



---

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών*

*«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

---

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Ανάλυση κύκλου ζωής συστήματος οργανικού  
κύκλου Rankine (ORC) μικρής κλίμακας  
χαμηλών θερμοκρασιών*

### Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Κουτάντζη Ζωής

### Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής,  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

---

Αθήνα, Ιούλιος 2020



<b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b>	«Ανάλυση κύκλου ζωής συστήματος οργανικού κύκλου Rankine (ORC) μικρής κλίμακας χαμηλών θερμοκρασιών»
<b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>	Κουτάντζη Ζωή
<b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>	Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
<b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>	2019-20

## Σύνοψη

Δεδομένων των αυξανόμενων περιβαλλοντικών προβληματισμών γύρω από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας, τα αποκεντρωμένα συστήματα αποκτούν ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών, ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) αποτελεί την πιο αποδοτική μέθοδο εκμετάλλευσης πηγών θερμότητας χαμηλού ενεργειακού επιπέδου (<200 °C). Η μελέτη αυτή αποσκοπεί να αποτιμήσει ποσοτικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός τέτοιου συστήματος μικρής κλίμακας. Για την πλήρη και διεξοδική μελέτη του συστήματος, αναλύονται δύο εναλλακτικά συστήματα με βάση την πηγή θερμότητας. Το πρώτο σύστημα εκμεταλλεύεται την απορριπτόμενη θερμότητα από το ψυγείο μιας MEK πλοίου, ενώ το δεύτερο αξιοποιεί την θερμότητα που προέρχεται από ηλιακούς συλλέκτες κενού. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής, η εξοικονόμηση ενέργειας στη MEK του πλοίου από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του ORC είναι αξιόλογη, ακόμα και αποτελώντας μόνο ένα βοηθητικό σύστημα. Σχετικά με τις εκπομπές αερίων που συνεισφέρουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την καατstroφή της στιβάδας του όζοντος, τη σημαντικότερη συνεισφορά έχει το οργανικό μέσο R134a. Από την άλλη πλευρά, το ηλιακό ORC έχει πολλαπλάσιο αποτύπωμα σε όλες τις κατηγορίες σε σχέση με ένα φωτοβολταϊκό πεδίο ίσης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η βελτιστοποίηση και των δύο συστημάτων, κυρίως με την χρήση εργαζόμενου μέσου μηδενικού GWP, επιφέρει την σημαντικότερη βελτίωση στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του υπό μελέτη συστήματος.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενός Οργανικού Κύκλου Rankine εκκινούμενου από ηλιακούς συλλέκτες κενού (solar ORC) και ενός Οργανικού Κύκλου Rankine που αξιοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα του ψυγείου μιας βοηθητικής μηχανής diesel ενός πλοίου (marine ORC). Η μελέτη, η οποία πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SimaPro περιλάμβανε την κατά το δυνατόν αναλυτική καταγραφή των πρώτων υλών, των διαδικασιών επεξεργασίας αυτών, των μεταφορών, των καταναλώσεων και των διεργασιών που συνδέονται με τη διαχείριση των αποβλήτων στο τέλος ζωής του συστήματος, με σκοπό την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού σε σύγκριση με μία μηχανή εσωτερικής καύσης diesel (MEK) και Φωτοβολταϊκά Πάνελ (Φ/Β), αντίστοιχα. Η ανάλυση αυτή

πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ReCiPe 2016. Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα marine ORC υπερτερεί σε δείκτες όπως αυτός της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της εξάντλησης ορυκτών πόρων αλλά υστερεί σε άλλους, όπως στην οικοτοξικότητα των οικοσυστημάτων και την εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων. Στα βασικά συμπεράσματα της ανάλυσης προέκυψε η σημαντική αρνητική συνεισφορά της εκτεταμένης χρήσης χαλκού και άλλων μεταλλευμάτων στο συγκεκριμένο σύστημα αλλά και της σημαντικής συνεισφοράς των γεννητριών. Αναφορικά με το σύστημα solar ORC, αυτό παρουσιάζει σημαντικά ισχυρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο συγκριτικά με τα Φ/Β σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με το ψυκτικό μέσο να καταλαμβάνει τα μεγαλύτερα ποσοστά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση του όζοντος, 60% και 79% αντίστοιχα, και τους ηλιακούς συλλέκτες να συνεισφέρουν σημαντικά στις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων.

