



Θερμοδυναμική και οικονομική  
διερεύνηση ενσωμάτωσης  
συστήματος ORC για  
εκμετάλλευση απορριπτόμενης  
θερμότητας σε εγκατάσταση  
συμπίεσης CO<sub>2</sub>

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

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.

Ονοματεπώνυμο

ΚΑΡΑΓΕΩΡΓΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ ΙΓΝΑΤΙΟΣ

Copyright © Καραγεώργης Χρήστος Ιγνάτιος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	3
Ευχαριστίες .....	4
Περίληψη .....	5
Abstract .....	6
Συνομογραφίες.....	7
1. Εισαγωγή .....	10
1.1 Δέσμευση, αποθήκευση και αξιοποίηση CO <sub>2</sub> .....	11
1.2 ORC και εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας .....	15
1.2.1 Απορριπτόμενη θερμότητα από την τσιμεντοβιομηχανία.....	15
1.2.2 Απορριπτόμενη θερμότητα από την βιομηχανία αλουμινίου .....	16
1.2.3 Απορριπτόμενη θερμότητα από μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK).....	17
1.3 Ενσωμάτωση ORC σε μονάδες συμπίεσης CO <sub>2</sub> .....	19
1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας .....	28
2. Περιγραφή εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> και μεθοδολογία .....	29
2.1 Περιγραφή εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> και ενσωμάτωσης συστήματος ORC	29
2.2 Μεθοδολογία και παραδοχές.....	32
2.3 Οικονομική αξιολόγηση .....	38
2.3.1 Υπολογισμός βασικών οικονομικών μεγεθών .....	38
2.3.2 Βασικό σενάριο .....	39
2.4 Ανάλυση ευαισθησίας.....	40
3. Αποτελέσματα .....	41
3.1 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα .....	41
3.1.1 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη (χωρίς ενσωμάτωση ORC)	41
3.1.2 Διάταξη με 4 συμπιεστές .....	42
3.1.3 Διάταξη με 5 συμπιεστές .....	49
3.1.4 Διάταξη με 6 συμπιεστές .....	53
3.1.4.1 Διάγραμμα Sankey .....	57
3.1.4.2 Διαγράμματα Q-T .....	60
3.1.5 Συγκριτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων για διαφορετικά πλήθη	
βαθμίδων συμπίεσης και εργαζόμενων ρευστών ORC .....	61
3.2 Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης.....	64
4. Συμπεράσματα .....	68
5. Κατάλογος Πινάκων .....	69
6. Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	70
7. Κατάλογος Εικόνων.....	72
8. Βιβλιογραφία.....	73

## Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα, για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουν να δοθούν στους καθηγητές Κακαρά Εμμανουήλ και Χουντάλα Δημήτριο για το χρόνο που αφιέρωσαν στη μελέτη της εργασίας και τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Μπραϊμάκη για την καταλυτική του στήριξη, τη συνεισφορά και την καθοδήγηση, καθώς και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της μελέτης και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γιάννη και Γιώτα, την αδερφή μου Θέλμα, τη φίλη μου Γωγώ, καθώς και το φιλικό μου περιβάλλον για την υλική και ψυχολογική τους στήριξη σε κάθε στάδιο της ακαδημαϊκής μου, και όχι μόνο, πορείας και εξέλιξης.

## Περίληψη

Στη σύγχρονη εποχή η βιομηχανία της ενέργειας παράγει αέρια του θερμοκηπίου ενισχύοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες και επιβαρύνουν το περιβάλλον, καταλυτικό ρόλο διαδραματίζει η δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS). Σημαντικό κομμάτι της CCS είναι η συμπίεση CO<sub>2</sub> κατά την οποία παράγεται θερμότητα σε χαμηλής ή μεσαίας κλίμακας θερμοκρασίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας συμπιεστών CO<sub>2</sub> για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του συστήματος συμπίεσης. Μελετήθηκαν συστήματα 4, 5 και 6 συμπιεστών με ενσωμάτωση συστήματος ORC αλλά και χωρίς αυτήν. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Aspen Plus V12.0. Η βελτιστοποίηση που πήρε μέρος είχε στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης των συμπιεστών και όχι την μέγιστη παραγωγή του ORC. Για τον λόγο αυτό η βέλτιστη επιλογή για συμπίεση CO<sub>2</sub> με λόγο συμπίεσης 1:150, είναι το εξαβάθμιο σύστημα με το ψυκτικό R1234ze σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 9 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  ή το R1234yf στην ίδια θερμοκρασία αλλά σε πίεση 12 bar. Η ελάχιστη κατανάλωση που επιτυγχάνεται και στις 2 περιπτώσεις ισούται με 4,136 kW<sub>e</sub>. Η μείωση κατανάλωσης των συμπιεστών λόγω του ORC και ο βαθμός απόδοσης του ORC ισούνται με 1.21 % και 2.16 %, αντίστοιχα. Επίσης, πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση για την ενσωμάτωση του συστήματος ORC. Σε αυτήν βρέθηκε ότι το σύστημα 4 συμπιεστών έχει την μεγαλύτερη Καθαρή Παρούσα Αξία (2,190,973 €), τον μεγαλύτερο Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης (36.7 %) και την μέγιστη ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (1,252 MW<sub>e</sub>/έτος). Επίσης, παρουσιάζει την μικρότερη Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής (2.8 έτη) και το χαμηλότερο ειδικός κόστος επένδυσης (3,710 €/kW<sub>e</sub>). Συνεπώς, η ενσωμάτωση ORC σε σύστημα 4 συμπιεστών CO<sub>2</sub> παρουσιάζεται ως η οικονομικά προτιμότερη επένδυση. Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (DPP). Επίσης, φαίνεται ότι η DPP είναι ανάλογη του κόστους επένδυσης καθώς μεγαλύτερο κεφάλαιο απαιτεί περισσότερα χρόνια αποπληρωμής ενώ μικρότερο κεφάλαιο σημαίνει ταχύτερη απόσβεση. Η ελάχιστη τιμή της DPP και των τριών συστημάτων συναντάται στο τετραβάθμιο σύστημα. Εντοπίζεται για κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 200 €/MWh (0.20 €/kWh), για κεφάλαιο ίσο με το 70 % του αρχικού κόστους επένδυσης και ισούται με 1.79 έτη. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής μελέτης έδειξαν την αξιολογη αξιοποίηση του ORC σε εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> για εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας το οποίο αξίζει να γίνει αντικείμενο μελλοντικών ερευνών.

## Abstract

In modern times, the energy industry produces greenhouse gases, enhancing global warming. Carbon Capture and Storage (CCS) plays a catalytic role in reducing CO<sub>2</sub> emissions produced by human activities and burdening the environment. An important part of CCS is the compression of CO<sub>2</sub> during which heat is produced in a low or medium range of temperatures. In this thesis, the exploitation of the waste heat of CO<sub>2</sub> compressors, to produce electricity, was examined in order to minimize the consumption of the compression system. Systems of 4, 5 and 6 compressors with and without ORC presence were studied. The study was performed with Aspen Plus V12.0 software. The optimization that took part was aimed at minimizing the consumption of the compressors and not the maximum output of the ORC. For this reason, the optimal choice for CO<sub>2</sub> compression with a compression ratio of 1:150, is the six-stage system with the refrigerant R1234ze at an ORC evaporation pressure equal to 9 bar and temperature  $T_{htf,wc,out}$  25 °C or with R1234yf at the same temperature but at a pressure of 12 bar. The minimum consumption achieved in both cases is equal to 4,136 kW<sub>e</sub>. The consumption reduction of compressors due to the ORC system and the thermal efficiency of ORC are equal to 1.21 % and 2.16 %, respectively. Also, a financial evaluation was performed for the ORC system. It was found that the 4-compressor system has the highest Net Present Value (€ 2,190,973), the highest Internal Rate of Return (36.7 %) and annual electricity savings (1,252 MW<sub>e</sub>/year). This system also presents the shortest Discounted Payback Period (2.8 years) and the lowest specific investment cost (3,710 €/kW<sub>e</sub>). Therefore, adding ORC to a 4-compressor CO<sub>2</sub> system presents itself as the most economically preferable investment. From the sensitivity analysis carried out, it was observed that with the increase in the cost of electricity, the Discounted Payback Period (DPP) decreases. Moreover, it appears that the DPP is proportional to the investment capital as a larger capital requires more years of repayment while a smaller capital means faster payback. The minimum value of DPP of all three systems is found in the four-stage system. It is identified for an electricity cost of 200 €/MWh (0.20 €/kWh), for capital equal to 70 % of the initial investment capital and equals to 1.79 years. The results of the present diploma study showed the remarkable utilization of ORC in a CO<sub>2</sub> compression system for the exploitation of waste heat which deserves to be the subject of future research.

## Συνομογραφίες

<i>Capex</i>	Capital Expenditure
<i>CCS</i>	Carbon Capture and Storage
<i>CCU</i>	Carbon Capture and Utilisation
<i>CEPCI</i>	Chemical Engineering Plant Cost Index
<i>DPP</i>	Discounted Payback Period
<i>EGR</i>	Exhaust gas Recirculation
<i>EOR</i>	Enhanced Oil Recovery
<i>GWP</i>	Global Warming Potential
<i>HDD</i>	Heavy Duty Diesel
<i>HFO</i>	Hydrofluoroolefin
<i>HTF</i>	Heat Transfer Fluid
<i>ICI</i>	Initial Capital Cost Investment
<i>IGCC</i>	Integrated Gasification Combined Cycle
<i>IRR</i>	Internal Rate of Return
<i>MEA</i>	Monoethanolamine
<i>NPV</i>	Net Present Value
<i>ODP</i>	Ozone Depletion Potential
<i>ORC</i>	Organic Rankine Cycle
<i>PP</i>	Pinch Point

<i>SIC</i>	Specific Investment Cost
<i>SPB</i>	Simple Payback Period
<i>TIT</i>	Turbine Inlet Temperature
<i>TP</i>	Tail pipe
<i>WGS</i>	Water Gas Shift
<i>WHR</i>	Waste Heat Recovery
<i>MEK</i>	Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως

### **Μεταβλητές**

$\dot{m}$	Παροχή μάζας (kg/s)
$p_r$	λόγος συμπίεσης (-)
$h$	Ειδική ενθαλπία (kJ/kg)
$P$	Ηλεκτρική ισχύς (kW <sub>e</sub> )
$Q$	Θερμική ισχύς (kW <sub>th</sub> )
$T$	Θερμοκρασία (°C)
$p$	Πίεση (bar)
$\eta$	Βαθμός απόδοσης (%)



**Δείκτες**

<i>c</i>	συμπιεστής
<i>cond</i>	συμπυκνωτής
<i>e</i>	ηλεκτρικός
<i>em</i>	ηλεκτρομηχανικός
<i>ev</i>	ατμοποιητής
<i>exp</i>	εκτονωτής
<i>f</i>	καύσιμο
<i>wc</i>	Υδροψυκτος ψύκτης
<i>htf</i>	ρευστό μεταφοράς θερμότητας
<i>ic</i>	ενδιάμεσος ψύκτης CO <sub>2</sub>
<i>in</i>	είσοδος
<i>is</i>	ισεντροπικός
<i>net</i>	καθαρός
<i>no-ORC</i>	Χωρίς ενσωμάτωση συστήματος ORC
<i>OM</i>	Λειτουργία και συντήρηση
<i>ORC</i>	Οργανικός Κύκλος Rankine
<i>out</i>	έξοδος
<i>pump</i>	αντλία
<i>tot</i>	συνολικός
<i>w</i>	Ψυκτικό νερό
<i>WHR</i>	Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας

## 1. Εισαγωγή

Οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις του σύγχρονου κόσμου δημιουργούν μια επιτακτική ανάγκη για μαζική παραγωγή ενέργειας. Η βιομηχανία της ενέργειας προκαλεί μείζονα προβλήματα στο περιβάλλον καθώς παράγει αέρια του θερμοκηπίου ενισχύοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η μείωση της παγκόσμιας υπερθέρμανσης μέχρι και 1.5 °C αποτελεί προτεραιότητα και προϋποθέτει άμεσες και ουσιαστικές αλλαγές στο ενεργειακό σύστημα (Wieland, et al., 2021).

Για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες και επιβαρύνουν το περιβάλλον, καταλυτικό ρόλο μπορεί να διαδραματίσει η δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS). Το σύστημα CCS απαρτίζεται από την δέσμευση, την συμπίεση, την μεταφορά και την μόνιμη γεωλογική εναπόθεση του CO<sub>2</sub>.

Σήμερα, οι περισσότερες έρευνες που σχετίζονται με το CCS, επικεντρώνονται στην δέσμευση και την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> και όχι τόσο στην συμπίεση του. Ωστόσο, η κατανάλωση ισχύος των συμπιεστών του CO<sub>2</sub> επηρεάζει άμεσα την απόδοση μιας εγκατάστασης CCS καθώς και το σύνολο των δαπανών της. Η συμπίεση του CO<sub>2</sub> απαιτεί περίπου 90–120 kWh ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα. Οι δαπάνες του συστήματος συμπίεσης προσεγγίζουν έως και το ένα τρίτο του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας ενός συστήματος CCS, μετάκαυσης που έχει ως βάση του αμίνες (Pei, et al., 2014).

Οι συμπιεστές χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια για να συμπιέσουν CO<sub>2</sub> αυξάνοντας έτσι την ενέργειά του. Συγκεκριμένα, αυξάνεται η πίεση αλλά και η θερμοκρασία του αερίου. Η θερμοκρασία αυτή είναι χαμηλής ή μεσαίας κλίμακας. Για τον λόγο αυτό συνήθως δεν θεωρείται αξιόλογη πηγή θερμότητας και απορρίπτεται στο περιβάλλον. Ιδιαίτερα υψηλή ικανότητα στην εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας σε τέτοιες θερμοκρασίες παρουσιάζει ο Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC).

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ειδοποιός διαφορά του με ένα κλασικό κύκλο Rankine έγκειται στο ότι ο ORC χρησιμοποιεί οργανικά ρευστά ως εργαζόμενο μέσο αντί για νερό. Ο ORC σε εύρος μικρών έως μεσαίων θερμοκρασιών είναι σημαντικά αποτελεσματικότερος από τον κύκλο Rankine νερού – ατμού. Έχει την δυνατότητα παραγωγής από μερικά kW έως και δεκάδες MW αξιοποιώντας απορριπτόμενη θερμότητα (Wieland, et al., 2021).

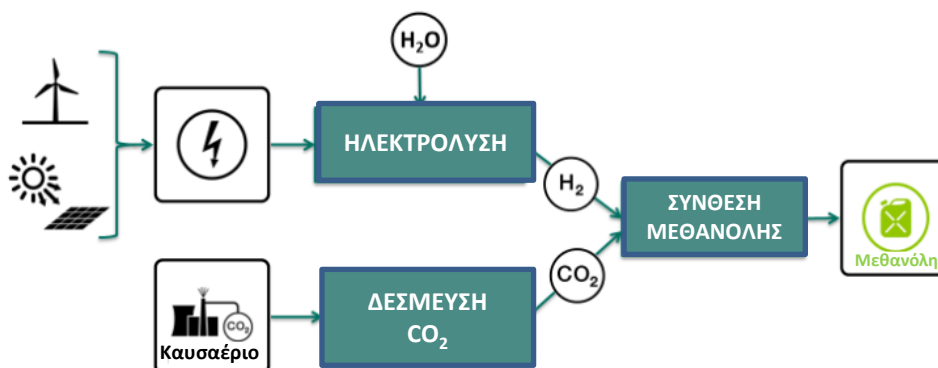
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας συμπιεστών CO<sub>2</sub> για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ORC με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του συστήματος συμπίεσης. Επίσης, διεξάγεται οικονομική αξιολόγηση για την ενσωμάτωση του συστήματος ORC. Αξίζει να διευκρινιστεί ότι δεν πρόκειται για μια μελέτη για το σύστημα CCS γενικώς αλλά για μια συστηματική διερεύνηση για την ανάκτηση θερμότητας που παράγεται κατά τη συμπίεση του CO<sub>2</sub> μέσω της τεχνολογίας ORC.

## 1.1 Δέσμευση, αποθήκευση και αξιοποίηση CO<sub>2</sub>

Οι μεγάλες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της γης, που απορρέουν από την παραγωγή και την αξιοποίηση της ενέργειας, έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί η μείωση των αέριων ρύπων, που προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη, και για τον σκοπό αυτό υπάρχουν διάφορες μέθοδοι. Η πιο σύγχρονη αυτών είναι η δέσμευση και αποθήκευση CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage – CCS) και η δέσμευση και η αξιοποίηση του διοξειδίου του άνθρακα (Carbon capture and Utilization – CCU) (Κάπρης, 2022).

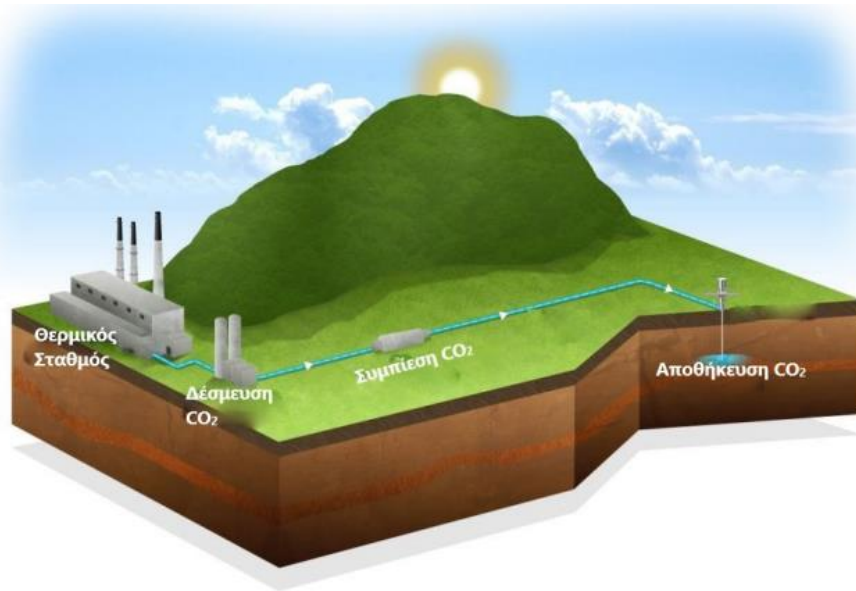
Οι μέθοδοι CCS και CCU έχουν κοινές δύο από τις τρεις διεργασίες που τις απαρτίζουν: τη δέσμευση και τη μεταφορά του CO<sub>2</sub>. Η δέσμευση και ο διαχωρισμός του διοξειδίου του άνθρακα, γίνεται κατά βάση με χημική (με χρήση στηλών που έχουν βάση τις αμίνες) και φυσική απορρόφηση. Αυτές είναι διαδικασίες που πραγματοποιούνται μετά την καύση. Σε ορισμένα συστήματα, όμως, όπως τα IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle), η δέσμευση μπορεί να επιτευχθεί πριν την καύση (Γεωργουσόπουλος, 2020). Ακόμη, ο διαχωρισμός και η διαλογή του CO<sub>2</sub> μπορεί να γίνει με μεμβράνες διαχωρισμού αερίων, προσρόφηση καθώς και χαμηλής θερμοκρασίας απόσταξη (Κάπρης, 2022).

Η μέθοδος CCU βασίζεται στην δέσμευση, τη μεταφορά και την εκμετάλλευση του CO<sub>2</sub> ως πρώτη ύλη ή και τον συνδυασμό του με άλλες χημικές ενώσεις με σκοπό την παραγωγή προϊόντων. Για παράδειγμα, μπορεί να ενσωματωθεί μόνιμα, με ανάμειξη, σε ήδη υπάρχοντα οικοδομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα. Ακόμη, μπορεί να μετασχηματιστεί σε καύσιμα όπως η μεθανόλη, αν συνδυαστεί με το υδρογόνο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.1.1*. Ειδικότερα, αν το υδρογόνο που χρησιμοποιηθεί έχει προκύψει με χρήση ενέργειας ανανεώσιμων πηγών (ηλεκτρόλυση του νερού), τότε τα οφέλη είναι μεγαλύτερα. Με τους παραπάνω τρόπους αποφεύγεται η άμεση απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και η μόλυνση του περιβάλλοντος. Πρακτική λύση, αποτελεί και η χρήση του στον τομέα της γεωργίας, καθώς τα φυτά χρησιμοποιούν το CO<sub>2</sub> για την διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Γεωργουσόπουλος, 2020).



Εικόνα 1.1.1 Σχηματική αναπαράσταση της αξιοποίησης του CO<sub>2</sub> για παραγωγή μεθανόλης (Vidal Vázquez, 2022)

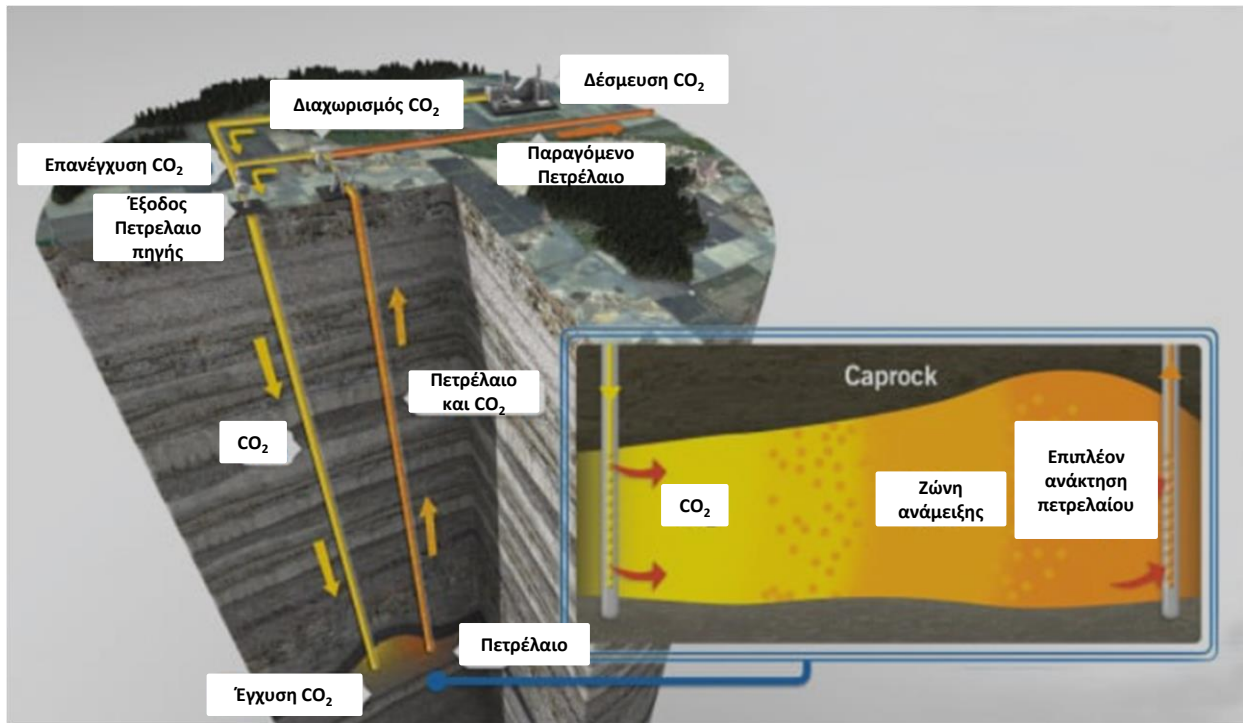
Η μέθοδος CCS αποτελείται από τρεις βασικές διεργασίες: τη δέσμευσή του CO<sub>2</sub>, τη μεταφορά και τη γεωλογική εναπόθεσή του, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην *Εικόνα 1.1.2*. Η αποθήκευση του γίνεται κυρίως σε ενεργά και εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, κάτω από στρώματα χαμηλής διαπερατότητας, σε μορφή υπερκρίσιμου ρευστού (υδροδυναμική παγίδευση) (Κάπρης, 2022). Τα κοιτάσματα αυτά πολλές φορές ξεπερνούν τα 1000 μέτρα σε βάθος (Γεωργουσόπουλος, 2020).



**Εικόνα 1.1.2 Απεικόνιση της μεθόδου CCS (Γεωργουσόπουλος, 2020)**

Στην *Εικόνα 1.1.3* περιγράφεται ένας μηχανισμός εναπόθεσης, στον οποίο γίνεται διάλυση του αερίου CO<sub>2</sub> σε υγρό λάδι υπόγειων δεξαμενών. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery - EOR) (Κάπρης, 2022).

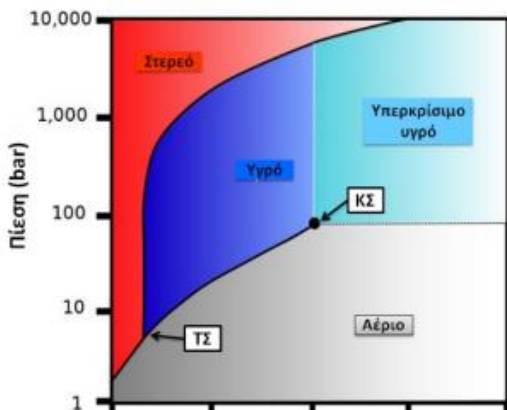
Το CO<sub>2</sub> μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί ως συμπιεσμένο αέριο, υγρό (όταν πρόκειται για μεταφορά μέσω πλοίου) ή σε υπερκρίσιμη κατάσταση (31.18, 73.8 bar) (Γεωργουσόπουλος, 2020). Ο τελευταίος θεωρείται ο πιο αποδοτικός και ασφαλής τρόπος εναπόθεσης, καθώς μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα διαρροής του ρευστού στην ατμόσφαιρα (Cue'llar-Franca & Azaragic, 2015). Σε περίπτωση που το διοξείδιο βρεθεί σε διφασική ροή υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας συμπυκνωμάτων στους αγωγούς διανομής, ακόμη και στην είσοδο συμπιεστή. Συνεπώς, κι αυτό αποτελεί βασικό λόγο μεταφοράς του διοξειδίου του άνθρακα σε πιέσεις μεγαλύτερες από την κρίσιμη πίεση. Επίσης, ο ειδικός όγκος του CO<sub>2</sub>, όταν βρίσκεται σε συνθήκες υψηλότερες του κρίσιμου σημείου, γίνεται έως και 500 φορές μικρότερος από τον ειδικό όγκο του στην αέρια φάση. Έτσι, μειώνεται σημαντικά ο απαιτούμενος όγκων των σωληνώσεων για τη διανομή του, άρα και το κόστος της μεταφοράς του (Pei, et al., 2014).



**Εικόνα 1.1.3 Χρήση του CO<sub>2</sub> για την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (Overton, 2016)**

Το CO<sub>2</sub> όταν είναι υπερκρίσιμο παρουσιάζει πυκνότητες κοντινές σε αυτές των υγρών, αλλά παράλληλα μπορεί να συμπιεστεί, όπως τα αέρια. Για τη μεταφορά του δια μέσου δικτύου αγωγών, το διοξείδιο πρέπει να βρίσκεται συνήθως σε πιέσεις 15-20 MPa (150-200 bar) (Pei, et al., 2014).

