορισμό των πιέσεων στον συμπυκνωτήρα, η χρήση της μεθανόλης οδηγεί σε απόδοση υψηλότερη από των δύο HFCs και της υδροφθοροολεφίνης, ενώ το τολουόλιο και πάλι δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η κατάταξη των οργανικών ρευστών σε φθίνουσα σειρά του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης (Σχήμα 9.2.2) για τη διάταξη με τον recuperator είναι πανομοιότυπη με αυτή του απλού κύκλου. Το ισοβουτάνιο προηγείται με 42,8% και ακολουθεί το R1233zd(e) με 38,3%. Το R152a επιφέρει τιμή ίση με 37,1% και το ισοπεντάνιο με 35%. Η μόνη διαφορά από την απλή διάταξη είναι ότι οι τιμές των υπόλοιπων HFCs είναι σχεδόν ταυτόσημες, με ελαφρώς υψηλότερη αυτή του R161. Από εξεργειακή σκοπιά, το τολουόλιο και η μεθανόλη δεν αποδίδουν ούτε στο recuperated κύκλο, ενώ το R1234yf οδηγεί σε απόδοση ίση με 29,8%.

Δεν σημειώνεται η ίδια σειρά και για τη διάταξη με τον προθερμαντήρα. Η ολική εξεργειακή απόδοση με το R1233zd(e) αγγίζει το 47,5%, αποτελώντας την καλύτερη που έχει επιτευχθεί σε όλες τις παραλλαγές του συστήματος. Στην συνέχεια, το ισοπεντάνιο με 42,5% και το ισοβουτάνιο με 42% είναι επίσης πολύ αποδοτικά από εξεργειακή σκοπιά. Τα υπόλοιπα ρευστά επιφέρουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα, δηλαδή το R152a προηγείται με 38,5% των άλλων δύο HFCs, του R1234yf, της μεθανόλης και του τολουολίου.



Σχήμα 9.2.2. Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετούμενες διατάξεις του ORC.



Σχήμα 9.2.3. Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης ανά ρευστό για τις τρεις μελετούμενες διατάξεις του ORC.

Στο recuperated κύκλο η μεγιστοποίηση του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης (Σχήμα 9.2.3) παρατηρείται στα ίδια ρευστά για τα οποία μεγιστοποιείται και η θερμική απόδοση (Σχήμα 9.2.1). Προηγείται το ισοπεντάνιο με 53,8% και έπειτα το R1233zd(e) με 52,9%. Το ισοβουτάνιο με 50,4% έχει μεγάλη διαφορά από το R152a με 43,8%. Το R161 προηγείται του R134a, ενώ η εσωτερική εξεργειακή απόδοση με τη μεθανόλη είναι αρκετά κοντινή στο 35% του R1234yf.

Μέγιστη τιμή στο preheated κύκλο, ίση με 51,7%, επιτυγχάνεται με το R1233zd(e), ενώ το ισοπεντάνιο επιφέρει εσωτερική εξεργειακή απόδοση ίση με 47,9%. Στην συνέχεια, το ισοβουτάνιο, με 43,7%, και το R152a, με 40,1%, προηγούνται της μεθανόλης, με 36,6%. Τη μεθανόλη διαδέχεται το R161 και το R134a, ενώ το R1234yf οδηγεί σε τιμή ίση με μόλις 30,3%.

Οι σχετικές μεταβολές στις τρεις εκφράσεις της απόδοσης με τις δύο σύνθετες διατάξεις του οργανικού κύκλου Rankine σε σχέση με την απλή συνοψίζονται στον Πίνακα 9.2.1.

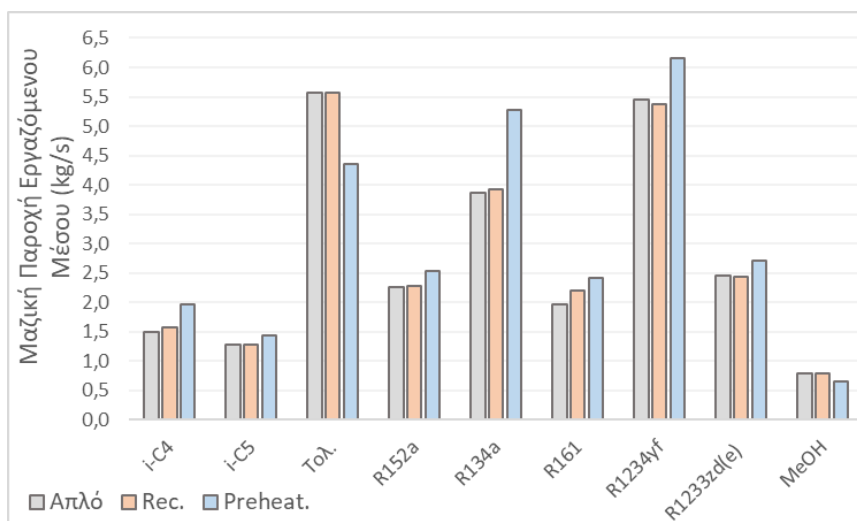
Πίνακας 9.2.1. %Σχετική μεταβολή τριών βαθμών απόδοσης με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator στο απλό ORC.

	Preheated Κύκλο			Recuperated Κύκλο		
	%n <sub>th</sub>	%n <sub>ex</sub>	%εσωτερικός n <sub>ex</sub>	%n <sub>th</sub>	%n <sub>ex</sub>	%εσωτερικός n <sub>ex</sub>
<b>i-C4</b>	117,0%	-0,9%	-2,6%	24,0%	0,8%	12,1%
<b>i-C5</b>	72,1%	21,4%	3,3%	21,9%	-0,1%	16,0%
<b>Τολουόλιο</b>	39,0%	15,5%	23,0%	3,3%	3,3%	3,3%
<b>R152a</b>	52,1%	0,5%	-0,8%	20,8%	-3,2%	8,3%
<b>R134a</b>	34,6%	-5,3%	-6,2%	29,4%	-1,7%	12,2%
<b>R161</b>	34,2%	5,7%	1,7%	17,5%	3,4%	10,2%
<b>R1234yf</b>	55,9%	-0,6%	-0,7%	36,6%	-0,1%	14,7%
<b>R1233zd(e)</b>	44,4%	23,9%	7,5%	14,5%	-0,1%	10,0%
<b>Μεθανόλη</b>	36,8%	2,3%	17,8%	5,1%	-5,2%	2,7%

Από τον Πίνακα 9.2.1 γίνεται αντιληπτό ότι η προσθήκη του επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας, είτε αυτός αξιοποιείται ως recuperator είτε ως προθερμαντήρας, αυξάνει το θερμικό βαθμό απόδοσης του ORC για όλα τα ρευστά. Η προσθήκη recuperator επιφέρει σχετική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης που μεγιστοποιείται στο 37% για το R1234yf. Εξαιρώντας τη μεθανόλη και το τολουόλιο, για τα υπόλοιπα ρευστά η αύξηση είναι τουλάχιστον 15%, έχοντας τιμές πάνω από 20% για τα αλκάνια, το R134a και το R152a. Από την άλλη μεριά, η διάταξη με τον προθερμαντήρα επιφέρει σχετική αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης τουλάχιστον ίση με 34% για το R161 και το R134a, καθώς και 37% και 39% για τη μεθανόλη και το τολουόλιο αντίστοιχα, παρά τις μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στον συμπυκνωτήρα. Η μέγιστη αύξηση σημειώνεται στην περίπτωση του ισοβουτανίου, για το οποίο η προσθήκη προθερμαντήρα εκτοξεύει τη θερμική απόδοση από το 11,4% στο 24,7%. Πολύ σημαντική είναι και η αύξηση για το ισοπεντάνιο, από το 13,8% στο 23,7%, καθώς και για το R1234yf, ίση με 56%.

Σε αντίθεση με το θερμικό, στον ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης σημειώνονται τόσο αυξήσεις όσο και μειώσεις με αξιοποίηση των σύνθετων διατάξεων. Με τον recuperator, ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται όταν ως εργαζόμενα μέσα χρησιμοποιούνται τα R152a, R134a, R1233zd(e) και η μεθανόλη, ενώ με τον προθερμαντήρα τα R134a, R1234yf και το ισοβουτάνιο. Επιπλέον, με την πρώτη διάταξη, οι σχετικές αυξομειώσεις δεν ξεπερνούν το 5%, ενώ με τη δεύτερη σημειώνονται αυξήσεις μεγαλύτερες από 15% για το τολουόλιο, το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e). Οι μειώσεις και με αυτή τη διάταξη φτάνουν έως το 5%.

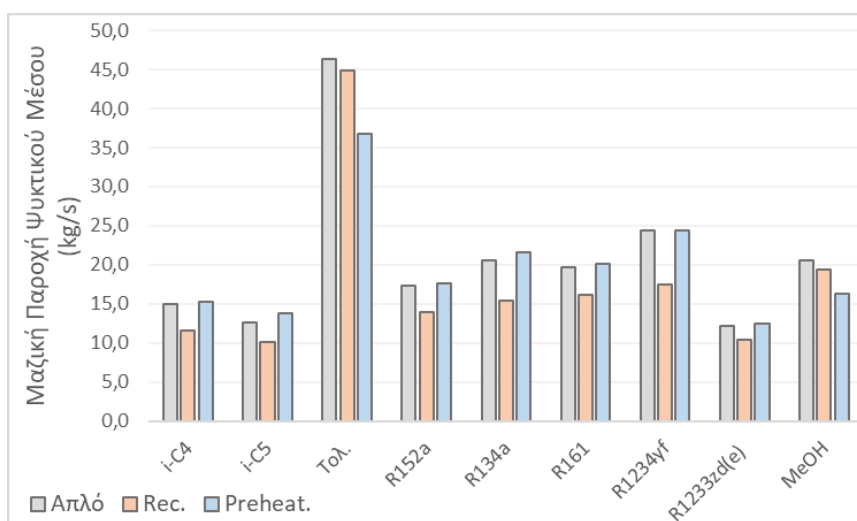
Η προσθήκη του recuperator αυξάνει τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης σε όλες τις περιπτώσεις ρευστών. Με εξαίρεση τη μεθανόλη και το τολουόλιο, η διάταξη αυτή επιφέρει σημαντικά υψηλότερη αύξηση της απόδοσης αυτής σε σχέση με τη χρήση του προθερμαντήρα. Μάλιστα, η δεύτερη σύνθετη διάταξη του ORC οδηγεί σε μείωση της συγκεκριμένης έκφρασης της απόδοσης για τα ρευστά ισοβουτάνιο, R152a, R134a και R1234yf. Οι μειώσεις αυτές είναι αρκετά χαμηλές, με τη μέγιστη σχετική μείωση να ισούται με 6,2% για το R134a. Όσο για το recuperated κύκλο, η μέγιστη αύξηση αφορά το ισοπεντάνιο και ισούται με 16%, και έπειτα το R1234yf, ίση με 14,7%. Οι σχετικές μεταβολές του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης είναι γενικά πιο υψηλές από του ολικού.



Σχήμα 9.2.4. Μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.

Μέγιστη μαζική παροχή στο recuperated κύκλο έχει το τολουόλιο και πολύ κοντά το R1234yf με περίπου 5,5 kg/s, ενώ ελάχιστη έχει η μεθανόλη, με 0,8 kg/s. Πολύ χαμηλές είναι οι παροχές των δύο αλκανίων, περί των 1,3-1,5 kg/s. Το R1233zd(e) έχει και με αυτή τη διάταξη μαζική παροχή περίπου ίση με 2,4 kg/s, δηλαδή μεγαλύτερη από το R161 και το R152a.

Με χρήση του προθερμαντήρα, και πάλι η ελάχιστη μαζική παροχή αντιστοιχεί στη μεθανόλη και ισούται με μόλις 0,65 kg/s. Ακολουθεί το ισοπεντάνιο με 1,44 kg/s και το ισοβουτάνιο με περίπου 2 kg/s. Η παροχή του R1233zd(e) είναι τετραπλάσια της μεθανόλης και διπλάσια του ισοπεντανίου. Η φθίνουσα κατάταξη των ρευστών είναι γενικά παρόμοια με το απλό ORC, με τη διαφορά ότι το τολουόλιο με 4,35 kg/s έχει μικρότερη παροχή τόσο από το R1234yf, με 6,16 kg/s, όσο και από το R134a, με 5,28 kg/s.

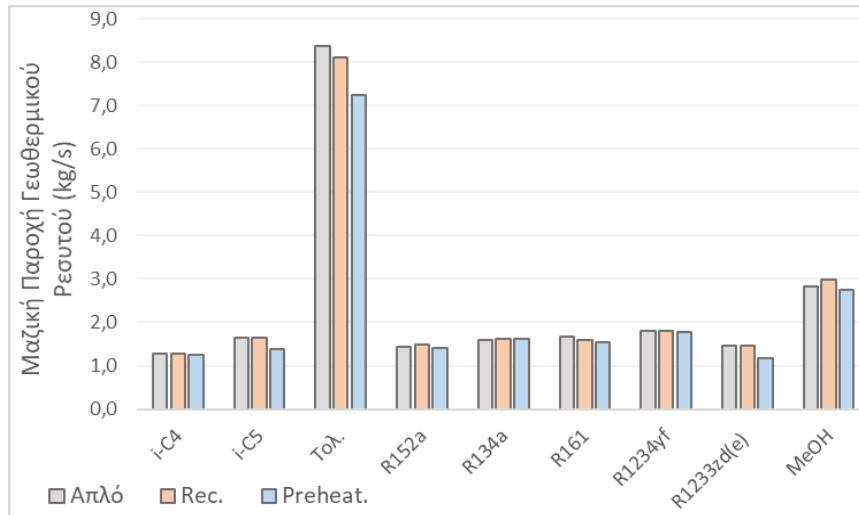


Σχήμα 9.2.5. Μαζική παροχή νερού ψύξης ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.

Αντίστοιχα με το εργαζόμενο μέσο, και η μαζική παροχή του νερού ψύξης ακολουθεί σχεδόν πανομοιότυπη τάση στο recuperated και στο απλό κύκλο. Η κύρια διαφορά αφορά τη μεθανόλη, η οποία επιφέρει τη δεύτερη μέγιστη απαίτηση για ψύξη μετά το τολουόλιο, και ακολουθούν το R1234yf και το R134a. Επιπλέον, το ισοπεντάνιο οδηγεί σε απαίτηση χαμηλότερη κατά 0,4 kg/s από το R1233zd(e).

Όταν χρησιμοποιείται η διάταξη με τη προθέρμανση, προηγείται και πάλι το τολουόλιο,

με αρκετά μεγαλύτερη απαίτηση σε σχέση με τα υπόλοιπα ρευστά, και ακολουθεί το R1234yf και το R134a. Σε αυτή την περίπτωση, η μεθανόλη έχει μικρότερη απαίτηση για νερό ψύξης από το R152a κατά 1,38 kg/s, ενώ συνολικά την ελάχιστη απαίτηση επιφέρει η χρήση του R1233zd(e), ίση με 12,5 kg/s.



Σχήμα 9.2.6. Μαζική παροχή γεωθερμικού νερού ανά ρευστό για τις τρεις μελετώμενες διατάξεις του ORC.

Η απαίτηση σε νερό γεωθερμίας είναι αρκετά κοντινή σε σχέση με το απλό κύκλο και στις δύο διατάξεις για όλα τα ρευστά. Μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στη διάταξη με τον προθερμαντήρα. Η μέγιστη απαίτηση σημειώνεται με το τολουόλιο και τη μεθανόλη. Η ελάχιστη στην περίπτωση του preheated κύκλου παρατηρείται με το R1233zd(e) και όχι με το ισοβουτάνιο, όπως στην απλή και στην recuperated διάταξη.

Οι σχετικές μεταβολές των μαζικών παροχών στις σύνθετες διατάξεις σε σχέση με το απλό ORC συνοψίζονται στον Πίνακα 9.2.2.

Πίνακας 9.2.2. %Σχετική μεταβολή μαζικών παροχών εργαζόμενου μέσου, νερού ψύξης και γεωθερμικού ρευστού με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator στο απλό ORC.

	Preheated Κύκλο			Recuperated Κύκλο		
	Μέσο	Ψυκτικό	Γεωθερμικό	Μέσο	Ψυκτικό	Γεωθερμικό
<b>i-C4</b>	32,0%	2,1%	-3,2%	5,8%	-22,4%	-1,5%
<b>i-C5</b>	12,1%	8,5%	-16,6%	0,4%	-20,9%	0,1%
<b>Τολουόλιο</b>	-21,8%	-20,6%	-13,6%	0,0%	-3,3%	-3,2%
<b>R152a</b>	12,2%	2,1%	-1,8%	1,5%	-19,2%	3,2%
<b>R134a</b>	37,0%	5,0%	0,7%	1,9%	-24,9%	1,7%
<b>R161</b>	23,0%	2,7%	-8,0%	12,2%	-17,4%	-4,5%
<b>R1234yf</b>	13,1%	-0,5%	-1,4%	-1,4%	-28,5%	0,6%
<b>R1233zd(e)</b>	10,6%	2,3%	-20,1%	-0,2%	-14,7%	0,2%
<b>Μεθανόλη</b>	-17,5%	-20,6%	-2,7%	0,3%	-5,3%	5,5%

Για τα περισσότερα ρευστά, η χρήση του recuperator επιφέρει αμελητέες μεταβολές στη μαζική τους παροχή. Εξαιρέση αποτελούν το R161, του οποίου η παροχή αυξάνεται κατά 0,24 kg/s, και το ισοβουτάνιο, με σχετική αύξηση περίπου ίση με 6%. Οι υπόλοιπες μεταβολές

δεν ξεπερνούν το 2%, ενώ μείωση σημειώνεται μόνο στη μαζική παροχή των δύο υδροφθοροολεφινών. Οι μεταβολές είναι πιο σημαντικές όταν χρησιμοποιείται προθερμαντήρας. Μόνο στην περίπτωση του τολουολίου και της μεθανόλης, η μαζική παροχή μειώνεται κατά 21,8% και 17,5% αντίστοιχα. Οι αυξήσεις για τα υπόλοιπα ρευστά κινούνται σε ένα εύρος 10-37%, κάτι που συνεπάγεται ότι η διάταξη αυτή επιφέρει και τις μέγιστες μαζικές παροχές για τα περισσότερα εργαζόμενα μέσα.

