

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

<<Διερεύνηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης συστημάτων ORC διπλής βαθμίδας με ζεοτροπικά μείγματα υδρογονανθράκων και CO₂ ως εργαζόμενα ρευστά>>

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Όνοματεπώνυμο: Βίκτωρας Γρίσπος

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 15/10/2020



VIKTORAS GRISPOS

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

<<Investigation of the exergetic efficiency of double-stage ORCs operating with zeotropic mixtures of hydrocarbons and CO₂>>

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

First and Last name: Viktoras Grispos

Thermal Section

Supervisor: Sotirios Karellas, Professor NTUA

Athens, 15/10/2020



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Athens 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ.Σωτήριο Καρέλλα που μου έδωσε την δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική υπό την επίβλεψη του στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τον Δρ. Κωσταντίνο Μπραιμάκη για την σημαντική κατατόπιση και καθοδήγηση του σε ό,τι αφορά το περιεχόμενο της διπλωματικής αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη της καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής

Πνευματική ιδιοκτησία – Λογοκλοπή

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Όνοματεπώνυμο:

Βίκτωρας Γρίσπος

Πίνακας Περιεχομένων

Πνευματική ιδιοκτησία – Λογοκλοπή	4
Περίληψη	7
Abstract.....	8
Αρτικόλεξα-Συντομογραφίες.....	9
Αρτικόλεξα.....	9
Συντομογραφίες.....	10
Μεταβλητές-Ελληνικά Σύμβολα-Δείκτες	11
Μεταβλητές.....	11
Ελληνικά Σύμβολα.....	11
Δείκτες.....	11
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Ο κύκλος Clausius-Rankine.....	14
1.2 Ο κύκλος ORC	16
1.2.1 Γενικά-Βασικές αρχές	16
1.2.2 Εργαζόμενα ρευστά κύκλων ORC και κριτήρια επιλογής τους.....	20
1.2.3 Ανάλυση απόδοσης κύκλου ORC-Παραλλαγές απλού κύκλου.....	22
1.3 Ζεotropικά ρευστά	26
1.3.1 Ορισμός, ανάλυση και προοπτικές-εμπόδια χρήσης σε ORC.....	26
1.3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	30
1.4 Συστήματα ORC πολλαπλών βαθμίδων.....	31
1.4.1 Διατάξεις πολυβάθμιων συστημάτων-πλεονεκτήματα	31
1.4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	36
1.5 Διβάθμια συστήματα ORC	38
1.5.1 Γενικά-Διατάξεις διβάθμιων συστημάτων-Πλεονεκτήματα	38
1.5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	42
1.6 Συνδυασμός ζεotropικών ORC με συστήματα δυο βαθμίδων	44
1.6.1 Γενικά.....	44
1.6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	45
1.7 Σκοπός της παρούσας εργασίας	47
2. Μοντελοποίηση και μεθοδολογία βελτιστοποίησης	49
2.1 Παρουσίαση μελετούμενων διαμορφώσεων ORC.....	49
2.2 Μοντελοποίηση	52
2.3 Επιλογή εργαζόμενων μέσων	56
2.4 Επιλογή παραμέτρων και παραδοχές λειτουργίας	58
2.4.1 Πηγή θερμότητας	58
2.4.2 Στοιχεία μονοβάθμιου και διβάθμιου ORC.....	59
2.5 Δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης	60
2.6 Διαδικασία Βελτιστοποίησης.....	62
3. Αποτελέσματα και συζήτηση	66
3.1 Βέλτιστες διαμορφώσεις	66

3.2	Θερμοδυναμική εφαρμοσιμότητα και αρχές βελτιστοποίησης	82
3.2.1	Θερμοδυναμική εφαρμοσιμότητα	82
3.2.2	Αρχές βελτιστοποίησης	85
4.	Συμπεράσματα	92
4.1	Σύνοψη	92
4.2	Προτάσεις μελλοντικής διερεύνησης	93
5.	Κατάλογος πινάκων.....	94
6.	Κατάλογος εικόνων	95
7.	Βιβλιογραφία-Αναφορές.....	99
8.	Παραρτήματα	104

Περίληψη

Σήμερα, τα συστήματα Οργανικού Κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle-ORC) προτείνονται ως λύση για την εκμετάλλευση πηγών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών και την μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, εμπόδιο στην ευρεία εξάπλωση τους αποτελεί, αφενός, η χαμηλή ενεργειακή τους απόδοση και αφετέρου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την χρήση των οργανικών ουσιών ως εργαζόμενα μέσα στα συστήματα αυτά. Με σκοπό να διερευνηθεί η δυνατότητα ελαχιστοποίησης του 1^{ου} μειονεκτημάτος, στην παρούσα εργασία εξετάζονται, από εξεργειακή σκοπιά, 4 διαμορφώσεις ORC: το απλό/βασικό μονοβάθμιο ORC καθαρών ουσιών (Standard ORC-SORC), το απλό/βασικό μονοβάθμιο ORC ζεοτροπικών μειγμάτων (Zeotropic ORC-ZORC), το διβάθμιο ORC καθαρών ουσιών (Double Stage ORC-DSORC) και το διβάθμιο ORC ζεοτροπικών μειγμάτων (Double-Stage ORC with Zeotropic mixtures-DS-ZORC). Για την εξάλειψη του 2^{ου} μειονεκτημάτος, στις ανωτέρω διατάξεις εισάγονται καθαρές ουσίες ή μείγματα υδρογονανθράκων (HCs) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) οι οποίες έχουν πολύ χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αρχικά, γίνεται μοντελοποίηση των 4 διαμορφώσεων στο περιβάλλον του λογισμικού AspenPlus™ και αφού επιλεγούν τα 6 εργαζόμενα μέσα (Κυκλοπεντάνιο, Πεντάνιο, Βουτάνιο, Ισοβουτάνιο, Προπάνιο, CO₂), ακολουθεί η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και παραδοχών λειτουργίας για τα υπο μελέτη συστήματα. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας μια μεθοδολογία διεξοδικής αναζήτησης, πραγματοποιείται η προσομοίωση όλων των κύκλων για κάθε πιθανό συνδυασμό καθαρής ουσίας ή μείγματος και για κάθε εξεταζόμενη θερμοκρασία πηγής (100, 120, 140, 160 °C) προκειμένου να ευρεθούν οι μεταβλητές που βελτιστοποιούν το εκάστοτε σύστημα ORC, δηλαδή εκείνες που μεγιστοποιούν την εξεργειακή του απόδοση. Τα αποτελέσματα φανερώνουν την θερμοδυναμική υπεροχή του συστήματος DS-ZORC στις 3 πρώτες θερμοκρασίες, αφού επιτυγχάνει σχετική εξεργειακή βελτίωση που φτάνει το 65,1 % στην θερμοκρασία 100 °C, το 49,5 % στην θερμοκρασία 120 °C και το 34,2 % στην θερμοκρασία των 140 °C, συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC. Επιπλέον, ιδιαίτερα ελκυστική αποδεικνύεται και η επιλογή του συστήματος ZORC στην θερμοκρασία των 160 °C, με την σχετική εξεργειακή του βελτίωση να αγγίζει το 37 % σε σχέση με το σύστημα SORC, ενώ σε μικρότερες θερμοκρασίες, υπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί που καθιστούν την λειτουργία του αποδοτικότερη έναντι των υπόλοιπων διαμορφώσεων. Με δεδομένη την ύπαρξη λιγοστών αναφορών στο πεδίο των διβάθμιων ζεοτροπικών κύκλων και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μεγάλη πλειοψηφία καθαρών ενώσεων και μειγμάτων δεν έχει ερευνηθεί ακόμα στις εξεταζόμενες διαμορφώσεις ORC (και ιδιαίτερα κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες), η παρούσα εργασία έρχεται να εμπλουτίσει την διαθέσιμη γνώση αναφορικά με την απόδοση των συστημάτων ORC και τέλος, να συμβάλλει στην κατανόηση τους, αλλά και να δώσει ερέθισμα στον αναγνώστη για περαιτέρω διερεύνηση των συστημάτων αυτών.

Abstract

Today, Organic Rankine Cycle (ORC) systems are proposed as a solution in order to extract heat from low temperature heat sources and convert it to electricity. However, there are two main barriers that prevent their wide applicability; On the one hand, they exhibit low energetic efficiency, and on the other hand, they cause environmental issues due to the organic substances used as working fluids of these cycles. For the purpose of investigating the potential of minimizing the 1st barrier, this study is analyzing, from the scope of exergy, 4 ORC configurations; the standard ORC using pure fluids (SORC), the standard ORC using zeotropic mixtures (ZORC), the double stage ORC using pure fluids (DSORC) and the double stage ORC using zeotropic mixtures (DS-ZORC). In order to eliminate the second barrier, pure substances and mixtures of hydrocarbons (HCs) and carbon dioxide (CO₂), which they have very low environmental impact, are introduced in the above cycles. Firstly, 4 configurations are being modeled by the AspenPlus™ software and after the selection of 6 working fluids (Cyclopentane, Pentane, Butane, Isobutane, Propane, CO₂), the next step is the selection of the appropriate parameters and the modelling assumptions of the analyzed cycles. Subsequently, a brute-force (exhaustive search) optimization methodology is implemented which involves simulating all cycles corresponding to all possible combinations of the pure substances and mixtures, applied to all heat source temperatures (100, 120, 140, 160 °C), in order to find the optimization variables of the contextually ORC system, which corresponds to the variables that maximize it's exergetic efficiency. In the first 3 temperatures, the results reveal the thermodynamic superiority of DS-ZORC system which achieves relative exergetic improvement 65,1 % at temperature of 100 °C, 49,5 % at temperature of 120 °C and 34,2 % at temperature of 140 °C compared to the optimized SORC. Furthermore, the ZORC system is also proved to be an especially appealing choice at the temperature of 160 °C, as it results to relative exergetic improvement equal to 37 % compared to SORC, while at lower heat source temperatures, there are certain fluid combinations that maximize it's efficiency compared to all the other configurations. By taking into consideration that there are only few scientific articles referred to double stage ORCs using zeotropic mixtures, and taking into account the fact that the big majority of the examined pure substances and mixtures hasn't been introduced to the other configurations yet (especially under the certain circumstances), the present work aims to enrich the available knowledge related to the performance of the ORCs and finally to contribute to the understanding and also encourage the reader for further investigation.

Αρτικόλεξα-Συνομογραφίες

Αρτικόλεξα

ASHRAE	Αμερικανική κοινότητα μηχανικών για ζητήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού
CCUS	Στρατηγικής δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης του άνθρακα
CFCs	Χλωροφθοράνθρακες
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα
DSORC	Διβάθμιο σύστημα ORC με καθαρές ουσίες
DS-ZORC	Διβάθμιο σύστημα ORC με ζεοτροπικά μείγματα
GWP	Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη
HCs	Υδρογονάνθρακες
HCFCs	Υδροχλωροφθοράνθρακες
HFCs	Υδροφθοράνθρακες
HFOs	Υδροφθοροολεφίνες
HTC	Υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία
LTC	Χαμηλή Κρίσιμη Θερμοκρασία
ODP	Δυναμικό εξασθένησης του όζοντος
ORC	Οργανικός Κύκλος Rankine
PFCs	Υπερφθοράνθρακες
PP	Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά
PTORC	Διβάθμιο-παράλληλο-σύστημα ORC με καθαρές ουσίες
SORC	Απλό/Βασικό/Συμβατικό/Μονοβάθμιο σύστημα ORC καθαρών ουσιών
STORC	Διβάθμιο-εν σειρά-σύστημα ORC με καθαρές ουσίες
ZORC	Απλό/Βασικό/Συμβατικό/Μονοβάθμιο σύστημα ORC με ζεοτροπικά μείγματα

Συντομογραφίες

ΘΠ	Θερμή Πηγή
ΥΘ	Υψηλή Θερμοκρασία
ΥΠ	Υψηλή Πίεση
ΧΘ	Χαμηλή Θερμοκρασία
ΧΠ	Χαμηλή Πίεση
ΨΠ	Ψυχρή Πηγή

Μεταβλητές-Ελληνικά Σύμβολα-Δείκτες

Μεταβλητές

C	Συγκέντρωση	
$\dot{E}x$	Ρυθμός εξέργειας	kW
h	Ειδική ενθαλπία	kJ/kg
\dot{m}	Παροχή μάζας	kg/s
p	Πίεση	bar
P	Ισχύς	kW
Q	Θερμότητα	J
\dot{Q}	Θερμική Ισχύς	kW
s	Ειδική Εντροπία	kJ/kgK
T	Θερμοκρασία	°C
W	Έργο	J

Ελληνικά Σύμβολα

Δ	Διαφορά
η	Βαθμός Απόδοσης
θ	Παράγωγος
N	Αριθμός βαθμίδων ατμοποίησης

Δείκτες

cond	Συμπυκνωτής
crit	Κρίσιμη
co	Όριο
CW	Νερό Ψύξης

DS	Διβάθμιο σύστημα
e	Ηλεκτρική
evap	Ατμοποιητής
ex	Εξεργειακός
exp	Εκτονωτής
g	Γεννήτρια
gl	Θερμοκρασιακή ολίσθηση
hs	Πηγή Θερμότητας
hsu	Αξιοποίηση της Πηγής Θερμότητας
HT	Υψηλή Θερμοκρασία
in	Εισόδου
is	Ισεντροπικός
LT	Χαμηλή Θερμοκρασία
m	Μηχανικός
M	Κινητήρας Αντλίας
max	Μέγιστη
min	Ελάχιστη
net	Καθαρή ποσότητα
PUMP	Αντλία
pump	Αντλία
ref	Σε Συνθήκες Αναφοράς
REJ	Απορριπτόμενη
rel	Σχετική
SG	Ατμοπαραγωγός
SS	Μονοβάθμιο σύστημα
sup	Υπερθέρμανση

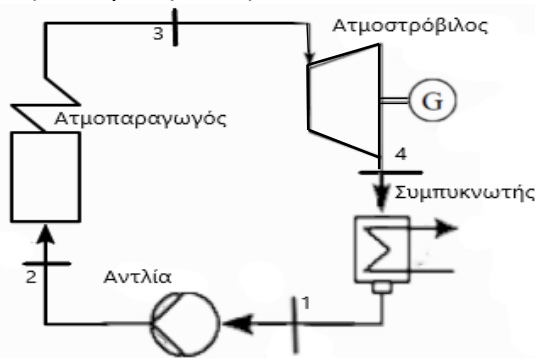
sys	Συστήματος
TURB	Στρόβιλος
th	Θερμικός
wf	Εργαζόμενο μέσο

1. Εισαγωγή

1.1 Ο κύκλος Clausius-Rankine

Πρόκειται για ένα βασικό θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας των θερμικών και πυρηνικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και βασίζεται στην συνεχή κυκλοφορία του νερού ως εργαζόμενου μέσου. Ένα μονογραμμικό διάγραμμα του βασικού κύκλου Rankine απεικονίζεται στην **Εικόνα 1**. Οι μεταβολές που υφίσταται το νερό καθορίζονται από τις εκάστοτε διατάξεις στις οποίες εισέρχεται και συγκεκριμένα:

- 1) Συμπύεση του τροφοδοτικού νερού, μέσω της πρόσδοσης έργου (W_{PUMP}) από μια αντλία, έως ότου φτάσει σε μια υψηλή πίεση (Μεταβολή 1→2).
- 2) Προθέρμανση, ατμοποίηση και υπερθέρμανση του συμπιεσμένου νερού προσδίδοντας θερμότητα (Q_{SG}) μέχρι να φτάσει μια τελική θερμοκρασία, από τον ατμοπαραγωγό της εγκατάστασης (Μεταβολή 2→3).
- 3) Εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού και παραγωγή έργου (W_{TURB}) από τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης (Μεταβολή 3→4).
- 4) Συμπύκνωση του μείγματος νερού-ατμού, απορρίπτωντας θερμότητα (Q_{REJ}), από τον συμπυκνωτή της εγκατάστασης και επιστροφή του στο τροφοδοτικό δοχείο για την επανεκκίνηση του κύκλου (Μεταβολή 4→1).



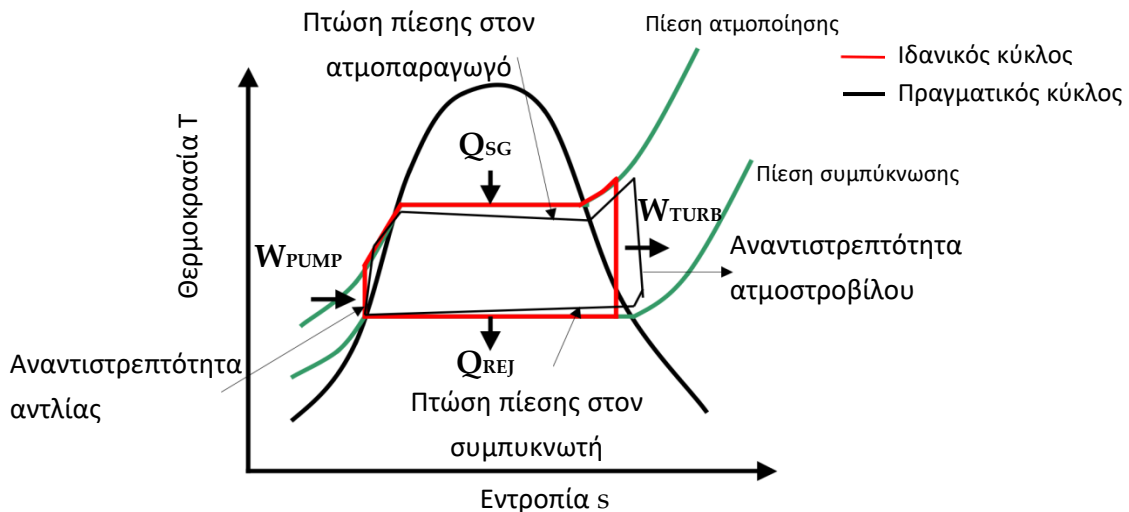
Εικόνα 1: Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης απλού θερμοδυναμικού κύκλου Clausius-Rankine [1]

Πηγή: Witte, 2018

Αξίζει να ειπωθεί σ' αυτό το σημείο ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στην ιδανική και την πραγματική λειτουργία του παραπάνω κύκλου. Οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται παραστατικά στην **Εικόνα 2**. Στον ιδανικό κύκλο, όλες οι διεργασίες πραγματοποιούνται ισεντροπικά ή ισόθλιπτα και είναι μεταβολές αναστρέψιμες, εν αντιθέσει με τον πραγματικό κύκλο, όπου διάφοροι παράγοντες τις καθιστούν μη-αναστρέψιμες. Ενδεικτικά, μερικοί απο αυτούς είναι:

- 1) Η πτώση πίεσης στον ατμοπαραγωγό, τον συμπυκνωτή και τις συνδεδεμένες σωληνώσεις της εγκατάστασης λόγω των συνεκτικών δυνάμεων ρευστού-τοιχωμάτων που αναπτύσσονται.
- 2) Οι απώλειες θερμότητας στα επιμέρους στοιχεία του κύκλου, εφόσον οι διεργασίες που πραγματοποιούνται δεν είναι αδιαβατικές.
- 3) Οι αναντιστρεπτότητες που εμφανίζουν η αντλία και ο ατμοστρόβιλος.
- 4) Η συμπύκνωση του ατμού μέχρι την κατάσταση υπόψυκτου υγρού (προς αποφυγή σπυλαιώσεως που καταπονεί τα πτερύγια της αντλίας).
- 5) Οι ενδεχόμενες διαρροές ατμού κατά την διάρκεια του κύκλου.
- 6) Η πιθανή είσοδος αέρα στον συμπυκνωτή.
- 7) Άλλες απώλειες σχετιζόμενες με τα ρουλεμάν της εγκατάστασης.

Για να αντισταθμιστούν οι απώλειες πίεσης και να διατηρηθεί η παραγωγή έργου από τον ατμοστρόβιλο ίδια με αυτήν του ιδανικού κύκλου, θα πρέπει το νερό να συμπιεστεί σε μεγαλύτερη πίεση, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη αντλία αλλά και μεγαλύτερη δαπάνη ενέργειας. Επίσης, για την αντιστάθμιση των θερμικών απωλειών και των διαρροών ατμού από το κύκλωμα, θα πρέπει να διακινείται μεγαλύτερη παροχή ατμού προκειμένου αυτή να αποτνωίνεται στον ατμοστρόβιλο και να εξισορροπείται η παραγωγή ισχύος με αυτήν του ιδανικού κύκλου. Όμως οι διορθώσεις αυτές έχουν σημαντικό αντίκτυπο στον θερμικό βαθμό απόδοσης του πραγματικού κύκλου που είναι πολύ χαμηλότερος από τον αντίστοιχο ιδεατό.

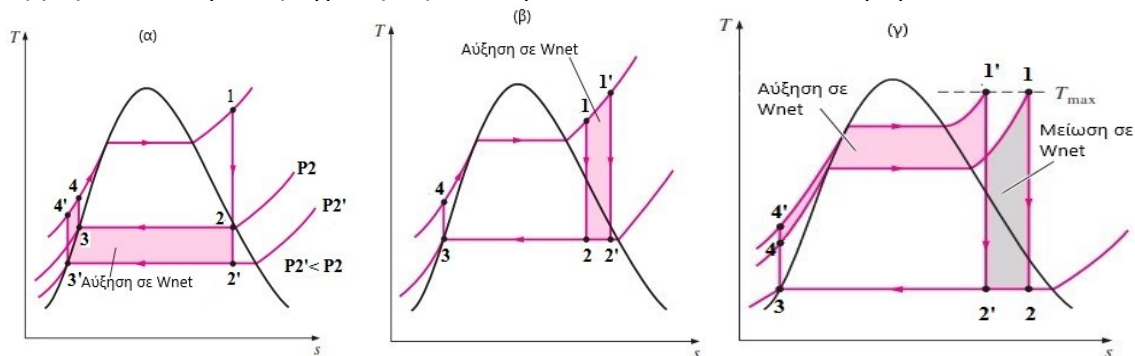


Εικόνα 2: Αποκλίσεις μεταξύ του ιδανικού και του πραγματικού κύκλου Rankine σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [2]

Πηγή: Kadem, 2006

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αύξησης της απόδοσης του απλού κύκλου Rankine μέσω της αύξηση του καθαρού παραγόμενου έργου (W_{net}). Συγκεκριμένα:

- 1) Μείωση της πίεσης συμπύκνωσης (**Εικόνα 3 (α)**), που οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας, αυξάνοντας την ενθαλπική πτώση και επομένως την παραγωγή έργου στον ατμοστρόβιλο. Μερικοί από τους περιορισμούς που ανακύπτουν αφορούν την ελάχιστη πίεση συμπύκνωσης που δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη πίεση του ψυκτικού μέσου, καθώς και την ταυτόχρονη αύξηση του κλάσματος υγρότητας του ατμού, η οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου.
- 2) Αύξηση της υπερθέρμανσης του ατμού (**Εικόνα 3 (β)**) οδηγώντας σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας και συνδυαστικά μείωση του κλάσματος υγρότητας του ατμού. Εδώ, τίθενται περιορισμοί που αφορούν κυρίως την θερμική αντοχή των υλικών του ατμοστρόβιλου.
- 3) Αύξηση της πίεσης λειτουργίας του ατμοπαραγωγού (**Εικόνα 3(γ)**) συνεπάγεται αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας οδηγώντας τελικά σε αύξηση του καθαρού παραγόμενου έργου. Περιοριστική παράμετρος εδώ, αποτελεί ξανά η αύξηση του κλάσματος υγρότητας του ατμού που καταπονεί τον στρόβιλο.



Εικόνα 3: (α) Επίδραση της πτώσης πίεσης του συμπυκνωτή (P₂→P_{2'}) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) (β) Επίδραση της αύξησης της υπερθέρμανσης του ατμού (T₁→T_{1'}) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) (γ) Επίδραση της αύξησης της πίεσης λειτουργίας του ατμοπαραγωγού (P₄→P_{4'}) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) [3]

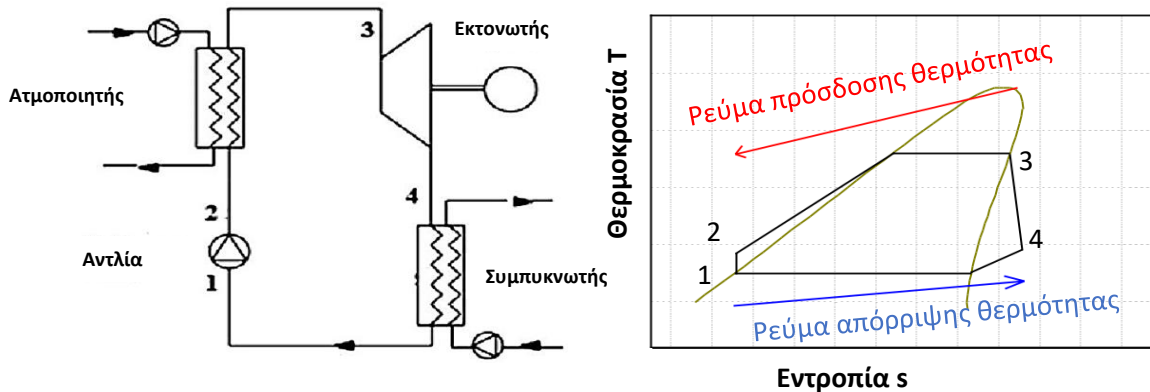
Πηγή: Divedi, 2016

1.2 Ο κύκλος ORC

1.2.1 Γενικά-Βασικές αρχές

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που ερευνάται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια αποτελεί ο οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle-ORC). Το μονογραμμικό διάγραμμα του απλού/βασικού μονοβάθμιου ORC (Standard Organic Rankine Cycle-SORC) μαζί με το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας βρίσκονται στην **Εικόνα 4**. Όπως υποδεικνύει και το όνομα του, ο ORC έχει πολύ

παρόμοια αρχή λειτουργίας με τον συμβατικό κύκλο Rankine, μόνο που εδώ, εργαζόμενο μέσο του κύκλου αποτελεί κάποιο οργανικό ρευστό και όχι το νερό (ανόργανο ρευστό). Επίσης, η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου γίνεται απευθείας από ένα εναλλάκτη θερμότητας, τον ατμοποιητή, μερικές φορές με τη χρήση κυκλώματος διαθερμικού ελαίου ως μέσο που προμηθεύει τη θερμότητα στο οργανικό ρευστό [4], σε αντίθεση με τον κύκλο Rankine, όπου έχουμε σταδιακή προθέρμανση-ατμοποίηση και υπερθέρμανση του νερού που έρχεται σε άμεση επαφή με τις εκάστοτε επιφάνειες του ατμοπαραγωγού (Οικονομητήρας-Ατμοποιητής-Προθερμαντήρας). Μια άλλη διαφορά στην διάταξη ORC είναι ότι η εκτόνωση που ακολουθεί μετά την ατμοποίηση, μπορεί να γίνει όχι μόνο σε αξονικό στρόβιλο, αλλά και σε ακτινικό στρόβιλο, κοχλιωτούς και ελικοειδείς εκτονωτές, περιστροφικούς ή εμβολοφόρους, αναλόγως την ισχύ της εκτόνωσης [5]. Τέλος, δεν απαιτείται η ύπαρξη τυμπάνου νερού-ατμού και απαεριωτή.

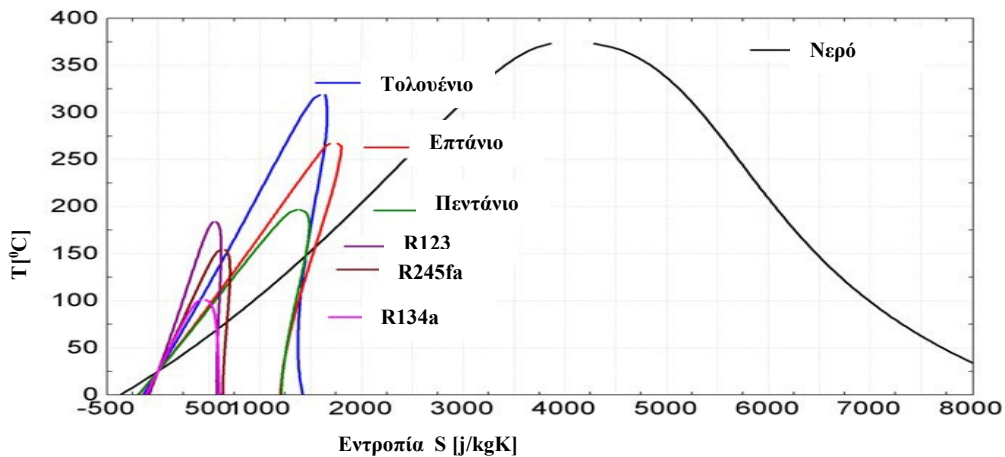


Εικόνα 4: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης ενός βασικού ORC [6] (β) Οι μεταβολές του εργαζόμενου μέσου ενός βασικού ORC σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [7]

Πηγή: Pethurajan, 2018 και Li, 2016

Οι βασικότερες κατηγορίες εργαζόμενων μέσων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα ORC είναι: οι υδρογονάνθρακες (HCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs), οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι υδροφθοροολεφίνες (HFOs), οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), οι σιλοξάνες, οι αλκοόλες, οι αιθέρες και οι φθωριούχοι αιθέρες [8]. Καθένα από τα ρευστά αυτά έχει την δική του καμπύλη κορεσμού, που το κατατάσσει σε μια από τις εξής κατηγορίες (**Εικόνα 5**):

- Ξηρού (dry) ρευστού, όπου η καμπύλη κορεσμένου ατμού εμφανίζει θετική κλίση ($\frac{\theta T}{\theta s} > 0$), πχ το πεντάνιο.
- Υγρού (wet) ρευστού, όπου η καμπύλη κορεσμένου ατμού εμφανίζει αρνητική κλίση ($\frac{\theta T}{\theta s} < 0$), πχ το νερό.
- Ισεντροπικού (isentropic) ρευστού, όπου η καμπύλη κορεσμένου ατμού εμφανίζει σχεδόν μηδενική κλίση ($\frac{\theta T}{\theta s} \rightarrow 0$), πχ το R245fa.



Εικόνα 5: Καμπύλες κορεσμού οργανικών ρευστών και νερού σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [9]

Πηγή: Quoilin, 2013

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των οργανικών ρευστών και του νερού, μερικές από τις οποίες αποτυπώνονται και στην **Εικόνα 5**, είναι οι εξής [9-11]:

- Τα οργανικά ρευστά έχουν χαμηλότερο κρίσιμο σημείο αλλά και σημείο βρασμού σε σχέση με τον νερό, πράγμα που σημαίνει πως η ατμοποίηση σε έναν ORC λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες, γεγονός που τα καθιστά ικανά για εκμετάλλευση πηγών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών (πχ γεωθερμία). Επίσης, είναι ευκολότερη η μετάβαση και η λειτουργία στην περιοχή των υπερκρίσιμων πιέσεων.
- Για συγκεκριμένη πίεση ατμοποίησης, η διαφορά εντροπίας κορεσμένου ατμού και κορεσμένου υγρού ενός οργανικού ρευστού και κατά συνέπεια, η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή του νερού. Έτσι, απαιτείται σημαντικά μικρότερη προσφορά θερμότητας για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου σε έναν κύκλο ORC, σε σχέση με τον συμβατικό κύκλο Rankine. Όμως, η αξιοποίηση ίδιας προσφερόμενης θερμότητας ενός ατμοπαραγωγού από έναν ατμοποιητή ORC συστήματος, θα απαιτούσε πολύ μεγαλύτερες παροχές οργανικού ρευστού και άρα μεγαλύτερες καταναλώσεις στην αντλία της εγκατάστασης.
- Το νερό, όπως αναφέρθηκε, ανήκει στην κατηγορία των υγρών μέσων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την υπερθέρμανση του για την μείωση των υγρών σταγονιδίων που σχηματίζονται στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστροβίλου και καταπονούν τα πτερύγια του (διάρκεια ζωής 15-20 χρόνια). Από την άλλη μεριά, υπάρχουν ξηρά και ισεντροπικά οργανικά ρευστά που καθόλη την διάρκεια της εκτόνωσης παραμένουν στην περιοχή υπέρθερμου ή κορεσμένου ατμού, γεγονός που επεκτείνει και την διάρκεια ζωής των στροβίλων ή άλλων εκτονωτών σε συστήματα ORC (διάρκεια ζωής μέχρι 30 χρόνια).
- Πολλοί παράγοντες αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης του συμβατικού κύκλου Rankine: Η πολύ χαμηλή πυκνότητα του νερού

στο τμήμα με τις χαμηλές πιέσεις της εγκατάστασης προκαλεί αύξηση της παροχής όγκου του ρευστού και συνεπώς αύξησης της υδραυλικής διαμέτρου και του μεγέθους των αγωγών και των εναλλακτών θερμότητας. Η πολύ μεγάλη ενθαλπική πτώση και ο υψηλός λόγος πιέσεων του κύκλου οδηγούν στην δημιουργία ενός ακριβού-ανθεκτικού πολυβάθμιου ατμοστροβίλου ενώ ακριβή είναι και η κατασκευή του ατμοπαραγωγού έτσι ώστε να έχει υψηλή αντοχή στις υψηλές πιέσεις και την θερμική καταπόνηση, για να παράξει τον επιθυμητό, υψηλής ενθαλπίας, ατμό. Στον αντίποδα, τα συστήματα ORC λειτουργούν με πολύ χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες, καθιστώντας την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων τους πολύ απλούστερη. Ενδεικτικά, η πλειοψηφία των εγκατεστημένων εκτονωτών σε ORC έχουν το πολύ 2 βαθμίδες, ενώ η ατμοποίηση πραγματοποιείται απευθείας και με την χρήση μοναδικού εναλλάκτη, χωρίς τύμπανο και ανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου.

- Το νερό σαν εργαζόμενο μέσο παρουσιάζει πληθώρα ελκυστικών ιδιοτήτων και πλεονεκτημάτων για την χρήση του σε σύστημα ηλεκτροπαραγωγής. Καταρχάς, υπάρχει σε αφθονία στη φύση και το κόστος προμήθειας του είναι χαμηλό. Είναι μη τοξικό, μη εύφλεκτο και δεν προκαλεί οποιουδήποτε είδους ρύπανση, ούτε αποτελεί απειλή για το περιβάλλον. Έχει πολύ καλή θερμική/χημική σταθερότητα (δεν παρουσιάζεται κίνδυνος αποσύνθεσης), χαμηλό ιξώδες που συμβάλλει στην μείωση των απωλειών τριβής στους αγωγούς και τους εναλλάκτες της εγκατάστασης, αυξάνοντας έτσι και τον συνολικό βαθμό απόδοσης της. Εν αντιθέσει με το νερό, υπάρχουν πολλά οργανικά ρευστά που εμφανίζουν μια ή περισσότερες ανεπιθύμητες ιδιότητες ή μειονεκτήματα στην εφαρμογή τους. Ένα από αυτά παρουσιάζονται για την κάθε κατηγορία στον **Πίνακα 1** που ακολουθεί.

Πίνακας 1: Μειονεκτήματα εφαρμογής διάφορων κατηγοριών οργανικών ουσιών σε κύκλο ORC [12]

Κατηγορίες οργανικών ουσιών	Ενδεικτικά μειονεκτήματα
Υδρογονάνθρακες (HCs) (γραμμικοί, κυκλικοί, αρωματικοί)	Προβλήματα αναφλεξιμότητας
Υπερφθοράνθρακες (PFCs)	Ανεπιθύμητες θερμοδυναμικές ιδιότητες
Χλωροφθοράνθρακες (CFCs)	Έχουν αποσυρθεί πλήρως εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούν
Υδροφθοράνθρακες (HFCs)	Ζητήματα αναξιοπιστίας και συμβατότητας με τα υλικά κατασκευής του συστήματος
Υδροφθοροολεφίνες (HFOs)	Υψηλό κόστος προμήθειας
Υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs)	Ενισχύουν την υπερθέρμανση του πλανήτη
Σιλοξάνες (MM, MM/MDM/MD2M)	Συχνά διαθέσιμες ως μείγματα, παρά ως καθαρές ουσίες
Αλκοόλες	Εύφλεκτες, θερμοδυναμικά ανεπιθύμητες
Αιθέρες, φθοριούχοι αιθέρες	Προβλήματα τοξικότητας και αναφλεξιμότητας

Πηγή: Bao, 2013

1.2.2 Εργαζόμενα ρευστά κύκλων ORC και κριτήρια επιλογής τους

Όπως γίνεται αντιληπτό, στις διάφορες κατηγορίες οργανικών ουσιών εντάσσονται πληθώρα υποψήφιων εργαζόμενων μέσων με διαφορετικές φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες. Αυτό δίνει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην εφαρμογή τέτοιου είδους ρευστών, καθώς είναι εφικτό να γίνει εκμετάλλευση πηγών θερμότητας μεγάλου εύρους θερμοκρασιών, για πολλές εφαρμογές και διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ταυτόχρονα όμως, δυσχεραίνει την διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου ρευστού για την εκάστοτε εφαρμογή, καθιστώντας το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ακόμα πιο σύνθετο. Μια επιπλέον παράμετρος που θεωρείται πως εντείνει το πρόβλημα αυτό είναι η τεράστια ποικιλία διαθέσιμων μειγμάτων προερχόμενη από συνδυασμούς δύο ή περισσότερων ουσιών, σε ίσες ή διαφορετικές μοριακές αναλογίες. Στην πραγματικότητα βέβαια, οι εμπορικές διατάξεις ORC που σχεδιάζονται ή βρίσκονται σε λειτουργία, διαθέτουν μόνο ένα μικρό σύνολο από καθαρές ουσίες και όχι μείγματα, διότι οι κατασκευαστές τους λαμβάνουν υπόψη ένα μεγάλο σύνολο περιορισμών (πχ τήρηση νομοθεσίας, ευκολία προμήθειας, χαμηλό κόστος) αλλά και τις προηγούμενες επιτυχείς εφαρμογές καλά μελετημένων ρευστών [13]. Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται μερικά από τα πιο δημοφιλή οργανικά ρευστά και τα πεδία χρήσης τους

Πίνακας 2: Συνηθέστερα εργαζόμενα μέσα σε εμπορικές εφαρμογές [9]

Δημοφιλή ρευστά	Πεδία χρήσης
HFC-134a	Χρήση σε εργοστάσια γεωθερμίας ή για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας πολύ χαμηλής θερμοκρασίας
HFC-245fa	Χρήση κυρίως για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας
Πεντάνιο	Χρήση στο μοναδικό ηλιακό εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας στην Νεβάδα. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας και εκμετάλλευση γεωθερμίας μεσαίας κλίμακας
Solkatherm	Χρήση για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας
OMTS	Χρήση σε εργοστάσια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας με βιομάζα
Τολουένιο	Χρήση για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας

Πηγή: Quoilin, 2013

Υπάρχουν πολλές επιστημονικές δημοσιεύσεις στις οποίες έχει διερευνηθεί η θερμοδυναμική απόδοση ενός συνόλου από υποψήφια ρευστά, στηριζόμενες σε αποτελέσματα ενός μοντέλου που αναπαριστά τις διεργασίες της μελετώμενης διαμόρφωσης του ORC. Σε κάθε περίπτωση, για την επιλογή του καταλληλότερου εργαζόμενου μέσου, πρέπει να πληρούνται τα εξής κριτήρια [8, 9]:

- Να έχει μέτρια κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία, αποδεκτές πιέσεις ατμοποίησης και συμπύκνωσης (ιδανικά μικρότερες από 25 bar και μεγαλύτερες από 1 bar αντίστοιχα) και καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας (χαμηλό ιξώδες και υψηλή αγωγιμότητα).
- Να έχει καλές χημικές και θερμικές ιδιότητες (χημική εφικτότητα σε υψηλές θερμοκρασίες), να έχει καλή συμβατότητα με τα υλικά (μη-διαβρωτικό) και με σημείο πήξης χαμηλότερο από την ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για αποφυγή στερεοποίησης της οργανικής ουσίας.
- Να είναι μη τοξικό, μη-εύφλεκτο και να έχει καλή διαλυτότητα με το λιπαντικό έλαιο.
- Να έχει χαμηλό κόστος, να είναι σε εμπορική διαθεσιμότητα και να μεγιστοποιεί τον ενεργειακό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης του κύκλου σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ρευστά.

- Να συμμορφώνεται με την ισχύουσα νομοθεσία που απορρέει από τη εφαρμογή των πρωτοκόλλων Μόντρεαλ (1987) και Κιότο (1997) αλλά και τους κανονισμούς που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση [14, 15] σχετικά με τον περιορισμό των φθοριούχων αερίων (F-gases), ώστε να έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο στη στοιβάδα του όζοντος και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Με άλλα λόγια, οι δείκτες δυναμικού εξασθένισης του όζοντος (ODP-Ozone Depletion Potential) και δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP-Global Warming Potential) μιας οργανικής ουσίας, οφείλουν να μην υπερβαίνουν τα προβλεπόμενα επίπεδα και να ακολουθούν τη νέα τάση της εποχής που στοχεύει στο σταδιακό μηδενισμό τους. Οργανικές ενώσεις όπως οι CFCs που ήταν ευρέως διαδεδομένες στο παραλθόν, έχουν πλέον καταργηθεί, ενώ άλλες όπως οι HCFCs και οι HFCs βρίσκονται υπό σταδιακή κατάργηση ή περιορισμό [16, 17] και ως εκ τούτου, το ενδιαφέρον της κοινής γνώμης στρέφεται πλέον σε κατηγορίες που πληρούν τα περιβαλλοντικά πρότυπα, όπως οι HCs, οι HFOs, οι σιλοξάνες (MM, MM/MDM/MD2M) αλλά και συνδυασμοί των ενώσεων αυτών.

1.2.3 Ανάλυση απόδοσης κύκλου ORC-Παραλλαγές απλού κύκλου

Η τεχνολογία ORC είναι συνηθέστερη στην εκμετάλλευση πηγών θερμότητας κυρίως χαμηλών αλλά και μεσαίων θερμοκρασιών (80-300 °C), λόγω της θερμικής αστάθειας που εμφανίζουν τα περισσότερα οργανικά ρευστά, καθιστώντας τα αναξιόπιστα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350 °C. Επομένως, η απόδοση του κύκλου ORC είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τον αντίστοιχο κύκλο νερού-ατμού, καθώς ο τελευταίος αξιοποιεί πηγές θερμότητας μεγαλύτερες των 500 °C. Οι συνηθέστεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος ORC είναι οι εξής: ο θερμικός βαθμός απόδοσης, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ο βαθμός αξιοποίησης της πηγής θερμότητας και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.

1) Ο θερμικός ή ενεργειακός ή βαθμός απόδοσης του 1^{ου} θερμοδυναμικού νόμου (η_{th} -thermal efficiency) ορίζεται ως η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του κύκλου (δηλαδή η ισχύς που παράγεται από τον εκτονωτή αν αφαιρεθούν οι καταναλώσεις της αντλίας και του βοηθητικού εξοπλισμού) διαιρεμένη με τη θερμική ισχύ που έχει παραλάβει το ρεύμα του εργαζόμενου μέσου από το ρεύμα της πηγής θερμότητας, μέσω του ατμοποιητή της εγκατάστασης και δίνεται από την σχέση (1.2.1):

$$\eta_{th} = \frac{P_{e,net}}{\dot{Q}_{ORC,in}} \quad (1.2.1)$$

Στην εξίσωση αυτή, $P_{e,net}$ είναι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και $\dot{Q}_{ORC,in}$ η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο από το θερμό ρεύμα της πηγής. Ο βαθμός αυτός είναι ένα μέτρο που εξαρτάται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τις παραμέτρους λειτουργίας του κύκλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο όπου μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς δεν συμπίπτει απαραίτητα με εκείνο που μεγιστοποιεί τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης.

2) Ο εξεργειακός ή βαθμός απόδοσης του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου (η_{ex} -exergetic efficiency) ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, προς το ρυθμό εξέργειας του θερμού ρεύματος της πηγής που εισέρχεται στον ατμοποιητή της εγκατάστασης και δίνεται από τη σχέση (1.2.2):

$$\eta_{ex} = \frac{P_{e,net}}{\dot{E}x_{hs,in}} \quad (1.2.2)$$

Στην εξίσωση αυτή, $P_{e,net}$ είναι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και $\dot{E}x_{hs,in}$ ο ρυθμός εξέργειας του θερμού ρεύματος της πηγής. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης υποδεικνύει το κατά πόσο η προσφερόμενη θερμική ισχύς μετατρέπεται σε καθαρή ηλεκτρική ισχύ λαμβάνοντας υπόψη και τα χαρακτηριστικά του θερμού ρεύματος της πηγής και του ψυχρού ρεύματος της δεξαμενής απόρριψης θερμότητας όπως επίσης και του εκάστοτε περιβάλλοντος αναφοράς. Ο βαθμός αυτός είναι ανάλογος του γινόμενου του θερμικού βαθμού με τον βαθμό αξιοποίησης της πηγής θερμότητας και επομένως η μεγιστοποίηση του εξαρτάται άμεσα από τον βέλτιστο συνδυασμό των όρων αυτών. Οι αναντιστρεπτότητες που δημιουργούνται εξαιτίας των μη-ιδανικών μεταβολών στα επιμέρους στοιχεία του κύκλου (πχ μη ισεντροπικές μεταβολές κατά τη συμπίεση και την εκτόνωση) προκαλούν καταστροφή της εξέργειας και συνεπώς ελάττωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης.

3) Ο βαθμός αξιοποίησης της πηγής θερμότητας (η_{hsu} -heat source utilization efficiency) ορίζεται ως το πηλίκο της θερμικής ισχύος που έχει παραλάβει το εργαζόμενο μέσο από την πηγή θερμότητας, προς την θεωρητικά μέγιστη θερμική ισχύ που θα μπορούσε να παραλάβει, εφόσον το εξερχόμενο, από τον ατμοποιητή, ρεύμα της πηγής είχε ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία αναφοράς του συστήματος, και δίνεται από τη σχέση (1.2.3):

$$\eta_{hsu} = \frac{\dot{Q}_{ORC,in}}{\dot{Q}_{hs,ref}} \quad (1.2.3)$$

Στον παραπάνω τύπο, $\dot{Q}_{hs,ref}$ είναι η μέγιστη θεωρητική θερμική ισχύς που μπορεί να προσδώσει το ρεύμα θερμότητας ενώ $\dot{Q}_{ORC,in}$ η θερμική ισχύς που τελικά προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο του κύκλου. Ο δείκτης αυτός φανερώνει το ποσό της προσφερόμενης θερμότητας που ανακτάται από την θεωρητικά μέγιστη διαθέσιμη, δηλαδή αποτελεί ποιοτικό μέτρο της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δυο συναλλασσόμενων ρευμάτων στον ατμοποιητή, ενώ το γινόμενο του με το ενεργειακό βαθμό απόδοσης ονομάζεται συνολικός βαθμός μετατροπής.

4) Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος (η_{sys} -system efficiency) είναι ένας δείκτης ισοδύναμος με τον εξεργειακό βαθμό και ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη θεωρητικά μέγιστη θερμική ισχύ που θα μπορούσε να παραλάβει το εργαζόμενο μέσο, εφόσον το εξερχόμενο από τον ατμοποιητή ρεύμα της

πηγής είχε ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία αναφοράς του συστήματος, και δίνεται από τη σχέση (1.2.4):

$$\eta_{sys} = \frac{P_{e,net}}{\dot{Q}_{hs,ref}} \quad (1.2.4)$$

Για μια πηγή θερμότητας συγκεκριμένης θερμοχωρητικότητας ή παροχής μάζας, η μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος συμπίπτει με την μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, όχι όμως και με του θερμικού. Οι σχεδιαστικές παράμετροι που αφορούν την μεγιστοποίηση του ενεργειακού βαθμού είναι πιθανό να μειώνουν τον βαθμό αξιοποίησης της πηγής θερμότητας καθώς ο τελευταίος εξαρτάται από τον συνδυασμό των παραμέτρων που αφορούν τόσο την πηγή όσο και τη λειτουργία του κύκλου.