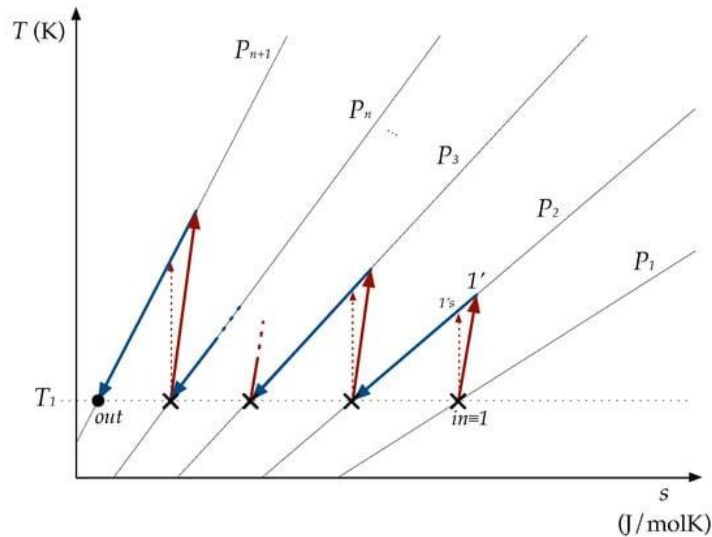
Όπως παρατηρείται στην *Εικόνα 1.1.4*, σε πιέσεις άνω των 150 bar, ανάλογα με την θερμοκρασία, το CO<sub>2</sub> θα είναι είτε υγρό είτε υπερκρίσιμο ρευστό. Οι θερμοκρασίες μετά την συμπίεση του διοξειδίου είναι αρκετά υψηλές, άρα δεν γίνεται να υπάρξει το τελευταίο στην στερεή του φάση στις συνθήκες αυτές (παρά μόνο με μεγάλη ψύξη) (Γεωργουσόπουλος, 2020).



**Εικόνα 1.1.4 Διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα (Γεωργουσόπουλος, 2020)**

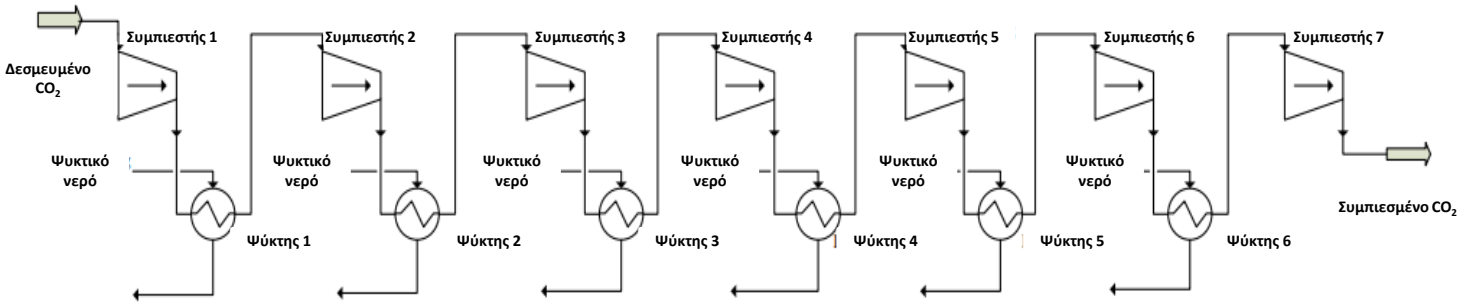
Το CO<sub>2</sub>, λόγω του μοριακού του βάρους, που είναι μεγαλύτερο από αυτό του ατμοσφαιρικού αέρα, περιορίζει την ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξουν τα περύγια του συμπιεστή. Για τον λόγο αυτό προκύπτει συγκεκριμένο όριο του λόγου συμπίεσης ανά βαθμίδα (Pei, et al., 2014). Έτσι, για να πετύχουμε λόγο πίεσης παραδείγματος χάρη 1:150 χρειάζονται πολλές βαθμίδες συμπίεσης.

Καθώς συμπιέζεται σε κάθε βαθμίδα το CO<sub>2</sub>, εκτός από την πίεση, αυξάνεται και η θερμοκρασία του. Αυτό είναι ανεπιθύμητο διότι, με την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνεται η πυκνότητα του CO<sub>2</sub> και στην επόμενη βαθμίδα θα πρέπει να δαπανηθεί μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για την συμπίεση του. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η ενδιάμεση ψύξη μεταξύ διαδοχικών βαθμίδων ώστε η διεργασία να προσεγγίσει όσο περισσότερο γίνεται την ισόθερμη μεταβολή που απαιτεί μικρότερο έργο συμπίεσης, όπως περιγράφεται στην *Εικόνα 1.1.5*.



**Εικόνα 1.1.5** Απεικόνιση πολυβάθμιας συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη σε διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας. (López-Paniagua, et al., 2020)

Έτσι, για να βρεθεί το CO<sub>2</sub> σε υπερκρίσιμη κατάσταση απαιτούνται πολυβάθμια συμπίεση και ενδιάμεση ψύξη, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.1.6* (Pei, et al., 2014).



**Εικόνα 1.1.6** Πολυβάθμια συμπίεση του CO<sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη (Pei, et al., 2014)

Ένα ψυκτικό μέσο παραλαμβάνει ορισμένο ποσό θερμότητας από το συμπιεσμένο και θερμό CO<sub>2</sub> μέσω των εναλλακτών (intercoolers). Συνήθως η θερμότητα αυτή απορρίπτεται στο περιβάλλον (waste heat) καθώς εντοπίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά.



Μια σύγχρονη μέθοδος, εκμετάλλευσης θερμότητας από πηγές χαμηλών θερμοκρασιών είναι τα συστήματα ORC (Organic Rankine Cycle). Με την χρήση των τελευταίων μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια η οποία θα μειώσει την κατανάλωση ισχύος των συμπιεστών.

## 1.2 ORC και εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της τεχνολογίας ORC με στόχο την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

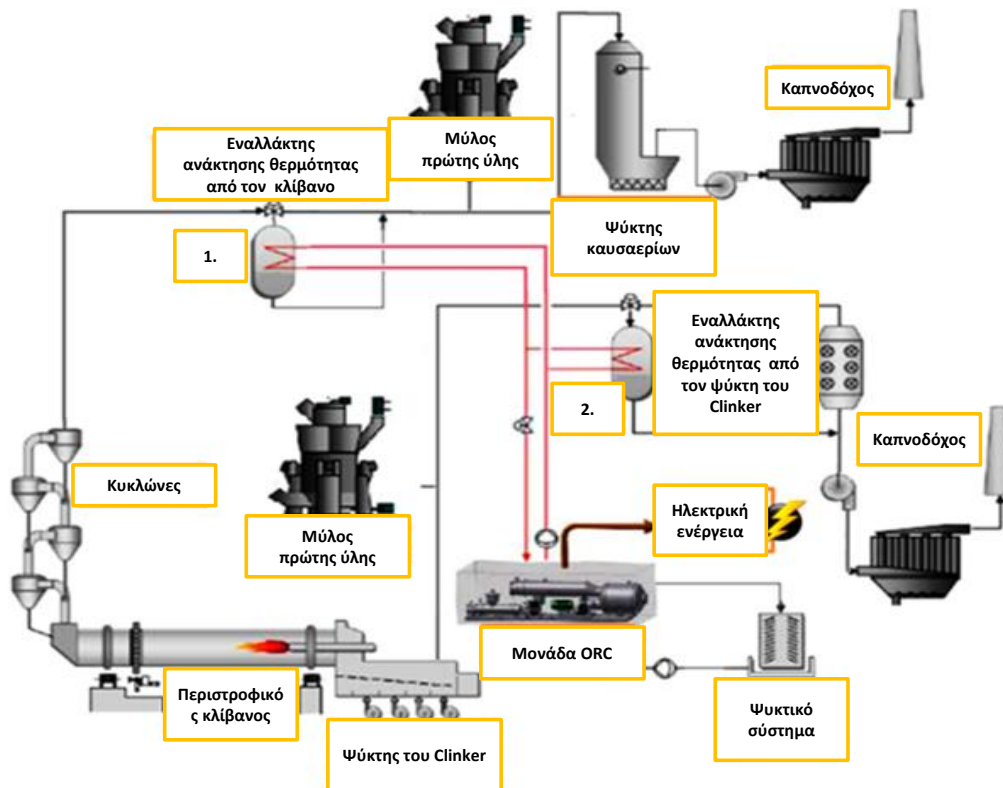
Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι μια τεχνολογία ιδιαίτερα χρήσιμη και ανερχόμενη για την μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα σύγχρονα συστήματα ORC μπορούν να αξιοποιούν απορριπτόμενη θερμότητα από θερμικές διεργασίες βιομηχανιών και μηχανών εσωτερικής καύσεως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθως παρουσιάζονται παραδείγματα από εφαρμογές ORC για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε διάφορους τομείς.

### 1.2.1 Απορριπτόμενη θερμότητα από την τσιμεντοβιομηχανία

Σε μια βιομηχανία τσιμέντου οι απώλειες ενέργειας από τα θερμά αέρια ρεύματα φτάνουν μέχρι και το 40 % της ενέργειας εισόδου της εγκατάστασης (Madloul, et al., 2011). Οι κύριες πηγές θερμών αερίων είναι οι εξής: τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον κλίβανο (exhaust gases from rotary kiln) και ο αέρας ψύξης του κλίνκερ (clinker cooling air). Για την αξιοποίηση της θερμότητας των τελευταίων είθισται η εγκατάσταση εναλλακτών που θα μεταδώσουν την θερμότητα στο οργανικό ρευστό ενός ORC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.2.1*.

Η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας με χρήση ORC εφαρμόζεται σε διάφορες τσιμεντοβιομηχανίες. Υπάρχει δυνατότητα με την ηλεκτροπαραγωγή του ORC να καλυφθεί μέχρι και το 30 % των ιδιοκαταναλώσεων μιας εγκατάστασης παραγωγής τσιμέντου. Επίσης, η ενσωμάτωση του συστήματος ORC μπορεί να βελτιώσει τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης περίπου 10 %. Ένας συνήθης χρόνος αποπληρωμής για την προσθήκη αυτή είναι 2 χρόνια.

Άξιος αναφοράς είναι ο σταθμός στο Lengfurt της Γερμανίας όπου η ηλεκτρική ενέργεια που παραγόταν με τεχνολογία ORC κάλυπτε το 10 % των αναγκών του εργοστασίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην εγκατάσταση αυτή, το καυσαέριο του κλιβάνου βρισκόταν στους 350 °C και ο ζεστός αέρας ψύξης του κλίνκερ στους 275 °C. Συγκεκριμένα, η παραγωγή ήταν 1.3 MW<sub>e</sub> ενώ εξοικονομούσαν 7,000 τόνοι CO<sub>2</sub> ετησίως (Μπέλλος, 2012).



Εικόνα 1.2.1 Εγκατάσταση ORC στην παραγωγή τσιμέντου (Campana, et al., 2013)

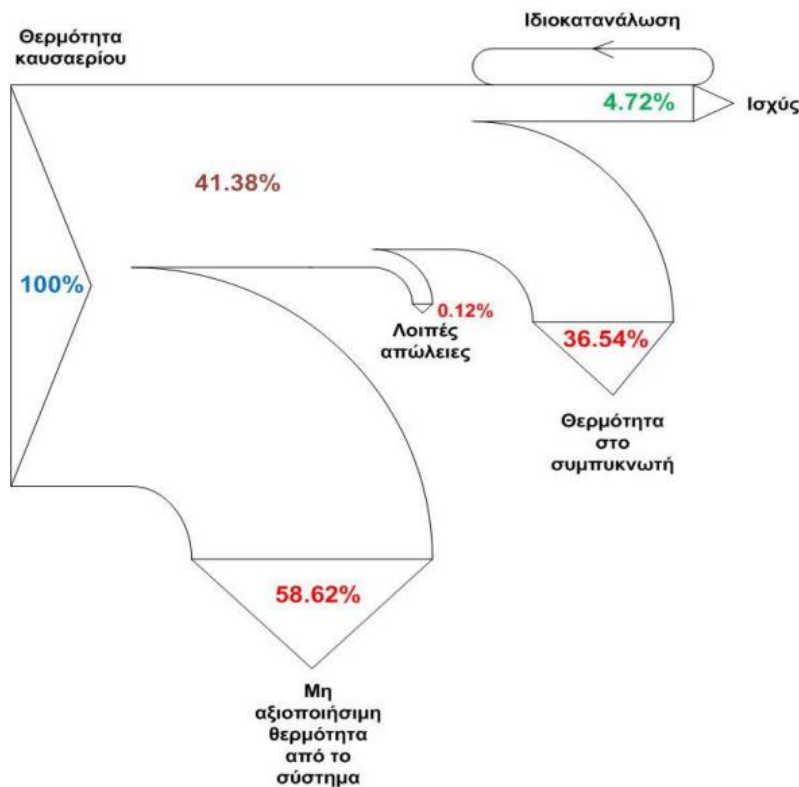
### 1.2.2 Απορριπτόμενη θερμότητα από την βιομηχανία αλουμινίου

Σε μια βιομηχανία αλουμινίου αποβάλλονται μεγάλα ποσά ενέργειας προς το περιβάλλον μέσω των θερμών καυσαερίων. Τα καυσαέρια αυτά παράγονται από τους φούρνους του αλουμινίου ή κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Η θερμοκρασία τους είναι χαμηλή και συνήθως δεν ξεπερνά τους 200 °C. Σε αυτό το θερμοκρασιακό επίπεδο ο καταλληλότερος και αποδοτικότερος τρόπος για εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας είναι το ORC.

Στην *Εικόνα 1.2.2* φαίνεται το Διάγραμμα Sankey που περιγράφει την δυνατότητα εκμετάλλευσης απορριπτόμενης θερμότητας από ORC σε βιομηχανία αλουμινίου (Μπέλλος, 2012).

Στην συγκεκριμένη διάταξη με τη χρήση της θερμότητας των καυσαερίων παράγονται 3.54 MW<sub>e</sub> που καλύπτει ικανοποιητικό ποσοστό των ιδιοκαταναλώσεων της εγκατάστασης παραγωγής αλουμινίου. Γίνεται, ωστόσο, αντιληπτό ότι δεν είναι δυνατή η πλήρης εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων καθώς σημαντικό ποσοστό της θερμότητας παραμένει αναξιοποίητο.





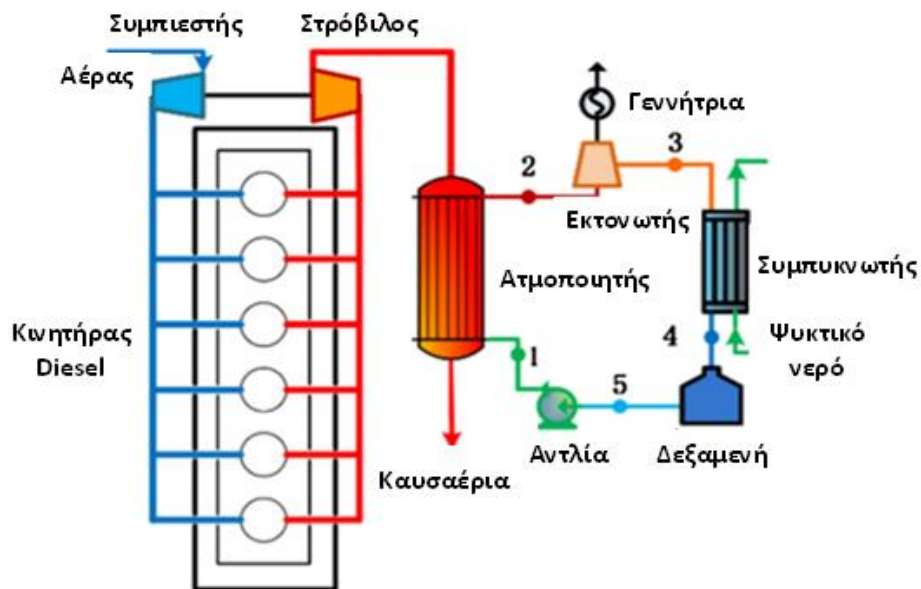
Εικόνα 1.2.2 Διάγραμμα Sankey για βιομηχανία αλουμινίου (Μπέλλος, 2012)

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθιστά τόσο χρήσιμο το σύστημα ORC στην βιομηχανία του αλουμινίου είναι η αποφυγή εκπομπών CO<sub>2</sub>. Με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αποφεύγεται η επιπλέον καύση και η κατανάλωση καυσίμου όπως ο λιγνίτης που επιφέρουν μεγάλες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Σε μια εγκατάσταση που παράγονται 0,85 τόνοι CO<sub>2</sub> ανά παραγόμενη MWh<sub>e</sub> μπορούν να αποφευχθούν περίπου 21 χιλιάδες CO<sub>2</sub> τόνοι ετησίως (Μπέλλος, 2012).

### 1.2.3 Απορριπτόμενη θερμότητα από μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ)

Οι μηχανές ντίζελ βαρέως τύπου (heavy-duty diesel engines – HDD engines) απορρίπτουν θερμότητα με διάφορους τρόπους. Η θερμότητα αυτή συναντάται σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτι που καθιστά ιδανική την χρήση ORC για την εκμετάλλευσή της. Από τις κυριότερες και συνηθέστερες πηγές θερμότητας είναι τα καυσαέρια ανακυκλοφορίας (Exhaust gas Recirculation – EGR). Τα καυσαέρια αυτά αποτελούν μια υψηλής ποιότητας πηγή θερμότητας καθώς συναντώνται σε θερμοκρασίες από 280 έως και 600 °C. Τα EGR είναι μέρος των καυσαερίων που παράγεται στον κινητήρα και επιστρέφει σε αυτόν συνδυαζόμενο με τον αέρα τροφοδότησης για περαιτέρω καύση. Απορριπτόμενη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας (200-470 °C) φέρουν και τα καυσαέρια της εξάτμισης (Tail pipe exhaust gas – TP exhaust gas). Εκμετάλλευση της θερμότητας των TP καυσαερίων από ORC παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.2.3. Τα καυσαέρια της εξάτμισης έχουν αρκετά μεγαλύτερη παροχή μάζας από ότι τα EGR. Ωστόσο,

τα EGR βρίσκονται σε τόσο υψηλή θερμοκρασία που προσφέρουν θερμότητα ίδιου επιπέδου με τα TP.



**Εικόνα 1.2.3 Εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων κινητήρα HDD με ORC (Zhao, et al., 2017)**

Δύο πηγές που δεν είθισται να αξιοποιούνται για εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας είναι ο συμπιεσμένος θερμός αέρας εισόδου στον κινητήρα (περίπου 55-155 °C) και το ψυκτικό αυτού (περίπου 75-85 °C). Οι πηγές αυτές παρόλο που βρίσκονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω της υψηλής παροχής μάζας τους στο σύστημα των μηχανών HDD περιέχουν αθροιστικά μέχρι και το 30 % της ενέργειας του καυσίμου. Συγκεκριμένα το ψυκτικό (περίπου 2.5-4 kg/s) περιέχει μεγαλύτερη ενέργεια συνολικά από ότι τα καυσαέρια EGR (0.00-0.06 kg/s) (Xu, et al., 2019).

Σε έρευνα για HDD κινητήρες αποδείχτηκε ότι η χρήση ORC μπορεί να αυξήσει την ισχύ που αποδίδει το όχημα και να ενισχύσει την εξοικονόμηση καυσίμου. Το ORC μπορεί να επιτύχει ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας μέχρι και 15 %. Η αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλότερη θερμοκρασία καυσαερίων που αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα. Έτσι, μειώνεται η θερμική ρύπανση που προκαλούν οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK) στο περιβάλλον (MingShan, et al., 2011).

Μια ακόμη εφαρμογή του ORC είναι η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από συστήματα συμπίεσης CO<sub>2</sub>. Η μέθοδος αυτή είναι ανερχόμενη και δεν έχει διερευνηθεί αρκετά. Στο *Κεφάλαιο 1.3* παρουσιάζονται σχετικές μελέτες.

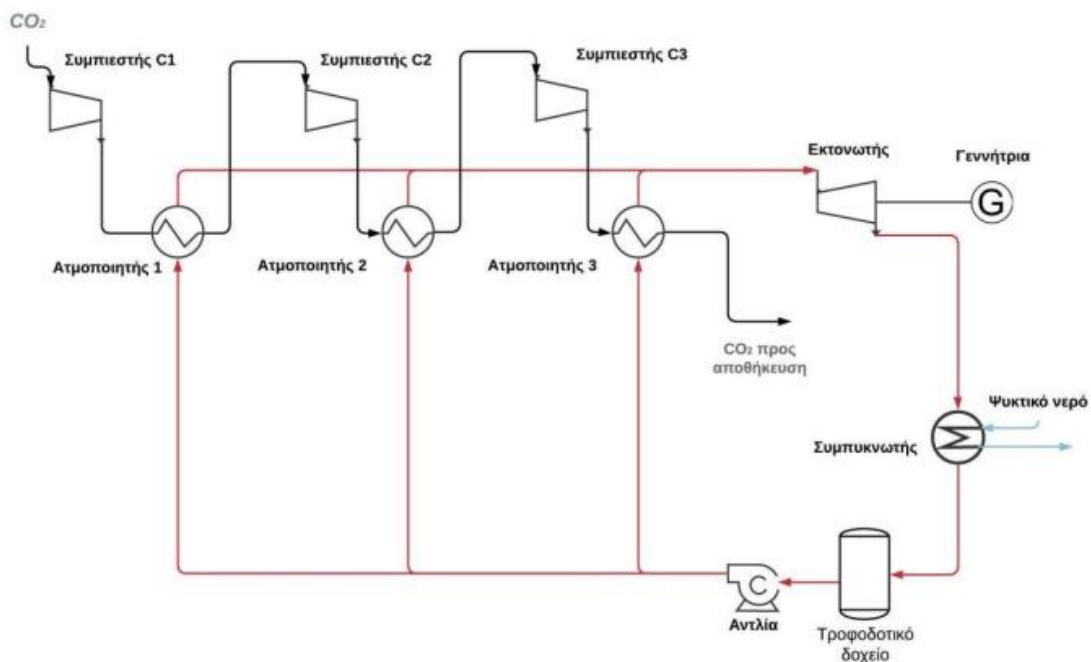
### 1.3 Ενσωμάτωση ORC σε μονάδες συμπίεσης CO<sub>2</sub>

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας από δημοσιεύσεις, διπλωματικές εργασίες και άρθρα πάνω σε θέματα που αφορούν τον συνδυασμό μονάδων συμπίεσης CO<sub>2</sub> με τον οργανικό κύκλο Rankine.

Ο Γεωργουσόπουλος (2020) μελέτησε την δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας από τις εξής πηγές: μια μονάδα διαχωρισμού αέρα, μια μονάδα δέσμευσης CO<sub>2</sub> και από την ψύξη αερίου σύνθεσης μετά από αντιδραστήρα WGS (Water Gas Shift).

Συγκεκριμένα, για τη μονάδα δέσμευσης CO<sub>2</sub>, μελετήθηκε η εκμετάλλευση της θερμότητας που παράγεται μετά από τη συμπίεση του διοξειδίου, μέσω του οργανικού κύκλου Rankine. Το σύστημα που χρησιμοποίησε περιλάμβανε 3 στάδια συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη. Στην *Εικόνα 1.3.1* φαίνεται η διάταξη ORC με τους συμπιεστές CO<sub>2</sub> που μοντελοποιήθηκε. Με κόκκινο χρώμα είναι το κύκλωμα ORC, ενώ με μαύρο η πορεία του CO<sub>2</sub>.

Το CO<sub>2</sub> εισήλθε στο σύστημα με παροχή 10.907 kg/sec, πίεση ίση με 1.5 bar και θερμοκρασία 35 °C. Για αυτήν τη θερμοκρασία και λόγο πίεσης ίσο με 4.64, η θερμοκρασία εξόδου από τον πρώτο συμπιεστή προέκυψε ίση με 165 °C. Για τους συμπιεστές χρησιμοποιήθηκε ισεντροπικός και μηχανικός βαθμός απόδοσης ίσοι με 0.8 και 0.97 αντίστοιχα. Για τα δεδομένα αυτά προέκυψε συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των τριών συμπιεστών ίση με 3,730 kW.



Εικόνα 1.3.1 Σύστημα τριβάθμιας συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ORC (Γεωργουσόπουλος, 2020)

Για το ORC τα Pinch Points των ατμοποιητών ορίστηκαν στους 10 K ενώ η υπερθέρμανση τους στους 5 K. Για τον συμπυκνωτή, το Pinch Point ορίστηκε στους 5 K. Το νερό είχε θερμοκρασία εισόδου 20 °C και αυξήθηκε κατά 5 °C μετά την συμπύκνωση. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης του οργανικού υλικού ήταν μεταξύ 25 και 31 °C, διότι το νερό είχε θερμοκρασία 20 °C και επειδή σκοπός ήταν να ψυχθεί στους 35 °C το διοξείδιο. Η μέγιστη πίεση ατμοποίησης θεωρήθηκε ίση με το 90 % της κρίσιμης πίεσης του εκάστοτε ρευστού.

Ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και του εκτονωτή ορίστηκαν ίσοι με 0.85 και 0.95 αντίστοιχα. Για την αντλία επιλέχθηκε ισεντροπικός βαθμός απόδοσης ίσος με 0.75 ενώ για τον εκτονωτή 0.8.

Ο στόχος της μοντελοποίησης αυτής ήταν η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος από τους συμπιεστές. Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκαν διάφορα οργανικά ρευστά, αυξάνοντας την πίεση ατμοποίησης ανά 1 bar. Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής: R1234yf, R1234ze, R601, R600A, R1270, R290.