Στο recuperated κύκλο είναι σημαντική η μείωση της απαίτησης για νερό ψύξης με όλα τα ρευστά, με εξαίρεση τις μικρότερες μειώσεις, της τάξης του 5%, στο τολουόλιο και τη μεθανόλη. Οι τιμές της μείωσης για τις υπόλοιπες ουσίες κινούνται σε ένα εύρος 15-30%, με τη μέγιστη να αφορά το R1234yf και την ελάχιστη το R1233zd(e). Αντίθετα, η διάταξη με τον προθερμαντήρα επιφέρει, για την πλειοψηφία των ρευστών, αυξημένες μαζικές παροχές νερού ψύξης, με εξαίρεση το τολουόλιο και τη μεθανόλη, για τα οποία οι απαιτήσεις μειώνονται κατά τουλάχιστον 20%. Η μέγιστη αύξηση εμφανίζεται στο ισοπεντάνιο, από τα 12,7 στα 13,8 kg/s, και έπειτα στο R134a, από τα 20,5 στα 21,5 kg/s ψυκτικού μέσου.

Όσον αφορά το γεωθερμικό ρευστό, στο recuperated κύκλο οι παροχές εμφανίζουν αρκετά μικρές διακυμάνσεις σε σχέση με το απλό κύκλο. Η μέγιστη μείωση της μαζικής του παροχής σημειώνεται όταν χρησιμοποιείται το τολουόλιο και ισούται με 3,2% και η μέγιστη αύξηση με τη μεθανόλη, ίση με 5,5%. Στο preheated κύκλο οι διαφορές είναι και πάλι υψηλότερες, με την πλειοψηφία των ρευστών να απαιτούν μειωμένες ποσότητες νερού γεωθερμίας, λόγω της ψύξης του σε χαμηλότερη θερμοκρασία στον προθερμαντήρα. Η μεγαλύτερη μείωση, ίση με 20,1%, αφορά το R1233zd(e), για το οποίο το γεωθερμικό ρευστό ψύχεται σε θερμοκρασία κατά 30°C χαμηλότερη από της απλής διάταξης. Σημαντικές είναι και οι μεταβολές στο ισοπεντάνιο και το τολουόλιο, ενώ στα υπόλοιπα ρευστά η σχετική μείωση είναι μικρότερη από 10%.

Συνολικά, δεν υπάρχει κάποιο ρευστό για το οποίο να αυξάνονται σημαντικά και ταυτόχρονα και οι τρεις παροχές στο recuperated κύκλο. Αντίθετα, με χρήση του προθερμαντήρα, το R134a και το ισοβουτάνιο έχουν αυξημένη μαζική παροχή, αλλά και αυξημένες απαιτήσεις σε βοηθητικές παροχές, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του κόστους του συστήματος.

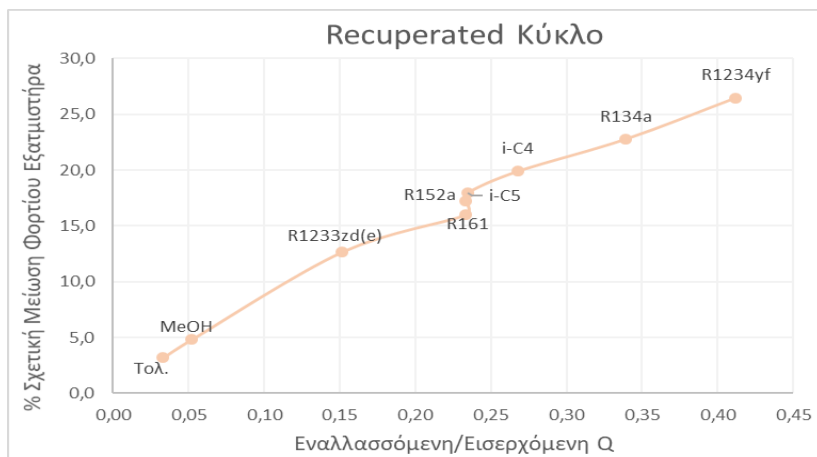
Και στις δύο σύνθετες διατάξεις, η εσωτερική εναλλαγή θερμότητας μειώνει το φορτίο του εξατμιστήρα. Η χρήση του recuperator μειώνει παράλληλα και το φορτίο του συμπυκνωτήρα, καθώς προψύχεται το εργαζόμενο μέσο που εισέρχεται σε αυτόν, κάτι που δεν ισχύει με τη χρήση του προθερμαντήρα, η οποία απάγει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας στο νερό ψύξης.

Στο recuperated κύκλο η μέγιστη σχετική μείωση του φορτίου του εξατμιστήρα ισούται με 26,5% και του συμπυκνωτήρα με 28,5% και παρατηρούνται με χρήση του R1234yf. Για το συγκεκριμένο ρευστό εναλλάσσεται και η μέγιστη ποσότητα θερμότητας στον recuperator, ίση με 367 kW. Η ελάχιστη μείωση των φορτίων των δύο εναλλακτών παρουσιάζεται στο τολουόλιο και είναι μικρότερη από 4%, και ακολούθως στη μεθανόλη, με εσωτερική εναλλαγή μόλις 52 kW θερμότητας. Η σχετική μείωση του φορτίου του εξατμιστήρα είναι αρκετά υψηλότερη στο preheated κύκλο, ξεπερνώντας το 25% για όλα τα ρευστά. Η μέγιστη μείωση αφορά το ισοβουτάνιο, με την ποσότητα της θερμότητας που εναλλάσσεται στον προθερμαντήρα να είναι μεγαλύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται στον εξατμιστήρα. Πολύ σημαντική είναι και η βελτίωση στην περίπτωση του ισοπεντανίου. Ελάχιστη μείωση σημειώνεται με χρήση της μεθανόλης, με τη θερμότητα που εναλλάσσεται στον προθερμαντήρα να μην ξεπερνά τα 90 kW.

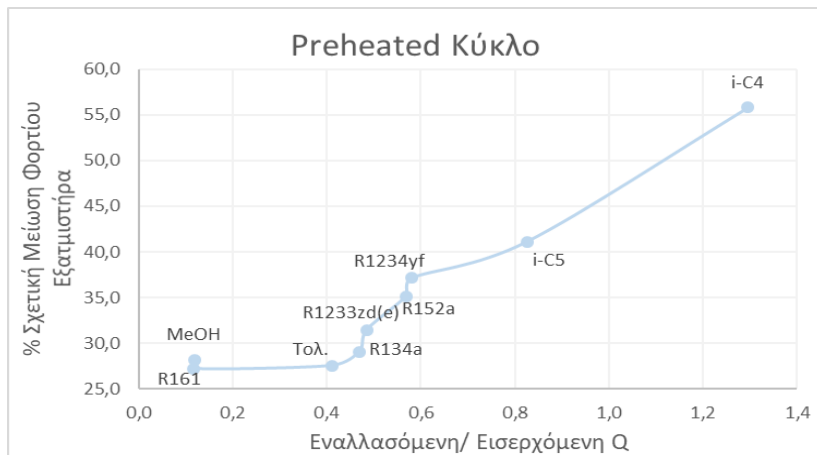
Πίνακας 9.2.3. %Σχετική μεταβολή φορτίου εξατμιστήρα και συμπυκνωτήρα και θερμότητα εναλλαγής στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας ανά διάταξη και ανά ρευστό.

	Σχετική Μεταβολή Εισερχόμενης Θερμότητας		Σχετική Μεταβολή Εξερχόμενης Θερμότητας		Εναλλασσόμενη Θερμότητα (kW)	
	Preheated	Rec.	Preheated	Rec.	Preheated	Rec.
	Κύκλο	Κύκλο	Κύκλο	Κύκλο	Κύκλο	Κύκλο
i-C4	-55,8%	-19,9%	2,1%	-22,4%	445,0	167,0
i-C5	-41,1%	-18,0%	8,5%	-20,9%	329,1	130,2
Τολουόλιο	-28,2%	-3,2%	-20,6%	-3,3%	189,3	71,1
R152a	-35,1%	-17,3%	2,8%	-18,6%	326,5	170,8
R134a	-29,1%	-22,8%	5,0%	-24,9%	343,3	270,4
R161	-27,5%	-16,0%	2,7%	-17,4%	295,2	194,5
R1234yf	-37,1%	-26,5%	-0,5%	-28,5%	442,4	367,1
R1233zd(e)	-31,5%	-12,7%	2,3%	-14,7%	216,7	86,2
Μεθανόλη	-27,2%	-4,8%	-20,6%	-5,3%	89,3	51,6

Η άμεση συσχέτιση της μείωσης του φορτίου του εξατμιστήρα και της θερμότητας εναλλαγής στον επιπλέον εναλλάκτη δεν είναι εντελώς ξεκάθαρη. Πιο πολύ νόημα έχει η συσχέτιση της μείωσης αυτής με το πηλίκο της εναλλασσόμενης θερμότητας προς την εισερχόμενη στον εξατμιστήρα.



Σχήμα 9.2.7. %Σχετική μείωση  $Q_{in}$  συναρτήσει του λόγου  $Q_{εναλλασσόμενη}/Q_{in}$  στο recuperated κύκλο.



Σχήμα 9.2.8. %Σχετική μείωση  $Q_{in}$  συναρτήσει του λόγου  $Q_{εναλλασσόμενη}/Q_{in}$  στο preheated κύκλο.



Η τάξη μεγέθους της μείωσης της θερμότητας στον εξατμιστήρα, αλλά και του λόγου της εναλλασσόμενης προς την εισερχόμενη θερμότητα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της διάταξης με τον προθερμαντήρα, σε αντιστοιχία με τους υψηλότερους θερμοκούς βαθμούς απόδοσης (Σχήμα 9.2.1). Σε γενικές γραμμές, όσο αυξάνεται ο λόγος της εναλλασσόμενης προς την εισερχόμενη θερμότητα τόσο μειώνεται η απαιτούμενη θερμότητα στον εξατμιστήρα.

Υπολογίζεται και η καταστροφή εξέργειας που λαμβάνει χώρα στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας καθώς και συνολικά στο κύκλο.

**Πίνακας 9.2.4.** %Σχετική μεταβολή ολικής καταστροφής εξέργειας με προσθήκη του προθερμαντήρα και του recuperator και μεμονωμένη καταστροφή εξέργειας στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας.

	Σχετική μείωση ολικής εξεργειακής καταστροφής		Καταστροφή εξέργειας στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας (kW)	
	Preheated Κύκλο	Recuperated Κύκλο	Preheated Κύκλο	Recuperated Κύκλο
<b>i-C4</b>	0,6%	-22,4%	4,1	17,1
<b>i-C5</b>	-4,9%	-25,9%	5,2	19,9
<b>Τολουόλιο</b>	-22,6%	-3,7%	1,0	8,6
<b>R152a</b>	-0,1%	-12,9%	7,8	9,4
<b>R134a</b>	5,1%	-16,7%	13,1	10,9
<b>R161</b>	-5,4%	-15,3%	8,2	7,2
<b>R1234yf</b>	-0,9%	-17,9%	16,5	13,8
<b>R1233zd(e)</b>	-14,5%	-17,5%	3,4	12,1
<b>Μεθανόλη</b>	-22,3%	-3,8%	1,5	8,3

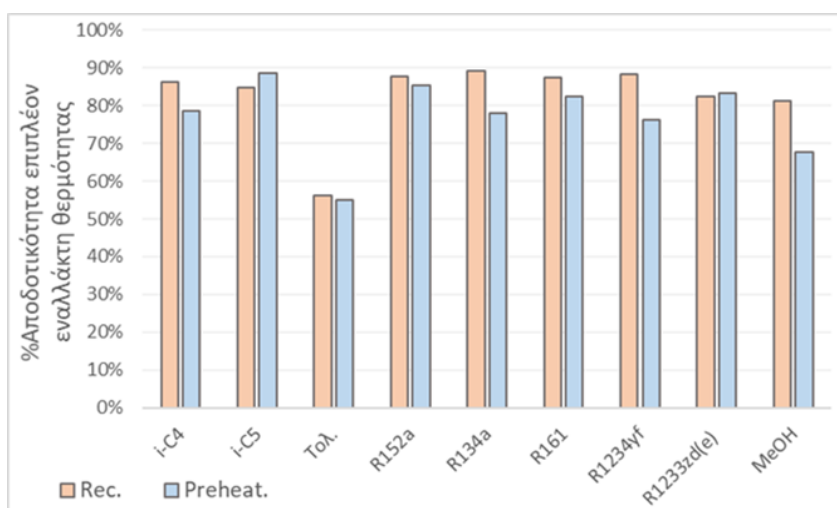
Οι σύνθετες διατάξεις, παρόλο που περιέχουν μία επιπλέον συσκευή, οδηγούν σε μείωση της ολικής εξεργειακής καταστροφής, υποδεικνύοντας έτσι την πιο ουσιαστική αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των διαθέσιμων θερμών ρευμάτων και την αποδοτικότερη λειτουργία του εξατμιστήρα και του συμπυκνωτήρα, καθώς οι διακυμάνσεις στην αντλία και στον στρόβιλο είναι πολύ μικρές και για τις δύο διατάξεις. Ειδικότερα, η χρήση του recuperator μειώνει την καταστροφή εξέργειας για όλες τις περιπτώσεις ρευστών. Η πιο σημαντική μείωση παρουσιάζεται στο ισοπεντάνιο και ισούται με περίπου 26%, και στο ισοβουτάνιο, με 22,4%. Οι μικρότερες μειώσεις σημειώνονται στο τολουόλιο και τη μεθανόλη και δεν ξεπερνούν το 4%. Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν με χρήση του προθερμαντήρα, δηλαδή οι μέγιστες μειώσεις παρουσιάζονται στη μεθανόλη και το τολουόλιο και ξεπερνούν το 22%, έπειτα στο R1233zd(e), με 14,5%, ενώ οι υπόλοιπες τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες. Εξαίρεση αποτελεί το R134a, στο οποίο σημειώνεται αύξηση της ολικής εξεργειακής απώλειας, ίση με 5%.

Στον επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας λαμβάνει χώρα αρκετά μικρή εξεργειακή καταστροφή, που δεν ξεπερνά τα 20 kW, ανεξάρτητα από το ρευστό και τη διάταξη του κύκλου. Με τα περισσότερα ρευστά, η απώλεια εξέργειας είναι μικρότερη στον recuperator από ότι στον προθερμαντήρα. Εξαίρεση αποτελεί το R1234yf, με το οποίο η καταστροφή στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας είναι η μέγιστη και ίση με 16,5 kW, το R134a και το R161. Στον προθερμαντήρα η καταστροφή μεγιστοποιείται με τα δύο αλκάνια και το R1234yf για τα οποία, όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 9.2.3, είναι μέγιστη και η ποσότητα θερμότητας που εναλλάσσεται στην συγκεκριμένη συσκευή.

Όσον αφορά τις εξεργειακές αποδόσεις των συσκευών του κύκλου, οι διακυμάνσεις

στην αντλία και στον στρόβιλο είναι αμελητέες. Οι αποδόσεις του συμπυκνωτήρα προκύπτουν αυξημένες για όλα τα ρευστά και στις δύο διατάξεις σε σχέση με το απλό κύκλο, με τις σχετικές αυξήσεις σε κάποιες περιπτώσεις να ξεπερνούν το 50%, λόγω της μικρής τάξης μεγέθους της απόδοσης του εναλλάκτη. Ο εξαμιστήρας του recuperated κύκλου έχει μεγαλύτερη απόδοση από του απλού, ενώ στο preheated κύκλο οι αποδόσεις αυτές είναι μικρότερες σε σχέση με την απλή διάταξη για τα ρευστά ισοβουτάνιο, R152a, R134a και R1234yf.

Υπολογίζεται η αποδοτικότητα του επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας, μέσω της Εξίσωσης 9.1.1. Στο recuperated κύκλο, η μέγιστη αποδοτικότητα σημειώνεται στην περίπτωση του R134a και ισούται με 89,1%. Η ελάχιστη παρατηρείται στο τολουόλιο, ίση με 56,3%. Οι τιμές για τα υπόλοιπα ρευστά κινούνται στο εύρος 80-85%, τιμές που επιλέγονται συχνά ως κριτήριο σχεδιασμού του recuperator. Η αποδοτικότητα του προθερμαντήρα προκύπτει, για την πλειονότητα των ρευστών, ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή του recuperator, εξαιρώντας το R1233zd(e). Η τιμή είναι το ίδιο χαμηλή και με τις δύο διατάξεις για το τολουόλιο, αρκετά χαμηλή για τη μεθανόλη, περί του 68%, ενώ για τα υπόλοιπα ρευστά κινείται στο εύρος 76-85%.