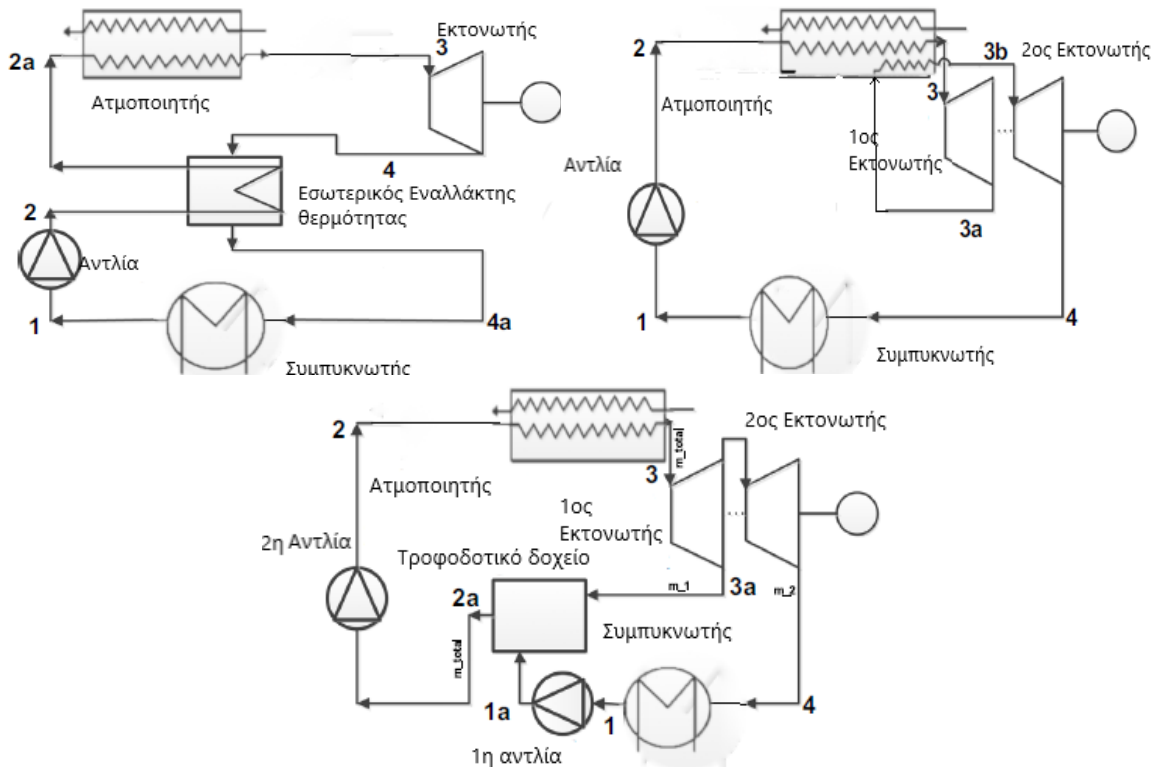
Συνήθως, προκειμένου να γίνει βελτιστοποίηση σχεδιασμού και παραμέτρων λειτουργίας ενός συστήματος ORC, είναι αναγκαίο να ορισθεί ως κριτήριο προς μεγιστοποίηση ένας ή περισσότεροι από τους ανωτέρω δείκτες. Στις περιπτώσεις πηγών θερμότητας κλειστού τύπου (πχ ηλιακά, βιομάζα), ως είσοδο στο σύστημα ORC λαμβάνεται συγκεκριμένη θερμορροή από την πηγή θερμότητας, η οποία είναι σταθερή και ανεξάρτητη από το σχεδιασμό του κύκλου. Σε αυτού του είδους τις εφαρμογές, ο βαθμός αξιοποίησης της πηγής θερμότητας παραμένει σταθερός και επομένως επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του θερμικού βαθμού απόδοσης. Για πηγές θερμότητας ανοικτού τύπου (πχ γεωθερμία, ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας) ως είσοδο λαμβάνεται ένα θερμό ρεύμα που εισέρχεται στον ατμοποιητή και χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη παροχή μάζας, θερμοχωρητικότητα και θερμοκρασία. Μέρος του ενεργειακού περιεχομένου του ρεύματος αυτού δεν ανακτάται από το εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου και καταλήγει ανεκμετάλλευτο στο περιβάλλον. Για τέτοιου είδους μη προκαθορισμένες θερμορροές, που εξαρτώνται από τον σχεδιασμό του συστήματος ORC, είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη μεγιστοποίηση τόσο του θερμικού όσο και του βαθμού αξιοποίησης της πηγής θερμότητας, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί τόσο ο εξεργειακός όσο και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.

Για την βελτίωση της ενεργειακής και εξεργειακής απόδοσης του SORC (**Εικόνα 4 (α)**) έχουν προταθεί παραλλαγές με ή χωρίς πρόσθετα στοιχεία, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- Κύκλος ανακόμισης θερμότητας, με την προσθήκη ενός εσωτερικού εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ της εξόδου του εκτονωτή και της εισόδου του συμπυκνωτή, για την απορρόφηση της θερμότητας του υπέρθερμου ατμού και αξιοποίηση της στην προθέρμανση του εξερχόμενου από την αντλία, ρευστού. Έτσι, απαιτείται λιγότερη πρόσδοση θερμότητας από τον ατμοποιητή και επομένως ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου αυξάνεται (**Εικόνα 6α**).

- Κύκλος με αναθέρμανση, με κύριο σκοπό τη μείωση του κλάσματος υγρότητας του παραγόμενου ατμού στις τελευταίες βαθμίδες της εκτόνωσης. Περιλαμβάνει δυο εν σειρά εκτονωτές, έναν υψηλότερης και έναν χαμηλότερης πίεσης. Αρχικά ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται σε υψηλή πίεση και οδηγείται ξανά στον ατμοποιητή όπου και θα αναθερμανθεί, δηλαδή θα αποκτήσει παρόμοιου ή ίσου μεγέθους θερμοκρασία με εκείνη πριν την εκτόνωση. Ο εξερχόμενος, σε χαμηλότερη πίεση αυτή τη φορά, ατμός οδηγείται στον δεύτερο εκτονωτή χαμηλής πίεσης της εγκατάστασης για περαιτέρω αξιοποίηση του ενεργειακού του περιεχομένου. Με την προϋπόθεση ότι η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου στον κύκλο αναθέρμανσης είναι ίδια με εκείνη του απλού κύκλου, ο κύκλος με αναθέρμανση μπορεί να παράξει περισσότερη καθαρή ηλεκτρική ισχύ, όμως απαιτεί περισσότερη θερμική ισχύ για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου. Κατά συνέπεια, το όφελος στον θερμικό βαθμό απόδοσης είναι συνήθως ανεπαίσθητο (**Εικόνα 6β**) [7].
- Κύκλος με αναγεννητική προθέρμανση, όπου το ρεύμα του εργαζόμενου μέσου μετά την έξοδο του από την 1^η αντλία, αναμιγνύεται ισόθλιπτα σε τροφοδοτικό δοχείο με κατάλληλο ρεύμα ατμού που απομαστεύεται από κάποια ενδιάμεση βαθμίδα του εκτονωτή. Το τελικό ρεύμα που φτάνει στην υψηλή πίεση με την βοήθεια της 2^{ης} αντλίας, έχει υψηλότερη θερμοκρασία κατά την είσοδο του στον ατμοποιητή. Ως αποτέλεσμα απαιτείται λιγότερη θερμότητα για την ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου, ενώ παράλληλα η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνη του απλού ORC, οδηγώντας τόσο σε εξοικονόμηση ενέργειας όσο και σε αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης (**Εικόνα 6γ**).
- Η χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων ως εργαζόμενα μέσα στον απλό κύκλο αντικαθιστώντας τις συμβατικές καθαρές ουσίες. Τα ζεοτροπικά ρευστά, χάρη στην ιδιότητα τους να μεταβάλλουν την θερμοκρασία τους κατά την αλλαγή φάσης τους δημιουργούν ένα καλύτερο <<ταιριάσμα>> μεταξύ των θερμοκρασιακών προφίλ των ρευστών παραλαβής και απόρριψης θερμότητας, κατά την διαδικασία της ατμοποίησης και της συμπύκνωσης αντιστοιχώς. Έτσι, μειώνονται οι αναντιστρεπτότητες που δημιουργούνται κατά την μεταφορά θερμότητας (για πεπερασμένες θερμοκρασιακές διαφορές) από τους δυο εναλλάκτες του συστήματος ORC, με αποτέλεσμα τη συνολικά μικρότερη καταστροφή εξέργειας, δηλαδή την αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του κύκλου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα ζεοτροπικά μείγματα και τη συμβολή τους στη βελτίωση της απόδοσης ενός ORC θα παρουσιαστούν σε ξεχωριστή ενότητα (**1.3**).
- Η δημιουργία πολλαπλών βαθμίδων ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου είναι ένας εναλλακτικός τρόπος μείωσης των αναντιστρεπτοτήτων που προκύπτουν κατά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ της πηγής και του εργαζόμενου ρευστού. Κατά συνέπεια, περισσότερη θερμότητα μεταφέρεται συνολικά στον κύκλο με αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Η επιλογή του αριθμού των βαθμίδων πρέπει να γίνεται με προσοχή και γνώμονα τόσο την βελτιστοποίηση της μεταφοράς εξέργειας όσο και το κόστος της εγκατάστασης. Στην πράξη προτιμώνται τα διβάθμια συστήματα καθώς με την προσθήκη

πολλαπλών επιπέδων πιέσεων αυξάνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας. Τα συστήματα με πολλαπλές βαθμίδες ατμοποίησης θα αναλυθούν εκτενώς σε ξεχωριστή ενότητα (1.4).



Εικόνα 6: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με ανακόμιση θερμότητας (β) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με αναθέρμανση (γ) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με αναγεννητική προθέρμανση [7]

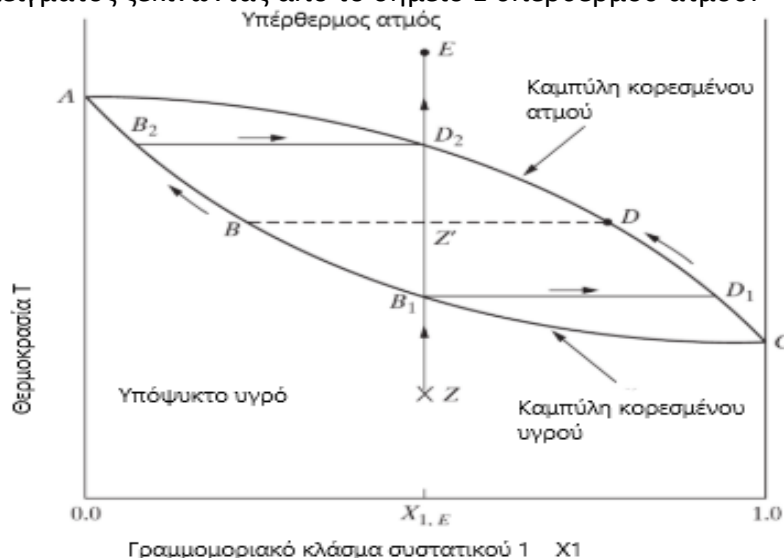
Πηγή: Li, 2016

1.3 Ζεοτροπικά ρευστά

1.3.1 Ορισμός, ανάλυση και προοπτικές-εμπόδια χρήσης σε ORC

Ζεοτροπικά ή μη-αζεοτροπικά ρευστά ονομάζονται οι χημικές ενώσεις που προέρχονται από την ανάμειξη δύο ή περισσότερων καθαρών ουσιών με διαφορετικά σημεία βρασμού. Τα ζεοτροπικά μείγματα αποτελούμενα από δύο καθαρές ενώσεις καλούνται δυαδικά, ενώ εκείνα από περισσότερες, πολυσυστατικά. Στην κατάσταση ισορροπίας, οι σύστασεις της υγρής και της αέριας φάσης δεν είναι ποτέ ίσες. Καθώς το ξηρό κλάσμα του ζεοτροπικού μίγματος αυξάνεται από 0 έως 1 κατά την εναλλαγή φάσης, η θερμοκρασία ισορροπίας και η σύσταση της κάθε φάσης μεταβάλλονται. Για να γίνει αντιληπτή η θερμοδυναμική συμπεριφορά ενός δυαδικού ζεοτροπικού μίγματος,

παρατίθενται η **Εικόνα 7** που επεξηγεί την διαδικασία της ατμοποίησης. Ξεκινώντας από το σημείο Z σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού, το μείγμα θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση και παραμένει στην αρχική του συγκέντρωση έως ότου φτάσει στο σημείο B₁ (κατάσταση κορεσμένου υγρού). Περαιτέρω θέρμανση του μείγματος προκαλεί, αρχικά, την εξάτμιση του πιο πτητικού και στη συνέχεια του λιγότερο πτητικού συστατικού, μετακινώντας την συγκέντρωση της υγρής φάσης πάνω στη καμπύλη B₁B₂, ενώ η συγκέντρωση της αέριας φάσης μετακινείται κατά μήκος της καμπύλης D₁D₂. Με την ολοκλήρωση της ατμοποίησης, το υγρό θα έχει κατάσταση που αντιστοιχεί στο σημείο B₂ και η ατμώδης φάση θα αντιστοιχεί στο σημείο D₂. Οι καμπύλες ABC και ADC ονομάζονται καμπύλες κορεσμένου υγρού και ατμού αντίστοιχως, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των σημείων αρχής (B₁) και τέλους (D₂) της διεργασίας καλείται θερμοκρασιακή ολίσθηση (Temperature Glide). Η θερμοκρασιακή ολίσθηση εξαρτάται από την διαφορά των κρίσιμων θερμοκρασιών των δυο συστατικών, την αναλογία τους στο μείγμα και την πίεση που πραγματοποιείται αλλαγή φάσης. Η αντίστροφη διαδικασία από αυτήν που περιγράφηκε πραγματοποιείται κατά την συμπύκνωση ζεοτροπικού μείγματος ξεκινώντας από το σημείο E υπέρθερμου ατμού.

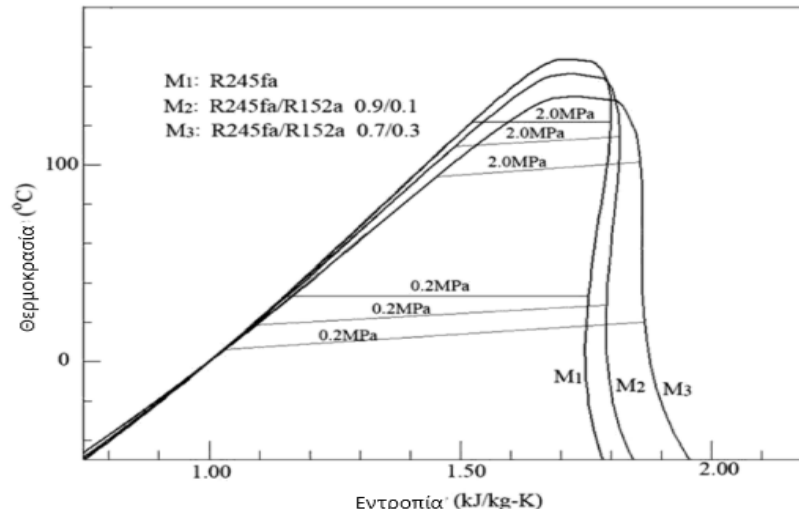


Εικόνα 7: Διάγραμμα φάσης υπό σταθερή πίεση δυαδικού ζεοτροπικού (μη-αζεοτροπικού) μείγματος [18]

Πηγή: Ghiaasiaan, 2007

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες ενός ζεοτροπικού μείγματος δεν είναι μόνο άμεση συνάρτηση των ιδιοτήτων των καθαρών ουσιών που το συνθέτουν, αλλά και της εκάστοτε αναλογίας (μοριακή ή κατά μάζα) κάθε μιας από αυτές. Για παράδειγμα, η ανάμειξη δυο καθαρών ρευστών ίδιου τύπου (ξηρού, ισηντροπικού ή υγρού) θα οδηγήσει σε ζεοτροπικό μείγμα με καμπύλη κορεσμού αντίστοιχης μορφής, όμως η ανάμειξη δύο διαφορετικών ειδών ρευστού θα μπορούσε να οδηγήσει σε ζεοτροπικό μείγμα που να ανήκει σε οποιαδήποτε από τις 3 κατηγορίες, εξαρτώμενο πάντα από την

μοριακή συγκέντρωση των επιμέρους συστατικών. Επιπλέον, οι κρίσιμες θερμοκρασίες των μη-αζεωτροπικών μειγμάτων θα βρίσκονται ανάμεσα σε εκείνες των καθαρών ουσιών που το απαρτίζουν, και μάλιστα, θα εμφανίζουν γραμμική εξάρτηση από τους εκάστοτε συνδυασμούς μοριακών αναλογιών των επιμέρους συστατικών τους [19]. Στην **Εικόνα 8** απεικονίζονται οι καμπύλες κορεσμού δυο δυαδικών ζεωτροπικών μειγμάτων που προέκυψαν από την διαφορετική κατά μάζα σύσταση των ίδιων ουσιών, συγκριτικά με την καμπύλη κορεσμού του συστατικού τους με την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία.



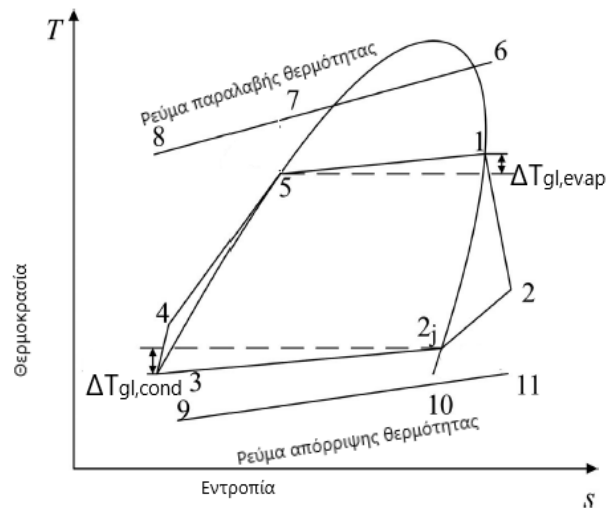
Εικόνα 8: Καμπύλες κορεσμού ζεωτροπικών μειγμάτων M2: R245fa/R152a 0.9/0.1 και M3: R245fa/R152a 0.7/0.3 εν συγκρίσει με την καμπύλη της καθαρής ουσίας M1: R245fa [20]

Πηγή: XinRong, 2016

Η οργανική ένωση R-245fa είναι το ρευστό υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας και ανήκει στην κατηγορία ξηρών μέσων, ενώ η ένωση R152a σε αυτήν των υγρών μέσων και μαζί συγκροτούν δυο ξηρά ζεωτροπικά μείγματα με κατά μάζα αναλογίες 0.9/0.1 και 0.7/0.3 αντιστοίχως. Όπως γίνεται φανερό, τα τελικά μείγματα έχουν μεταξύ τους διαφορετική θερμοκρασιακή ολίσθηση, χαμηλότερα κρίσιμα σημεία και υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης για πίεση 0.2 MPa σε σχέση με την καθνή ουσία R245fa.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι λόγοι για τους οποίους η μεγάλη πλειοψηφία ερευνών παρουσιάζουν τα συστήματα ORC με ζεωτροπικά μείγματα (Zeotropic ORCs-ZORCs) να υπερτερούν έναντι των συμβατικών ORC με καθαρές ουσίες. Κύρια αιτία είναι η θερμοκρασιακή ολίσθηση που εμφανίζουν κατά την αλλαγή φάσης, δηλαδή η μη ισοθερμοκρασιακή μεταβολή του μείγματος υπό σταθερή πίεση που συμβαίνει κατά την ατμοποίηση (5→1) και συμπύκνωση (2j→3) του, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 9**. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας στην έξοδο του ατμοποιητή (Σημείο 1) και η

μείωση της θερμοκρασίας στην έξοδο του συμπυκνωτή (Σημείο 3) προκαλούν ένα καλύτερο <<ταιριάσμα>> των θερμοκρασιακών προφίλ του ρευστού με τα ρεύματα παραλαβής (6→8) και απόρριψης (9→11) θερμότητας [21]. Με άλλα λόγια, οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας έχουν λιγότερες απώλειες και γίνονται λιγότερο αναντιστρεπτές, αφού οι μειωμένες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ρευμάτων των δύο εναλλακτών μειώνουν τον ρυθμό καταστροφής της εξέργειας οδηγώντας σε αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Επίσης, η μεγαλύτερη ενθαλπική πτώση που δημιουργείται από την αύξηση της θερμοκρασίας ($\Delta T_{gl, evap}$) στην έξοδο του ατμοποιητή, αξιοποιείται στον εκτονωτή προς παραγωγή περισσότερου έργου με συνέπεια την αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου. Ωστόσο, σύμφωνα με έρευνες, το κυριότερο ρόλο στην βελτίωση της απόδοσης δείχνει να έχει η μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας από την πτώση θερμοκρασίας ($\Delta T_{gl, cond}$) κατά την συμπύκνωση στην διφασική περιοχή. Ένα άλλο πλεονέκτημα που δίνει προβάδισμα στην μελλοντική εξάπλωση των ζεοτροπικών μειγμάτων είναι η δυνατότητα που παρέχουν στο να καλύπτουν ευκολότερα τις απαιτήσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τους κανόνες ασφαλείας ενός ORC με την ανάμειξη κατάλληλων ποσοτήτων από πολλούς συνδυασμούς καθαρών ουσιών.



Εικόνα 9: Θερμοκρασιακή ολίσθηση ζεοτροπικού μείγματος κατά τις διεργασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης του [22]

Πηγή: Lin, 2020

Στον αντίποδα, παρόλο που η γενική εικόνα της χρήσης ZORCs καταδεικνύει ενεργειακά και εξεργειακά οφέλη, η τεχνολογία αυτή δεν είναι ακόμα ώριμη για χρήση σε εμπορικές εφαρμογές. Οι έρευνες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία είναι σχετικά περιορισμένες και εστιάζονται κυρίως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Τα ζητήματα που αποτελούν τροχοπέδη στην ευρεία εξάπλωση τους συνοψίζονται ως εξής [23]:

1) Ανεπαρκής ακρίβεια προσδιορισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ζεοτροπικών μειγμάτων με τα υπάρχοντα θεωρητικά εργαλεία, οδηγώντας σε μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αδυναμίας των θεωρητικών αναλύσεων να επεξεργαστούν τα μη-γραμμικά θερμοκρασιακά προφίλ των ζεοτροπικών μειγμάτων, ενώ σημαντική είναι και η υποεκτίμηση των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας των εναλλακτών της εγκατάστασης [24]. Το τελευταίο συμβαίνει λόγω της μειωμένης θερμικής αγωγιμότητας που εμφανίζει το μείγμα κατά τις αλλαγές φάσης, η οποία αποδίδεται στις διαρκώς μεταβαλλόμενες συγκέντρωσεις υγρής και αέριας κατάστασης στην διφασική περιοχή. Συνέπεια όλων αυτών αποτελεί η υπερδιαστασιολόγηση των επιφανειών του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή με το οικονομικό αντίκτυπο που αυτό συνεπάγεται.

2) Η αλλαγή σύστασης του μείγματος, η οποία ορίζεται ως η μέγιστη διαφορά της σύστασης με την οποία το σύστημα ORC έχει αρχικά πληρωθεί για να διακινεί, με εκείνη την οποία τελικά κυκλοφορεί σε αυτό όταν σταθεροποιηθεί η λειτουργία του [21]. Η μεταβολή αυτή μπορεί να αποδοθεί στα εξής φαινόμενα: τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ υγρής και αέριας φάσης, τη διαφορά διαλυτότητας των ουσιών του ζεοτροπικού μείγματος στο λιπαντικό έλαιο και τη διαφορά όγκου του συστήματος και των διαρροών που παρουσιάζει [25]. Η αλλαγή σύστασης μεταβάλλει σημαντικά τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του συστήματος και θέτει ένα όριο στην μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή ολίσθηση, προκαλώντας μείωση του παραγόμενου έργου, ενώ παράλληλα καθιστά αναγκαία την εγκατάσταση ενισχυμένου ή πρόσθετου εξοπλισμού για αποφυγή ανεπιθύμητων διαρροών [26], με την ανάλογη οικονομική επιβάρυνση.

3) Η κλασματοποίηση των συστατικών ενός δυαδικού ζεοτροπικού μείγματος, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο η ατμώδης φάση έχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε ένα εκ των δυο συστατικών του μείγματος, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει στην υγρή φάση, όπου η συγκέντρωση του συστατικού που ήταν προηγουμένως σε έλλειψη, υπερτερεί, πλέον, σημαντικά στο μείγμα. Στις εφαρμογές ORC, ανεπιθύμητη κλασματοποίηση των συστατικών λαμβάνει χώρα είτε στον ατμοποιητή είτε στον συμπυκνωτή, προκαλώντας αστάθεια και απρόβλεπτες συνέπειες για το σύστημα, το οποίο θα υποχρεωθεί να λειτουργήσει σε συνθήκες διαφορετικές από εκείνες του σχεδιασμού του. Παράγοντες που ενθαρρύνουν την δημιουργία ενός τέτοιου φαινομένου είναι η μεγάλη διαφορά των θερμοκρασιών βρασμού των επιμέρους ουσιών του μείγματος, καθώς επίσης και η υψηλή θερμοκρασιακή ολίσθηση η οποία πρακτικά θα πρέπει να περιορίζεται σε τιμές της τάξεως των 15 °C [27].

1.3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι πρώτες έρευνες πάνω στην χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων σε διατάξεις ORC ξεκίνησαν την δεκαετία του 1990, όταν αναπτύχθηκαν τα πρώτα μοντέλα πρόβλεψης ιδιοτήτων για μείγματα ρευστών. Πρώτοι οι Angelino and Colonnadipaliano [28] μελέτησαν τα προτερήματα χρήσης ζεοτροπικών μειγμάτων ως εργαζόμενα μέσα σε συστήματα ORC για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας και εκμετάλλευση

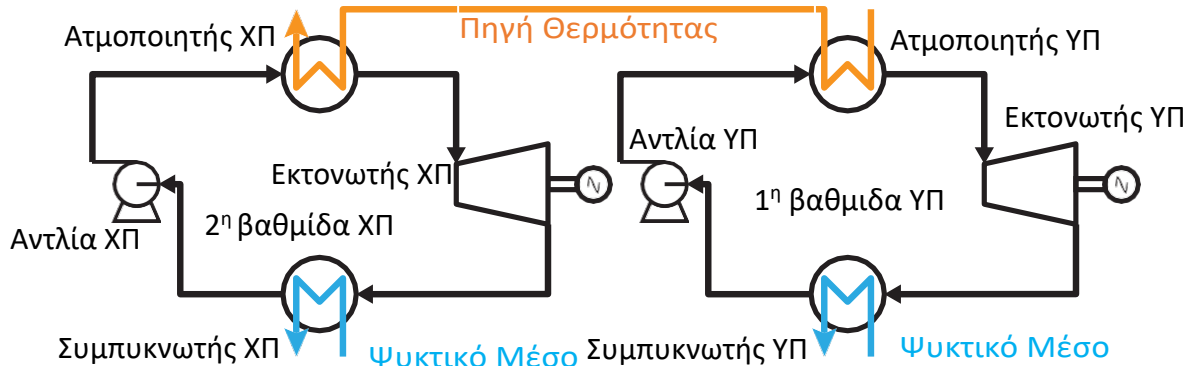
γεωθερμίας και δεν διαπίστωσαν αύξηση στην απόδοση τους συγκριτικά με την χρήση καθαρής ουσίας. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Wang and Zhao [29] αλλά και οι Li, et al. [30] με ευρήματα όμως που περιορίζονταν στις συνθήκες λειτουργίας. Ακολούθησαν περισσότερες και πιο εμπειριστατωμένες μελέτες, όπως αυτή των Chys, et al. [31] οι οποίοι κατέληξαν σε αποτελέσματα που δείχνουν την θετική επίδραση των ζεοτροπικών μειγμάτων στον ενεργειακό βαθμό απόδοσης συστήματος ORC, με την βελτίωση να φτάνει το 16 % και 6 % για πηγές γεωθερμίας με θερμοκρασίες 150 °C και 250 °C αντιστοίχως. Οι Radulovic and Beleno Castaneda [32] ερεύνησαν την λειτουργία ενός υπερκρίσιμου ORC, τροφοδοτούμενο από ρεύμα γεωθερμίας χαμηλής θερμοκρασίας, τοποθετώντας 6 ζεοτροπικά μείγματα (2 συνδυασμοί με 3 γραμμομοριακές αναλογίες). Το μείγμα R-143a (0.7)/R-124 (0.3) έδινε τον μέγιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης ίσο με 46 % ενώ συγκριτικά με την καθαρή ουσία R-143a η απόδοση του κύκλου μπορεί να βελτιωθεί μέχρι και 15 % για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Οι Lecompte, et al. [33] εξέτασαν από την σκοπιά της εξέργειας την απόδοση δυο υποκρίσιμων ORC με εργαζόμενα μέσα 7 ζεοτροπικά μείγματα. Η απόδοση του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου βελτιώθηκε κατά 7.1-14.2 % σε σχέση με την λειτουργία τους υπό τις καθαρές ουσίες που συγκροτούσαν τους συνδυασμούς των μειγμάτων. Τέλος, οι Braimakis, et al. [34] αναζητώντας τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση μη-αζεοτροπικών μειγμάτων, διεξήγαγαν έρευνα με στόχο την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε εύρος θερμοκρασιών πηγής 100-300 °C, επιστρατεύοντας τον κλασσικό οργανικό κύκλο αλλά και τον κύκλο με ανακόμιση θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, επέλεξαν 9 καθαρές ουσίες, εκ των οποίων οι 6 ήταν εξαιρετικά χαμηλού δείκτη GWP, και με διαφορετικούς συνδυασμούς και αναλογίες, δημιούργησαν δυαδικά ζεοτροπικά μείγματα τα οποία τοποθέτησαν ως εργαζόμενα μέσα στις 2 διατάξεις. Τα αποτελέσματα απέδειξαν την εξεργειακή υπεροχή των ζεοτροπικών μειγμάτων έναντι των καθαρών ουσιών, σε όλες τις θερμοκρασίες πηγής, τόσο στον απλό όσο και στον κύκλο με ανακόμιση, με την εξεργειακή βελτίωση να φτάνει μέχρι και το 36.39 %, επιβεβαιώνοντας και τις προηγούμενες έρευνες. Από ενεργειακής σκοπιάς, διαπίστωσαν πως ο συμβατικός κύκλος με ζεοτροπικά μείγματα ευνοείται περισσότερο από την τοποθέτηση εναλλάκτη ανακόμισης σε σχέση με τον ίδιο κύκλο διαρρεόμενο από καθαρές ουσίες, καθώς και ότι η χρήση των τελευταίων συνίσταται κυρίως σε περιπτώσεις μεγιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης ενός συστήματος ORC.

1.4 Συστήματα ORC πολλαπλών βαθμίδων

1.4.1 Διατάξεις πολυβάθμιων συστημάτων-πλεονεκτήματα

Με γνώμονα την εξαιρετικά χαμηλή απόδοση του απλού υποκρίσιμου οργανικού κύκλου, αναπτύχθηκε μια στρατηγική ενίσχυσης της διαμόρφωσης των συστημάτων ORC που σχετίζεται με την προσθήκη πολλαπλών βαθμίδων ατμοποίησης ή εναλλακτικά, πολλαπλών επιπέδων πίεσης. Ο εκάστοτε αριθμός N βαθμίδων (ή N κλειστών βρόχων)

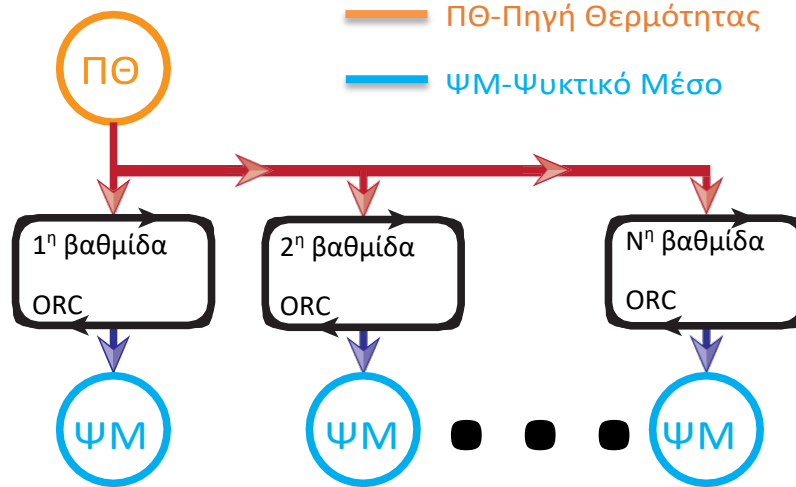
που σχηματίζονται και από τις οποίες διέρχεται το ίδιο εργαζόμενο μέσο, είναι εκείνος που διαφοροποιεί τα N-βάθμια (διβάθμια, τριβάθμια κ.ο.κ) από τα μονοβάθμια συστήματα, ενώ αύξηση του αριθμού αυτού οδηγεί σε ολόενα και πιο σύνθετες διατάξεις. Αν επιλεγεί αυθαίρετα ο αριθμός $N=2$, τότε η γενικότερη και απλούστερη διαμόρφωση ενός διβάθμιου συστήματος απεικονίζεται στην **Εικόνα 10**. Πρόκειται ουσιαστικά για την εν-σειρά σύνδεση δυο μονοβάθμιων συστημάτων ORC που τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή θερμότητας.



Εικόνα 10: Μονογραμμικό διάγραμμα της απλούστερης διαμόρφωσης ενός διβάθμιου συστήματος ORC [35]

Πηγή: Thierry, 2016

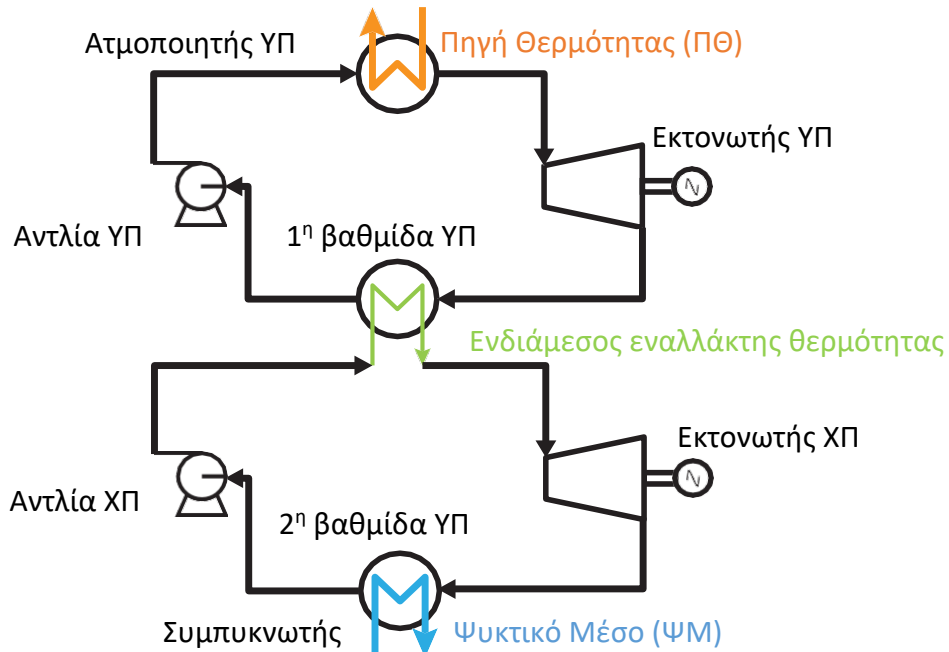
Με στόχο να γίνει όσο το δυνατόν υψηλότερη εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου της πηγής θερμότητας, οι δυο βαθμίδες-βρόχοι λειτουργούν σε διαφορετικές πιέσεις και θερμοκρασίες. Ο ατμοποιητής του 1^{ου} βρόχου, που δέχεται απευθείας το θερμό ρεύμα της πηγής, λειτουργεί συνήθως σε υψηλή πίεση/θερμοκρασία (ΥΠ/ΥΘ) ώστε να μετατρέψει όσο το δυνατόν περισσότερη προσφερόμενη θερμότητα σε ωφέλιμη, η οποία με την σειρά της θα μετατραπεί σε ισχύ μέσω του εκτονωτή ΥΠ. Το εξερχόμενο, από τον 1^ο ατμοποιητή, ρεύμα της πηγής, έχοντας πλέον χαμηλότερη θερμοκρασία, εισέρχεται στον 2^ο ατμοποιητή ο οποίος λειτουργεί σε χαμηλή πίεση/θερμοκρασία (ΧΠ/ΧΘ) προκειμένου να ανακτήσει το μεγαλύτερο μέρος της εναπομείνουσας θερμότητας του ρεύματος αυτού, προς παραγωγή επιπλέον έργου από τον εκτονωτή ΧΠ. Όση θερμότητα δεν αξιοποιηθεί κατά την εκτόνωση, μεταφέρεται στο περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο, το διβάθμιο σύστημα μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να απορροφά περισσότερη θερμότητα και να παράγει μεγαλύτερη ισχύ συγκριτικά με το αντίστοιχο μονοβάθμιο. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γενικευτεί και για περισσότερες από 2 βαθμίδες όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 11**, με την προϋπόθεση όμως ότι η διαθέσιμη θερμότητα της πηγής θα μπορεί να γίνει αξιοποιήσιμη από τις επιπλέον βαθμίδες, και μάλιστα, σε τέτοιο βαθμό που να αιτιολογείται το κόστος και η πολυπλοκότητα της κατασκευής.



Εικόνα 11: Μεθολογία εν σειρά σύνδεσης N βαθμίδων ατμοποίησης τροφοδοτούμενες από κοινή πηγή θερμότητας [35]

Πηγή: Thierry, 2016

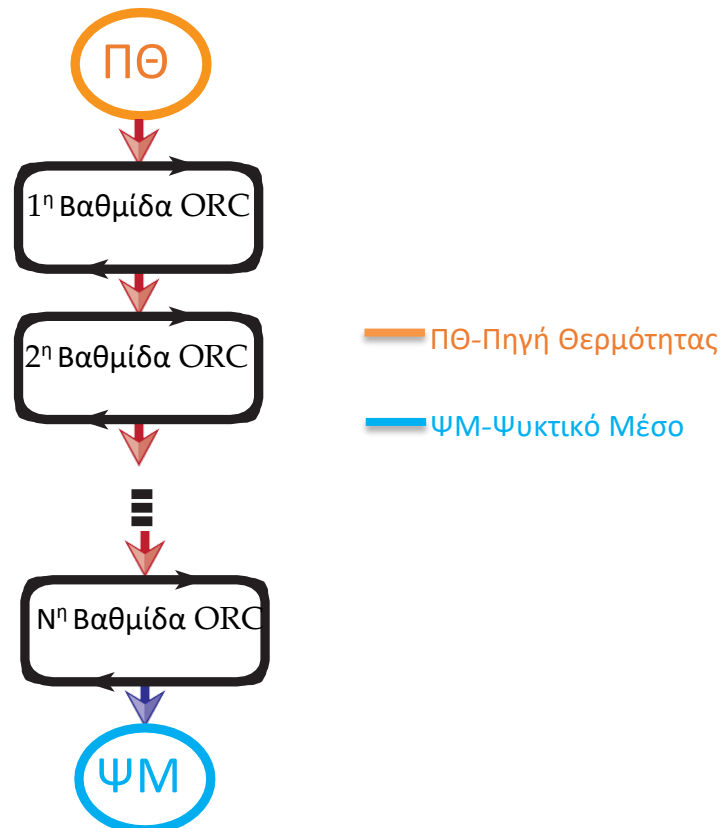
Μια εναλλακτική και ενδιαφέρουσα διαμόρφωση είναι εκείνη του συστήματος διαδοχικών βαθμίδων (cascade system) η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι κάθε μονοβάθμιο σύστημα ORC θα πρέπει να απορρίπτει θερμότητα μέσω του συμπυκνωτή για την ολοκλήρωση και επανέναρξη του κύκλου. Αν επιλεγεί ξανά ο αριθμός $N=2$ για λόγους απλότητας, τότε το διβάθμιο σύστημα διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην **Εικόνα 12**.



Εικόνα 12: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ORC δυο διαδοχικών βαθμίδων [35]

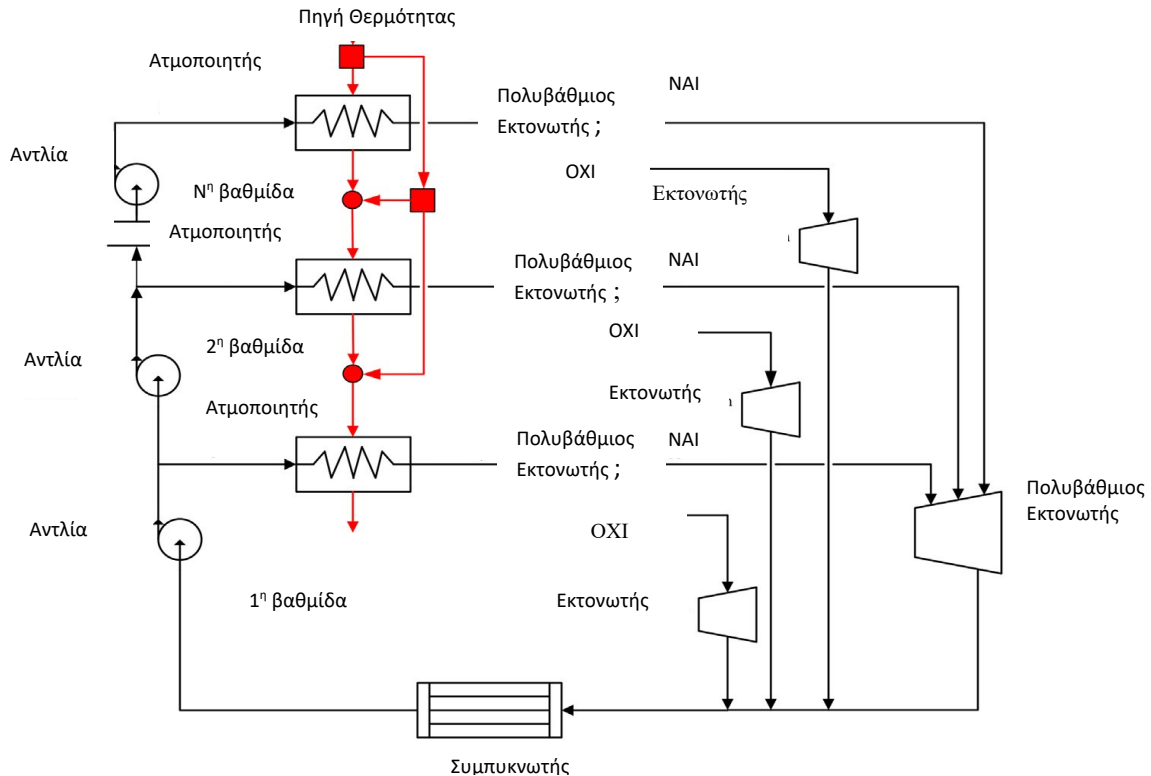
Πηγή: Thierry, 2016

Στο παραπάνω σύστημα δυο διαδοχικών βαθμίδων, υπάρχει ένας κοινός εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται τόσο ως συμπυκνωτής για την άνω βαθμίδα, όσο και ως ατμοποιητής για την κάτω. Αφού πραγματοποιηθεί η παραλαβή θερμότητας από την πηγή στον ατμοποιητή της άνω βαθμίδας και παραχθεί ωφέλιμο έργο, είναι σειρά του ενδιαμέσου εναλλάκτη να απορρίψει την υπόλοιπη θερμότητα της 1ης βαθμίδας στον κύκλωμα του εναλλάκτη της 2ης βαθμίδας, οδηγώντας έτσι στην ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου της κάτω βαθμίδας, το οποίο στη συνέχεια θα οδηγηθεί στον αντίστοιχο εκτονωτή για επιπλέον παραγωγή ισχύος. Η θερμότητα που δεν αξιοποιήθηκε, θα απορριφθεί τελικά στο περιβάλλον μέσω του συμπυκνωτή του 2ου βρόχου, σε κάποιο ψυχρό ρεύμα νερού ή αέρα. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα διαδοχικών βαθμίδων επιτυγχάνει υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης συγκριτικά με ένα μονοβάθμιο, αφού καταφέρνει να παράξει περισσότερη ισχύ ελαχιστοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί έναν εναλλάκτη θερμότητας λιγότερο σε σχέση με το διβάθμιο σύστημα που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η διαδικασία γενικεύεται και για περισσότερες από 2 βαθμίδες (**Εικόνα 13**) με την προϋπόθεση ότι η θερμότητα που απορρίπτεται από κάθε βαθμίδα θα είναι ικανή να ατμοποιήσει το εργαζόμενο μέσο της επόμενης βαθμίδας.



Εικόνα 13: Μεθοδολογία διαδοχικής σύνδεσης N βαθμίδων ατμοποίησης [35]
 Πηγή: Thierry, 2016

Ωστόσο, οι περισσότερες πολυβάθμιες διατάξεις που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία είναι διβάθμιες ή τριβάθμιες και προκύπτουν από την γενική μορφή του παρακάτω (Εικόνα 14) πολυβάθμιου ORC συστήματος:



Εικόνα 14: Γενική μορφή πολυβάθμιου συστήματος ORC [36]

Πηγή: Stijerovic, 2016

Αναλόγως την επιλογή του αριθμού N των βαθμίδων ατμοποίησης, το είδος αλλά και τον αριθμό εκτονωτών που διαθέτει ένα σύστημα (πολυβάθμιος εκτονωτής ή μικρότεροι εκτονωτές), μπορούν να δημιουργηθούν πολλοί συνδυασμοί N -βάθμιων συστημάτων, τα οποία θα περιλαμβάνουν N -ατμοποιητές, N -αντλίες και ένα συμπυκνωτή, ενώ εφικτή είναι και η προσθήκη στοιχείων (εναλλάκτες, δοχεία κλπ) όπως εκείνα που συζητήθηκαν στην παράγραφο 1.2.3. Επειδή όμως οι πολυβάθμιες διατάξεις απαρτίζονται από πολλά στοιχεία τα οποία αυξάνουν τις παραμέτρους λειτουργίας αλλά και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, θα πρέπει κάθε συνδυασμός να μελετάται ξεχωριστά ώστε να αποφασιστεί εάν το κόστος επένδυσης και συντήρησης εξισορροπείται από την βελτίωση απόδοσης που προσφέρει συγκριτικά με ένα συμβατικό ORC.