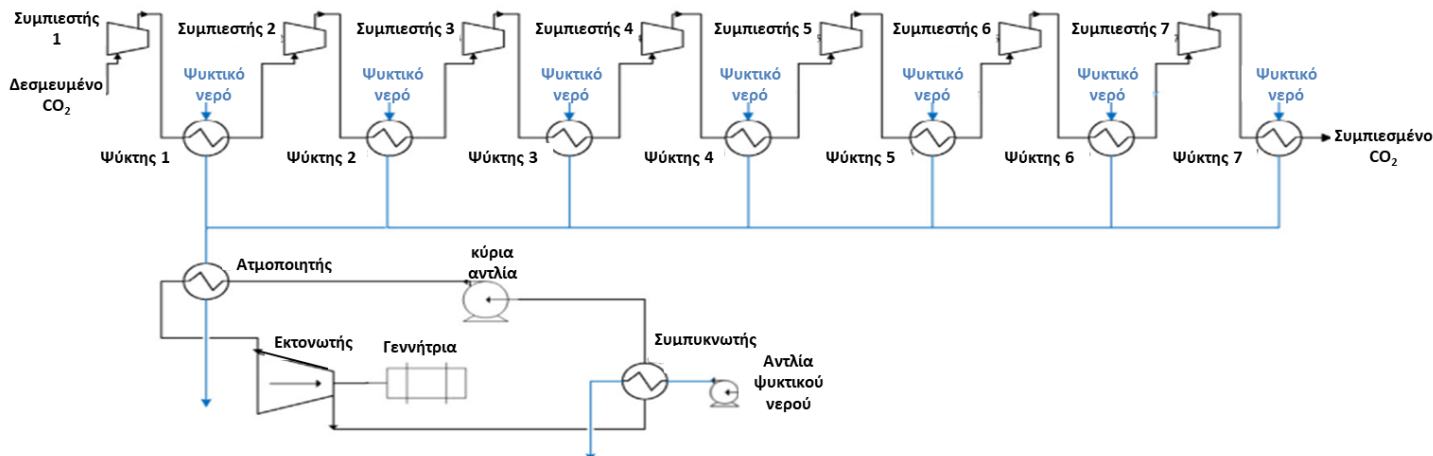
Με την μελέτη αυτή βρέθηκε ότι η μέγιστη μείωση κατανάλωσης των συμπιεστών εντοπίζεται στο R1234ze με 12.68 % ενώ την μικρότερη μείωση έχει το πεντάνιο R601 με 9.21 %. Καλή μείωση παρατηρήθηκε και στο ισοβουτάνιο R600a με 11.90 % ενώ τα υπόλοιπα οργανικά ρευστά έχουν μικρότερη και μεταξύ τους παρόμοια μείωση κατανάλωσης. Στα περισσότερα ρευστά, εκτός από τα R601, R600a, η βέλτιστη πίεση ατμοποίησης ήταν ίση με τη μέγιστη (90 % της κρίσιμης) που θα μπορούσε να φτάσει κάθε εργαζόμενο μέσο.

Τα R601, R1234ze, R600a είχαν την μεγαλύτερη κρίσιμη θερμοκρασία ίση με 196, 111 και 135 °C, αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες εξόδου του διοξειδίου του άνθρακα από κάθε συμπιεστή ήταν κοντά στις παραπάνω τιμές. Για τον λόγο αυτό τα συγκεκριμένα εργαζόμενα μέσα, είχαν και καλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Άρα συνέβαλαν περισσότερο στην παραγωγή ισχύος για να ισοσκελιστεί η κατανάλωση των συμπιεστών. Επίσης, το ψυκτικό R1234ze κατάφερε να ψύξει σε χαμηλές θερμοκρασίες το CO<sub>2</sub>, άρα βοήθησε στην μείωση της κατανάλωσης των συμπιεστών. Συνεπώς, το ρευστό αυτό αποτέλεσε τη βέλτιστη επιλογή διότι πέρα από πολύ καλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (10.08 %) παρουσίασε και σημαντική ψυκτική ικανότητα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το R600a και το R601 είχαν τους καλύτερους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης ίσους με 12.23 % και 12.36 %. Ωστόσο, δεν παρουσίασαν καλή ψυκτική ικανότητα και για αυτό δεν θεωρήθηκε κάποιο από τα δύο ως βέλτιστο ρευστό. Τέλος, τα υπόλοιπα ψυκτικά ρευστά έψυξαν αποδοτικά το CO<sub>2</sub> αλλά λόγω της απόκλισης της κρίσιμης τους θερμοκρασίας από τις θερμοκρασίες εξόδου του CO<sub>2</sub> από τους συμπιεστές, είχαν χαμηλότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (Γεωργουσόπουλος, 2020).

Στην δημοσίευσή τους οι Pei et al. (2014) συνέκριναν ένα σύστημα 2-βάθμιας συμπίεσης κρουστικών κυμάτων (shockwave compression) με ένα σύστημα πολυβάθμιας συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη. Σκοπός ήταν η μελέτη της ενεργειακής κατανάλωσης των δύο συστημάτων και η εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας της συμπίεσης από κύκλωμα ORC.

Για την πολυβάθμια συμπίεση χρησιμοποιήθηκε ένα 7-βάθμια εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη (intercooling compression). Ερευνήθηκε η χρήση συστήματος ORC για την ανάκτηση θερμότητας από το θερμό CO<sub>2</sub> με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για το σύστημα που παρατίθεται στην *Εικόνα 1.3.2*, ο λόγος συμπίεσης του διοξειδίου του άνθρακα ανά βαθμίδα ορίστηκε ίσος με 1.914. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του εκτονωτή και της κύριας αντλίας του ORC ορίστηκαν 85 % και 75 %, αντίστοιχα. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του ORC θεωρήθηκε 96 % και η θερμοκρασία στην οποία ψύχθηκε το CO<sub>2</sub> είναι 37 °C. Το εργαζόμενο μέσο του ORC είναι το κανονικό Πεντάνιο (n-Pentane). Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Fluid - HTF) για τη μεταφορά θερμότητας από τους ενδιάμεσους ψύκτες (intercoolers) στον ατμοποιητή του ORC ήταν το νερό. Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε και στον συμπυκνωτή του ORC σε θερμοκρασία 15 °C και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας τροφοδοσίας του ήταν 75 %.



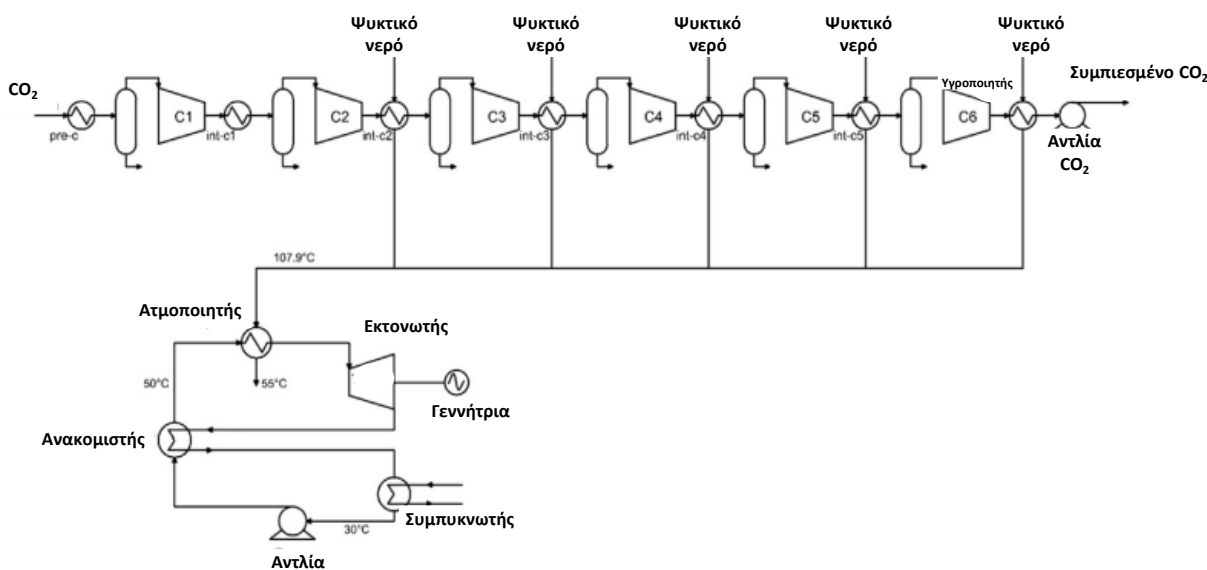
**Εικόνα 1.3.2** Επταβάθμια συμπίεση CO<sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη και χρήση ORC (Pei, et al., 2014)

Η θερμοκρασία TIT (turbine inlet temperature) στην είσοδο του εκτονωτή, περιορίστηκε από τη θερμοκρασία του νερού ψύξης. Οι Peng Pei et al. ερεύνησαν την επίδραση που έχει η αλλαγή της TIT στην απόδοση του ORC. Τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω. Η απόδοση του ORC αυξήθηκε με την αύξηση της TIT. Η ειδική ενέργεια συμπίεσης για θερμοκρασίες TIT 60-80 °C πήρε τιμές από 73.3 μέχρι και 77.7 kWh ανά τόνο CO<sub>2</sub>. Η βέλτιστη (ελάχιστη τιμή) (73.3 kWh/tn<sub>CO2</sub>) εντοπίστηκε στους 80 °C (350 K). Στην θερμοκρασία αυτή ο θερμικός βαθμός απόδοσης έγινε μέγιστος ( $\eta_{TH}=17\%$ ). Συνεπώς με τη χρήση του ORC, παράχθηκε ωφέλιμο έργο έως και το 17 % της απορριπτόμενης θερμότητας συμβάλλοντας στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Χωρίς αυτήν, η ειδική ενέργεια συμπίεσης θα έφτανε την τιμή των 88 kWh/tn<sub>CO2</sub> (Pei, et al., 2014).

Οι Farajollahi & Hossainpour (2017) μελέτησαν ένα σύστημα που αποτελείται από έναν θερμικό σταθμό 350 MW<sub>e</sub>, μία μονάδα απορρόφησης με βάση την μονοαιθανολαμίνη (Monoethanolamine - MEA) για τη δέσμευση CO<sub>2</sub> και μια διάταξη συμπίεσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας μεταξύ των συμπιεστών του CO<sub>2</sub>, ο ψύκτης του ατμού (steam cooler) και ο ψύκτης

των καυσαερίων ήταν τρεις πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Για την εκμετάλλευση αυτής χρησιμοποιήθηκε ένα κύκλωμα ORC για κάθε μια από τις παραπάνω πηγές.

Για την συμπίεση θεωρήθηκε ένα 6-βάθμιο σύστημα. Πριν από κάθε βαθμίδα συμπίεσης τοποθετήθηκαν ένας ψύκτης (εναλλάκτης θερμότητας) και ένα ατμοδοχείο (flash tank). Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή του νερού (σε υγρή φάση) από το ρεύμα CO<sub>2</sub> και την απόρριψη του πριν από την επόμενη συμπίεση. Μετά την τελευταία βαθμίδα συμπίεσης, χρησιμοποιήθηκε ένας υγροποιητής (liquefier) για να υγροποιηθεί το συμπιεσμένο αέριο CO<sub>2</sub> και να τροφοδοτηθεί μέσω αντλίας στην επιθυμητή πίεση. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.3.3*, η θερμότητα από 4 ψύκτες και τον υγροποιητή απάγεται από το νερό, το οποίο τη μεταδίδει στον ατμοποιητή ενός συστήματος ORC.



**Εικόνα 1.3.3 Ανάκτηση θερμότητας με ORC από συμπίεση CO<sub>2</sub> (Farajollahi & Hossainpour, 2017)**

Το CO<sub>2</sub> εισήλθε στο σύστημα με πίεση 1.65 bar, συμπιέστηκε με λόγο συμπίεσης ανά βαθμίδα ίσο με 2 και εξήλθε από το σύστημα στα 150 bar. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και των συμπιεστών του CO<sub>2</sub> ορίστηκαν 75 % και 85 %, αντίστοιχα. Στους ψύκτες υπήρχε πτώση πίεσης 2 %. Η συνολική κατανάλωση για την εγκατάσταση συμπίεσης του CO<sub>2</sub> (αντλία και συμπιεστές) ήταν 13.51 MW<sub>e</sub>. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Peng-Robinson. Το οργανικό ρευστό που επιλέχθηκε για το ORC είναι το κανονικό Πεντάνιο (n-Pentane) με κρίσιμη θερμοκρασία ίση με 196.5 °C και κρίσιμη πίεση 33.75 bar.

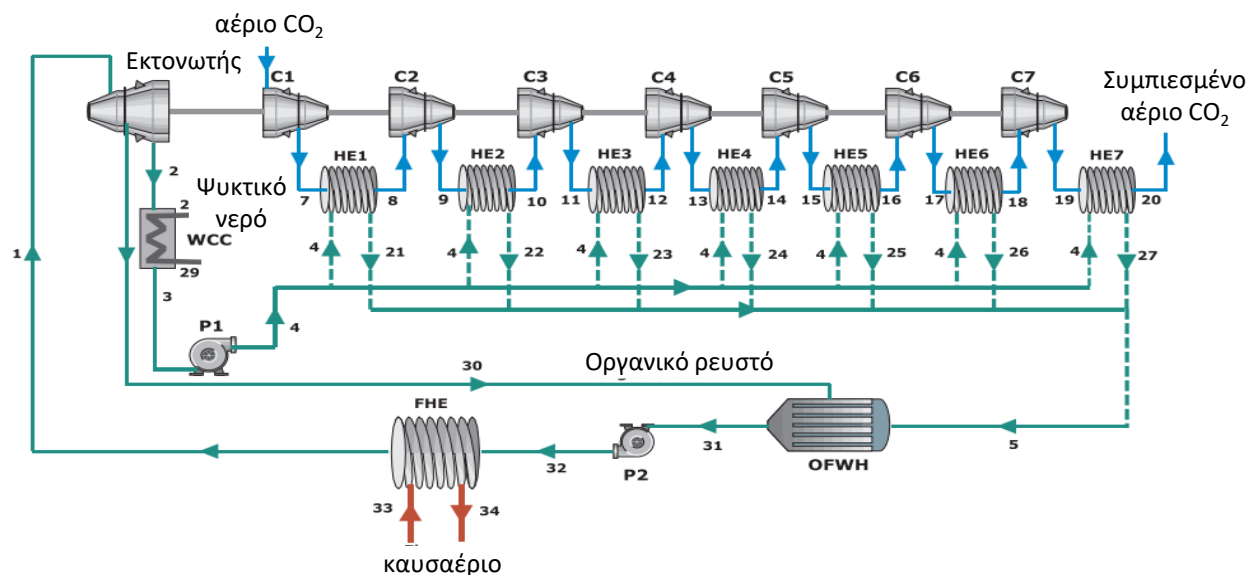
Οι πιέσεις ατμοποιητή και συμπυκνωτή ορίστηκαν στα 6.319 bar και 0.9 bar, αντίστοιχα. Η θερμοκρασία ατμοποίησης ορίστηκε ίση με 102.9 °C. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίστηκε 75 % ενώ του εκτονωτή 85 %. Στον ανακομιστή θερμότητας το Pinch Point (minimum approach temperature) θεωρήθηκε ίσο με 6 K. Με την μοντελοποίηση αυτή, οι



Farajollahi & Hossainpour (2017) συμπέραναν ότι για τις συνθήκες αυτές και για πηγή θερμότητας ίση με 22.53 MW<sub>th</sub> (ανακτώμενη θερμότητα από την συμπίεση και υγροποίηση του CO<sub>2</sub>), η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που παρήγαγε το ORC ήταν 3 MW<sub>e</sub>.

Οι Kurtulus et al. (2018) στη δημοσίευσή τους πραγματοποίησαν μια θερμοοικονομική ανάλυση σε σύστημα ORC, το οποίο χρησιμοποιώντας ανακτώμενη θερμότητα παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια για συμπίεση CO<sub>2</sub>.

Στην συγκριμένη έρευνα αναλύθηκε ένα σύστημα 7-βάθμιας συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη μεταξύ διαδοχικών βαθμίδων συμπίεσης. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.3.4. Η ισχύς για τη συμπίεση του CO<sub>2</sub> παρέχεται από τον εκτονωτή του ORC. Το ORC ως πηγή θερμότητας στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιεί ένα ρεύμα καυσαερίων (flue gas) και την θερμότητα που απάγει το οργανικό ρευστό από το θερμό CO<sub>2</sub> στους εναλλάκτες.



**Εικόνα 1.3.4** Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ORC για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια (Kurtulus, et al., 2018)

Το CO<sub>2</sub> προκύπτει με διαχωρισμό, μέσω χημικών μεθόδων, από το ρεύμα καυσαερίων. Έπειτα, εισέρχεται στον πρώτο συμπιεστή σε θερμοκρασία 310 K (37 °C), πίεση 0.162 MPa (1.62 bar) και παροχή ίση με 34,8 kg/s. Ο λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα είναι 1.914 και το CO<sub>2</sub> μετά από κάθε συμπίεση ψύχεται στους 310K. Ο ισητροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας και του εκτονωτή του ORC ορίζονται 75 % και 85 %, αντίστοιχα. Η απόδοση των εναλλακτών ισούται με 0.80. Η θερμοκρασία του νερού συμπύκνωσης είναι 288 K ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος ορίζεται στους 293 K. Το CO<sub>2</sub> εξέρχεται από την εγκατάσταση συμπίεσης σε πίεση 15.7 MPa.

Ως εργαζόμενο ρευστό του ORC επιλέχθηκε το ισοβουτένιο (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιέσεις από 300 μέχρι 3,000 kPa. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης είναι τα παρακάτω. Με την ισχύ του εκτονωτή του ORC συμπιέζονται 2.789 kg<sub>CO2</sub>/s, δηλαδή

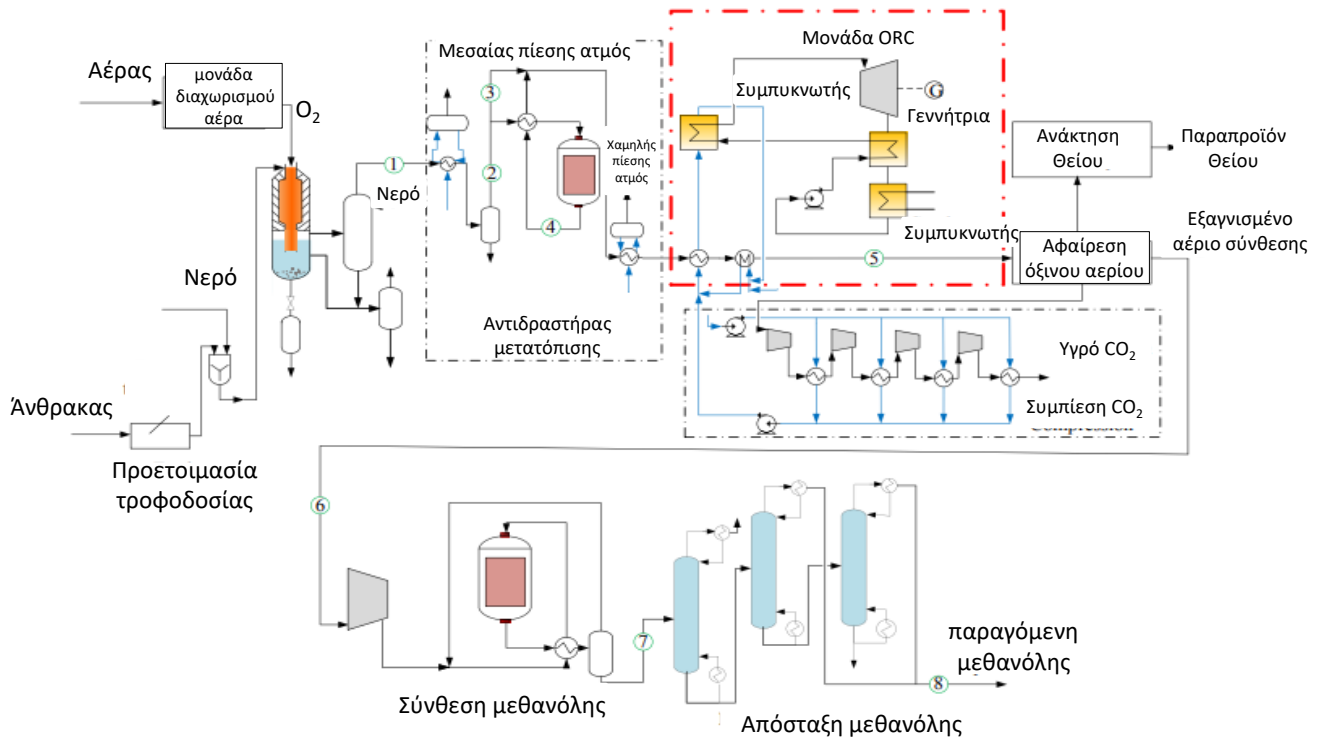
μόλις το 8 % της συνολικής παροχής του CO<sub>2</sub>. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς που δαπανήθηκε στις αντλίες ήταν 58.9 kW. Στο νερό του συμπυκνωτή απορρίπτεται θερμότητα ισχύος 3,024 kW<sub>th</sub> ενώ η θερμική ισχύς που ανακτάται από το ρεύμα καυσαερίων ισούται με 3,498 kW<sub>th</sub>. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στον εκτονωτή φτάνει τα 688 kW<sub>e</sub>. Συμπεραίνεται ότι η αύξηση της ποσότητας του CO<sub>2</sub> που συμπιέζεται, επέφερε την αύξηση της πίεσης εισόδου του εκτονωτή. Επίσης, αν το ισοβουτένιο χρησιμοποιούνταν σε υπερκρίσιμη κατάσταση, το σύστημα θα είχε τη δυνατότητα συμπίεσης μεγαλύτερων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> με την χρήση ανακτώμενης θερμότητας. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης του κύκλου προέκυψε 17.2 % ενώ ο εξεργειακός ίσος με 51.6 %.

Από την οικονομική ανάλυση του συστήματος προέκυψε το μέσο εξεργειακό κόστος (exergetic cost) χρήσης των καυσαερίων ως καύσιμο ίσο με 12.34 \$/GJ (GigaJoule), ενώ το κόστος του συμπιεσμένου CO<sub>2</sub> 18.36 \$/t<sub>CO2</sub>.

Οι Liu et al. (2016) μελέτησαν μια εγκατάσταση αεριοποίησης άνθρακα και μετατροπής του σε μεθανόλη. Στο σύστημα αυτό, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 1.3.5*, ανακτάται θερμότητα από την 4-βάθμια συμπίεση του CO<sub>2</sub> και από έναν αντιδραστήρα WGS και αξιοποιείται σε κύκλωμα ORC για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, το νερό απάγει θερμότητα από το θερμό CO<sub>2</sub> και από το αέριο σύνθεσης και φτάνει τη θερμοκρασία των 142.9 °C. Με τη θερμοκρασία αυτή οδηγείται στον ατμοποιητή του ORC.

Τα οργανικά ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν για το ORC είναι τα R123, R600, R600a, R601a, R141b, R245fa. Πιο αποδοτικό από τα παραπάνω ρευστά ήταν το R600a με θερμικό βαθμό απόδοσης κοντά στο 12 %. Για δέσμευση ίση με 65 % παράγονται 4.4 MW ηλεκτρικής ισχύος. Οι Liu et al. συμπέραναν ότι με την αύξηση του ποσοστού δέσμευσης CO<sub>2</sub> αυξάνεται η ποσότητα θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί. Συνεπώς, για δέσμευση 85 % παράγονται 4.8 MW. Ο ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος μετατροπής του άνθρακα σε μεθανόλη, για δέσμευση CO<sub>2</sub> 65 %, είναι 45 %. Με την ενσωμάτωση του ORC προέκυψε αύξηση του βαθμού απόδοσης στα 45.5 %. Αν η δέσμευση είναι στο 85 % ο ολικός βαθμός απόδοσης από 43.4 %, φτάνει την τιμή 44.8 % με την προσθήκη του συστήματος ORC. Από την οικονομική ανάλυση της έρευνας αυτής, προέκυψε ότι το καθαρό κέρδος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανακτώμενη θερμότητα για την εγκατάσταση αυτή, φτάνει τα 3.2 εκατομμύρια Δολάρια ΗΠΑ (United State Dollars – USD) τον χρόνο. Τέλος, ο χρόνος απόσβεσης για την εγκατάσταση συστήματος δέσμευσης CO<sub>2</sub> 85 % μαζί με ORC υπολογίστηκε στα 2.7 έτη.





Εικόνα 1.3.5 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μετατροπής άνθρακα σε μεθανόλη σε συνδυασμό με ORC (Liu, et al., 2016)

Στον Πίνακα 1.3.1 συγκεντρώνεται το αντικείμενο μελέτης καθώς και κάποια βασικά χαρακτηριστικά των παραπάνω ερευνών.

**Πίνακας 1.3.1 Σύνοψη δημοσιεύσεων που συνδυάζουν συστήματα συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ORC για ανάκτηση θερμότητας**

Δημοσίευση	Πηγή θερμότητας προς ανάκτηση	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Εργαζόμενο μέσο του ORC	Αποτελέσματα
<b>Γεωργουσόπουλος, (2020)</b>	Ενδιάμεση ψύξη CO <sub>2</sub> σε σύστημα 3-βάθμιας συμπίεσης.	Το εργαζόμενο μέσο του ORC1.	R1234yf, R1234ze, R601, R600A, R1270, R290	Μέγιστη μείωση κατανάλωσης συμπιεστών: 13.74 %. Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ORC: 533.12 kW <sub>e</sub> . Μέγιστος Θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC: 11.02 %
<b>Pei et al. (2014)</b>	Ενδιάμεση ψύξη CO <sub>2</sub> σε σύστημα 7-βάθμιας συμπίεσης.	Νερό	Κανονικό Πεντάνιο	Μέγιστη μείωση κατανάλωσης συμπιεστών: 16.7 %. Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ORC: 8.3 kW <sub>e</sub> . Μέγιστος Θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC: 17 %.
<b>Farajollahi &amp; Hossainpour (2017)</b>	Ενδιάμεση ψύξη CO <sub>2</sub> από 4 βαθμίδες συμπίεσης (6-βάθμιου συστήματος) και έναν υγροποιητή.	Νερό	Κανονικό Πεντάνιο	Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ORC: 3 MW <sub>e</sub> . Μέγιστος Θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC: 13.32 %

Δημοσίευση	Πηγή θερμότητας προς ανάκτηση	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Εργαζόμενο μέσο του ORC	Αποτελέσματα
<b>Kurtulus et al. (2018)</b>	Ενδιάμεση ψύξη CO <sub>2</sub> σε σύστημα 7-βάθμιας συμπίεσης.	Το εργαζόμενο μέσο του ORC1.	Ισοβουτένιο	Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ORC: 687.9 kW <sub>e</sub>  Μέγιστος Θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC: 17.2 %
<b>Liu et al. (2016)</b>	Ενδιάμεση ψύξη CO <sub>2</sub> σε σύστημα 4-βάθμιας συμπίεσης και ψύξη αερίου σύνθεσης ενός αντιδραστήρα WGS.	Νερό	R123, R600, R600a, R601a, R141b, R245fa	Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το ORC: 4.8 MW <sub>e</sub> .  Μέγιστος Θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC: 12 %.

<sup>1</sup> Η θερμότητα μεταδίδεται απευθείας από το θερμό CO<sub>2</sub> στο οργανικό ρευστό του ORC μέσω εναλλάκτη.