Σχήμα 9.2.9. Αποδοτικότητα recuperator και preheater στις δύο μελετώμενες σύνθετες διατάξεις του ORC.

Συμπερασματικά, η διάταξη με τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας προτείνεται όταν πρωταρχικός στόχος είναι η όσο τον δυνατόν ελαχιστοποίηση του κόστους, με παράλληλη βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης, αφού τόσο η μαζική παροχή του εργαζόμενου μέσου όσο και του νερού ψύξης είναι χαμηλότερες συγκριτικά με την εναλλακτική διάταξη. Αντίθετα, αν πρωταρχικής σημασίας είναι η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση, το κύκλο με τον προθερμαντήρα επιφέρει πολύ υψηλές τιμές θερμικής απόδοσης και ικανοποιητικές εξεργειακές αποδόσεις, με ελαφρώς αυξημένες μαζικές παροχές των οργανικών ρευστών και του ψυκτικού μέσου.

### 9.3. Εξέταση Σύνθετων Διατάξεων με Εναλλακτικές Πηγές Θερμότητας

#### 9.3.1. Βέλτιστη Θερμοκρασία Γεωθερμικού Ρευστού στο Recuperated ORC

Στο recuperated κύκλο μεταβάλλεται η αρχική θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού στο εύρος 120-250°C, προκειμένου η πηγή θερμότητας να συνδυάζεται βέλτιστα με το εκάστοτε εργαζόμενο μέσο. Οι υπόλοιπες σχεδιαστικές επιλογές παραμένουν αμετάβλητες.

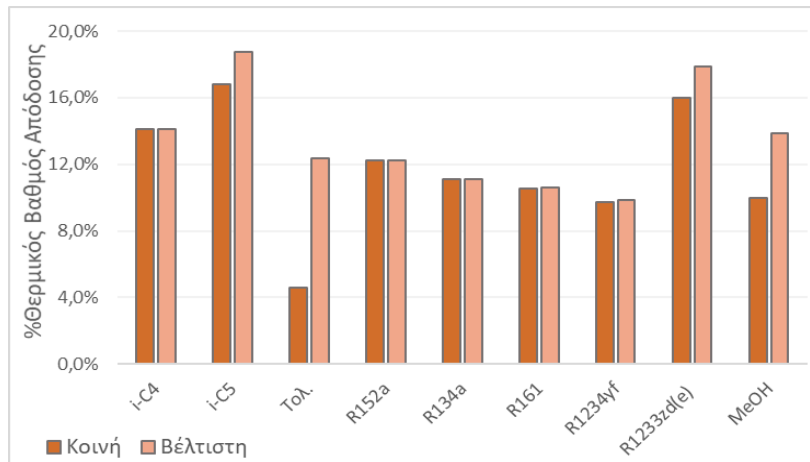
- **Ισοβουτάνιο:** η βέλτιστη θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου είναι χαμηλότερη από τους 200°C. Συνεπώς, η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας θα επέφερε μείωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του κύκλου. Αντίθετα, η μείωση της θερμοκρασίας αυτής θα οδηγούσε σε σημαντική ελάττωση της θερμοκρασιακής διαφοράς στον εξατμιστήρα. Συνεπώς, με το συγκεκριμένο ρευστό οι βέλτιστες συνθήκες ταυτίζονται με τις αρχικές (Πίνακας 9.1.1).
- **Ισοπεντάνιο:** η αρχική θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού επιλέγεται στους 227°C και η πίεσή του στα 2700 kPa (τιμή αυξημένη κατά περίπου 50 kPa από την τάση ατμών του καθαρού νερού στην συγκεκριμένη θερμοκρασία). Αυξάνεται και η υψηλή πίεση του κύκλου από τα 2150 στα 2565 kPa.
- **Τολουόλιο:** η μέγιστη δυνατή πίεση αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κορεσμού υψηλότερη από τους 250°C. Για θερμοκρασία του τολουολίου ίση με 238°C, η πίεση κορεσμού ισούται με 1400 kPa. Ωστόσο, στα recuperated κύκλα ο ατμός που εξέρχεται από τον εξατμιστήρα πρέπει να είναι υπέρθερμος, συνεπώς η πίεση μειώνεται περαιτέρω, μέχρι την τιμή των 800 kPa.
- **R152:** η αύξηση της θερμοκρασίας της πηγής θα επέφερε ελαφριά άνοδο του θερμικού βαθμού απόδοσης, αλλά μείωση των εξεργειακών. Οι βέλτιστες συνθήκες ταυτίζονται με τις αρχικές, καθώς η χαμηλότερη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας θα μείωνε το περιθώριο αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου της υγρής φάσης από τον recuperator, η οποία είναι ευνοϊκό να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη (Σχήμα 9.1.2).
- **R134a:** και σε αυτή την περίπτωση ρευστού οι βέλτιστες συνθήκες ταυτίζονται με τις αρχικές. Με μείωση της θερμοκρασίας της πηγής, θα μειωνόταν σημαντικά ο θερμικός και οι μαζικές παροχές του εργαζόμενου μέσου και του νερού ψύξης. Με αύξηση της θερμοκρασίας θα προέκυπταν τα ίδια με το R152a.
- **R161:** η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού τίθεται ίση με 182°C, δηλαδή χαμηλότερη από την αρχική, και η πίεσή του στα 1100 kPa.
- **R1234yf:** επιλέγεται ακόμη χαμηλότερη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, και συγκεκριμένα 164°C και πίεση 735 kPa.
- **R1233zd(e):** επιλέγεται θερμοκρασία της πηγής θερμότητας ίση με 227°C και ίδια πίεση με την περίπτωση του ισοπεντανίου.
- **Μεθανόλη:** επιλέγεται, αντίστοιχα με το τολουόλιο, η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού, αλλά υπάρχει περαιτέρω περιθώριο βελτίωσης των αποτελεσμάτων με χρήση κάποιας πηγής θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασίας. Η υψηλή πίεση του κύκλου διπλασιάζεται σε σχέση με την αρχική στο recuperated κύκλο (Πίνακας 9.1.1), παραμένοντας όμως αρκετά χαμηλότερη από την κρίσιμη.

**Πίνακας 9.3.1.1.** Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο recuperated ORC για τη βέλτιστη αρχική θερμοκρασία του γεωθερμικού νερού, ανά ρευστό.

	<b>i-C5</b>	<b>Τολουόλιο</b>	<b>R161</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R1233zd(e)</b>	<b>MeOH</b>
<b>T<sub>1</sub> (°C)</b>	34	110,6	34	33,5	34	64,5
<b>T<sub>3</sub> (°C)</b>	98,5	145	73	79,5	86,5	90,5
<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>	195	207	149	140,5	197	232,9
<b>P<sub>3</sub> (kPa)</b>	2565	800	3620	2535	3150	1250
<b>T<sub>geoth1</sub> (°C)</b>	227	250	182	164	227	250
<b>P<sub>geoth</sub> (kPa)</b>	2690	4025	1100	735	2690	4025
<b>T<sub>geoth2</sub> (°C)</b>	89	194	84	89	110,5	136,5

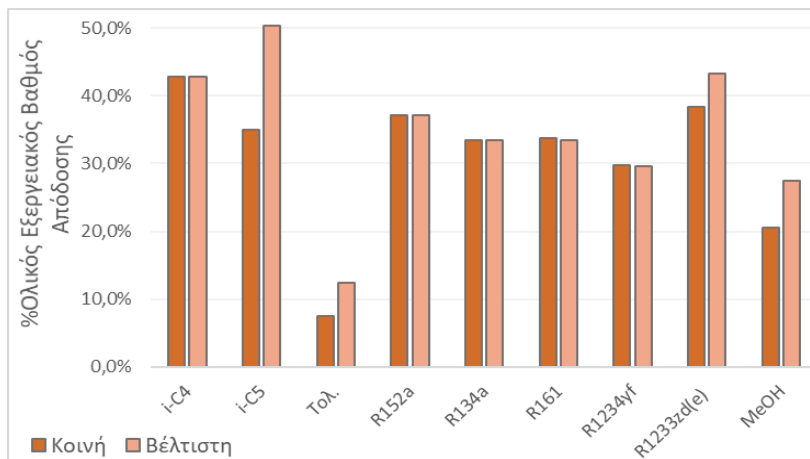
Οι βέλτιστες συνθήκες για τα i-C4, R152a και R134a είναι αυτές που περιέχονται στον Πίνακα 9.1.1.

Το ισοβουτάνιο, το R152a και το R134a, για λόγους σύγκρισης με τα βέλτιστα αποτελέσματα των υπολοίπων ρευστών, συμπεριλαμβάνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



**Σχήμα 9.3.1.1.** Θερμικός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

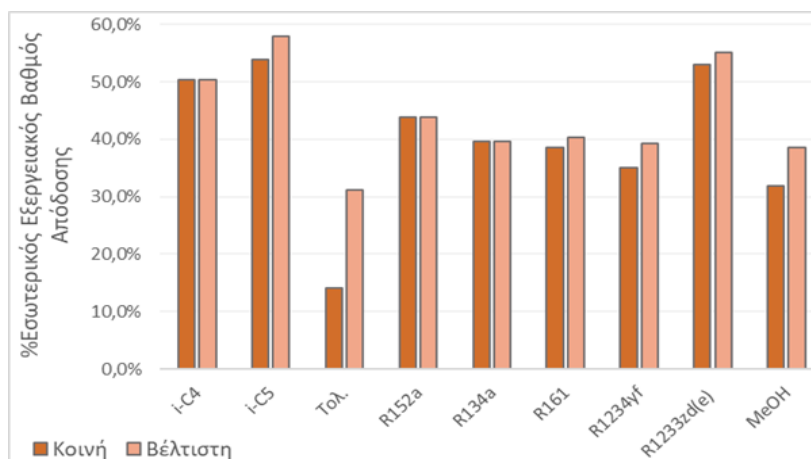
Η μεταβολή της αρχικής θερμοκρασίας του γεωθερμικού ρευστού επιφέρει αύξηση στο θερμικό βαθμό απόδοσης του recuperated κύκλου. Η ελάχιστη αύξηση, που είναι σχεδόν αμελητέα, παρατηρείται στο R161 και στο R1234yf, ενώ η μέγιστη στο τολουόλιο, ίση με 7,8%. Οι μέγιστες αποδόσεις με τη βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας επιτυγχάνονται με το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e) και προκύπτουν ίσες με 18,8% και 17,9% αντιστοίχως. Παρόλο που δεν μεταβάλλεται η θερμοκρασία στην περίπτωση του ισοβουτανίου, η απόδοσή του είναι η τρίτη καλύτερη. Οι τιμές των τριών HFCs είναι υψηλότερες από του R1234yf. Μέσα από το Σχήμα 9.3.1.1 αναδεικνύεται η σημασία της σχέσης της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας με την κρίσιμη θερμοκρασία των οργανικών ρευστών.



**Σχήμα 9.3.1.2.** Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

Επιτυγχάνεται σημαντική απόλυτη αύξηση του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης στην περίπτωση του ισοπεντανίου, ίση με 15,3%. Ικανοποιητική είναι και η αύξηση για τη μεθανόλη, από το 20,5% στο 27,4%, και για το R1233zd(e), από το 38,3% στο 43,3%. Για το R161 και το R1234yf η εναλλακτική θερμοκρασία της πηγής θερμότητας οδηγεί σε πολύ ελαφριά μείωση, μικρότερη από 0,4%, του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης. Το

ισοβουτάνιο επιφέρει και πάλι την τρίτη μέγιστη τιμή, μετά το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), και οι τρεις HFCs προηγούνται του R1234yf. Η απαίτηση θερμότητας υψηλότερης θερμοκρασίας για την εξάτμιση του τολουολίου και της μεθανόλης επιβεβαιώνεται από τις τιμές της εξεργειακής απόδοσης, που είναι εκτός των αποδεκτών ορίων.



Σχήμα 9.3.1.3. Εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

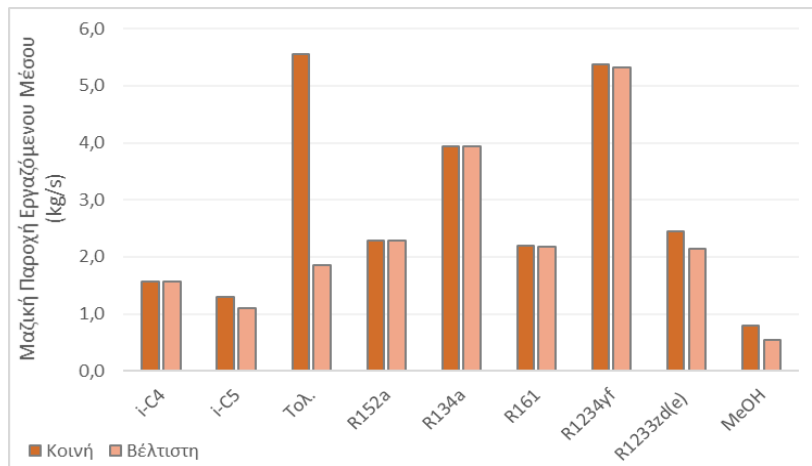
Σε αντίθεση με τον ολικό, ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται για όλα τα ρευστά με την ελεύθερη επιλογή της θερμοκρασίας της πηγής. Η ελάχιστη απόλυτη αύξηση ισούται με 1,8% και αφορά το R161. Πολύ σημαντική βελτίωση σημειώνεται στην περίπτωση του τολουολίου, από το 14% στο 31%, όπως και της μεθανόλης, από το 32% στο 38,6%.

Στον Πίνακα 9.3.1.2. συνοψίζονται οι σχετικές μεταβολές των τιμών των τριών εκφράσεων της απόδοσης του recuperated οργανικού κύκλου Rankine με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, ανά ρευστό.

Πίνακας 9.3.1.2. %Σχετική μεταβολή τιμών των αποδόσεων του recuperated ORC με χρήση της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας σε σχέση με την κοινή.

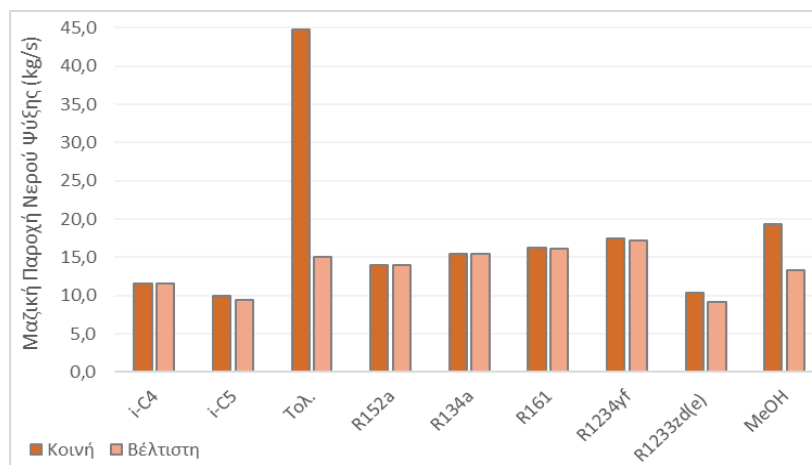
	Σχετική Μεταβολή Αποδόσεων		
	% $n_{th}$	% $n_{ex}$	%εσωτερικός $n_{ex}$
<b>i-C5</b>	11,5%	43,8%	7,6%
<b>Τολουόλιο</b>	170,5%	65,3%	121,6%
<b>R161</b>	0,6%	-1,1%	4,6%
<b>R1234yf</b>	1,3%	-0,5%	12,1%
<b>R1233zd(e)</b>	11,8%	13,2%	4,0%
<b>Μεθανόλη</b>	38,7%	33,5%	20,9%

Η σχετική αύξηση των τιμών των αποδόσεων στην περίπτωση του τολουολίου είναι συντριπτική σε σχέση με τα υπόλοιπα ρευστά. Ακολουθεί, με αρκετά χαμηλότερα ποσοστά, η μεθανόλη. Με άλλα λόγια, στα δύο ρευστά, τα οποία δεν συνδυάζονται αποδοτικά με το γεωθερμικό ρευστό στους 200°C, σημειώνεται σημαντική βελτίωση με αύξηση της θερμοκρασίας του μόλις κατά 50°C.



**Σχήμα 9.3.1.4.** Μαζική παροχή εργαζόμενου μέσου στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

Οι βέλτιστες συνθήκες οδηγούν σε μειωμένη μαζική παροχή όλων των οργανικών ρευστών. Πολύ μεγάλη ελάττωση προκύπτει στην περίπτωση του τολουολίου, το οποίο με τη βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής έχει παροχή μικρότερη από 2 kg/s, ενώ με την κοινή ξεπερνά τα 5,5 kg/s. Η μεθανόλη έχει την ελάχιστη μαζική παροχή ανεξάρτητα από τις συνθήκες. Στην περίπτωση του R161 και του R1234yf, οι μεταβολές των παροχών είναι ουσιαστικά αμελητέες. Το ισοπεντάνιο και το ισοβουτάνιο έχουν τις ελάχιστες παροχές μετά τη μεθανόλη, ακολουθούμενα από το τολουόλιο, ενώ το R1233zd(e) εξακολουθεί να έχει παροχή υψηλότερη από 2,1 kg/s, παρά το βέλτιστο συνδυασμό του με την πηγή θερμότητας.