Επιπλέον, το σύστημα αξιολογήθηκε και για μια σειρά από μελέτες περιπτώσεων. Αρχικά μελετήθηκε η επίδραση στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της διάταξης που έχει η αλλαγή του ψυκτικού μέσου. Μετά την αντικατάσταση του, παρατηρήθηκε ότι το σύστημα παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε σχέση με πριν σε όλες τις κατηγορίες βλάβης. Στη συνέχεια, μελετήθηκε το σενάριο της μεταφοράς του συστήματος από τη Μεσόγειο στη Βαλτική θάλασσα, και τα αποτελέσματα έδειξαν πως η μείωση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης οδηγεί σε αυξημένη ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση σε εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου, συνεπώς και μειωμένες εκπομπές στην ατμόσφαιρα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την γενικότερη καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος. Αναφορικά με το σύστημα solar ORC, μελετήθηκε η επίδραση στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που επιφέρει η αντικατάσταση των συλλεκτών κενού με επίπεδους συλλέκτες. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, αν και οι επίπεδοι συλλέκτες συνεισφέρουν σημαντικά στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος καταλαμβάνοντας ποσοστά από 7,5% έως 64%, με μέσο όρο περίπου 50%, το νέο σύστημα παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντικά απόδοση.

**POST-GRADUATE THESIS:** « Life Cycle Analysis of a solar driven small scale Organic Rankine Cycle system»  
**STUDENT:** Koutantzi Zoi  
**SUPERVISOR:** Karellas Sotirios, Professor, School of Mechanical Engineering  
**ACADEMIC YEAR:** 2019-20

### **Abstract**

Given the growing environmental concerns surrounding conventional energy production methods, decentralized systems have received particular attention in recent years. Among the various technologies, the Organic Rankine Cycle (ORC) is the most efficient method of exploiting low energy heat sources (<200 °C). This study aims to quantify the environmental footprint of such a small-scale system. For the complete and thorough study of the system, two alternative systems based on the heat source are analyzed. The first system utilizes the heat dissipated from the refrigerator of an internal combustion ship engine, while the second utilizes the heat coming from solar vacuum collectors. According to the results of the life cycle analysis, the energy saving of the ship's engine by using the ORC system is significant, even when it constitutes an auxiliary system. Regarding the gas emissions that contribute to global warming and the depletion of the ozone layer, the most important contribution is made by the organic fluid R134a. On the other hand, the solar ORC has a multiple footprint in all categories in relation to a photovoltaic field of equal annual electricity production. The optimization of both systems, mainly with the use of a zero GWP working fluid, leads to the most significant improvement of the environmental footprint of the system under study

### **Summary**

In the present thesis, the Life Cycle Analysis of an Organic Rankine Cycle driven by Solar Vacuum Collectors (solar ORC) and an Organic Rankine Cycle that utilizes the heat dissipated from the refrigerator's auxiliary diesel engine (marine ORC) was studied. The study, which was carried out by using SimaPro software, included the most detailed recording of raw materials, their processes, transport, consumption and processes related to waste management at the end of the life of the system, aims to the assessment of the environmental impact in comparison with a diesel internal combustion engine and Photovoltaic Panels (PV), respectively. This analysis was performed by using the ReCiPe 2016 method. It was observed that the marine ORC system excels in indicators such as global warming and fossil resource scarcity but lags behind in others, such as ecosystem toxicity and mineral resource scarcity. The main conclusions of the analysis showed the significant negative contribution of the extensive use of copper and other ores in this system and the significant contribution of the generators. Regarding the solar ORC

system, it presents a significantly stronger environmental impact compared to PV in all categories of impacts, with the refrigerant occupying the largest percentages in global warming and ozone depletion, 60% and 79% respectively, and the solar panels making a significant contribution to the other impact categories.

In addition, the system was evaluated for a number of case studies. Firstly, the environmental impact for the scenario of the replacement of the working fluid was studied. After its replacement, it was observed that the system performs slightly better than before in all categories. Then, the scenario of the transfer of the system from the Mediterranean to the Baltic Sea was studied, and the results showed that the reduction of the condensing temperature leads to increased power generation and consequently to energy and fuel savings, hence reduced emissions into the atmosphere which is confirmed from the improved environmental performance of the system. Regarding the solar ORC system, the environmental impact of replacing vacuum collectors with flat collectors has been studied. According to the results, although the flat collectors contribute significantly to the environmental impact of the system by occupying percentages from 7.5% to 64%, with an average of about 50%, the new system shows better environmental performance.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού “Δ.Π.Μ.Σ στην Παραγωγή & Διαχείριση Ενέργειας” του ΕΜΠ. Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα, ο οποίος με εμπιστεύθηκε και μου την ανέθεσε, δίνοντάς μου την ευκαιρία να εργαστώ σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Τρύφωνα Ρουμπεδάκη για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση καθ’ όλη τη διάρκεια μελέτης και συγγραφής της εργασίας, καθώς και τον μεταπτυχιακό φοιτητή Γιώργο Κάλλη, για τις χρήσιμες συμβουλές του, χωρίς τις οποίες δε θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωσή της.