Αναμφισβήτητα, η υιοθέτηση πολλαπλών βαθμίδων ατμοποίησης αποτελεί τη μέθοδο που παρουσιάζει την μεγαλύτερη προοπτική για βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος ORC [8]. Κυριότερο προτέρημα της αποτελεί η μείωση των αναντιστρεπτοτήτων που δημιουργούνται κατά την διαδικασία πρόσδοσης θερμότητας

από το θερμό ρεύμα της πηγής στο εργαζόμενο μέσο του κύκλου, συνδυαστικά με την πολλαπλή εκμετάλλευση του ενεργειακού περιεχομένου της προσφερόμενης θερμότητας από τους ατμοποιητές της εγκατάστασης. Είναι σαφές ότι, δυο ρευστά που διέρχονται από τον ατμοποιητή, πρέπει να έχουν συγκεκριμένη θερμοκρασιακή διαφορά για να λάβει χώρα η μεταφορά θερμότητας. Η πεπερασμένη διαφορά αυτή, προκαλεί αναπόφευκτα αναντιστρεπτότητες που όμως περιορίζονται χάρη στο καλύτερο <<ταίριασμα>> που δημιουργείται μεταξύ των θερμοκρασιακών προφίλ του εργαζόμενου μέσου, σε όλες τις βαθμίδες ενός ORC, και του ρευστού που μεταφέρει την θερμότητα της πηγής. Μάλιστα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων πίεσης που λειτουργεί το σύστημα ORC, τόσο περισσότερο συγκλίνουν τα προφίλ των συναλλασσόμενων ρευστών στους ατμοποιητές της εγκατάστασης, βελτιώνοντας κατ'αυτό τον τρόπο τον βαθμό αξιοποίησης της πηγής θερμότητας. Έτσι, περισσότερη θερμική ισχύς προσδίδεται συνολικά στον κύκλο με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η καταστροφή της εξέργειας, οδηγώντας στην αύξηση τόσο του θερμικού όσο και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του. Προβάδισμα στην εφαρμογή πολυβάθμιων συστημάτων ORC δίνει και η ευχέρεια για ενεργή βελτιστοποίηση των πολλών παραμέτρων που διαθέτει (πχ πιέσεις ατμοποίησης, βαθμοί υπερθέρμανσης σε κάθε βαθμίδα κλπ) γεγονός που συμβάλλει σε μια αποτελεσματικότερη διαδικασία απορρόφησης της προσφερόμενης θερμότητας, καθώς ο κύκλος προσαρμόζεται ευκολότερα στα εκάστοτε χαρακτηριστικά απελευθέρωσης θερμότητας από την πηγή.

1.4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Μια από τις πρώτες έρευνες σε πολυβάθμια συστήματα ήταν αυτή του Z.Gnutek [37] ο οποίος πραγματοποίησε θερμοδυναμική ανάλυση σε ένα πολυβάθμιο σύστημα ORC για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από θερμοκρασία πηγής 120 °C, χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο το R123 και προτείνοντας μια νέα πολυ-τμηματική μηχανή εκτόνωσης με συρόμενα πτερυγία. Επιλέγοντας την τετραβάθμια ατμοποίηση του διακινούμενου μέσου και βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους λειτουργίας, κατάφερε να μεγιστοποιήσει την παραγόμενη ισχύ αλλά και τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης και παράλληλα να ψύξει το ρευστό που μετέφερε την θερμότητα της πηγής σε θερμοκρασία παραπλήσια με εκείνη του περιβάλλοντος.

Οι Stijerovic, et al. [36] ακολούθησαν μια νέα προσέγγιση για την βελτίωση συστημάτων ORC εισάγοντας μια γενική μορφή πολυβάθμιας διάταξης ORC, την οποία ερεύνησαν με την μέθοδο των σύνθετων καμπυλών εξέργειας. Θεωρώντας μια σχετικά υψηλή θερμοκρασία πηγής θερμότητας (300 °C), εξέτασαν την επίδραση που έχει η προσθήκη επιπλέον βαθμίδων στο μονοβάθμιο σύστημα, σε ότι αφορά τις απώλειες εξέργειας που δημιουργούνται από τις αναντιστρεπτότητες κατά την ατμοποίηση και την συμπύκνωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για χαμηλές ποσότητες θερμότητας οι διβάθμιες διατάξεις έχουν πανομοιότυπη απόδοση με τα απλά συστήματα, ενώ εμφανίζουν σημαντική υπεροχή για υψηλότερες ποσότητες. Επίσης, η τριβάθμια διάταξη δεν εμφανίζει

σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος (μόλις 1.5 %) οδηγώντας στη θεώρηση της διβάθμιας διάταξης ως βέλτιστης για την συγκεκριμένη περίπτωση.

Οι Thierry, et al. [35] παρουσίασαν δυο ειδών πολυβάθμιες διατάξεις ORC: την εν σειρά και την διαδοχική σύνδεση πολλών μονοβάθμιων συστημάτων. Τοποθετώντας τις κατάλληλες μεταβλητές σε ένα αλγεβρικό μοντέλο με στόχο την βελτιστοποίηση λειτουργίας, κατέληξαν ότι για την αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών, οι αποδοτικότερες διαμορφώσεις των πολυβάθμιων διατάξεων είναι οι διβάθμιες, οι οποίες είναι εγγενώς ακριβότερες των μονοβάθμιων. Ωστόσο, με αύξηση της θερμοκρασίας, η απλή μονοβάθμια διάταξη γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική, καθώς η εν σειρά σύνδεση των δυο βαθμίδων είναι οριακά λιγότερο αποδοτική, ενώ η διαδοχική συνδέση απαιτεί την ύπαρξη ενδιάμεσων εναλλακτών που προσαυξάνουν το αρχικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης.

Οι Li, et al. [38] κατασκεύασαν ένα θερμο-οικονομικό μοντέλο ώστε να αναλύσουν την λειτουργία ενός διβάθμιου και ενός μονοβάθμιου ORC συστήματος. Πηγή εκμετάλλευσης ήταν η θερμότητα των καυσαερίων ενός αεριοστροβίλου σε θερμοκρασιακό εύρος 200-300 °C ενώ τα εργαζόμενα μέσα των δυο κύκλων ήταν 6, με κρίσιμες θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 250 °C. Από θερμοδυναμική σκοπιά, απέδειξαν ότι το διβάθμιο ORC είναι ικανότερο στην ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, αφού μπορεί να παράξει περισσότερη ισχύ και να έχει ιδανικότερη εξεργειακή συμπεριφορά σε σχέση με το συμβατικό ORC, παρόλο που ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης του τελευταίου είναι επικρατέστερος. Επίσης, συμπέραναν ότι το θερμοδυναμικό πλεονέκτημα που αποκτά το διβάθμιο σύστημα, τείνει να εξασθενεί με την αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας εισόδου των καυσαερίων, κάνοντας το όφελος από την βαθμίδα χαμηλής πίεσης ολοένα και μικρότερο. Τέλος, από οικονομική σκοπιά, το απλό ORC εμφανίζεται περισσότερο ανταγωνιστικό, ενώ το διβάθμιο δείχνει να έχει προοπτικές βελτίωσης στο άμεσο μέλλον.

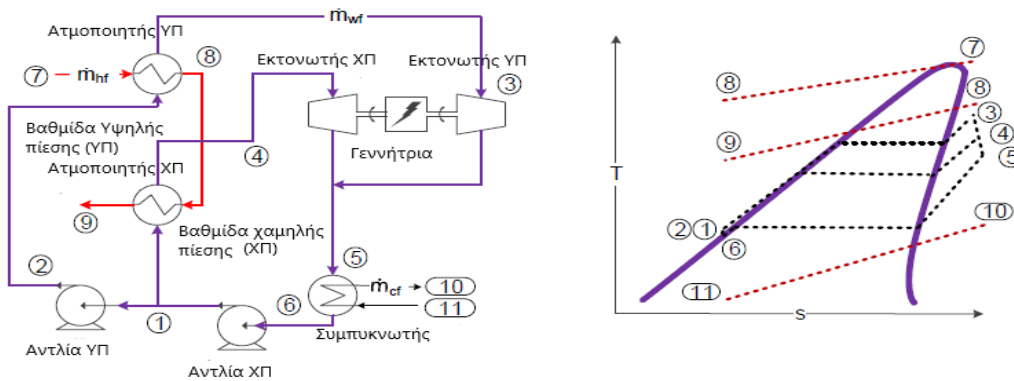
Οι Yu, et al. [39] επιθυμώντας να κατανοήσουν την βελτίωση που επιφέρει η προσθήκη πολλαπλών βαθμίδων ατμοποίησης στη καθαρή παραγόμενη ισχύ ενός μονοβάθμιου ORC, διεξήγαγαν θερμοδυναμική ανάλυση της απόδοσης τριών συστημάτων: ενός μονοβάθμιου, ενός διβάθμιου και ενός τριβάθμιου. Η θερμοκρασία του ρεύματος της γεωθερμικής πηγής επιλέχθηκε στο εύρος 135-200 °C και το εργαζόμενο μέσο ήταν το R245fa κοινό και για τις τρεις διαμορφώσεις. Όπως αναμενόταν, οι πολυβάθμιες διατάξεις είχαν σαφές προβάδισμα στη καθαρή παραγωγή ισχύος, κυρίως για θερμοκρασίες πηγής μικρότερες των 150 °C, ενώ καθοριστική για το αποτέλεσμα αυτό αποδείχθηκε η ρύθμιση παραμέτρων όπως οι πιέσεις ατμοποίησης, οι βαθμοί υπερθέρμανσης και οι ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές των ρευμάτων των εναλλακτών της εκάστοτε πολυβάθμιας εγκατάστασης.

1.5 Διβάθμια συστήματα ORC

1.5.1 Γενικά-Διατάξεις διβάθμιων συστημάτων-Πλεονεκτήματα

Τα διβάθμια συστήματα ORC (Double Stage ORC-DSORC) ή συστήματα ORC με δυο βαθμίδες ατμοποίησης, αποτελούν ειδική περίπτωση της κατηγορίας των πολυβάθμιων συστημάτων και συγκεντρώνουν έντονο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Η γενικευμένη μορφή ενός διβάθμιου συστήματος ORC παρουσιάστηκε στην **Εικόνα 10** της προηγούμενης ενότητας και αποτελείται από δυο διακριτά μονοβάθμια συστήματα που τοποθετούνται σε εν-σειρά σύνδεση μεταξύ τους και εκμεταλλεύονται από κοινού το θερμικό περιεχόμενο του ρεύματος της πηγής θερμότητας. Συνήθως, στη διαμόρφωση αυτή, η βαθμίδα που δέχεται πρώτη το εξωτερικό ρεύμα της πηγής λειτουργεί σε υψηλή πίεση/θερμοκρασία ατμοποίησης ενώ αντίστοιχα εκείνη που έπεται σε χαμηλότερη πίεση/θερμοκρασία.

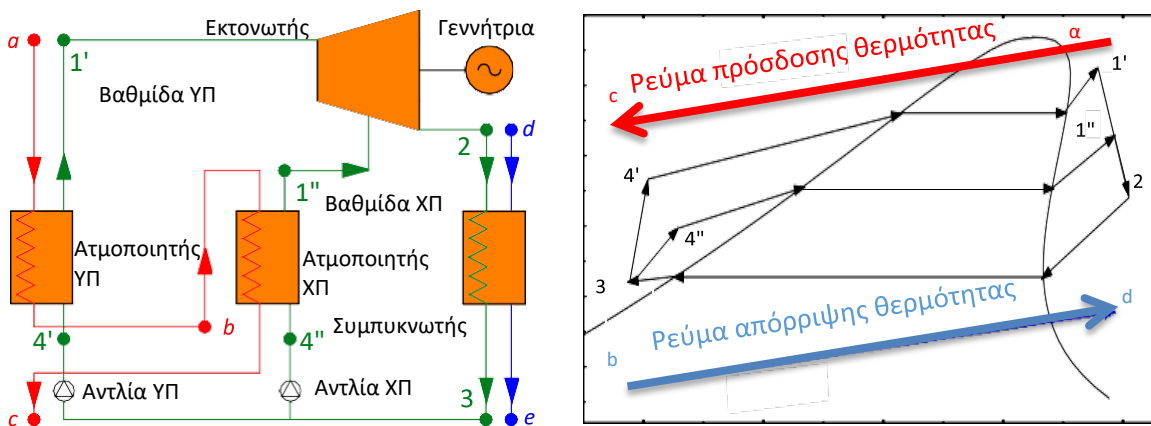
Παρόλο που τα διβάθμια συστήματα εμφανίζουν προοπτικές για βελτίωση της απόδοσης ενός απλού ORC, εντούτοις αυξάνουν σημαντικά το αρχικό κόστος επένδυσης της εγκατάστασης, καθώς απαιτούν, ουσιαστικά, τον διπλασιασμό του εξοπλισμού (εκτονωτής, αντλία, εναλλάκτες κλπ) που περιλαμβάνει το συμβατικό ORC για τον σχηματισμό των δυο πανομοιότυπων βαθμίδων τους. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν γίνει προσπάθειες για τη δημιουργία διβάθμιων συστημάτων με ιδιαίτερες διαμορφώσεις, στις οποίες παραλείπονται ένα ή περισσότερα στοιχεία σε σχέση με την γενικευμένη μορφή της **Εικόνας 10**, υπό τη προϋπόθεση ότι το εργαζόμενο μέσο της εγκατάστασης θα είναι κοινό και για τις δύο βαθμίδες. Μια από τις δημοφιλέστερες διαμορφώσεις είναι και το διβάθμιο-παράλληλο-σύστημα (Parallel Two-Stage Organic Rankine Cycle-PTORC), το οποίο εξοικονομεί την προμήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας καθώς διαθέτει μοναδικό συμπυκνωτή για τη λειτουργία του. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ο διαχωρισμός του διακινούμενου ρευστού σε δύο ρεύματα (ένα σε κάθε βαθμίδα) μετά την συμπίεση του (6→1) από την αντλία ΧΠ. Το 1^ο ρεύμα, δηλαδή αυτό της βαθμίδας ΧΠ, εισέρχεται στον ατμοποιητή ΧΠ (1→4) και έπειτα στον εκτονωτή ΧΠ (4→5) προς παραγωγή μηχανικού έργου. Το 2^ο ρεύμα, αφού συμπιεστεί από την αντλία ΥΠ (1→2), διέρχεται από τα αντίστοιχα στοιχεία της βαθμίδας ΥΠ (2→3 και 3→5). Οι δυο εκτονωτές εκβάλλουν σε μια κοινή ΧΠ, επιτρέποντας κατ'αυτό το τρόπο την ισόθλιπτη ανάμειξη των δυο ρευμάτων και την κοινή τους συμπύκνωση (5→6), οδηγώντας στην επανέναρξη του κύκλου με την είσοδο του εργαζόμενου μέσου στην αντλία ΧΠ. Το σύστημα PTORC με το αντίστοιχο διάγραμμα θερμοκρασία-εντροπίας που το συνοδεύει, βρίσκονται στην **Εικόνα 15**.



Εικόνα 15: Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος ORC (PTORC) και αναπαράσταση μεταβολών εργαζόμενου μέσω εντός του διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [40]

Πηγή: Lecompte, 2015

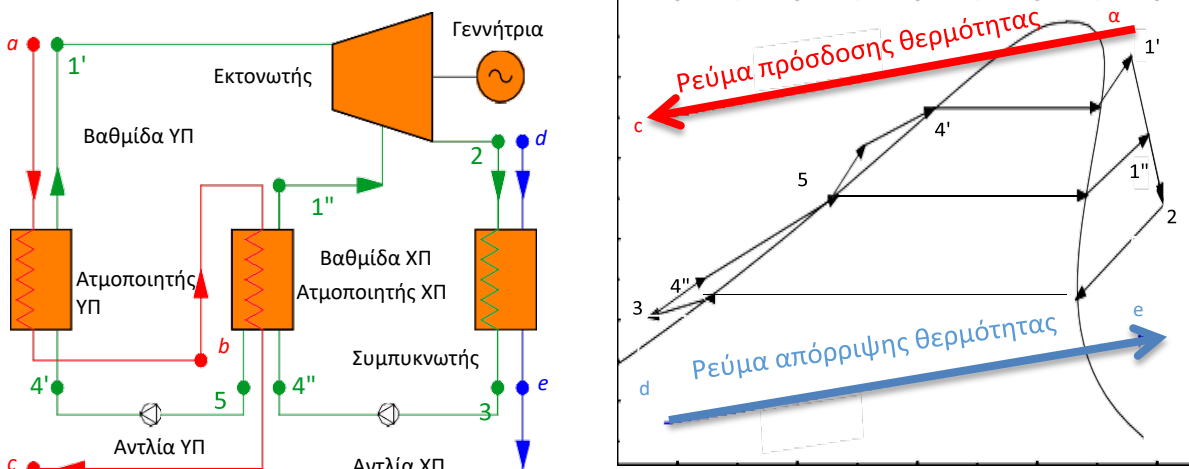
Μια παραλλαγή του PTORC η οποία παρουσιάζεται στην **Εικόνα 16**, προβλέπει την χρήση ενός ενιαίου εκτονωτή, δηλαδή εκτονωτή του οποίου οι βαθμίδες ΥΠ και ΧΠ συνδέονται εν σειρά, αντί της ύπαρξης δυο ξεχωριστών εκτονωτών, έναν για κάθε βαθμίδα. Το 2ο ρεύμα της βαθμίδας ΥΠ, μετά την έξοδο του από τον ατμοποιητή, εισέρχεται στην βαθμίδα ΥΠ του εκτονωτή όπου και εκτονώνεται μέχρι την ΧΠ ατμοποίησης. Το 1ο ρεύμα της βαθμίδας ΧΠ μετά την έξοδο από τον ατμοποιητή, αναμειγνύεται ισόθλιπτα με το 2ο ρεύμα πριν την είσοδο στη βαθμίδα ΧΠ, όπου και εκτονώνεται η συνολική παροχή του εργαζόμενου μέσου έως ότου φτάσει στη πίεση συμπύκνωσης.



Εικόνα 16: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος με επαγωγικό στρόβιλο (β) Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) των μεταβολών του εργαζόμενου μέσου στο διβάθμιο-παράλληλο-σύστημα [41]

Πηγή: Li, 2015

Τέλος, μια από τις συχνότερα μελετούμενες διαμορφώσεις συστημάτων διπλής ατμοποίησης είναι και το διβάθμιο-εν σειρά-σύστημα (Series Two-Stage Organic Rankine Cycle-STORC), το οποίο αποτελεί μια ενισχυτική διαμόρφωση του PTORC, καθώς περιλαμβάνει έναν επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος προθερμαίνει το διακινούμενο μέσο λίγο πριν τον διαχωρισμό του στα επιμέρους ρεύματα των δυο βαθμίδων. Το προτέρημα της διάταξης αυτής, βασίζεται στην ικανότητα του προθερμαντήρα να αξιοποιεί μέρος της θερμότητας χαμηλότερου θερμοκρασιακού επιπέδου, στην προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου και ιδιαίτερα του ρεύματος της υψηλότερης βαθμίδας, εν αντιθέσει με το PTORC, όπου οι δυο ατμοποιητές αναλαμβάνουν εξ'ολοκλήρου τη προθέρμανση και ατμοποίηση των ρευμάτων των δυο βρόχων. Το μονογραμμικό διάγραμμα ενός STORC μαζί με το διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας αποτυπώνονται στην **Εικόνα 17**.



Εικόνα 17: Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-εν σειρά-συστήματος (STORC) με ενιαίο εκτονωτή (β): Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) των μεταβολών του εργαζόμενου μέσου στο διβάθμιο-εν σειρά-σύστημα [41]

Πηγή: Li, 2016

Σε ένα απλό ORC, οι εξεργειακές απώλειες που δημιουργούνται κατά την μεταφορά θερμότητας των δυο ρευμάτων του ατμοποιητή, είναι υψηλότερες από κάθε άλλη διεργασία καθώς μπορούν να υπερβούν και το 40% των συνολικών εξεργειακών απωλειών του συστήματος [7, 42, 43]. Ο περιορισμός που θέτει η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά (PP-Pinch Point) των δυο ρευμάτων όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά του εργαζόμενου μέσου κατά την ισόθλιπτη πρόσδοση θερμότητας, δημιουργούν συνθήκες κακού <<ταιριάσματος>> μεταξύ των δυο θερμοκρασιακών προφίλ του ατμοποιητή, οδηγώντας σε καταστροφή της εξέργειας. Στην **Εικόνα 18 (α)** αποτυπώνονται τα θερμοκρασιακά προφίλ των δυο ρευμάτων του ατμοποιητή ενός μονοβάθμιου συστήματος συναρτήσει του ποσού θερμότητας που μεταφέρθηκε στον κύκλο (Q-T). Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μειωθούν οι εξεργειακές απώλειες κατά την διαδικασία απορρόφησης θερμότητας του εργαζόμενου μέσου από την πηγή

προκειμένου να βελτιωθεί ο βαθμός αξιοποίησης της και να αυξηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Προς αυτή την κατεύθυνση βρίσκονται και τα διβάθμια ORC, καθώς με την προσθήκη νέας βαθμίδας, εν γένει, μειώνουν την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δυο ρευμάτων του ατμοποιητή οδηγώντας σε καλύτερο <<ταίριασμα>> των θερμοκρασιακών προφίλ των δυο ρευστών, δηλαδή εκείνου που μεταφέρει και εκείνου που παραλαμβάνει τη θερμότητα. Με την εισαγωγή ενός νέου ατμοποιητή, μια νέα ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά γεννιέται, αναιρώντας εν μέρη τους περιορισμούς της παλιάς, ενώ όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 18 (β)**, τα προφίλ των δύο ρευμάτων θα συγκλίνουν περισσότερο μεταξύ τους σε σχέση με τα αντίστοιχα προφίλ της μονοβάθμιας διάταξης, με αποτέλεσμα περισσότερη θερμότητα να γίνεται εκμεταλλεύσιμη για παραγωγή έργου. Συγκριτικά με τον μονοβάθμιο ORC, το διβάθμιο σύστημα έχει σημαντικά περισσότερες παραμέτρους προς βελτιστοποίηση (πιέσεις, παροχές, βαθμοί υπερθέρμανσης, ελάχιστες θερμοκρασιακές διαφορές κλπ) που του επιτρέπουν να προσαρμόζεται καταλληλότερα στα εκάστοτε χαρακτηριστικά απελευθέρωσης θερμότητας του θερμού ρεύματος της πηγής.



Εικόνα 18: Ποιοτικό διάγραμμα θερμοκρασιακών προφίλ εργαζόμενου μέσου και ρεύματος της πηγής θερμότητας συναρτήσει του ποσού θερμότητας που μεταφέρθηκε στον κύκλο (α) ενός μονοβάθμιου ORC συστήματος και (β) ενός διβάθμιου ORC συστήματος [44]

Πηγή: Manente, 2017

1.5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι τριβάθμιες και πολυβάθμιες διατάξεις μπορούν να επιτύχουν περαιτέρω αύξηση του βαθμού μετατροπής της προσφερόμενης θερμότητας σε ισχύ, μειώνοντας ακόμα περισσότερο της θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εργαζόμενου μέσου και του ρευστού της πηγής [36, 45]. Όμως η προσθήκη πολλαπλών επιπέδων πίεσης ουσιαστικά βελτιώνει μόνο την διαδικασία απορρόφησης θερμότητας από την πηγή χωρίς να ελαττώνει τις αναντιστρεπτές απώλειες άλλων διεργασιών, όπως αυτές της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του μέσου σε ένα ψυχρό ρεύμα. Επίσης, η υιοθέτηση τους καθίσταται σχεδόν απαγορευτική, εφόσον απαιτείται η εισαγωγή πολλών επιπλέον στοιχείων (αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας, εκτονωτές κλπ) που αυξάνουν το συνολικό κόστος, την δυσκολία προμήθειας και τοποθέτησης, όπως επίσης και τη πολυπλοκότητα λειτουργίας, τη δυσκολία χειρισμού, ελέγχου και συντήρησης της εγκατάστασης. Έτσι, η πλειοψηφία των ερευνών που αφορούν τα πολυβάθμια συστήματα, εστιάζουν κυρίως στη μελέτη διβάθμιων διατάξεων με ή χωρίς την προσθήκη επιπλέον στοιχείων (πχ εναλλάκτες, δοχεία κλπ), μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

Οι Xi, et al. [46] χρησιμοποιώντας την μέθοδο γενετικού αλγορίθμου για την βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων, ερεύνησαν τη θερμοδυναμική απόδοση τριών συστημάτων ORC: ενός απλού μονοβάθμιου, ενός μονοβάθμιου με αναγεννητική προθέρμανση και ενός διβάθμιου με αναγεννητική προθέρμανση. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας και με την εφαρμογή 6 διαφορετικών οργανικών ουσιών ως εργαζόμενα μέσα, το διβάθμιο σύστημα με αναγεννητική προθέρμανση εμφανίστηκε ως επικρατέστερο από τη σκοπιά του 1^{ου} και του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου. Ενδεικτικά, το διβάθμιο αναγεννητικό σύστημα, το μονοβάθμιο αναγεννητικό και το απλό μονοβάθμιο σημείωσαν εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης 56.87 %, 55.01 % και 50.61 % αντιστοίχως, χρησιμοποιώντας το ρευστό R11, ενώ επιβεβαιώθηκε και η καταλληλότητα των αναγεννητικών συστημάτων στην εκμετάλλευση πηγών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι δυο διατάξεις με αναγεννητική προθέρμανση απαιτούν μικρότερα θερμικά φορτία τόσο κατά την ατμοποίηση όσο και κατά τη συμπύκνωση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη κατασκευή μικρότερων επιφανειών των εναλλακτών θερμότητας και στην συνεπακόλουθη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης των διατάξεων αυτών.

Οι Braimakis and Karellas [47] αναλύοντας της γενικευμένη μορφή ενός διβάθμιου συστήματος, επέλεξαν 7 διαφορετικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα και δημιούργησαν ποικιλία συνδυασμών στις βαθμίδες υψηλής και χαμηλής πίεσης, αξιοποιώντας θερμοκρασίες πηγής στο εύρος 100-300 °C. Αναζητώντας τις αρχές που διέπουν την βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων, αναγνώρισαν τα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής, ιδιαίτερα όταν η πηγή θερμότητας είναι πολύ χαμηλότερη των κρίσιμων θερμοκρασιών των εργαζόμενων ρευστών της κάθε βαθμίδας ή όταν βρίσκεται σε ένα

ορισμένο εύρος ανάμεσα τους. Στην 1^η περίπτωση μάλιστα, το εξεργειακό όφελος έφτανε μέχρι και το 25 % σε σχέση με τον βασικό κύκλο. Ωστόσο δεν απέκλεισαν το ενδεχόμενο η απόδοση του 2^{ου} θερμοδυναμικού νόμου ενός μονοβάθμιου συστήματος να φτάνει σε υψηλότερα επίπεδα από εκείνα ενός διβάθμιου, για διαφορετική θεώρηση οργανικών ουσιών ως εργαζόμενα μέσα.

Οι Manente, et al. [44] επιθυμώντας να εξερευνήσουν σε βάθος τις δυνατότητες των διβάθμιων συστημάτων, επέλεξαν ένα σύστημα PTORC προκειμένου να πραγματοποιήσουν σύγκριση του με το απλό μονοβάθμιο. Για εύρος θερμοκρασιών πηγής 100-200 °C και πληθώρα οργανικών ουσιών ως εργαζόμενα μέσα, η αποτίμηση τόσο του θερμικού όσο και του βαθμού αξιοποίησης της πηγής στην απόδοση των δυο συστημάτων, τους οδήγησε στα εξής χρήσιμα συμπεράσματα: Το όφελος που προκύπτει από τη λειτουργία της διβάθμιας διάταξης είναι αμελητέο, όταν η κρίσιμη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου είναι περίπου 40 °C μικρότερη της θερμοκρασίας εισόδου του θερμού ρεύματος της πηγής, ενώ αντιθέτως, όταν οι δυο προαναφερθείσες θερμοκρασίες λαμβάνουν παρόμοιες τιμές ή όταν η κρίσιμη θερμοκρασία του μέσου είναι υψηλότερη, το κέρδος στην απόδοση του συστήματος και της παραγόμενης ισχύος είναι της τάξεως του 20 %.

Οι Li, et al. [48] πρότειναν ένα σύστημα STORC το οποίο τροφοδοτείται ταυτοχρόνως από δύο θερμά ρεύματα: ένα υψηλότερης θερμοκρασίας προερχόμενο από πηγή ηλιακής ενέργειας και ένα χαμηλότερης προερχόμενο από γεωθερμία. Σκοπός ήταν η σύγκριση του με την συνηθέστερη περίπτωση, δηλαδή εκείνη όπου το διβάθμιο σύστημα στηρίζεται σε μοναδική αξιοποιήσιμη πηγή για την λειτουργία του. Με βάση τις εκτιμήσεις τους, το σύστημα διπλής πηγής παράγει περισσότερη καθαρή ισχύ για θερμοκρασίες πηγών θερμότητας χαμηλότερες των 140 °C, με την μέγιστη αύξηση να φτάνει το 27 %, όταν οι θερμοκρασίες των θερμών ρευμάτων ρυθμίζονται στους 110 °C. Ωστόσο, η σταδιακή αύξηση των θερμοκρασιών των δυο πηγών, προκάλεσε σχετική μείωση της βελτίωσης της απόδοσης που εμφανίζει το σύστημα, καθιστώντας το καταλληλότερο για μικρά έως μεσαία θερμοκρασιακά πεδία εκμετάλλευσης.

Οι Li, et al. [41] επιθυμώντας να ελαχιστοποιήσουν τις εξεργειακές απώλειες, κυρίως αυτές του ατμοποιητή, εισήγαγαν δυο διβάθμια συστήματα, ένα PTORC και ένα STORC, ώστε να αξιολογήσουν την απόδοση και να επισημάνουν τις διαφορές μεταξύ τους. Με εργαζόμενο μέσο το R245fa, τις χαμηλότερες εξεργειακές απώλειες κατέγραψε το STORC με μέση μείωση 9.1 % ενώ το PTORC εμφάνισε μέση μείωση 4.5 % αναφορικά με τις απώλειες ενός συμβατικού μονοβάθμιου ORC. Παρόλο που και οι δυο διατάξεις είναι ικανές να αυξήσουν την καθαρή παραγόμενη ισχύ ενός τυπικού ORC, εντούτοις ανταποκρίνονται διαφορετικά στις μεταβολές της θερμοκρασίας του θερμού ρεύματος της γεωθερμικής πηγής που αναλύεται στην προκειμένη περίπτωση. Ειδικότερα, για το PTORC, αύξηση της αρχικής θερμοκρασίας εισόδου του θερμού ρεύματος της πηγής οδηγεί σε ανάλογη επιδείνωση του <<ταιριάσματος>> των θερμοκρασιακών προφίλ των

ρευμάτων του ατμοποιητή ΥΠ, με άμεσο αντίκτυπο στην παραγόμενη ισχύ, ενώ αντιθέτως, το STORC ευνοείται με ανάλογη μείωση των εξεργειακών απωλειών από την αλλαγή αυτή, επιτυγχάνοντας εξαιρετική συστηματική απόδοση.

1.6 Συνδυασμός ζεοτροπικών ORC με συστήματα δυο βαθμίδων

1.6.1 Γενικά

Στα πλαίσια της συνεχούς αναζήτησης τρόπων βελτιστοποίησης συστημάτων ORC ήταν και η ανάπτυξη μιας καινοτόμας ιδέας η οποία θα μεγιστοποιεί τον ζητούμενο βαθμό μετατροπής της προσφερόμενης θερμότητας σε ισχύ, μέσω της συνέλιξης των πλεονεκτημάτων των διβάθμιων συστημάτων ατμοποίησης με εκείνα των μη-αζεοτροπικών μειγμάτων. Η εφαρμογή της ιδέας αυτής οδηγεί στη λειτουργία μιας διβάθμιας διάταξης διαρρεόμενης από ζεοτροπικά μείγματα με σημαντική προοπτική ενίσχυσης της ενεργειακής και εξεργειακής απόδοσης συγκριτικά με τα διβάθμια συστήματα καθαρών ουσιών ή τα μονοβάθμια ζεοτροπικών μειγμάτων. Στον **Πίνακα 3** συνοψίζονται τα αναμενόμενα οφέλη από την χρήση διβάθμιων ζεοτροπικών συστημάτων ORC (Double Stage ORC with Zeotropic mixtures- DS-ZORC) ως άθροισμα των επιμέρους πλεονεκτημάτων που επιφέρουν τόσο η διβάθμια ατμοποίηση όσο και η εισαγωγή ζεοτροπικών μειγμάτων σε ένα συμβατικό ORC, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες.

Πίνακας 3: Σύνοψη πλεονεκτημάτων από την εφαρμογή διβάθμιων συστημάτων και τη χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων και προσδοκόμενα οφέλη από τη λειτουργία διβάθμιων ζεοτροπικών συστημάτων.

Διβάθμια συστήματα	Ζεοτροπικά μείγματα	Διβάθμια ζεοτροπικά συστήματα
Μείωση εξεργειακών απωλειών κατά την διαδικασία απορρόφησης θερμότητας του εργαζόμενου μέσου από τη πηγή	Μείωση των εξεργειακών απωλειών κατά την διαδικασία απορρόφησης θερμότητας του εργαζόμενου από τη πηγή	Σημαντική μείωση των εξεργειακών απωλειών του συστήματος ως αποτέλεσμα των μειώσεων των αναντιστρεπτών απωλειών κατά τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας από και προς το εργαζόμενο μέσο
Βελτιωμένη προσαρμοστικότητα σε ποικιλία πηγών θερμότητας	Μείωση των εξεργειακών απωλειών κατά τη διαδικασία απόρριψης θερμότητας του εργαζόμενου μέσου στο ψυχρό ρεύμα	Βελτιωμένη προσαρμοστικότητα σε ποικιλία πηγών θερμότητας
	Ευκολότερη επίτευξη των ζητούμενων θερμοφυσικών ιδιοτήτων και τήρηση των περιβαλλοντικών προτύπων και κανόνων ασφαλείας	Ευκολότερη επίτευξη των ζητούμενων θερμοφυσικών ιδιοτήτων και τήρηση των περιβαλλοντικών προτύπων και κανόνων ασφαλείας

1.6.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Sadeghi, et al. [49] μελέτησαν 10 ζεοτροπικά μείγματα (R402A, R404A, R407A, R410A, R422A, R438A, R402B, R403B, R422D, R22M) και μια καθαρή ουσία (R245fa) σε ένα σύστημα SORC, ένα PTORC και ένα STORC. Σκοπός ήταν η αξιοποίηση θερμού ρεύματος γεωθερμίας για ηλεκτροπαραγωγή και σύγκριση των τριών διατάξεων μεταξύ τους με κριτήρια την καθαρή παραγόμενη ισχύ και την εξεργειακή απόδοση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καθαρή παραγόμενη ισχύς του απλού ORC είναι μικρότερη από αυτή των

διβάθμιων συστημάτων για όλα τα εργαζόμενα μέσα, ενώ η χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων προκάλεσε αύξηση μέχρι 27.76 % στο SORC, 24.98 % στο PTORC και 24.79 % στο STORC, έχοντας ως αναφορά την λειτουργία τους με το ρευστό R245fa. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις, το STORC παρουσίασε την υψηλότερη εξεργειακή απόδοση ενώ το PTORC την χαμηλότερη, παρόλο που η ισχύς της τελευταίας υπερβαίνει αυτή του απλού κύκλου, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο εξεργειακό κέρδος που έχει η διβάθμια από την δεξαμενή θερμότητας.

Οι Li, et al. [50] έχοντας στόχο να διερευνήσουν την επίδραση της πηγής θερμότητας και των διαφορετικών συστάσεων ζεοτροπικού μείγματος στην θερμοδυναμική απόδοση και τις παραμέτρους λειτουργίας συστημάτων ORC, ασχολήθηκαν με διβάθμια διάταξη διαρρεόμενη από μείγμα ισοβουτανίου/ισοπεντανίου. Συγκεκριμένα, για εύρος θερμοκρασίας πηγής 100-200 °C, επέλεξαν 11 διαφορετικές κατά μάζα συγκεντρώσεις (συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων χρήσης καθαρού ισοπεντανίου και ισοβουτανίου) και εξήγαγαν σημαντικά συμπεράσματα τόσο για τον διβάθμιο όσο και για τον απλό κύκλο. Η καθαρή παραγόμενη ισχύς της διβάθμια διάταξης με μείγμα ισοβουτανίου/ισοπεντανίου φάνέρωσε αύξηση μέχρι και 11.9 % ή 15.2 % σε σχέση με την λειτουργία της υπό καθαρό ισοβουτάνιο ή ισοπεντάνιο και προβάδισμα που φτάνει το 25.7 % συγκριτικά με την ισχύ του απλού ζεοτροπικού κύκλου. Παρατήρησαν επίσης, πως η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μειούμενη αύξηση στη καθαρή παραγόμενη ισχύ του ζεοτροπικού διβάθμιου κύκλου και ότι τα μείγματα υψηλότερων κρίσιμων σημείων είναι ευνοικότερα τόσο για εφαρμογή σε μεγάλα εύρη θερμοκρασιών πηγής, όσο και στη μετατροπή περισσότερης προσφερόμενης θερμότητας σε παραγόμενο έργο.

Σε συνέχεια της πρηγούμενης έρευνας, Οι Li, et al. [51] ανέλυσαν την εξεργειακή συμπεριφορά του ίδιου διβάθμιου συστήματος ORC, προκειμένου να αναδείξουν την υπεροχή του σε σχέση με το απλό σύστημα ORC. Για πηγή θερμότητας 100-200 °C, απέδειξαν ότι το διβάθμιο σύστημα με ζεοτροπικό μείγμα ως εργαζόμενο μέσο, μεγιστοποιεί την εξεργειακή απόδοση του για θερμοκρασίες πηγής θερμότητας χαμηλότερες των 180 °C και έχει μέγιστη εξεργειακή αύξηση 11.6 % , 15.4 % και 25.6 % συγκριτικά με διβάθμιο σύστημα ισοβουτανίου, διβάθμιο σύστημα ισοπεντανίου και μονοβάθμιο ζεοτροπικού μείγματος αντίστοιχα. Ακόμη, διαπίστωσαν πως οι μεγαλύτερες αναντιστρεπτές απώλειες λαμβάνουν χώρα κατά την απορρόφηση θερμότητας σε εύρος θερμοκρασιών 100-160 °C, κατά την εκτόνωση για εύρος 160-170 °C και κατά την απόρριψη θερμότητας για εύρος 180-200 °C.

Οι Li, et al. [52] επιθυμώντας να μεγιστοποιήσουν την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια ενός αεριοστροβίλου, αντιπαραθέτουν τις αποδοτικότερες συνθήκες λειτουργίας ενός SORC με εκείνες ενός STORC. Τα εξεταζόμενα ρευστά ήταν καθαρές ουσίες αλκανίων συνδυασμένες με την ουσία R245fa σε κατά μάζα συγκεντρώσεις από 0 έως 1. Η βέλτιστη απόδοση της απλής διάταξης εμφανίζεται με εργαζόμενο μέσο την ουσία R245fa, με την καθαρή παραγόμενη ισχύ να

φτάνει τα 52.56 kW, ενώ η βέλτιστη απόδοση μεταξύ των μη-αζεοτροπικών μειγμάτων εμφανίζεται στον συνδυασμό κυκλοεξανίου/R245fa με αναλογία 0.8 (η αναλογία 1 συμπίπτει με τη χρήση καθαρού κυκλοεξανίου) με τη παραγόμενη ισχύ, τον θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης να παίρνουν τις τιμές 44.57 kW, 26.8 % και 67.12 % αντιστοίχως. Ο προηγούμενος συνδυασμός στην ίδια αναλογία μεγιστοποιεί και το όφελος της διβάθμιας διάταξης η οποία καταγράφει καθαρή παραγόμενη ισχύ, θερμικό και εξεργειακό βαθμό απόδοσης 70.97 kW, 27.43 % και 83.98 % αντίστοιχα.

Οι Luo, et al. [53] πρότειναν μια πρωτοποριακή ιδέα που αφορά την λειτουργία διβάθμιου ζεοτροπικού συστήματος ORC με συμπυκνωτή διαχωρισμού υγρής και αέριας φάσης, ώστε να ελέγχει και να προσαρμόζει κατάλληλα το υγρό κλάσμα και άρα την σύσταση και την παροχή του εργαζόμενου μέσου κατά την ατμοποίηση, και να επιτυγχάνει βελτιωμένη θερμοοικονομική απόδοση σε σχέση με τον απλό ζεοτροπικό και τον διβάθμιο ζεοτροπικό κύκλο. Αναλυτικότερα, δοκίμασαν 6 δυαδικούς συνδυασμούς ρευστών με διαφορετική συγκέντρωση στον καθένα και διαπίστωσαν πως η καθαρή παραγόμενη ισχύς της διβάθμιας ζεοτροπικής διάταξης με συμβατικό συμπυκνωτή είναι 10.69-25.27 % υψηλότερη από εκείνη ενός απλού ζεοτροπικού συστήματος, ενώ η νέα διάταξη με συμπυκνωτή διαχωρισμού επιτύγχανει 13.05-26.18 % αύξηση στην ίδια σύγκριση. Επιπροσθέτως, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για όλες τις περιπτώσεις λαβάνει τις υψηλότερες τιμές του στην σύστημα με διαχωριστή εφόσον οι συνολικές αναντιστρεπτές απώλειες κατά την συμπύκνωση και την ατμοποίηση ελαχιστοποιούνται, χάρη στη καινούργια δυνατότητα τροποποίησης των συγκεντρώσεων των επιμέρους ρευστών των ζεοτροπικών μειγμάτων.

1.7 Σκοπός της παρούσας εργασίας

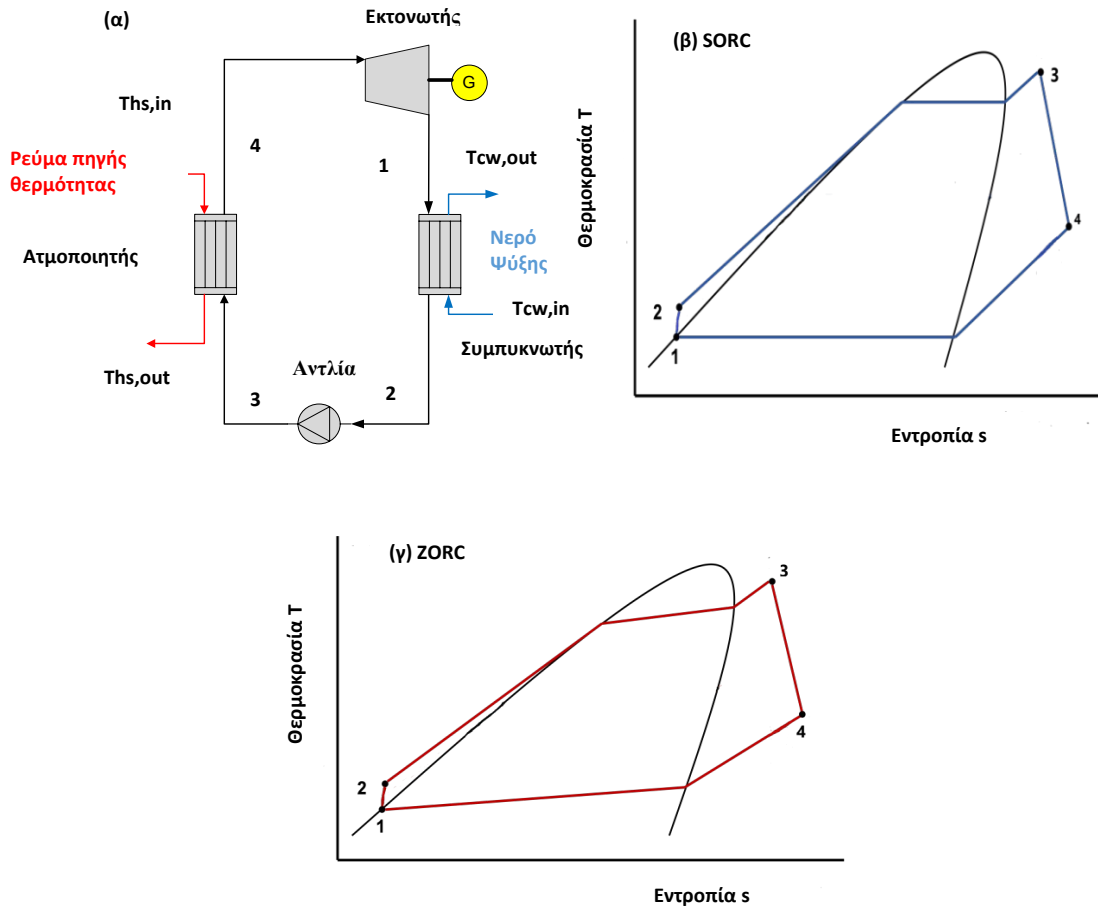
Λόγω της επιτακτικής ανάγκης για παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση, κοινή τάση της εποχής είναι η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και η στροφή σε αντισυμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Μεταξύ άλλων, η τεχνολογία ORC προτείνεται ως μια εναλλακτική λύση με βασικά της προτερήματα την απλότητα, την αξιοπιστία και την ευελιξία που παρέχει, ενώ στα κυριότερα μειονέκτηματά της εντάσσονται η ανεπάρκεια της να εκμεταλλευτεί σε μεγάλο βαθμό τις διαθέσιμες ενεργειακές πηγές, ιδιαίτερα όταν υλοποιείται στην βασική της μορφή, αλλά και οι περιβαλλοντικές πτυχές και τα ζητήματα ασφαλείας που ανακύπτουν από την χρήση οργανικών ουσιών. Ωστόσο, μια από τις πολλές διαμορφώσεις του διβάθμιου ζεοτροπικού κύκλου που παρουσιάζεται, έρχεται να εξαλείψει τα δυο αυτά εμπόδια και να προσφέρει ανταγωνιστική και ασφαλή ηλεκτροπαραγωγή συγκριτικά με τις συνήθεις πρακτικές. Παρόλο που η ιδέα της διβάθμιας ζεοτροπικής διάταξης είναι σχετικά διαδεδομένη, εντούτοις οι βιβλιογραφικές αναφορές είναι σπάνιες και με ευρήματα που αφορούν είτε μία από τις υπάρχουσες διαμορφώσεις είτε συγκεκριμένα ρευστά και συνθήκες λειτουργίας. Η εργασία αυτή έχει σκοπό να εμπλουτίσει τις διαθέσιμες πληροφορίες, να αποτελέσει αρωγό στην

βαθύτερη κατανόηση των διβάθμιων ζεοτροπικών συστημάτων ORC και να δώσει ερέθισμα στους αναγνώστες για περαιτέρω διερεύνηση. Ειδικότερα, παρατίθεται μια εκτενής ανάλυση με στόχο την ενεργειακή και εξεργειακή βελτιστοποίηση ενός διβάθμιου συστήματος το οποίο διαρρέεται από 15 συνδυασμούς 6 καθαρών ουσιών (Προπάνιο, Βουτάνιο, Πεντάνιο, Κυκλοπεντάνιο, Ισοβουτάνιο, Διοξείδιο του άνθρακα) σε 11 γραμμομοριακές αναλογίες για τον καθένα. Η αρχική επιλογή των καθαρών ουσιών έγινε με κριτήριο την προοπτική που παρέχουν να επιτύχουν τον προαναφερθέν στόχο με βάση τις ιδιότητες τους καθώς και τη συμμόρφωση στα τωρινά και μελλοντικά περιβαλλοντικά πρότυπα. Οι πηγές θερμότητας που προσδίδουν ενέργεια στο σύστημα ORC είναι ανεξάρτητες του είδους εφαρμογής (πχ γεωθερμία, ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας κλπ) και είναι θερμοκρασίας 100, 120, 140 και 160 °C. Αφού υπολογιστούν οι βέλτιστες παράμετροι με τη βοήθεια κατάλληλης προσομοίωσης, ακολουθεί η σύγκριση της απόδοσης του διβάθμιου ζεοτροπικού ORC (DS-ZORC) με άλλες διατάξεις, όπως εκείνες του αντίστοιχου διβάθμιου συστήματος με καθαρές ουσίες (DSORC), του απλού μονοβάθμιου με μείγματα (ZORC) αλλά και του απλού μονοβάθμιου με καθαρές ουσίες (SORC), ώστε να εξαχθούν γενικότερα συμπεράσματα αναφορικά με την μελετώμενη διάταξη.