**Σχήμα 9.3.1.5.** Μαζική παροχή νερού ψύξης στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

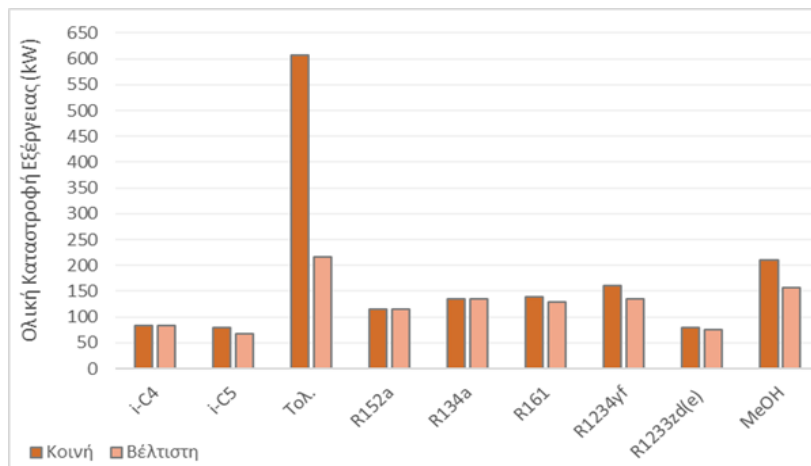
Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται και για το νερό ψύξης. Η μέγιστη μείωση της μαζικής του παροχής παρατηρείται όταν επιλέγεται το τολουόλιο, για το οποίο η απαίτηση για ψύξη μειώνεται κατά 30 kg/s. Σημαντική είναι και η απόλυτη μείωση στην περίπτωση της μεθανόλης, που ισούται με περίπου 6 kg/s. Για τα υπόλοιπα ρευστά, η μεταβολή της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας έχει πολύ μικρή επίδραση στην απαιτούμενη παροχή του ψυκτικού μέσου, με τις μειώσεις να μην ξεπερνούν το 1 kg/s. Τη μέγιστη απαίτηση νερού ψύξης επιφέρει η χρήση του R1234yf, του R134a, του R161 και του τολουολίου. Οι ελάχιστες παροχές προκύπτουν με το R1233zd(e) και το ισοπεντάνιο και είναι χαμηλότερες από 10 kg/s.



**Πίνακας 9.3.1.3.** %Σχετική μείωση μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου και νερού ψύξης στο recuperated ORC με χρήση της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας σε σχέση με την κοινή.

	Σχετική Μείωση Μαζικών Παροχών	
	Εργαζόμενο Μέσο	Ψυκτικό Μέσο
<b>i-C5</b>	15,0%	5,4%
<b>Τολουόλιο</b>	66,8%	66,5%
<b>R161</b>	0,6%	0,6%
<b>R1234yf</b>	1,1%	1,2%
<b>R1233zd(e)</b>	12,2%	11,5%
<b>Μεθανόλη</b>	31,4%	31,3%

Οι μέγιστες μεταβολές αφορούν και πάλι το τολουόλιο, για το οποίο οι μαζικές παροχές μειώνονται παραπάνω από 60%, ελαττώνοντας δραστικά το λειτουργικό κόστος και ένα μέρος του πάγιου της εγκατάστασης του ORC. Ακολουθεί η μεθανόλη, με μείωση των δύο παροχών της τάξης του 30%. Όσο για τα ρευστά R161 και R1234yf, η βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας επιφέρει παρόμοιες μαζικές παροχές με την αρχική των 200°C.



**Σχήμα 9.3.1.6.** Ολική καταστροφή εξέργειας στο recuperated ORC με κοινή θερμοκρασία της πηγής θερμότητας και βέλτιστη ανά ρευστό.

Τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, αφού με τις βέλτιστες συνθήκες καταστρέφεται λιγότερη εξέργεια στο κύκλο ανεξαρτήτως του ρευστού. Η μείωση με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού γεωθεμίας στην περίπτωση του τολουολίου είναι ίση με 64%. Όταν επιλέγεται η μεθανόλη, η αντίστοιχη μείωση προκύπτει ίση με 26%, ενώ για το R1234yf και το ισοπεντάνιο κυμαίνεται περί του 15%. Η ελάχιστη μείωση της καταστροφής εξέργειας στις συσκευές του κύκλου παρουσιάζεται με το R161 και το R1233zd(e) και ισούται με 7%. Όσον αφορά την κατανομή της συνολικής εξεργειακής απώλειας στις επιμέρους συσκευές, οι αυξομειώσεις στον στρόβιλο, στην αντλία και στον recuperator είναι της τάξης των 2 kW. Οι επιμέρους καταστροφές μειώνονται σημαντικά στον εξατμιστήρα και στον συμπυκνωτήρα.

Για την αντλία, τον στρόβιλο, τον συμπυκνωτήρα και τον recuperator, οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης δεν επηρεάζονται από την επιλογή της βέλτιστης αρχικής θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας. Αύξηση σημειώνεται για όλα τα ρευστά στην απόδοση του εξατμιστήρα, με την μέση τιμή της αύξησης αυτής να ισούται με 5,2%. Η μέγιστη αύξηση αφορά το ισοπεντάνιο και το τολουόλιο και ισούται με περίπου 7% και η ελάχιστη το R1233zd(e), ίση με 2,2%.



### 9.3.2. Σταθερή Θερμοκρασία Γεωθερμικού Ρευστού στο Preheated ORC

Επιλέγεται η χρήση μίας εναλλακτικής πηγής θερμότητας στο κύκλο με τον προθερμαντήρα (Σχήμα 9.1.6), και συγκεκριμένα γεωθερμικό ρευστό στους 120°C και στα 250 kPa. Η επιλογή αυτή απαιτεί τη χρήση υποατμοσφαιρικών πιέσεων στον συμπυκνωτήρα για το τολουόλιο και τη μεθανόλη και χαμηλότερη από τη μέγιστη επιτρεπτή πίεση στον εξατμιστήρα για τα περισσότερα ρευστά.

Οι τελικές επιλογές λειτουργικών συνθηκών στο preheated κύκλο με την επιλεγμένη πηγή θερμότητας ανά οργανικό ρευστό συνοψίζονται στον Πίνακα 9.3.2.1 και τα κύρια αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος αυτού στον Πίνακα 9.3.2.2.

Πίνακας 9.3.2.1. Τελική επιλογή λειτουργικών συνθηκών στο preheated ORC με γεωθερμικό νερό στους 120°C, ανά ρευστό.

	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>4</sub> (°C)	P <sub>3</sub> (kPa)	T <sub>geoth2</sub> (°C)
<b>i-C4</b>	33,5	79,5	82	1350	86
<b>i-C5</b>	33,5	79	81	450	86
<b>Τολουόλιο</b>	33,5	93	97	65	101
<b>R152a</b>	33,5	80	98	2500	88
<b>R134a</b>	34	77	83,5	2700	84,5
<b>R161</b>	34	75	89	3350	83
<b>R1234yf</b>	33,5	73,5	85	2535	82
<b>R1233zd(e)</b>	33,5	75	92,5	740	87,5
<b>Μεθανόλη</b>	34,5	75	113	200	87,5

Πίνακας 9.3.2.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης του preheated ORC με γεωθερμικό ρευστό στους 120°C.

	%n <sub>th</sub>	%n <sub>ex</sub>	%εσωτερικός n <sub>ex</sub>	$\dot{m}$ (kg/s)	$\dot{m}_{cool}$ (kg/s)	$\dot{E}x_{destr}$ (kW)
<b>i-C4</b>	11,0%	29,8%	39,5%	3,23	24,7	138,4
<b>i-C5</b>	10,6%	28,7%	40,0%	3,05	25,3	144,1
<b>Τολουόλιο</b>	13,5%	20,6%	48,4%	1,95	18,5	87,0
<b>R152a</b>	11,3%	28,8%	41,0%	3,60	22,3	126,5
<b>R134a</b>	10,9%	31,0%	38,2%	6,58	24,4	134,1
<b>R161</b>	10,1%	29,8%	38,6%	3,34	23,3	131,2
<b>R1234yf</b>	10,6%	32,0%	37,6%	7,63	24,9	133,2
<b>R1233zd(e)</b>	11,0%	28,5%	42,8%	5,01	22,7	127,2
<b>Μεθανόλη</b>	10,0%	26,0%	44,6%	0,85	21,5	114,8

Μεταξύ των ρευστών, τη μέγιστη ενεργειακή απόδοση επιφέρει η χρήση του τολουολίου, εφόσον δημιουργηθεί κενό στον συμπυκνωτήρα, και έπειτα του R152a, ρευστού με σχετικά χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία. Ακολουθεί το R1233zd(e), το ισοβουτάνιο και το R134a. Τη χαμηλότερη απόδοση παρουσιάζει η μεθανόλη και το R161 με τιμή περίπου ίση με 10%, ενώ μεγάλο ενδιαφέρον έχει το γεγονός ότι το ισοπεντάνιο, ένα από τα πιο αποδοτικά μεταξύ των εξεταζόμενων ρευστών, και το R1234yf οδηγούν ακριβώς στον ίδιο θερμικό βαθμό απόδοσης. Γενικά, ωστόσο, οι αποδόσεις είναι πολύ κοντινές και, εξαιρώντας το τολουόλιο, κινούνται σε ένα στενό εύρος, συγκεκριμένα 10-11,3%.

Το R1234yf επιφέρει το μέγιστο ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ακολουθούμενο από το R134a και το R161, δηλαδή τα ρευστά με τις ελάχιστες κρίσιμες θερμοκρασίες. Το ισοβουτάνιο και το R152a οδηγούν σε σχετικά υψηλές τιμές της έκφρασης αυτής, συγκριτικά με το μέσο όρο των ρευστών. Το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e) παρουσιάζουν σχετικά

χαμηλές τιμές εξεργειακής απόδοσης. Οι ελάχιστες τιμές αφορούν τη μεθανόλη και το τολουόλιο, παρά την εφαρμογή κενού στον συμπυκνωτήρα, λόγω της σημαντικά υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας τους σε σχέση με τη θερμοκρασία της παρεχόμενης θερμότητας.

Όσον αφορά τον εσωτερικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, τα αποτελέσματα είναι εντελώς αντίθετα. Προηγείται το τολουόλιο και η μεθανόλη, με πάνω από 44%, και ακολουθούν τα R1233zd(e), R152a και ισοπεντάνιο, με τιμές τουλάχιστον ίσες με 40%. Τα ρευστά αυτά, στην πλειονότητά τους, έχουν σχετικές υψηλές κρίσιμες θερμοκρασίες. Τα ρευστά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, δηλαδή το R1234yf και το R134a, επιφέρουν τις ελάχιστες τιμές του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης.

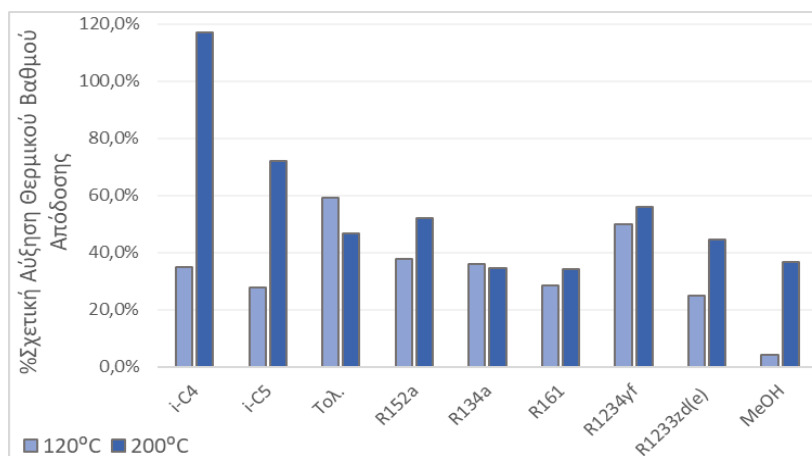
Ελάχιστη μαζική παροχή έχει η μεθανόλη, όπως και σε όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν, και έπειτα το τολουόλιο, με λιγότερα από 2 kg/s. Ακολουθούν τα αλκάνια, με περίπου 3 kg/s, και τα R161 και R152a, με 3,5 kg/s. Μέγιστη μαζική παροχή έχει το R1234yf, που προκύπτει εννεαπλάσια από αυτή της μεθανόλης, και το R134a, ενώ αρκετά υψηλή είναι και η παροχή του R1233zd(e).

Οι ελάχιστες απαιτήσεις σε νερό ψύξης σημειώνονται με χρήση των ρευστών με την ελάχιστη μαζική παροχή, δηλαδή του τολουολίου και της μεθανόλης. Κοντά στα κατώτατα όρια του εύρους αυτού είναι και οι απαιτήσεις του R152a και του R1233zd(e), ενώ μέγιστες είναι αυτές των αλκανίων και του R1234yf.

Τα ρευστά με την ελάχιστη απαίτηση σε νερό ψύξης, δηλαδή το τολουόλιο, η μεθανόλη, το R152a και το R1233zd(e), οδηγούν και στην ελαχιστοποίηση της ολικής καταστροφής εξέργειας στις συσκευές του κύκλου, η οποία μεγιστοποιείται για τα δύο αλκάνια. Αναλυτικά, η ελάχιστη καταστροφή εξέργειας λαμβάνει χώρα στην αντλία και ακολουθεί ο προθερμαντήρας, με αρκετά μικρές διακυμάνσεις. Η μέγιστη εξεργειακή καταστροφή σημειώνεται στον εξατμιστήρα για τα αλκάνια και το R152a και για τα υπόλοιπα ρευστά στον στρόβιλο.

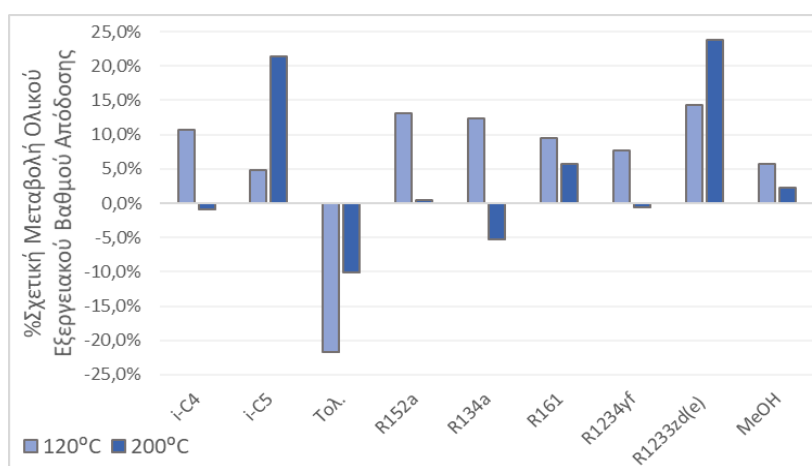
Από τον Πίνακα 9.3.2.2, μία σχετικά ικανοποιητική επιλογή οργανικού ρευστού, όταν η πηγή θερμότητας βρίσκεται στους 120°C και το κύκλο περιέχει προθερμαντήρα, είναι το R152a, το οποίο παρουσιάζει τη δεύτερη μέγιστη θερμική απόδοση, αρκετά χαμηλή απαίτηση σε νερό ψύξης, υψηλή τιμή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης και μία σχετικά χαμηλή μαζική παροχή. Με την ίδια λογική, θα μπορούσε να επιλεγθεί το ισοβουτάνιο. Το R1233zd(e), ενώ επιφέρει υψηλή θερμική απόδοση και ελάχιστη απαίτηση σε νερό ψύξης, έχει μεγάλη παροχή και δεν είναι αποδοτικό εξεργειακά. Το R1234yf και το R134a, ενώ συμφέρουν εξεργειακά, επιφέρουν αυξημένο κόστος, εξαιτίας των υψηλών παροχών νερού και μέσου. Το ισοπεντάνιο, παρά τις χαμηλές τιμές των μαζικών παροχών, δεν φαίνεται να είναι τόσο αποδοτικό. Όσον αφορά το τολουόλιο, η χρήση του μεγιστοποιεί τη θερμική και εσωτερική εξεργειακή απόδοση, η μαζική του παροχή είναι η δεύτερη ελάχιστη και η απαίτηση σε νερό ψύξης η χαμηλότερη. Ωστόσο, ο ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης είναι εκτός των αποδεκτών ορίων, αποτρέποντας τη θεώρηση του ρευστού αυτού ως μία ιδανική επιλογή εργαζόμενου μέσου. Για τον ίδιο λόγο, απορρίπτεται και η μεθανόλη.