## Περιεχόμενα

Σύνοψη.....	iii
Περίληψη .....	iii
Abstract.....	v
Summary.....	v
Πρόλογος.....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Λίστα Εικόνων .....	x
Λίστα Πινάκων.....	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Ηλιακοί συλλέκτες.....	1
1.1.1 Επίπεδοι Συλλέκτες.....	2
1.1.2 Συλλέκτες κενού.....	3
1.1.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου .....	5
1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine.....	5
1.3 Ηλιακά υποβοηθούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine.....	8
1.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής.....	11
1.5 Βάσεις δεδομένων και λογισμικά .....	16
1.6 Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016.....	17
1.6.1 Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “midpoint” .....	18
1.6.2 Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “endpoint” (Εκτίμηση βλαβών).....	20
1.6.3 Προοπτικές .....	20
1.7 Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Οργανικό Κύκλο Rankine .....	21
1.8 Επιστημονικό ερώτημα .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	27
2.1 Ηλιακοί συλλέκτες κενού.....	27
2.2 Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.....	28
2.3 Ελικοειδής Εκτονωτής.....	29
2.4 Αντλία διαφράγματος .....	29
2.5 Ατμοποιητής.....	31
2.6 Συμπυκνωτής.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	34
3.1 Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης .....	34
3.1.1 Στόχος της μελέτης .....	34
3.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα.....	35



3.2.1	Απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων .....	35
3.2.2	Περιορισμοί της μελέτης και υποθέσεις – προσεγγίσεις .....	35
3.2.3	Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή .....	37
3.2.4	Μεταφορά .....	38
3.2.5	Τέλος Ζωής.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	Αποτελέσματα .....	41
4.1	Αποτελέσματα για το υπό εξέταση σύστημα .....	41
4.2	Μελέτη Σεναρίων.....	50
4.2.1	Επίδραση του ψυκτικού μέσου στο marine ORC .....	50
4.2.2	Επίδραση του ψυκτικού μέσου και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο marine ORC .....	54
4.2.3	Επίδραση ηλιακών συλλεκτών στο ηλιακά εκκινούμενο ORC .....	56
4.2.4	Επίδραση της αντικατάστασης των συλλεκτών στο ηλιακά εκκινούμενο ORC	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	64
5.1	Συμπεράσματα .....	64
5.2	Προτάσεις.....	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	.....	67

## Λίστα Εικόνων

Εικ. 1.1. Απεικονίσεις συγκεντρωτικών συλλεκτών [4] .....	2
<b>Εικ. 1.2.</b> Σωλήνας κενού άμεσης ροής. α. ομοαξονικός β. τύπου “U” .....	4
<b>Εικ. 1.3.</b> Σχηματική αναπαράσταση Οργανικού Κύκλου Rankine [15] .....	6
<b>Εικ. 1.4.</b> Διάγραμμα T-s για (α) υγρό, (β) ισεντροπικό and (γ) ξηρό εργαζόμενο μέσο {Velez, 2014 #20} .....	7
<b>Εικ. 1.5.</b> Σχηματική απεικόνιση προτεινόμενου ORC με χρήση υπερκρίσιμου CO <sub>2</sub> . [17]....	9
<b>Εικ. 1.6.</b> Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. [28].....	11
<b>Εικ. 1.7.</b> Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [25].....	12
<b>Εικ. 1.8.</b> Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας. [34] .....	18
<b>Εικ. 2.1.</b> Ηλιακοί συλλέκτες στην οροφή του εργαστηρίου .....	28
<b>Εικ. 2.2.</b> Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας.....	28
<b>Εικ. 2.3.</b> Απεικόνιση σπειροειδούς συμπιεστή .....	29
<b>Εικ. 2.4.</b> Σχηματικό διάγραμμα αντλίας κυκλοφορίας οργανικού ρευστού.....	30
<b>Εικ. 2.5.</b> Εγκατεστημένη αντλία στην εργαστηριακή διάταξη .....	31
<b>Εικ. 2.6.</b> Σχηματική αναπαράσταση πλακοειδούς εναλλάκτη .....	32
<b>Εικ. 2.7.</b> Ατμοποιητής στο κύκλωμα ORC της εγκατάστασης .....	32
<b>Εικ. 4.1.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε επίπεδο “midpoint” .....	41
<b>Εικ. 4.2.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε επίπεδο “endpoint” .....	42
<b>Εικ. 4.3.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine και της επίδρασης του καυσίμου σε επίπεδο “midpoint” .....	44
<b>Εικ. 4.4.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε αναφορά με μια MEK diesel σε επίπεδο “midpoint” .....	45
<b>Εικ. 4.5.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε αναφορά με μια MEK diesel σε επίπεδο “endpoint” .....	46
<b>Εικ. 4.6.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “midpoint” .....	47
<b>Εικ. 4.7.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “endpoint” .....	47
<b>Εικ. 4.8.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine αναφορικά με Φ/B σε επίπεδο “midpoint” .....	48
<b>Εικ. 4.9.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine αναφορικά με Φ/B σε επίπεδο “endpoint” .....	49
<b>Εικ. 4.10.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “midpoint” .....	51
<b>Εικ. 4.11.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “endpoint” .....	52
<b>Εικ. 4.12.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “midpoint” .....	53