## 1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από μονάδες συμπίεσης CO<sub>2</sub>. Σκοπός είναι η μέγιστη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τους συμπιεστές. Για αυτό εξετάζεται η εγκατάσταση συστήματος ORC το οποίο έχοντας ως πηγή την απορριπτόμενη θερμότητα, παράγει ηλεκτρική ενέργεια που αντισταθμίζει την κατανάλωση των συμπιεστών. Γίνεται συστηματική διερεύνηση ως προς την επίδραση που παρουσιάζει ο αριθμός των βαθμίδων συμπίεσης στην ηλεκτροπαραγωγή του ORC, σε εγκαταστάσεις 4, 5 και 6 συμπιεστών. Επίσης εξετάζεται η επίδοση τριών διαφορετικών οργανικών ρευστών (R1234ze, R1234yf, R1233zdE) στο σύστημα ORC. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας από το θερμό CO<sub>2</sub> στον ατμοποιητή του ORC χρησιμοποιείται το DOWTHERM Q.

Επιπλέον, διεξάγεται οικονομική αξιολόγηση για την ενσωμάτωση του ORC σε εγκαταστάσεις 4, 5 και 6 συμπιεστών, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης εγκατάστασης. Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για την επίδραση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και του αρχικού κόστους επένδυσης στην Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής του ORC.

Έρευνες σχετικές με τη χρήση ORC για εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας σε συστήματα συμπίεσης CO<sub>2</sub> είναι περιορισμένες. Οι περισσότερες μελέτες για ανάκτηση θερμότητας με ORC επικεντρώνονται κυρίως σε άλλες πηγές θερμότητας και όχι στη συμπίεση CO<sub>2</sub>. Ακόμη, δεν υπάρχουν έρευνες που να μελετούν την σύγκριση μεταξύ διατάξεων διαφορετικού αριθμού βαθμίδων συμπίεσης ενώ ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας συνήθως χρησιμοποιείται το νερό.

## 2. Περιγραφή εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> και μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του συστήματος που μελετάται και παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης με όλες τις παραδοχές που ακολουθούνται.

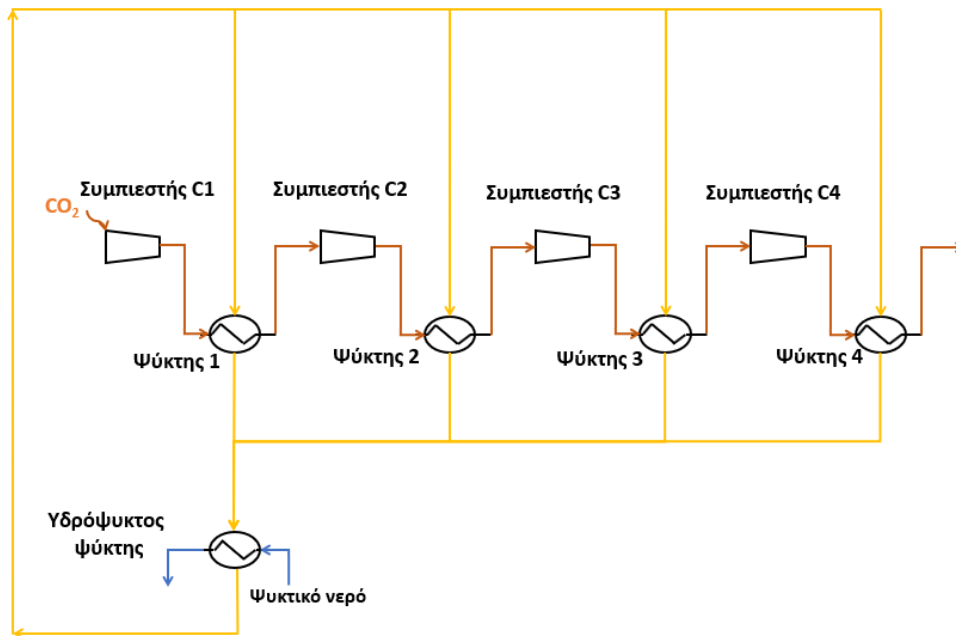
### 2.1 Περιγραφή εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> και ενσωμάτωσης συστήματος ORC

Στην παρούσα διπλωματική μελέτη εξετάζονται 3 συστήματα συμπίεσης CO<sub>2</sub> με την ενσωμάτωση ORC, αλλά και χωρίς αυτή (σενάριο αναφοράς): ένα τετραβάθμιο (με 4 βαθμίδες συμπίεσης), ένα πενταβάθμιο και ένα εξαβάθμιο.

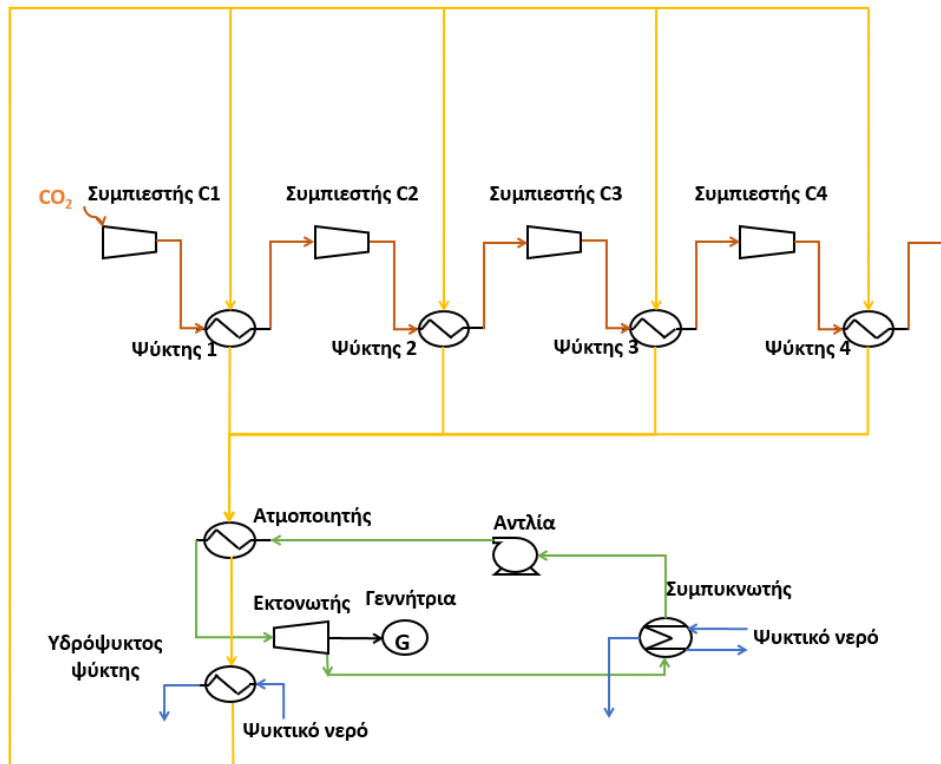
Το CO<sub>2</sub> εισέρχεται στην εγκατάσταση σε όλες τις περιπτώσεις με δεδομένη παροχή (10.9 kg/s), πίεση (1.013 bar) και θερμοκρασία (35 °C) ενώ συμπιέζεται σε δεδομένη τελική πίεση διερχόμενο διαδοχικά από τις βαθμίδες συμπίεσης. Ο λόγος συμπίεσης σε όλη την εγκατάσταση είναι 1:150, ενώ το CO<sub>2</sub> εισέρχεται σε ατμοσφαιρική πίεση (1.013 bar), επομένως εξέρχεται από την τελευταία βαθμίδα σε πίεση 152 bar. Οι υπό μελέτη διατάξεις παρουσιάζονται στις: *Εικόνα 2.1.1*, *Εικόνα 2.1.2*, *Εικόνα 2.1.3*, και *Εικόνα 2.1.4*.

Εξερχόμενο από κάθε βαθμίδα, το ρεύμα CO<sub>2</sub> ψύχεται σε έναν ενδιάμεσο ψύκτη (intercooler-IC) από ρευστό HTF. Στην περίπτωση του σεναρίου αναφοράς, το οποίο δεν περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ORC, τα ρεύματα HTF που εξέρχονται από κάθε ενδιάμεσο ψύκτη αναμιγνύονται και εισέρχονται ως ενιαίο σε έναν υδρόψυκτο ψύκτη όπου ψύχονται με νερό ώστε να επανακυκλοφορήσουν στους ενδιάμεσους ψύκτες.

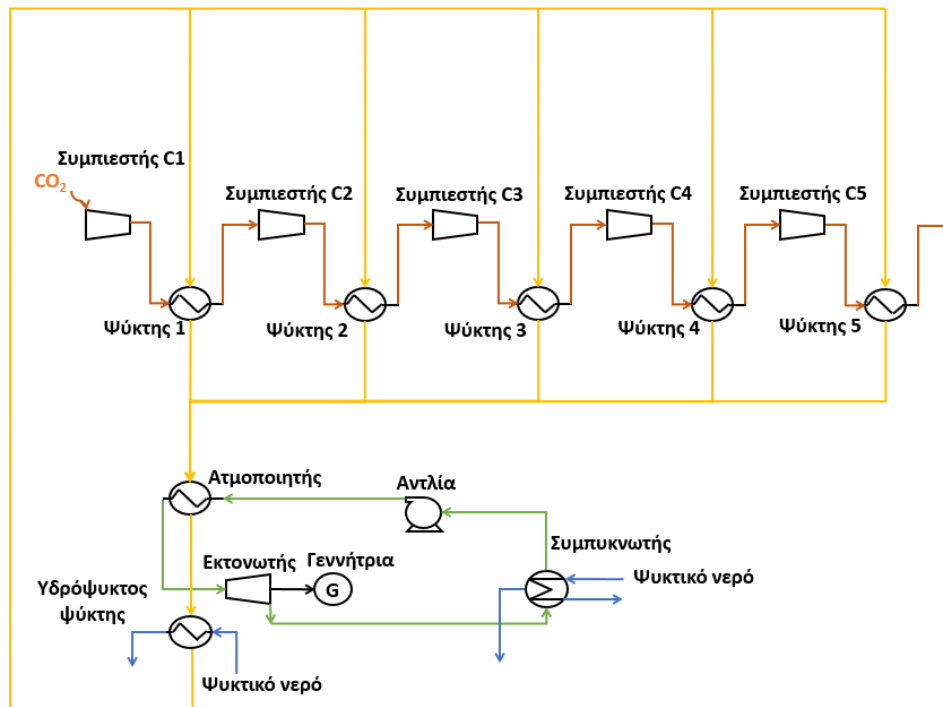
Στην περίπτωση της ενσωμάτωσης συστήματος ORC, τα ρεύματα HTF μετά την ανάμιξή τους πριν οδηγηθούν στον υδρόψυκτο ψύκτη διέρχονται από τον ατμοποιητή του ORC, όπου και πραγματοποιείται η ατμοποίηση του εργαζόμενου ρευστού του κύκλου. Το εργαζόμενο ρευστό εξερχόμενο ως υπέρθερμος ατμός εισέρχεται στον εκτονωτή όπου παράγεται η μηχανική ισχύς και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Ο χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης ατμός στην έξοδο του εκτονωτή οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψύχεται από ένα ρεύμα νερού (υδρόψυκτος συμπυκνωτής) και εξέρχεται ως υπόψυκτο υγρό. Στη συνέχεια, το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στην αντλία όπου αυξάνεται η πίεση του στην επιθυμητή τιμή της πίεσης ατμοποίησης ώστε να επαναληφθεί ο κύκλος.



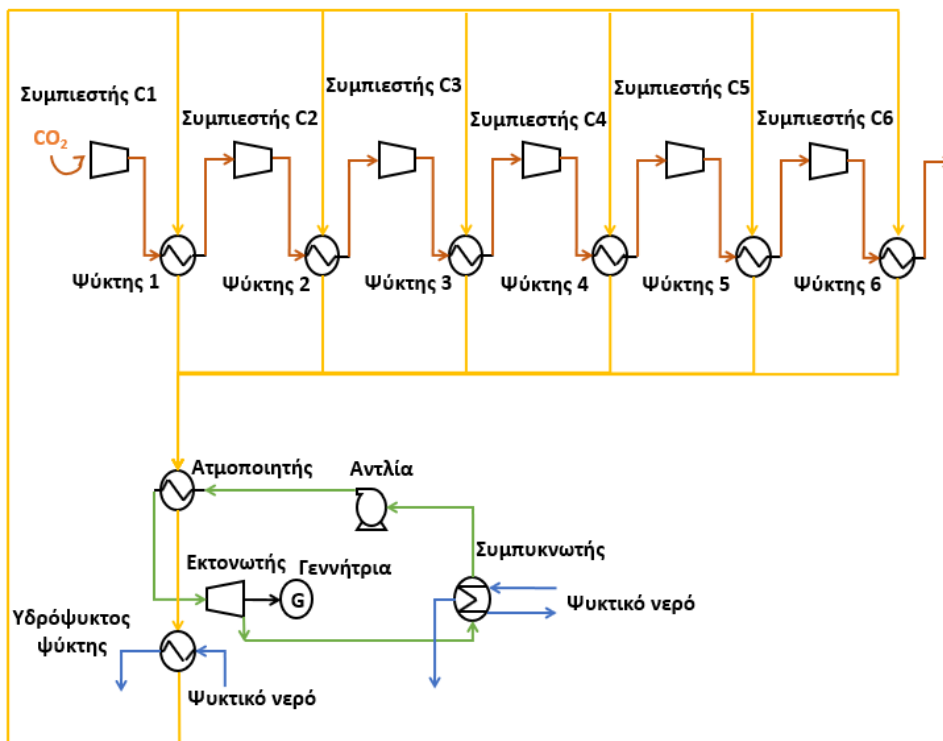
Εικόνα 2.1.1 Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με 4 βαθμίδες, χωρίς ORC



Εικόνα 2.1.2 Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με 4 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC



Εικόνα 2.1.3 Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με 5 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC



Εικόνα 2.1.4 Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με 6 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC

## 2.2 Μεθοδολογία και παραδοχές

Για την επίτευξη της ελάχιστης κατανάλωσης των συμπιεστών εξετάζονται συστήματα με διαφορετικό πλήθος συμπιεστών. Συγκεκριμένα, μελετώνται συστήματα με 4, 5 και 6 συμπιεστές με την ενσωμάτωση ORC αλλά και χωρίς αυτήν. Ακόμη, αξιολογούνται διάφορα οργανικά ρευστά μηδενικού δείκτη ODP (Ozone Depletion Potential) και χαμηλού GWP (Global Warming Potential), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2.1. Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το DOWTHERM Q. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές πίεσης ατμοποίησης και θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στους ενδιάμεσους ψύκτες των συμπιεστών.

Μια βασική παράμετρος της εγκατάστασης είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού HTF στους ενδιάμεσους ψύκτες CO<sub>2</sub> ( $T_{htf,ic,in}$ ), η οποία και είναι ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του από τον υδρόψυκτο ψύκτη  $T_{htf,wc,out}$ . Συγκεκριμένα, το HTF αφού μεταδώσει θερμότητα στον ατμοποιητή του ORC, οδηγείται ξανά στην είσοδο των ψυκτών του CO<sub>2</sub> για να πραγματοποιηθεί νέος κύκλος. Ωστόσο, η θερμοκρασία που έχει μετά τον ατμοποιητή είναι υψηλή. Για τον λόγο αυτό τοποθετείται ένας υδρόψυκτος ψύκτης (εναλλάκτης θερμότητας αντιρροής) μετά τον ατμοποιητή του ORC και πριν την είσοδο του HTF στους ψύκτες, με PP = 5 K. Με τον ψύκτη αυτό επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου του HTF στους ενδιάμεσους ψύκτες CO<sub>2</sub> για την πραγματοποίηση του επόμενου κύκλου. Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται πως η θερμοκρασία του ρεύματος CO<sub>2</sub> στην έξοδο κάθε ενδιάμεσου ψύκτη ( $T_{CO_2,ic,out}$ ) είναι 10 K υψηλότερη από τη θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$ . Εφόσον η θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  αλλάζει ως παράμετρος για την διαδικασία βελτιστοποίησης, αλλάζει και η  $T_{CO_2,ic,out}$ . Πιο συγκεκριμένα, καθώς, η  $T_{htf,wc,out}$  παίρνει τιμές από 25-55 °C, η θερμοκρασία  $T_{CO_2,ic,out}$  κυμαίνεται γενικά μεταξύ 35 °C και 65 °C.

Μία σημαντική παράμετρος για το σύστημα ORC είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού HTF στον ατμοποιητή  $T_{htf,ev,in}$ . Η θερμοκρασία αυτή εξαρτάται από την απορριπτόμενη θερμότητα των συμπιεστών και από την  $T_{htf,wc,out}$ . Η θερμότητα που παράγεται κατά την συμπίεση εξαρτάται από το πλήθος των συμπιεστών της εγκατάστασης. Όταν η ίδια αύξηση πίεσης επιτυγχάνεται με λιγότερους συμπιεστές (και ενδιάμεσους ψύκτες) η θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> αυξάνεται περισσότερο, μεταφέροντας μεγαλύτερα ποσά θερμότητας στο ρευστό HTF μέσω των εναλλακτών. Συνεπώς, η αύξηση των βαθμίδων συμπίεσης προκαλεί μείωση της  $T_{htf,ev,in}$ , ενώ η αύξηση της  $T_{htf,wc,out}$  επιφέρει την αύξηση της  $T_{htf,ev,in}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι η  $T_{htf,ev,in}$  δεν εξαρτάται από την επιλογή του οργανικού ρευστού του ORC.

Η πίεση συμπύκνωσης καθορίζεται με βάση την απαίτηση για Pinch Point στον συμπυκνωτή ίσο με 5 K. Επίσης, η παροχή μάζας του ρευστού HTF σε κάθε εναλλάκτη μεταξύ συμπιεστών καθορίζεται με βάση την απαίτηση για Pinch Point στους εναλλάκτες ίσο με 10 K.

Η μέγιστη τιμή της πίεσης ατμοποίησης διατηρήθηκε 3 bar χαμηλότερη από την κρίσιμη πίεση κάθε ρευστού (Rayegan & Tao, 2011), (Bao & Zhao, 2013), λαμβάνοντας υπόψη ότι οι απότομες



αλλαγές που εμφανίζουν οι ιδιότητες των οργανικών ρευστών σε σχεδόν κρίσιμες πιέσεις (Karellas, et al., 2012), μπορεί να επιφέρουν την ασταθή συμπεριφορά συστήματος (Pan, et al., 2012).

Τα μοντέλα του συστήματος συμπίεσης καθώς και των ORC για κάθε περίπτωση, αναπτύχθηκαν στο λογισμικό Aspen Plus V12.0, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Peng Robinson – Boston Mathias (Aspen Plus 12.0, 2022).

**Πίνακας 2.2.1 Επιλεχθέντα οργανικά ρευστά**

Οργανικό Ρευστό	Κρίσιμη πίεση (bar)	Κρίσιμη Θερμοκρασία (°C)	ODP	GWP	Τύπος
<b>R1234ze</b>	36.62	109.40	0	6	HFO <sup>1</sup>
<b>R1234yf</b>	33.82	94.70	0	4	HFO <sup>1</sup>
<b>R1233zdE</b>	35.71	165.60	0	1	HFO <sup>1</sup>

<sup>1</sup> HFO: υδροφθοροολεφίνες

Στους: Πίνακας 2.2.2 και Πίνακας 2.2.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις διατάξεις πολυβάθμιας συμπίεσης και του ORC. Αναφέρονται επίσης παραδοχές που έγιναν για την μοντελοποίηση.

**Πίνακας 2.2.2 Δεδομένα συμπιεστών και ψυκτών CO<sub>2</sub>**

Δεδομένα συμπιεστών και ψυκτών του CO <sub>2</sub>	
Παροχή μάζας CO <sub>2</sub> ( $\dot{m}_{CO_2}$ )	10.9 kg/sec <sup>1</sup>
Πίεση εισόδου του CO <sub>2</sub> ( $p_{CO_2}$ )	1.013 bar
Θερμοκρασία εισόδου του CO <sub>2</sub> στην εγκατάσταση (αρχική θερμοκρασία) ( $T_{CO_2,in}$ )	35 °C <sup>1</sup>
Ολικός λόγος πίεσης συστήματος συμπίεσης ( $p_{r,tot}$ )	1:150
Λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα για σύστημα 4 συμπιεστών ( $p_{r,c,4}$ )	3.50
Λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα για σύστημα 5 συμπιεστών ( $p_{r,c,5}$ )	2.72

Δεδομένα συμπιεστών και ψυκτών του CO <sub>2</sub>	
Λόγος συμπίεσης ανά βαθμίδα για σύστημα 6 συμπιεστών ( $p_{r,c,6}$ )	2.31
Ισεντροπικός Βαθμός Απόδοσης Συμπιεστών ( $\eta_{c,is}$ )	0.80 <sup>1</sup>
Pinch Point ψυκτών του CO <sub>2</sub> (εναλλακτών θερμότητας) ( $PP_{ic}$ )	10 K <sup>1</sup>
Θερμοκρασία εξόδου του HTF από τον υδρόψυκτο ψύκτη ( $T_{htf,wc,out}$ )	25, 35, 45, 55 °C (βελτιστοποίηση)
Θερμοκρασία εξόδου CO <sub>2</sub> από κάθε ψύκτη ( $T_{CO_2,ic,out}$ )	$T_{CO_2,ic,out} = T_{htf,wc,out} + 10$ K
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή ( $\eta_{c,em}$ )	0.96
Πίεση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας ( $p_{htf}$ )	5 bar

<sup>1</sup> (Γεωργουσόπουλος, 2020)

Πίνακας 2.2.3 Δεδομένα διάταξης ORC

Διάταξη ORC	
<b>Ατμοποιητής</b>	
Μέγιστη πίεση ατμοποίησης ( $p_{evap,max}$ )	$(p_{crit}^{1-3})$ bar
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά ατμοποιητή ( $PP_{ev}$ )	10 K <sup>2</sup>
Υπερθέρμανση ( $\Delta T_{sh}$ )	5 K <sup>2</sup>
<b>Συμπυκνωτής</b>	
Θερμοκρασία εισόδου ψυκτικού νερού στο συμπυκνωτή ( $T_{w,cond,in}$ )	20 °C <sup>2</sup>
Αύξηση θερμοκρασίας νερού στο συμπυκνωτή ( $\Delta T_{w,cond}$ )	10 K
Ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά συμπυκνωτή ( $PP_{cond}$ )	5 K <sup>2</sup>
<b>Αντλία</b>	
Βαθμός απόδοσης αντλίας ( $\eta_{pump}$ )	0.65
<b>Εκτονωτής - Γεννήτρια</b>	
Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης εκτονωτή-γεννήτριας ( $\eta_{exp,em}$ )	0.96
Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης εκτονωτή ( $\eta_{exp,is}$ )	0.70

<sup>1</sup> ( $p_{crit}$ ): η κρίσιμη πίεση κάθε ρευστού

<sup>2</sup> (Γεωργουσόπουλος, 2020)

Ο στόχος της μοντελοποίησης είναι ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης συμπίεσης. Για τον σκοπό αυτό εξετάζονται όλα τα οργανικά ρευστά αυξάνοντας την πίεση ατμοποίησης ανά 1 bar (ξεκινώντας από τα 4 bar) και την θερμοκρασία εισόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στους ψύκτες CO<sub>2</sub> ανά 10 K (ξεκινώντας από 25 °C).

Στην συνέχεια παρατίθενται οι βασικές σχέσεις υπολογισμού των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς στην αντλία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{e,pump} = \frac{\dot{m}_{ORC} (h_{pump,out,is} - h_{pump,in})}{\eta_{pump}} \quad 2.1$$

Η  $h_{pump,in}$  αναφέρεται στην ενθαλπία του ρευστού στην είσοδο της αντλίας. Η  $h_{pump,out,is}$  είναι η ενθαλπία που θα είχε το ρευστό στην έξοδο της αντλίας αν η αύξηση πίεσης γινόταν ισηντροπικά και  $\dot{m}_{ORC}$  η παροχή μάζας του εργαζόμενου μέσου του ORC. Επιπλέον,  $\eta_{pump}$  είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας.

Στον ατμοποιητή, η θερμότητα που μεταδίδεται από το ρευστό HTF στο εργαζόμενο ρευστό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_{htf} (h_{htf,ev,in} - h_{htf,ev,out}) \quad 2.2$$

Όπου  $\dot{m}_{htf}$  η παροχή μάζας του HTF,  $h_{htf,ev,in}$  η ενθαλπία του HTF όταν εισέρχεται στον ατμοποιητή του ORC,  $h_{htf,ev,out}$  η ενθαλπία του HTF όταν εξέρχεται από τον ατμοποιητή του ORC.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στον εκτονωτή-γεννήτρια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{e,exp} = \eta_{exp,em} \dot{m}_{ORC} (h_{exp,in} - h_{exp,out}) \quad 2.3$$

Όπου  $h_{exp,in}$  και  $h_{exp,out}$  οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του ρευστού του ORC από τον εκτονωτή.

Η κατάσταση του ρευστού στην έξοδο του εκτονωτή υπολογίζεται βάσει του ισηντροπικού βαθμού απόδοσης του εκτονωτή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\eta_{exp,is} = \frac{(h_{exp,in} - h_{exp,out})}{(h_{exp,in} - h_{exp,out,s})} \quad 2.4$$

Όπου  $h_{exp,out,is}$  ενθαλπία που θα είχε το οργανικό ρευστό στην έξοδο του εκτονωτή αν η εκτόνωση γινόταν ισεντροπικά.

Η θερμότητα που μεταδίδει το εργαζόμενο μέσο του ORC στο νερό του συμπυκνωτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{orc}(h_{exp,out} - h_{pump,in}) \quad 2.5$$

Η καθαρή παραγόμενη ισχύς του ORC υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{e,ORC} = P_{e,exp} - P_{e,pump} \quad 2.6$$

Ο βαθμός απόδοσης του ORC σύμφωνα με όσα περιεγράφηκαν ορίζεται από την εξίσωση:

$$\eta_{ORC} = \frac{P_{e,ORC}}{\dot{Q}_{evap}} \quad 2.7$$

Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται σε κάθε βαθμίδα συμπίεσης CO<sub>2</sub> υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{e,c,i} = \frac{\dot{m}_{CO_2}(h_{CO_2,out} - h_{CO_2,in})}{\eta_{c,em}} \quad 2.8$$

Όπου  $\dot{m}_{CO_2}$  η παροχή μάζας του διοξειδίου του άνθρακα στην εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub>,  $h_{CO_2,in}$  και  $h_{CO_2,out}$  οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του CO<sub>2</sub> από τον εκάστοτε συμπιεστή. Επιπλέον, ως  $\eta_{c,em}$  συμβολίζεται ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης για κάθε βαθμίδα.

Η κατάσταση του ρεύματος CO<sub>2</sub> στην έξοδο κάθε βαθμίδας συμπίεσης υπολογίζεται μέσω του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή από τη σχέση:

$$\eta_{c,is} = \frac{(h_{CO_2,out,s} - h_{CO_2,in})}{(h_{CO_2,out} - h_{CO_2,in})} \quad 2.9$$

Όπου  $h_{CO_2,out,s}$  η ενθαλπία που θα είχε το CO<sub>2</sub> στην έξοδο του κάθε συμπιεστή αν η συμπίεση γινόταν ισεντροπικά.