Γίνεται μία σύγκριση της βελτίωσης που επιφέρει η διάταξη με τον προθερμαντήρα σε σχέση με το απλό οργανικό κύκλο Rankine με τις δύο πηγές θερμότητας που μελετήθηκαν, δηλαδή γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C. Παρατίθενται διαγράμματα της σχετικής μεταβολής των αποδόσεων, των μαζικών παροχών και της εξεργειακής καταστροφής στο σύνθετο κύκλο σε σχέση με το απλό με την εκάστοτε πηγή θερμότητας. Σημειώνεται ότι για το τολουόλιο, και όχι για τη μεθανόλη, επιλέγεται και στις δύο διατάξεις και με τις δύο πηγές θερμότητας υποατμοσφαιρική πίεση στον συμπυκνωτήρα, προκειμένου να έχει νόημα η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 9.3.2.1.** %Σχετική μεταβολή θερμικού βαθμού απόδοσης του *preheated* ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

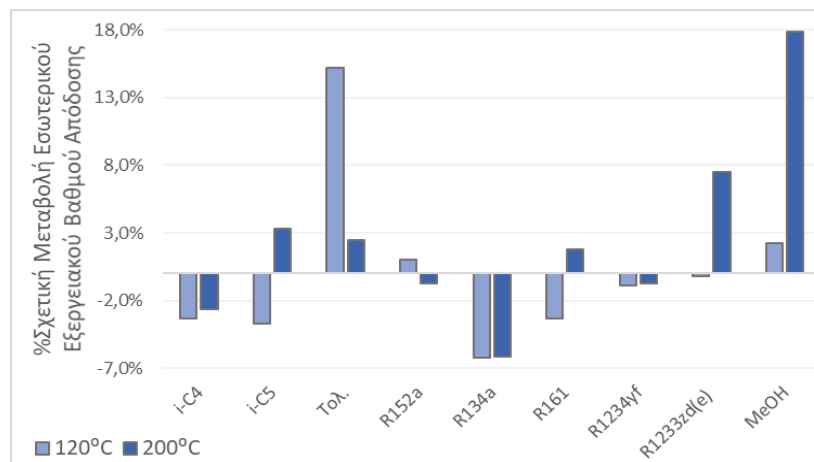
Από το Σχήμα 9.3.2.1 γίνεται αντιληπτό ότι η διάταξη με τον προθερμαντήρα επιφέρει αύξηση της θερμικής απόδοσης σε σχέση με την απλή, ανεξαρτήτως ρευστού και πηγής θερμότητας. Ωστόσο, στην πλειοψηφία των ουσιών, με εξαίρεση το τολουόλιο και το R134a, η σχετική αύξηση είναι πιο σημαντική στην περίπτωση της θερμότερης πηγής. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του ισοβουτανίου, η σχετική αύξηση είναι ίση με 35% με γεωθερμικό ρευστό στους 120°C, ενώ όταν η πηγή είναι στους 200°C, αγγίζει το 120%. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι σε κάθε σύστημα ORC πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή και συνδυασμός του εργαζόμενου μέσου και της πηγής θερμότητας για να αποδειχθεί κάποια πιο περίπλοκη διάταξη αποδοτική. Μεγάλες διαφορές με τις δύο πηγές παρατηρούνται και στο ισοπεντάνιο, αφού από το 28%, με την υψηλότερη θερμοκρασία του νερού γεωθερμίας η σχετική αύξηση ισούται με 72%, και στη μεθανόλη, από το 4% στο 37%. Για τα υπόλοιπα ρευστά οι διαφορές είναι μικρότερες, ενώ υπάρχει και η περίπτωση του τολουολίου για το οποίο ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται κατά 59%, όταν ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται αυτή στους 120°C, και κατά 47%, όταν η θερμότητα παρέχεται στους 200°C.



**Σχήμα 9.3.2.2.** %Σχετική μεταβολή ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του *preheated* ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

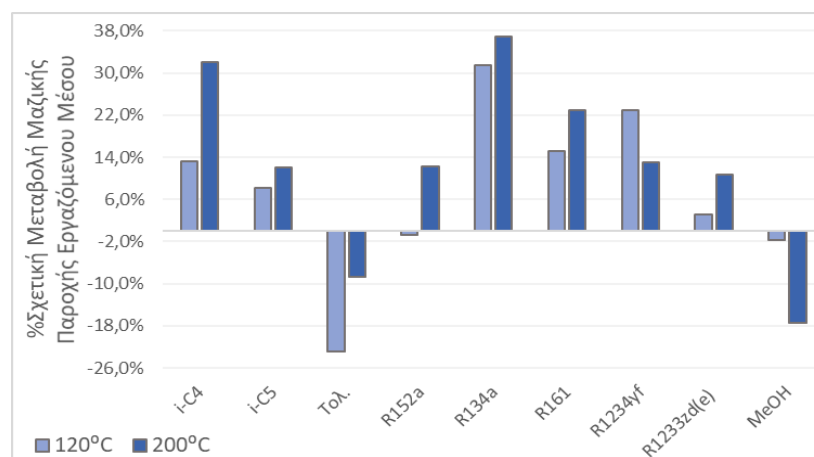
Στην πλειονότητα των ρευστών η πηγή θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερες σχετικές αυξήσεις του ολικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης όταν χρησιμοποιείται προθερμαντήρα. Υπάρχουν και ρευστά, όπως το ισοβουτάνιο, το R134a και

το R1234yf, για τα οποία, όχι μόνο είναι μεγαλύτερη η αύξηση με την πηγή των 120°C, αλλά η πηγή των 200°C επιφέρει ελαφριά μείωση της εξεργειακής απόδοσης σε σχέση με το απλό κύκλο. Αντίθετα, για το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e), η θερμότερη πηγή επιφέρει πιο σημαντική αύξηση στον ολικό εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ενώ για το τολουόλιο παρατηρείται μείωση και με τις δύο πηγές θερμότητας, και ειδικά με αυτή στους 120°C.



**Σχήμα 9.3.2.3.** %Σχετική μεταβολή εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης του preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

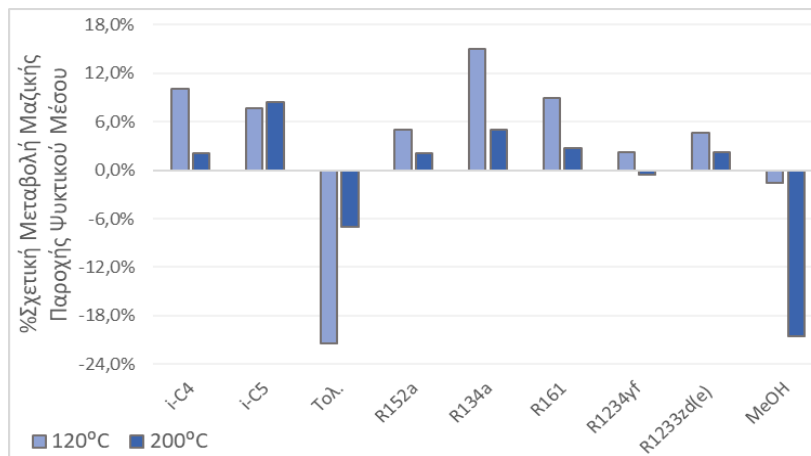
Ο εσωτερικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης εμφανίζεται μειωμένος στο preheated κύκλο. Τα ρευστά για τα οποία αυξάνεται η τιμή του είναι ρευστά που ευνοούνται από πιο θερμές πηγές, λόγω των υψηλότερων κρίσιμων θερμοκρασιών τους, όπως το τολουόλιο, η μεθανόλη, το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e). Δεν είναι ξεκάθαρη η επίδραση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, μιας και για κάποια ρευστά, όπως το R152a και το τολουόλιο, η πηγή χαμηλότερης θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη βελτίωση, ενώ για άλλα, όπως το R161 και το ισοπεντάνιο, παρατηρείται το αντίθετο.



**Σχήμα 9.3.2.4.** %Σχετική μεταβολή μαζικής παροχής εργαζόμενου μέσου στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

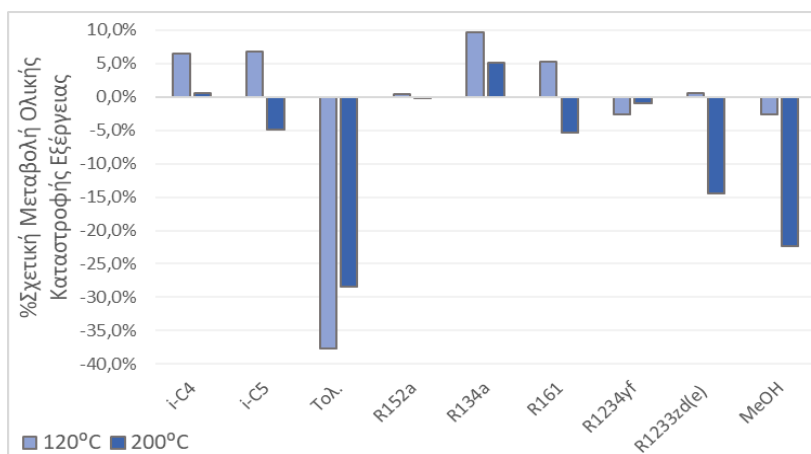
Με εξαίρεση τη μεθανόλη και το τολουόλιο, η χρήση της πιο περίπλοκης διάταξης αυξάνει τις μαζικές παροχές των οργανικών ρευστών. Οι αυξήσεις αυτές είναι αρκετά μεγαλύτερες όταν η πηγή θερμότητας είναι σε υψηλότερη θερμοκρασία, με εξαίρεση το R1234yf. Η μέγιστη σχετική αύξηση ισούται με 37% και αφορά το R134a όταν εξατμίζεται

από γεωθερμικό ρευστό στους 200°C, με την σχετική αύξηση με την ψυχρότερη πηγή να είναι περίπου 32%. Η μείωση είναι ίση με 23% για το τολουόλιο, όταν εξατμίζεται από νερό γεωθερμίας στους 120°C, και 17,5% για την εξατμισμό της μεθανόλης από πηγή στους 200°C.



**Σχήμα 9.3.2.5.** %Σχετική μεταβολή μαζικής παροχής νερού ψύξης στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

Οι απαιτήσεις σε νερό ψύξης στο σύνθετο κύκλο είναι υψηλότερες από ότι στο απλό με όλα τα ρευστά, εξαιρώντας τη μεθανόλη και το τολουόλιο. Σε αντίθεση, ωστόσο, με το εργαζόμενο μέσο, οι αυξήσεις είναι υψηλότερες όταν η πηγή θερμότητας είναι χαμηλότερης θερμοκρασίας. Μόνο στην περίπτωση του ισοπεντάνιου ισχύει το αντίθετο, καθώς η σχετική αύξηση είναι ίση με 7,7% με το γεωθερμικό νερό στους 120°C, έναντι 8,5% με την πηγή στους 200°C.



**Σχήμα 9.3.2.6.** %Σχετική μεταβολή ολικής καταστροφής εξέργειας στο preheated ORC σε σχέση με το απλό με γεωθερμικό ρευστό στους 120 και στους 200°C.

Παρατηρείται από το Σχήμα 9.3.2.6 ότι η χρήση της πηγής θερμότητας στους 200°C επιφέρει, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις ρευστών, μείωση της εξεργειακής καταστροφής στο σύστημα, λόγω της αποδοτικότερης αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας μέσω ενεργειακής ολοκλήρωσης. Αντίθετα, η πηγή των 120°C επιφέρει ελαφριά αύξηση της αθροιστικής καταστροφής εξέργειας για τα αλκάνια και τους HFCs, που βέβαια δεν ξεπερνά το 10% και οφείλεται στην αρκετά χαμηλή θερμοκρασία της διαθέσιμης θερμότητας, που αυξάνει την απώλεια εξέργειας στον εξατμιστήρα.

## 10. Συνολική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων & Σύγκριση με Βιβλιογραφικά Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό εξετάζεται αν επαληθεύονται τα παραπάνω αποτελέσματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των οργανικών κύκλων Rankine. Αρχικά, από τα Σχήματα 7.2.3.1-7.2.3.6 επιβεβαιώνεται ότι δεν υπάρχει βέλτιστο οργανικό ρευστό για όλες τις εφαρμογές, αλλά απαιτείται προσεκτική επιλογή και συνδυασμός του εργαζόμενου μέσου με την πηγή θερμότητας, το οποίο είναι σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία [22,27]. Η αύξηση της πίεσης του εξαμιστήρα (Σχήματα 5.1.3, 5.1.4) και η μείωση της θερμοκρασίας εισόδου στην αντλία (Σχήμα 5.1.9), τόσο για τα καθαρά ρευστά όσο και για τα μίγματα, αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, κάτι που παρατηρείται και στα αποτελέσματα άλλων ερευνητών [2,8,9,17,22]. Από το Σχήμα 5.1.15 γίνεται εμφανές ότι η αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας των οργανικών ρευστών ευνοεί το θερμικό βαθμό απόδοσης των ORCs, επαληθεύοντας την αναμενόμενη, από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τάση [2,8,27]. Η αξιοποίηση recuperator οδηγεί σε αύξηση της ενεργειακής (Σχήμα 9.2.1) και, στις περιπτώσεις ορθού συνδυασμού με την πηγή θερμότητας, της εξεργειακής απόδοσης (Σχήμα 9.3.1.2), ενώ η ολική καταστροφή εξέργειας προκύπτει μειωμένη σε σχέση με την απλή διάταξη (Σχήμα 9.3.1.6), παρά την προσθήκη μίας επιπλέον συσκευής στο κύκλο, κάτι που επιβεβαιώνεται από αρκετές μελέτες [1,7,8,19,38,41]. Όταν χρησιμοποιείται προθερμαντήρας, όπου αξιοποιείται η έξοδος της θερμής βοηθητικής παροχής από τον εξαμιστήρα, η προθέρμανση προτείνεται να πραγματοποιείται έως την κατάσταση κορεσμένου υγρού [63], γεγονός που παρατηρείται και στις αναλύσεις ευαισθησίας του Σχήματος 9.1.7.

Η χρήση ισοβουτανίου ως λειτουργούν μέσο είναι αρκετά συχνή στα ORCs [2,13,19,22,23,26,31,37]. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του συστήματος με το ρευστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 7-15%, ειδικά για μικρές δυναμικότητες [2,13,31]. Αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.2.1, 6.2.1 και στον Πίνακα 7.2.2.1.

Πολύ συχνή είναι η χρήση του ισοπεντανίου [8,19,22,23,26,27,37], αλλά και του τολουολίου [14,17,19,22,26]. Η επιλογή του ισοπεντανίου, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στο κύκλο, οδηγεί σε ελαφρώς υψηλότερες τιμές ενεργειακής απόδοσης από το ισοβουτάνιο, συγκεκριμένα στο εύρος 10-16% [8,13,27], όπως προκύπτει και στα αποτελέσματα των Σχημάτων 5.2.1, 6.2.1. Με το τολουόλιο επιτυγχάνονται, γενικά, υψηλές θερμικές αποδόσεις, τουλάχιστον ίσες με 13%, και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη και οριακά υψηλότερες από 20% [6], κάτι που προκύπτει και από τις προσομοιώσεις με σχετικά υψηλή θερμοκρασία πηγής (τουλάχιστον 300°C) και υποατμοσφαιρική πίεση στον συμπυκνωτήρα (Σχήμα 7.2.3.1). Το τολουόλιο προτείνεται όταν η πηγή θερμότητας έχει αρκετά υψηλή θερμοκρασία, μέχρι και 400°C [26]. Η πηγή αυτή στα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψε να είναι η ευνοϊκότερη από θερμοδυναμική σκοπιά, όταν επιλέγεται η συγκεκριμένη ουσία (Πίνακας 7.2.2.3).

Μεταξύ των συνήθων ψυκτικών ρευστών, απαντάται συχνά το R134a, το οποίο προτείνεται για πηγές σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας [13,14,19,22,24,26,27,31,37] και το R152a [13,22,26,27,29,37], ενώ λιγότερο συχνά χρησιμοποιείται το R161 [22,26]. Το R152a θεωρείται μία καλή επιλογή εργαζόμενου μέσου όταν η θερμότητα παρέχεται στους 150°C [20,29], γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις, αφού η βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας με το ρευστό αυτό προέκυψε ότι πρέπει να κυμαίνεται στο εύρος 150-

200°C.

Τέλος, η μεθανόλη δεν προτιμάται ως εργαζόμενο μέσο στα ORCs, ωστόσο δεν αποκλείεται να χρησιμοποιηθεί. Η θερμική απόδοση που επιφέρει κυμαίνεται στα σχετικά υψηλά όρια του αναμενόμενου εύρους, ενδεικτικά 12%, με την εκμετάλλευση θερμότητας σχετικά υψηλής θερμοκρασίας [26], κάτι που επαληθεύεται τόσο στον Πίνακα 7.2.2.9 όσο και από την επιλογή της βέλτιστης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, που πρέπει να κυμαίνεται περί των 450°C.



## 11. Συμπεράσματα

Συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη και προσομοίωση του οργανικού κύκλου Rankine. Αρχικά, σχετικά με την επιλογή εργαζόμενων μέσων σε ένα οργανικό κύκλο Rankine, τα οργανικά ρευστά υψηλής, σχετικά, κρίσιμης θερμοκρασίας οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις, ανεξάρτητα από τη διάταξη του συστήματος και την επιλογή υποκρίσιμων ή υπερκρίσιμων συνθηκών. Τα περισσότερα από τα ρευστά αυτά είναι ξηρά ή ισεντροπικά (ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, τολουόλιο, R1233zd(e)), όμως πολύ αποδοτική αποδεικνύεται και η χρήση της μεθανόλης, που είναι υγρό ρευστό, συνεπώς το κριτήριο αυτό δεν είναι καθοριστικό για την επιλογή ή απόρριψη κάποιας οργανικής ουσίας. Ανάμεσα στα επιλεγμένα ρευστά, η μεθανόλη έχει την ελάχιστη μαζική παροχή, ακόμη και με πηγές θερμότητας χαμηλότερης θερμοκρασίας ή με την αποφυγή δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτήρα. Αρκετά χαμηλές είναι και οι μαζικές παροχές των δύο αλκανίων σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ενώ η παροχή του τολουολίου μπορεί να μειωθεί σημαντικά, όταν αυτό συνδυάζεται με την κατάλληλη πηγή θερμότητας και ένα ψυκτικό μέσο με το οποίο δεν προκύπτουν μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στον συμπυκνωτήρα. Τα αποτελέσματα για τη μεθανόλη και το τολουόλιο βελτιώνονται αισθητά όταν η πίεση στον συμπυκνωτήρα είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Απαιτείται, βέβαια, εκτίμηση και αντιστάθμιση του κόστους δημιουργίας και διατήρησης του κενού, καθώς και της επιπλέον δυσκολίας ελέγχου του συστήματος.