<b>Εικ. 4.13.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “endpoint” .....	54
<b>Εικ. 4.14.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze στην Βαλτική σε επίπεδο “midpoint” .....	55
<b>Εικ. 4.15.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze στην Βαλτική σε επίπεδο “endpoint” .....	56
<b>Εικ. 4.16.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με συλλέκτες κενού σε επίπεδο “midpoint” .....	57
<b>Εικ. 4.17.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με συλλέκτες κενού σε επίπεδο “endpoint” .....	58
<b>Εικ. 4.18.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “midpoint” .....	59
<b>Εικ. 4.19.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “endpoint” .....	60
<b>Εικ. 4.20.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “midpoint” .....	60
<b>Εικ. 4.21.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “endpoint” .....	61
<b>Εικ. 4.22.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “midpoint” .....	62
<b>Εικ. 4.23.</b> Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “endpoint” .....	63

## **Λίστα Πινάκων**

Πιν. 2.1. Χαρακτηριστικά δεξαμενής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.....	29
<b>Πιν. 2.2.</b> Χαρακτηριστικά αντλίας κυκλοφορίας οργανικού ρευστού. ....	30
<b>Πιν. 2.3.</b> Χαρακτηριστικά ατμοποιητή της εγκατάστασης .....	32
<b>Πιν. 2.4.</b> Χαρακτηριστικά συμπυκνωτή της εγκατάστασης .....	33
<b>Πιν. 4.1.</b> Ενδεικτικά περιεχόμενα του σετ δεδομένων “Photovoltaic panel, multi-Si wafer {Liu, #16}  production   Cut-off, U” .....	50

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$A_{col}$	Επιφάνεια συλλεκτών /φ/β	$m^2$
<u>Ελληνικά Σύμβολα</u>		
$\eta$	Βαθμός απόδοσης	-
<u>Δείκτες</u>		
$tot$	Συνολικό	
<u>Ακρωνύμια</u>		
$\Phi/B$	Φωτοβολταϊκά	
ETC	Συλλέκτες κενού (Evacuated Tube Collectors)	
FPC	Επίπεδοι συλλέκτες (Flat Plate Collectors)	
ORC	Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle)	

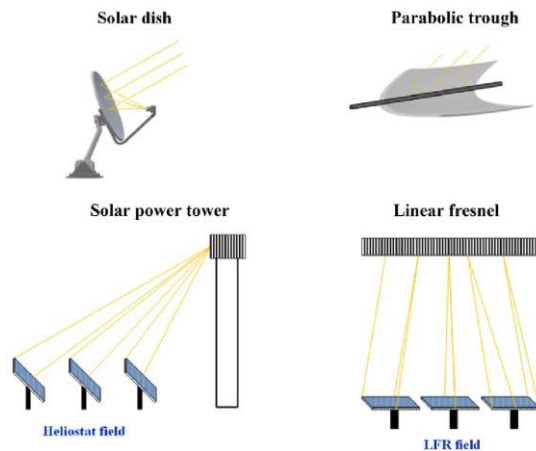
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ηλιακοί συλλέκτες

Η ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως αυξάνεται γρήγορα λόγω της απότομης αύξησης του πληθυσμού και της προόδου των τεχνολογικών εξελίξεων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να υπάρξει μία αξιόπιστη, οικονομικά αποδοτική και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για την ικανοποίηση της μελλοντικής ζήτησης ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια, μεταξύ άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελεί μια πηγή ενέργειας με μεγάλη διαθεσιμότητα για την αντιμετώπιση μακροπρόθεσμων προβλημάτων της ενεργειακής κρίσης [1].