Ισολογισμός ενέργειας στους ψύκτες του CO<sub>2</sub>:

$$\dot{m}_{CO_2} h_{CO_2,ic,in} + \dot{m}_{htf} h_{htf,ic,in} = \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2,ic,out} + \dot{m}_{htf} h_{htf,ic,out} \quad 2.10$$

Όπου,  $h_{CO_2,ic,in}$  και  $h_{CO_2,ic,out}$  οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του CO<sub>2</sub> από τον ψύκτη ενώ  $h_{htf,ic,in}$  και  $h_{htf,ic,out}$  οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου του ρευστού HTF από τον ψύκτη.

Η καταναλισκόμενη ισχύς συμπίεσης της εγκατάστασης είναι ίση με το άθροισμα της κατανάλωσης ισχύος της κάθε βαθμίδας.

$$P_{e,c,tot} = \sum_1^n P_{e,c,i} \quad 2.11$$

Στην περίπτωση της εγκατάστασης χωρίς ενσωματωμένο σύστημα ORC η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης είναι ίση με την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ συμπίεσης θεωρώντας την ελάχιστη θερμοκρασία ψύξης του ρευστού HTF ( $T_{htf,gc,out}$ ) η οποία είναι ίση με 25°C, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{e,c,tot,no-ORC} = P_{e,c,tot} = \sum_1^n P_{e,c,i} \quad 2.12$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο δείκτης  $i$  αναφέρεται σε κάθε μία βαθμίδα συμπίεσης ενώ  $n$  είναι το πλήθος των βαθμίδων.

Για τον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης ισχύος της εγκατάστασης με ενσωματωμένο σύστημα ORC ( $P_{e,tot,ORC}$ ) αφαιρείται από την καταναλισκόμενη ισχύ συμπίεσης ( $P_{e,c,tot}$ ) η καθαρή ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το σύστημα ORC ανά περίπτωση ( $P_{e,ORC}$ ), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{e,tot,ORC} = P_{e,c,tot} - P_{e,ORC} \quad 2.13$$

Το εξοικονομούμενο ποσοστό ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης με ενσωματωμένο σύστημα ORC υπολογίζεται ως ποσοστό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος της εγκατάστασης χωρίς την ενσωμάτωση του συστήματος ORC ( $P_{e,tot,no-ORC}$ ), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta P_{e,tot} = \frac{P_{e,tot,no-ORC} - P_{e,tot,ORC}}{P_{e,tot,no-ORC}} * 100 \% \quad 2.14$$

## 2.3 Οικονομική αξιολόγηση

### 2.3.1 Υπολογισμός βασικών οικονομικών μεγεθών

Η οικονομική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε για το σύστημα του ORC επικεντρώθηκε στον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value - NPV), τον Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR), Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (Discounted Payback Period – DPP).

Καθαρή Παρούσα Αξία είναι το άθροισμα των παρουσών αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Μετράει το πλεόνασμα ή την έλλειψη ταμειακών ροών, σε όρους παρούσας αξίας, σε σύγκριση με το κόστος κεφαλαίων που χρησιμοποιήθηκαν για μια επένδυση. Η NPV υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 2.15 :

$$NPV = -C_o + \sum_{t=0}^n \left[ \frac{C_f \cdot (1 + f_f)^{t-1} - C_{OM} \cdot (1 + f)^{t-1}}{(1 + i)^t} \right] \quad 2.15$$

Στην παραπάνω εξίσωση,  $i$  είναι το επιτόκιο προεξόφλησης,  $t$  ο χρόνος της μελλοντικής πληρωμής,  $n$  είναι η διάρκεια της επένδυσης σε χρόνια,  $f$  η ετήσια αύξηση στα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης,  $f_f$  η ετήσια αύξηση της τιμής του καυσίμου,  $C_o$  (Capital Expenditure – Capex ή Initial Capital Cost Investment – ICI) το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης που περιλαμβάνει την προμήθεια εξοπλισμού και το κόστος εργασίας για την εγκατάσταση. Ακόμη,  $C_f$  είναι τα έξοδα για καύσιμα που αποφεύγονται ετησίως και  $C_{OM}$  τα ετήσια έξοδα λειτουργίας και συντήρησης.

Ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR) είναι το επιτόκιο προεξόφλησης κατά το οποίο η Καθαρή Παρούσα Αξία όλων των ταμειακών ροών μιας επένδυσης ισούται με μηδέν, σύμφωνα με την Εξίσωση 2.16:

$$-C_o + \sum_{t=0}^n \left[ \frac{C_f \cdot (1 + f_f)^{t-1} - C_{OM} \cdot (1 + f)^{t-1}}{(1 + IRR)^t} \right] = 0 \quad 2.16$$

Η Περίοδος Αποπληρωμής (Simple Payback Period - SPB) υπολογίζεται με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$SPB = \frac{C_o}{C_f - C_{OM}} \quad 2.17$$

Η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (Discounted Payback Period - DPP) υπολογίζεται με βάση την SPB μέσω της Εξίσωσης 2.18:

$$DPP = \frac{\ln \left[ SPB(i + 1) \left( \frac{f_f + 1}{i + 1} - 1 \right) + 1 \right]}{\ln \left( \frac{f_f + 1}{i + 1} \right)} \quad 2.18$$

Οι Εξισώσεις 2.15-2.19 προέρχονται από την έρευνα των Pallis et al. (2021).

### 2.3.2 Βασικό σενάριο

Το συνολικό κεφάλαιο της επένδυσης (Co) υπολογίζεται με βάση το ειδικό κόστος επένδυσης (Specific Investment Cost - SIC) και την ηλεκτροπαραγωγή του συστήματος με την Εξίσωση 2.19:

$$SIC = \frac{C_o}{P_{net}} \quad 2.19$$

Το SIC υπολογίζεται με την χρήση μιας συσχέτισης που πρότεινε η Gewald (2013). Στη συσχέτιση αυτή, στο κόστος του ORC περιλαμβάνονται μόνο άμεσες και όχι έμμεσες δαπάνες. Έτσι, χρησιμοποιείται ακόμη ένας “συντελεστής εγκατάστασης” ίσος με 1,47 για να ληφθούν υπόψη κόστη μεταφοράς, προμήθειας και εγκατάστασης. Επίσης, χρησιμοποιείται ο δείκτης κόστους χημικών εγκαταστάσεων (Chemical Engineering Plant Cost Index - CEPCI) για να υπολογιστεί η ισοδύναμη τιμή κόστους για το έτος 2021. Για την χρήση του κατάλληλου CEPCI χρησιμοποιείται η Εξίσωση 2.20 με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 2.3.1.

$$Κόστος_{2021} = Κόστος_{έτος-i} \frac{CEPCI_{2021}}{CEPCI_{έτος-i}} \quad 2.20$$

#### Πίνακας 2.3.1 Δείκτης CEPCI για ανά έτος (Maxwell, 2020)

Έτος	Δείκτης CEPCI
2021	708,0
2020	596,2
2019	607,5

Με τις παραπάνω παραδοχές, το ειδικό κόστος επένδυσης προκύπτει μέσω της Εξίσωσης 2.21:

$$SIC_{WHR-ORC} = 8937,12 * P_{e,ORC}^{-0,174} \quad 2.21$$

Για την οικονομική αξιολόγηση, θεωρήθηκε το σενάριο ενσωμάτωσης συστήματος ORC το οποίο οδηγεί στην ελάχιστη καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ της εγκατάστασης για 4, 5 και 6 συμπιεστές.

Στον Πίνακα 2.3.2 παρουσιάζονται οι παραδοχές που έγιναν για την οικονομική αξιολόγηση της ενσωμάτωσης συστήματος ORC στην εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub>.

**Πίνακας 2.3.2 Παραδοχές για την οικονομική μελέτη**

<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>
<b>Διάρκεια ζωής ORC – Διάρκεια επένδυσης (<i>n</i>)</b>	20 χρόνια <sup>1</sup>
<b>Επιτόκιο προεξόφλησης (<i>i</i>)</b>	8.0 % <sup>1</sup>
<b>Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (<i>C<sub>OM</sub></i>)</b>	2 % επί το αρχικό κεφάλαιο ( <i>C<sub>0</sub></i> ) <sup>1</sup>
<b>Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας</b>	180 €/MWh <sup>2</sup>
<b>Ετήσια αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας (<i>f<sub>f</sub></i>)</b>	4.0 % <sup>1</sup>
<b>Ιδία κεφάλαια</b>	100 % <sup>1</sup>
<b>Δάνειο ή επιχορήγηση</b>	0 % <sup>1</sup>
<b>Ώρες λειτουργίας ανά έτος</b>	8,000

<sup>1</sup> (Pallis, et al., 2021), <sup>2</sup> (Eurostat, 2022)

## 2.4 Ανάλυση ευαισθησίας

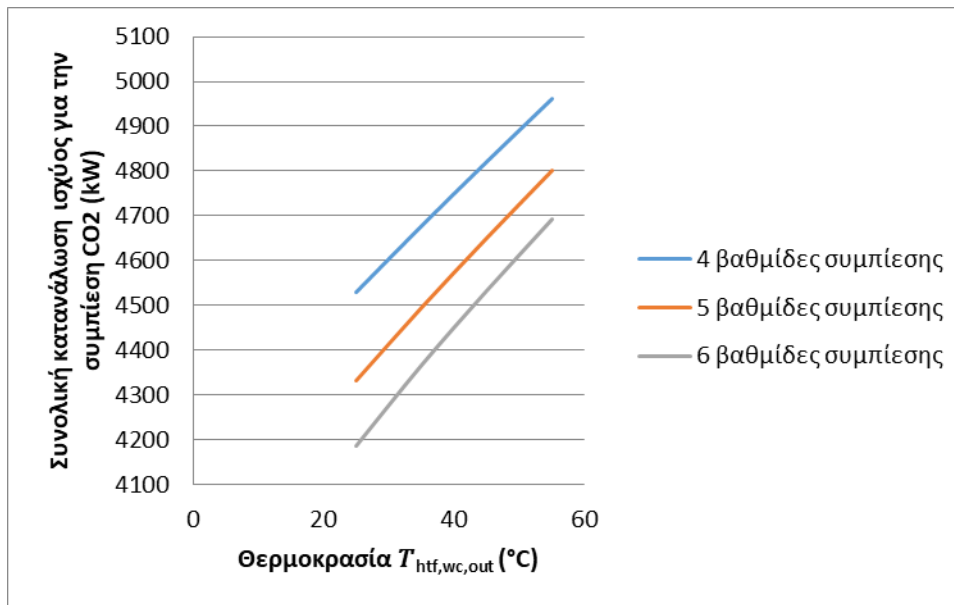
Για να εκτιμηθεί η επίδραση ορισμένων οικονομικών παραμέτρων στην Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής διεξήχθη μια ανάλυση ευαισθησίας. Στην ανάλυση αυτή οι παράμετροι ήταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και το αρχικό κόστος επένδυσης (*C<sub>0</sub>*).



### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα

##### 3.1.1 Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη (χωρίς ενσωμάτωση ORC)

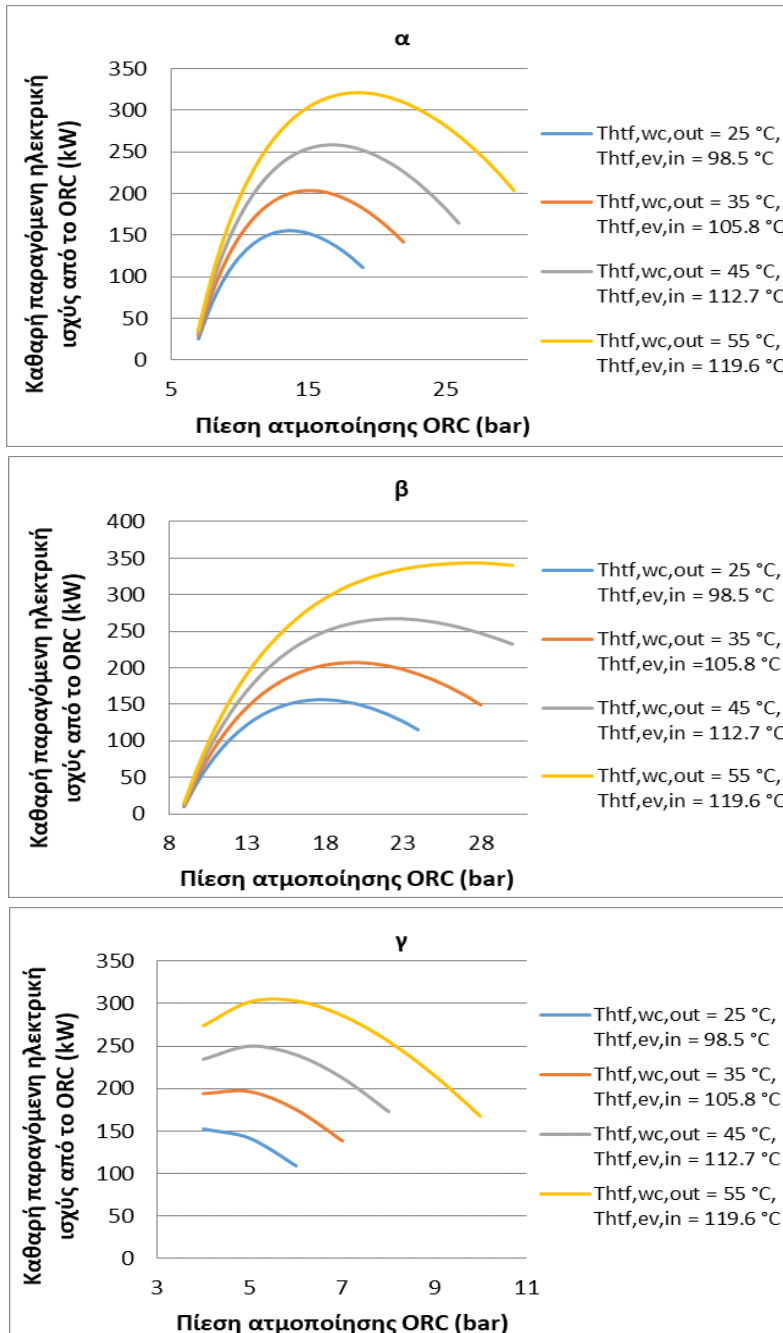


**Διάγραμμα 3.1.1.1** Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της θερμοκρασίας ψύξης του ρευστού μεταφοράς θερμότητας για τις 3 διατάξεις (χωρίς παρουσία ORC).

Στο *Διάγραμμα 3.1.1.1* διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των συμπιεστών μειώνεται η κατανάλωση ισχύος. Όπως αναφέρθηκε στο *Κεφάλαιο 1.1*, καθώς συμπιέζεται το διοξείδιο αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται η πυκνότητά του με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απαιτούμενη ισχύς για την επόμενη συμπίεσή του. Όταν ο ίδιος λόγος πίεσης επιτυγχάνεται σε περισσότερες βαθμίδες συμπίεσης (με ενδιάμεση ψύξη) η διεργασία της συμπίεσης προσεγγίζει όλο και περισσότερο την ισόθερμη μεταβολή. Η τελευταία συνεπάγεται μικρότερο έργο συμπίεσης. Ακόμη, αυξάνοντας την θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$ , αυξάνεται και η θερμοκρασία  $T_{CO_2,ic,out}$  (*Κεφάλαιο 2.2*). Με την αύξηση της τελευταίας το CO<sub>2</sub> εισέρχεται σε κάθε βαθμίδα συμπίεσης με υψηλότερη θερμοκρασία, γεγονός που αυξάνει το έργο συμπίεσης του. Έτσι, η ελάχιστη κατανάλωση σε διάταξη χωρίς ORC εντοπίζεται στο σύστημα με τους 6 συμπιεστές, για  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C και ισούται με 4,187 kW.

### 3.1.2 Διάταξη με 4 συμπιεστές

Στο Διάγραμμα 3.1.2.1 παρουσιάζεται η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του ORC συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης, για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



Διάγραμμα 3.1.2.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.

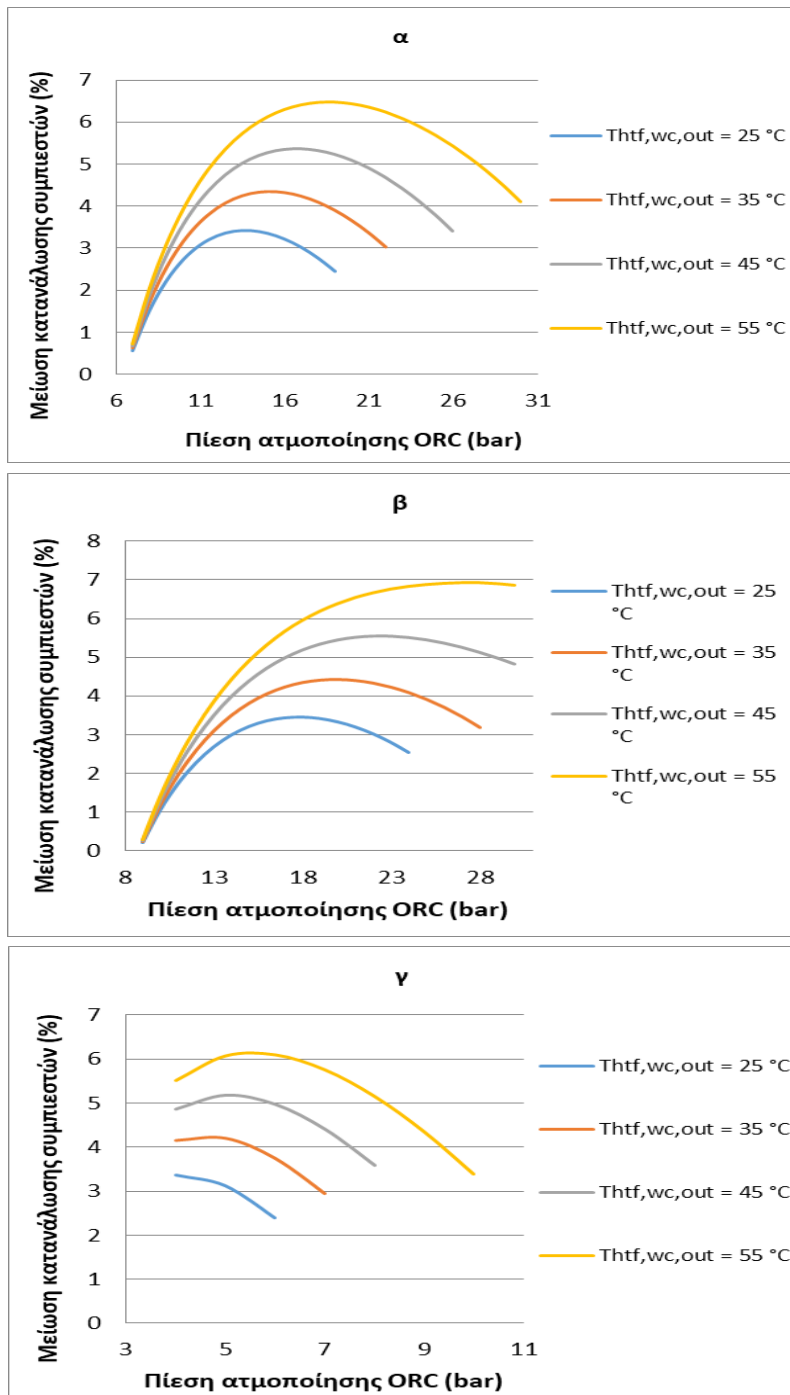
Όπως φαίνεται στο *Διάγραμμα 3.1.2.1α* η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας (δηλαδή του ρευστού HTF) κυμαίνεται από 98 μέχρι 120 °C, πολύ κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού R1234ze (110 °C). Καθώς αυξάνεται η πίεση ατμοποίησης, ο βαθμός εκμετάλλευσης της πηγής θερμότητας μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί το Pinch Point εμφανίζεται στην είσοδο του ατμοποιητή (και όχι του προθερμαντήρα) και το ρευστό HTF εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Με την αύξηση της πίεσης, όμως, αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ORC. Έτσι, στο *Διάγραμμα 3.1.2.1α* παρατηρείται, ότι η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι σημαντικότερη από την μείωση του βαθμού αξιοποίησης της πηγής θερμότητας μέχρι την τιμή της πίεσης για την οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς. Μετά την πίεση αυτή, η μείωση του βαθμού αξιοποίησης γίνεται εντονότερη σε σχέση με την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης και για τον λόγο αυτό η παραγόμενη ισχύς μειώνεται. Ακόμη, όσο αυξάνεται η  $T_{htf,wc,out}$  σε κάθε καμπύλη, αυξάνεται και η  $T_{htf,ev,in}$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του ρευστού HTF και του ψυκτικού στον ατμοποιητή. Έτσι, αυξάνεται το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στο ψυκτικό άρα και η παραγόμενη ισχύς του ORC. Για τον λόγο αυτό η μέγιστη ισχύς παράγεται για την μέγιστη  $T_{htf,wc,out}$  (55 °C).

Στο *Διάγραμμα 3.1.2.1α* παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234ze ισούται με 321 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C και πίεση 19 bar. Η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας πριν από τον ατμοποιητή του ORC ( $T_{htf,ev,in}$ ) για την μέγιστη ισχύ έχει την τιμή 119.6 °C.

Στο *Διάγραμμα 3.1.2.1β* παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 344 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C,  $T_{htf,ev,in} = 119.6$  °C και πίεση 27 bar. Η θερμοκρασία  $T_{htf,ev,in}$  παρουσιάζεται ανεξάρτητη από την επιλογή ψυκτικού καθώς εξαρτάται κυρίως από την  $T_{htf,wc,out}$  και τον αριθμό των συμπιεστών, όπως αναφέρθηκε στο *Κεφάλαιο 2.2*.

Στο *Διάγραμμα 3.1.2.1γ* παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 303 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C,  $T_{htf,ev,in} = 119.6$  °C και πίεση 6 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.2.2 παρουσιάζεται η μείωση της κατανάλωσης των συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



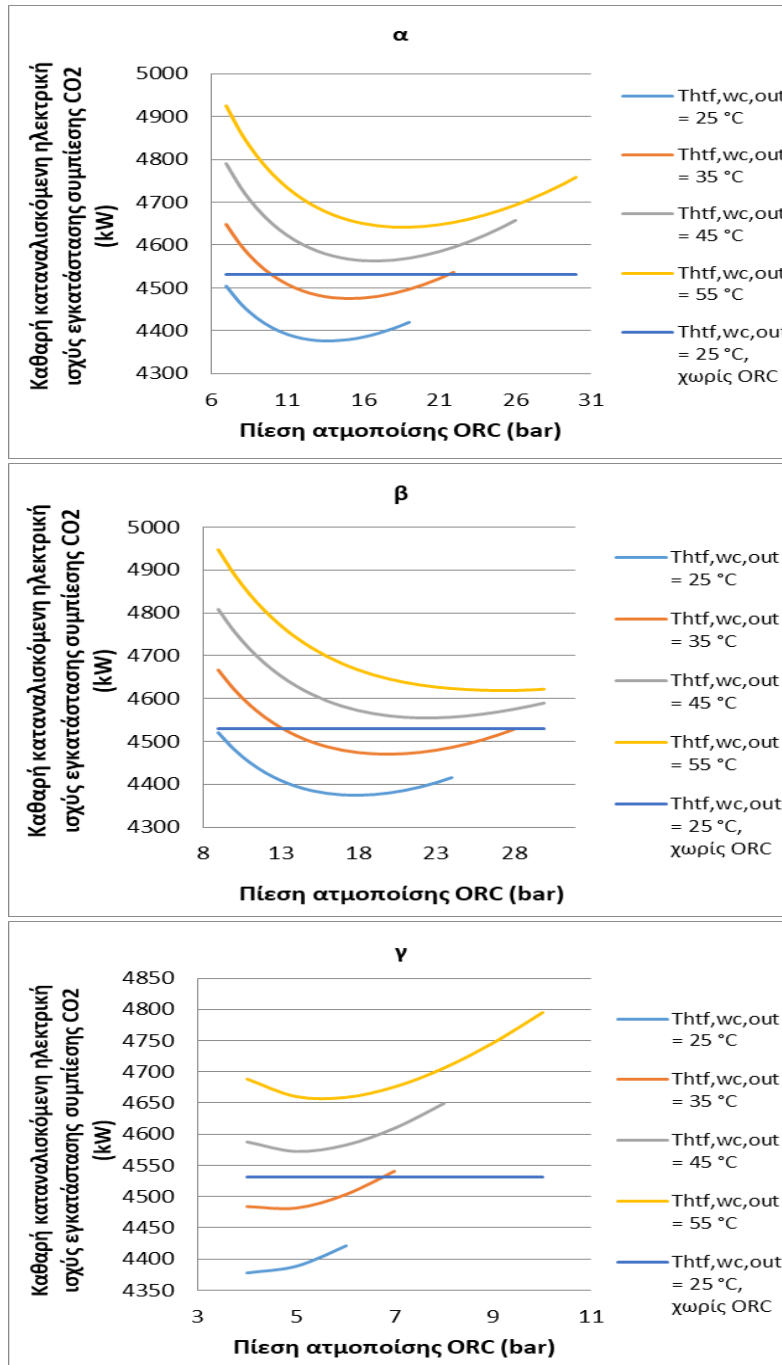
**Διάγραμμα 3.1.2.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Η μείωση κατανάλωσης των συμπιεστών είναι ανάλογη της καθαρής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος του ORC (Εξισώσεις 2.13, 2.14). Συνεπώς, στο Διάγραμμα 3.1.2.2α φαίνεται ότι η μείωση κατανάλωση αυξάνεται μέχρι την τιμή της πίεσης για την οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς, λόγω της αύξησης της παραγόμενης ισχύος. Μετά την πίεση αυτή η μείωση κατανάλωσης μειώνεται λόγω της μείωσης της παραγόμενης ισχύος. Επίσης, η αύξηση της  $T_{htf,wc,out}$  επιφέρει αύξηση της παραγόμενης ισχύος αλλά και της κατανάλωσης των συμπιεστών. Ωστόσο, φαίνεται ότι η αύξηση της ισχύος είναι σημαντικότερη από την αύξηση της κατανάλωσης, καθώς παρατηρείται αύξηση της μείωσης κατανάλωσης (Εξίσωση 2.14). Έτσι, η μέγιστη μείωση κατανάλωσης εντοπίζεται για την μέγιστη τιμή της  $T_{htf,wc,out}$  (55 °C). Συγκεκριμένα, η μέγιστη μείωση για το R1234ze επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C και πίεση 19 bar. Η τιμή της, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.1.2.2α, ισούται με 6.47 %.