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης των μηχανημάτων συμπίεσης και εκτόνωσης προσεγγίζουν τις ισεντροπικές αποδόσεις τους, δηλαδή κινούνται σε ένα περιορισμένο εύρος περί του 65% για την αντλία και του 75% για τον στρόβιλο, όπως ήταν αναμενόμενο δεδομένου η λειτουργία τους θεωρείται αδιαβατική. Αποτέλεσμα αυτού είναι και η καταστροφή εξέργειας στις συγκεκριμένες συσκευές να παρουσιάζει σχεδόν αμελητέες διακυμάνσεις. Αντίθετα, η εξεργειακή απόδοση του εξατμιστήρα και του συμπυκνωτήρα επηρεάζεται σημαντικά από τον συνδυασμό του οργανικού ρευστού με την πηγή θερμότητας και το ψυκτικό μέσο αντίστοιχα. Η μείωση των αποδόσεων των εναλλακτών συνοδεύεται συνήθως από αυξημένη εξεργειακή απώλεια στις συγκεκριμένες συσκευές, αλλά και γενικά στο κύκλο.

Κατά την αξιολόγηση των θερμοδυναμικών μοντέλων, το REFPROP αναδεικνύεται πολύ ικανοποιητικό, μιας και, ακόμη και στο ολικό εύρος της διφασικής περιοχής, η χρήση του επιφέρει σχετικές αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα μικρότερες από 2,5%. Το μέγιστο σφάλμα παρουσιάζεται στην πρόβλεψη της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας κορεσμένου υγρού και έπειτα στην αντίστοιχη ιδιότητα για τον κορεσμένο ατμό, ενώ οι προβλέψεις της τάσης ατμών και του μοριακού όγκου κορεσμού είναι πολύ κοντινές στις πειραματικές τιμές. Από την άλλη μεριά, η Peng-Robinson αποτυγχάνει να προβλέψει ορθώς την τάση ατμών των οργανικών ουσιών κοντά στο τριπλό σημείο. Το σφάλμα στην συγκεκριμένη μεταβλητή περιορίζεται σημαντικά στο τυπικό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας ενός ORC, που περιλαμβάνει θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από αυτή του τριπλού σημείου της πλειονότητας των ρευστών. Στο εύρος αυτό οι μεγαλύτερες αποκλίσεις της PR προκύπτουν στην εκτίμηση της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας της κορεσμένης υγρής και ατμώδους φάσης και κινούνται στο διάστημα 10-12%. Οι προβλέψεις των δύο μοντέλων είναι πολύ πιο κοντινές μεταξύ τους στην περίπτωση της ενθαλπίας εξάτμισης, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές. Οι αποκλίσεις των δύο μοντέλων στο κρίσιμο σημείο ενδεχομένως να οφείλονται και στον τρόπο που συγκλίνει στους αντίστοιχους υπολογισμούς το λογισμικό.

Για υποκρίσιμες και transcritical συνθήκες, οι τιμές των μαζικών παροχών, των εναλλασσόμενων ποσών θερμότητας, του έργου και συνεπώς των αποδόσεων και των εξεργειακών καταστροφών που προβλέπει το REFPROP και η Peng-Robinson είναι πολύ κοντινές, με τα δύο μοντέλα να οδηγούν και στην ίδια κατάταξη των επιλεγμένων ρευστών. Οι αποκλίσεις των μοντέλων αυξάνονται όσο μεγαλώνει και η τάξη μεγέθους της εκάστοτε μεταβλητής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την εξεργειακή καταστροφή στον συμπυκνωτήρα με χρήση τολουολίου και πίεση τουλάχιστον ίση με την ατμοσφαιρική. Συνεπώς, παρόλο που αναμφίβολα το REFPROP αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή θερμοδυναμικού μοντέλου, η σύγκριση με την PR οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι προβλέψεις της κυβικής καταστατικής εξίσωσης για το εύρος λειτουργίας ενός τυπικού υποκρίσιμου και transcritical ORC είναι καλές, σίγουρα όμως απαιτούνται βελτιώσεις, όπως είναι και η διόρθωση του όγκου της υγρής φάσης. Αντίθετα, στα καθαρά υπερκρίσιμα κύκλα, για τα οποία οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι αρκετά υψηλότερες από τις κρίσιμες τιμές, μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις, συνεπώς δεν είναι ασφαλής η χρήση τους χωρίς την σύγκρισή τους με πειραματικά δεδομένα σε υπερκρίσιμες συνθήκες, τα οποία σπανίζουν στη βιβλιογραφία.

Σε γενικές γραμμές, η αξιοποίηση transcritical συνθηκών επιφέρει, πέρα από την αύξηση της ενεργειακής και της εξεργειακής απόδοσης λόγω του καλύτερου συνδυασμού με την πηγή θερμότητας, και ελάττωση της μαζικής παροχής του εργαζόμενου μέσου και του νερού ψύξης, με παράλληλη μείωση της ολικής καταστροφής εξέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μείωση ενός μέρους του λειτουργικού, αλλά και του πάγιου κόστους της εγκατάστασης ενός ORC, αντισταθμίζοντας τις μεγαλύτερες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας που απαιτούνται και το επιπλέον κόστος των υλικών κατασκευής για αντοχή στις υψηλότερες πιέσεις. Από την άλλη μεριά, δεν ενδείκνυται η επιλογή καθαρά υπερκρίσιμων συνθηκών για εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, εκτός και αν χρησιμοποιηθεί ένα ρευστό αρκετά χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας αλλά και πίεσης, ώστε να μην αυξηθεί υπέρμετρα το πάγιο κόστος του εξατμιστήρα.

Από τη μελέτη των πηγών θερμότητας είναι φανερό ότι δεν έχουν όλα τα οργανικά ρευστά τις ίδιες δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας. Οι δυνατότητες αυτές έχουν να κάνουν με τις ιδιότητες και γενικά, με τη φύση του εκάστοτε ρευστού. Το ισοπεντάνιο, παρά την σχετικά υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία του, αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή εργαζόμενου μέσου ακόμα και για πηγές θερμότητας στους 120-150°C. Αντίθετα, ρευστά όπως το R1234yf και το R134a, των οποίων η κρίσιμη θερμοκρασία είναι μικρότερη από 105°C, οδηγούν σε υψηλές μαζικές παροχές και ενεργειακές αποδόσεις που μετά βίας αγγίζουν το 10%, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία της πηγής. Βέβαια, για χαμηλότερες θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας, οι αποκλίσεις ανάμεσα στα βέλτιστα και τα χείριστα αποτελέσματα είναι πολύ μικρές, καθώς μειώνονται τα περιθώρια αύξησης της πίεσης του εξατμιστήρα και άρα περιορίζονται οι αποδόσεις που μπορούν να επιτευχθούν. Είναι, επίσης, σημαντικό να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει ένα βέλτιστο οργανικό ρευστό για όλες τις εφαρμογές των οργανικών κύκλων Rankine, καθώς και ότι με μία συγκεκριμένη πηγή θερμότητας μπορούν να συνδυαστούν αποδοτικά περισσότερα του ενός εργαζόμενα μέσα. Η αξία της επιλογής της κατάλληλης πηγής θερμότητας επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι η βέλτιστη πηγή ελαχιστοποιεί την καταστροφή εξέργειας στον εξατμιστήρα και μεγιστοποιεί τον εξεργειακό βαθμό απόδοσής του.

Από την επιλογή ενός αζεοτροπικού μίγματος οργανικών ουσιών δεν προκύπτει κάποιο ιδιαίτερο όφελος σε σχέση με τη χρήση καθαρών ρευστών. Συνεπώς, σε συνδυασμό με την επιπρόσθετη δυσκολία ελέγχου του συστήματος, η χρήση ενός αζεοτροπικού μίγματος δεν

προτείνεται και πρέπει να ελέγχονται τα διαγράμματα φάσεων, προτού καθοριστούν οι τελικές αναλογίες. Στην περίπτωση των ζεοτροπικών μιγμάτων, παρουσιάζονται πλεονεκτήματα από εξεργειακή σκοπιά λόγω του φαινομένου της θερμοκρασιακής ολίσθησης κατά την αλλαγή φάσης, επιτρέποντας τον καλύτερο συνδυασμό του οργανικού ρευστού με το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής θερμότητας και του ψυκτικού μέσου. Ο συνδυασμός αυτός οδηγεί σε μικρότερες καταστροφές εξεργειας και μεγαλύτερους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης των εναλλακτών θερμότητας, σε σχέση με τις καθαρές ουσίες. Η μελέτη των ποσοτήτων των συστατικών των δυαδικών μιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις οδήγησε στο συμπέρασμα ότι είναι ευνοϊκό να συμμετέχει σε μεγαλύτερο ποσοστό το ρευστό, το οποίο ως καθαρή ουσία είναι πιο αποδοτική, και όχι απαραίτητα να επιλέγεται η σύσταση που μεγιστοποιεί την τιμή της θερμοκρασιακής ολίσθησης στους εναλλάκτες θερμότητας. Η σχετική αύξηση των αποδόσεων και η σχετική μείωση των μαζικών παροχών είναι μεγαλύτερη ως προς το πτητικότερο από τα συστατικά του μίγματος και πρέπει να αντισταθμίζει το επιπλέον πάγιο κόστος των απαιτούμενων μεγαλύτερων επιφανειών εναλλαγής θερμότητας.

Μεταξύ των σύνθετων διατάξεων που εξετάστηκαν, η χρήση recuperator οδηγεί σε ικανοποιητική αύξηση του θερμικού και του εσωτερικού εξεργειακού βαθμού απόδοσης, σημαντική μείωση της απαιτούμενης παροχής του νερού ψύξης και σταθερότητα της παροχής του εργαζόμενου μέσου σε σχέση με το απλό ORC. Η χρήση προθερμαντήρα, από την άλλη μεριά, επιφέρει πολύ σημαντική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, ελαφριά αύξηση και των δύο τιμών της εξεργειακής απόδοσης, αλλά αυξημένες μαζικές παροχές οργανικού ρευστού και ψυκτικού μέσου. Συνεπώς, η επιλογή της αρχιτεκτονικής του κύκλου έχει άμεση σχέση με το αν επιδιώκεται η θερμοδυναμική ή η οικονομική βελτιστοποίηση. Αναδεικνύεται και η σημασία του προσεκτικού σχεδιασμού του δικτύου εναλλακτών θερμότητας, στα πλαίσια της ενεργειακής ολοκλήρωσης του συστήματος. Η χρήση μίας τέτοιας διάταξης απαιτεί αναλυτικό υπολογισμό του επιπλέον κόστους του εναλλάκτη θερμότητας και των σωληνώσεων, μαζί με την πρόσθετη πτώση πίεσης και την απώλεια θερμότητας. Τέλος, οι σύνθετες διατάξεις ενδεχομένως να προβλέπουν διαφορετική βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας σε σχέση με το απλό κύκλο, παρόλο που το εργαζόμενο μέσο είναι κοινό. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι σε κάθε σύστημα ORC πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή και συνδυασμός του εργαζόμενου μέσου και της θερμικής πηγής, προκειμένου να αποδειχθεί κάποια πιο σύνθετη διάταξη αποδοτική.

Καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους αποσκοπεί στη βελτίωση των αποτελεσμάτων ενός οργανικού κύκλου Rankine. Συγκεκριμένα, οι transcritical συνθήκες, η χρήση ζεοτροπικού μίγματος και η βέλτιστη επιλογή πηγής θερμότητας στοχεύει στην όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου της διαθέσιμης πηγής θερμότητας. Η παραλλαγή της διάταξης του ORC αποσκοπεί, γενικά, στην αύξηση της θερμικής απόδοσης. Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν, δηλαδή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ζεοτροπικό μίγμα με transcritical συνθήκες σε μία διάταξη που περιλαμβάνει προθερμαντήρα ή recuperator, καθορίζοντας τη βέλτιστη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, ανάλογα με το επιλεγμένο οργανικό ρευστό.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι, με ορθή επιλογή του οργανικού ρευστού, προσεκτικό συνδυασμό του με την πηγή θερμότητας και επιλογής της κατάλληλης διάταξης, το οργανικό κύκλο Rankine μπορεί να συναγωνιστεί το συμβατικό, ειδικά στην περίπτωση διαθεσιμότητας θερμότητας σε θερμοκρασία χαμηλότερη από 400°C, που δεν αρκεί για την εξάτμιση και υπερθέρμανση του νερού.

## 12. Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Στο πλαίσιο μίας μελλοντικής μελέτης, θα ήταν σκόπιμη η διεξαγωγή μίας λεπτομερούς τεχνοοικονομικής ανάλυσης του οργανικού κύκλου Rankine. Το πάγιο κόστος του συστήματος περιλαμβάνει το κόστος των συσκευών και των σωληνώσεων καθώς και του εργαζόμενου μέσου. Προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια το κόστος των στοιχείων του κύκλου, απαιτείται ο αναλυτικός σχεδιασμός τους. Για τους εναλλάκτες θερμότητας απαραίτητος κρίνεται ο υπολογισμός της διαμέτρου του κελύφους και των αυλών. Θα μπορούσαν να εξεταστούν και διαφορετικά είδη εναλλακτών, όπως οι εναλλάκτες με πλάκες. Όσον αφορά τον στρόβιλο, δεν έχει προσδιοριστεί αν είναι σπειροειδής, ελικοειδής ή εμβολοφόρος. Η επιλογή αυτή έχει σημαντική επίδραση τόσο στην απόδοση όσο και στο κόστος ενός ORC. Επιπλέον, υπ' όψη μπορούν να ληφθούν και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, όπως και οι υφιστάμενες πτώσεις πίεσης. Για να είναι ακριβής η αξιολόγηση του πάγιου κόστους ενός τέτοιου συστήματος, πρέπει να συνεκτιμηθούν επιπλέον έξοδα, όπως το κόστος εγκατάστασης, που περιλαμβάνει την εργασία τοποθέτησης και τα υλικά σωληνώσεων, μονώσεων, ηλεκτρολογικών, οργάνων μέτρησης και ελεγκτών.

Η εκτίμηση του λειτουργικού κόστους περιλαμβάνει το νερό ψύξης και τη ροή της πηγής θερμότητας ή και το ενδιάμεσο ρευστό, εφόσον απαιτείται. Σημαντική είναι η φορολογία για τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, που έχει γενικά μεγάλη επίδραση στο περιθώριο κέρδους ενός συστήματος ORC, αλλά και η αποφυγή χρήσης συμβατικών καυσίμων για την εξάτμιση του εργαζόμενου μέσου, σε σχέση με το συμβατικό κύκλο ατμού.

Για την αξιολόγηση μίας επένδυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι οικονομικοί δείκτες. Ένας δείκτης που χρησιμοποιείται συχνά στην περίπτωση των ORCs είναι το σταθμισμένο κόστος του ηλεκτρισμού, που ορίζεται ως το πηλίκο του ετησίου ολικού κόστους (λειτουργικού και πάγιου) προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ίδιο διάστημα [27,31]. Ωφέλιμη θα ήταν και η χρήση των βασικών κριτηρίων αξιολόγησης επενδύσεων, όπως αυτό της Καθαρής Παρούσας Αξίας, του Χρόνου Αποπληρωμής και του Ρυθμού Επιστροφής Κεφαλαίου. Η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι τα καθαρά κέρδη επένδυσης υπολογισμένα στην σημερινή αξία χρήματος. Ο Εσωτερικός Ρυθμός Επιστροφής Κεφαλαίου είναι η μέγιστη τιμή του επιτοκίου (που αποτελεί έναν δείκτη υποτίμησης της αξίας του χρήματος με το χρόνο), για την οποία η επένδυση έχει θετική Καθαρή Παρούσα Αξία. Ο Χρόνος Αποπληρωμής της επένδυσης πρέπει να είναι αρκετά μικρότερος από τον προβλεπόμενο χρονικό ορίζοντα λειτουργίας της εγκατάστασης. Τα μειονεκτήματα του κριτηρίου αυτού είναι ότι αγνοεί τη χρονική αξία του χρήματος και τις πιθανές διακυμάνσεις του ετήσιου κέρδους στη διάρκεια ζωής μιας επένδυσης. Χαρακτηρίζεται, όμως, από σημαντική απλότητα, δίνει μία γρήγορη πρώτη εκτίμηση της σκοπιμότητας ανάληψης μίας επιχειρηματικής δραστηριότητας και γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια αξιολόγησης μιας επένδυσης [64].