Προκειμένου να αξιοποιηθεί η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο, μία μέθοδος είναι η χρήση ηλιακών συλλεκτών, δηλαδή συσκευών οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική ενέργεια, μεταφέροντας την σε μια συσκευή αποθήκευσης για μεταγενέστερη χρήση. Το σύστημα των ηλιακών συλλεκτών μπορεί να χαρακτηριστεί από φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία και χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή ζεστού νερού ή ζεστού νερού χρήσης, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς. Το όριο της ενεργειακής απόδοσης ενός ηλιακού συλλέκτη αντιπροσωπεύεται από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να εισχωρήσει και να απορροφηθεί [2].

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους μη συγκεντρωτικούς και τους συγκεντρωτικούς. Ένας μη συγκεντρωτικός συλλέκτης χρησιμοποιεί την ίδια επιφάνεια για την παρακολούθηση και για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ ένας συγκεντρωτικός συλλέκτης χρησιμοποιεί τις κοίλες ανακλαστικές επιφάνειες που διαθέτει συγκεντρώνοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, σε μία μικρότερη περιοχή (δέκτης), αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση ενέργειας ανά επιφάνεια [3].



**Εικ. 1.1.** Απεικονίσεις συγκεντρωτικών συλλεκτών [4]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιοι από τους πιο βασικούς τύπους ηλιακών συλλεκτών.

### 1.1.1 Επίπεδοι Συλλέκτες

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (flat plate collector) είναι ο συνηθέστερος τύπος ηλιακού συλλέκτη κατάλληλος για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 30 έως 80 °C. Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι μια επιλογή χαμηλού κόστους και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές που απαιτούν θερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασίας, όπως θέρμανση χώρων και θερμική τροφοδοσία βιομηχανικών διεργασιών [5].

Τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι τα ακόλουθα [3]:

- Διαφανές κάλυμμα. Ένα ή περισσότερα φύλλα από ύαλο ή άλλο υλικό που μεταδίδει ακτινοβολία.
- Σωλήνες, πτερύγια ή διάκενα. Για να κατευθυνθεί το ρευστό μεταφοράς θερμότητας από την είσοδο στην έξοδο.
- Απορροφητικές πλάκες. Επίπεδες, κυματοειδείς ή αυλακωτές πλάκες, στις οποίες συνδέονται οι σωλήνες, τα πτερύγια ή τα περάσματα.
- Κεφαλίδες ή συλλέκτες. Για την παραλαβή και την εκκένωση του ρευστού και την ελαχιστοποίηση της απώλειας θερμότητας.
- Κέλυφος. Για να περιβληθούν τα παραπάνω εξαρτήματα και να παραμείνουν απαλλαγμένα από σκόνη, υγρασία.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι βελτίωσης της θερμικής απόδοσης των ηλιακών επίπεδων συλλεκτών. Για παράδειγμα, βελτίωση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την αύξηση της απορροφητικότητας της ακτινοβολίας και τη βελτίωση της διαφάνειας της γυάλινης επιφάνειας. Η θερμική απόδοση αυξάνεται επίσης με την μείωση των θερμικών

απωλειών στο περιβάλλον και τη χρήση συστημάτων αντανάκλασης προς βελτίωση της διαθέσιμης ενέργειας [6].

### 1.1.2 Συλλέκτες κενού

Ένας συλλέκτης κενού αποτελείται από απορροφητικό χάλκινο σωλήνα τοποθετημένο έκκεντρα μέσα σε ένα διαφανές γυάλινο κάλυμμα που έχει ένα ανακλαστικό φιλμ ένθεσης στην εσωτερική του επιφάνεια και κενό σε εκκεντρικό δακτυλιοειδή χώρο [7].

Το περίβλημα κενού περιορίζει τα φαινόμενα μεταφοράς και αγωγιμότητας, έτσι ώστε οι συλλέκτες κενού να μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερη θερμοκρασία από τους επίπεδους συλλέκτες. Όπως και οι επίπεδοι συλλέκτες, οι συλλέκτες κενού συλλέγουν τόσο άμεση όσο και διάχυτη ακτινοβολία. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους είναι υψηλότερη σε μικρότερες γωνίες [3].

Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες εξόδου με σχετικά υψηλή θερμική απόδοση και χωρίς άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, η ακατάλληλη επιλογή του αριθμού των συλλεκτών και της ρύθμισής τους μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση του αποτυπώματος και του κόστους κεφαλαίου που προκύπτει από τις διαδικασίες κατασκευής και εγκατάστασης [8].