2. Μοντελοποίηση και μεθοδολογία βελτιστοποίησης

2.1 Παρουσίαση μελετούμενων διαμορφώσεων ORC

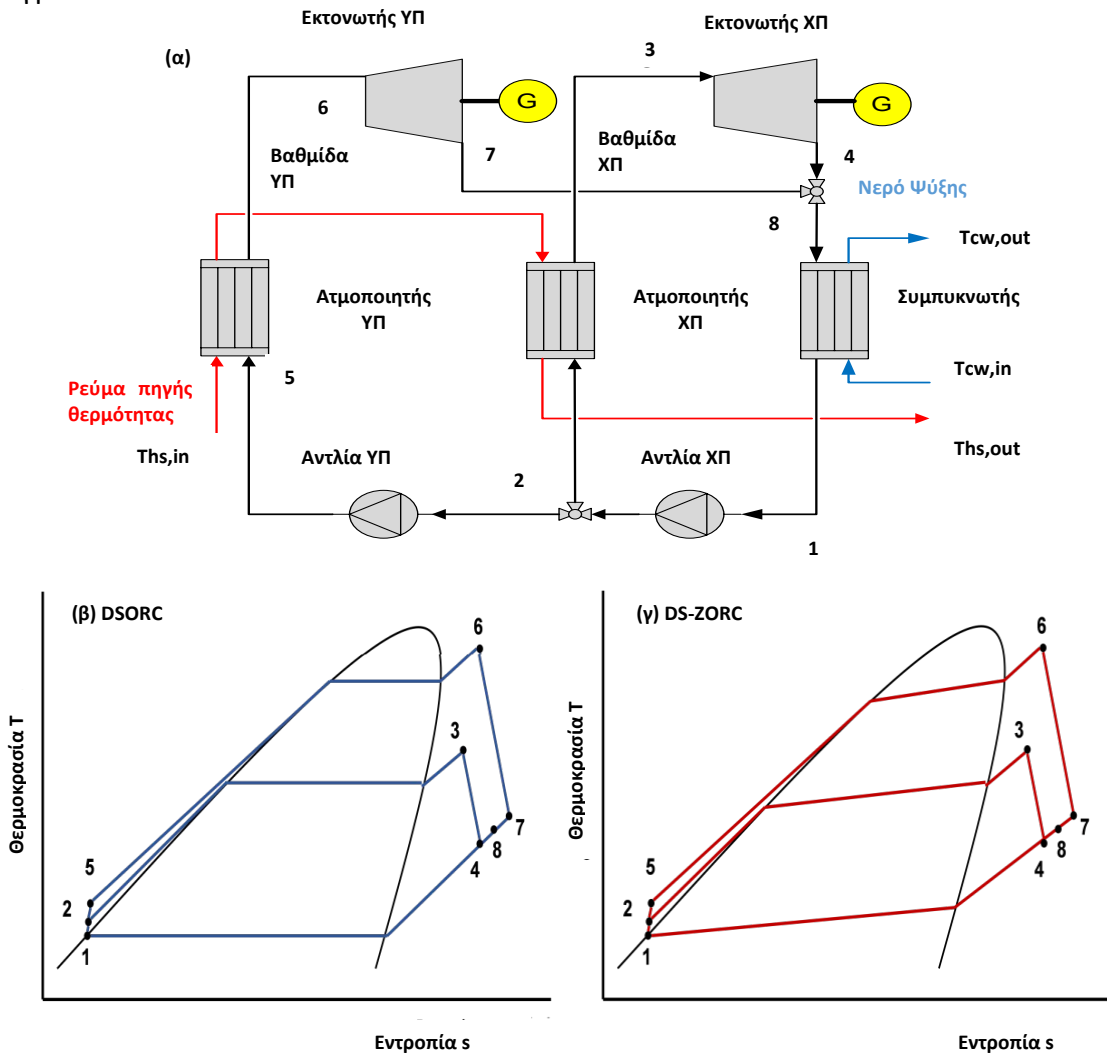
Το πρώτο από τα συστήματα που θα αποτελέσει αντικείμενο αναφοράς της παρούσας εργασίας είναι το απλό μονοβάθμιο ORC διαρρεόμενο είτε από καθαρές οργανικές ουσίες (SORC), είτε από ζεοτροπικά μείγματα (ZORC) ως αποτέλεσμα της ανάμειξης των ενώσεων αυτών, σε υποκρίσιμες συνθήκες λειτουργίας. Όπως φαίνεται και από το μονογραμμικό διάγραμμα (**Εικόνα 19**) ο βασικός κύκλος απαρτίζεται από τα εξής 4 στοιχεία: Την αντλία, τον ατμοποιητή, τον εκτονωτή και τον συμπυκνωτή. Αρχικά, το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται στην αντλία (1→2) και έπειτα προθερμαίνεται, ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται (2→3) από το ρεύμα της πηγής θερμότητας εντός του ατμοποιητή. Στην συνέχεια, ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται (3→4) προς παραγωγή μηχανικής ισχύος η οποία θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια μιας γεννήτριας. Τέλος, το ρευστό του κύκλου εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου και ψύχεται (4→1) από κατάλληλο ρεύμα νερού έως ότου φτάσει σε κατάσταση κορεσμένου υγρού όπου και θα είναι έτοιμο να εισέλθει ξανά στην αντλία για την επανεκκίνηση του κύκλου. Η ουσιαστική διαφορά των δυο περιπτώσεων εργαζόμενων μέσων, όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας της **Εικόνας 19**, αφορά την ιδιότητα της θερμοκρασιακής ολίσθησης που διαθέτουν τα ζεοτροπικά μείγματα, η οποία οδηγεί στην πραγματοποίηση μη ισόθλιπτων διεργασιών αλλαγής φάσης, εν αντιθέσει με τις οργανικές ενώσεις, όπου οι διαδικασίες της ατμοποίησης και συμπύκνωσης γίνονται εξ'ολοκλήρου υπό σταθερή πίεση.



Εικόνα 19: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα απλού μονοβάθμιου ORC (β) Μεταβολές καθαρής οργανικής ουσίας εντός του μονοβάθμιου συστήματος (SORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) (γ) Μεταβολές ζεοτροπικού μείγματος εντός του μονοβάθμιου συστήματος (ZORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s).

Το δεύτερο από τα συστήματα που αναφέρεται, είναι αυτό στο οποίο εστιάζει η παρούσα εργασία και ανήκει στην κατηγορία των πολυβάθμιων συστημάτων ατμοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για το διβάθμιο-παράλληλο-σύστημα (PTORC), και προκύπτει από τον διαχωρισμό του διακινούμενου ρευστού σε δύο ρεύματα (ένα για κάθε βαθμίδα), μετά την συμπίεση του (1→2) από την αντλία ΧΠ. Το 1^ο ρεύμα, δηλαδή αυτό της βαθμίδας ΧΠ, εισέρχεται στον ατμοποιητή ΧΠ (2→3) και έπειτα στον εκτονωτή ΧΠ (3→4) προς παραγωγή μηχανικού έργου. Το 2^ο ρεύμα, αφού συμπιεστεί από την αντλία ΥΠ (2→5), διέρχεται από τα αντίστοιχα στοιχεία της βαθμίδας ΥΠ (5→6 και 6→7). Οι δυο εκτονωτές εκβάλλουν σε μια κοινή ΧΠ, επιτρέποντας κατ'αυτό το τρόπο την ισόθλιπτη ανάμειξη των δυο ρευμάτων και την κοινή τους συμπύκνωση (8→1), οδηγώντας στην επανέναρξη του κύκλου με την είσοδο του εργαζόμενου μέσου στην αντλία ΧΠ. Το μονογραμμικό διάγραμμα του PTORC μαζί με τα

διαγράμματα θερμοκρασία-εντροπίας των εργαζόμενων μέσων για τις περιπτώσεις λειτουργίας με ή χωρίς ζεοτροπικά μείγματα, εμφανίζονται στην **Εικόνα 20**. Στο εξής, για λόγους απλότητας, το PTORC θα αναφέρεται ως DSORC όταν έχει ως εργαζόμενο μέσο καθαρή οργανική ένωση και ως DS-ZORC όταν έχει ως εργαζόμενο μέσο ζεοτροπικό μείγμα.



Εικόνα 20: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος ORC (β) Μεταβολές καθαρής οργανικής ουσίας εντός του διβάθμιου συστήματος (DSORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) (γ) Μεταβολές ζεοτροπικού μείγματος εντός του διβάθμιου συστήματος (DS-ZORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)

2.2 Μοντελοποίηση

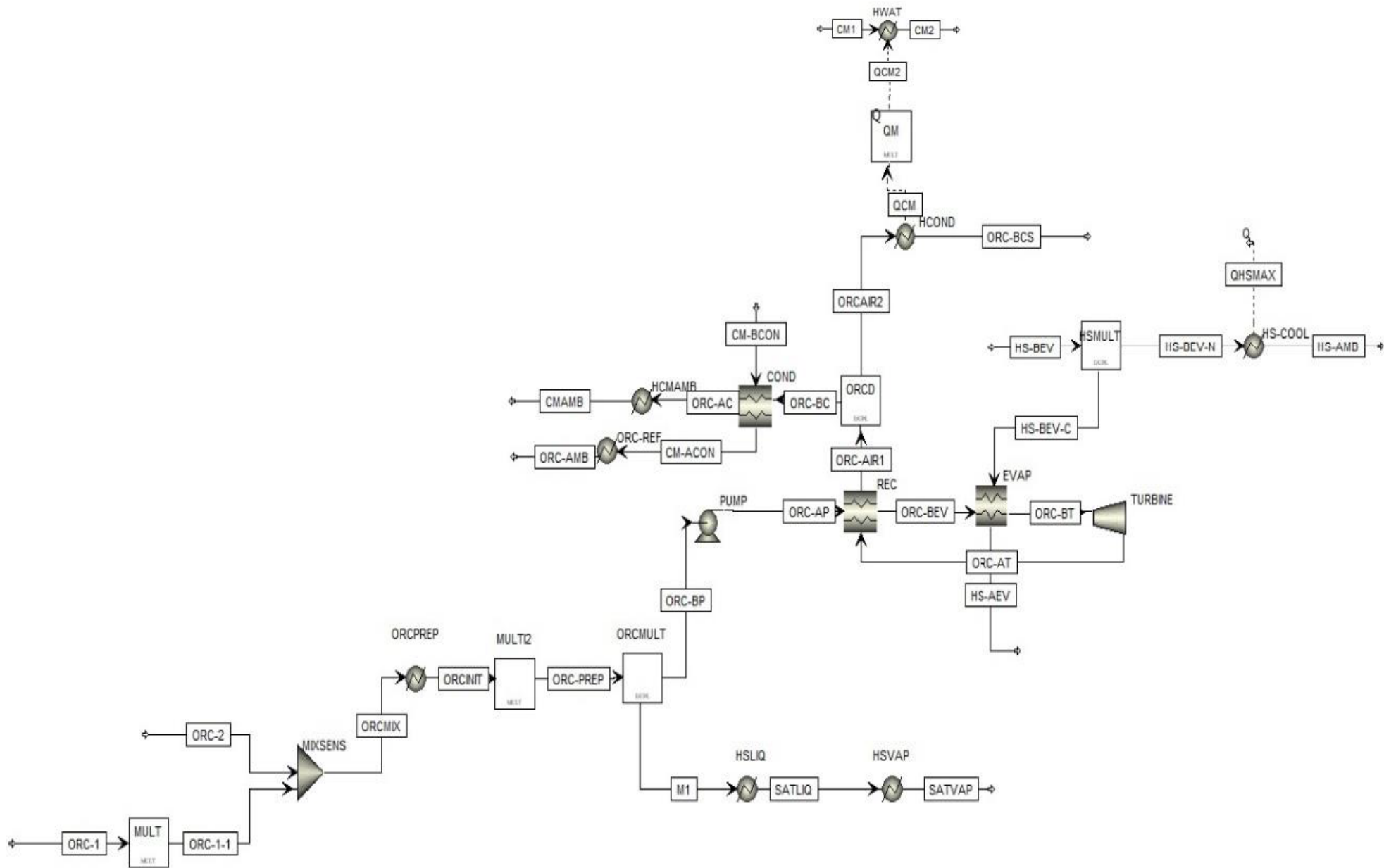
Η μοντελοποίηση των δυο διατάξεων ORC πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού AspenPlus™ [54], ενώ όλες οι θερμοφυσικές ιδιότητες των καθαρών ρευστών, των μειγμάτων, του ρεύματος της πηγής θερμότητας αλλά και του νερού ψύξης υπολογίστηκαν στο λογισμικό αυτό χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson συνδυαστικά με τη μέθοδο προσδιορισμού ιδιοτήτων Boston-Mathias alpha function [55].

Οι προσομοιώσεις όλων των θερμοδυναμικών κύκλων διεξήχθησαν στο λογισμικό AspenPlus™ υπό συνθήκες σταθερής λειτουργίας. Όλες οι πτώσεις πίεσης και οι θερμικές απώλειες στις σωληνώσεις, τα εξαρτήματα και τους εναλλάκτες θερμότητας θεωρήθηκαν αμελητέες. Επίσης δεν έχουν ληφθεί υπόψη τυχόν αλλαγές στη συγκέντρωση των ζετροπικών μειγμάτων λόγω του φαινομένου της κλασματοποίησης των συστατικών τους.

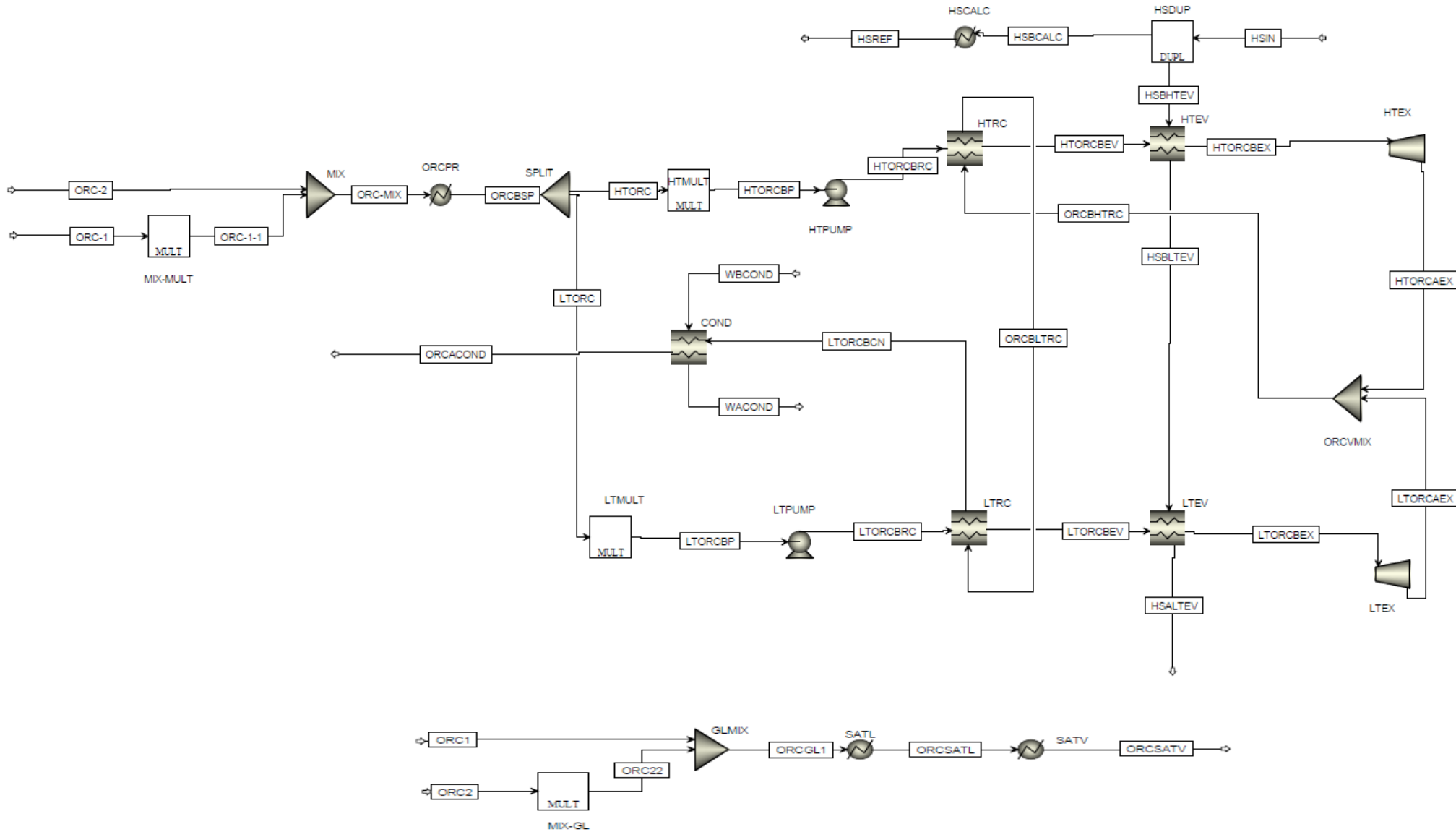
Στο περιβάλλον του λογισμικού AspenPlus™ καθένα από τα δυο συστήματα ORC αναπαρίστανται μέσω ενός διαγράμματος ροής (Flowsheet) το οποίο αποτελείται από δομικά στοιχεία (Blocks) και ροές (Streams) και παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με τα μονογραμμικά διαγράμματα των συστημάτων αυτών που αναφέρθηκαν στην ενότητα **2.1**. Κάθε δομικό στοιχείο αντιπροσωπεύει, εν γένει, μια συσκευή (πχ HTEV=High Temperature Evaporator, δηλαδή ατμοποιητής ΥΘ) ενώ η σύνδεση διαδοχικών δομικών στοιχείων πραγματοποιείται μέσω των ροών, οι οποίες καθορίζουν με βέλη την κατεύθυνση του εργαζόμενου μέσου αλλά και των εξωτερικών ρευμάτων (της πηγής θερμότητας και του νερού ψύξης) στον εκάστοτε κύκλο. Επιπροσθέτως, σε κάθε διάγραμμα ροής, έχουν τοποθετηθεί πριν και μετά από κάθε δομικό στοιχείο ορθογωνικές επισημάνσεις (Labels) που υποδηλώνουν το σημείο στο οποίο βρίσκεται το εργαζόμενο μέσο ή το εξωτερικό ρεύμα, κυρίως για λόγους ευκρίνειας. Για παράδειγμα, για το εξωτερικό ρεύμα της πηγής θερμότητας, η ένδειξη HSBHTEV (Heat Source Before High Temperature Evaporator) υποδηλώνει ότι το ρεύμα στο συγκεκριμένο σημείο βρίσκεται λίγο πριν την είσοδο του στον ατμοποιητή ΥΘ. Επιπλέον, εν αντιθέσει με το μονογραμμικά διαγράμματα, τα διαγράμματα ροής συμπεριλαμβάνουν ορισμένα πρόσθετα στοιχεία, μερικά εκ των οποίων είναι ανενεργά, όπως οι εναλλάκτες ανακόμισης θερμότητας (HTRC, LTRC) στο διάγραμμα ροής του διβάθμιου κύκλου, ενώ για τον ίδιο κύκλο, άλλα στοιχεία όπως τα ORCMIX και SPLIT αναπαριστούν τις διεργασίες ανάμειξης και διαχωρισμού των ρευμάτων του εργαζόμενου μέσου αντιστοίχως. Τα διαγράμματα ροής της μονοβάθμιας και της διβάθμιας διάταξης ORC εμφανίζονται στις **Εικόνες 21** και **22** αντιστοίχως.

Ενδεικτικά, για την περίπτωση του διβάθμιου ORC, η προσομοίωση ξεκινά με την επιλογή δυο καθαρών ουσιών (ORC1, ORC2). Η πρώτη ουσία (ORC1) εισάγεται στο δομικό στοιχείο MIX-MULT που έχει το ρόλο να καθορίζει την σύσταση του μείγματος

που θα προκύψει μέσω της ανάμειξης στο στοιχείο ORCMIX. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το εργαζόμενο μέσο διαχωρίζεται σε δυο ρεύματα μέσω του στοιχείου SPLIT. Η παροχή των δυο ρευμάτων έχει ρυθμιστεί εξ αρχής από τα στοιχεία HTMULT και LTMULT που ακολουθούν και επομένως κάθε ρεύμα εισέρχεται στους βρόχους ΥΘ και ΧΘ. Τα δυο ρεύματα, αφού διέλθουν μέσα απ' όλα τα αντίστοιχα στοιχεία κάθε βαθμίδας (HTPUMP, HTEV, HTEX ή LTPUMP, LTEV, LTEX), ενώνονται ξανά μέσω του στοιχείου ORVMIX και συμπυκνώνονται από κοινού στο στοιχείο COND. Έπειτα, το στοιχείο ORCPR αναλαμβάνει να μεταφέρει το εργαζόμενο μέσο σε κατάσταση κορεσμού ώστε να εισέλθει ξανά στον διαχωριστή SPLIT και να επανεκκινήσει η διαδικασία. Τέλος, αξίζει να τονισθεί ότι παρόλο που το διάγραμμα ροής έχει τη μορφή ανοικτού κύκλου, δηλαδή η ροή φαίνεται να διακόπτεται μετά το στοιχείο που προκαλεί συμπύκνωση (COND), εντούτοις κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και η ροή επαναλαμβάνεται κυκλικά συνεχίζοντας από το στοιχείο ORCPR.



Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του μονοβάθμιου ORC σε περιβάλλον AspenPlus™ [19]
 Πηγή: Braimakis, 2018



Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του μονοβάθμιου ORC σε περιβάλλον AspenPlus™

2.3 Επιλογή εργαζόμενων μέσων

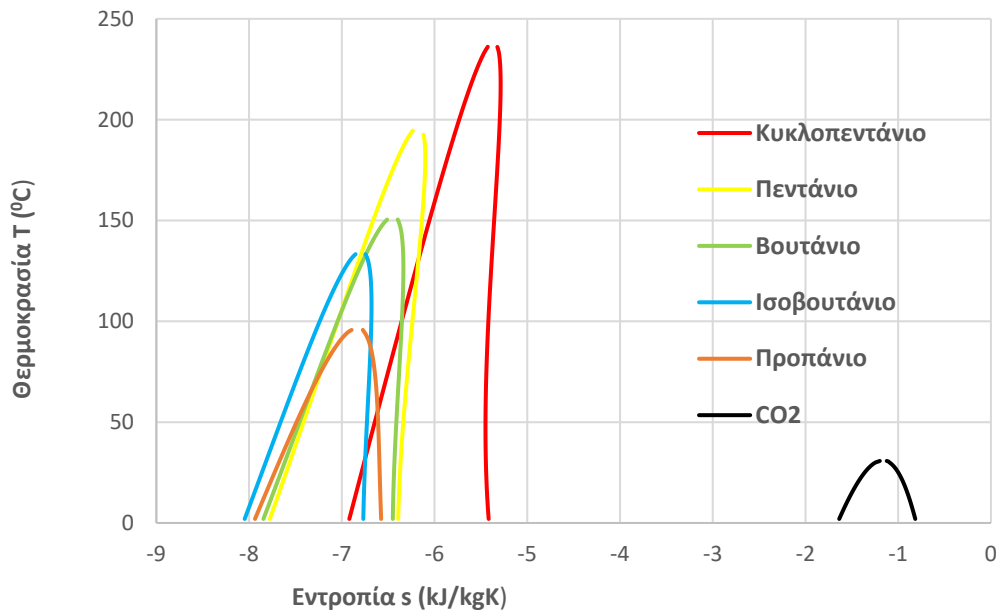
Οι οργανικές ενώσεις που επιλέχθηκαν ως εργαζόμενα μέσα στη παρούσα έρευνα είναι οι εξής: Το Πεντάνιο, το Κυκλοπεντάνιο, το Βουτάνιο, το Ισοβουτάνιο, το Προπάνιο και το Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Οι πρώτες 5 ενώσεις εμπίπτουν στην κατηγορία των υδρογονανθράκων (HCs) και διαθέτουν επιθυμητές θερμοδυναμικές ιδιότητες (πχ χαμηλές κρίσιμες πιέσεις), ενώ η εκλογή τους έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν ευρύ φάσμα κρίσιμων θερμοκρασιών ($97\text{-}239\text{ }^\circ\text{C}$). Επιπλέον, χαρακτηρίζονται ως <<φυσικά>> ρευστά εφόσον έχουν μηδενικούς δείκτες δυναμικού εξασθένισης του όζοντος (ODP), πολύ χαμηλούς δείκτες δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) και παράλληλα συμμορφώνονται με την εφαρμογή των πρωτοκόλλων Μόντρεαλ και Κιότο αλλά και με τους κανόνες των φθοριούχων αερίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Κυριότερο μειονέκτημα τους είναι η υψηλή ευφλεκτότητα καθώς εντάσσονται στην κατηγοροποίηση ασφαλείας A3 κατά ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers). Το CO_2 είναι επίσης ένα <<φυσικό ρευστό>>, αφού έχει μηδενικό ODP και αμελητέο GWP, είναι μη-τοξικό, μη-εύφλεκτο και ταυτόχρονα αδρανές, μη διαβρωτικό και χημικά σταθερό. Έχει ικανοποιητικές θερμοδυναμικές ιδιότητες και είναι πολύ οικονομικό καθώς βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, ενώ η χρήση του ως εργαζόμενο μέσο αποτελεί ελκυστική επιλογή ως μέρος μια ευρύτερης στρατηγικής δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης του άνθρακα (Carbon Capture, Utilization and Storage-CCUS). Ωστόσο, ένα από τα βασικά εμπόδια που εμφανίζονται κατά την χρήση του σε ένα ORC αφορά την χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία του ($31\text{ }^\circ\text{C}$) η οποία δυσχεραίνει την διαδικασία απόρριψης θερμότητας στο ψυχρό ρεύμα όταν εκείνη πραγματοποιείται σε υποκρίσιμες συνθήκες. Τα εξεταζόμενα ρευστά μαζί με τις βασικές ιδιότητες τους συνοψίζονται στον **Πίνακα 4** ενώ οι καμπύλες κορεσμού τους παρουσιάζονται στην **Εικόνα 23**.

Ομαδοποιώντας τις 6 οργανικές ενώσεις σε όλα τα πιθανά ζεύγη, θα προκύψουν 15 συνδυασμοί, καθένας από τους οποίους θα παράξει πληθώρα δυαδικών ζεοτροπικών μειγμάτων, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις μοριακές συγκεντρώσεις που καταλαμβάνουν τα δυο επιμέρους συστατικά του. Με αυτό το τρόπο, θα μελετηθούν ζεοτροπικά μείγματα προερχόμενα από ουσίες (όπως το Κυκλοπεντάνιο, το Προπάνιο και το CO_2) που δεν έχουν εισαχθεί ακόμα σε διβάθμιες διατάξεις άλλων ερευνών, ενώ η ανάμιξη υδρογονανθράκων με το CO_2 αποτελεί μια μέθοδο που θα μετριάσει τις προαναφερθείσες ατέλειες των συνιστωσών αυτών. Σημειώνεται επίσης, ότι η σύνθεση πολυσυστατικών μειγμάτων δεν έχει ληφθεί υπόψη, αφού έχει αποδειχθεί πως αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της διαδικασίας προσδίδοντας αμελητέα οφέλη στην απόδοση συστημάτων ORC [23, 31].

Πίνακας 4: Επιλεγμένα εργαζόμενα μέσα και βασικές ιδιότητες τους

Εργαζόμενο μέσο	T_{crit} (°C)	p_{crit} (bar)	ODP	GWP	Κατηγοριοποίηση ασφαλείας κατά ASHRAE
Κυκλοπεντάνιο	239	41	0	11	A3
Πεντάνιο (R-601)	196	33	0	4	A3
Βουτάνιο (R-600)	152	38	0	4	A3
Ισοβουτάνιο (R-600a)	135	36	0	3	A3
Προπάνιο (R-290)	97	42	0	3.3	A3
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂ ή R-744)	31	74	0	1	-

Καμπύλες κορεσμού των επιλεγμένων καθαρών ενώσεων



Εικόνα 23: Καμπύλες κορεσμού των εξεταζόμενων καθαρών ενώσεων σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)

2.4 Επιλογή παραμέτρων και παραδοχές λειτουργίας

2.4.1 Πηγή θερμότητας

Ως πηγή θερμότητας θεωρήθηκε ένα ρεύμα απορριπτόμενης θερμότητας που αποτελείται από ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα (79 % N₂, 21 % O₂) σε πίεση 2 bar. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το διβάθμιο σύστημα καθαρών ουσιών (DSORC) αλλά και το μονοβάθμιο ζεοτροπικό (ZORC) μεγιστοποιούν την προοπτική βελτίωσης της απόδοσης τους σε χαμηλές θερμοκρασίες πηγής θερμότητας, οι εξεταζόμενες θερμοκρασίες εισόδου του ρεύματος της πηγής (T_{hs,in}) είναι 100, 120, 140 και 160 °C. Διευκρινίζεται ότι σε ένα μονοβάθμιο σύστημα, η θερμοκρασία της πηγής στην είσοδο του συστήματος είναι ίση με την θερμοκρασία της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή, ενώ για ένα διβάθμιο είναι ίση με την θερμοκρασία της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΥΠ. Σε ότι αφορά την θερμοκρασία εξόδου του ρεύματος αυτού από το εκάστοτε σύστημα, δεν έχει τεθεί πρακτικά κανένας περιορισμός. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι σε εφαρμογές όπως η ανάκτηση θερμότητας από καυσαέρια ή από νερό γεωθερμικής πηγής, συνήθως απαιτείται μια ελάχιστη αποδεκτή θερμοκρασία ψύξης του ρεύματος της πηγής, της τάξεως των 110 °C, για αποφυγή προβλημάτων όπως είναι η διάβρωση των επιφανειών των εναλλακτών θερμότητας αλλά και του υπόλοιπου εξοπλισμού. Ωστόσο, αυτός ο τεχνικός περιορισμός δεν έχει ληφθεί υπόψη καθώς στόχος της παρούσας έρευνας δεν είναι να εξετάσει μια συγκεκριμένη περίπτωση/εφαρμογή αλλά να παρέχει ένα γενικό θεωρητικό υπόβαθρο που θα είναι χρήσιμο σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Θεωρώντας συνθήκες αναφοράς σε θερμοκρασία T_{ref}=20 °C και πίεσης p_{ref}=1.013 bar, η μέγιστη θεωρητική θερμική ισχύς (Q̇_{hs,ref}) που μπορεί να προσδώσει η πηγή θερμότητας δίνεται από την σχέση (2.1.1) :

$$\dot{Q}_{hs,ref} = \dot{m}_{hs}(h_{hs,in} - h_{hs,ref}) \quad (2.1.1)$$

Όπου h_{hs,in} είναι η ειδική ενθαλπία εισόδου του ρεύματος της πηγής στο σύστημα και h_{hs,ref} η ειδική ενθαλπία του ίδιου ρεύματος σε συνθήκες αναφοράς. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας αναφέρονται εν συντομία στον **Πίνακα 5**.

Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας

Θερμοκρασία εισόδου θερμού ρεύματος (T _{hs,in})	100-160 °C με βήματα 20 K
Πίεση θερμού ρεύματος	2 bar
Σύσταση θερμού ρεύματος (γραμμομοριακά κλάσματα)	79% N ₂ , 21% O ₂

2.4.2 Στοιχεία μονοβάθμιου και διβάθμιου ORC

Οι κυριότερες παραδοχές και παράμετροι προς βελτιστοποίηση παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6**. Τυπικές τιμές έχουν επιλεχθεί για τους βαθμούς απόδοσης των εκτονωτών, των αντλιών, των κινητήρων κάθε αντλίας αλλά και της γεννήτριας. Επίσης, έχουν επιλεγεί συγκεκριμένες τιμές της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των δύο ρευμάτων σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας. Επιπλέον, θεωρείται δεδομένη και η θερμοκρασία του νερού ψύξης όπως και η θερμοκρασιακή ανύψωση του στον συμπυκνωτή. Με βάση τα δυο τελευταία στοιχεία και χρησιμοποιώντας τον ενεργειακό ισολογισμό στον συμπυκνωτή υπολογίζεται και η παροχή μάζας του ψυκτικού νερού. Ακόμη, η πίεση συμπύκνωσης και επομένως και η θερμοκρασία, υπολογίζονται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στο συμπυκνωτή που έχει οριστεί. Τέλος, προαπαιτούμενο αποτελεί και η επιλογή του βαθμού υπερθέρμανσης ώστε να προσδιοριστεί η θερμοκρασία/οι θερμοκρασίες εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον εκτονωτή/στους εκτονωτές του μονοβάθμιου/διβάθμιου συστήματος αντιστοίχως.

Πίνακας 6: Κυριότερες παραδοχές και παράμετροι προς βελτιστοποίηση

Παράμετροι	Τιμές
Βαθμοί απόδοσης	
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτονωτών ($\eta_{is,exp}$)	75 %
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης αντλιών ($\eta_{is,pump}$)	70 %
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{m\eta g}$)	95 %
Βαθμός απόδοσης κινητήρων των αντλιών (η_M)	85 %
Εναλλάκτες θερμότητας	
Θερμοκρασία ψυκτικού νερού στην είσοδο του συμπυκνωτή ($T_{cw,in}$)	20 °C
Θερμοκρασιακή αύξηση του ψυκτικού νερού στον συμπυκνωτή (ΔT_{cw})	15 K
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον ατμοποιητή/στους ατμοποιητές ΥΘ και ΧΘ ($PP_{evap}/PP_{evap,HT}, PP_{evap,LT}$)	5 K
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή (PP_{cond})	5 K
Πιέσεις και Θερμοκρασίες	
Πίεση ατμοποίησης/Πιέσεις ατμοποίησης των βαθμίδων ΥΘ και ΧΘ ($p_{evap}/p_{evap,HT}, p_{evap,LT}$)	Προς βελτιστοποίηση
Πίεση συμπύκνωσης (p_{cond})	Υπολογισμένη για να ικανοποιεί το PP_{cond}
Θερμοκρασία εισόδου στους εκτονωτές ($T_{exp,in}$)	Προσαυξημένη κατά 10K ($\Delta T_{sup}=10$ K)

2.5 Δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης

Η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ενός μονοβάθμιου συστήματος ορίζεται ως η διαφορά της καθαρής ισχύος που παράγεται από τον εκτονωτή με την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει η αντλία για την λειτουργίας της:

$$P_{e,net}^{SS} = P_{e,exp} - P_{e,pump} \quad (2.1.2)$$

Ομοίως, η καθαρή ηλεκτρική ισχύς του διβάθμιου συστήματος είναι ίση με το άθροισμα της καθαρής ηλεκτρικής ισχύος που παράγουν οι εκτονωτές υψηλής και χαμηλής πίεσης εάν αφαιρεθούν οι καταναλώσεις ισχύος των δυο αντλιών ΥΠ και ΧΠ:

$$P_{e,net}^{DS} = (P_{e,exp,HT} - P_{e,exp,LT}) - (P_{e,pump,HT} - P_{e,pump,LT}) \quad (2.1.3)$$

Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που παράγει ένας εκτονωτής ή καταναλώνει μια αντλία, δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{e,exp} = \eta_m \eta_g \Delta h_{exp} = \eta_m \eta_g \eta_{is,exp} \Delta h_{is,exp} \quad (2.1.4)$$

$$P_{e,pump} = \frac{\dot{m}_{wf} \Delta h_{pump}}{\eta_M} = \frac{\dot{m}_{wf} \Delta h_{is,pump}}{\eta_M \eta_{is,pump}} \quad (2.1.5)$$

Στην σχέση (2.1.4), $\eta_m \eta_g$ είναι ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης, $\eta_{is,exp}$ ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή και $\Delta h_{is,exp}$ η ισεντροπική πτώση ειδικής ενθαλπίας του εκτονωτή. Στην σχέση (2.1.5), \dot{m}_{wf} είναι η παροχή του εργαζόμενου μέσου, Δh_{pump} η ειδική ενθαλπική αύξηση που προκαλεί στο μέσο αυτό η αντλία, $\Delta h_{is,pump}$ η ισεντροπική αύξηση ειδικής ενθαλπίας, $\eta_{is,pump}$ ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και η_M ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα της αντλίας.

Ο θερμικός ή ενεργειακός βαθμός απόδοσης ενός ORC, ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την θερμική ισχύ που παραλαμβάνει ο κύκλος από την πηγή θερμότητας:

$$\eta_{th} = \frac{P_{e,net}}{\dot{Q}_{ORC,in}} \quad (2.1.6)$$

Η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το μονοβάθμιο και το διβάθμιο σύστημα από την πηγή θερμότητας δίνονται από τις σχέσεις:

$$\dot{Q}_{ORC,in}^{SS} = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_3) \quad (2.1.7)$$

$$\dot{Q}_{ORC,in}^{DS} = \dot{m}_{wf,HT}(h_6 - h_5) + \dot{m}_{wf,LT}(h_3 - h_2) \quad (2.1.8)$$

Όπου \dot{m}_{wf} η παροχή του εργαζόμενου μέσου και $(h_4 - h_3)$ η μεταβολή ειδικής ενθαλπίας που υφίσταται όταν διέρχεται από τον ατμοποιητή του μονοβάθμιου συστήματος.

Στην σχέση (2.1.8) $\dot{m}_{wf,HT}$, $\dot{m}_{wf,LT}$ είναι οι παροχές του εργαζόμενου μέσου που διαρρέουν τις δυο βαθμίδες ΥΘ και ΧΘ, ενώ $(h_6 - h_5)$ και $(h_3 - h_2)$ οι μεταβολές ειδικής ενθαλπίας που υφίσταται το εργαζόμενο μέσο από τους ατμοποιητές ΥΘ και ΧΘ αντίστοιχα.

Ο βαθμός αξιοποίησης της πηγής θερμότητας ορίζεται ως η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το σύστημα ORC, διαιρεμένη με την θεωρητικά μέγιστη θερμική ισχύ που θα μπορούσε να παραλάβει, εφόσον το εξερχόμενο ,από τον ατμοποιητή, ρεύμα της πηγής είχε ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία αναφοράς του συστήματος ($T_{ref}=20$ °C), και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{hsu} = \frac{\dot{Q}_{ORC,in}}{\dot{Q}_{hs,ref}} = \frac{\dot{Q}_{ORC,in}}{\dot{m}_{hs}(h_{hs,in} - h_{hs,ref})} \quad (2.1.9)$$

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης των δυο συστημάτων υπολογίζονται ως εξής:

$$\eta_{ex,net}^{SS} = \frac{P_{e,net}^{SS}}{\dot{E}x_{hs,in}} \quad (2.2.0)$$

$$\eta_{ex,net}^{DS} = \frac{P_{e,net}^{DS}}{\dot{E}x_{hs,in}} \quad (2.2.1)$$

Η εξέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος είναι η μέγιστη θεωρητική ποσότητα έργου που μπορεί να εξαχθεί από αυτό εάν έρθει σε ισορροπία με το περιβάλλον του (συνθήκες αναφοράς). Θεωρώντας μια ιδανική θερμική μηχανή, η οποία δέχεται θερμορροή \dot{Q} σε θερμοκρασία T και απορρίπτει θερμότητα σε μια ψυχρή δεξαμενή θερμοκρασίας T_{ref} ισοθερμοκρασιακά, ο ρυθμός του έργου αυτού υπολογίζεται με βάση τον βαθμό απόδοσης του Carnot ως εξής:

$$\dot{E}x = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_{ref}}{T}\right) \quad (2.2.2)$$

Εάν το σύστημα είναι ένα ρεύμα ρευστού, τότε ο ρυθμός εξέργειας του δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{E}x = \dot{m}[(h_T - h_{ref}) - T_{ref}(s_T - s_{ref})] \quad (2.2.3)$$

Με βάση τα παραπάνω, ο ρυθμός εξέργεια ενός ρεύματος θερμότητας που εισέρχεται σε ένα σύστημα ORC δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{E}x_{hs,in} = \dot{m}_{hs} [(h_{hs,in} - h_{hs,ref}) - T_{ref}(s_{hs,in} - s_{hs,ref})] \quad (2.2.4)$$

Όπου $s_{hs,in}$ είναι η ειδική εντροπία εισόδου του θερμού ρεύματος στο σύστημα και $s_{hs,ref}$ η ειδική εντροπία του ρεύματος αυτού σε συνθήκες αναφοράς.

Με τον συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μπορεί να γραφτεί ως:

$$\eta_{ex} = \eta_{th} \eta_{hsu} \frac{(h_{hs,in} - h_{hs,ref})}{[(h_{hs,in} - h_{hs,ref}) - T_{ref}(s_{hs,in} - s_{hs,ref})]} \quad (2.2.5)$$

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι ένας δείκτης ισοδύναμος με τον εξεργειακό βαθμό και ορίζεται ως ο λόγος της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη θεωρητικά μέγιστη θερμική ισχύ που θα μπορούσε να παραλάβει το εργαζόμενο μέσο, εφόσον το εξερχόμενο, από τον ατμοποιητή, ρεύμα της πηγής είχε ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία αναφοράς του συστήματος, και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{sys} = \frac{P_{e,net}}{\dot{Q}_{hs,ref}} \quad (2.2.6)$$

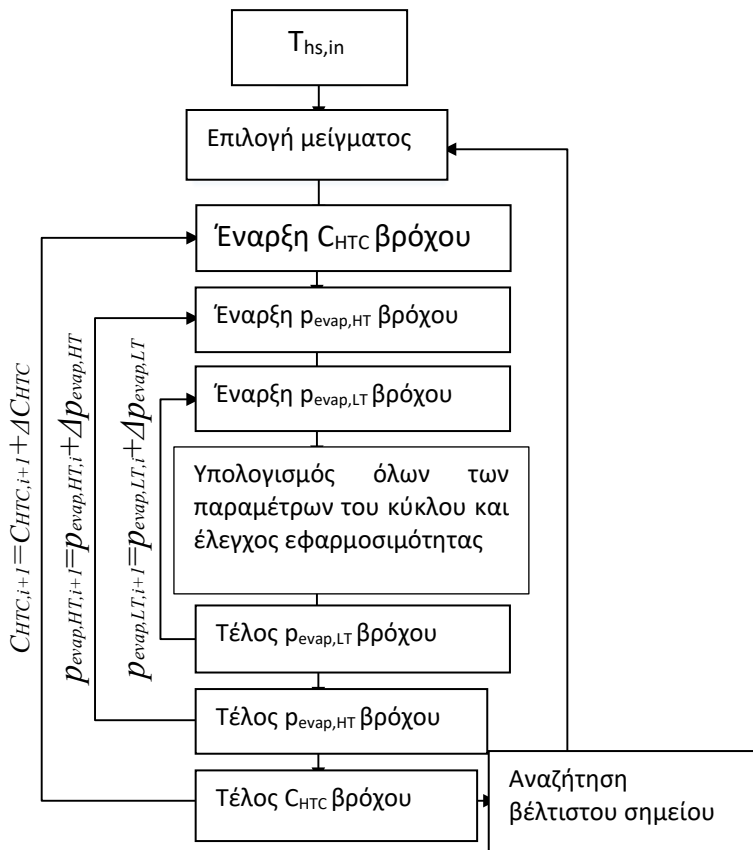
2.6 Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης, η οποία με βάση τη μεθοδολογία και τις παραδοχές που παρουσιάστηκαν είναι ισοδύναμη με την μεγιστοποίηση της συνολικά παραγόμενης ισχύος.

Για την περίπτωση του απλού μονοβάθμιου συστήματος, η μοναδική μεταβλητή βελτιστοποίησης είναι η πίεση ατμοποίησης, ενώ για εκείνη του μονοβάθμιου ζεοτροπικού, η παράλληλη χρήση δυο καθαρών ουσιών οδηγεί στην εισαγωγή μιας επιπλέον μεταβλητής, της σύστασης του ζεοτροπικού μείγματος. Για την περίπτωση του διβάθμιου συστήματος, η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου λαμβάνει χώρα σε δυο επίπεδα πιέσεων, ενός υψηλότερου και ενός χαμηλότερου, και συνεπώς, είναι απαραίτητη η θεώρηση δυο μεταβλητών βελτιστοποίησης που αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα αυτά. Ομοίως με πριν, η αντικατάσταση των καθαρών ουσιών από ζεοτροπικά μείγματα, θα εισάγει εκ νέου τη μεταβλητή της σύστασης του μείγματος, καθιστώντας την διαδικασία βελτιστοποίησης του διβάθμιου ζεοτροπικού ORC (3 μεταβλητές) περισσότερο περίπλοκη συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαμορφώσεις. Για τα δυο ζεοτροπικά συστήματα, η σύσταση του μείγματος καθορίζεται μεταβάλλοντας το μοριακό κλάσμα του συστατικού που κατέχει την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία, το οποίο στο εξής θα αναφέρεται ως συστατικό HTC (High T_{crit} Component). Αντίθετα, το

συστατικό του μείγματος με την χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία θα αναφέρεται ως συστατικό LTC (Low T_{crit} Component).

Με απώτερο στόχο την βελτιστοποίηση των υπάρχουσων διαμορφώσεων, εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία διεξοδικής αναζήτησης (exhaustive search), η οποία περιλαμβάνει την προσομοίωση όλων των κύκλων που αντιστοιχούν σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μεταβλητών βελτιστοποίησης. Παρόλο που η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι υπολογιστικά χρονοβόρα, εντούτοις τα αποτελέσματα της χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Το διάγραμμα ροής της γενικευμένης αυτής μεθοδολογίας αναζήτησης (το οποίο περιλαμβάνει και τις 4 περιπτώσεις διαφορετικών διαμορφώσεων) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 24**. Όπως γίνεται αντιληπτό, για τις 2 εκδοχές της μονοβάθμιας διάταξης (με ή χωρίς χρήση καθαρών ουσιών) ενσωματώνεται μοναδικός βρόχος υπολογισμού της πίεσης ατμοποίησης (p_{evap}), αντικαθιστώντας τους δυο εμφωλευμένους βρόχους υπολογισμού υψηλής ($p_{evap,HT}$) και χαμηλής πίεσης ($p_{evap,LT}$), ενώ για τις δυο περιπτώσεις διατάξεων με καθαρές ουσίες, παραλείπεται ο βρόχος που αφορά την βελτιστοποίηση τη συγκέντρωσης του συστατικού HTC (C_{HTC}) εντός του μείγματος.



Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής της διεξοδικής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης των μελετώμενων διαμορφώσεων.