Απαραίτητη είναι και η διεξαγωγή μίας ανάλυσης κύκλου ζωής, αφού εξαρχής ο στόχος των οργανικών κύκλων Rankine είναι η εύρεση μίας πιο βιώσιμης μεθόδου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιο διαδεδομένη βάση δεδομένων είναι η EcoInvent, με το SimaPro να αποτελεί το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο εμπορικό λογισμικό για την εκτέλεση της ανάλυσης αυτής. Για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μίας εφαρμογής, υπάρχει και η μέθοδος EcoIndicator99, η οποία «βαθμολογεί» διεργασίες και προϊόντα σύμφωνα με διεθνή πρότυπα. Όσο πιο πολλούς βαθμούς έχει ένα προϊόν ή μία διεργασία τόσο μεγαλύτερη καταστροφή μπορεί να προκαλέσει στην ποιότητα των οικοσυστημάτων, την

ανθρώπινη υγεία και τους φυσικούς πόρους.

Τέλος, προτείνεται ο συνδυασμός των εξεταζόμενων μεθόδων βελτίωσης του οργανικού κύκλου Rankine, δηλαδή η χρήση transcritical συνθηκών με προσεκτικό συνδυασμό πηγής και εργαζόμενου μέσου σε σύνθετες διατάξεις, ώστε να εκτιμηθεί η μέγιστη δυνατή βελτίωση της αποδοτικότητας αυτού του συστήματος μετατροπής θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

## Παράρτημα Α: Ιδιότητες Συνήθων Οργανικών Ρευστών

Πίνακας Α.1. Σημαντικές ιδιότητες συνήθων οργανικών ρευστών σε συστήματα ORC [2,3,8,9,13,14,22-26,28,31].

Ρευστό	Κατηγορία	Κανονικό Σημείο βρασμού (K)	Κρίσιμη Θερμο- κρασία (K)	Κρίσι- μη Πίεση (MPa)	Μοριακό Βάρος (g/mol)	ODP	GWP	ASHRAE	Σημειώσεις
<b>ΨΥΚΤΙΚΑ ΜΕΣΑ</b>									
R11	Ισεντροπικό	296,8	471,11	4,41	137,37	1	4750	A1	CFC, Απαγορευμένο λόγω ODP
R113	Ξηρό	320,8	487,21	3,39	187,38	1	6130	A1	CFC
R142b	Ισεντροπικό	264,05	410,25	4,06	100,5	0,06	2220	A2	HCFC
R22	Ισεντροπικό	232,35	369,25	4,99	86,47	0,04	1790	A1	HCFC
R123	Ξηρό	300,8	456,8	3,66	152,94	0,02	77	B1	HCFC
R161	Υγρό	235,6	375,35	5,09	48,06	0	12	A3	HFC
R125	Ισεντροπικό	225,05	339,15	3,62	120,02	0	3420	A1	HFC, Αστάθεια
R143a	Υγρό	225,6	345,86	3,76	84	0	4470	A2	HFC
R227ea	Ξηρό	256,8	374,9	2,92	170,02	0	3220	A1	HFC
R32	Υγρό	221,5	351,3	5,78	52	0	675	A2L	HFC
R245fa	Ξηρό	288,3	427,16	3,65	134,1	0	1030	B1	HFC, Τοξικότητα
R134a	Υγρό	248,9	395,2	4,06	102,03	0	1430	A1	HFC
R152a	Υγρό	249,1	386,41	4,52	66,05	0	124	A2	HFC
R236ea	Ξηρό	279,3	412,44	3,50	152	0	1370	n.a.	HFC
R245ca	Ξηρό	298,3	447,57	3,93	134	0	693	B1	HFC, Τοξικότητα
R1233zd (E)	Ισεντροπικό	243,2	439,6	3,62	130,49	0	1	A1	4 <sup>ης</sup> γενιάς ψυκτικό
R1234yf	Ισεντροπικό	243,7	367,85	3,38	114,04	0	4	A2L	4 <sup>ης</sup> γενιάς ψυκτικό
R1225ye (Z)	n.a.*	252,15	379,25	3,34	132,03	0	<3.6	B1	4 <sup>ης</sup> γενιάς ψυκτικό, Τοξικότητα
R404a	Υγρό	227,2	345,4	3,73	97,6	0,04	3300	A1	Ζεοτροπικό Μίγμα (R134a, R125, R32)
R407c	Υγρό	229,7	359,9	4,63	86,2	0	1800	A1	Ζεοτροπικό Μίγμα (R134a, R125, R143a)
R500	Υγρό	239,55	375,25	4,17	99,3	0,61	8100	A1	Αζεότροπο Μίγμα (R12,R152a)

Πίνακας Α.1. (Συνέχεια)

Ρευστό	Κατηγορία	Κανονικό Σημείο βρασμού (K)	Κρίσιμη Θερμο- κρασία (K)	Κρίσι- μη Πίεση (MPa)	Μοριακό Βάρος (g/mol)	ODP	GWP	ASHRAE	Σημειώσεις
R507a	Υγρό	226,45	343,75	3,71	98,86	0	3800	A1	Αζεότροπο Μίγμα (R125,R143a)
<b>ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ</b>									
Αιθάνιο (R170)	Υγρό	184,35	405,15	4,87	30,07	0	5.5	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Προπάνιο (R290)	Υγρό	231,2	396,9	4,25	44,1	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Βουτάνιο (R600)	Ξηρό	272,7	425,11	3,80	58,12	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Πεντάνιο (R601)	Ξηρό	309,2	469,7	3,37	72,1	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Εξάνιο	Ξηρό	341,9	507,82	3,03	86,17	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Επτάνιο	Ξηρό	371,57	540,15	2,73	100,21	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Δεκάνιο	Ξηρό	447,3	617,7	2,10	142,28	0	~20	A3	Αλκάνιο, ευθύγραμμη αλυσίδα
Προπίνιο	Υγρό	250	402,4	5,63	40,1	n.a.*	~20	A3	Αλκίνιο
Προπυλένιο (R1270)	Υγρό	225,5	365,6	4,56	42,08	n.a.*	~20	A3	Αλκαδιένιο
Ισοβουτάνιο (R600a)	Ξηρό	261,4	407,8	3,63	58,2	0	4	A3	Αλκάνιο, διακλάδωση
Ισοπεντάνιο (R601a)	Ξηρό	301,0	460,35	3,37	72,14	0	4	A3	Αλκάνιο, διακλάδωση
Διμεθυλοπρο- πάνιο (R601b)	Ξηρό	282,65	433,15	3,16	72,15	0	~20	A3	Αλκάνιο, 2 διακλαδώσεις
Ισοεξάνιο	Ξηρό	333,15	498,15	3,04	86,18	0	~20	n.a.*	Αλκάνιο, διακλάδωση
Κυκλοπεντά- νιο	Ξηρό	322,4	511,72	4,57	70,13	0	11	n.a.*	Κυκλικό αλκάνιο
Κυκλοεξάνιο	Ξηρό	353,9	553,64	4,07	84,15	n.a.*	~20	A3	Κυκλικό αλκάνιο
Τολουόλιο	Ξηρό	383,8	591,75	4,12	92,13	n.a.*	~20	A3	Αρωματικό



Πίνακας Α.1. (Συνέχεια)

Ρευστό	Κατηγορία	Κανονικό Σημείο βρασμού (K)	Κρίσιμη Θερμο- κρασία (K)	Κρίσι- μη Πίεση (MPa)	Μοριακό Βάρος (g/mol)	ODP	GWP	ASHRAE	Σημειώσεις
Βενζόλιο	Ξηρό	353,3	562,02	4,89	78,11	n.a.*	~20	B2	Αρωματικό, Τοξικότητα Αρωματικό
Π-ξυλόλιο	Ξηρό	411,6	616,16	3,53	106,16	n.a.*	~20	n.a.*	
<b>ΑΛΚΟΟΛΕΣ</b>									
Μεθανόλη	Υγρό	337.85	513,4	8,22	32,04	n.a.*	n.a.*	n.a.*	
Αιθανόλη	Υγρό	351.39	514,71	6,27	46,08	n.a.*	n.a.*	n.a.*	
<b>ΑΙΘΕΡΕΣ</b>									
Διμεθλαιθέ- ρας- RE170	Υγρό	248.35	400,15	5,37	46,07	0	n.a.*	A3	
<b>ΑΝΟΡΓΑΝΑ</b>									
NH <sub>3</sub> - R717	Υγρό	239.8	405.6	11,33	17,03	0	<1	B2L	Τοξικότητα
CO <sub>2</sub> - R744	n.a.*	194,69	304,15	7,38	44,01	0	1	A1	
<b>ΣΙΛΟΞΑΝΙΑ</b>									
OMTS/MDM	Ξηρό	426,2	564,09	1,41	236,65	0	1	n.a.*	
D4	Ξηρό	448,15	585,15	1,31	296,6	0	1	n.a.*	

\*Έλλειψη δεδομένων.

## Παράρτημα Β: Μοντελοποίηση R161, R1234yf και R1233zd(e) μέσω Peng-Robinson

Τα ρευστά R161, R1234yf και R1233zd(e) δεν περιέχονται στις βάσεις δεδομένων του HYSYS. Για να αξιολογηθεί το κατά πόσο τα αποτελέσματα της Peng-Robinson μέσω Aspen Properties και HYSYS είναι κοντινά μεταξύ τους, επιλέγονται τα ρευστά που περιέχονται και στις δύο βάσεις δεδομένων, δηλαδή τα ισοβουτάνιο, ισοπεντάνιο, τολουόλιο, R152a και R134a. Εξετάζονται θερμοκρασίες από -50 έως 200°C, ανάλογα με το κρίσιμο σημείο κάθε ουσίας, με βήμα 10 βαθμών, στις οποίες υπολογίζεται η τάση ατμών, η μολαρική θερμοχωρητικότητα κορεσμένου υγρού και ο γραμμομοριακός όγκος κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού μέσω της PR τόσο από το HYSYS όσο και το Aspen Properties. Ειδικά μέσω Aspen Properties, δοκιμάζονται δύο εναλλακτικά μοντέλα που είναι διαθέσιμα στο λογισμικό, και συγκεκριμένα το Aspen Properties Peng-Robinson (βάση δεδομένων APV110.PURE37) και το Aspen Properties HYSYS Peng-Robinson (βάση δεδομένων APV110.HYSYS). Ανά μεταβλητή για τα δύο μοντέλα υπολογίζεται το %σχετικό σφάλμα από τα αποτελέσματα μέσω HYSYS για κάθε σετ μετρήσεων (κάθε τιμή θερμοκρασίας στο καθορισμένο εύρος) μέσω της εξίσωσης:

$$\% \text{σχετ. σφάλμα} = \frac{|x_{\text{HYSYS}} - x_{\text{Aspen Properties}}|}{x_{\text{HYSYS}}} * 100\% \text{ (Εξ. Β. 1)}$$

όπου x οι εξεταζόμενες μεταβλητές.

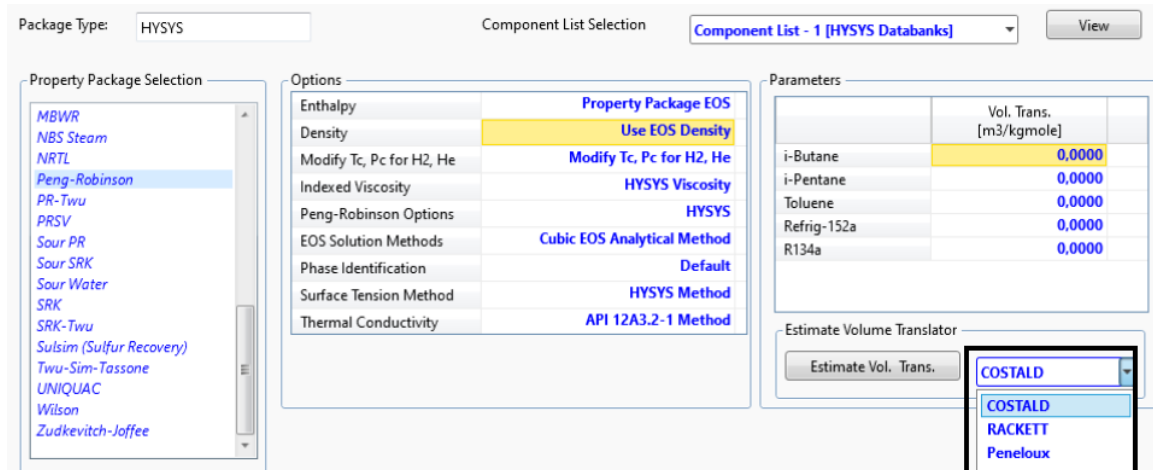
**Πίνακας Β.1.** %Σχετικές αποκλίσεις αποτελεσμάτων Aspen Properties PR και Aspen Properties HYSYS PR από τα αποτελέσματα του HYSYS PR για τα ρευστά που περιέχονται και στις δύο βάσεις δεδομένων.

	Aspen Properties PR				Aspen Properties HYSYS PR			
	P <sub>sat</sub>	V <sub>υγρού</sub>	C <sub>p,υγρού</sub>	V <sub>ατμού</sub>	P <sub>sat</sub>	V <sub>υγρού</sub>	C <sub>p,υγρού</sub>	V <sub>ατμού</sub>
i-C4	0,09	5,44	1,11	0,10	0,00	0,00	1,08	0,00
i-C5	2,42	3,72	0,33	2,37	0,00	0,00	0,32	0,00
Τολουόλιο	5,94	0,82	0,97	6,44	0,00	0,01	1,01	0,00
R152a	1,84	10,17	2,81	1,95	2,00	1,19	1,21	2,09
R134a	0,02	5,72	1,46	0,07	0,00	0,04	1,40	0,05
Μέση Τιμή	2,06	5,17	1,34	2,19	0,40	0,25	1,00	0,43

Πράγματι, οι αποκλίσεις του μοντέλου Aspen Properties HYSYS PR από την ΚΕ μέσω HYSYS είναι κατά μέσο όρο μικρότερες για όλες τις μεταβλητές. Το μέγιστο μέσο σφάλμα εμφανίζεται στην εκτίμηση της γραμμομοριακής θερμοχωρητικότητας της υγρής φάσης και αγγίζει μόλις το 1%. Οι περιπτώσεις στις οποίες οι αποκλίσεις μέσω του Aspen Properties PR είναι μικρότερες αφορούν τον όγκο κορεσμένου ατμού και την πίεση κορεσμού του R152a. Το συγκεκριμένο ρευστό παρουσιάζει και τις μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των ουσιών σε αρκετές μεταβλητές. Μικρότερη μέση απόκλιση από τους υπολογισμούς μέσω HYSYS παρουσιάζεται στην τάση ατμών και στον όγκο κορεσμένου υγρού. Μεταξύ των δύο μοντέλων, τα σφάλματα είναι ίδιας τάξης μεγέθους στην θερμοχωρητικότητα και για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες μεταβλητές μίας τάξης μεγέθους μικρότερα του μοντέλου Aspen Properties HYSYS PR. Συνεπώς, για τα ρευστά R161, R1234yf και R1233zd(e) είναι πιο αντιπροσωπευτική η χρήση του μοντέλου αυτού, σε σχέση με το Aspen Properties PR.

## Παράρτημα Γ: Εκτίμηση Παραμέτρου Διόρθωσης Όγκου Υγρής Φάσης μέσω του Λογισμικού

Προτού γίνει η προσαρμογή των τιμών της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης σε αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, διερευνήθηκε η βελτίωση των προβλέψεων της Peng-Robinson με τις δυνατότητες που προσφέρει το λογισμικό, δηλαδή με τις μεθόδους Peneloux, RACKETT και COSTALD. Η COSTALD περιλαμβάνει εξάρτηση τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από την πίεση, ενώ η RACKETT μόνο από τη θερμοκρασία.



Σχήμα Γ.1. Επιλογές διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης στο Aspen HYSYS μέσω Peng-Robinson.

Η χρήση κάποιας από αυτές τις μεθόδους δεν επηρεάζει την τιμή των υπόλοιπων ιδιοτήτων των ρευστών. Παρατίθενται στον Πίνακα Γ.1 οι τιμές της διόρθωσης, όπως λαμβάνονται από το λογισμικό. Παρατίθενται, επίσης, οι αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα, όπως υπολογίζονται από την Εξ. 4.2.1, για το ολικό εύρος της διφασικής περιοχής στον Πίνακα Γ.2 και για το τυπικό εύρος λειτουργίας ενός ORC στον Πίνακα Γ.3.

Πίνακας Γ.1. Τιμές της παραμέτρου διόρθωσης του όγκου κορεσμένου υγρού από το λογισμικό μέσω PR με τις τρεις διαθέσιμες μεθόδους.

Διόρθωση Όγκου (m <sup>3</sup> /kmol)								
	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd (e)
<b>Peneloux</b>	0,00682	0,00653	-0,00071	0,00306	0,000839	-*	-*	-*
<b>COSTALD</b>	0	0,00380	-0,00111	0	0	0	0	0,00131
<b>RACKETT</b>	0	0,05255	-0,00011	0	0	0	0	0,00330

\*Με «-» αναφέρεται η μη λήψη κάποιου αποτελέσματος από το μοντέλο.

**Πίνακας Γ.2.** %Σχετικό σφάλμα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της Peng-Robinson και με τις μεθόδους διόρθωσης του όγκου σε εύρος θερμοκρασιών από το τριπλό έως το κρίσιμο σημείο.

	Τριπλό- Κρίσιμο Σημείο								Μέσος Όρος
	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	
<b>Μη διορθωμένη</b>	5,61	7,89	5,10	12,3	6,82	6,20	2,90	2,88	6,22
<b>Peneloux</b>	5,25	10,3	4,89	16,5	7,81	-*	-*	-*	8,96
<b>COSTALD</b>	5,61	8,15	4,83	12,3	6,82	6,20	2,90	3,38	6,28
<b>RACKETT</b>	5,61	9,28	4,85	12,3	6,82	6,20	2,90	5,28	6,66

\*Με «-» αναφέρεται η μη λήψη κάποιου αποτελέσματος από το μοντέλο.