Το αρχικό τους κόστος εξακολουθεί να είναι απαγορευτικό, μολονότι μειώνεται σταδιακά, ενώ το κόστος συντήρησής τους είναι λογικό, αλλά είναι ιδιαίτερα εύθραυστοι λόγω της γυάλινης σωλήνωσης. Ο σχηματισμός χιονιού πάνω από τον συλλέκτη αποτελεί συνεχή κίνδυνο σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [7].

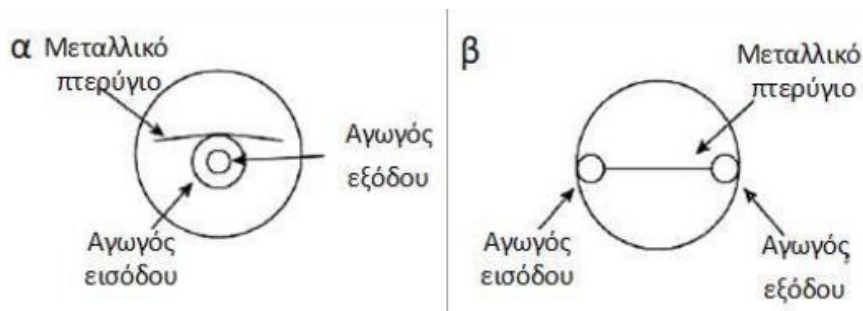
Ανάλογα με τη μέθοδο απαγωγής της θερμότητας από τον απορροφητή οι ηλιακοί συλλέκτες κενού διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Συλλέκτες άμεσης ροής (direct - flow)
- Συλλέκτες θερμικού σωλήνα (heat - pipe)

#### ***I. Συλλέκτες άμεσης ροής***

Το ψυκτικό μέσο ρέει εντός των σωλήνων κενού στους συλλέκτες άμεσης ροής, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε μονού και διπλού τοιχώματος. Ειδικότερα, το ρευστό ρέει εντός των χάλκινων σωλήνων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του σωλήνα κενού. Η πορεία ροής που ακολουθεί το εργαζόμενο μέσο μπορεί να είναι είτε ομοαξονική, είτε ακολουθώντας μία διαδρομή σχήματος “U”, είτε με άλλο τρόπο ανάλογα με το σχήμα αυτών των σωλήνων, (Εικ. 1.2). Όταν πραγματοποιείται χρήση σωλήνα διπλού τοιχώματος, τότε, το ψυκτικό μέσο μπορεί να ρέει ελεύθερο εντός αυτού χάρη του φαινομένου του θερμοσιφωνισμού. Σε όλες τις περιπτώσεις ωστόσο, η είσοδος και η έξοδος του εργαζόμενου ρευστού γίνονται από την ίδια άκρη του σωλήνα κενού.





Εικ. 1.2. Σωλήνας κενού άμεσης ροής. α. ομοαξονικός β. τύπου “U”

## II. Συλλέκτες θερμικού σωλήνα

Πρόκειται για συλλέκτες οι οποίοι συνήθως είναι αποτελούμενοι από σωλήνες κενού διπλού τοιχώματος, έχοντας στο εσωτερικό του σωλήνα τοποθετημένα ένα έλασμα αλουμινίου με κυκλικό σχήμα και ένα χάλκινο αγωγό (θερμικός σωλήνας). Ο αγωγός αυτός παραμένει κλειστός στο ένα άκρο του, ενώ το άλλο άκρο του είναι συνδεδεμένο με έναν επίσης κλειστό μεταλλικό αγωγό (συμπυκνωτής). Το έλασμα αλουμινίου εφάπτεται τόσο με τον εσωτερικό υάλινο σωλήνα όσο και με το θερμικό σωλήνα, με αποτέλεσμα μέσω της επιφάνειάς του να πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας με αγωγή από τον πρώτο στον δεύτερο.

Στο εσωτερικό του θερμικού σωλήνα όπου επικρατούν συνθήκες κενού υπάρχει μία μικρή ποσότητα ρευστού για παράδειγμα νερό ή μεθανόλη [9, 10]. Ο λόγος ύπαρξης του κενού είναι η μείωση του σημείου βρασμού του ρευστού με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται εύκολα η μετάβαση από την υγρή στην αέρια φάση. Καθώς ρευστό απορροφά θερμότητα, αεριοποιείται και ο ατμός ανεβαίνει ψηλά φθάνοντας στον συμπυκνωτή. Εκεί, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας από τον ατμό εντός του θερμικού σωλήνα στο εργαζόμενο μέσο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή ο συμπυκνωτής. Αφού ο ατμός αποδώσει τη θερμότητά του, συμπυκνώνεται και επιστρέφει λόγω βαρύτητας στο κατώτερο μέρος του χάλκινου σωλήνα πριν ξεκινήσει ξανά ο κύκλος.