Για κάθε δυαδικό μείγμα, το μοριακό κλάσμα των συγκεντρώσεων των συστατικών του μεταβάλλεται από 0.9/0.1 σε 0.1/0.9, προσαυξάνοντας κάθε φορά κατά 0.1 τη συγκέντρωση του συστατικού HTC με αφητηρία την τιμή 0.1. Ως αποτέλεσμα, προσομοιώθηκε η λειτουργία 141 διαφορετικών εργαζόμενων μέσων (135 μείγματα και 6 καθαρές ουσίες) τόσο στη μονοβάθμια όσο και στη διβάθμια διάταξη ORC. Επίσης, για κάθε συγκέντρωση του συστατικού HTC (C_{HTC}), η πίεση/οι πιέσεις ατμοποίησης κυμαίνεται/κυμαίνονται από μια ελάχιστη τιμή των 4 bar μέχρι μια μέγιστη των 40 bar με βήματα του 1 bar, με τα όρια αυτά να θέτονται ως γενικοί περιορισμοί για τα υπο μελέτη συστήματα. Βέβαια, η πίεση/οι πιέσεις ατμοποίησης θα πρέπει πάντοτε να είναι χαμηλότερες των αντίστοιχων πιέσεων συμπύκνωσης προκειμένου να είναι υλοποιήσιμη η λειτουργία των ανωτέρω κύκλων. Στο ίδιο πλαίσιο, εφόσον ερευνάται η υποκρίσιμη συμπεριφορά των συστημάτων ORC, θα πρέπει η πίεση/οι πιέσεις ατμοποίησης να μην υπερβαίνουν τις κρίσιμες πιέσεις (p_{crit}) των εργαζόμενων μέσων και μάλιστα, να είναι μικρότερες τουλάχιστον κατά 2 bar. Ακόμη, μια προϋπόθεση που τίθενται για την λειτουργία των ζεοτροπικών ORC, αφορά την θερμοκρασιακή ολίσθηση των εργαζόμενων μέσων ($\Delta T_{\text{gl, evap}}$, $\Delta T_{\text{gl, cond}}$) η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 K, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα κλασματοποίησης των επιμέρους συστατικών τους. Τέλος, αναφορικά με τις διβάθμιες διαμορφώσεις, προκειμένου να διασφαλιστεί η απόρριψη ακραίων λύσεων, όπως εκείνες κατά τις οποίες η παραγόμενη ισχύς μιας εκ των δυο βαθμίδων είναι πολύ χαμηλότερη της άλλης, ελέγχεται η τιμή του λόγου των μεγεθών αυτών ($P_{\text{exp, HT}}/P_{\text{exp, LT}}$ ή $P_{\text{exp, LT}}/P_{\text{exp, HT}}$) έτσι ώστε να μην υπερβαίνει το 10 %.

Οι βασικές παράμετροι των εναλλακτών θερμότητας (πχ $PP_{\text{evap}}/(PP_{\text{evap, HT}}, PP_{\text{evap, LT}})$, ΔT_{CW}) που έχουν αρχικώς οριστεί στον **Πίνακα 6**, αποτελούν πρόσθετα μέτρα αξιολόγησης της εφικτότητας κάθε παραγόμενης λύσης, καθώς ο επαναυπολογισμός τους, μετά το πέρας της προσομοίωσης, λειτουργεί ως μέσο επαλήθευσης, με δεδομένο ότι οι δυο τιμές (δηλ. η αρχική και η τελική τιμή) θα πρέπει να συμπίπτουν. Τα υπολογισμένα σημεία και οι λειτουργικές παράμετροι του κύκλου συλλέγονται σε πίνακες δεδομένων, οι οποίοι εν συνεχεία προσπελάζονται ώστε να απορριφθούν οι ανέφικτες λύσεις και να ταυτοποιηθούν τα βέλτιστα σημεία μεταξύ των αποδεκτών λύσεων. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δυαδικά μείγματα και για όλες τις περιπτώσεις θερμοκρασιών της πηγής θερμότητας. Οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση, μαζί με τα βήματα και τα όρια αναζήτησης τους για κάθε διαμόρφωση δίνονται στον **Πίνακα 7**.

Πίνακας 7: Μεταβλητές βελτιστοποίησης, εύρος αναζήτησης και βήμα για κάθε διαμόρφωση

Διαμόρφωση	Μεταβλητές βελτιστοποίησης	Γενικό Εύρος	Βήμα
SORC	p_{evap} (bar)	4-40	1
ZORC	p_{evap} (bar)	4-40	1
	C_{HTC} (%)	10-90	10
DSORC	$p_{evap,HT}$ (bar)	4-40	1
	$p_{evap,LT}$ (bar)	4-40	1
DS-ZORC	$p_{evap,HT}$ (bar)	4-40	1
	$p_{evap,LT}$ (bar)	4-40	1
	C_{HTC} (%)	10-90	10
Περιορισμοί (σε όλες τις διαμορφώσεις)		$p_{evap} > p_{cond}$, $p_{evap} < p_{crit} - 2$, $PP_{evap} = 5$ K, $PP_{cond} = 5$ K, $p_{evap,HT} > p_{evap,LT}$, $\Delta T_{gl,evap} < 20$ K, $\Delta T_{gl,cond} < 20$ K, $P_{exp,HT}/P_{exp,LT} > 0.1$, $P_{exp,LT}/P_{exp,HT} > 0.1$	

3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζονται οι βέλτιστες διαμορφώσεις συστημάτων ORC με βάση τη μεγιστοποίηση της εξεργειακής απόδοσης. Στο δεύτερο μέρος, πραγματοποιείται μια πιο λεπτομερής ανάλυση σχετικά με την εφικτότητα των λύσεων και τις βέλτιστες σχεδιαστικές παραμέτρους του διβάθμιου ζεοτροπικού κύκλου.

3.1 Βέλτιστες διαμορφώσεις

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης και των 4 βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων (DS-ZORC, DSORC, ZORC, SORC) όλων των δυαδικών συνδυασμών μειγμάτων, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις θερμοκρασιών πηγής θερμότητας, βρίσκονται σε μια σειρά από ραβδογράμματα στο κεφάλαιο **Παραρτήματα** της παρούσας εργασίας (**Εικόνα 34**). Οι αναγνώστες παραπέμπονται σ'αυτά έτσι ώστε να αποκτήσουν μια πιο λεπτομερή και σαφή εικόνα σχετικά με την απόδοση όλων των μειγμάτων και διατάξεων ORC.

Οι βέλτιστες διαμορφώσεις που αποδίδουν τους μέγιστους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης για τα μείγματα (ή καθαρές ουσίες), μαζί με τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αναλογούν, υπολογισμένες για θερμοκρασίες πηγών θερμότητας 100, 120, 140 και 160 °C, βρίσκονται στους **Πίνακες 8, 9, 10** και **11**. Για κάθε δυαδικό ζεύγος ρευστών, οι συντομογραφίες LTC και HTC υποδηλώνουν την λειτουργία ενός συστήματος ORC με εργαζόμενο μέσο το συστατικό με την χαμηλότερη (LTC) ή την υψηλότερη (HTC) κρίσιμη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, όταν η βέλτιστη διαμόρφωση ενός δυαδικού συνδυασμού με συστατικά A (HTC) και B (LTC) είναι το SORC-LTC, τότε το απλό μονοβάθμιο σύστημα (SORC) διαρρεόμενο από το συστατικό B είναι η βέλτιστη διαμόρφωση για τον συνδυασμό των ουσιών αυτών, και στη συγκεκριμένη θερμοκρασία πηγής, εμφανίζει υπεροχή έναντι των άλλων συστημάτων ORC.

Εξαιτίας κυρίως του περιορισμού που έχει τεθεί για την θερμοκρασιακή ολίσθηση (να μην υπερβαίνει τα 20 K σε όλους τους εναλλάκτες θερμότητας) ορισμένα μείγματα παράγουν εξαιρετικά μικρό ή και μηδενικό αριθμό αποδεκτών καταστάσεων λειτουργίας συγκριτικά με τον αριθμό προσομοιώσεων που έχουν διεξαχθεί. Τέτοιες είναι και οι περιπτώσεις που προκύπτουν από ανάμειξη ουσιών με ιδιαίτερα διαφορετικές κρίσιμες θερμοκρασίες καθώς και εκείνες όπου οι μοριακές συγκεντρώσεις των δυο συστατικών τείνουν να λαμβάνουν πανομοιότυπες τιμές (από την αναλογία 0.4/0.6 έως 0.6/0.4) οδηγώντας κατ'αυτό το τρόπο στη μεγιστοποίηση της θερμοκρασιακής ολίσθησης. Επιπλέον, το CO₂, λόγω των ιδιαίτερων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του ($p_{crit}=74\text{bar}$, $T_{crit}=31^{\circ}\text{C}$) δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί ως καθαρή ουσία, τόσο στο μονοβάθμιο όσο στο διβάθμιο σύστημα, παρόλο που η συμμετοχή του σε κάποια

μείγματα ορισμένης αναλογίας, καθίσταται ικανή να αποδώσει μερικά υλοποιήσιμα σημεία λειτουργίας.

Με βάση τους παρακάτω πίνακες, διαπιστώνουμε τα εξής:

- 1) Για τη χαμηλότερη θερμοκρασία πηγής (100 °C), η μέγιστη εξεργειακή απόδοση ($\eta_{ex,max} = 31.7 \%$) επιτυγχάνεται από το διβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα λειτουργώντας με μείγμα Βουτανίου-Πεντανίου σε μοριακή αναλογία 0.5/0.5.
- 2) Για θερμοκρασία πηγής 120 °C, η υψηλότερη εξεργειακή απόδοση (35.5 %) καταγράφεται πάλι για το διβάθμιο ζεοτροπικό ORC, λειτουργώντας όμως αυτή τη φορά με μείγμα Κυκλοπεντανίου-Βουτανίου με σύσταση 0.3/0.7.
- 3) Για θερμοκρασία πηγής 140 °C, το διβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα κυριαρχεί ξανά παρουσιάζοντας μέγιστη εξεργειακή απόδοση (38 %) για τον ίδιο ακριβώς συνδυασμό και αναλογία με πριν.
- 4) Τέλος, για την μεγαλύτερη θερμοκρασία πηγής (160 °C), την πρώτη θέση καταλαμβάνει το μονοβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα με εξεργειακή απόδοση που φτάνει το 42.4 % για μείγμα Βουτανίου-Προπανίου σε μοριακή αναλογία 0.4/0.6.

Επίσης, από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι στην πλειοψηφία των εξεταζόμενων συνδυασμών, το διβάθμιο ζεοτροπικό ORC σημειώνει τον μέγιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης, ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία πηγής είναι μεταξύ 100 °C και 140 °C. Οι περιπτώσεις όπου είναι προτιμητέα η απλή διβάθμια ή μονοβάθμια ζεοτροπική διάταξη είναι σημαντικά λιγότερες, ενώ παράλληλα υπάρχουν και μερικά ζεύγη ρευστών που καθιστούν ιδανικότερη την απλή μονοβάθμια. Γενικά, παρόλο που η επικράτηση του διβάθμιου ζεοτροπικού ORC είναι φανερή για θερμοκρασίες πηγής 100 °C και 120 °C, εντούτοις, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η απλή διβάθμια και η μονοβάθμια ζεοτροπική κερδίζουν έδαφος και γίνονται ολοένα και περισσότερο ανταγωνιστικές.

Πίνακας 8: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 100 °C.

Δυαδικός συνδυασμός	$\eta_{ex,max}$ (%)	Βέλτιστη διαμόρφωση	$p_{evap}/p_{evap,HT}$ (bar)	$p_{evap,LT}$ (bar)	C_{HTC} (%)
Βουτάνιο-Προπάνιο	31.7	DS-ZORC	17	8	50
Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο	31.1	DS-ZORC	10	5	20
Κυκλοπεντάνιο-Ισοβουτάνιο	29.2	DS-ZORC	10	5	10
Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο	28.8	DS-ZORC	9	5	10
Πεντάνιο-Βουτάνιο	28.1	DS-ZORC	8	4	20
Ισοβουτάνιο-Προπάνιο	27.8	DS-ZORC	20	11	50
Πεντάνιο-Προπάνιο	26.6	DS-ZORC	24	11	10
Προπάνιο-CO ₂	24.0	DS-ZORC	40	20	90
Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο	23.9	DS-ZORC	10	6	70
Βουτάνιο-CO ₂	23.2	DSORC-HTC	9	5	100
Ισοβουτάνιο-CO ₂	23.2	DSORC-HTC	13	8	100
Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο	22.1	DSORC-LTC	31	18	0
Πεντάνιο-CO ₂	12.9	SORC-HTC	4	-	100
Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο	12.9	SORC-LTC	4	-	0
Κυκλοπεντάνιο-CO ₂	-	DS-ZORC	-	-	-

Πίνακας 9: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 120 °C

Δυαδικός συνδυασμός	$\eta_{ex,max}$ (%)	Βέλτιστη διαμόρφωση	$p_{evap}/p_{evap,HT}$ (bar)	$p_{evap,LT}$ (bar)	C_{HTC} (%)
Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο	35.5	DS-ZORC	10	4	30
Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο	35.2	DS-ZORC	12	5	30
Βουτάνιο-Προπάνιο	35.2	DS-ZORC	21	9	50
Πεντάνιο-Βουτάνιο	34.8	DS-ZORC	9	4	40
Κυκλοπεντάνιο-Ισοβουτάνιο	34.5	DS-ZORC	14	6	20
Πεντάνιο-Προπάνιο	31.9	DS-ZORC	37	15	10
Ισοβουτάνιο-Προπάνιο	31.4	DS-ZORC	26	12	50
Προπάνιο-CO ₂	28.6	ZORC	40	-	90
Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο	28.4	DS-ZORC	13	7	50
Βουτάνιο-CO ₂	27.8	DSORC-HTC	12	6	100
Ισοβουτάνιο-CO ₂	27.8	DSORC-HTC	15	8	100
Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο	26.5	SORC-LTC	37	-	0
Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο	23.1	ZORC	4	-	10
Πεντάνιο-CO ₂	23.0	SORC-HTC	4	-	100
Κυκλοπεντάνιο-CO ₂	15.9	SORC-HTC	4	-	100

Πίνακας 10: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 140 °C

Δυαδικός συνδυασμός	$\eta_{ex,max}$ (%)	Βέλτιστη διαμόρφωση	$p_{evap}/p_{evap,HT}$ (bar)	$p_{evap,LT}$ (bar)	C_{HTC} (%)
Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο	38.0	DS-ZORC	12	4	30
Βουτάνιο-Προπάνιο	37.7	DS-ZORC	33	11	40
Πεντάνιο-Βουτάνιο	37.3	DS-ZORC	11	4	50
Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο	37.1	DS-ZORC	12	4	40
Πεντάνιο-Προπάνιο	37.0	ZORC	39	-	10
Κυκλοπεντάνιο-Ισοβουτάνιο	36.7	DS-ZORC	17	6	20
Ισοβουτάνιο-Προπάνιο	35.3	DS-ZORC	31	11	60
Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο	32.1	DS-ZORC	18	7	60
Ισοβουτάνιο-CO ₂	31.8	DSORC-HTC	21	8	100
Βουτάνιο-CO ₂	31.7	DSORC-HTC	15	6	100
Προπάνιο-CO ₂	30.5	SORC-HTC	37	-	100
Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο	30.3	SORC-LTC	37	-	0
Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο	29.2	DS-ZORC	9	4	10
Πεντάνιο-CO ₂	29.1	DSORC-HTC	9	4	100
Κυκλοπεντάνιο-CO ₂	25.2	SORC-HTC	4	-	100

Πίνακας 11: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 160 °C

Δυαδικός συνδυασμός	$\eta_{ex,max}$ (%)	Βέλτιστη διαμόρφωση	$p_{evap}/p_{evap,HT}$ (bar)	$p_{evap,LT}$ (bar)	C_{HTC} (%)
Βουτάνιο-Προπάνιο	42.4	ZORC	38	-	40
Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο	39.8	DS-ZORC	14	4	30
Ισοβουτάνιο-Προπάνιο	39.8	ZORC	35	-	50
Πεντάνιο-Προπάνιο	39.5	ZORC	39	-	10
Πεντάνιο-Βουτάνιο	39.3	DS-ZORC	14	4	50
Πεντανιο-Ισοβουτάνιο	39.3	DS-ZORC	22	6	20
Κυκλοπεντάνιο-Ισοβουτάνιο	39.1	DS-ZORC	22	6	20
Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο	35.9	DS-ZORC	31	8	20
Ισοβουτάνιο-CO ₂	35.2	SORC-HTC	27	-	100
Βουτάνιο-CO ₂	34.9	DSORC-HTC	21	6	100
Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο	33.0	DS-ZORC	11	4	20
Πεντάνιο-CO ₂	32.7	DSORC-HTC	11	4	100
Προπάνιο-CO ₂	30.6	SORC-HTC	40	-	100
Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο	30.4	DSORC-HTC	9	4	100
Κυκλοπεντάνιο-CO ₂	30.4	DSORC-HTC	9	4	100

Με γνώμονα την ανάδειξη της σχετικής βελτίωσης που επιφέρει στην απόδοση του συμβατικού ORC η εισαγωγή δεύτερης βαθμίδας ή/και η υιοθέτηση ζεοτροπικών μειγμάτων, υπολογίστηκε και σχεδιάστηκε στις **Εικόνες 25, 26, 27 και 28** για θερμοκρασίες πηγής 100, 120, 140 και 160 °C αντιστοίχως, η σχετική διαφορά της εξεργειακής απόδοσης ($\Delta\eta_{ex,rel}$) ανάμεσα στο βελτιστοποιημένο μονοβάθμιο/διβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα και το βελτιστοποιημένο μονοβάθμιο διαρρεόμενο από το αποδοτικότερο συστατικό του εκάστοτε μελετούμενου δυαδικού μείγματος. Για κάθε ζεύγος ρευστών, η σχετική διαφορά εξεργειακής απόδοσης ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

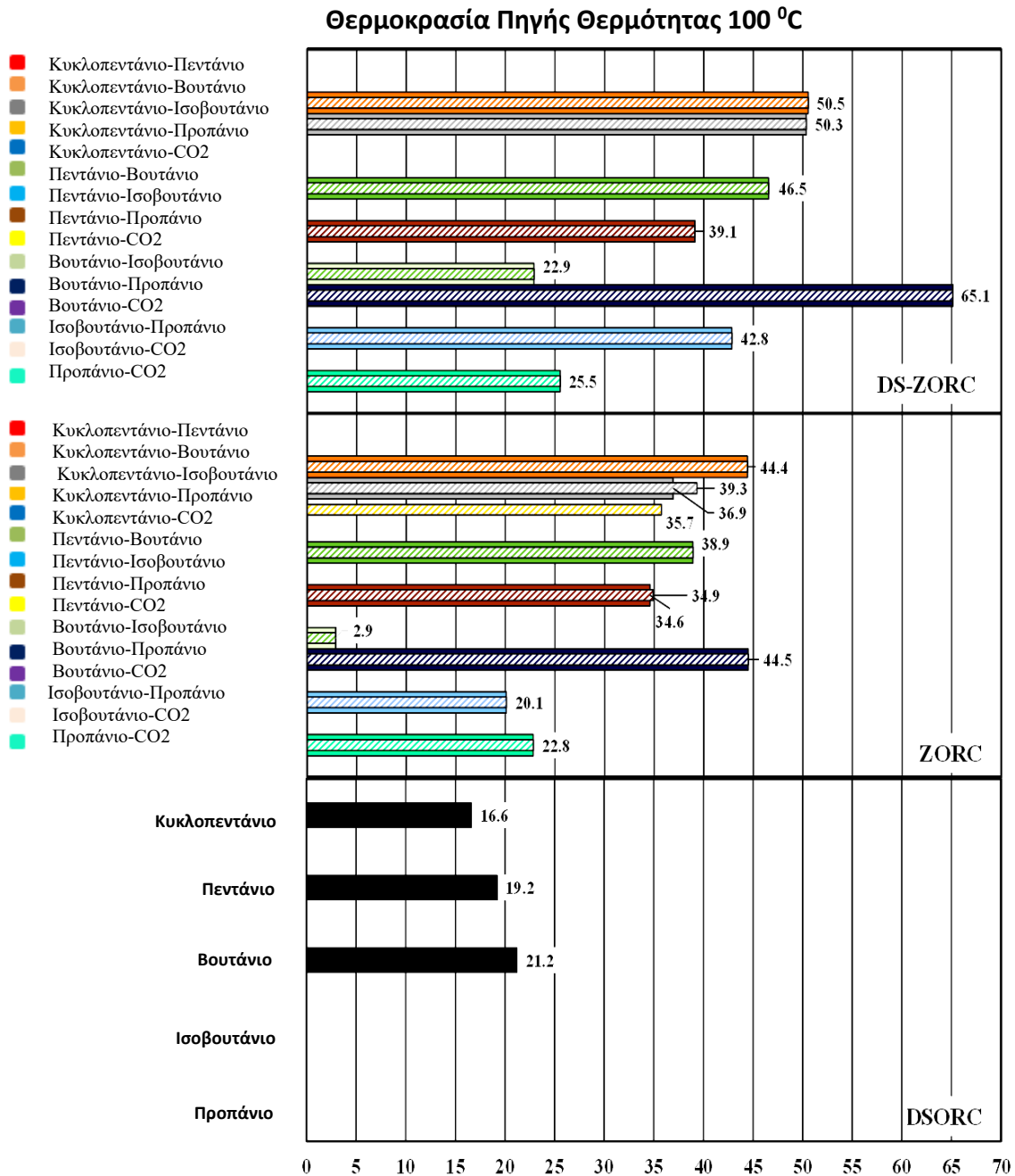
$$\Delta\eta_{ex,rel} = \frac{\eta_{ex,max}^{DS-ZORC/ZORC} - \max(\eta_{ex,max}^{SORC,HTC}, \eta_{ex,max}^{SORC,LTC})}{\max(\eta_{ex,max}^{SORC,HTC}, \eta_{ex,max}^{SORC,LTC})} \quad (3.1.1)$$

Στην εξίσωση αυτή, $\eta_{ex,max}^{DS-ZORC}$ και $\eta_{ex,max}^{ZORC}$ είναι ο μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης των βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων DS-ZORC και ZORC, ενώ $\eta_{ex,max}^{SORC,HTC}$, $\eta_{ex,max}^{SORC,LTC}$ οι μέγιστες εξεργειακές αποδόσεις του μονοβάθμιου συστήματος όταν αυτό λειτουργεί με εργαζόμενο μέσο ένα εκ των συστατικών HTC, LTC του συγκεκριμένου μείγματος, αντίστοιχα.

Για το διβάθμιο σύστημα καθαρών ουσιών, η σχετική διαφορά εξεργειακής απόδοσης δίνεται από:

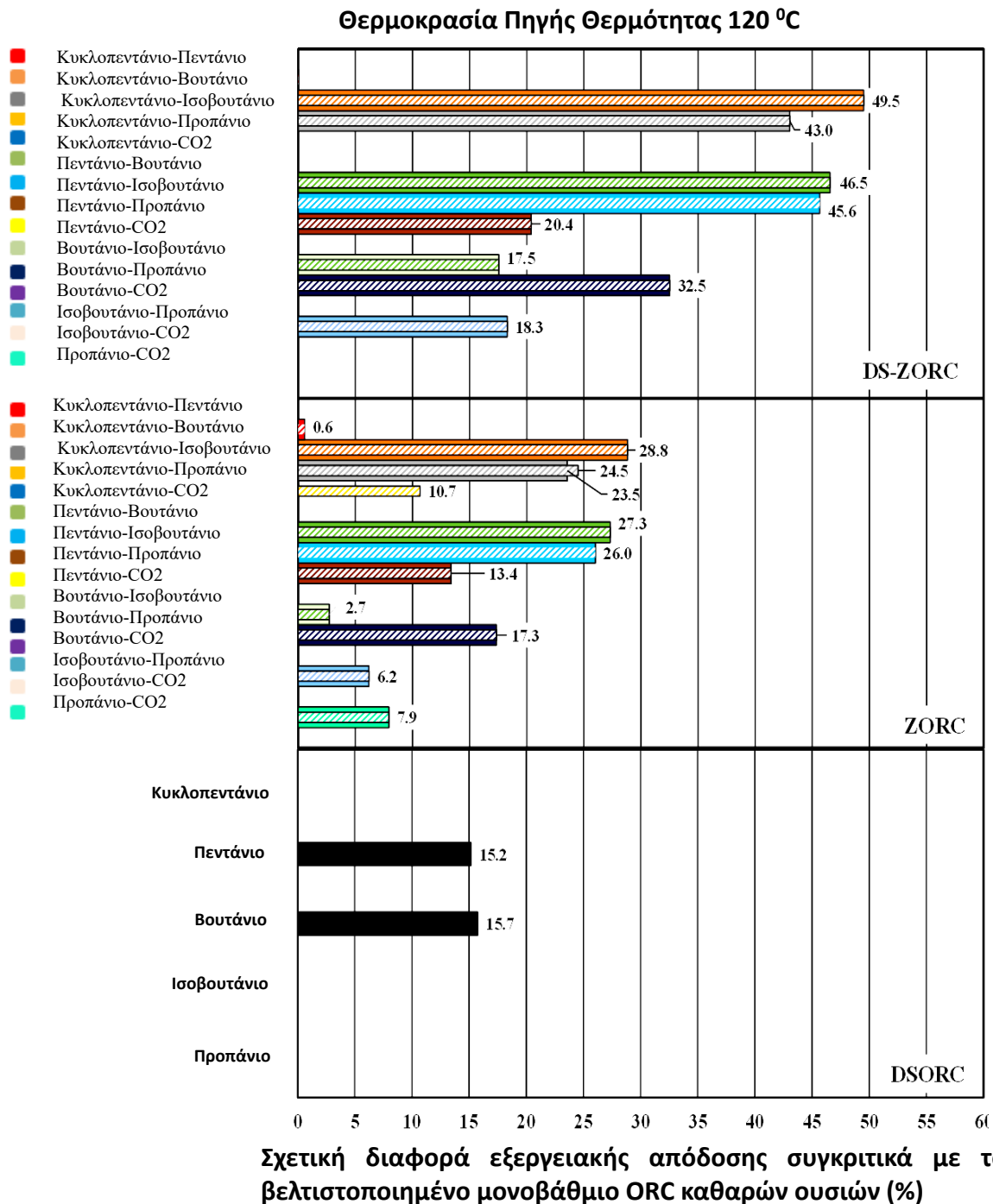
$$\Delta\eta_{ex,rel} = \frac{\eta_{ex,max}^{DSORC} - \eta_{ex,max}^{SORC}}{\eta_{ex,max}^{SORC}} \quad (3.1.2)$$

Στο σημείο αυτό, επισημαίνεται ότι στα διαγράμματα της σχετικής διαφοράς εξεργειακής απόδοσης απεικονίζονται μόνο θετικές τιμές. Με άλλα λόγια, συνδυασμοί ρευστών που δεν παράγουν αποδεκτές λύσεις σε μια εκ των δυο συγκρινόμενων διαμορφώσεων ή παρουσιάζουν ευνοικότερη απόδοση κατά την εισαγωγή τους στο μονοβάθμιο ORC, δεν γίνονται ορατές. Ακόμη, για λόγους πληρέστερης διερεύνησης, έχει επαναληφθεί ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων αυτών επεκτείνοντας τον αρχικό περιορισμό της θερμοκρασιακής ολίσθησης από 20 K → 40 K, με αποτέλεσμα, κάθε οριζόντια στήλη του ραβδογράμματος να αποτελείται από την εξωτερική περιοχή (περίβλημα) που αφορά τον παλιό περιορισμό των 20 K και την εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή που αντιστοιχεί στον νέο περιορισμό των 40 K.

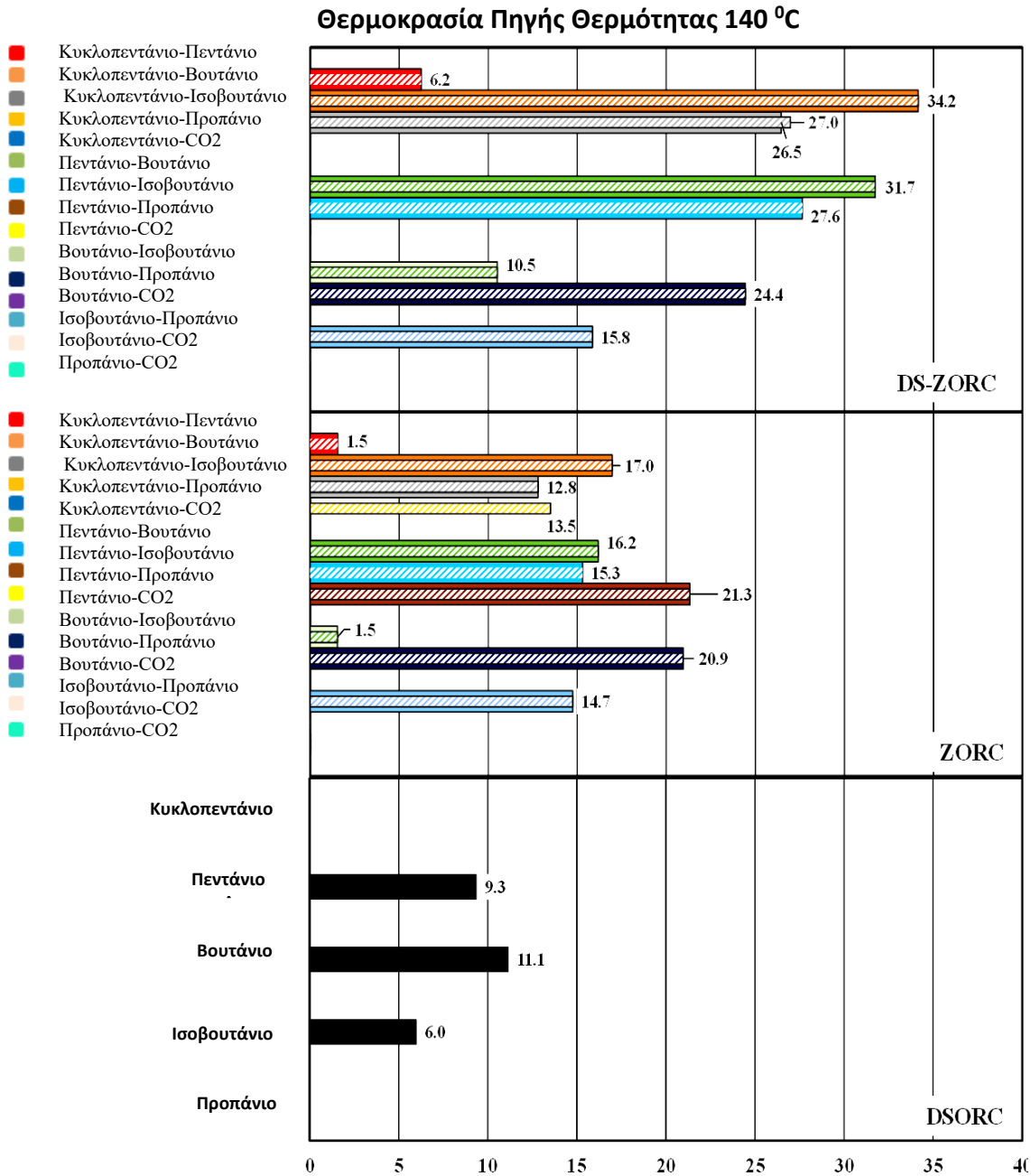


Σχετική διαφορά εξεργειακής απόδοσης συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο μονοβάθμιο ORC καθαρών ουσιών (%)

Εικόνα 25: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 100 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή)

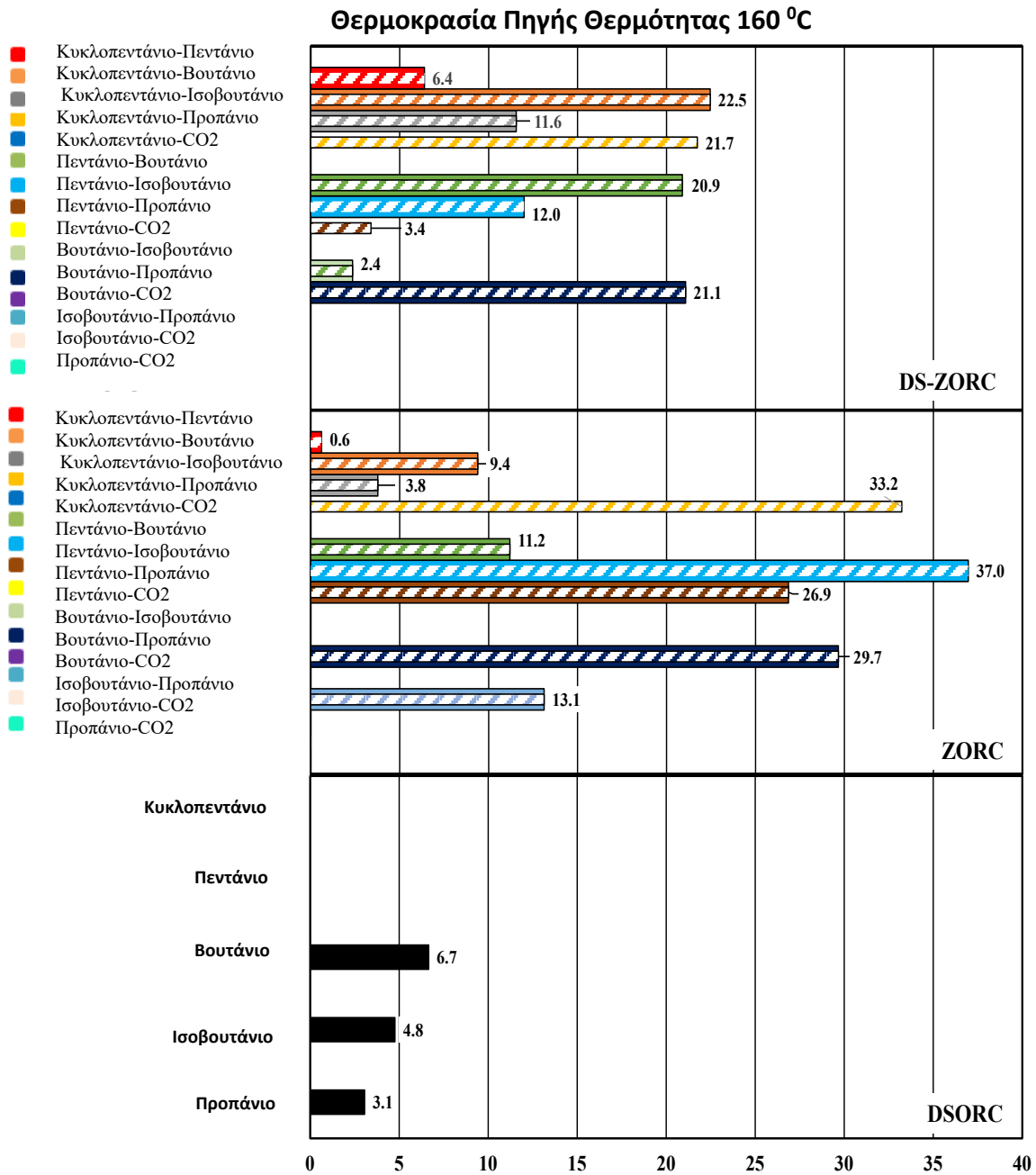


Εικόνα 26: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 120 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή)



Σχετική διαφορά εξεργειακής απόδοσης συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο μονοβάθμιο ORC καθαρών ουσιών (%)

Εικόνα 27: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SOFC για θερμοκρασία πηγής 140 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή)



Σχετική διαφορά εξεργειακής απόδοσης συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο μονοβάθμιο ORC καθαρών ουσιών (%)

Εικόνα 28: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 160 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή)

Μερικά βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τον σχεδιασμό των ανωτέρω ραβδογραμμάτων, συνοψίζονται ως εξής:

- 1)** Για το διβάθμιο ζεοτροπικό ORC, η σχετική βελτίωση στη χαμηλότερη θερμοκρασία πηγής (100 °C) κυμαίνεται από 22.9 % (Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο) έως 50.5 % (Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο). Στην υψηλότερη θερμοκρασία πηγής (160 °C) κυμαίνεται από 2.4 % (Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο) μέχρι 22.5 % (Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο).
- 2)** Για το απλό διβάθμιο σύστημα καθαρών ουσιών, η σχετική εξεργειακή βελτίωση σε θερμοκρασία πηγής 100 °C ξεκινά από το 16.6 % (Κυκλοπεντάνιο) και φτάνει το 21.2 % (Βουτάνιο). Για θερμοκρασία πηγής 160 °C ξεκινά από το 3.1 % (Προπάνιο) και φτάνει το 6.7 % (Βουτάνιο).
- 3)** Για το μονοβάθμιο ζεοτροπικό ORC, η σχετική αύξηση στην απόδοση για την ελάχιστη θερμοκρασία πηγής (100 °C) ποικίλει από το 2.9 % (Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο) έως το 44.5 % (Βουτάνιο-Προπάνιο), ενώ για την μέγιστη θερμοκρασία πηγής (160 °C) αρχίζει από το 0.6 % (Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο) μέχρι και το 37 % (Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο).
- 4)** Με την νέα ρύθμιση της μέγιστης επιτρεπτής θερμοκρασιακής ολίσθησης στους εναλλάκτες θερμότητας (20 K→40 K) η συντριπτική πλειοψηφία των αποτελεσμάτων παραμένουν ίδια, καθώς η μεγιστοποίηση της εξεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται συνήθως από μείγματα χαμηλότερης θερμοκρασιακής ολίσθησης. Ωστόσο, υπάρχει και ένας συνδυασμός ουσιών (Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο) που με την αλλαγή αυτή, καθιστά, πλέον, τη λειτουργία του μονοβάθμιου ζεοτροπικού ORC εξεργειακά ανώτερη σε σχέση με το απλό μονοβάθμιο, για όλες τις θερμοκρασίες πηγής, ενώ παρόμοια είναι η κατάσταση και για το διβάθμιο ζεοτροπικό ORC, το οποίο αποκτά εξεργειακό προβάδισμα για τον ίδιο συνδυασμό, αλλά αποκλειστικά για τη θερμοκρασία των 160 °C.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί πως η εξεργειακή βελτίωση που προκαλούν οι διάφορες διαμορφώσεις ORC συγκριτικά με την απλή μονοβάθμια διάταξη, γίνεται σπουδαιότερη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας, εφόσον και οι 3 ενισχυτικές παραλλαγές ORC (DS-ZORC, DSORC, ZORC) στηρίζονται στην αύξηση το βαθμού αξιοποίησης της προσφερόμενης θερμότητας, ελαχιστοποιώντας την θερμοκρασία του θερμού ρεύματος στην έξοδο του ατμοποιητή/των ατμοποιητών της εκάστοτε διαμόρφωσης. Επιπροσθέτως, με την εκμετάλλευση ενός πεδίου χαμηλής αρχικής θερμοκρασίας, η σχετική βελτίωση που δύναται να επιτευχθεί για κάθε επιπλέον βαθμό που ψύχεται το θερμό ρεύμα της πηγής είναι, εξ'ορισμού, υψηλότερη. Συνολικά, το διβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα, και σε μικρότερο βαθμό, το μονοβάθμιο ζεοτροπικό επιδεικνύουν την μεγαλύτερη πρόοδο, ενώ σαφώς υποδεέστερη εμφανίζεται η δυνατότητα βελτίωσης του διβάθμιου συστήματος με καθαρές ουσίες. Μολαταύτα, υπάρχουν σενάρια όπου η υιοθέτηση του απλού διβάθμιου είναι προτιμητέα, όπως σε περιπτώσεις όπου η λειτουργία των άλλων δυο διατάξεων δεν είναι υλοποιήσιμη για δεδομένο ζεύγος ρευστών ή όταν η βελτίωση που προσφέρουν οι ζεοτροπικές διατάξεις

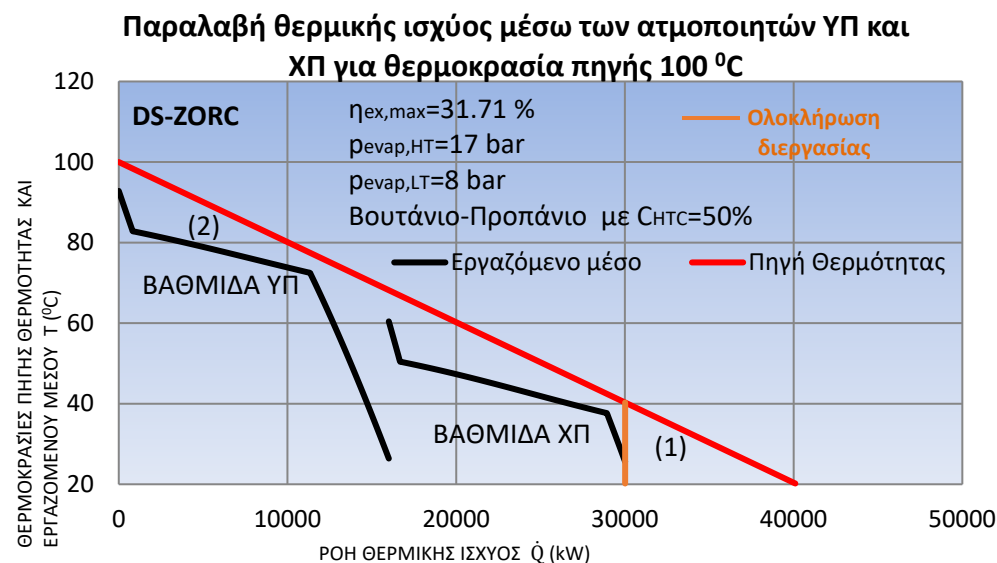
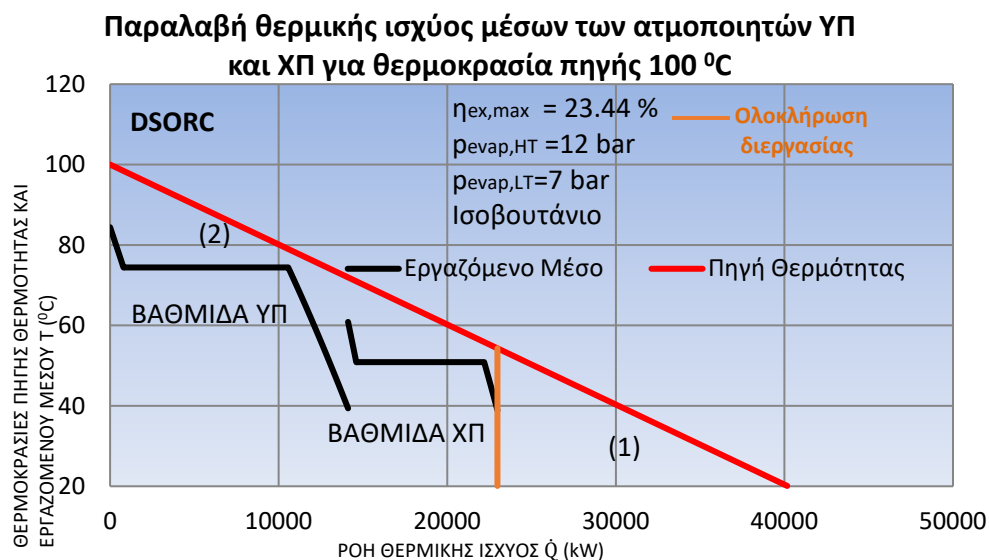
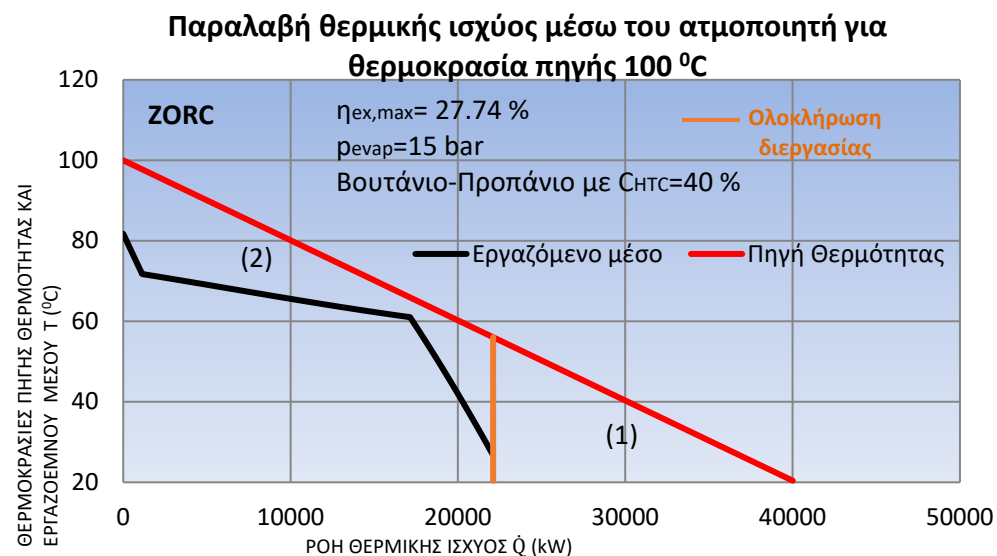
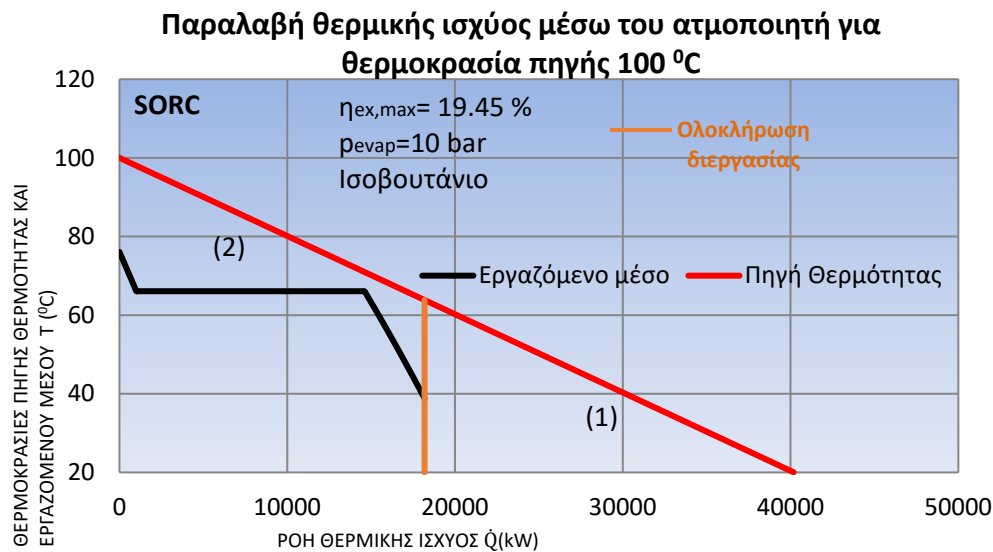
είναι υποτυπώδης συγκρινόμενη με εκείνη μιας απλής μονοβάθμιας ή ακόμα όταν υπάρχει περιορισμένη πικοιλία διαθέσιμων εργαζόμενων μέσων.

Στο ίδιο πλαίσιο, προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα βαθύτερα αίτια της υπεροχής του διβάθμιου ζεοτροπικού κύκλου στις 3 πρώτες θερμοκρασίες (100 °C, 120 °C, 140 °C) και του μονοβάθμιου ζεοτροπικού στην τελευταία (160 °C), πραγματοποιήθηκε απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εργαζόμενου μέσου από το ρεύμα της πηγής θερμότητας. Για κάθε θερμοκρασία, επιλέχθηκε το ρευστό ή ο συνδυασμός ρευστών με την κατάλληλη μοριακή αναλογία που μεγιστοποιεί την απόδοση κάθε διάταξης (SORC, ZORC, DSORC, DS-ZORC) έτσι ώστε να γίνει, κατά το δυνατόν, ακριβέστερη σύγκριση. Στην **Εικόνα 29**, παραθέτονται ενδεικτικά τα διαγράμματα των τεσσάρων διαμορφώσεων για θερμοκρασία πηγής 100 °C, ενώ για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο κεφάλαιο **Παραρτήματα (Εικόνες 35, 37, 39 και 41)**. Στον κατακόρυφο άξονα, τοποθετήθηκαν οι θερμοκρασίες του εργαζόμενου μέσου και του ρεύματος της πηγής θερμότητας έχοντας ως αφετηρία της θερμοκρασία αναφοράς ($T_{ref}=20$ °C), ενώ στον οριζόντιο τοποθετήθηκε η ροή θερμικής ισχύος, δηλαδή η θερμική ισχύς που παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο καθ' όλη τη διαδικασία πρόσδοσης θερμότητας.