**Πίνακας Γ.3.** %Σχετικό σφάλμα όγκου κορεσμένου υγρού από τα πειραματικά δεδομένα μέσω της Peng-Robinson και με τις μεθόδους διόρθωσης του όγκου σε εύρος θερμοκρασιών 10-200°C.

	Τυπικό Εύρος Λειτουργίας ORC: 10-200°C								Μέσος Όρος
	i-C4	i-C5	Τολ.	R152a	R134a	R161	R1234yf	R1233zd(e)	
<b>Μη διορθωμένη</b>	6,04	6,80	0,44	15,4	11,5	11,3	6,23	4,30	7,76
<b>Peneloux</b>	7,00	8,62	0,66	18,8	12,3	-	-	-	9,47
<b>COSTALD</b>	6,04	6,86	0,91	15,4	11,5	11,3	6,26	4,51	7,85
<b>RACKETT</b>	6,04	7,75	0,80	15,4	11,5	11,3	6,26	6,14	8,15

\*Με «-» αναφέρεται η μη λήψη κάποιου αποτελέσματος από το μοντέλο.

Μεταξύ των επιλογών που δίνει το λογισμικό, και οι τρεις δίνουν, για το μέσο όρο των ρευστών, μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα πειραματικά δεδομένα σε σχέση με την απλή Peng-Robinson, δηλαδή η χρήση τους όχι μόνο δεν βελτιώνει, αλλά χειροτερεύει τις προβλέψεις. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η λήψη της διόρθωσης σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία δεν είναι αντιπροσωπευτική. Η εκτίμηση των παραμέτρων μέσω Peneloux δίνει για το μέσο όρο των ρευστών, τα μέγιστα σφάλματα, ακολουθούμενη από τη RACKETT και τη COSTALD. Ενδεχομένως αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι οι άλλες δύο μέθοδοι δίνουν κάποια τιμή της διόρθωσης μόλις για τρία εκ των οχτώ εξεταζόμενων οργανικών ρευστών.

Οι τιμές της διόρθωσης μέσω COSTALD και RACKETT είναι θετικές για το ισοπεντάνιο και το R1233zd(e) και αρνητική για το τολουόλιο. Στο ολικό θερμοκρασιακό εύρος, μόνο στην περίπτωση του τολουολίου μειώνεται η απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα με χρήση κάποιας από αυτές τις δύο διορθώσεις. Στο ίδιο εύρος οι προβλέψεις με τη διόρθωση του Peneloux είναι πιο ακριβείς για το ισοβουτάνιο και το τολουόλιο, όμως η απόκλιση αυξάνεται στην περίπτωση του ισοπεντανίου και των δύο HFCs.

Στο πιο περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι ακόμα μικρότερη, αφού και οι τρεις μέθοδοι επιφέρουν αύξηση της απόκλισης των τιμών του μοριακού όγκου κορεσμένου υγρού από τις πειραματικές για όλα τα ρευστά.

Συνολικά, λοιπόν, δεν κρίνεται ουσιαστική η χρήση κάποιας από τις επιλογές διόρθωσης του όγκου της υγρής φάσης που προσφέρει το λογισμικό και προτιμάται η προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα του NIST.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Lecompte, S.; Huisseune, H.; van den Broek, M.; Vanslambrouck, B.; De Paepe, M. Review of Organic Rankine Cycle (ORC) Architectures for Waste Heat Recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *47*, 448–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>.
- [2] Aghahosseini, S.; Dincer, I. Comparative Performance Analysis of Low-Temperature Organic Rankine Cycle (ORC) Using Pure and Zeotropic Working Fluids. *Applied Thermal Engineering* **2013**, *54* (1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.028>.
- [3] Quoilin, S.; van den Broek, M.; Declaye, S.; Dewallef, P.; Lemort, V. Techno-Economic Survey of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, *22*, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>.
- [4] World Energy Outlook (WEO). World Energy Outlook 2022-Analysis-IEA, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (22/07/2023).
- [5] Foster, V.; Bedrosyan, D. Understanding CO<sub>2</sub> Emissions from the Global Energy Sector (English). World Bank Group **2014**, <http://documents.worldbank.org/curated/en/873091468155720710/Understanding-CO2-emissions-from-the-global-energy-sector> (26/07/2023).
- [6] International Action On Climate Change. European Commission, [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change_en) (20/07/2023).
- [7] Yu, H.; Helland, H.; Yu, X.; Gundersen, T.; Sin, G. Optimal Design and Operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) System Driven by Solar Energy with Sensible Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management* **2021**, *244*, 114494. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114494>.
- [8] Safari, F.; Ataei, A.; Choi, J.-K. Thermodynamic Performance Analysis of Different Organic Rankine Cycles to Generate Power from Renewable Energy Resources. *American Journal of Renewable and Sustainable Energy* **2015**, *1*, 31–38.
- [9] Kim, D.-K.; Lee, J.-S.; Kim, J.; Kim, Mo Se; Kim, Min Soo. Parametric Study and Performance Evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) System Using Low-Grade Heat at Temperatures below 80°C. *Applied Energy* **2017**, *189*, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.026>.
- [10] Zhai, H.; An, Q.; Shi, L.; Lemort, V.; Quoilin, S. Categorization and Analysis of Heat Sources for Organic Rankine Cycle Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, *64*, 790–805. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.076>.
- [11] Çengel, Y. A.; Boles, M. A.; Kanoglu, M. *Θερμοδυναμική για Μηχανικούς*, 9η εκ.; Εκδόσεις Τζιόλα: Αθήνα, 2020; 420–445, 555–569.

- [12] Κλιάνης, Λ.; Νικολός, Ι.; Σιδέρης, Ι. *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*, 2η εκ.; Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου: Αθήνα, 2018; 1–10, 109–114, [https://www.eef.edu.gr/media/2528/e\\_j00067.pdf](https://www.eef.edu.gr/media/2528/e_j00067.pdf) (26/07/2023).
- [13] Delgado-Torres, A. M.; García-Rodríguez, L. Analysis and Optimization of the Low-Temperature Solar Organic Rankine Cycle (ORC). *Energy Conversion and Management* **2010**, *51* (12), 2846–2856. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.022>.
- [14] Babatunde, A. F.; Sunday, O. O. A Review of Working Fluids for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2018; 413. 10.1088/1757-899X/413/1/012019.
- [15] Colonna, P.; Casati, E.; Trapp, C.; Mathijssen, T.; Larjola, J.; Turunen-Saaresti, T.; Uusitalo, A. Organic Rankine Cycle Power Systems: From the Concept to Current Technology, Applications, and an Outlook to the Future. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **2015**, *137* (10), 100801–100820. 10.1115/1.4029884.
- [16] Chatzopoulou, M. A.; Markides, C. N. Advancements in Organic Rankine Cycle System Optimisation for Combined Heat and Power Applications: Components Sizing and Thermoeconomic Considerations. In *Proceedings of ECOS 2017*.
- [17] Drescher, U.; Brüggemann, D. Fluid Selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in Biomass Power and Heat Plants. *Applied Thermal Engineering* **2007**, *27* (1), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.024>.
- [18] Tartière, T.; Astolfi, M. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia* **2017**, *129*, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.159>.
- [19] Branchini, L.; De Pascale, A.; Peretto, A. Systematic Comparison of ORC Configurations by Means of Comprehensive Performance Indexes. *Applied Thermal Engineering* **2013**, *61* (2), 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.039>.
- [20] Organic Rankine Cycle Market Size, Share & Trends Analysis Report by Application (Waste Heat Recovery, Biomass, Geothermal, Solar Thermal, Oil & Gas, Waste To Energy), by Region, and Segment Forecasts, 2023 – 2030. Grand View Research, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/organic-rankine-cycle-market> (24/07/2023).
- [21] Tartiere, T. ORC World Map, <https://orc-world-map.org/> (14/08/2023).
- [22] Zhai, H.; Shi, L.; An, Q. Influence of Working Fluid Properties on System Performance and Screen Evaluation Indicators for Geothermal ORC (Organic Rankine Cycle) System. *Energy* **2014**, *74*, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.030>.
- [23] González, J.; Llovel, F.; Garrido, J. M.; Quinteros-Lama, H. A Rigorous Approach for Characterising the Limiting Optimal Efficiency of Working Fluids in Organic Rankine Cycles. *Energy* **2022**, *254*, 124191. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124191>.



- [24] Hackl, R.; Harvey, S. Applying Process Integration Methods to Target for Electricity Production from Industrial Waste Heat Using Organic Rankine Cycle (ORC) Technology. In *Proceedings of the World Renewable Energy Congress*; 2011.
- [25] Qyyum, M.A.; Khan, A.; Ali, S.; Khurram, M.S.; Mao, N.; Naquash, A.; Adnan Aslam Noon; Praveen Linga; Lee, M. Assessment of Working Fluids, Thermal Resources and Cooling Utilities for Organic Rankine Cycles: State-of-The-Art Comparison, Challenges, Commercial Status, and Future Prospects. *Energy Conversion and Management* **2022**, *252*, 115055.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115055>.
- [26] Arjunan, P.; Gnana Muthu, J. H.; Somanasari Radha, S. L.; Suryan, A. Selection of Working Fluids for Solar Organic Rankine Cycle—a Review. *International Journal of Energy Research* **2022**, *46* (14), 20573–20599. <https://doi.org/10.1002/er.7723>.
- [27] Barse, K. A.; Mann, M. D. Maximizing ORC Performance with Optimal Match of Working Fluid with System Design. *Applied Thermal Engineering* **2016**, *100*, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.167>.
- [28] Calm, J. M.; Hourahan, G. C. Physical, Safety and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants. In *Proceedings of the 23rd International Congress of Refrigeration*; 2011.
- [29] Yang, L.; Gong, M.; Guo, H.; Dong, X.; Shen, J.; Wu, J. Effects of Critical and Boiling Temperatures on System Performance and Fluid Selection Indicator for Low Temperature Organic Rankine Cycles. *Energy* **2016**, *109*, 830–844.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.021>.
- [30] EUR-Lex. Ευρωπαϊκή Ένωση,  
<https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/summary/montreal-protocol-on-substances-that-deplete-the-ozone-layer.html> (27/07/2023).
- [31] Toffolo, A.; Lazzaretto, A.; Manente, G.; Paci, M. A Multi-Criteria Approach for the Optimal Selection of Working Fluid and Design Parameters in Organic Rankine Cycle Systems. *Applied Energy* **2014**, *121*, 219–232.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.089>.
- [32] Abadi, G. B.; Kim, K. C. Investigation of Organic Rankine Cycles with Zeotropic Mixtures as a Working Fluid: Advantages and Issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, *73*, 1000–1013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.020>.
- [33] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας,  
<https://ypen.gov.gr/energeia/oryktes-protos-yles/geothermia/> (30/05/2023).
- [34] Dickson, M. H.; Fanelli, M. What Is Geothermal Energy? In *Renewable Energy*; Routledge, 2011. Μετάφραση: Φυτίκας, Μ; Παπαχρήστου, Μ; Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
<https://www.certh.gr/dat/96D95C4A/file.pdf> (28/07/2023).
- [35] DiPippo, R. Geothermal Energy:—electricity generation and environmental impact. In: *Renewable Energy- Prospects for Implementation*; Eds. Butterworth-Heinemann, 1993.



- [36] AL-Musawi, O. A. H.; Khadom, A. A.; Manhood, H. B.; Mahdi, M. S. Solar Pond as a Low Grade Energy Source for Water Desalination and Power Generation: A Short Review. *Renewable Energy and Environmental Sustainability* **2020**, *5*, 4. <https://doi.org/10.1051/rees/2019008>.
- [37] Wang, X.; Levy, E. K.; Pan, C.; Romero, C. E.; Banerjee, A.; Rubio-Maya, C.; Pan, L. Working Fluid Selection for Organic Rankine Cycle Power Generation Using Hot Produced Supercritical CO<sub>2</sub> from a Geothermal Reservoir. *Applied Thermal Engineering* **2019**, *149*, 1287–1304. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.112>.
- [38] Barse, K. Design And Optimization Of Organic Rankine Cycle For Low Temperature Geothermal Power Plant. University of North Dakota. Theses and Dissertations. 2014; 1503.
- [39] Morosini, E. Transcritical Cycle. Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Transcritical\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Transcritical_cycle) (29/07/2023).
- [40] Karellas, S.; Schuster, A. Supercritical Fluid Parameters in Organic Rankine Cycle Applications. *International Journal of Thermodynamics* **2008**, *11* (3), 101-108.
- [41] Li, G. Organic Rankine Cycle Performance Evaluation and Thermo-economic Assessment with Various Applications Part I: Energy and Exergy Performance Evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, *53*, 477–499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.066>.
- [42] Świerzewski, M.; Kalina, J.; Musiał, A. Techno-Economic Optimization of ORC System Structure, Size and Working Fluid within Biomass-Fired Municipal Cogeneration Plant Retrofitting Project. *Renewable Energy* **2021**, *180*, 281–296. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.068>.
- [43] Manente, G.; Lazzaretto, A.; Bonamico, E. Design Guidelines for the Choice between Single and Dual Pressure Layouts in Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. *Energy* **2017**, *123*, 413–431. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.151>.
- [44] Eyerer, S.; Dawo, F.; Schiffler, C.; Niederdränk, A.; Spliethoff, H.; Wieland, C.M. Experimental Evaluation of an ORC-CHP Architecture Based on Regenerative Preheating for Geothermal Applications. *Applied Energy* **2022**, *315*, 119057. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119057>.
- [45] Francesconi, M.; Briola, S.; Antonelli, M. A Review on Two-Phase Volumetric Expanders and Their Applications. *Applied sciences* **2022**, *12* (20), 10328. <https://doi.org/10.3390/app122010328>.
- [46] White, M. T.; Read, M. G.; Sayma, A. I. Making the Case for Cascaded Organic Rankine Cycles for Waste-Heat Recovery. *Energy* **2020**, *211*, 118912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118912>.
- [47] Παπαϊωάννου, Α.Θ. *Μηχανολογικός Εξοπλισμός Βιομηχανικών Διεργασιών*, Εκδόσεις Κοράλι: Αθήνα, 2017; 165- 175.

- [48] Κροκίδα, Μ.; Μαρίνος-Κουρή, Δ.; Μαρούλης, Ζ. *Σχεδιασμός Θερμικών Διεργασιών*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.: Αθήνα, 2003; 32-75.
- [49] Κούκος, Ι. *Εισαγωγή στον Σχεδιασμό Χημικών Εργοστασίων*, Εκδόσεις Τζιόλα: Αθήνα, 2019; 282-307.
- [50] Huber, M. L.; Lemmon, E. W.; Bell, I. H.; McLinden, M. O. The NIST REFPROP Database for Highly Accurate Properties of Industrially Important Fluids. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2022**, *61* (42), 15449–15472. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01427>.
- [51] NIST Pages <https://pages.nist.gov/REFPROP-docs/> (18/02/2023).
- [52] Βουτσάς, Ε.. Καταστατικές Εξισώσεις και Πρόβλεψη Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων Ρευστών. Προχωρημένη Θερμοδυναμική, Ε.Μ.Π.. 2022.
- [53] Internationally Peer Reviewed Chemical Safety Information. World Health Organization, <https://www.inchem.org/#/> (01/08/2023).
- [54] National Library of Medicine. PubChem, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> (01/08/2023).
- [55] Hulse, R. J.; Basu, R.S.; Singh, R.R.; Thomas, R. H. Physical Properties of HCFO-1233zd(E). *Journal of Chemical & Engineering Data* **2012**, *57* (12), 3581–3586. <https://doi.org/10.1021/je300776s>.
- [56] Wallington, T. J.; Anderson, J. E. Comment on “Environmental Fate of the next Generation Refrigerant 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf)”. *Environmental Science & Technology* **2015**, *49* (13), 8263–8264. <https://doi.org/10.1021/es505996r>.
- [57] Natural Refrigerants Inc., <https://refrigerants.com/> (01/08/2023).
- [58] Wu, Y.; Liang, X.; Tu, X.; Zhuang, R. Study of R161 Refrigerant for Residential Airconditioning Applications. In *Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference*; 2012.
- [59] Wu, Y.; Zhu, Y.; Yu, L. Thermal and Economic Performance Analysis of Zeotropic Mixtures for Organic Rankine Cycles. *Applied Thermal Engineering* **2016**, *96*, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.083>.
- [60] Shahrooz, M.; Lundqvist, P.; Neksa, P. Performance of Binary Zeotropic Mixtures in Organic Rankine Cycles (ORCs). *Energy Conversion and Management* **2022**, *266*, 115783. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115783>.
- [61] Li, X.; Liu, T.; Chen, L. Thermodynamic Performance Analysis of an Improved Two-Stage Organic Rankine Cycle. *Energies* **2018**, *11* (11), 2864. <https://doi.org/10.3390/en11112864>.
- [62] Βουτσάς, Ε. Ορθολογική & Αειφορική Διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων, Ε.Μ.Π.. 2022.

[63] National Institute of Standards and Technology. NIST Chemistry WebBook, <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (24/02/2023).

[64] Διακουλάκη, Δ. *Οικονομική Ανάλυση Επιχειρηματικών Αποφάσεων*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.: Αθήνα, 2016; 109-111.