Σε ότι αφορά τη σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών βασικών κατηγοριών, οι συλλέκτες άμεσης ροής παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τους συλλέκτες θερμικών σωλήνων. Οι συλλέκτες άμεσης ροής έχουν χαμηλότερο κόστος αλλά και μικρότερο μέγεθος. Ένα ακόμη αξιοσημείωτο πλεονέκτημα τους είναι η ευελιξία όσον αφορά την τοποθέτησή τους αφού δύναται να τοποθετηθούν τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα [9]. Αντίθετως οι συλλέκτες θερμικών σωλήνων είναι υποχρεωτικό να τοποθετούνται με μία κλίση τουλάχιστον 25°, έτσι ώστε να μπορεί το ρευστό εντός του θερμικού σωλήνα να επιστρέφει στο κάτω μέρος αυτού.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των συλλεκτών θερμικών σωλήνων είναι ότι δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις για συντήρηση και ότι απουσιάζει ο κίνδυνος σχηματισμού πάγου.

Επίσης, είναι δυνατή η αντικατάσταση ενός σωλήνα, χωρίς να απαιτείται η εκκένωση όλου του συστήματος, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των συλλεκτών άμεσης ροής.

### 1.1.3 Συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου

Ένας ακόμα βασικός τύπος ηλιακού συλλέκτη είναι ο συλλέκτης παραβολικού κατόπτρου ο οποίος θεωρείται τεχνολογικά ώριμος και περισσότερο πρακτικός. Είναι ένας συλλέκτης παρακολούθησης ενός άξονα και αποτελείται από ανακλαστικό κάτοπτρο σε παραβολικό σχήμα με κάλυμμα και δέκτη με δυνατότητα αύξησης της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου μεταξύ 60 και 400 ° C [11].

Στον συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου, ένας καθρέφτης ή ένας ανακλαστήρας με παραβολικό σχήμα συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία στην γραμμή εστίασης, όπου τοποθετείται ένας σωληνοειδής δέκτης που περιέχει ένα ρευστό για τη παραγωγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας. Οι δέκτες επί των επιφανειακών απορροφητικών παραβολικών ηλιακών συλλεκτών συνήθως αποτελούνται από μεταλλικό απορροφητήρα με επίστρωση (π.χ. επίστρωση μαύρου χρωμίου) και εξωτερικό περίβλημα από γυαλί και ο δακτύλιος μεταξύ τους εκκενώνεται για να καταστείλει την απώλεια θερμότητας. Μια επιθυμητή επιφάνεια απορροφητή θα πρέπει να έχει υψηλή απορροφητικότητα ως προς το ηλιακό φάσμα αλλά χαμηλή εκπομπή ως προς το φάσμα των μέσων υπέρυθρων για την ελαχιστοποίηση της απώλειας ακτινοβολίας.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του συλλέκτη παραβολικού κατόπτρου είναι η αστάθεια της επιλεκτικής επίστρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες [12].

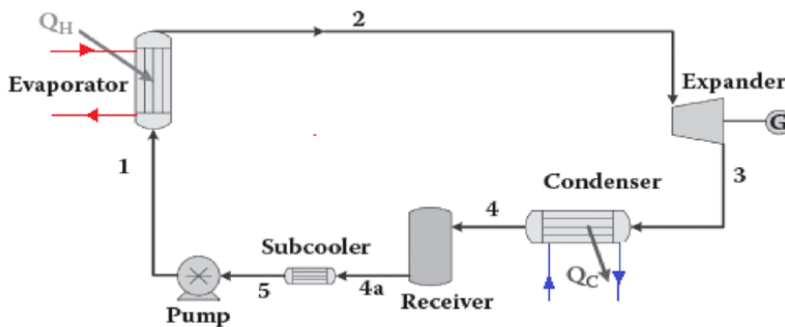
Ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη αποτελεί την κυρίαρχη τεχνολογία μεταξύ ηλιακών συλλεκτών μέσης θερμοκρασίας, τόσο εμπορικά όσο και βιομηχανικά. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτών των συλλεκτών είναι: υψηλή πυκνότητα ισχύος, μεγάλο βαθμό απόδοσης και ευελιξία. Ως εκ τούτου, είναι η τεχνολογία με τη μεγαλύτερη τεχνολογική και εμπορική σημασία η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες, για εφαρμογές διεργασιών και μονάδες παραγωγής ενέργειας. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν αρκετοί εμπορικοί συλλέκτες για ηλιοθερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