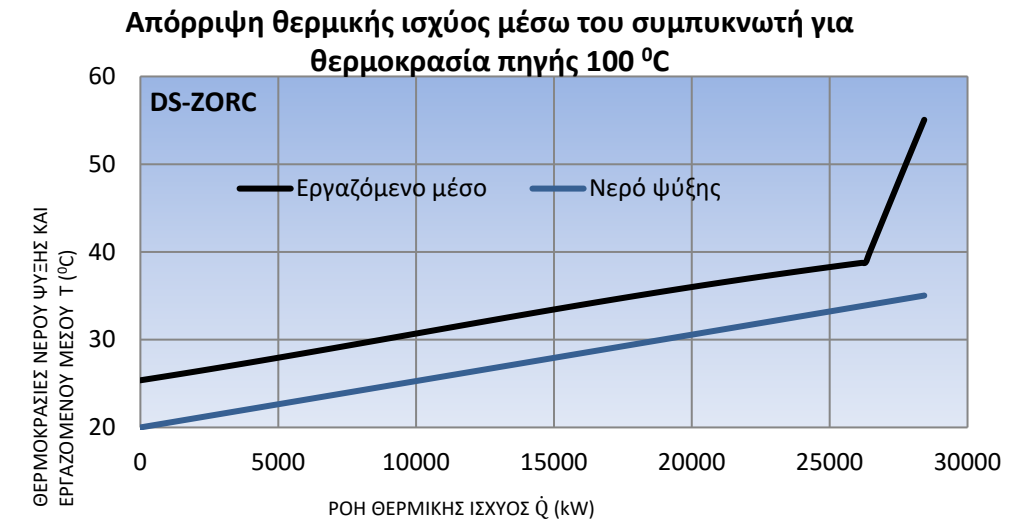
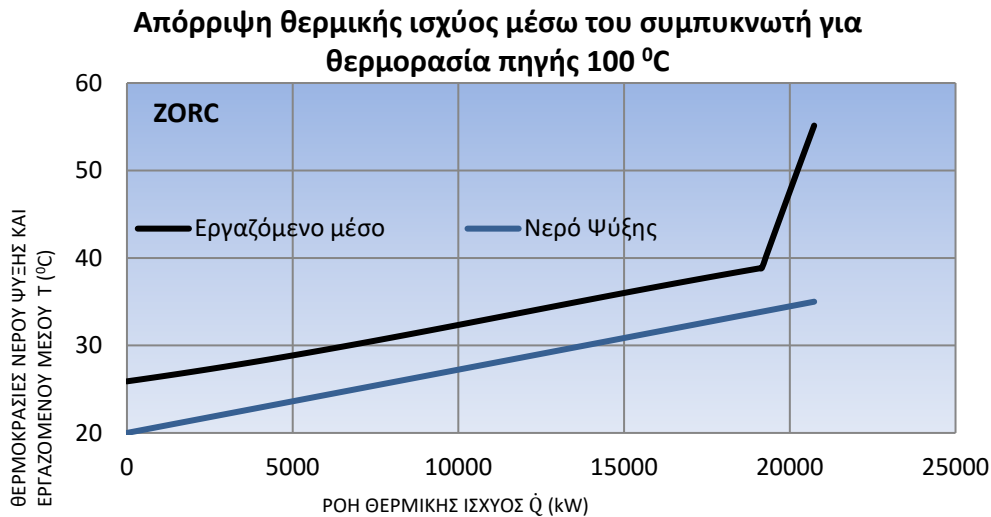
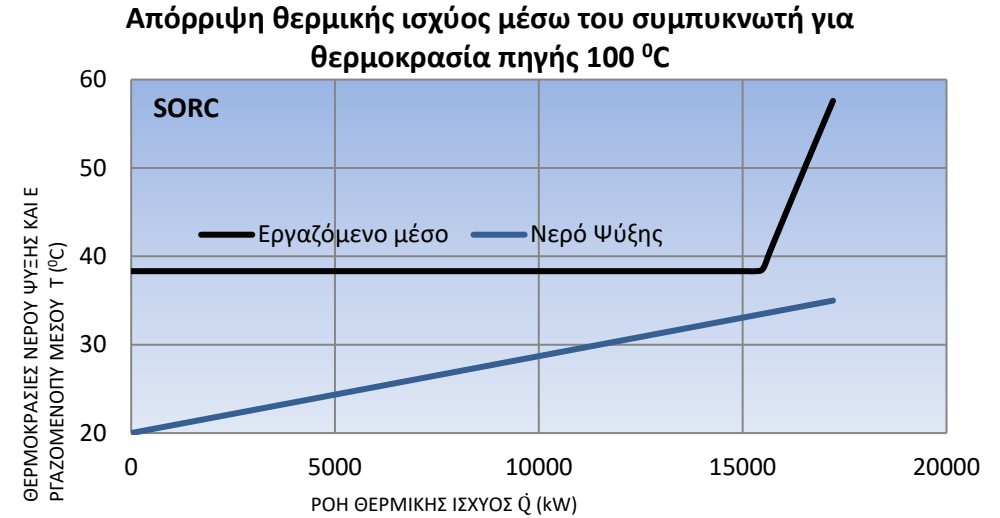
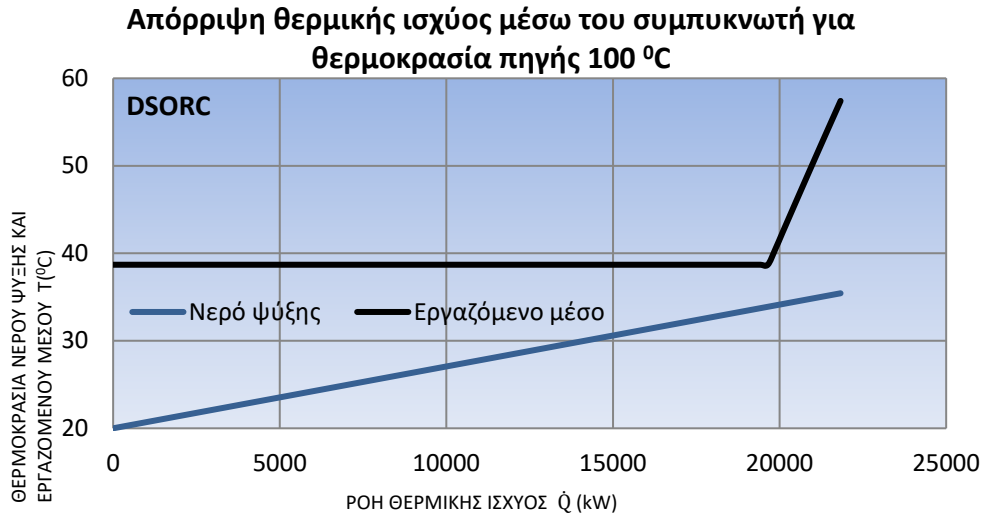
Όπως γίνεται φανερό από την **Εικόνα 29**, παρόλο που το SORC επιτυγχάνει ένα ικανοποιητικό <<ταίριασμα>> μεταξύ των δυο ρευμάτων του ατμοποιητή, εντούτοις δεν καταφέρνει να αξιοποιήσει σε μεγάλο βαθμό την διαθέσιμη θερμική ισχύ της πηγής θερμότητας, αφήνοντας ανεκμετάλλευτο ένα σημαντικό ποσό θερμικής ισχύος, το οποίο γραφικά αποτυπώνεται μέσω της τριγωνικής περιοχής (1). Από την άλλη μεριά, το ZORC, χάρη στη θερμοκρασιακή ολίσθηση κατά την διεργασία της ατμοποίησης, κατορθώνει να μειώσει την θερμική ισχύ που καταλήγει αναξιοποίητη στο περιβάλλον. Επίσης, τα θερμοκρασιακά προφίλ της πηγής θερμότητας και του εργαζόμενου μέσου συγκλίνουν ακόμη περισσότερο, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας από το ένα ρευστό στο άλλο εμφανίζει μειωμένες αναντιστρεπτότητες σε σχέση με την περίπτωση του SORC και επομένως, ο ρυθμός με τον οποίο καταστρέφεται η εξέργεια είναι βραδύτερος. Μάλιστα, ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας αναπαρίσταται γραφικά μέσω της περιοχής (2) ανάμεσα στις δυο καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα δυο ρεύματα του εναλλάκτη. Αναφορικά με το DSORC, οι δυο ατμοποιητές ΥΠ και ΧΠ καταφέρνουν να αξιοποιήσουν ένα μικρό επιπρόσθετο τμήμα της διαθέσιμης θερμικής ισχύος συγκριτικά με το ZORC. Παρόλα αυτά, η εξεργειακή απόδοση του DSORC αποδεικνύεται υποδεέστερη από εκείνη του ZORC, γεγονός που οφείλεται στον αυξημένο ρυθμό καταστροφής εξέργειας, κυρίως ως αποτέλεσμα της δημιουργίας δυο θερμοκρασιακών κατανομών (μια για κάθε βαθμίδα) του εργαζόμενου μέσου. Κάθε κατανομή περιλαμβάνει και από μια ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά, επιδεινώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο το <<ταίριασμα>> του εκάστοτε ρευστού με το ρεύμα της πηγής. Τέλος, το DS-ZORC, επιστρατεύοντας τόσο τις δυο βαθμίδες ατμοποίησης όσο και την χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων κατορθώνει να εκμεταλλευτεί ένα επιπλέον σημαντικό

τιμήμα της προσφερόμενης θερμικής ισχύος, αυξάνοντας περαιτέρω τον βαθμό αξιοποίησης της πηγής συγκριτικά με το DSORC. Αξιοσημείωτο είναι επίσης και το ότι οι καμπύλες του εργαζόμενο μέσου έχουν προσεγγίσει σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη του ρευστού της πηγής, ελαττώνοντας έτσι τις αναντιστρεπτές απώλειες μετάδοσης θερμότητας ακόμα περισσότερο, καθιστώντας το DS-ZORC κυρίαρχο απέναντι σε κάθε άλλη διαμόρφωση, από τη σκοπιά της εξέργειας.

Ακόμη, για λόγους πληρότητας, σχεδιάστηκαν στην **Εικόνα 30** για θερμοκρασία 100 °C τα διαγράμματα \dot{Q} -T που απεικονίζουν την διαδικασία απόρριψης θερμικής ισχύος του εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή κάθε διάταξης. Όπως γίνεται αντιληπτό, για τα συστήματα ZORC και DS-ZORC, το εργαζόμενο μέσο κατά τη διεργασία της συμπύκνωσης υφίσταται θερμοκρασιακή ολίσθηση, με αποτέλεσμα οι δυο καμπύλες του εναλλάκτη αυτού να συγκλίνουν περισσότερο μεταξύ τους σε σχέση με εκείνες των συστημάτων SORC και DSORC. Κατά συνέπεια, παρατηρούνται μικρότεροι ρυθμοί καταστροφής της εξέργειας, ενώ ιδιαίτερα ευνοϊκή αποδεικνύεται και η μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στον θερμικό και επομένως τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης των ζεοτροπικών κύκλων. Για τα διαγράμματα των υπόλοιπων θερμοκρασιών (**Εικόνες 36, 38, 40 και 42**) ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει ξανά στο κεφάλαιο **Παραρτήματα**.



Εικόνα 29: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για όλες τις μελετώμενες διαμορφώσεις (SORC, ZORC, DSORC, DS-ZORC) και σε θερμοκρασία πηγής 100 °C



Εικόνα 30: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για όλες τις μελετώμενες διαμορφώσεις (SORC, ZORC, DSORC, DS-ZORC) όταν η θερμοκρασία της πηγής είναι 100 °C

Θέτοντας ως πρωτεύον κριτήριο τα αποτελέσματα και λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα αλλά και τα αυξημένα κόστη επένδυσης που απαιτεί ο σχεδιασμός ενός διβάθμιου συστήματος, μπορεί να εξαχθεί το ασφαλές συμπέρασμα ότι το απλό διβάθμιο ORC (DSORC) αποτελεί την λιγότερο δαπανηρή στρατηγική ενίσχυσης της απόδοσης ενός συμβατικού συστήματος ORC, καθώς συσχετίζεται με την μικρότερη συνεισφορά στην επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί (μεγιστοποίηση της εξεργειακής απόδοσης), για όλο το εύρος των θερμοκρασιών πηγής και ταυτόχρονα απαιτεί την προμήθεια πολλών επιμέρους στοιχείων συγκριτικά με το απλό ORC. Συνεπώς, οι δυο ανταγωνιστικότερες διαμορφώσεις είναι εκείνες των μη-αζεοτροπικών μειγμάτων, με τη διβάθμια ζεοτροπική (DS-ZORC) να αποκτά ισχυρό προβάδισμα σε θερμοκρασίες 120 και 140 °C, ενώ στις ακραίες θερμοκρασίες (100 και 160 °C), το σχετικό πλεονέκτημα έναντι των μονοβάθμιων ζεοτροπικών (ZORC) φθίνει, προκαλώντας αμφιβολίες για το αν μια τέτοια δαπανηρή επένδυση θα μετέφραζε αυτές τις διαφορές εξεργειακής απόδοσης σε αξιόλογο τεχνοοικονομικό όφελος.

Στο σημείο αυτό, υπογραμμίζεται ότι τα ανωτέρω συμπεράσματα της παρούσας έρευνας αφορούν αποκλειστικά τις συγκεκριμένες περιπτώσεις εργαζόμενων μέσων στις εξεταζόμενες διατάξεις. Με δεδομένη την ευαισθησία της απόδοσης των μελετούμενων διαμορφώσεων ORC στην επιλογή του εργαζόμενου μέσου και στις μεταβολές των θερμοκρασιών της πηγής θερμότητας, τα συμπεράσματα αυτά δεν μπορούν να γενικευτούν για σενάρια ρευστών με διαφορετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες ή για θερμοκρασίες πηγών εκτός του εύρους 100-160 °C.

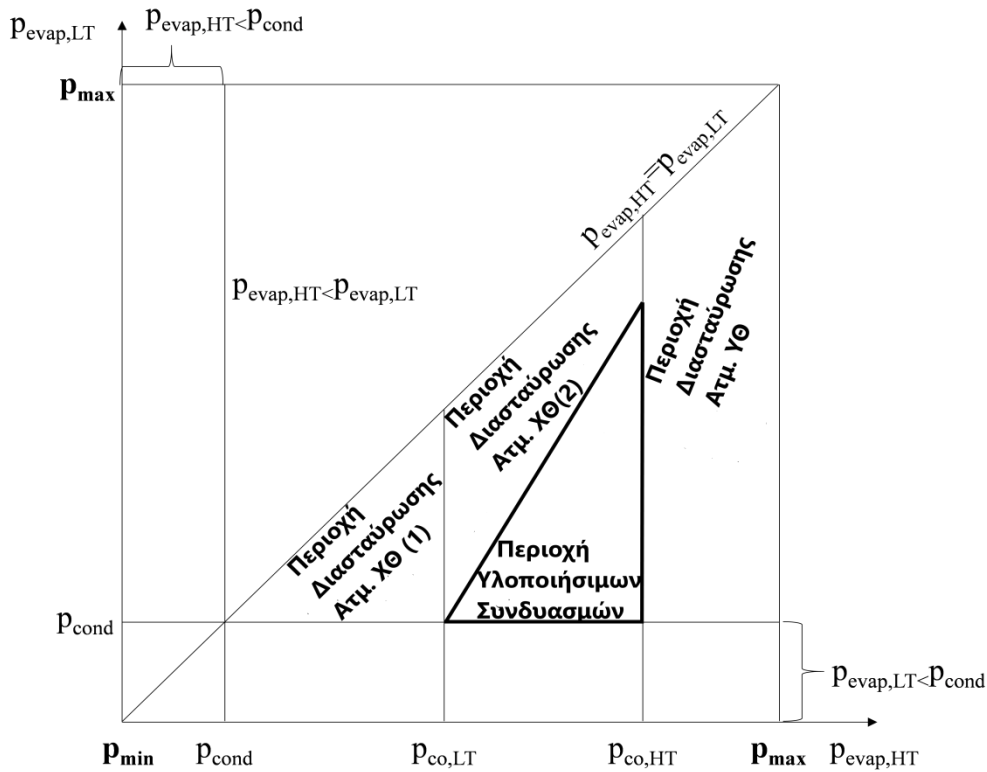
3.2 Θερμοδυναμική εφαρμοσιμότητα και αρχές βελτιστοποίησης

3.2.1 Θερμοδυναμική εφαρμοσιμότητα

Μια κρίσιμη πτυχή των διβάθμιων ζεοτροπικών ORC αφορά την θερμοδυναμική τους εφαρμοσιμότητα σε συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Οι περιορισμοί που σχετίζονται με την επιλογή κατάλληλων πιέσεων ατμοποίησης στις βαθμίδες ΥΘ και ΧΘ ενός διβάθμιου συστήματος με εργαζόμενο μέσο ένα μείγμα σταθερής συγκέντρωσης, αναπαρίστανται γραφικά μέσω του διαγράμματος της **Εικόνας 31**. Πρόκειται, ουσιαστικά, για ένα ποιοτικό διάγραμμα που αντιπροσωπεύει μια γενικευμένη περίπτωση, αφού έχει ως στόχο να διευκολύνει την ανάλυση της διαδικασίας επιλογής των πιέσεων λειτουργίας των δυο ατμοποιητών της εγκατάστασης. Εξαρτώμενο πάντα από τις μοναδικές ιδιότητες κάθε εργαζόμενου μέσου (κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία) και το θερμοκρασιακό επίπεδο της πηγής θερμότητας, δεν αποκλείεται η ακριβής του μορφή να διαφέρει αναλόγως από την εξεταζόμενη περίπτωση.

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 31** στο αρχικό τετράγωνο (πλευράς $p_{\max}-p_{\min}$) οι συνδυασμοί των πιέσεων ατμοποίησης στο άνω τριγωνικό τμήμα (πάνω από τη διαγώνιο $p_{\text{evap,HT}}=p_{\text{evap,LT}}$) δεν είναι εφικτοί (ή θερμοδυναμικά εφαρμόσιμοι), εφόσον οι

πιέσεις του ατμοποιητή ΧΘ θα είναι υψηλότερες εκείνων του ατμοποιητή ΥΘ. Επιπλέον, οι δυο ορθογωνικές περιοχές που είναι προσκείμενες στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα απορρίπτονται, αφού αντιστοιχούν σε πιέσεις ατμοποίησης μικρότερες της πίεσης συμπύκνωσης του κύκλου ORC ($p_{\text{evap,HT}} < p_{\text{cond}}$ και $p_{\text{evap,LT}} < p_{\text{cond}}$). Ακόμη, αν η κρίσιμη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου είναι χαμηλότερη από εκείνη της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας, τότε καθώς αυξάνεται η πίεση του ατμοποιητή ΥΘ πάνω από ένα όριο ($p_{\text{co,HT}}$) δημιουργούνται προβλήματα θερμοκρασιακής διασταύρωσης των δυο ρευμάτων του εναλλάκτη αυτού, οδηγώντας έτσι στο αποκλεισμό της τραπεζοειδούς περιοχής στο δεξί μέρος του διαγράμματος (Περιοχή Διασταύρωσης Ατμ. ΧΘ). Χάρη στο περιορισμό των 5 K που τέθηκε για την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά των ρευμάτων των δυο ατμοποιητών, η διαφορά αυτή στον ατμοποιητή ΥΘ βρίσκεται στο σημείο έναρξης της διεργασίας ατμοποίησης σε όλους τους λειτουργικά-εφικτούς κύκλους. Επομένως, υπάρχει μια θετική συσχέτιση ανάμεσα στην πίεση του ατμοποιητή ΥΘ και της θερμοκρασίας του θερμού ρεύματος της πηγής, αναφορικά με την έξοδο του τελευταίου από τον ατμοποιητή ΥΘ ή την είσοδο του στον ατμοποιητή ΧΘ. Κατά συνέπεια, οι πιέσεις του ατμοποιητή ΥΘ κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι ($p_{\text{co,LT}}$) ελαττώνουν υπερβολικά τη θερμοκρασία της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΘ, προκαλώντας ζητήματα θερμοκρασιακής διασταύρωσης για τα ρεύματα του εναλλάκτη ΧΘ, γεγονός που οδηγεί στην αφαίρεση της τριγωνικής περιοχής στο αριστερό μέρος του διαγράμματος (Περιοχή Διασταύρωσης Ατμ. ΧΘ (1)), συρρικνώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο τους πιθανούς υλοποιήσιμους συνδυασμούς των δυο πιέσεων. Το ίδιο πρόβλημα δημιουργείται ξανά στον ατμοποιητή ΧΘ, όταν η ΧΠ ατμοποίησης υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο πλατό, του οποίου το μέτρο λαμβάνει διαφορετική τιμή, αλλά πάντα εξαρτώμενη από την αρχική επιλογή ΥΠ ατμοποίησης (εντός του διαστήματος [$p_{\text{co,LT}}$, $p_{\text{co,HT}}$]). Έτσι, είναι απαραίτητο να απορριφθεί μια ακόμα περιοχή (Περιοχή Διασταύρωσης Ατμ. ΧΘ (2)) από το διάγραμμα προκειμένου να σχηματισθεί η τελική τριγωνική περιοχή (περιοχή υλοποιήσιμων συνδυασμών) που θα περιλαμβάνει το σύνολο των εφικτών συνδυασμών πιέσεων για την ομαλή λειτουργία ενός διβάθμιου συστήματος. Εντός της εναπομείνουσας περιοχής (των αποδεκτών ζευγών πιέσεων), αύξηση της ΥΠ ωθεί σε αύξηση της θερμοκρασίας πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΠ, επιτρέποντας κατ'αυτό το τρόπο την μεγέθυνση και της ΧΠ ατμοποίησης.



Εικόνα 31: Γραφική αναπαράσταση όλων των περιορισμών που τίθενται για την επιλογή πιέσεων ατμοποίησης στις βαθμίδες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας ενός διβάθμιου συστήματος με εργαζόμενο μέσο σταθερής σύστασης.

Για κάθε μείγμα, αύξηση της συγκέντρωσης του συστατικού HTC, προκαλεί επίσης ανύψωση της κρίσιμης θερμοκρασίας του μείγματος αυτού με, εν γένει, ταυτόχρονη ελάττωση της πίεσης συμπύκνωσης. Εξαιρέση αποτελούν τα μείγματα με συστατικό το CO₂, εξαιτίας κυρίως της αρκετά υψηλότερης κρίσιμης πίεσης του σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλεγμένες χημικές ενώσεις ($p_{crit}=74$ bar). Σε αυτό το πλαίσιο, και στηριζόμενοι στα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι αναγκαία η συμπλήρωση δυο ακραίων-μη υλοποιήσιμων- περιπτώσεων αλλά και μιας τυπικά αποδεκτής λειτουργίας.

1^η περίπτωση ($T_{crit} \ll T_{hs,in}$)

Η περίπτωση αυτή περιλαμβάνει το απλό διβάθμιο σύστημα όταν αυτό διαρρέεται από καθαρή ουσία χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας (πχ CO₂), αλλά και το διβάθμιο ζεotropικό σύστημα με μείγματα που προκύπτουν από ουσίες χαμηλών κρίσιμων θερμοκρασιών ή μείγματα με χαμηλή περιεκτικότητα στο HTC συστατικό τους. Ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες 140-160 °C, εφόσον η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά του ατμοποιητή ΥΠ τοποθετείται στο σημείο έναρξης της προθέρμανσης του εργαζόμενου μέσου, εξαιτίας του σταθερού περιορισμού των 5 K, το ρεύμα της πηγής υποχρεώνεται

να εξέλθει από τον ατμοποιητή ΥΠ με πολύ χαμηλή θερμοκρασία, καθιστώντας αδύνατη την υλοποίηση των διβάθμιων διατάξεων.

2^η περίπτωση ($T_{crit} \gg T_{hs,in}$)

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ το διβάθμιο σύστημα είτε θα διαρέεται από καθαρές ουσίες υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, είτε από ζεοτροπικά μείγματα που προήλθαν από μεγάλες περιεκτικότητες συστατικών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας. Με την θερμοκρασία της πηγής σε χαμηλά επίπεδα (100-120 °C), για να αποφευχθεί το φαινόμενο της θερμοκρασιακής διασταύρωσης των ρευμάτων του ατμοποιητή ΥΠ, πρέπει να επιλεγούν πολύ χαμηλές τιμές πιέσεων ατμοποίησης στην υψηλή βαθμίδα. Αναμενόμενο αποτέλεσμα της επιλογής αυτής είναι η ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΠ, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση θερμοκρασιακής διασταύρωσης στον εναλλάκτη της βαθμίδας ΧΠ, εμποδίζοντας έτσι την ομαλή λειτουργία των διβάθμιων διαμορφώσεων.

3^η περίπτωση ($T_{crit} \approx T_{hs,in}$)

Πρόκειται για τη συνένωση των εξής ενδεχομένων: (α) Το εργαζόμενο μέσο (μείγμα ή καθαρή ουσία) λαμβάνει τιμές όχι πολύ μικρότερες της θερμοκρασίας της πηγής (β) Το εργαζόμενο λαμβάνει τιμές όχι πολύ μεγαλύτερες της θερμοκρασίας της πηγής. Σ'αυτή τη περίπτωση, υπάρχει ένα σύνολο τιμών ΥΠ ατμοποίησης που είναι επαρκώς χαμηλές ώστε να αποτρέψουν την δημιουργία προβλήματων θερμοκρασιακής διασταύρωσης στον ατμοποιητή ΥΠ και παράλληλα να διατηρήσουν σε ικανοποιητικό επίπεδο τη θερμοκρασία του ρεύματος της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΠ, για την αποφυγή αντίστοιχων θεμάτων στη βαθμίδα ΧΠ.

3.2.2 Αρχές βελτιστοποίησης

Οι βασικές πτυχές που σχετίζονται με την βελτιστοποίηση του απλού μονοβάθμιου, του μονοβάθμιου ζεοτροπικού αλλά και της γενικευμένης μορφής του διβάθμιου συστήματος ORC έχουν ήδη συζητηθεί εκτενώς στην βιβλιογραφία [19, 34, 47, 56]. Οι κυριότερες από αυτές συνοψίζονται στους **Πίνακες 12, 13** και **14** που ακολουθούν.

Πίνακας 12: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση ενός μονοβάθμιου ORC καθαρών ουσιών

Για T_{crit} πολύ/αρκετά υψηλότερη της $T_{hs,in}$	Η βέλτιστη πίεση κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.
Για ενδιάμεσες T_{crit} και $T_{hs,in}$	Είναι επιθυμητή η επιλογή υψηλών πιέσεων ατμοποίησης.
Για $T_{hs,in}$ αρκετά/πολύ υψηλότερη της T_{crit}	Πιέσεις ατμοποίησης πολύ κοντά στο ανώτερο όριο καθορίζονται ως βέλτιστες.

Πίνακας 13: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση ενός μονοβάθμιου συστήματος ORC με ζεοτροπικά μείγματα

Για T_{crit} του συστατικού HTC πολύ/αρκετά υψηλότερη της $T_{hs,in}$	Για συστατικά με εντελώς διαφορετικές T_{crit} επιλέγονται μείγματα με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις στο συστατικό HTC.
	Για συστατικά με παραπλήσιες T_{crit} επιλέγονται μείγματα με υψηλότερες συγκεντρώσεις στο συστατικό HTC.
Για T_{crit} του συστατικού LTC σχετικά υψηλότερη της $T_{hs,in}$	Μια πολύ χαμηλή συγκεντρώση στο συστατικό HTC συνδυαστικά με υψηλές πιέσεις ατμοποίησης καθορίζονται ως βέλτιστες.
Για ενδιάμεσες T_{crit} και $T_{hs,in}$	Οι ισορροπημένες μοριακές συγκεντρώσεις των δυο συστατικών στο μείγμα μαζί με την επιλογή μεσαίων έως υψηλών πιέσεων ατμοποίησης καθορίζονται ως βέλτιστες.
Για T_{hs} αρκετά/πολύ υψηλότερη της T_{crit} του συστατικού HTC	Είναι επικρατέστερη η επιλογή υψηλών συγκεντρώσεων στο συστατικό HTC, ενώ σε περιπτώσεις παρόμοιων κρίσιμων θερμοκρασιών, είναι ευνοικότερη μια ισορροπημένη αναλογία των δυο συστατικών στο μείγμα.

Πίνακας 14: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση της γενικευμένης μορφής ενός διβάθμιου συστήματος ORC καθαρών ουσιών

Για πολύ χαμηλές $T_{hs,in}$	Οι βέλτιστες πιέσεις υψηλής και χαμηλής ατμοποίησης διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα
Για $T_{hs,in}$ κοντά στη T_{crit} του ρευστού της βαθμίδα ΧΠ	Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής κατάλληλου συνδυασμού υψηλότερων (σε σχέση με πριν) πιέσεων στις βαθμίδες ΥΠ και ΧΠ, πάντα εξαρτώμενες από τις κρίσιμες θερμοκρασίες των ρευστών κάθε βαθμίδας
Για $T_{hs,in}$ κοντά στη T_{crit} του ρευστού της βαθμίδας ΥΠ	Η βελτιστοποίηση οδηγεί στην επιλογή πολύ υψηλών πιέσεων στην βαθμίδα ΥΠ αλλά σχετικά χαμηλότερες (συγκριτικά με πριν) πιέσεις στην βαθμίδα ΧΠ

Ωστόσο, με βάση τα αποτελέσματα της παραγράφου 3.1 που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εκλογή ρευστών και θερμοκρασιών πηγής θερμότητας της παρούσας εργασίας, διατυπώνονται τα εξής συμπεράσματα αναφορικά με τις αρχές βελτιστοποίησης των διαμορφώσεων ZORC, DSORC και DS-ZORC:

Για το μονοβάθμιο ζεotropικό ORC, παρόλο που η αύξηση της συγκέντρωσης του συστατικού HTC στο μείγμα ωθεί, πρακτικά, σε υψηλότερους ενεργειακούς βαθμούς απόδοσης, εντούτοις οδηγεί σε μείγματα μεγαλύτερης κρίσιμης θερμοκρασίας αλλά και σε υψηλότερο λόγο λανθάνοντος προς αισθητού θερμικού φορτίου, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση του βαθμού αξιοποίησης της πηγής θερμότητας. Παράλληλα, οι ενδιάμεσες αναλογίες των δυο συνιστωσών στο μείγμα, ενισχύουν τη θερμοκρασιακή ολίσθηση που εμφανίζει κατά την αλλαγή φάσης επιδρώντας θετικά στο βαθμό αξιοποίησης της πηγής. Ωστόσο, περιπτώσεις κατά τις οποίες η θερμοκρασιακή ολίσθηση υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό όριο που έχει τεθεί (πχ μείγματα προερχόμενα από οργανικές ενώσεις με εντελώς διαφορετικές κρίσιμες θερμοκρασίες) δεν συμπεριλαμβάνονται στις αποδεκτές καταστάσεις λειτουργίας.

Για τους διβάθμιο κύκλο, η αύξηση των πιέσεων υψηλής και χαμηλής ατμοποίησης έχει θετική επίδραση στον ενεργειακό βαθμό απόδοσης, αλλά όχι απαραίτητα και στον εξεργειακό. Για την μεγιστοποίηση του τελευταίου, που όπως έχει αναφερθεί ισοδυναμεί με μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο βαθμός αξιοποίησης της πηγής θερμότητας, ο οποίος, με αύξηση της ΥΠ, επηρεάζεται

αρνητικά εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας που έχει το ρεύμα της πηγής στη έξοδο του ατμοποιητή ΥΠ. Επειδή, λοιπόν, οι αυξομειώσεις των δυο πιέσεων ατμοποίησης μεταβάλλουν πικοιλοτρόπως την συνολικά παραγόμενη ισχύ καθιστώντας της διαδικασία της βελτιστοποίησης περίπλοκη, είναι αναγκαία η δημιουργία μιας γενικής κατηγοροποίησης με κριτήριο τις κρίσιμες θερμοκρασίες των εργαζόμενων μέσω συγκρινόμενες, πάντα, με τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, όπως η ακόλουθη:

Για την $p_{\text{evap,HT}}$:

- Αν η T_{crit} είναι πολύ χαμηλότερη από την $T_{\text{hs,in}}$, τότε αύξηση της ΥΠ οδηγεί σε αύξηση της ισχύος της βαθμίδας ΥΠ. Έτσι, σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι επιθυμητές οι πολύ υψηλές πιέσεις, καθώς η βέλτιστη πίεση βρίσκεται στο ανώτερο όριο των λειτουργικά εφικτών πιέσεων.
- Αν η T_{crit} είναι αρκετά χαμηλότερη της $T_{\text{hs,in}}$, τότε αύξηση της ΥΠ οδηγεί, αρχικά, σε αύξηση και έπειτα σε μείωση της παραγόμενης ισχύος στη βαθμίδα ΥΠ. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια ενδιάμεση τιμή πίεσης η οποία κορυφώνει την παραγόμενη ισχύ της υψηλής βαθμίδας. Ωστόσο, η πίεση αυτή μπορεί να μην ταυτίζεται επακριβώς με την βέλτιστη της βαθμίδας αυτής, καθώς μια περαιτέρω αύξηση της τιμής αυτής μπορεί αφενός να μειώνει την ισχύ της υψηλής βαθμίδας αλλά ταυτόχρονα να προκαλεί μια ποσοτικά μεγαλύτερη αύξηση ισχύος στη βαθμίδα ΧΠ, γεγονός που θα μεγιστοποιεί την συνολικά παραγόμενη ισχύ.
- Αν η T_{crit} είναι σχετικά χαμηλότερη/υψηλότερη από την $T_{\text{hs,in}}$, τότε η βέλτιστη ΥΠ θα βρίσκεται ξανά σε μια ενδιάμεση τιμή αλλά αυτή τη φορά θα προσεγγίζει το κατώτερο/ανώτερο όριο πίεσης αναλόγως την εξεταζόμενη περίπτωση.
- Αν η T_{crit} είναι αρκετά/πολύ υψηλότερη της $T_{\text{hs,in}}$, τότε αύξηση της ΥΠ οδηγεί σε ραγδαία μείωση της ισχύος στη βαθμίδα ΥΠ και παράλληλα σε αύξηση της ισχύος της βαθμίδας ΧΠ λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας του ρεύματος της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΠ. Όμως, επειδή το κέρδος σε ισχύ είναι σαφώς υποδεέστερο των απωλειών που προκύπτουν, η συνολικά παραγόμενη ισχύς μειώνεται υποδεικνύοντας έτσι ότι η βέλτιστη πίεση υψηλής ατμοποίησης θα κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

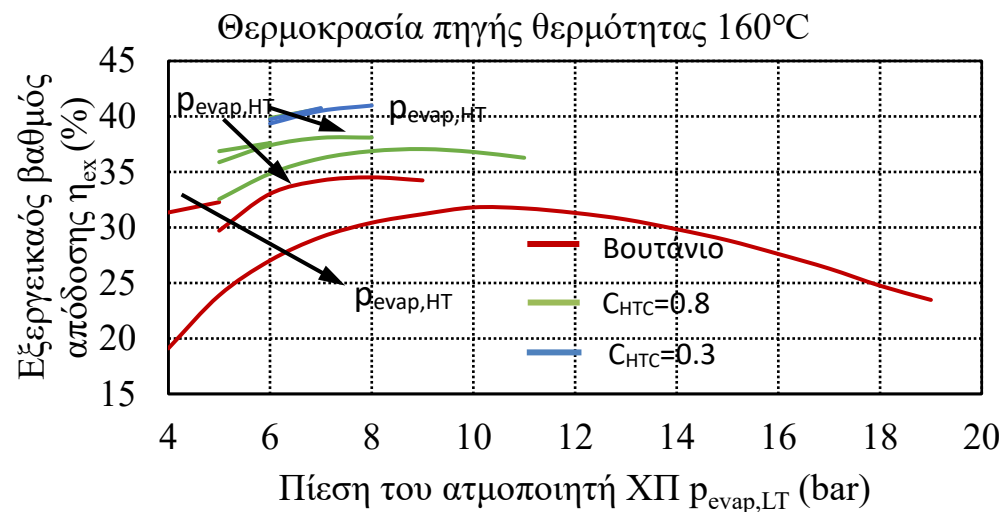
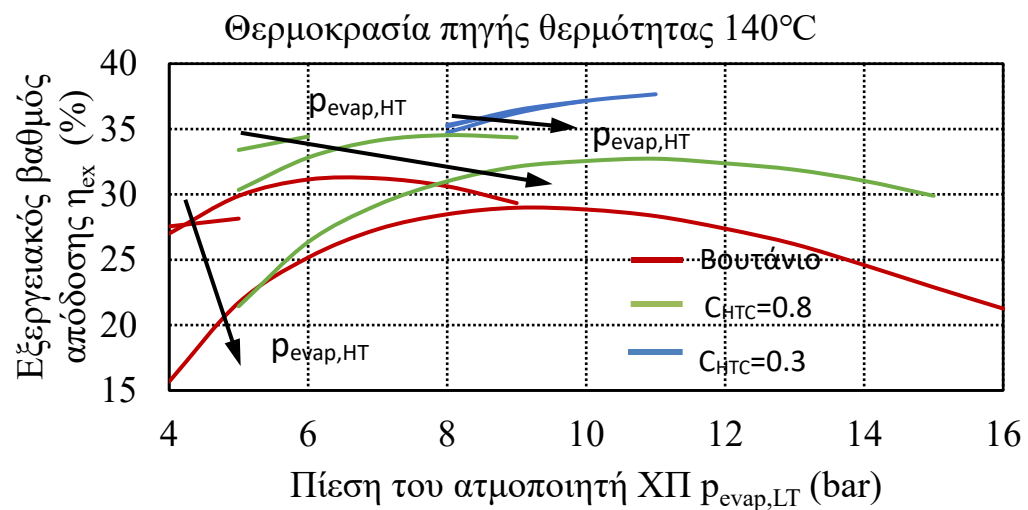
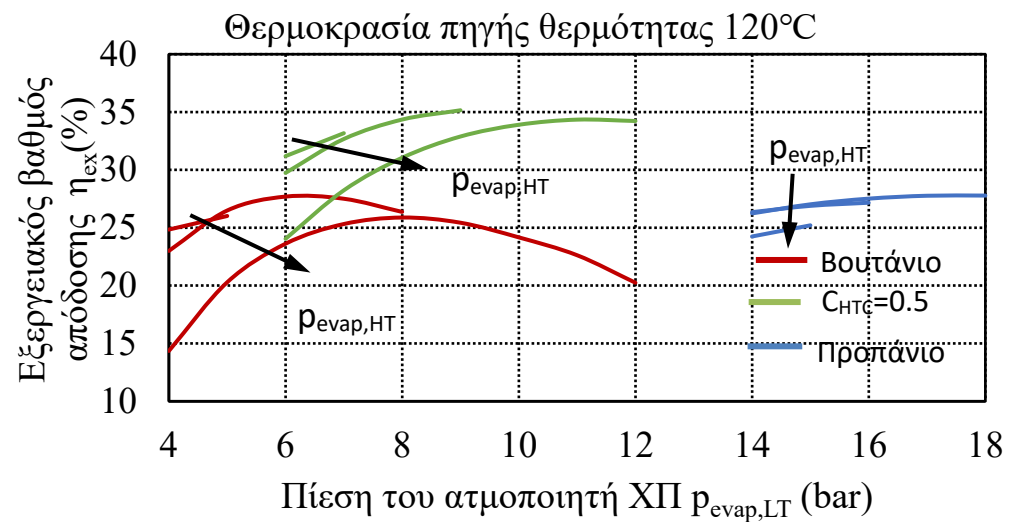
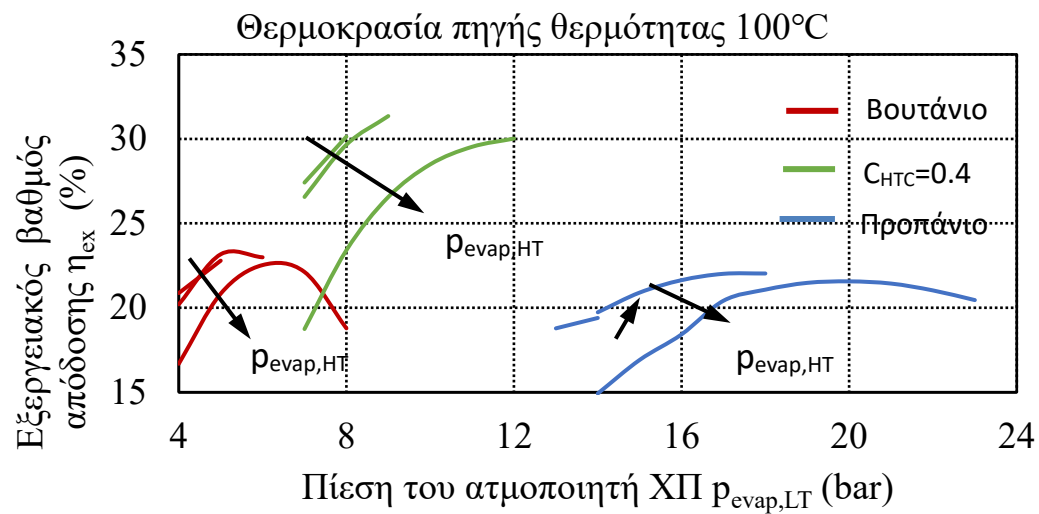
Για την $p_{\text{evap,LT}}$:

- Για χαμηλές πιέσεις υψηλής ατμοποίησης (T_{crit} σχετικά/αρκετά/πολύ υψηλότερη της $T_{\text{hs,in}}$) η θερμοκρασία του ρεύματος της πηγής στην είσοδο του ατμοποιητή ΧΠ θα είναι χαμηλή και επομένως είναι συμφέρουσα η μεγιστοποίηση της ΧΠ, αφού η αύξηση των υπόλοιπων υλοποιήσιμων πιέσεων θα προσφέρουν αύξηση της παραγόμενης ισχύος στη χαμηλή βαθμίδα.

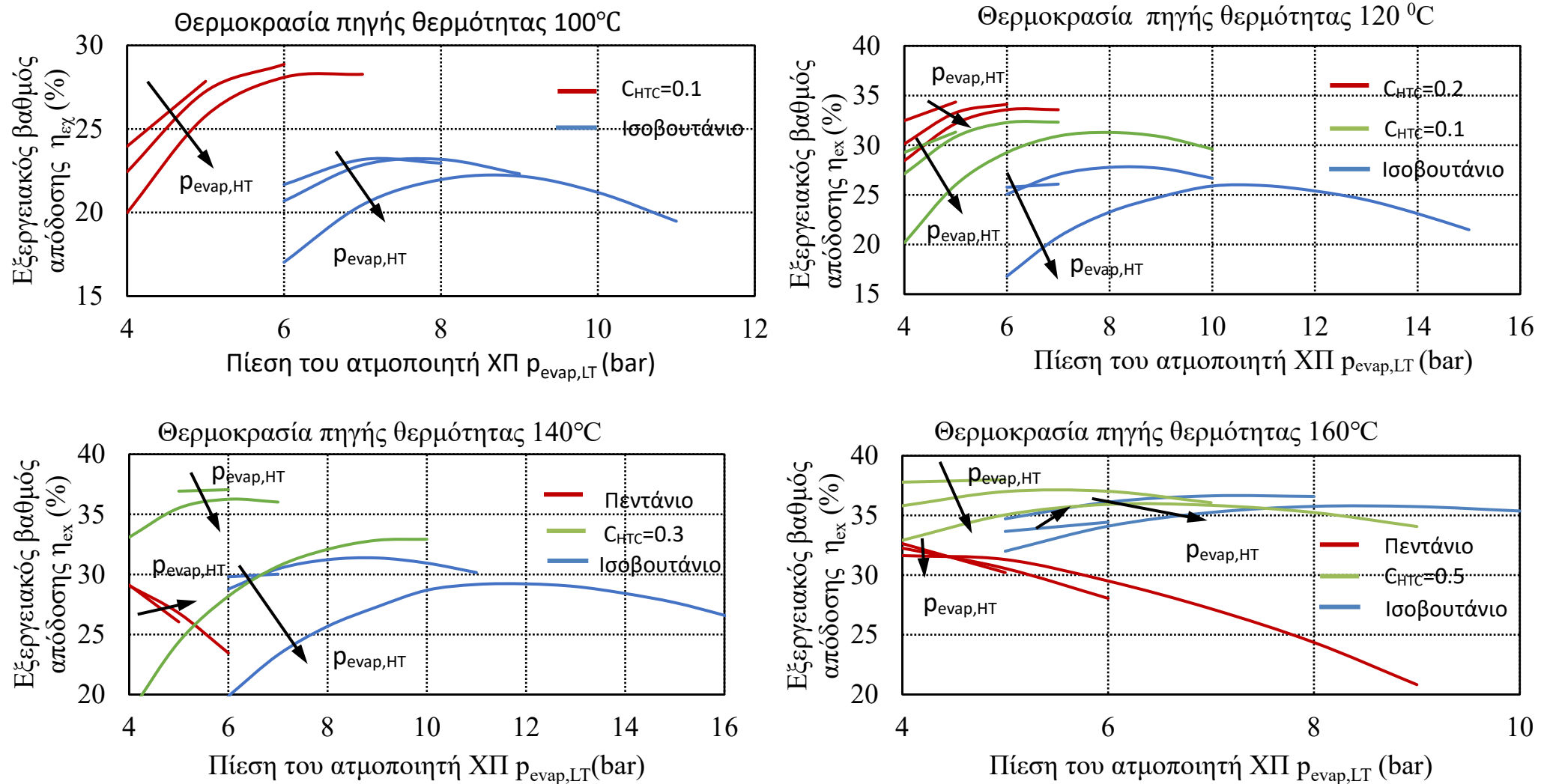
- Για ενδιάμεσες ή υψηλότερες πιέσεις υψηλής ατμοποίησης (T_{crit} σχετικά/αρκετά/πολύ χαμηλότερη της $T_{hs,in}$) υπάρχει η δυνατότητα επιλογής υψηλότερων (σε σχέση με πριν) πιέσεων στην βαθμίδα ΧΠ αλλά όχι ιδιαίτερος υψηλές, καθώς η ισχύς της βαθμίδας αυτής είναι αύξουσα μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο πίεσης και έπειτα εμφανίζει φθίνουσα συμπεριφορά.

Η βελτιστοποίηση του διβάθμιου ζεοτροπικού ORC αποτελεί συγχώνευση των αρχών που διέπουν την βελτιστοποίηση τόσο του απλού διβάθμιου όσο και του μονοβάθμιου ζεοτροπικού κύκλου. Όμως, εξαιτίας της σύνθετης αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση, δεν είναι εφικτή η αναγνώριση μιας ρητής κατευθυντήριας γραμμής που να εφαρμόζεται για όλα τα ζεύγη ρευστών και για πληθώρα θερμοκρασιών πηγής, έτσι ώστε να επιλεγούν κατάλληλα η συγκέντρωση του συστατικού HTC συνδυαστικά με τις πιέσεις ατμοποίησης του κύκλου αυτού. Ωστόσο, ένα γενικό πόρισμα που μπορεί να εξαχθεί, αφορά την απόρριψη συστατικών ή μοριακών συγκεντρώσεων συστατικών που έχουν ως αποτέλεσμα εργαζόμενα μέσα με κρίσιμες θερμοκρασίες υπερβολικά μεγαλύτερες ή μικρότερες των θερμοκρασιών της πηγής θερμότητας.