Στο Διάγραμμα 3.1.2.2β παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 6.93 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C και πίεση 27 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.2.2γ παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 6.11 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C και πίεση 6 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.2.3 παρουσιάζεται η καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



**Διάγραμμα 3.1.2.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Από το *Διάγραμμα 3.1.2.3α* φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η  $T_{\text{htf,wc,out}}$  αυξάνεται η κατανάλωση της εγκατάστασης. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως αναφέρθηκε στο *Κεφάλαιο 2.2*, η αύξηση της  $T_{\text{htf,wc,out}}$  επιφέρει αύξηση στην θερμοκρασία εξόδου του CO<sub>2</sub> από τους ψύκτες ( $T_{\text{CO}_2,\text{ic,out}}$ ). Έτσι, το CO<sub>2</sub> εισέρχεται σε υψηλότερη θερμοκρασία στον επόμενο συμπιεστή, αυξάνοντας το απαιτούμενο έργο συμπίεσής του. Για αυτόν τον λόγο η ελάχιστη κατανάλωση συναντάται για την ελάχιστη τιμή της  $T_{\text{htf,wc,out}}$  (25 °C). Ακόμη, η καθαρή κατανάλωση της εγκατάστασης (*Εξίσωση 2.13*) εξαρτάται από την παραγωγή ισχύος του ORC. Για αυτό τον λόγο όσο αυξάνεται η παραγωγή ισχύος, φαίνεται ότι μειώνεται η κατανάλωση, μέχρι την πίεση στην οποία παράγεται η μέγιστη ισχύς. Μετά την πίεση αυτή παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης λόγω της μείωσης της παραγόμενης ισχύος του ORC.

Στο *Διάγραμμα 3.1.2.3α* η ευθεία γραμμή δείχνει την κατανάλωση ισχύος που έχει η εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> για  $T_{\text{htf,wc,out}} = 25$  °C αν δεν χρησιμοποιηθεί ORC. Έτσι, διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{\text{htf,wc,out}}$  είναι 25 °C και για πιέσεις 10-21 bar όταν η θερμοκρασία αυτή είναι 35 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος του συστήματος συμπιεστών με ORC για το ψυκτικό R1234ze είναι ίση με 4,375 kW και εντοπίζεται για  $T_{\text{htf,wc,out}} = 25$  °C και πίεση 14 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.2.3β* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{\text{htf,wc,out}}$  είναι 25 °C και για πιέσεις 14-28 bar, όταν η θερμοκρασία αυτή είναι 35 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1234yf είναι ίση με 4,374 kW και εντοπίζεται για  $T_{\text{htf,wc,out}} = 25$  °C και πίεση 18 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.2.3γ* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{\text{htf,wc,out}}$  είναι 25 °C και για πιέσεις 4-6 bar, όταν η θερμοκρασία αυτή είναι 35 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1233zdE είναι ίση με 4,378 kW και εντοπίζεται για  $T_{\text{htf,wc,out}} = 25$  °C και πίεση 4 bar.

Κριτήριο βελτιστοποίησης είναι η ελάχιστη συνολική κατανάλωση του συστήματος. Τα αποτελέσματα για τα 3 ψυκτικά στην διάταξη των 4 συμπιεστών συνοψίζονται στον *Πίνακα 3.1.1*.

**Πίνακας 3.1.1** Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 4 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC

$P_{e,tot,ORC}$ (kW)	Ψυκτικό μέσο του ORC	$T_{htf,wc,out}$ (°C)	$p_{evap}$ (bar)
4,375	R1234ze	25	14
4,374	R1234yf	25	18
4,378	R1233zdE	25	4

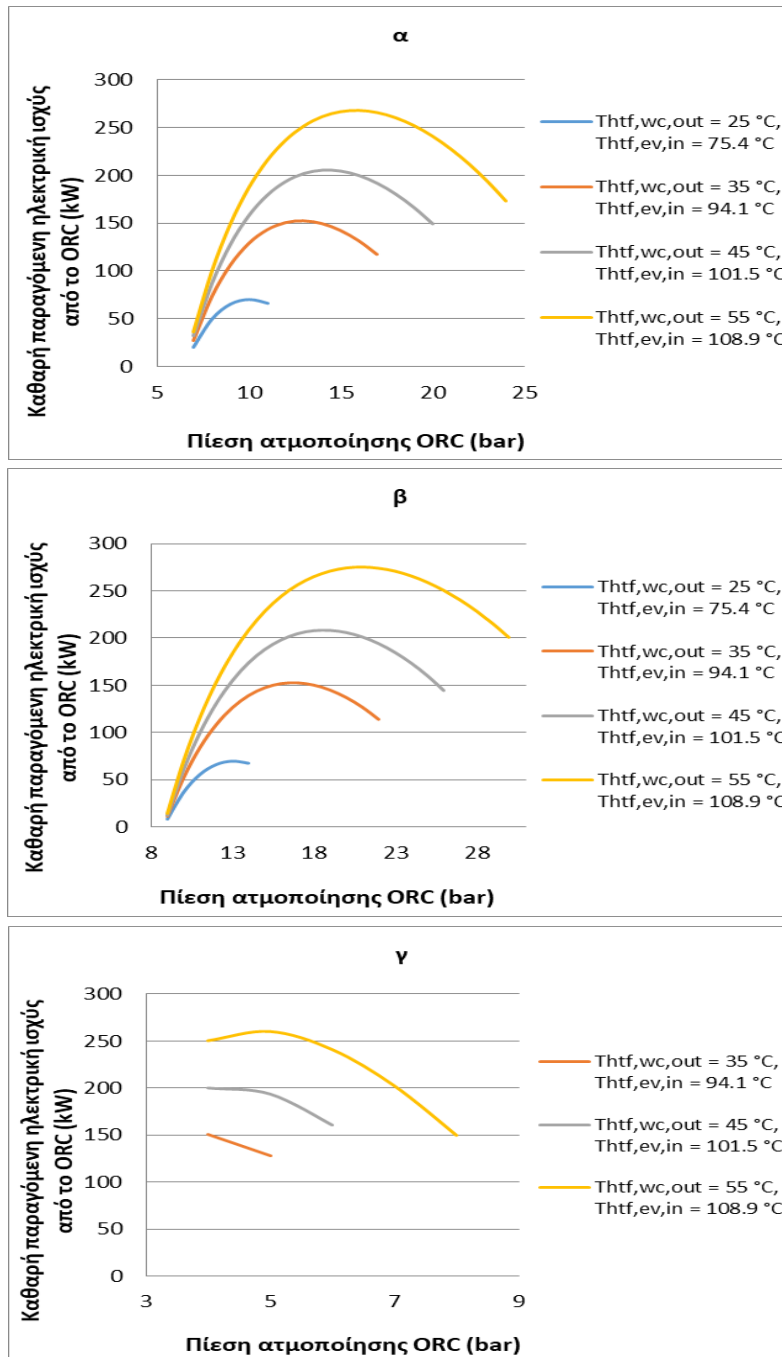
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι σε όλα τα ψυκτικά η ελάχιστη κατανάλωση εντοπίζεται σε  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C αλλά για διαφορετικές τιμές της πίεσης ατμοποίησης. Η συνολική κατανάλωση έχει μικρές διαφορές μεταξύ των τριών ρευστών. Αυτό συμβαίνει διότι η κατανάλωση των συμπιεστών (χωρίς ORC) είναι ίδια και για τα τρία ψυκτικά όταν γίνεται αναφορά σε ίδια θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$ , ενώ η παραγωγή ισχύος του ORC έχει μικρές διαφορές (Εξίσωση 2.13). Συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη επιλογή σε σύστημα 4 συμπιεστών είναι το ψυκτικό R1234yf σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 18 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C. Στη θερμοκρασία αυτή, με την ενσωμάτωση συστήματος ORC, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 156 kW ή 3.45 % όπως προκύπτει από την (Εξίσωση 2.14).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση κατανάλωσης των συμπιεστών υπολογίζεται για κάθε τιμή της  $T_{htf,wc,out}$ . Για  $T_{htf,wc,out} = 55$  °C έχω πάντα την μεγαλύτερη μείωση κατανάλωσης καθώς στην θερμοκρασία αυτή το ORC παράγει την μέγιστη ισχύ. Ωστόσο, στους 55 °C παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη συνολική καθαρή κατανάλωση του συστήματος από ότι στις τιμές 25, 35, 45 °C. Για τον λόγο αυτό, η μείωση που λαμβάνεται υπόψη είναι των 25 °C που εντοπίζεται η ελάχιστη κατανάλωση.



### 3.1.3 Διάταξη με 5 συμπιεστές

Στο Διάγραμμα 3.1.3.1 παρουσιάζεται η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του ORC συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης, για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



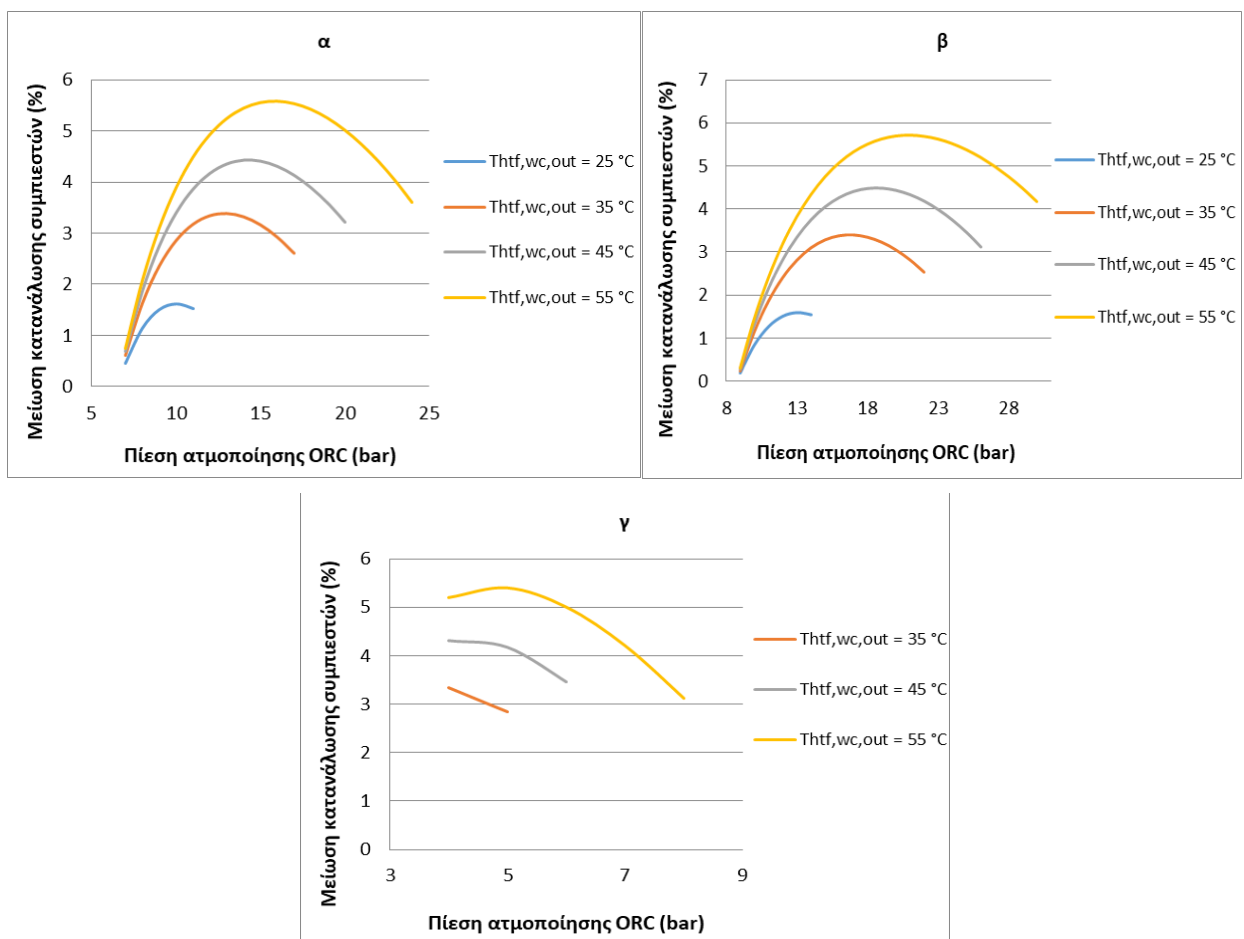
Διάγραμμα 3.1.3.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.1α παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234ze ισούται με 268 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 108.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 16 bar. Η θερμοκρασία  $T_{htf,ev,in}$  παρουσιάζεται μειωμένη σε σύγκριση με την εγκατάσταση των 4 συμπιεστών λόγω της αύξησης των βαθμίδων συμπίεσης (όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2).

Στο Διάγραμμα 3.1.3.1β παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 275 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 108.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 21 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.1γ παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 260 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 108.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 5 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.2 παρουσιάζεται η μείωση της κατανάλωσης των συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



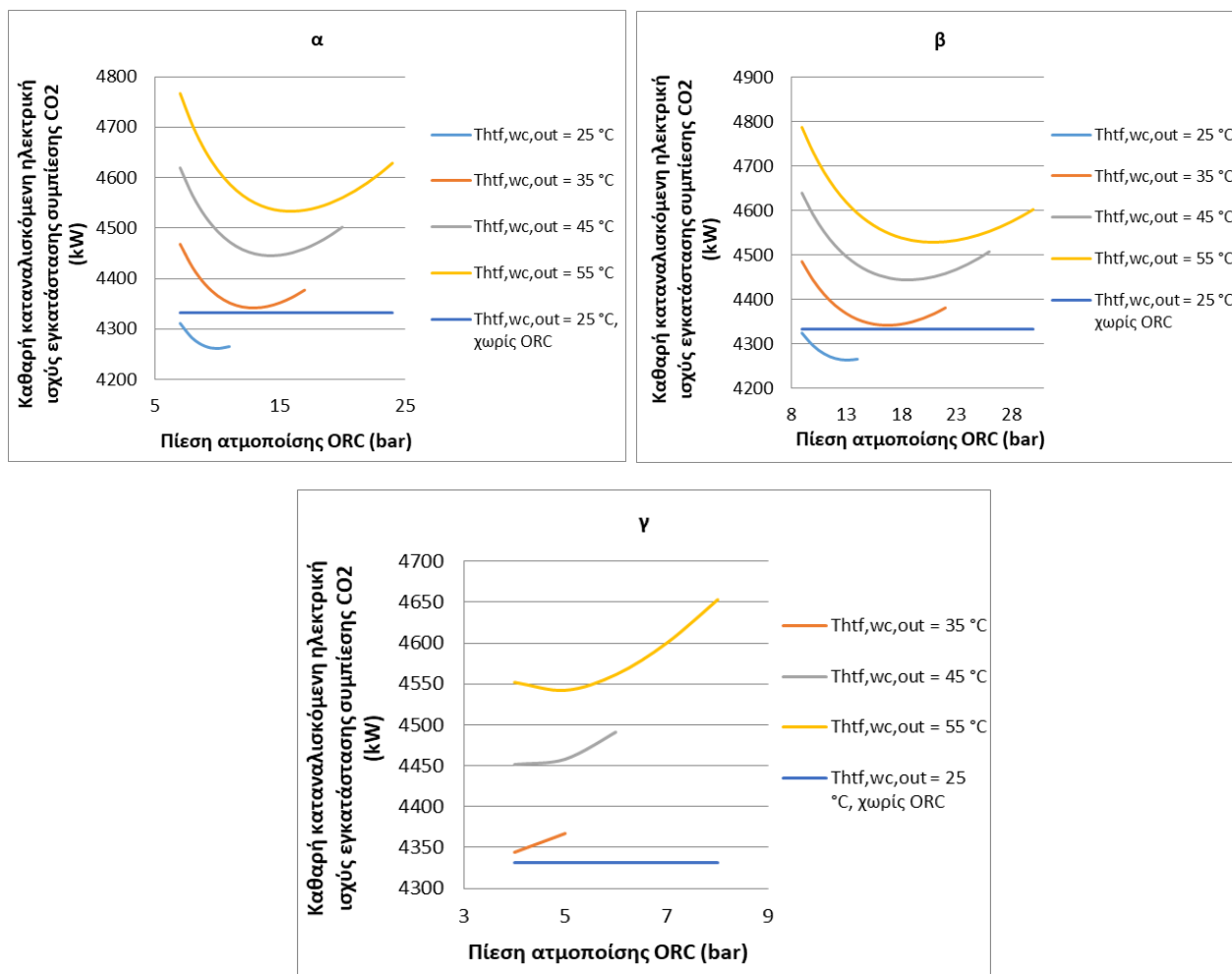
**Διάγραμμα 3.1.3.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Στο Διάγραμμα 3.1.3.2α φαίνεται ότι η μέγιστη μείωση για το R1234ze επιτυγχάνεται στις συνθήκες που παράγεται η μέγιστη ισχύς, δηλαδή για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 16 bar. Η τιμή της ισούται με 5.59 %.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.2β παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 5.72 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 21 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.2γ παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 5.41 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 5 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.3.3 παρουσιάζεται η καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



**Διάγραμμα 3.1.3.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Από το *Διάγραμμα 3.1.3.3α* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  είναι 25 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος του συστήματος συμπιεστών με ORC για το ψυκτικό R1234ze είναι ίση με 4,262 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C και πίεση 10 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.3.3β* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  είναι 25 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1234yf είναι ίση με 4,262 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C και πίεση 13 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.3.3γ* διαπιστώνεται ότι δεν συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για καμία τιμή της θερμοκρασίας  $T_{htf,wc,out}$ . Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1233zdE είναι ίση με 4,345 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 35$  °C και πίεση 4 bar. Παρατηρείται όμως ότι η γενική ελάχιστη κατανάλωση (4,332 kW) παρουσιάζεται για την διάταξη χωρίς παρουσία ORC και σε  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C (ευθεία γραμμή).

Τα αποτελέσματα για τα 3 ψυκτικά στην διάταξη των 5 συμπιεστών συνοψίζονται στον *Πίνακα 3.1.2*.

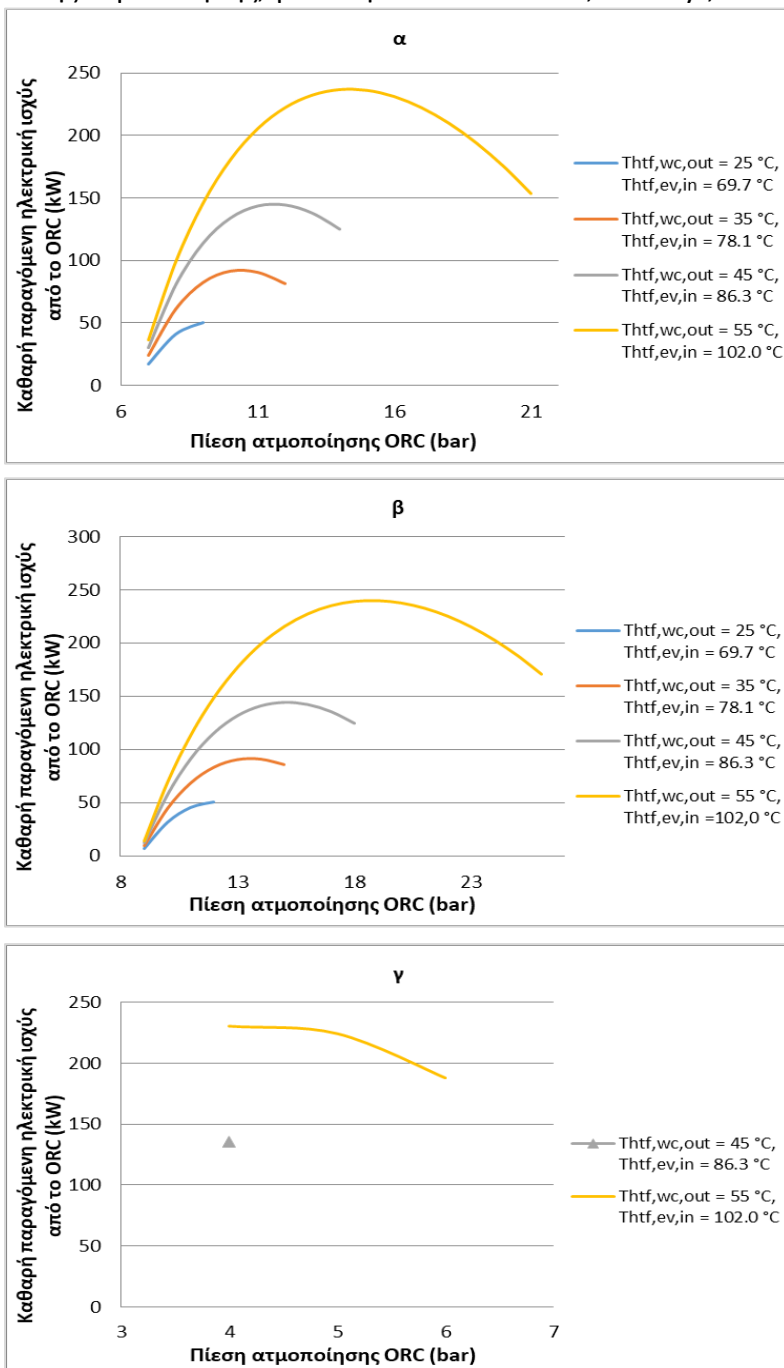
**Πίνακας 3.1.2** Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 5 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC.

$P_{e,tot,ORC}$ (kW)	Ψυκτικό μέσο του ORC	$T_{htf,wc,out}$ (°C)	$p_{evap}$ (bar)
4,262	R1234ze	25	10
4,262	R1234yf	25	13
4,345	R1233zdE	35	4

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι στα ψυκτικά R1234ze, R1234yf η ελάχιστη κατανάλωση εντοπίζεται σε  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C αλλά για διαφορετικές τιμές της πίεσης ατμοποίησης. Διαπιστώνεται ακόμη ότι η ελάχιστη καθαρή κατανάλωση για τα ρευστά αυτά είναι ίδια. Ωστόσο, για το ψυκτικό R1233zdE, για 5 συμπιεστές, δεν συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC. Άρα με κριτήριο την ελάχιστη κατανάλωση προτιμάται η απουσία ORC σε αυτήν την περίπτωση. Συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη επιλογή σε σύστημα 5 συμπιεστές μπορεί να είναι το ψυκτικό R1234ze σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 10 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C ή το R1234yf στην ίδια θερμοκρασία αλλά σε πίεση 13 bar. Για την βέλτιστη επιλογή, με ενσωμάτωση συστήματος ORC, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 70 kW ή 1.61 % όπως προκύπτει από την *Εξίσωση 2.14*.

### 3.1.4 Διάταξη με 6 συμπιεστές

Στο Διάγραμμα 3.1.4.1 παρουσιάζεται η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του ORC συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης, για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



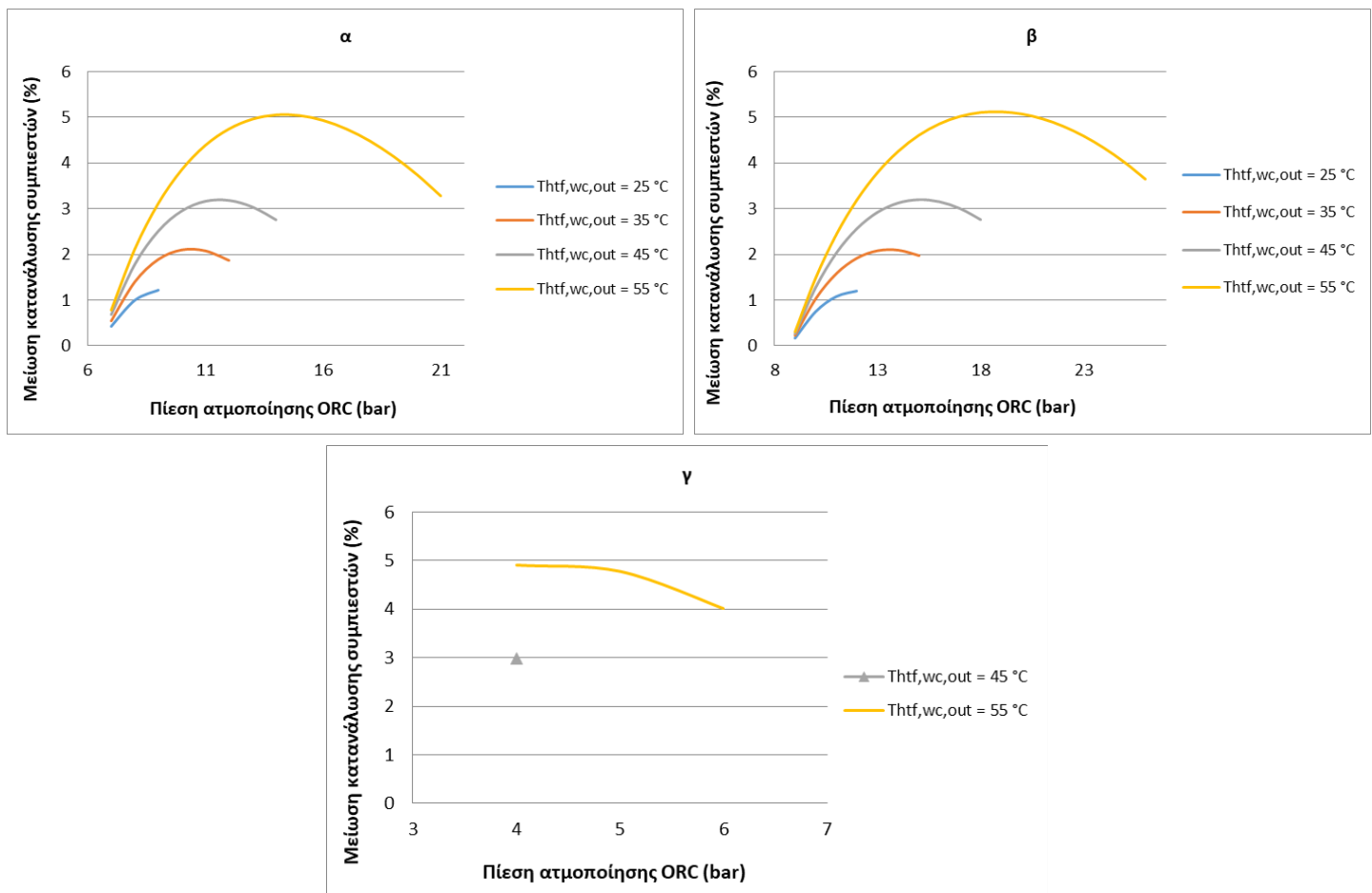
Διάγραμμα 3.1.4.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.1α παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234ze ισούται με 237 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 14 bar. Η θερμοκρασία  $T_{htf,ev,in}$  παρουσιάζεται μειωμένη σε σύγκριση με την εγκατάσταση των 5 συμπιεστών λόγω της αύξησης των βαθμίδων συμπίεσης (όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.2).