Η ισχύς του παραπάνω πορίσματος αποδεικνύεται μέσω της παρουσίασης δυο περιπτώσεων διαφορετικών ζευγών οργανικών ουσιών (Βουτάνιο-Προπάνιο και Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο). Όπως φαίνεται στις **Εικόνες 32** και **33**, έχουν σχεδιαστεί τα διαγράμματα της εξεργειακής απόδοσης συναρτήσει της ΧΠ ατμοποίησης για δεδομένες ΥΠ ατμοποίησης και συγκεντρώσεις του συστατικού HTC, σε όλες τις μελετούμενες θερμοκρασίες πηγής. Σε κάθε διάγραμμα, αναπαρίστανται οι περιπτώσεις μιας ενδιάμεσης και δυο ακραίων μοριακών αναλογιών (με τις τελευταίες να αντιστοιχούν και σε καθαρές ουσίες), ενώ τα εικονιζόμενα βέλη υποδεικνύουν κάθε φορά την κατεύθυνση αυξανόμενης ΥΠ ατμοποίησης.



Εικόνα 32: Διαγράμματα μεταβολών της εξεργειακής απόδοσης της διβάθμιας διάταξης (η_{ex}) όταν αυτή λειτουργεί με τον συνδυασμό Βουτανίου-Προπανίου σε επιλεγμένες μοριακές συγκεντρώσεις και για τις 4 θερμοκρασίες πηγής, συναρτήσει των πιέσεων υψηλής ($p_{evap,HT}$) και χαμηλής ατμοποίησης ($p_{evap,LT}$). Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση αυξανόμενης υψηλής πίεσης ατμοποίησης.



Εικόνα 33: Διαγράμματα μεταβολών της εξεργειακής απόδοσης της διβάθμιας διάταξης όταν αυτή λειτουργεί με τον συνδυασμό Πεντανίου-Ισοβουτανίου σε επιλεγμένες μοριακές συγκεντρώσεις και για τις 4 θερμοκρασίες πηγής, συναρτήσει των πιέσεων υψηλής ($p_{evap,HT}$) και χαμηλής ατμοποίησης ($p_{evap,LT}$). Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση αυξανόμενης υψηλής πίεσης ατμοποίησης.

4. Συμπεράσματα

4.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και η αξιολόγηση της εξεργειακής συμπεριφοράς μιας διβάθμιας διάταξης ORC διαρρεόμενης από ζεοτροπικά ρευστά (DS-ZORC), προερχόμενα από την ανάμειξη φυσικών υδρογονανθράκων και CO₂, όπως επίσης και η σύγκριση της με άλλες διαμορφώσεις όπως αυτές του απλού μονοβάθμιου (SORC), του μονοβάθμιου ζεοτροπικού (ZORC) και του απλού διβάθμιου ORC (DSORC) συστήματος. Για θερμοκρασίες πηγής 100, 120, 140 και 160 °C τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Από θερμοδυναμική σκοπιά, ο διβάθμιος ζεοτροπικός κύκλος εμφανίζεται ως η ελκυστικότερη επιλογή μεταξύ των άλλων διαμορφώσεων, ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες 100, 120 και 140 °C όπου και επιτυγχάνει την υψηλότερη εξεργειακή απόδοση με τιμές 31.7 %, 35.5 % και 38 % αντίστοιχα. Στους 160 °C, την πρώτη θέση καταλαμβάνει το μονοβάθμιο ζεοτροπικό ORC με εξεργειακό βαθμό απόδοσης 42.4 % και έπειτα ακολουθεί το διβάθμιο ζεοτροπικό με 39.8 %. Από τις τρεις παραλλαγές του συμβατικού ORC, την χειρότερη επίδοση παρουσιάζει το απλό διβάθμιο ORC που όμως ενδείκνυται η εφαρμογή του σε περιπτώσεις όπου υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα εργαζόμενων μέσων.
- Μερικά από τα αποδοτικότερα ζεύγη ρευστών για την λειτουργία του διβάθμιου ζεοτροπικού ORC είναι: Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο, Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο και το Βουτάνιο-Προπάνιο σε πικοιλία συγκεντρώσεων του HTC συστατικού τους.
- Η θερμοδυναμική υπεροχή της διβάθμιας ζεοτροπικής διάταξης είναι σαφής σε θερμοκρασίες 120 και 140 °C, γεγονός που μπορεί να αντισταθμίσει το πρόσθετο κόστος και τη πολυπλοκότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης έναντι της οικονομικότερης μονοβάθμιας ζεοτροπικής. Από την άλλη μεριά, σε θερμοκρασίες 100 και 160 °C το εξεργειακό όφελος δεν φαίνεται ικανό να αντισταθμίσει την επιπλέον δαπάνη και ενδεχομένως η μονοβάθμια ζεοτροπική διάταξη να αποτελεί την πιο συμφέρουσα επένδυση.
- Εξαιτίας της έμφυτης πολυπλοκότητας του, το διβάθμιο ζεοτροπικό σύστημα υπόκειται σε πληθώρα θερμοδυναμικών περιορισμών, οι οποίοι καθιστούν την εφαρμογή του υλοποιήσιμη μόνο κάτω από συγκεκριμένες οριακές συνθήκες. Επιπλέον, η επιλογή της βέλτιστης αναλογίας των συστατικών του εργαζόμενου μέσου του κύκλου αυτού, συνδυαστικά με την επιλογή των βέλτιστων πιέσεων ατμοποίησης, παίζουν καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό του καθώς έχουν άμεση επίδραση στην εφαρμοσιμότητα αλλά και την απόδοση του.
- Γενικά, είναι προτιμητέα η επιλογή δυαδικών συνδυασμών και συγκεντρώσεων που αποδίδουν ζεοτροπικά μείγματα με κρίσιμες θερμοκρασίες όχι υπερβολικά ανώτερες ή κατώτερες της θερμοκρασίας πηγής θερμότητας. Βέβαια, εφόσον η παρούσα

έρευνα βασίστηκε σε συγκεκριμένη γκάμα ρευστών, σε επιλεγμένες θερμοκρασίες πηγής και οριακές συνθήκες, δεν είναι εφικτή η έκδοση ρητών κατευθυντήριων γραμμών για τη βελτιστοποίηση κάθε διβάθμιου ζεοτροπικού ORC, καθώς υπεισέρχονται πληθώρα παραγόντων και ρυθμιστικών παραμέτρων που επηρεάζουν το εύρος των αποδεκτών λύσεων και φυσικά, την απόδοση του εξεταζόμενου ORC.

4.2 Προτάσεις μελλοντικής διερεύνησης

Με δεδομένο ότι η ιδέα της εισαγωγής ζεοτροπικών ρευστών σε διαβάθμιες διατάξεις είναι σχετικά πρόσφατη και οι αναφορές που υπάρχουν είναι λιγοστές, γίνεται παράθεση των ακόλουθων προτάσεων διερεύνησης, ως μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας:

- Μελέτη των ίδιων ρευστών (Πεντάνιο, Κυκλοπεντάνιο, Βουτάνιο, Ισοβουτάνιο, Προπάνιο και CO_2) για τον ίδιο διβάθμιο ζεοτροπικό κύκλο αλλά σε διαφορετικές θερμοκρασίες πηγής θερμότητας ($>160\text{ }^\circ\text{C}$ ή $<100\text{ }^\circ\text{C}$).
- Μελέτη διαφορετικών καθαρών ρευστών ή/και ενδεχομένως περισσότερων μειγμάτων που θα προκύπτουν από μεγαλύτερη πικοιλία συγκεντρώσεων των δυαδικών συνιστωσών τους (πχ μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του συστατικού HTC με βήμα 0.05 συγκριτικά με το 0.1 της εργασίας αυτής).
- Μελέτη της εξεργειακής απόδοσης του διβάθμιου-εν σειρά-συστήματος (STORC) με ζεοτροπικά ρευστά.
- Μελέτη που θα αφορά την τεχνοοικονομική αξιολόγηση του εξεργειακού οφέλους που προσφέρει ο διβάθμιος ζεοτροπικός κύκλος, για τις περιπτώσεις θερμοκρασιών όπου δεν παρουσιάζει σαφές εξεργειακό προβάδισμα έναντι των υπολοίπων διαμορφώσεων.

5. Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Μειονεκτήματα εφαρμογής διάφορων κατηγοριών οργανικών ουσιών σε κύκλο ORC [12].....	19
Πίνακας 2: Συνηθέστερα εργαζόμενα μέσα σε εμπορικές εφαρμογές [9].....	21
Πίνακας 3: Σύνοψη πλεονεκτημάτων από την εφαρμογή διβάθμιων συστημάτων και τη χρήση ζεοτροπικών μειγμάτων και προσδοκώμενα οφέλη από τη λειτουργία διβάθμιων ζεοτροπικών συστημάτων.	45
Πίνακας 4: Επιλεγμένα εργαζόμενα μέσα και βασικές ιδιότητες τους.....	57
Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας.....	58
Πίνακας 6: κυριότερες παραδοχές και παράμετροι προς βελτιστοποίηση.....	59
Πίνακας 7: Μεταβλητές βελτιστοποίησης, εύρος αναζήτησης και βήμα για κάθε διαμόρφωση	65
Πίνακας 8: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 100 °C.....	68
Πίνακας 9: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 120 °C.....	69
Πίνακας 10: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 140 °C.....	70
Πίνακας 11: Οι βέλτιστες διαμορφώσεις κάθε δυαδικού συνδυασμού ρευστών μαζί με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης τους και τις βελτιστοποιημένες μεταβλητές που τους αντιστοιχούν σε θερμοκρασίας πηγής 160 °C.....	71
Πίνακας 12: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση ενός μονοβάθμιου ORC καθαρών ουσιών.....	86
Πίνακας 13: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση ενός μονοβάθμιου συστήματος ORC με ζεοτροπικά μείγματα	86
Πίνακας 14: Βασική καθοδήγηση για την βελτιστοποίηση της γενικευμένης μορφής ενός διβάθμιου συστήματος ORC καθαρών ουσιών.....	87

6. Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης απλού θερμοδυναμικού κύκλου Clausius-Rankine [1].....	14
Εικόνα 2: Αποκλίσεις μεταξύ του ιδανικού και του πραγματικού κύκλου Rankine σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [2].....	15
Εικόνα 3: (α) Επίδραση της πτώσης πίεσης του συμπυκνωτή ($P_2 \rightarrow P_2'$) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) (β) Επίδραση της αύξησης της υπερθέρμανσης του ατμού ($T_1 \rightarrow T_1'$) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) (γ) Επίδραση της αύξησης της πίεσης λειτουργίας του ατμοπαραγωγού ($P_4 \rightarrow P_4'$) στο καθαρό παραγόμενο έργο σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) [3].....	16
Εικόνα 4: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης ενός βασικού ORC [6] (β) Οι μεταβολές του εργαζόμενου μέσου ενός βασικού ORC σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας [7].....	17
Εικόνα 5: Καμπύλες κορεσμού οργανικών ρευστών και νερού σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [9].....	18
Εικόνα 6: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με ανακόμιση θερμότητας (β) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με αναθέρμανση (γ) Μονογραμμικό διάγραμμα ORC με αναγεννητική προθέρμανση [7].....	26
Εικόνα 7: Διάγραμμα φάσης υπό σταθερή πίεση δυαδικού ζεοτροπικού (μη-αζεοτροπικού) μείγματος [18].....	27
Εικόνα 8: Καμπύλες κορεσμού ζεοτροπικών μειγμάτων M2: R245fa/R152a 0.9/0.1 και M3: R245fa/R152a 0.7/0.3 εν συγκρίσει με την καμπύλη της καθαρής ουσίας M1: R245fa [20].....	28
Εικόνα 9: Θερμοκρασιακή ολίσθηση ζεοτροπικού μείγματος κατά τις διεργασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης του [22].....	29
Εικόνα 10: Μονογραμμικό διάγραμμα της απλούστερης διαμόρφωσης ενός διβάθμιου συστήματος ORC [35].....	32
Εικόνα 11: Μεθολογία εν σειρά σύνδεσης N βαθμίδων ατμοποίησης τροφοδοτούμενες από κοινή πηγή θερμότητας [35].....	33
Εικόνα 12: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος ORC δυο διαδοχικών βαθμίδων [35].....	33
Εικόνα 13: Μεθοδολογία διαδοχικής σύνδεσης N βαθμίδων ατμοποίησης [35].....	34
Εικόνα 14: Γενική μορφή πολυβάθμιου συστήματος ORC [36].....	35
Εικόνα 15: Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος ORC (PTORC) και αναπαράσταση μεταβολών εργαζόμενου μέσου εντός του διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) [40].....	39

Εικόνα 16: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος με επαγωγικό στρόβιλο (β) Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) των μεταβολών του εργαζόμενου μέσου στο διβάθμιο-παράλληλο-σύστημα [41]	39
Εικόνα 17: Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-εν σειρά-συστήματος (STORC) με ενιαίο εκτονωτή (β): Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) των μεταβολών του εργαζόμενου μέσου στο διβάθμιο-εν σειρά-σύστημα [41].....	40
Εικόνα 18: Ποιοτικό διάγραμμα θερμοκρασιακών προφίλ εργαζόμενου μέσου και ρεύματος της πηγής θερμότητας συναρτήσεως του ποσού θερμότητας που μεταφέρθηκε στον κύκλο (α) ενός μονοβάθμιου ORC συστήματος και (β) ενός διβάθμιου ORC συστήματος [44]	41
Εικόνα 19: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα απλού μονοβάθμιου ORC (β) Μεταβολές καθαρής οργανικής ουσίας εντός του μονοβάθμιου συστήματος (SORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) (γ) Μεταβολές ζεοτροπικού μείγματος εντός του μονοβάθμιου συστήματος (ZORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s).	50
Εικόνα 20: (α) Μονογραμμικό διάγραμμα διβάθμιου-παράλληλου-συστήματος ORC (β) Μεταβολές καθαρής οργανικής ουσίας εντός του διβάθμιου συστήματος (DSORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) (γ) Μεταβολές ζεοτροπικού μείγματος εντός του διβάθμιου συστήματος (DS-ZORC) σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)....	51
Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του μονοβάθμιου ORC σε περιβάλλον AspenPlus™ [19]	54
Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής ως αποτέλεσμα της μοντελοποίησης του μονοβάθμιου ORC σε περιβάλλον AspenPlus™	55
Εικόνα 23: Καμπύλες κορεσμού των εξεταζόμενων καθαρών ενώσεων σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)	57
Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής της διεξοδικής μεθοδολογίας βελτιστοποίησης των μελετώμενων διαμορφώσεων.....	63
Εικόνα 25: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 100 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή).....	73
Εικόνα 26: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 120 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή).....	74
Εικόνα 27: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 140 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή).....	75

Εικόνα 28: Ραβδόγραμμα που υποδεικνύει τη σχετική βελτίωση της εξεργειακής απόδοσης (%) που επιφέρουν οι διαμορφώσεις DS-ZORC, ZORC και DSORC συγκριτικά με το βελτιστοποιημένο SORC για θερμοκρασία πηγής 160 °C, όταν η θερμοκρασιακή ολίσθηση των εναλλακτών είναι 20 K (εξωτερική περιοχή-περίβλημα) και 40 K (εσωτερική διαγραμμισμένη περιοχή)..... 76

Εικόνα 29: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για όλες τις μελετώμενες διαμορφώσεις (SORC, ZORC, DSORC, DS-ZORC) και σε θερμοκρασία πηγής 100 °C 80

Εικόνα 30: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για όλες τις μελετώμενες διαμορφώσεις (SORC, ZORC, DSORC, DS-ZORC) όταν η θερμοκρασία της πηγής είναι 100 °C 81

Εικόνα 31: Γραφική αναπαράσταση όλων των περιορισμών που τίθενται για την επιλογή πιέσεων ατμοποίησης στις βαθμίδες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας ενός διβάθμιου συστήματος με εργαζόμενο μέσο σταθερής σύστασης..... 84

Εικόνα 32: Διαγράμματα μεταβολών της εξεργειακής απόδοσης της διβάθμιας διάταξης (η_{ex}) όταν αυτή λειτουργεί με τον συνδυασμό Βουτανίου-Προπανίου σε επιλεγμένες μοριακές συγκεντρώσεις και για τις 4 θερμοκρασίες πηγής, συναρτήσει των πιέσεων υψηλής ($p_{evap,HT}$) και χαμηλής ατμοποίησης ($p_{evap,LT}$). Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση αυξανόμενης υψηλής πίεσης ατμοποίησης..... 90

Εικόνα 33: Διαγράμματα μεταβολών της εξεργειακής απόδοσης της διβάθμιας διάταξης όταν αυτή λειτουργεί με τον συνδυασμό Πεντανίου-Ισοβουτανίου σε επιλεγμένες μοριακές συγκεντρώσεις και για τις 4 θερμοκρασίες πηγής, συναρτήσει των πιέσεων υψηλής ($p_{evap,HT}$) και χαμηλής ατμοποίησης ($p_{evap,LT}$). Τα βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση αυξανόμενης υψηλής πίεσης ατμοποίησης..... 91

Εικόνα 34: Ραβδογράμματα που αποτυπώνουν τους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης και των 4 βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων (DS-ZORC, DSORC, ZORC, SORC) όλων των δυαδικών συνδυασμών ρευστών, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις θερμοκρασιών πηγής θερμότητας (100, 120, 140 και 160°C) 111

Εικόνα 35: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα SORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C. 112

Εικόνα 36: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα SORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C..... 113

Εικόνα 37: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα ZORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C. 114

Εικόνα 38: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα ZORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C..... 115

Εικόνα 39: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα DSORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C. 116

Εικόνα 40: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα DSORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C. . 117

Εικόνα 41: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα ZORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C. 118

Εικόνα 42: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα DS-ZORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C. 119

7. Βιβλιογραφία-Αναφορές

- [1] F. Witte. (2018-2020). *Clausius rakine cycle*. Available: https://tespy.readthedocs.io/en/master/tutorials_examples.html
- [2] L. Kadem. (2006). Available: http://users.encs.concordia.ca/~kadem/Chapter9_2.pdf
- [3] H. K. Divedi. *How we can increase the efficiency of rankine cycle*. Available: <https://www.hkdivedi.com/2016/10/how-can-we-increase-efficiency-of.html>
- [4] Calise, "Design and Parametric Optimization of an Organic Rankine Cycle Powered by Solar Energy," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 178-204, 2013.
- [5] R. Wang, L. Jiang, Z. Ma, A. Gonzalez-Diaz, Y. Wang, and A. Roskilly, "Comparative Analysis of Small-Scale Organic Rankine Cycle Systems for Solar Energy Utilisation," *Energies*, vol. 12, no. 5, 2019.
- [6] V. Pethurajan, S. Sivan, and G. C. Joy, "Issues, comparisons, turbine selections and applications – An overview in organic Rankine cycle," *Energy Conversion and Management*, vol. 166, pp. 474-488, 2018.
- [7] G. Li, "Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 477-499, 2016.
- [8] B. F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis, and G. Papadakis, "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3963-3979, 2011.
- [9] S. Quoilin, M. V. D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef, and V. Lemort, "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168-186, 2013.
- [10] J. S. Pereira, J. B. Ribeiro, R. Mendes, G. C. Vaz, and J. C. André, "ORC based micro-cogeneration systems for residential application – A state of the art review and current challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 728-743, 2018.
- [11] B. Vanslambroucka, I. Vankeirsbilcka, M. van den Broeka, S. Guseva, M. De Paepeb, "Efficiency comparison between the steam cycle and the organic rankine cycle for small scale power generation," p. 14, 2012.
- [12] J. Bao and L. Zhao, "A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 325-342, 2013.
- [13] M. A. Ennio Macchi, *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems 1st Edition Technologies and Applications (Energy)*. Woodhead Publishing, 2016, p. 698. Available: <https://books.google.gr/books?id=SoZ4CgAAQBAJ&printsec=frontcover>

&dq=organic+rankine+cycle+power+systems&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiugtyM7bvsAhVEDOwKHZ30BrsQ6AEwAHoECAYQAg#v=onepage&q=organic%20rankine%20cycle%20power%20systems&f=false

- [14] *Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases (Text with EEA relevance)*, 2006. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006R0842>
- [15] *Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance*, 2014. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517>
- [16] D. o. A. Australian Government, Water and the Environment. (2020). *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Available: <https://www.environment.gov.au/protection/ozone/montreal-protocol>
- [17] U. S. E. P. Agency, "Achievements in Stratospheric Ozone Protection," 2007, vol. 40 Available: www.epa.gov/ozone.
- [18] S. M. Ghiaasiaan, *Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation: In Conventional and Miniature Systems*, 1st ed. Cambridge University Press, 2007.
- [19] K. Braimakis, "Multi-scale thermo-economic optimization and thermodynamic assessment of energetic and exergetic efficiency improvement concepts of organic rankine cycle," LSBTP, NTUA, 2018.
- [20] I. D. XinRong Zhang, *Energy Solutions to Combat Global Warming*, 1st ed. Springer, 2016,p.855. Available:<https://books.google.gr/books?id=cPFGDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=energy+solutions+to+combat+global+warming&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwj k7JqH9bvsAhWQ2aQKHfgNBk4Q6AEwAHoECAMQAg#v=onepage&q=energy%20solutions%20to%20combat%20global%20warming&f=false>
- [21] W. Wu, L. Zhao, and T. Ho, "Experimental investigation on pinch points and maximum temperature differences in a horizontal tube-in-tube evaporator using zeotropic refrigerants," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 22-31, 2012.
- [22] J. Lin, G. Qin, and H. Yue, "Optimization of binary zeotropic mixture working fluids for an organic Rankine cycle for waste heat recovery between centrifugal compressor stages," *Energy Science & Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 1746-1757, 2020.
- [23] G. Bamorovat Abadi and K. C. Kim, "Investigation of organic Rankine cycles with zeotropic mixtures as a working fluid: Advantages and issues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1000-1013, 2017.
- [24] A. Auld, "Benefits and barriers of organic Rankine cycles for waste heat recovery and deep geothermal," School of Engineering and Computing Sciences Durham University, 2016.

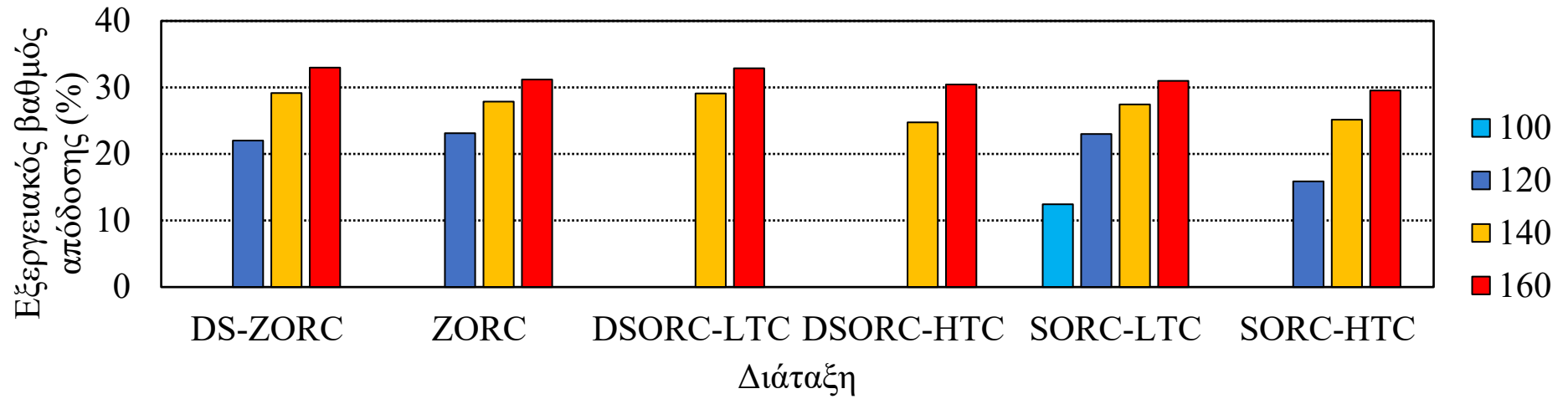
- [25] W. Xu, S. Deng, Y. Zhang, D. Zhao, and L. Zhao, "How to give a full play to the advantages of zeotropic working fluids in organic Rankine cycle (ORC)," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1591-1597, 2019.
- [26] A. F. Babatunde and O. O. Sunday, "A Review of Working Fluids for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 413, 2018.
- [27] F. Heberle, M. Preißinger, and D. Brüggemann, "Zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles for low-enthalpy geothermal resources," *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 364-370, 2012.
- [28] G. Angelino and P. Colonnadipaliano, "Multicomponent Working Fluids For Organic Rankine Cycles (ORCs)," *Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 449-463, 1998.
- [29] X. D. Wang and L. Zhao, "Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation," *Solar Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 605-613, 2009.
- [30] W. Li, X. Feng, L. J. Yu, and J. Xu, "Effects of evaporating temperature and internal heat exchanger on organic Rankine cycle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 17-18, pp. 4014-4023, 2011.
- [31] M. Chys, M. van den Broek, B. Vanslambrouck, and M. De Paepe, "Potential of zeotropic mixtures as working fluids in organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 623-632, 2012.
- [32] J. Radulovic and N. I. Beleno Castaneda, "On the potential of zeotropic mixtures in supercritical ORC powered by geothermal energy source," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 365-371, 2014.
- [33] S. Lecompte, B. Ameel, D. Ziviani, M. van den Broek, and M. De Paepe, "Exergy analysis of zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 727-739, 2014.
- [34] K. Braimakis, A. Mikelis, A. Charalampidis, and S. Karellas, "Exergetic performance of CO₂ and ultra-low GWP refrigerant mixtures as working fluids in ORC for waste heat recovery," *Energy*, vol. 203, 2020.
- [35] D. M. Thierry, A. Flores-Tlacuahuac, and I. E. Grossmann, "Simultaneous optimal design of multi-stage organic Rankine cycles and working fluid mixtures for low-temperature heat sources," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 89, pp. 106-126, 2016.
- [36] M. Z. Stijepovic, A. I. Papadopoulos, P. Linke, A. S. Grujic, and P. Seferlis, "An exergy composite curves approach for the design of optimum multi-pressure organic Rankine cycle processes," *Energy*, vol. 69, pp. 285-298, 2014.
- [37] A. B.-M. Z.Gnutek, "the thermodynamic analysis of multicycle ORC engine," *Energy*, pp. 1075-1082, 2001.
- [38] T. Li, N. Meng, J. Liu, J. Zhu, and X. Kong, "Thermodynamic and economic evaluation of the organic Rankine cycle (ORC) and two-stage series organic Rankine cycle (TSORC) for flue gas heat recovery," *Energy Conversion and Management*, vol. 183, pp. 816-829, 2019.

- [39] H. Yu, X. Lu, T. Wang, Y. Gu, and C. Geng, "THERMODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF A TRIPLE-PRESSURE ORC-COMPARISON WITH SINGLE PRESSURE AND DUAL PRESSURE ORCS," *International Conference on Applied Energy 2019*, 2019.
- [40] S. Lecompte, "Performance Evaluation of Organic Rankine Cycle Architectures: Application to Waste Heat Valorisation," Department of Electrical Energy, Metals, Mechanical Constructions and Systems, Ghent University, 2015-2016.
- [41] T. Li, Z. Zhang, J. Lu, J. Yang, and Y. Hu, "Two-stage evaporation strategy to improve system performance for organic Rankine cycle," *Applied Energy*, vol. 150, pp. 323-334, 2015.
- [42] S. Baral, D. Kim, E. Yun, and K. Kim, "Energy, Exergy and Performance Analysis of Small-Scale Organic Rankine Cycle Systems for Electrical Power Generation Applicable in Rural Areas of Developing Countries," *Energies*, vol. 8, no. 2, pp. 684-713, 2015.
- [43] V. L. Le, A. Kheiri, M. Feidt, and S. Pelloux-Prayer, "Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid," *Energy*, vol. 78, pp. 622-638, 2014.
- [44] G. Manente, A. Lazzaretto, and E. Bonamico, "Design guidelines for the choice between single and dual pressure layouts in organic Rankine cycle (ORC) systems," *Energy*, vol. 123, pp. 413-431, 2017.
- [45] D. Walraven, B. Laenen, and W. D'haeseleer, "Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources," *Energy Conversion and Management*, vol. 66, pp. 220-233, 2013.
- [46] H. Xi, M.-J. Li, C. Xu, and Y.-L. He, "Parametric optimization of regenerative organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery using genetic algorithm," *Energy*, vol. 58, pp. 473-482, 2013.
- [47] K. Braimakis and S. Karellas, "Exergetic optimization of double stage Organic Rankine Cycle (ORC)," *Energy*, vol. 149, pp. 296-313, 2018.
- [48] T. Li, X. Hu, J. Wang, X. Kong, J. Liu, and J. Zhu, "Performance improvement of two-stage serial organic Rankine cycle (TSORC) driven by dual-level heat sources of geothermal energy coupled with solar energy," *Geothermics*, vol. 76, pp. 261-270, 2018.
- [49] M. Sadeghi, A. Nemati, A. ghavimi, and M. Yari, "Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures," *Energy*, vol. 109, pp. 791-802, 2016.
- [50] J. Li, Z. Ge, Y. Duan, and Z. Yang, "Effects of heat source temperature and mixture composition on the combined superiority of dual-pressure evaporation organic Rankine cycle and zeotropic mixtures," *Energy*, vol. 174, pp. 436-449, 2019.
- [51] J. Li, Y. Duan, Z. Yang, and F. Yang, "Exergy analysis of novel dual-pressure evaporation organic Rankine cycle using zeotropic mixtures," *Energy Conversion and Management*, vol. 195, pp. 760-769, 2019.

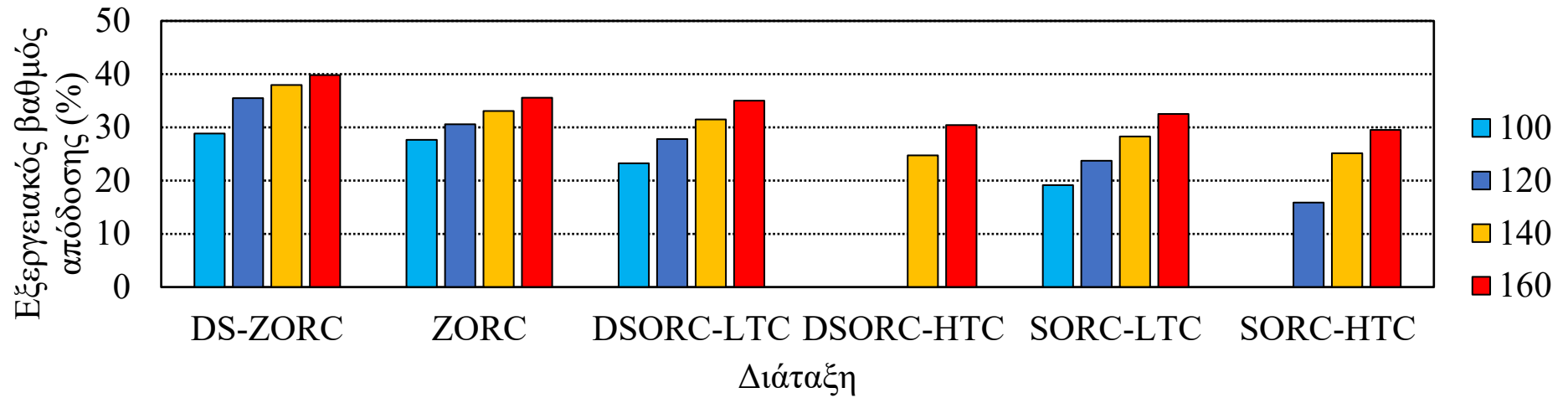
- [52] T. Li, J. Liu, J. Wang, N. Meng, and J. Zhu, "Combination of two-stage series evaporation with non-isothermal phase change of organic Rankine cycle to enhance flue gas heat recovery from gas turbine," *Energy Conversion and Management*, vol. 185, pp. 330-338, 2019.
- [53] X. Luo, R. Huang, Z. Yang, J. Chen, and Y. Chen, "Performance investigation of a novel zeotropic organic Rankine cycle coupling liquid separation condensation and multi-pressure evaporation," *Energy Conversion and Management*, vol. 161, pp. 112-127, 2018.
- [54] A. O. V. Aspen Technology Inc., *Process Optimization for Engineering Manufacturing and Supply Chain*, in, Aspen Technology: Burlington, ON, Canada, 2011.
- [55] P. M. M. P.M. Boston, *Proceedings of the 2nd International Conference on Phase Equilibria and Fluid Properties in the Chemical Process Industries*, West Berlin, March, 1980, pp. 823-849.
- [56] K. Braimakis, M. Preißinger, D. Brüggemann, S. Karellas, and K. Panopoulos, "Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures," *Energy*, vol. 88, pp. 80-92, 2015.

8. Παραρτήματα

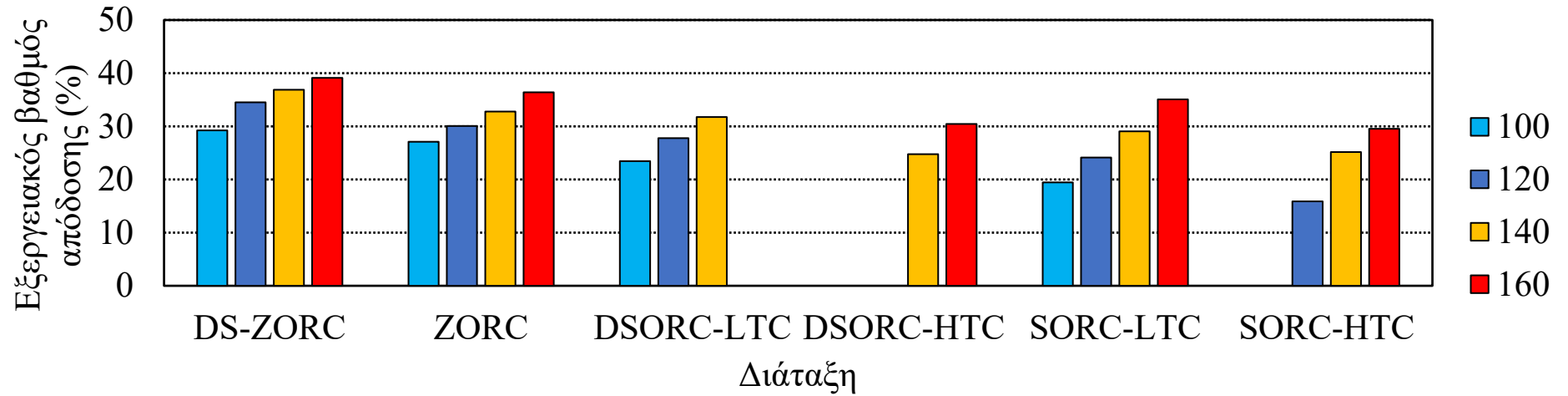
Κυκλοπεντάνιο-Πεντάνιο



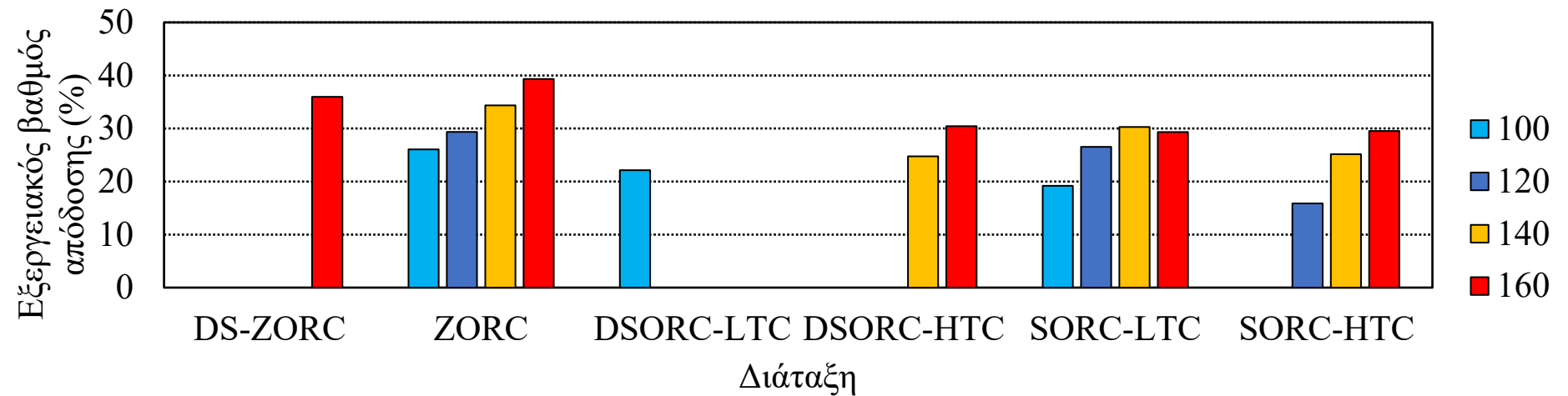
Κυκλοπεντάνιο-Βουτάνιο



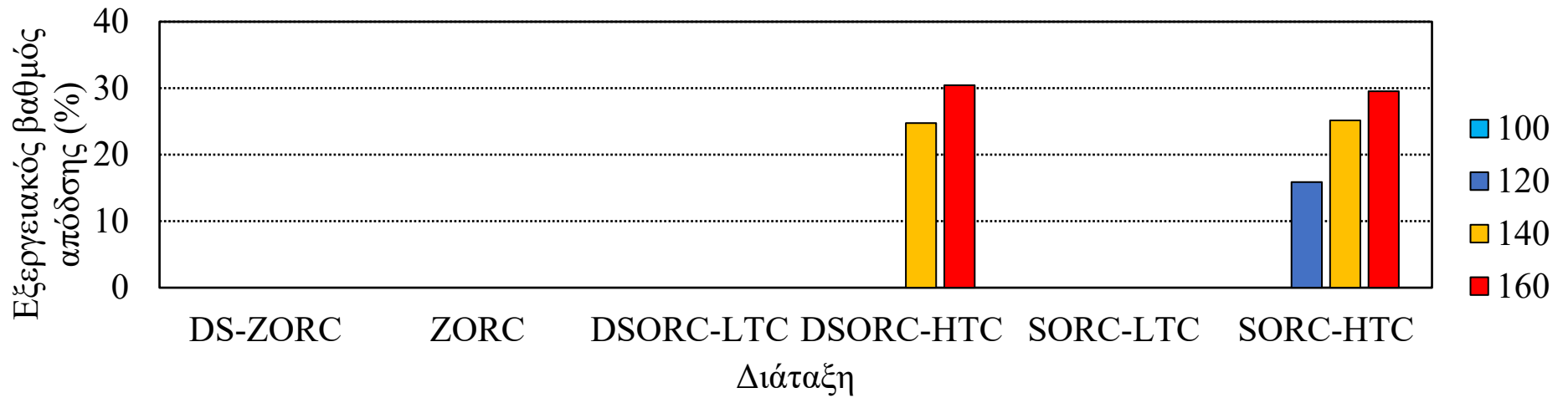
Κυκλοπεντάνιο-Ισοβουτάνιο



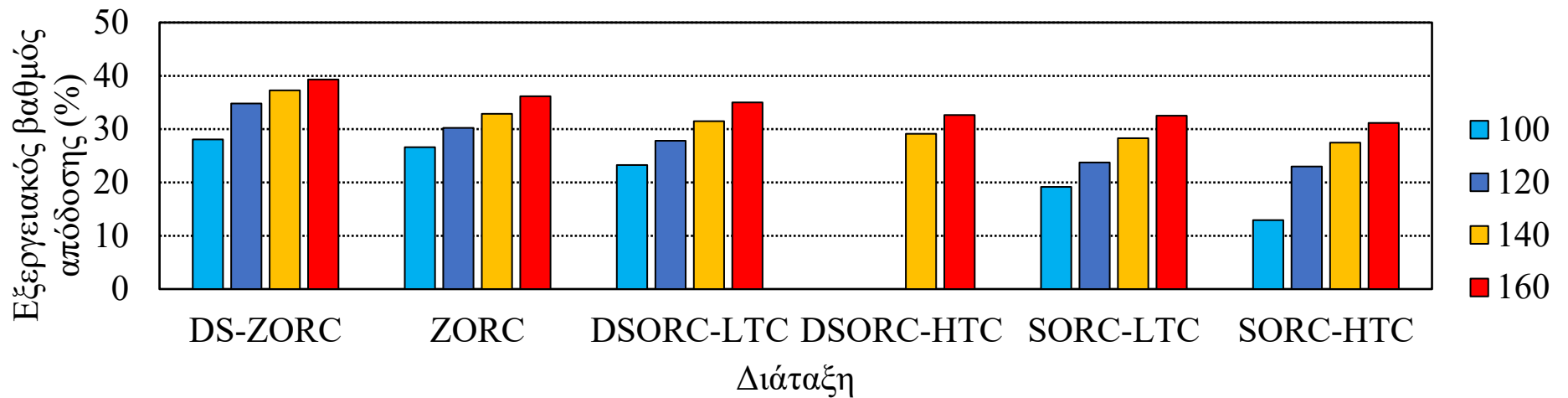
Κυκλοπεντάνιο-Προπάνιο



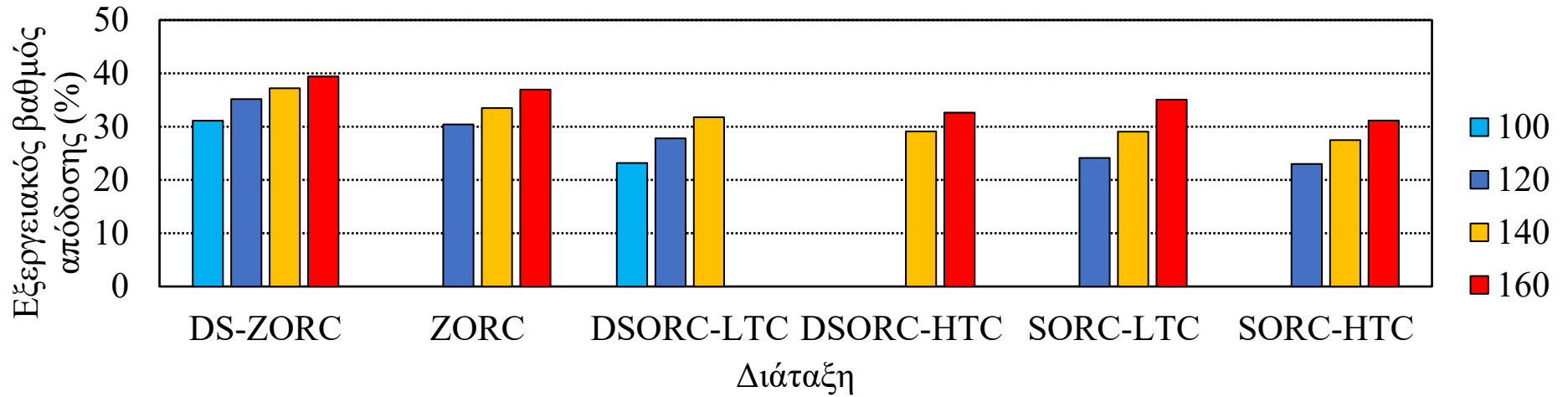
Κυκλοπεντάνιο-CO₂



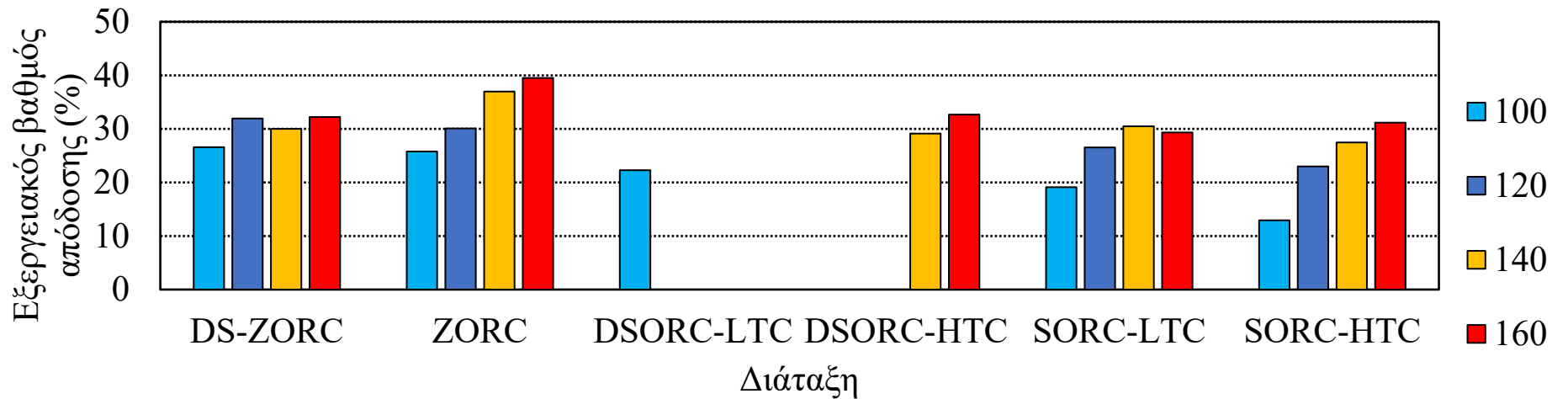
Πεντάνιο-Βουτάνιο



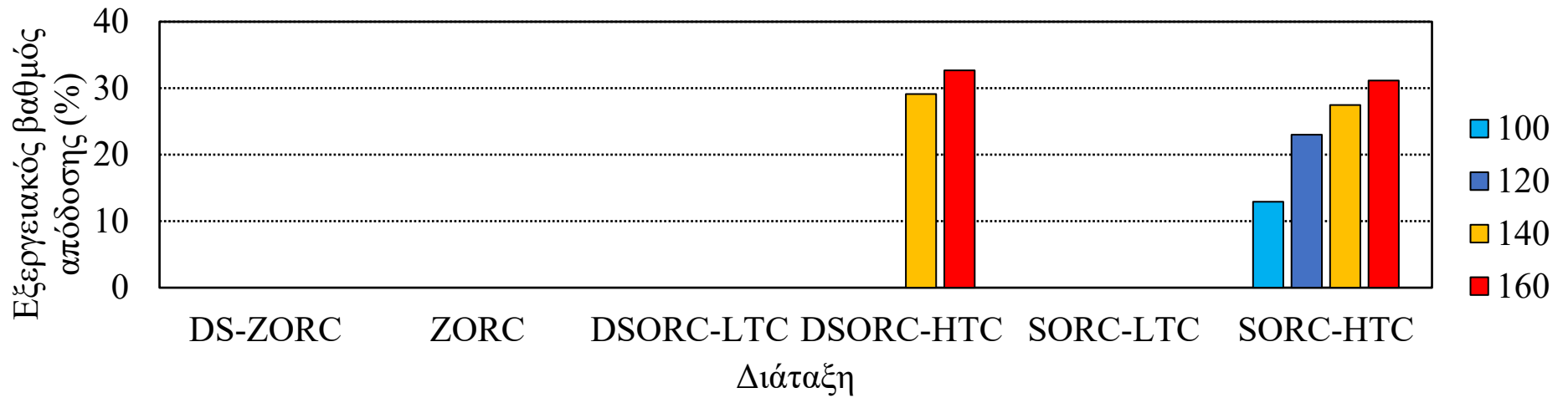
Πεντάνιο-Ισοβουτάνιο



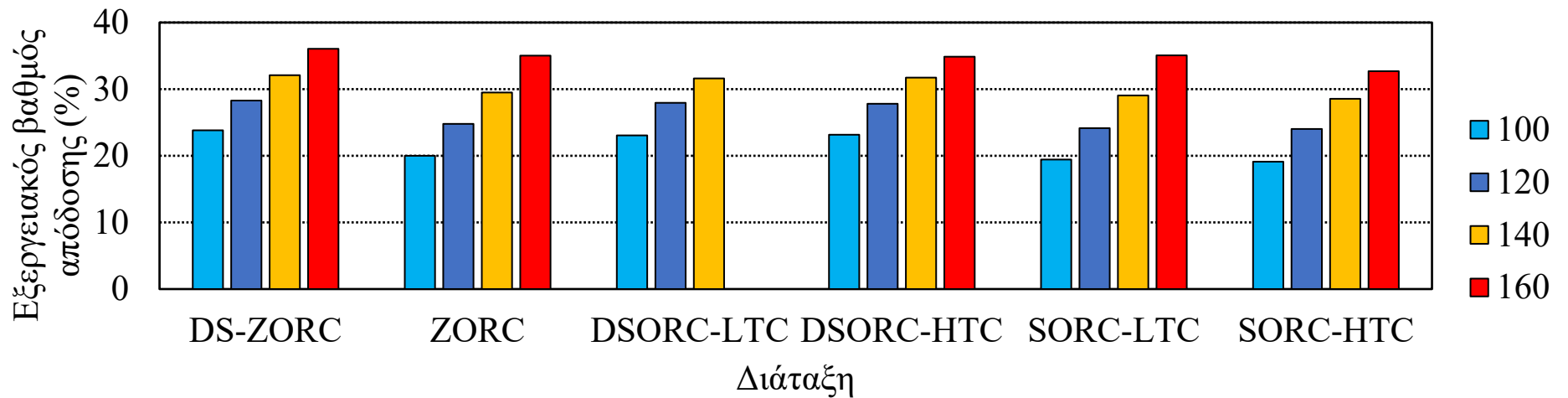
Πεντάνιο-Προπάνιο



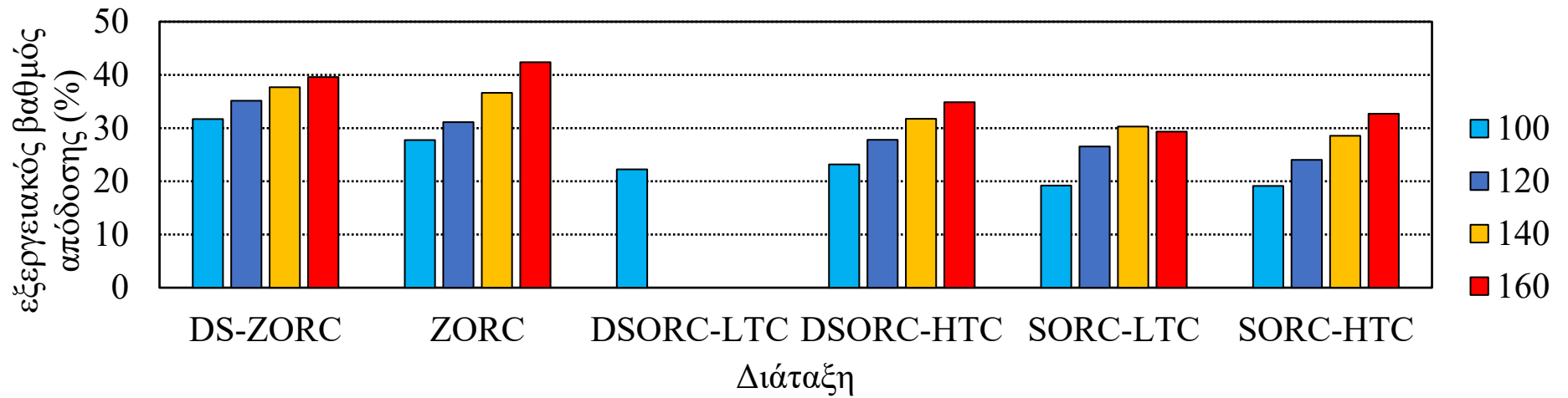
Πεντάνιο-CO2



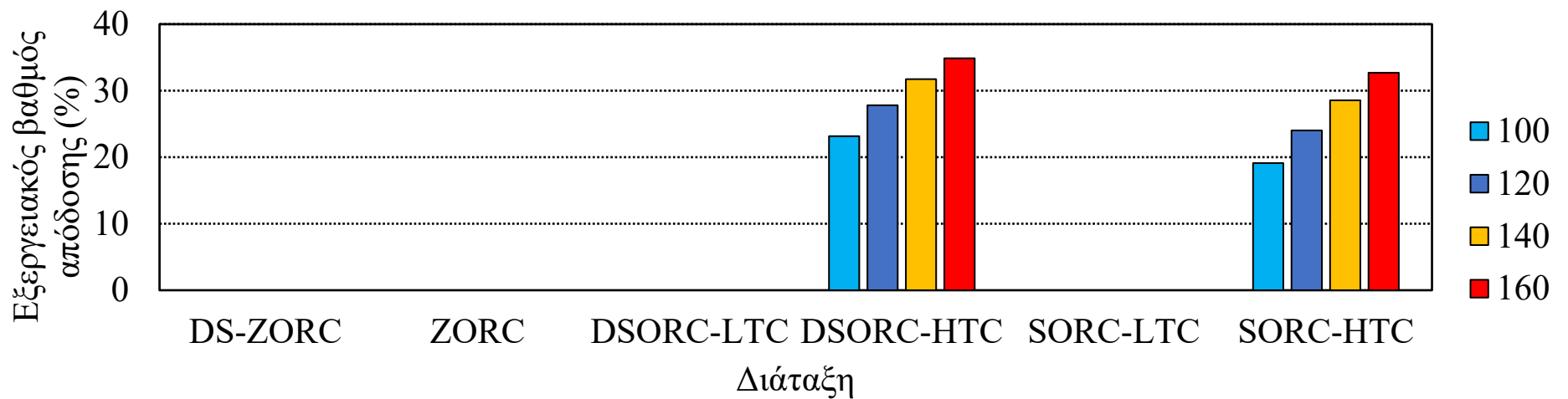
Βουτάνιο-Ισοβουτάνιο



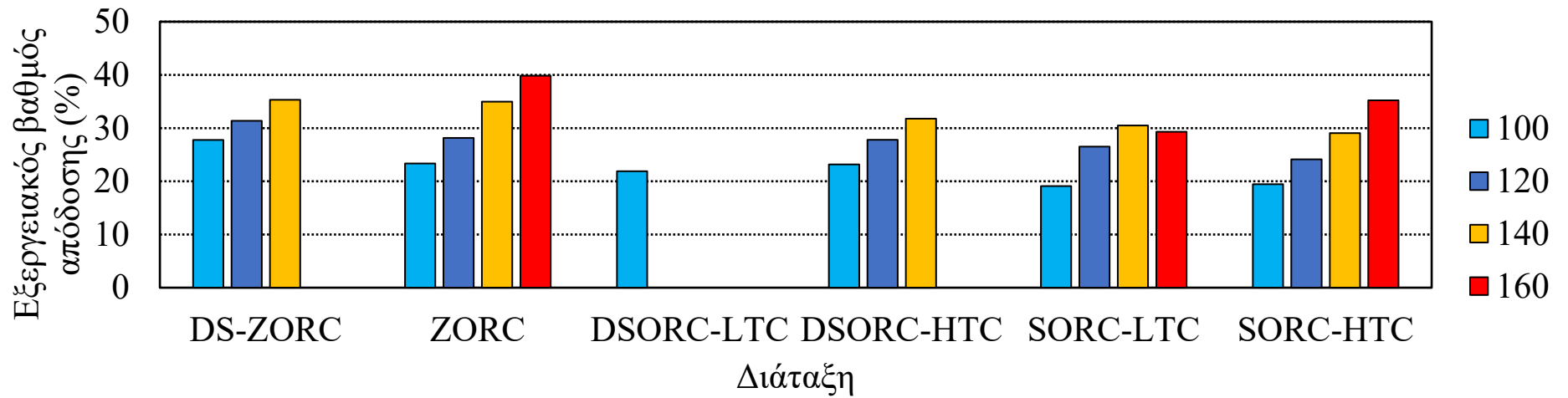
Βουτάνιο-Προπάνιο



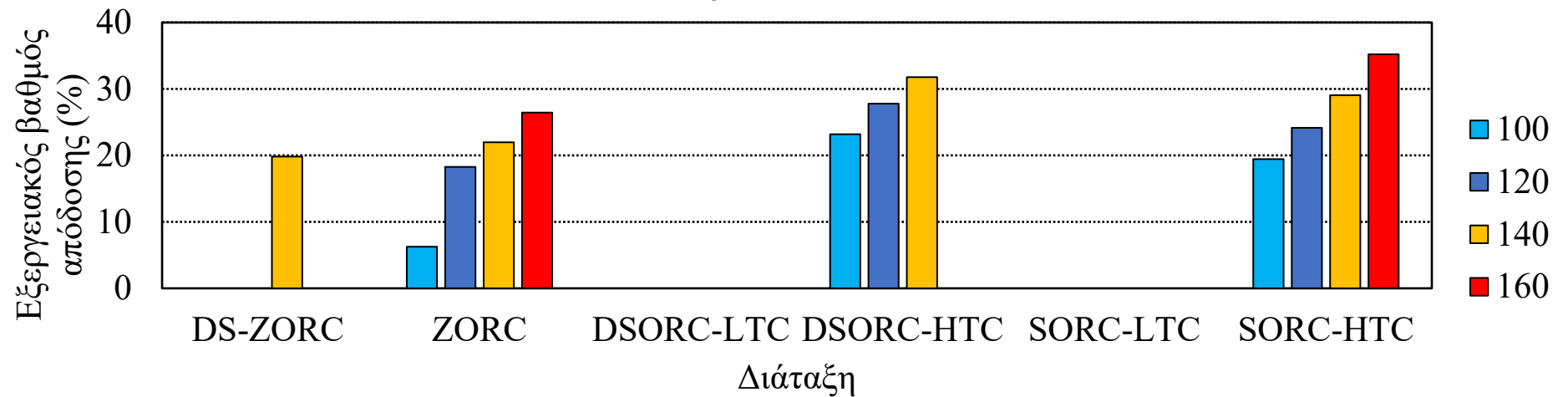
Βουτάνιο-CO₂

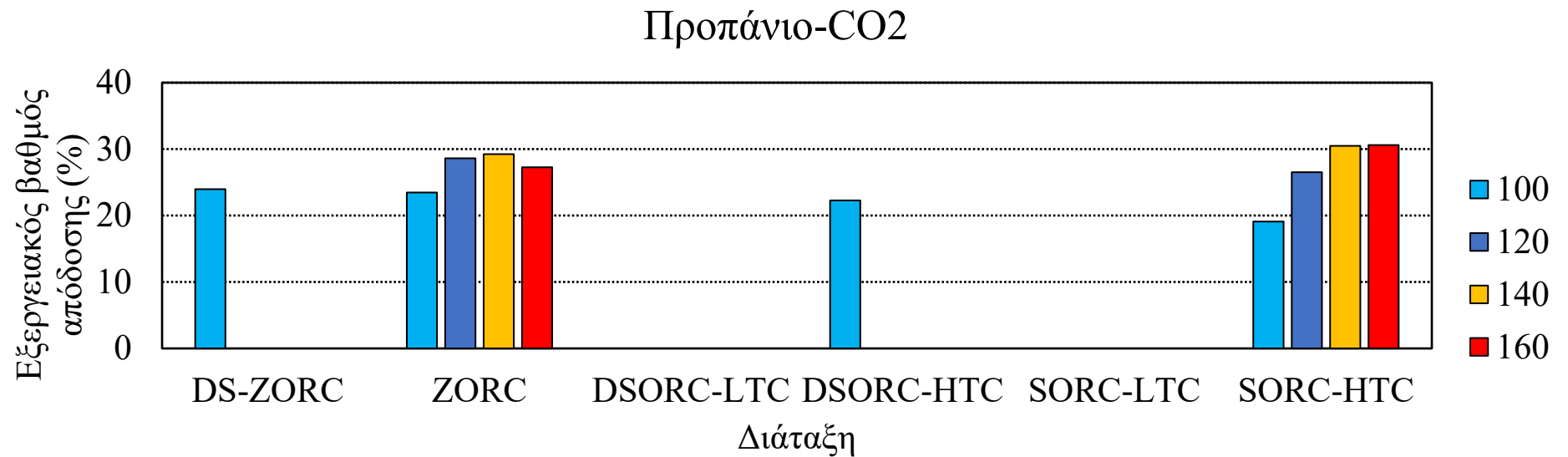


Ισοβουτάνιο-Προπάνιο

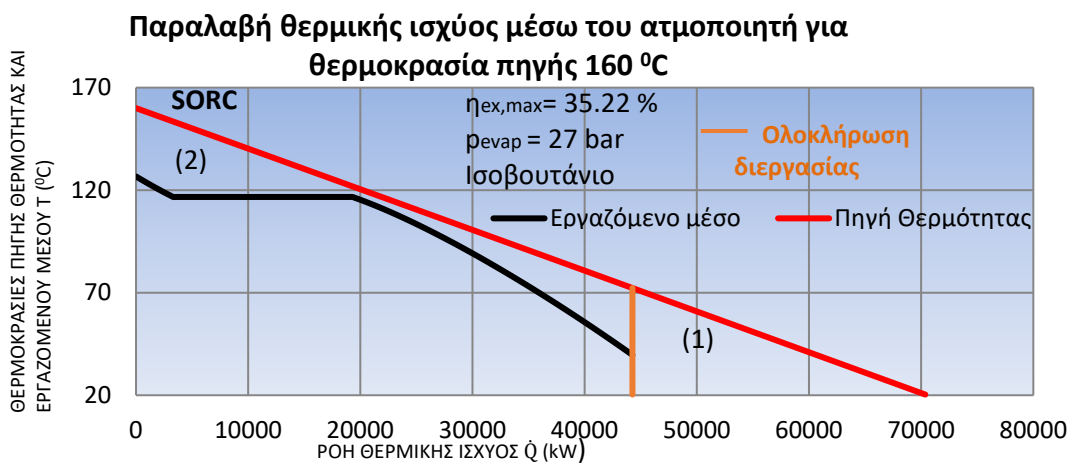
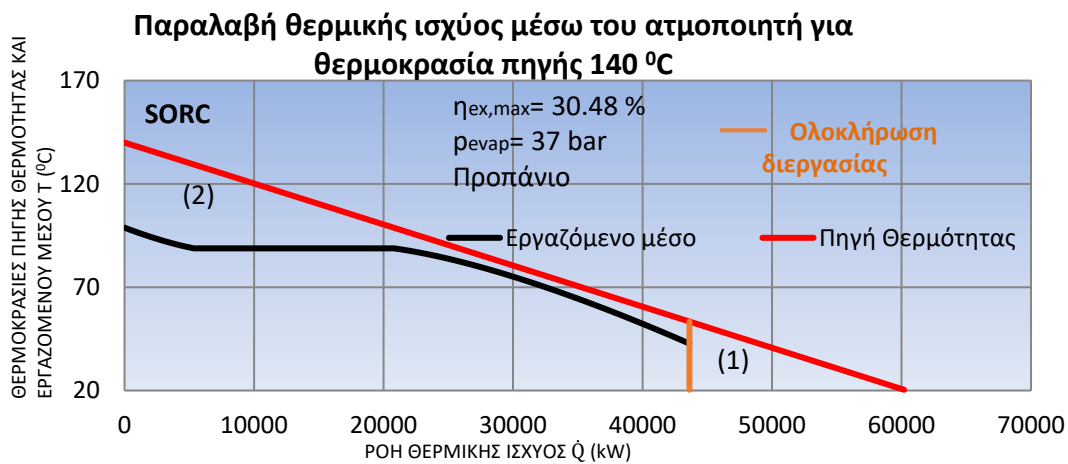
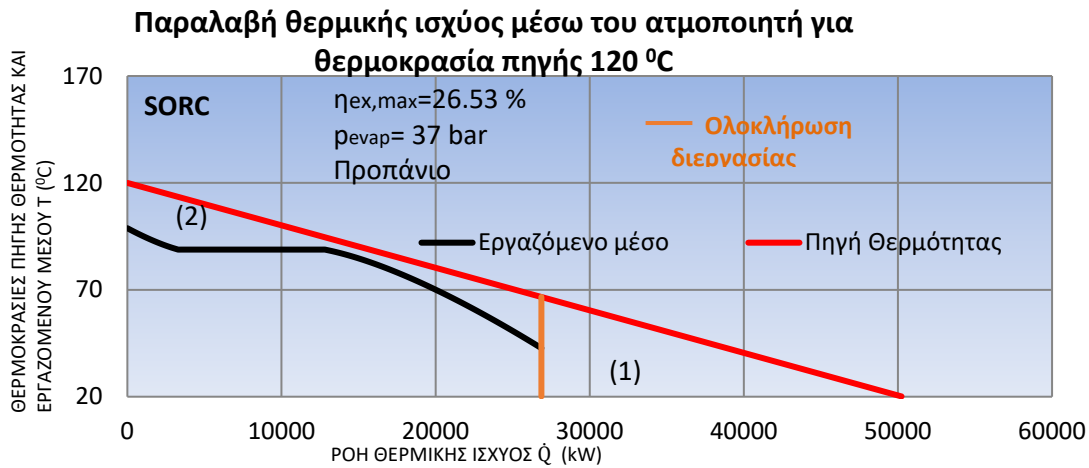


Ισοβουτάνιο-CO₂

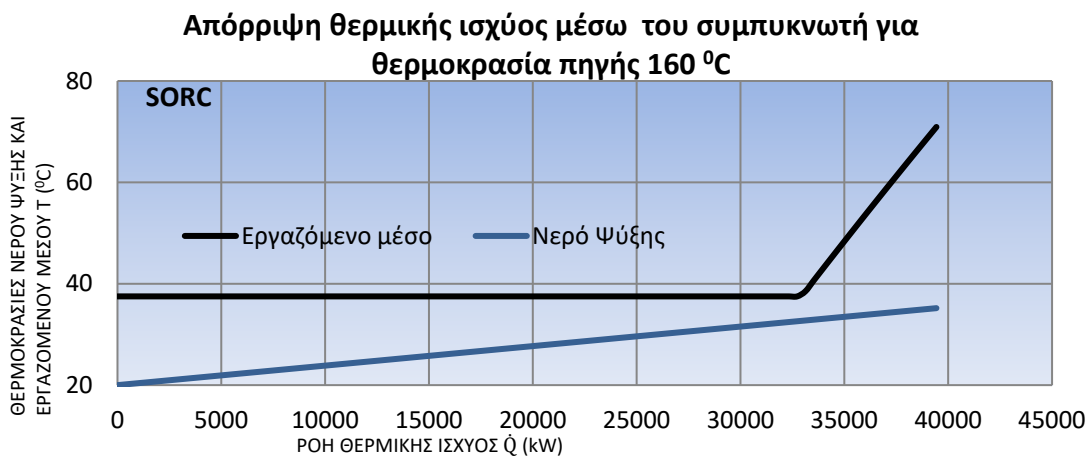
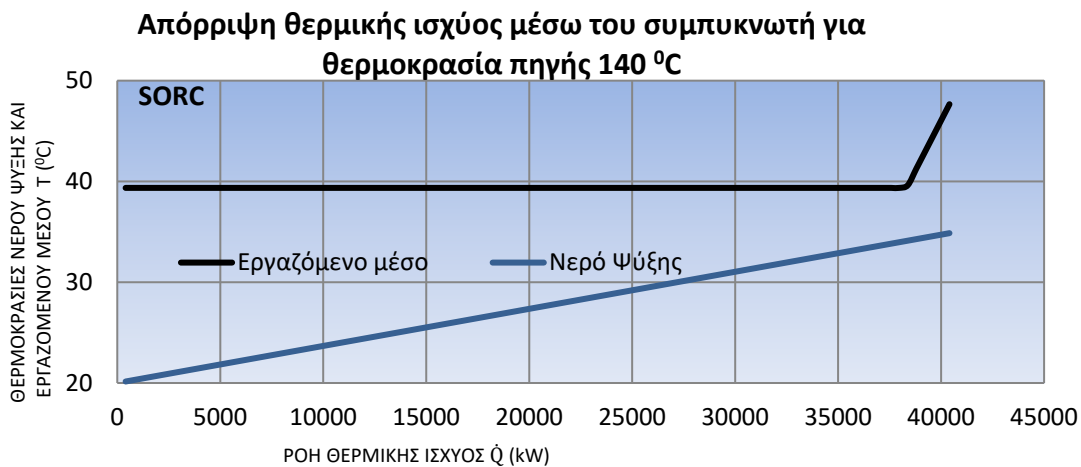
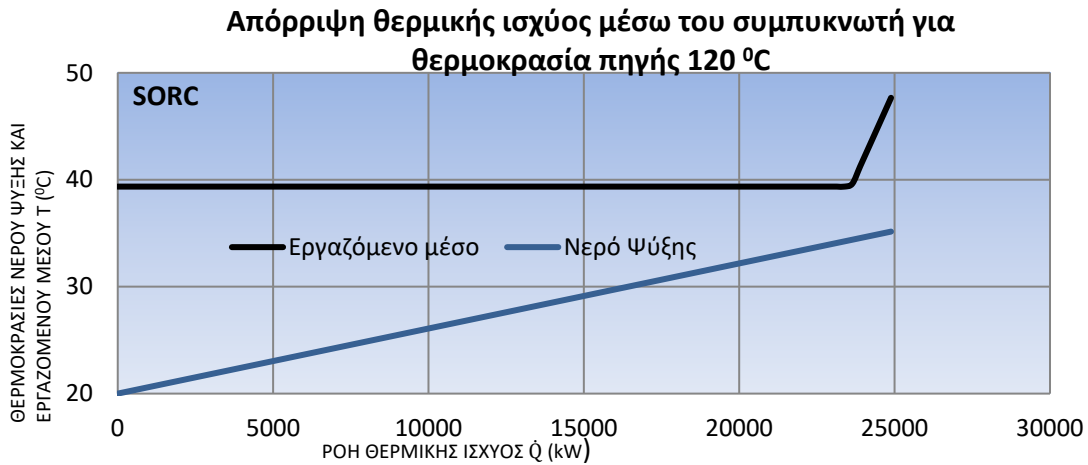




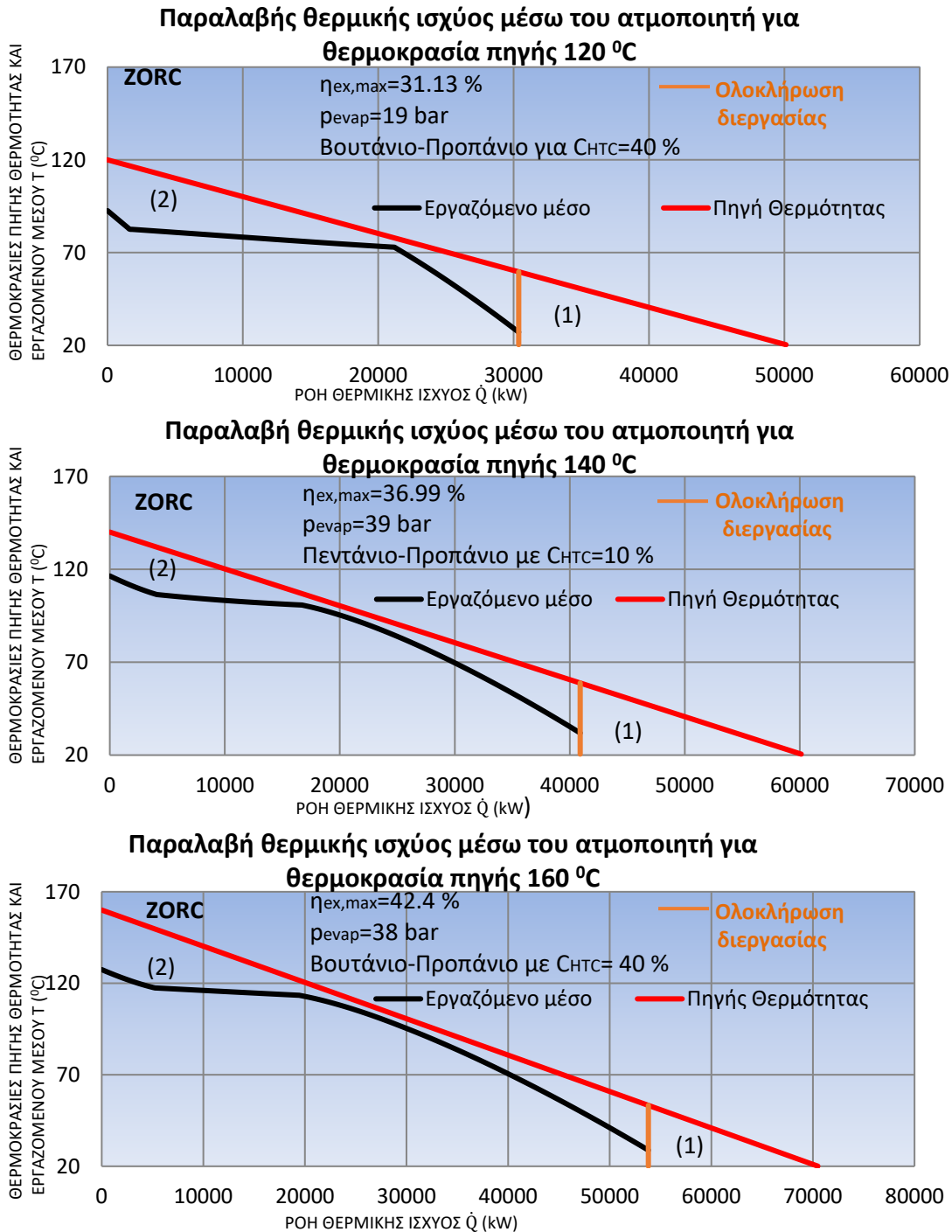
Εικόνα 34: Ραβδογράμματα που αποτυπώνουν τους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης και των 4 βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων (DS-ZORC, DSORC, ZORC, SORC) όλων των δυαδικών συνδυασμών ρευστών, για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις θερμοκρασιών πηγής θερμότητας (100, 120, 140 και 160°C)



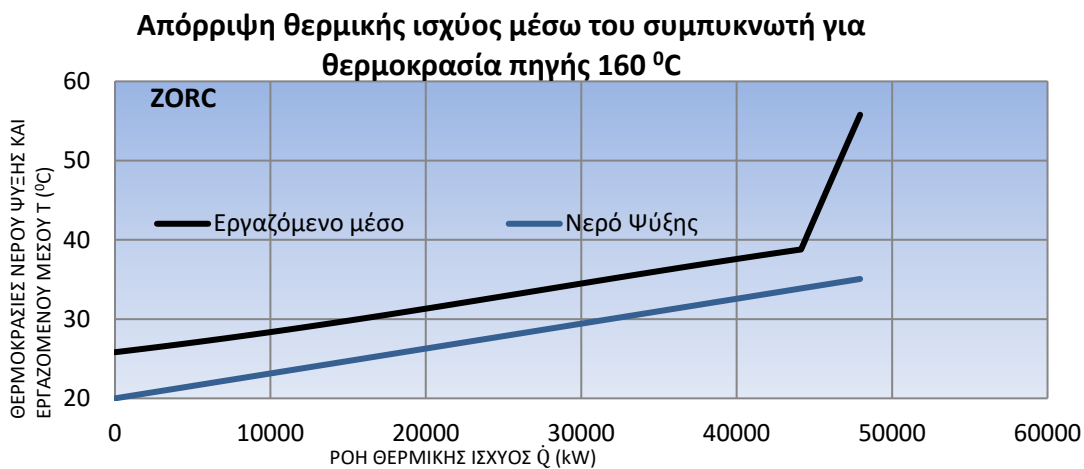
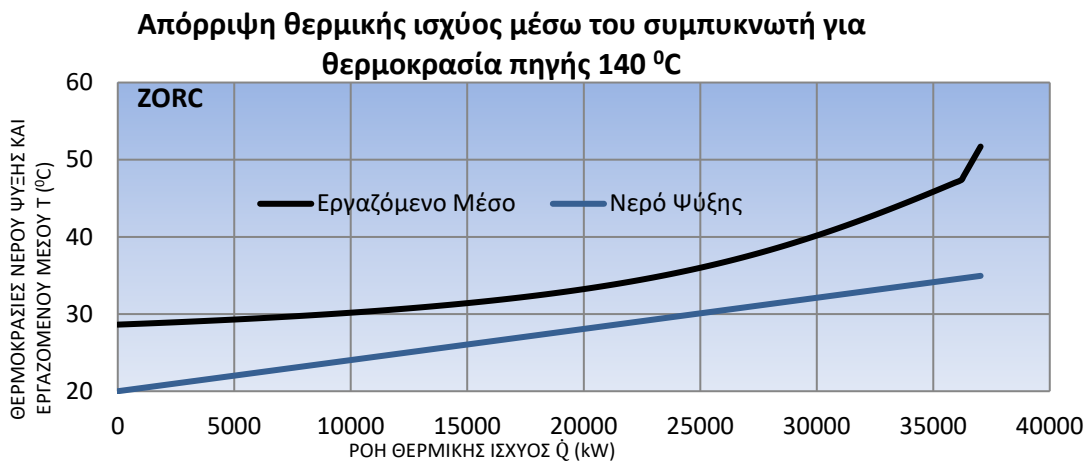
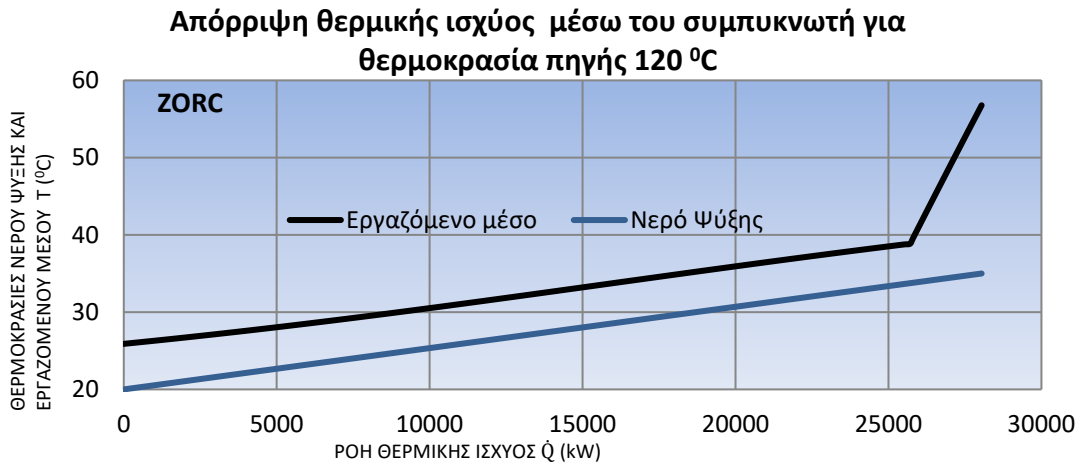
Εικόνα 35: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα SRC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C.



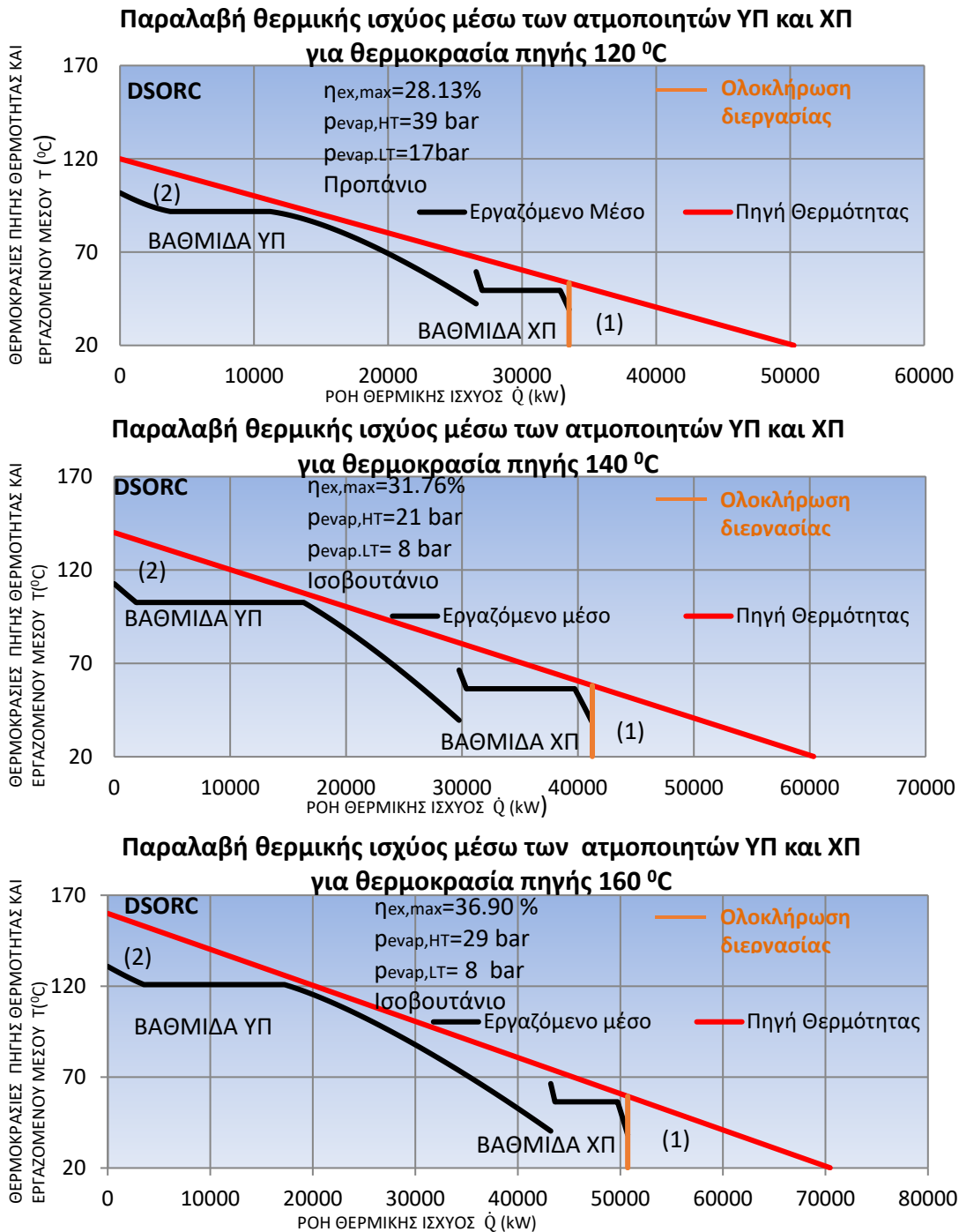
Εικόνα 36: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα SORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C.



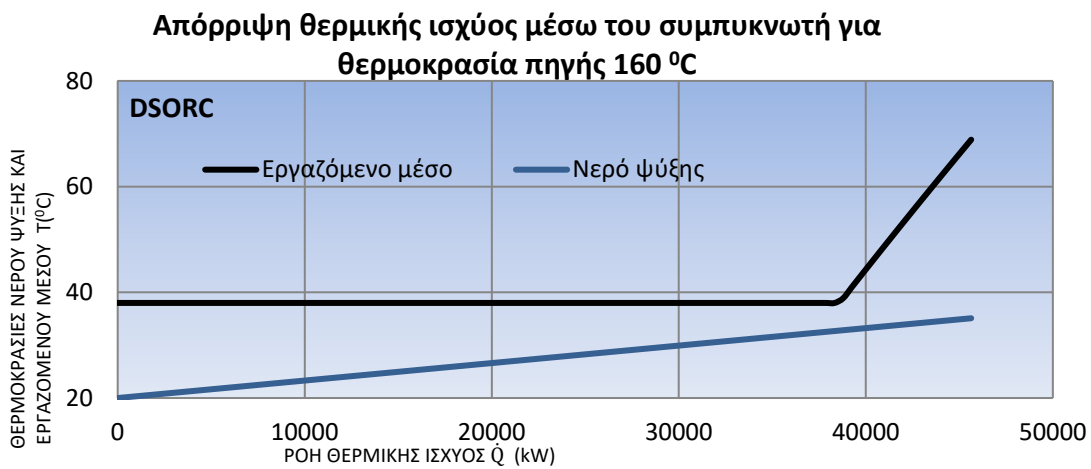
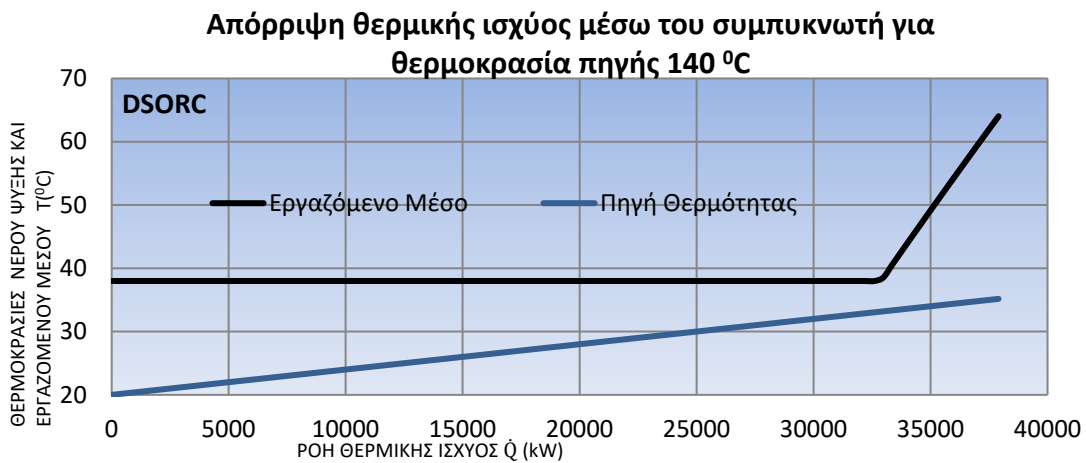
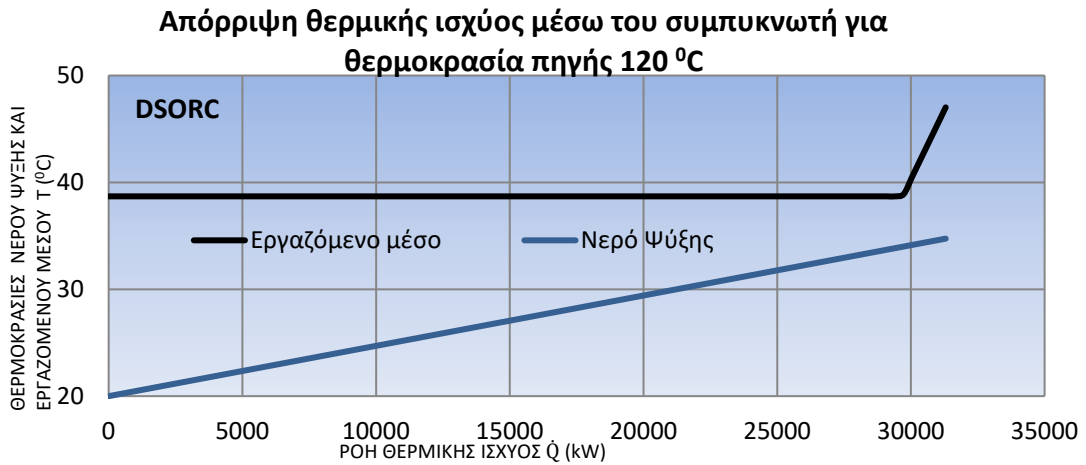
Εικόνα 37: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα ZORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C.



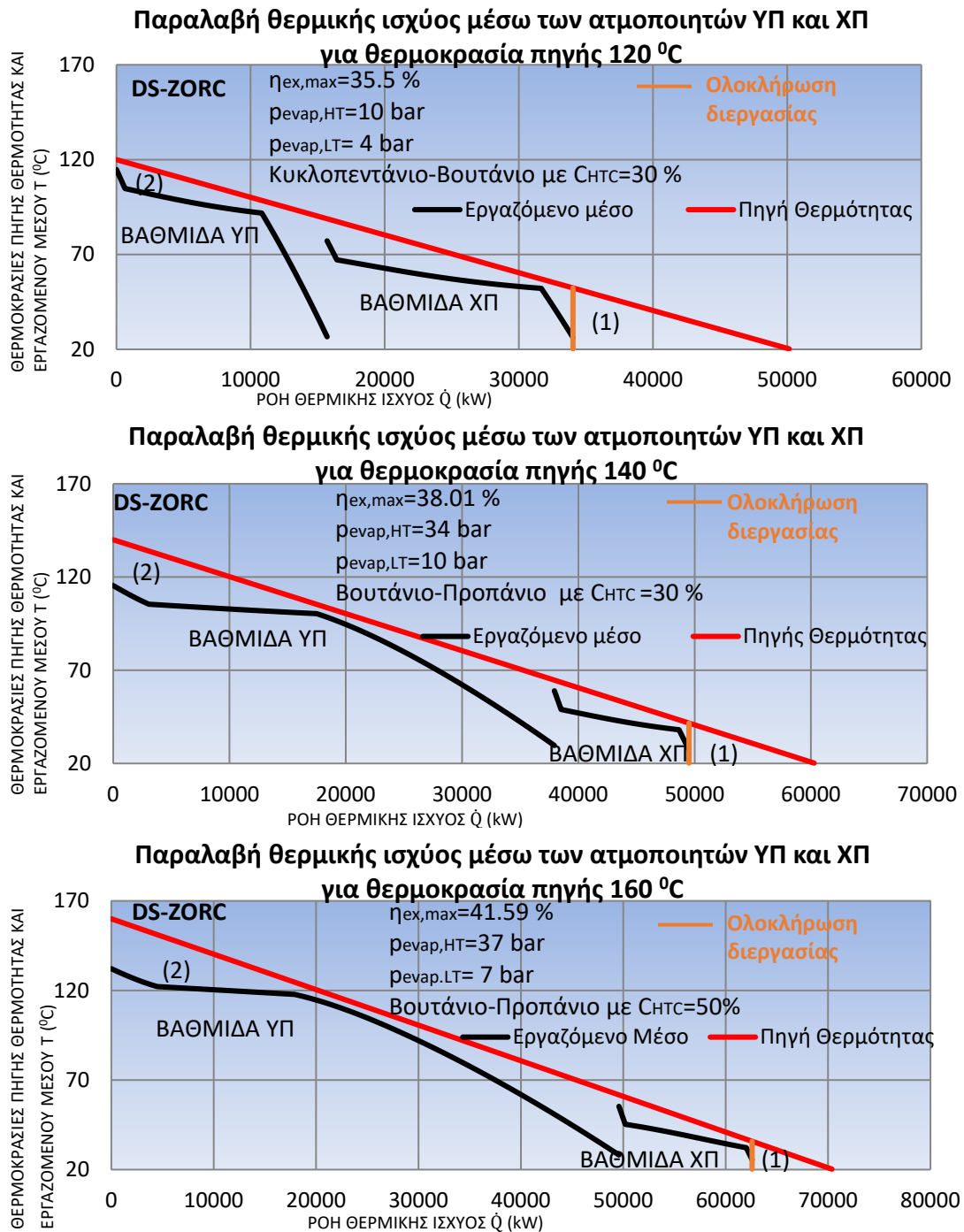
Εικόνα 38: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα ZORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C.



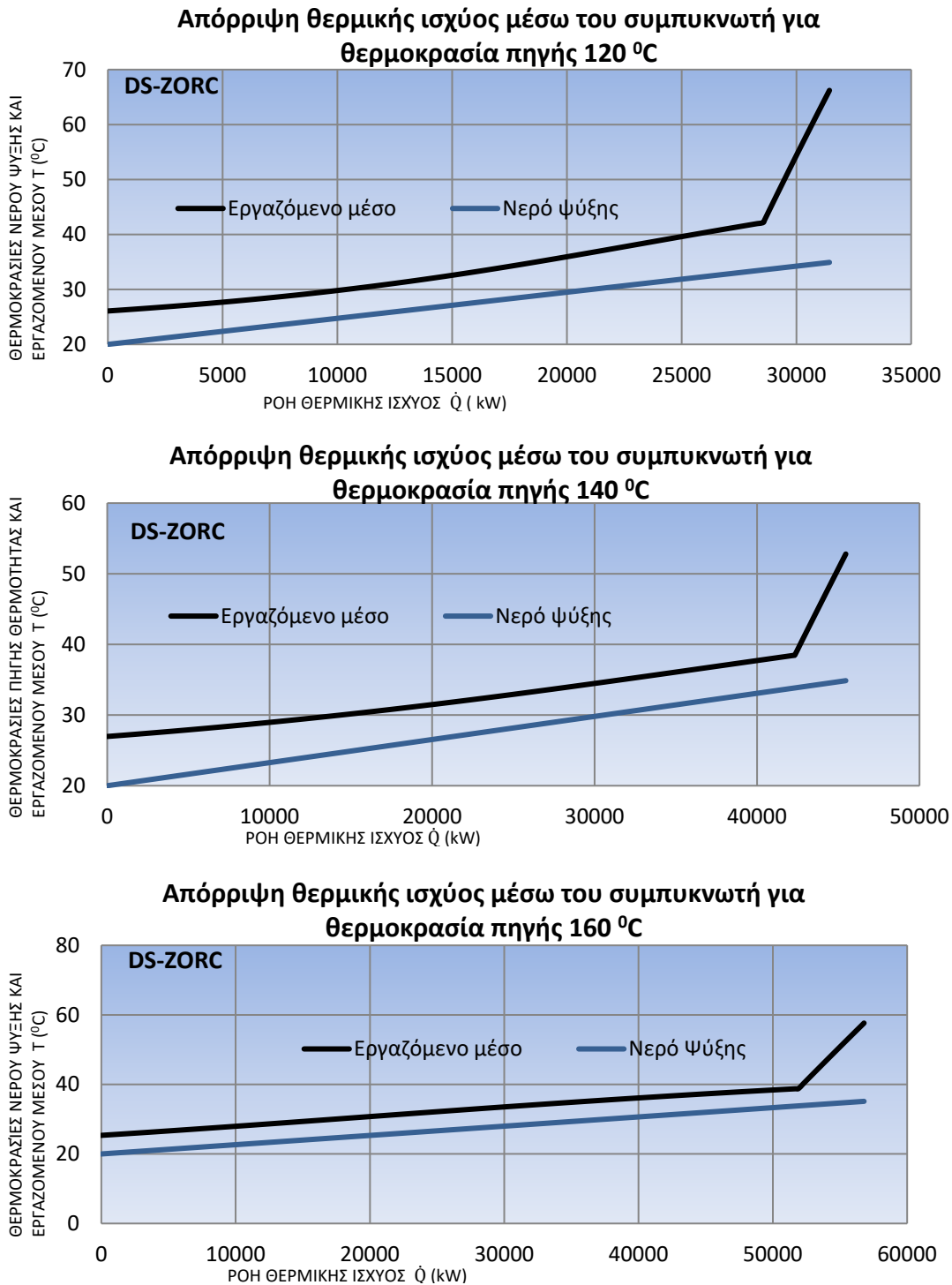
Εικόνα 39: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα DSORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C.



Εικόνα 40: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα DSORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C.



Εικόνα 41: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} -T της διαδικασίας παραλαβής θερμικής ισχύος του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου από την πηγή θερμότητας, για το σύστημα ZORC και σε θερμοκρασίες πηγής 120 °C, 140 °C και 160 °C.



Εικόνα 42: Απεικόνιση σε διάγραμμα \dot{Q} - T της διαδικασίας απόρριψης θερμότητας του εξεργειακά αποδοτικότερου εργαζόμενου μέσου στο νερό ψύξης του συμπυκνωτή, για το σύστημα DS-ZORC, όταν οι θερμοκρασίες της πηγής είναι 120 °C, 140 °C και 160 °C.