Στο Διάγραμμα 3.1.4.1β παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 240 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 19 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.1γ παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 231 kW και παράγεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{htf,ev,in} = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 4 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.2 παρουσιάζεται η μείωση της κατανάλωσης των συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



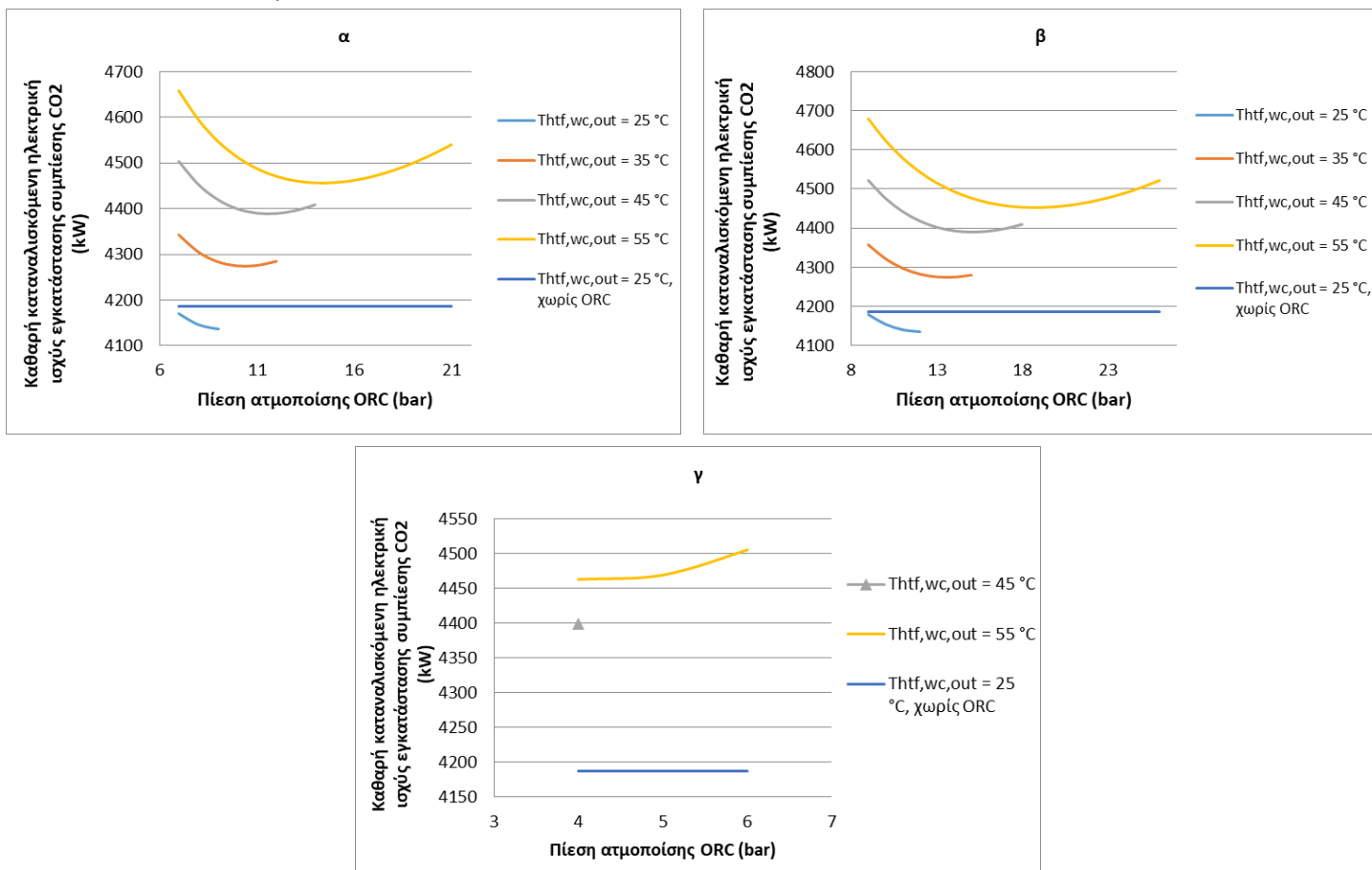
**Διάγραμμα 3.1.4.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Στο Διάγραμμα 3.1.4.2α φαίνεται ότι η μέγιστη μείωση για το R1234ze επιτυγχάνεται στις συνθήκες που παράγεται η μέγιστη ισχύς, δηλαδή για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 14 bar. Η τιμή της ισούται με 5.05 %.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.2β παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1234yf ισούται με 5.12 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 19 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.2γ παρατηρείται ότι η μέγιστη μείωση για το ψυκτικό R1233zdE ισούται με 4.91 % και επιτυγχάνεται για  $T_{htf,wc,out} = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  και πίεση 4 bar.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.3 παρουσιάζεται η καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για τα ψυκτικά R1234ze, R1234yf, R1233zdE.



**Διάγραμμα 3.1.4.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE.**

Από το *Διάγραμμα 3.1.4.3α* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  είναι 25 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος του συστήματος συμπιεστών με ORC για το ψυκτικό R1234ze είναι ίση με 4,136 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C και πίεση 9 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.4.3β* διαπιστώνεται ότι συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για όλες τις πιέσεις όταν η θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  είναι 25 °C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες η κατανάλωση ισχύος για την συμπίεση γίνεται αρκετά υψηλή και η ενσωμάτωση συστήματος ORC είναι ασύμφορη θερμοδυναμικά. Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1234yf είναι ίση με 4,136 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C και πίεση 12 bar.

Από το *Διάγραμμα 3.1.4.3γ* διαπιστώνεται ότι δεν συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC για καμία τιμή της θερμοκρασίας  $T_{htf,wc,out}$ . Η ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για το ψυκτικό R1233zdE είναι ίση με 4,399 kW και εντοπίζεται για  $T_{htf,wc,out} = 45$  °C και πίεση 4 bar. Παρατηρείται όμως ότι η γενική ελάχιστη κατανάλωση (4,187 kW) παρουσιάζεται για την διάταξη χωρίς παρουσία ORC και σε  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C (ευθεία γραμμή).

Ο Τα αποτελέσματα για τα 3 ψυκτικά στην διάταξη των 6 συμπιεστών συνοψίζονται στον *Πίνακα 3.1.3*.

**Πίνακας 3.1.3 Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 6 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC**

$P_{e,tot,ORC}$ (kW)	Ψυκτικό μέσο του ORC	$T_{htf,wc,out}$ (°C)	Πίεση ατμοποίησης ORC (bar)
4,136	R1234ze	25	9
4,136	R1234yf	25	12
4,399	R1233zdE	45	4

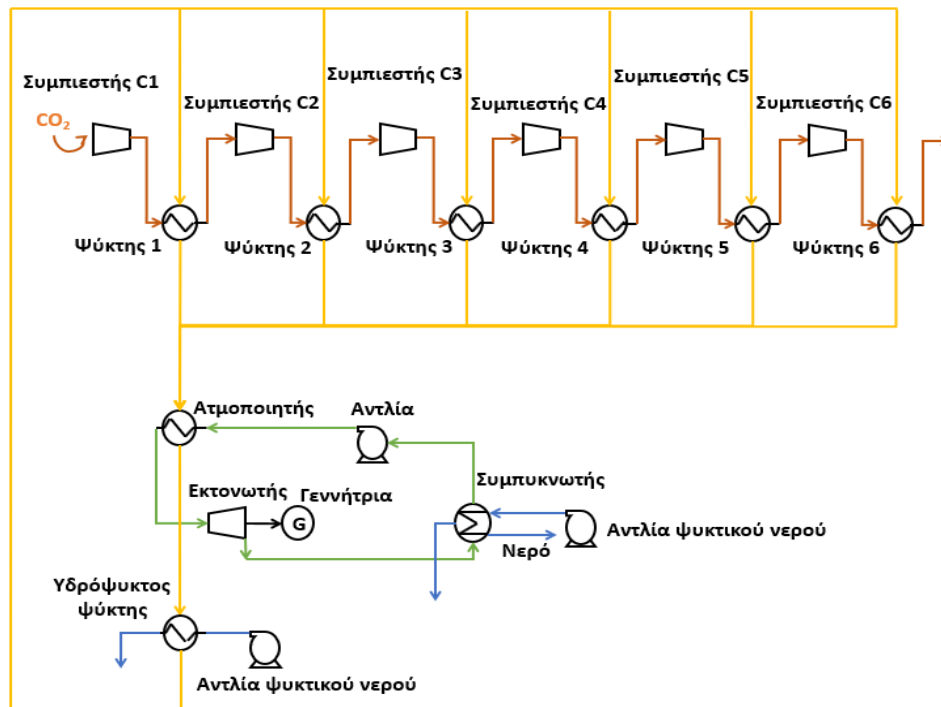
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι στα ψυκτικά R1234ze, R1234yf η ελάχιστη κατανάλωση εντοπίζεται σε  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C αλλά για διαφορετικές τιμές της πίεσης ατμοποίησης. Διαπιστώνεται ακόμη ότι η ελάχιστη καθαρή κατανάλωση για τα ρευστά αυτά είναι ίδια. Ωστόσο, για το ψυκτικό R1233zdE, για 6 συμπιεστές, δεν συμφέρει η ενσωμάτωση συστήματος ORC. Άρα με κριτήριο την ελάχιστη κατανάλωση προτιμάται η απουσία ORC σε αυτήν την περίπτωση. Συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη επιλογή σε σύστημα 6 συμπιεστές μπορεί



να είναι το ψυκτικό R1234ze (4,136 kW) σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 9 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ή το R1234yf (4,136 kW) στην ίδια θερμοκρασία αλλά σε πίεση 12 bar. Για την βέλτιστη επιλογή, με ενσωμάτωση συστήματος ORC, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση 51 kW ή 1.21 % όπως προκύπτει από την *Εξίσωση 2.14*.

### 3.1.4.1 Διάγραμμα Sankey

Η διάταξη των 6 συμπιεστών, με ψυκτικό το R1234ze, σε  $T_{htf,wc,out} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , πίεση ατμοποίησης 9 bar, όπως αναλύθηκε παραπάνω, αποτελεί ενεργειακά βέλτιστη λύση. Για την περίπτωση αυτή εξετάστηκε η κατανάλωση της αντλίας τροφοδοτικού νερού του συμπυκνωτή του ORC καθώς και της αντλίας τροφοδοτικού νερού του υδρόψυκτου ψύκτη, που φαίνονται στην *Εικόνα 3.1.1*. Οι καταναλώσεις αυτές θεωρήθηκαν αμελητέες για τα αποτελέσματα των υπόλοιπων κεφαλαίων (εκτός των υποκεφαλαίων 3.1.4.1, 3.1.4.2) της παρούσας διπλωματικής μελέτης. Για παροχή νερού 50.7 kg/s και πίεση εξόδου αντλίας 2 bar, ενώ η είσοδος νερού στην αντλία έγινε σε ατμοσφαιρική πίεση, η κατανάλωση της αντλίας του συμπυκνωτή ήταν ίση με 9 kW<sub>e</sub>. Ακόμη, για παροχή νερού 48 kg/s και πίεση εξόδου αντλίας 2 bar, ενώ η είσοδος νερού στην αντλία έγινε σε ατμοσφαιρική πίεση, η κατανάλωση της αντλίας του υδρόψυκτου ψύκτη ήταν ίση με 8 kW<sub>e</sub>.



**Εικόνα 3.1.1** Εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub> με 6 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC, με προσθήκη αντλιών νερού του υδρόψυκτου ψύκτη και του συμπυκνωτή

Στην εγκατάσταση της πολυβάθμιας συμπίεσης εισέρχεται το CO<sub>2</sub> (1.013 bar, 35 °C, 10.91 kg/s) με ισχύς 4,370 kW<sub>th</sub> ενώ στους 6 συμπιεστές καταναλώνονται 4,187 kW<sub>e</sub> για την συμπίεση του (4,370 + 4,187 = 8,557 kW). Το σημαντικότερο μέρος της ενέργειας αυτής (6,517kW) μεταφέρεται στο ρευστό HTF μέσω των ενδιάμεσων ψυκτών του CO<sub>2</sub>. Η υπόλοιπη ενέργεια μοιράζεται στο ρεύμα εξόδου του CO<sub>2</sub> (152 bar, 35 °C, 10.91 kg/s) και σε απώλειες των συμπιεστών.

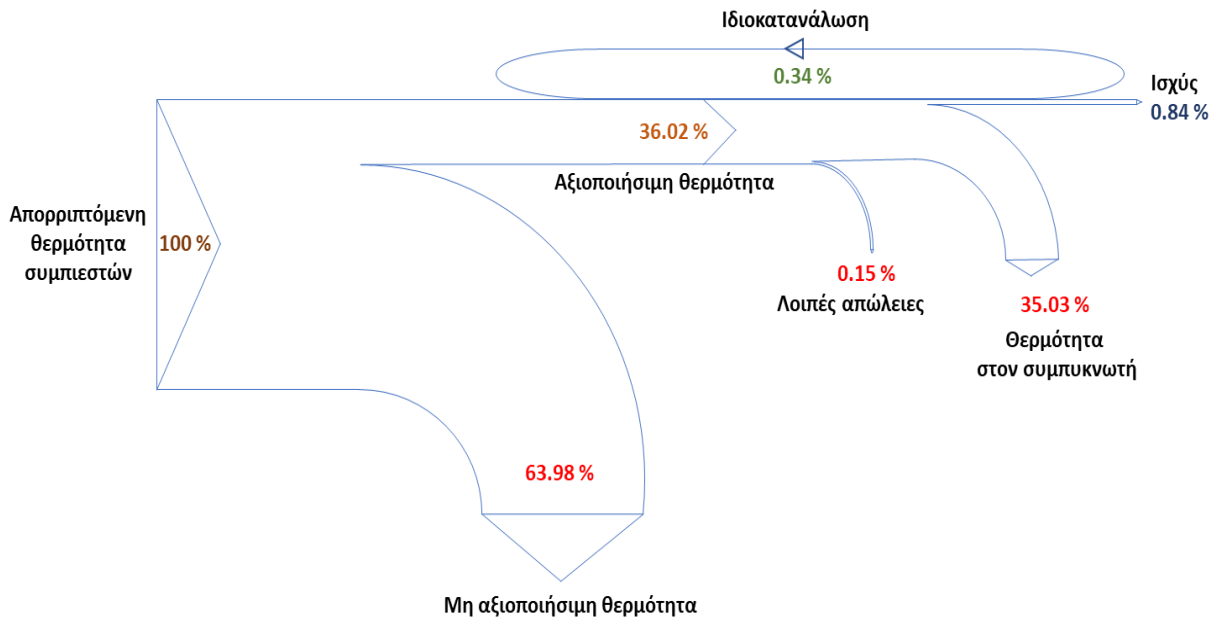
Στον Πίνακα 3.1.4 παρουσιάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του διαγράμματος Sankey.

**Πίνακας 3.1.4 Στοιχεία Διαγράμματος Sankey**

Θερμότητα	kW
Απορριπτόμενη θερμότητα συμπιεστών	6,517
Αξιοποιήσιμη θερμότητα	2,347
Μη αξιοποιήσιμη θερμότητα	4,170
Θερμότητα συμπυκνωτή	2,283
Ηλεκτρική ισχύς	55
Ιδιοκαταναλώσεις	22
Λοιπές απώλειες	9

Η μη αξιοποιήσιμη θερμότητα είναι η θερμότητα που απορρίπτεται από το ρευστό HTF στο νερό του υδρόψυκτου ψύκτη. Συγκεκριμένα το ρευστό HTF, αφού διέλθει από τον ατμοποιητή του ORC, ψύχεται στη θερμοκρασία των 25 °C με ρεύμα νερού ώστε να επανακυκλοφορήσει στους ενδιάμεσους ψύκτες του CO<sub>2</sub>. Αξιοποιήσιμη είναι η θερμότητα που μεταδίδεται από το ρευστό HTF στο οργανικό ρευστό, στον ατμοποιητή του ORC. Στον παραπάνω πίνακα αναφέρεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τον εκτονωτή, όχι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς. Η τελευταία προκύπτει με την αφαίρεση των ιδιοκαταναλώσεων του συστήματος ORC από την ισχύ του εκτονωτή. Οι ιδιοκαταναλώσεις περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος των δύο αντλιών νερού καθώς και της κύριας αντλίας του ORC. Στις λοιπές απώλειες περιλαμβάνονται οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες των τριών αντλιών και του εκτονωτή.

Στο Διάγραμμα 3.1.4.4 περιγράφεται σχηματικά η ροή της ενέργειας μέσω διαγράμματος Sankey.



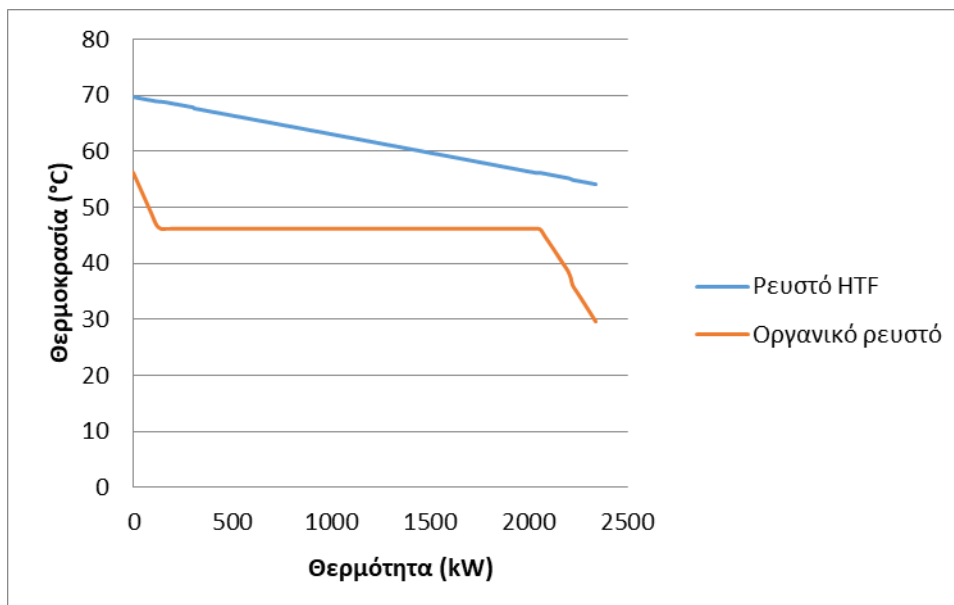
**Διάγραμμα 3.1.4.4 Διάγραμμα Sankey**

Από το παραπάνω Διάγραμμα παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας των συμπιεστών (63.98%) δεν δεσμεύεται από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας και απορρίπτεται. Αυτό συμβαίνει διότι το ρευστό HTF πρέπει να ψυχθεί στη θερμοκρασία των 25°C για να επανακυκλοφορήσει στους ψύκτες του CO<sub>2</sub>, αποβάλλοντας μεγάλο ποσό θερμότητας στο νερό του υδρόψυκτου ψύκτη. Ακόμη, παρατηρείται ότι περίπου το 35% της θερμότητας των συμπιεστών αποβάλλεται στον συμπυκνωτή του ORC, ενώ η παραγωγή ισχύος φτάνει μόλις το 0.84%.

### 3.1.4.2 Διαγράμματα Q-T

Για την περίπτωση των 6 συμπιεστών, με ψυκτικό το R1234ze, σε  $T_{htf,wc,out} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , πίεση ατμοποίησης 9 bar κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα θερμότητας Q – θερμοκρασίας T για τον ατμοποιητή και τον υδρόψυκτο ψύκτη.

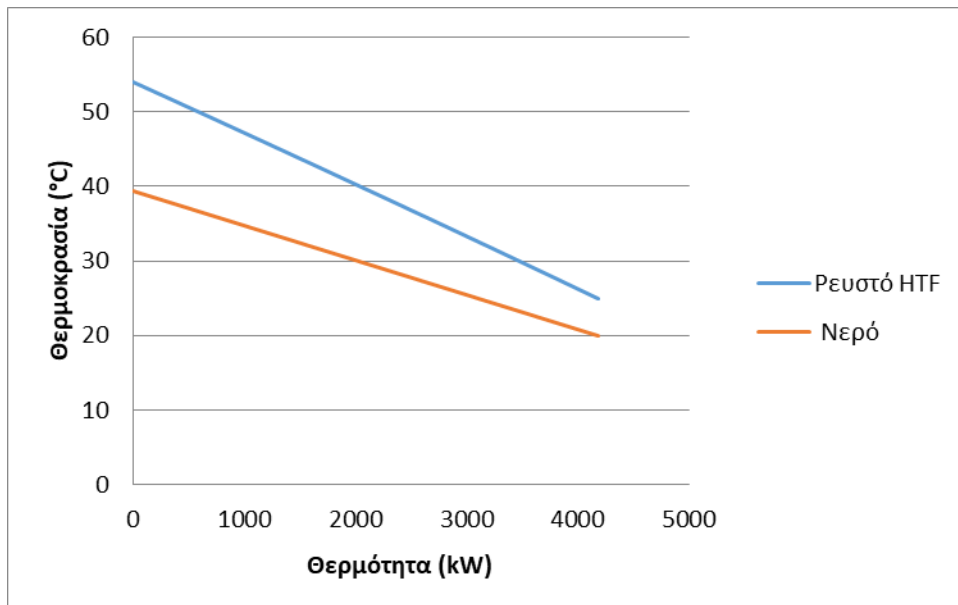
Στο Διάγραμμα 3.1.4.5 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού HTF και του οργανικού ρευστού κατά την μεταφορά θερμότητας από το πρώτο στο δεύτερο, στον ατμοποιητή του ORC.



**Διάγραμμα 3.1.4.5** Διάγραμμα θερμότητας Q – θερμοκρασίας T του ατμοποιητή για το οργανικό ρευστό R1234ze.

Από το παραπάνω Διάγραμμα παρατηρείται ότι το ρευστό HTF ψύχεται από τους 70 στους 54  $^{\circ}\text{C}$  ενώ το οργανικό ρευστό θερμαίνεται από τους 30 στους 56  $^{\circ}\text{C}$ . Το Pinch Point μεταξύ των 2 ρευμάτων εμφανίζεται στην είσοδο του ατμοποιητή. Η ατμοποίηση του οργανικού ρευστού γίνεται στη θερμοκρασία των 46  $^{\circ}\text{C}$  (για  $p_{evap} = 9\text{ bar}$ ).

Στο Διάγραμμα 3.1.4.6 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού HTF και του ψυκτικού νερού κατά την μεταφορά θερμότητας από το πρώτο στο δεύτερο, στον υδρόψυκτο ψύκτη.



**Διάγραμμα 3.1.4.6 Διάγραμμα θερμότητας Q – θερμοκρασίας T του υδρόψυκτου ψύκτη για το ρευστό HTF και το ψυκτικό νερό**

Από το παραπάνω Διάγραμμα παρατηρείται ότι το ρευστό HTF ψύχεται από τους 54 στους 25 °C ενώ το νερό θερμαίνεται από τους 20 στους 39 °C.

### **3.1.5 Συγκριτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων για διαφορετικά πλήθη βαθμίδων συμπίεσης και εργαζόμενων ρευστών ORC**

Στον Πίνακα 3.1.5 παρουσιάζονται τα βέλτιστα αποτελέσματα για κάθε διάταξη συμπίεσης με ORC. Στην περίπτωση των 5 και των 6 συμπιεστών, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουμε δύο ρευστά που δίνουν βέλτιστη λύση τα: R1234ze και R1234yf. Ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα αναφέρεται μόνο το ρευστό R1234ze. Τα δύο αυτά ρευστά (στην βέλτιστη λύση) στο μόνο χαρακτηριστικό που εμφανίζουν εμφανή διαφορά είναι η πίεση ατμοποίησης.

**Πίνακας 3.1.5 Αποτελέσματα οργανικών ρευστών ORC και συστήματος συμπίεσης CO<sub>2</sub>**

Χαρακτηριστικά	Βέλτιστο εργαζόμενο μέσο		
	R1234yf	R1234ze	R1234ze
$p_{evap}$ (bar)	18	10	9
$\dot{m}_{htf}$ (kg/s)	50.50	73.00	81.00
Βαθμίδες συμπίεσης	4	5	6
$T_{htf,wc,out}$ (°C)	25	25	25
Θερμοκρασία συμπύκνωσης ORC (°C)	34.08	34.26	34.30
$P_{e,c,1}$ (kW <sub>e</sub> )	1,217	948	776
$P_{e,c,2}$ (kW <sub>e</sub> )	1,201	939	770
$P_{e,c,3}$ (kW <sub>e</sub> )	1,147	916	758
$P_{e,c,4}$ (kW <sub>e</sub> )	966	854	730
$P_{e,c,5}$ (kW <sub>e</sub> )	-	675	665
$P_{e,c,6}$ (kW <sub>e</sub> )	-	-	487
$P_{e,c,tot}$ (kW <sub>e</sub> )	4,531	4,332	4,187
$P_{e,ORC}$ (kW <sub>e</sub> )	156	70	51
$\Delta P_{e,tot}$ (%)	3.45	1.61	1.21
$\eta_{ORC}$ (%)	4.54	2.83	2.16

Από τον Πίνακα 3.1.5 συμπεραίνεται, όπως αναφέρεται και παραπάνω, ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των βαθμίδων συμπίεσης μειώνεται η κατανάλωση σε κάθε συμπιεστή καθώς και η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι, η ελάχιστη κατανάλωση εντοπίζεται στη διάταξη των 6 συμπιεστών. Παρατηρείται, ωστόσο ότι η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των συμπιεστών. Όταν ο ίδιος λόγος συμπίεσης επιτυγχάνεται σε μικρότερο αριθμό βαθμίδων τότε το CO<sub>2</sub> φτάνει σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, το ρευστό HTF απάγει από το CO<sub>2</sub> μεγαλύτερα ποσά θερμότητας για αξιοποίηση στο ORC. Για τον λόγο αυτό, η μέγιστη ισχύς παράγεται στο σύστημα των 4 συμπιεστών. Η μεγαλύτερη μείωση κατανάλωσης και ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης ORC είναι 3.45 % και 4.54 % αντίστοιχα και συναντώνται στο τετραβάθμιο σύστημα σε πίεση ατμοποίησης 18 bar, θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  ίση με 25 °C, με το ψυκτικό R1234yf. Η μείωση γίνεται όλο και μικρότερη με την προσθήκη περισσότερων συμπιεστών. Με κριτήριο την ελάχιστη κατανάλωση των συμπιεστών η βέλτιστη επιλογή για συμπίεση CO<sub>2</sub> με λόγο συμπίεσης 1:150, είναι το εξαβάθμιο σύστημα με το ψυκτικό R1234ze (4,136 kW) σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 9 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C ή το R1234yf (4,136 kW) στην ίδια θερμοκρασία αλλά σε πίεση 12 bar. Παρόλο που η επιλογή αυτή είναι η βέλτιστη, η μείωση κατανάλωσης λόγω της προσθήκης ORC και ο βαθμός απόδοσης του ORC έχουν την μικρότερη τιμή από τα 3 συστήματα και ισούνται με 1.21 % και 2.16 %, αντίστοιχα.

### 3.2 Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης

Στον Πίνακα 3.2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για την ενσωμάτωση συστήματος ORC σε εγκατάσταση συμπίεσης CO<sub>2</sub>.

Πίνακας 3.2.1 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης

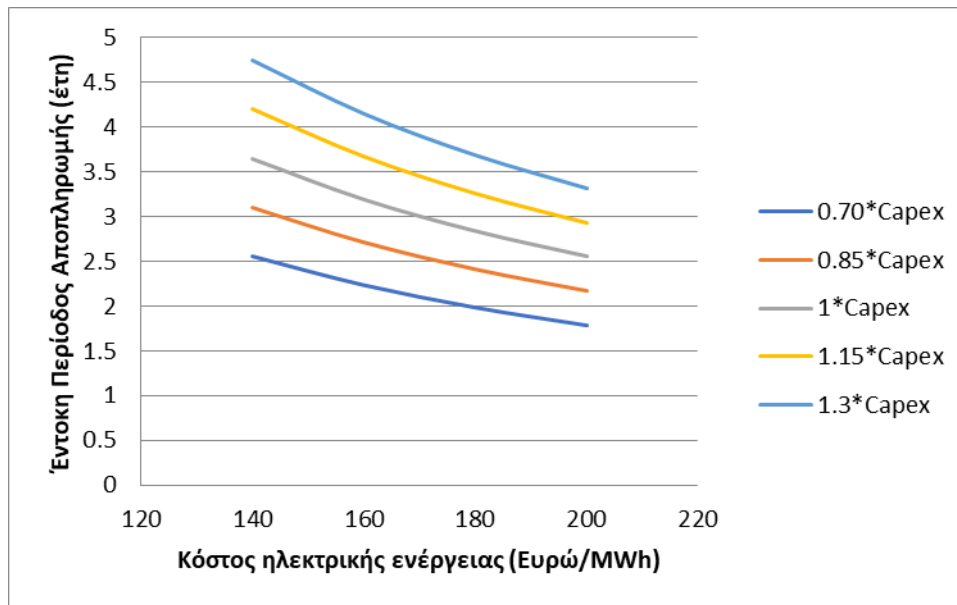
	Σύστημα 4 συμπιεστών	Σύστημα 5 συμπιεστών	Σύστημα 6 συμπιεστών
<i>Εγκατεστημένη ισχύς του ORC (kWe)</i>	156	70	51
<i>Ειδικό κόστος επένδυσης (SIC) (€/kWe)</i>	3,710.0	4,269.5	4,515.0
<i>Κόστος επένδυσης (C<sub>o</sub>) (€)</i>	580,432.4	297,968.7	228,505.5
<i>Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (C<sub>om</sub>) (€/έτος)</i>	11,609.0	5,959.0	4,570.0
<i>Ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWe/έτος)</i>	1,252,000.0	558,000.0	405,000.0
<i>Ετήσια έσοδα από εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (€/έτος)</i>	225,306.0	100,505.6	72,884.2
<i>Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) (€)</i>	2,190,973.0	930,814.0	660,191.0
<i>Εσωτερικός Συντελεστής απόδοσης (IRR) (%)</i>	36.7	31.6	29.7
<i>Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (χρόνια)</i>	2.8	3.3	3.5



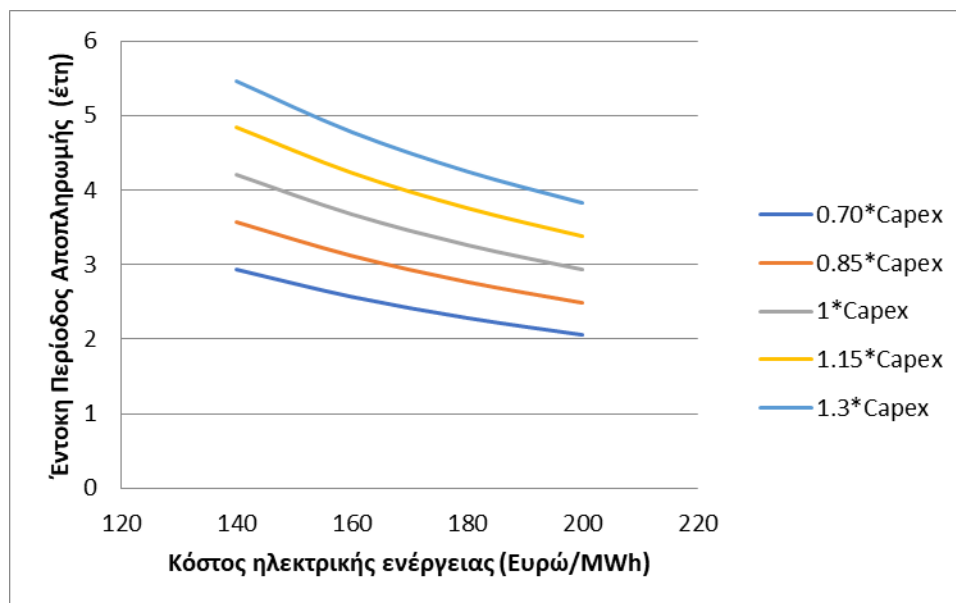
Στον Πίνακα 3.2.1 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η παραγόμενη ισχύς, αυξάνεται το SIC (Εξίσωση 3.1) και μειώνεται το κόστος επένδυσης (Εξίσωση 2.19). Φαίνεται ότι το μεγαλύτερο κόστος επένδυσης είναι 580,432.4 € συναντάται στο σύστημα των 4 συμπιεστών το οποίο φέρει την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ. Ακολουθούν τα συστήματα των 5 και 6 συμπιεστών με κόστος επένδυσης αισθητά μειωμένο: 297,968.7 και 228,505.5 € αντίστοιχα. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μειώνεται με την μείωση της ισχύος, δηλαδή με αύξηση των συμπιεστών, καθώς αποτελεί ποσοστό του αρχικού κόστους επένδυσης. Η παραγωγή του ORC επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 1.2 εκατομμύρια kW<sub>e</sub> για το τετραβάθμιο σύστημα που αντιστοιχούν σε 225,306.0 € ετησίως. Παρατηρείται ακόμη, ότι η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι μεγίστη στο σύστημα των 4 συμπιεστών και μειώνεται με την μείωση της παραγόμενης ισχύος του ORC. Ο IRR είναι 36.7 % για τετραβάθμια συμπίεση και μειώνεται με την αύξηση των βαθμίδων συμπίεσης φτάνοντας την τιμή 29.7 % για διάταξη 6 συμπιεστών. Συμπεραίνεται ότι το τετραβάθμιο σύστημα λόγω της μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος του ORC, παρόλο το μεγαλύτερο κόστος επένδυσης και συντήρησης που έχει, παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη Καθαρή Παρούσα Αξία και ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, απαιτεί και λιγότερη χρονική περίοδο για την αποπληρωμή του ORC, η οποία είναι ίση με 2.8 έτη, όταν τα υπόλοιπα συστήματα απαιτούν πάνω από 3 έτη. Συνεπώς, η ενσωμάτωση συστήματος ORC σε σύστημα 4 συμπιεστών φαίνεται να είναι οικονομικά η προτιμότερη επένδυση.

Στην ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, η επίδραση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και του αρχικού κόστους επένδυσης φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση έγινε από 140 μέχρι 200 €/MWh ηλεκτρικής ενέργειας με βήμα 20 και για το κόστος επένδυσης χρησιμοποιήθηκαν τιμές από το 70 μέχρι το 130 % του κόστους επένδυσης με βήμα 15 %.

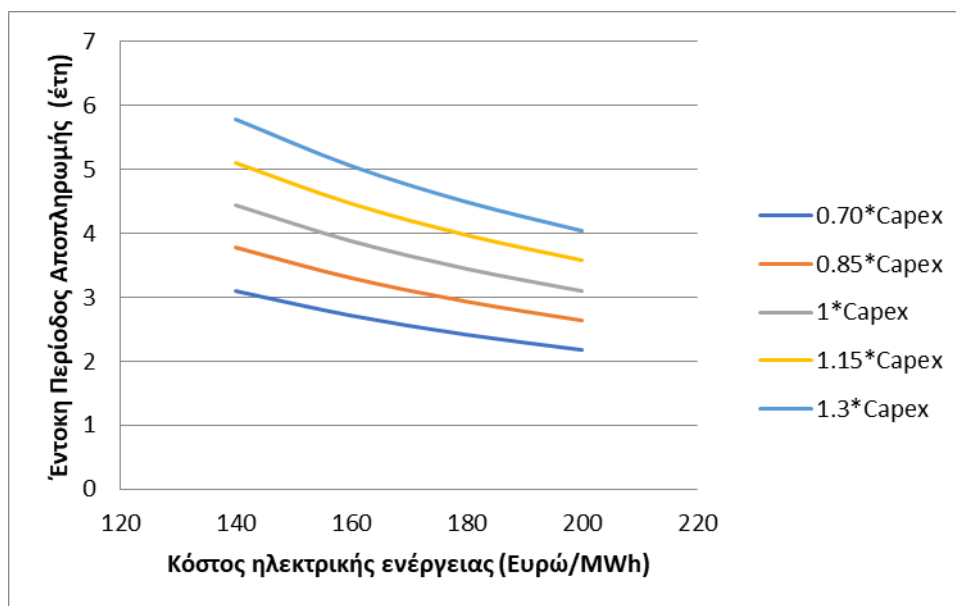
Στα Διάγραμμα 3.1.5.1, Διάγραμμα 3.1.5.2, και Διάγραμμα 3.1.5.3 παρουσιάζεται η επίδραση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας και του αρχικού κόστους επένδυσης ( $C_0$ ) στην Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής.



**Διάγραμμα 3.1.5.1** Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 4 συμπιεστών.



**Διάγραμμα 3.1.5.2** Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 5 συμπιεστών.



**Διάγραμμα 3.1.5.3 Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 6 συμπιεστών.**

Στα Διάγραμμα 3.1.5.1, Διάγραμμα 3.1.5.2, και Διάγραμμα 3.1.5.3 παρατηρείται ότι με την αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται η Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται και τα ετήσια έσοδα από την ηλεκτροπαραγωγή του ORC. Φαίνεται ότι η DPP είναι ανάλογη του κόστους επένδυσης καθώς μεγαλύτερο κεφάλαιο απαιτεί περισσότερα χρόνια αποπληρωμής ενώ μικρότερο κεφάλαιο σημαίνει ταχύτερη απόσβεση. Η ελάχιστη τιμή της DPP και στα τρία διαγράμματα εντοπίζεται στα 200 €/MWh (0.20 €/kWh) με κεφάλαιο ίσο με το 70 % του αρχικού κόστους επένδυσης. Η ελάχιστη τιμή της DPP και των τριών συστημάτων συναντάται στο τετραβάθμιο σύστημα και ισούται με 1.79 έτη.

## 4. Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, από ενεργειακής άποψης, βρέθηκε ότι η μεγαλύτερη μείωση κατανάλωσης ισχύος των συμπιεστών λόγω της προσθήκης ORC, μεταξύ των βέλτιστων λύσεων των 3 συστημάτων, είναι 3.45 % και παρατηρείται για το σύστημα 4 συμπιεστών σε πίεση ατμοποίησης 18 bar, θερμοκρασία  $T_{htf,wc,out}$  ίση με 25 °C, με το ψυκτικό R1234yf. Αυτό συμβαίνει διότι η μέγιστη ισχύς παράγεται στο τετραβάθμιο σύστημα. Ωστόσο, η βελτιστοποίηση που πήρε μέρος είχε στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης των συμπιεστών και όχι την μέγιστη παραγωγή του ORC. Για τον λόγο αυτό η βέλτιστη επιλογή για συμπύεση CO<sub>2</sub> με λόγο συμπύεσης 1:150, είναι το εξαβάθμιο σύστημα με το ψυκτικό R1234ze σε πίεση ατμοποίησης του ORC ίση με 9 bar και  $T_{htf,wc,out} = 25$  °C ή το R1234yf στην ίδια θερμοκρασία αλλά σε πίεση 12 bar. Η ελάχιστη κατανάλωση που επιτυγχάνεται και στις 2 περιπτώσεις ισούται με 4,136 kW<sub>e</sub>. Η μείωση κατανάλωσης λόγω της προσθήκης ORC και ο βαθμός απόδοσης του ORC ισούνται με 1.21 % και 2.16 %, αντίστοιχα.

Από την οικονομική αξιολόγηση βρέθηκε ότι το μεγαλύτερο κόστος επένδυσης είναι 580.432,4€ και συναντάται στο σύστημα των 4 συμπιεστών το οποίο φέρει και την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ. Η παραγωγή του ORC επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου 1.2 εκατομμύρια kW<sub>e</sub>, για το τετραβάθμιο σύστημα που αντιστοιχούν σε έσοδα 225,306.0 € ετησίως. Συμπεραίνεται ότι το τετραβάθμιο σύστημα έχει την μεγαλύτερη Καθαρή Παρούσα Αξία (2,190,973.0 €), τον μεγαλύτερο Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης (36.7 %) και την μέγιστη ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (1,252 MW<sub>e</sub>/έτος). Επίσης, παρουσιάζει και την μικρότερη Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής (2.8 έτη) και το χαμηλότερο ειδικός κόστος επένδυσης (3,710 €/kW<sub>e</sub>). Συνεπώς, η ενσωμάτωση συστήματος ORC σε σύστημα 4 συμπιεστών CO<sub>2</sub> παρουσιάζεται ως η οικονομικά προτιμότερη επένδυση.

Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται η DPP. Φαίνεται ότι η DPP είναι ανάλογη του κόστους επένδυσης καθώς μεγαλύτερο κεφάλαιο απαιτεί περισσότερα χρόνια αποπληρωμής ενώ μικρότερο κεφάλαιο σημαίνει ταχύτερη απόσβεση. Η ελάχιστη τιμή της DPP των τριών συστημάτων συναντάται στο τετραβάθμιο σύστημα, στα 200 €/MWh (0.20 €/kWh) με κεφάλαιο ίσο με το 70 % του αρχικού κόστους επένδυσης και ισούται με 1.79 έτη.

Συμπερασματικά, παρόλο που η βέλτιστη ενεργειακά λύση είναι η διάταξη των 6 συμπιεστών λόγω της ελάχιστης κατανάλωσης που επιτυγχάνει, η οικονομικά προτιμότερη λύση είναι η ενσωμάτωση συστήματος ORC στην διάταξη των 4 συμπιεστών. Φαίνεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς του ORC είναι μεγαλύτερη στο τετραβάθμιο σύστημα κάτι που του δίνει συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των συστημάτων 5 και 6 συμπιεστών κατά την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης αυτής. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής μελέτης έδειξαν την αξιολογική αξιοποίηση του ORC σε εγκατάσταση συμπύεσης CO<sub>2</sub> για εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας το οποίο αξίζει να γίνει αντικείμενο μελλοντικών ερευνών.

## 5. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.3.1 Σύνοψη δημοσιεύσεων που συνδυάζουν συστήματα συμπίεσης CO <sub>2</sub> με ORC για ανάκτηση θερμότητας .....	26
Πίνακας 2.2.1 Επιλεχθέντα οργανικά ρευστά.....	33
Πίνακας 2.2.2 Δεδομένα συμπιεστών και ψυκτών CO <sub>2</sub> .....	33
Πίνακας 2.2.3 Δεδομένα διάταξης ORC.....	34
Πίνακας 2.3.1 Δείκτης CεPcI για ανά έτος (Maxwell, 2020).....	39
Πίνακας 2.3.2 Παραδοχές για την οικονομική μελέτη .....	40
Πίνακας 3.1.1 Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 4 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC.....	48
Πίνακας 3.1.2 Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 5 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC.....	52
Πίνακας 3.1.3 Ελάχιστη συνολική καθαρή κατανάλωση ισχύος της εγκατάστασης για κάθε ψυκτικό σε διάταξη με 6 συμπιεστές, βέλτιστη θερμοκρασία ψύξης ρευστού μεταφοράς θερμότητας και βέλτιστη πίεση ατμοποίησης του ORC.....	56
Πίνακας 3.1.4 Στοιχεία Διαγράμματος Sankey.....	58
Πίνακας 3.1.5 Αποτελέσματα οργανικών ρευστών ORC και συστήματος συμπίεσης CO <sub>2</sub> .....	62
Πίνακας 3.2.1 Αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης .....	64

## 6. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1.1.1 Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> συναρτήσει της θερμοκρασίας ψύξης του ρευστού μεταφοράς θερμότητας για τις 3 διατάξεις (χωρίς παρουσία ORC). .....	41
Διάγραμμα 3.1.2.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. .	42
Διάγραμμα 3.1.2.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	44
Διάγραμμα 3.1.2.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 4 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	46
Διάγραμμα 3.1.3.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. .	49
Διάγραμμα 3.1.3.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	50
Διάγραμμα 3.1.3.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 5 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	51
Διάγραμμα 3.1.4.1 Καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. .	53
Διάγραμμα 3.1.4.2 Ποσοστιαία μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ισχύος συμπιεστών συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	54
Διάγραμμα 3.1.4.3 Καθαρή καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης συμπίεσης CO <sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης ατμοποίησης του ORC για 6 συμπιεστές: α) Ψυκτικό R1234ze, β) Ψυκτικό R1234yf, γ) Ψυκτικό R1233zdE. ....	55
Διάγραμμα 3.1.4.4 Διάγραμμα Sankey.....	59
Διάγραμμα 3.1.4.5 Διάγραμμα θερμότητας Q – θερμοκρασίας T του ατμοποιητή για το οργανικό ρευστό R1234ze.....	60
Διάγραμμα 3.1.4.6 Διάγραμμα θερμότητας Q – θερμοκρασίας T του υδρόψυκτου ψύκτη για το ρευστό HTF και το ψυκτικό νερό .....	61
Διάγραμμα 3.1.5.1 Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 4 συμπιεστών. ....	66

Διάγραμμα 3.1.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 5 συμπιεστών. .... 66

Διάγραμμα 3.1.5.3 Ανάλυση ευαισθησίας για την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής σε σχέση με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και το κόστος επένδυσης, σε σύστημα 6 συμπιεστών. .... 67

## 7. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.1 Σχηματική αναπαράσταση της αξιοποίησης του CO <sub>2</sub> για παραγωγή μεθανόλης (Vidal Vázquez, 2022).....	11
Εικόνα 1.1.2 Απεικόνιση της μεθόδου CCS (Γεωργουσόπουλος, 2020) .....	12
Εικόνα 1.1.3 Χρήση του CO <sub>2</sub> για την ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (Overton, 2016) .....	13
Εικόνα 1.1.4 Διάγραμμα φάσης του διοξειδίου του άνθρακα (Γεωργουσόπουλος, 2020).....	13
Εικόνα 1.1.5 Απεικόνιση πολυβάθμιας συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη σε διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας. (López-Paniagua, et al., 2020).....	14
Εικόνα 1.1.6 Πολυβάθμια συμπίεση του CO <sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη (Pei, et al., 2014) .....	14
Εικόνα 1.2.1 Εγκατάσταση ORC στην παραγωγή τσιμέντου (Campana, et al., 2013) .....	16
Εικόνα 1.2.2 Διάγραμμα Sankey για βιομηχανία αλουμινίου (Μπέλλος, 2012).....	17
Εικόνα 1.2.3 Εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων κινητήρα HDD με ORC (Zhao, et al., 2017).....	18
Εικόνα 1.3.1 Σύστημα τριβάθμιας συμπίεσης CO <sub>2</sub> με ORC (Γεωργουσόπουλος, 2020).....	19
Εικόνα 1.3.2 Επταβάθμια συμπίεση CO <sub>2</sub> με ενδιάμεση ψύξη και χρήση ORC (Pei, et al., 2014) .....	21
Εικόνα 1.3.3 Ανάκτηση θερμότητας με ORC από συμπίεση CO <sub>2</sub> (Farajollahi & Hossainpour, 2017) .....	22
Εικόνα 1.3.4 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με ORC για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια (Kurtulus, et al., 2018).....	23
Εικόνα 1.3.5 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος μετατροπής άνθρακα σε μεθανόλη σε συνδυασμό με ORC (Liu, et al., 2016) .....	25
Εικόνα 2.1.1 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με 4 βαθμίδες, χωρίς ORC .....	30
Εικόνα 2.1.2 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με 4 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC.....	30
Εικόνα 2.1.3 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με 5 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC.....	31
Εικόνα 2.1.4 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με 6 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC.....	31
Εικόνα 3.1.1 Εγκατάσταση συμπίεσης CO <sub>2</sub> με 6 βαθμίδες, με ενσωμάτωση ORC, με προσθήκη αντλιών νερού του υδρόψυκτου ψύκτη και του συμπυκνωτή.....	57



## 8. Βιβλιογραφία

Aspen Plus 12.0, 2022. *Aspen Plus 12.0*. [Online] Available at: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> [Accessed 23 January 2023].

Bao, J. & Zhao, L., 2013. *A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113001998> [Accessed 28 January 2023].

Braimakis, K., Roumpedakis, T. C., Leontaritis, A.-D. & Karellas, S., 2017. *Comparison of Environmentally Friendly Working Fluids for Organic Rankine Cycles*. [Online] Available at: [https://www.researchgate.net/publication/315538335\\_Comparison\\_of\\_Environmentally\\_Friendly\\_Working\\_Fluids\\_for\\_Organic\\_Rankine\\_Cycles\\_From\\_Numerical\\_to\\_Experimental\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/315538335_Comparison_of_Environmentally_Friendly_Working_Fluids_for_Organic_Rankine_Cycles_From_Numerical_to_Experimental_Techniques) [Accessed 5 October 2022].

Campana, F. et al., 2013. *ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890413004123> [Accessed 13 January 2023].

Cue'llar-Franca, R. M. & Azapagic, A., 2015. *Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982014000626> [Accessed 8 October 2022].

Eurostat, 2022. *Electricity prices for non-household consumers, first half 2022*. [Online] Available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity\\_prices\\_for\\_non-household\\_consumers,\\_first\\_half\\_2022\\_.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_non-household_consumers,_first_half_2022_.png) [Accessed 24 January 2023].

Farajollahi, H. & Hossainpour, S., 2017. *Application of organic Rankine cycle in integration of thermal power plant with post-combustion CO2 capture and compression*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216315705> [Accessed 15 October 2022].

Jarahnejad, M., 2012. *New Low GWP Synthetic Refrigerants*. [Online] Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:529641/FULLTEXT01.pdf-2> [Accessed 6 December 2022].

Karellas, S., Schuster, A. & Leontaritis, A.-D., 2012. *Influence of supercritical ORC parameters on plate heat exchanger design.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431111004935>  
[Accessed 28 January 2023].

Kurtulus, K. et al., 2018. *Thermoeconomic analysis of a CO<sub>2</sub> compression system using waste heat into the regenerative organic Rankine cycle.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418305144>  
[Accessed 17 October 2022].

Liu, X. et al., 2016. *A proposed coal-to-methanol process with CO<sub>2</sub> capture combined Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616304115>  
[Accessed 19 October 2022].

López-Paniagua, I., Rodríguez-Martín, J., Sánchez-Orgaz, S. & Roncal-Casano, J. J., 2020. *Step by Step Derivation of the Optimum Multistage Compression Ratio and an Application Case.* [Online]

Available at: <https://www.mdpi.com/1099-4300/22/6/678/htm>  
[Accessed 9 December 2022].

Madloul, N., Saidur, R., Hossain, M. & Rahim, N., 2011. *A critical review on energy use and savings in the cement industries.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111000207>  
[Accessed 13 January 2023].

Maxwell, C., 2020. *Cost Indices.* [Online]

Available at: <https://www.toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/>  
[Accessed 12 January 2023].

MingShan, W., JinLi, F., ChaoChen, M. & Syed Noman, D., 2011. *Waste heat recovery from heavy-duty diesel engine exhaust gases by medium temperature ORC system.* [Online]

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-011-4547-1>  
[Accessed 14 January 2023].

Overton, T., 2016. *Is EOR a Dead End for Carbon Capture and Storage?.* [Online]

Available at: <https://www.powermag.com/is-eor-a-dead-end-for-carbon-capture/>  
[Accessed 7 October 2022].

Pallis, P. et al., 2021. *Development, experimental testing and techno-economic assessment of a fully automated marine organic rankine cycle prototype for jacket cooling water heat recovery.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221008458>  
[Accessed 19 January 2023].

Pan, L., Wang, H. & Shi, W., 2012. *Performance analysis in near-critical conditions of organic Rankine cycle.* [Online]

Available at:

<https://www.researchgate.net/publication/257176386> Performance analysis in near-critical conditions of organic Rankine cycle

[Accessed 28 January 2023].

Pei, P., Barse, K., Nasah, J. & Gil, A., 2014. *IJGGC Waste heat recovery in CO2 compression.* [Online]

Available at:

<https://www.researchgate.net/publication/267027492> IJGGC Waste heat recovery in CO2 compression

[Accessed 8 October 2022].

Rayegan, R. & Tao, Y., 2011. *A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs).* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148110003344>

[Accessed 28 January 2023].

Usman, M. et al., 2017. *Thermo-economic comparison of air-cooled and cooling tower based Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa and R1233zde as candidate working fluids for different geographical climate conditions.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421730141X>

[Accessed 6 December 2022].

Vidal Vázquez, F., 2022. *Power-to-Methanol: Experimental and modeling work for CO2 capture and its application in combination with methanol synthesis.* [Online]

Available at: [https://www.imvt.kit.edu/english/57\\_1931.php](https://www.imvt.kit.edu/english/57_1931.php)

[Accessed 7 October 2022].

Wieland, C., Dawo, F., Schiffler, C. & Astolfi, M., 2021. *Market report on Organic Rankine Cycle Power Systems: Recent developments and outlook.* [Online]

Available at:

<https://www.researchgate.net/publication/358046863> Market report on Organic Rankine Cycle power systems recent developments and outlook

[Accessed 14 January 2023].

Xu, B. et al., 2019. *A comprehensive review of organic rankine cycle waste heat recovery systems in heavy-duty diesel engine applications.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301455>

[Accessed 14 January 2023].

Zhao, M. et al., 2017. *Performance evaluation of a diesel engine integrated with ORC system.* [Online]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116341412>  
[Accessed 14 January 2023].

Γεωργουσόπουλος, Σ., 2020. *Ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση της ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας από μονάδα IGCC βιομάζας μέσω κύκλου ORC*. [Online] Available at: <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/51067/%ce%94%ce%b9%cf%80%ce%bb%cf%89%ce%bc%ce%b1%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%ae%20%ce%95%cf%81%ce%b3%ce%b1%cf%83%ce%af%ce%b1%20-%20%ce%93%ce%b5%cf%89%cf%81%ce%b3%ce%bf%cf%85%cf%83%cf%8c%cf%80%ce%bf%cf%8>  
[Accessed 5 October 2022].

Κάπρης, Β., 2022. *Σύγκριση μεθόδων δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub>*. [Online] Available at: [https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/2600/mec\\_46144063.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/2600/mec_46144063.pdf?sequence=1&isAllowed=y)  
[Accessed 7 October 2022].

Μπέλλος, Ε., 2012. *Ενεργειακή αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας βιομηχανικών διεργασιών*. [Online] Available at: [https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6613/bellose\\_waste.pdf?sequence=3](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6613/bellose_waste.pdf?sequence=3)  
[Accessed 12 January 2023].