## 1.2 Οργανικός Κύκλος Rankine

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) είναι μια τροποποίηση του συμβατικού κύκλου Rankine, με κύρια διαφορά το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιείται. Αρχικά, υπάρχει ένα ρευστό, όπως ένα διαθερμικό έλαιο ή πεπιεσμένο νερό, μεταξύ της πηγής και του συστήματος ORC [13]. Αυτός ο κύκλος εκμεταλλεύεται πηγές θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών, όπως απορριπτόμενη θερμότητα βιομηχανιών, βιομάζα, την ηλιακή

ακτινοβολία και τη γεωθερμική ενέργεια, προκειμένου να μετατραπούν σε υψηλής ποιότητας ενέργεια, κυρίως ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας το οργανικό υγρό ως εργαζόμενο μέσο. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου και στις υψηλές πιέσεις λειτουργίας.

Η εφαρμογή ενός τυπικού ORC περιλαμβάνει τέσσερα βασικά βήματα: Το ψυκτικό θερμαίνεται από την πηγή θερμότητας και στη συνέχεια εκτονώνεται για να παράξει έργο. Εν συνεχεία συμπυκνώνεται και συμπιέζεται μέσω μίας αντλίας πριν ξεκινήσει ο κύκλος όπως απεικονίζεται στην Εικ. 1.3. Σήμερα, τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε αποκεντρωμένες μονάδες. Με θερμοκρασίες πηγής θερμότητας από 90 έως 400 °C, τα τυπικά εμπορικά διαθέσιμα εύρη ισχύος κυμαίνονται από λίγα kW έως 70 MW [14].



Εικ. 1.3. Σχηματική αναπαράσταση Οργανικού Κύκλου Rankine [15]

Ο οργανικός κύκλος Rankine έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τον συμβατικό κύκλο Rankine, με αποτέλεσμα την εκτεταμένη διερεύνηση και εφαρμογή του. Πρώτα απ' όλα, λόγω του χαμηλού σημείου ζέσης και της χαμηλής θερμοκρασίας ατμοποίησης των ψυκτικών μέσων που χρησιμοποιούνται, ο ORC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρήση πηγών θερμότητας μέσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, πολλά οργανικά ρευστά που ονομάζονται ξηρά, έχουν θετική κλίση της καμπύλης κορεσμού στο διάγραμμα T-s. Ως εκ τούτου, το οργανικό μέσο μετά την εκτόνωσή του βρίσκεται στην περιοχή υπέρθερμου ατμού καθώς και ο σχηματισμός σταγονιδίων είναι αμελητέος οδηγώντας έτσι στην ασφαλή λειτουργία του εκτονωτή. Επιπλέον, λόγω των χαμηλών λόγων εκτόνωσης σε οργανικούς κύκλους Rankine, μια μεγάλη ποικιλία εκτονωτών μπορεί να εγκατασταθεί σε εφαρμογές μικρής και πολύ μικρής κλίμακας, όπως οι ελικοειδείς (scroll) και οι κοχλιωτοί (screw).

### 1.2.1. Επιλογή του εργαζόμενου μέσου

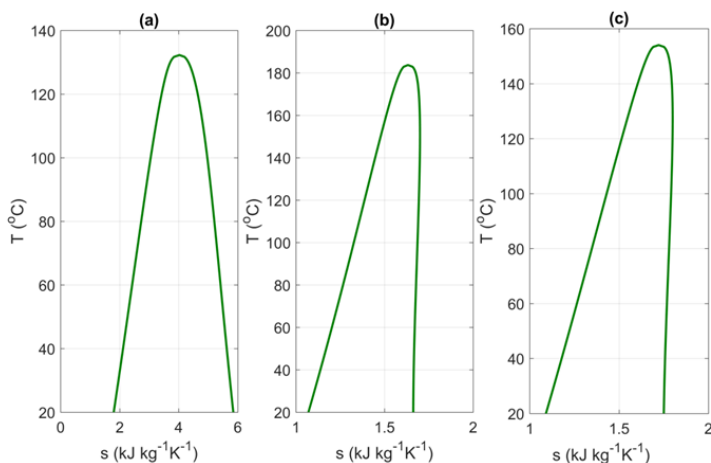
Μία από τις πιο σημαντικές πτυχές του οργανικού κύκλου Rankine είναι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου, καθώς επηρεάζει όχι μόνο την απόδοση του συστήματος, αλλά και

το εύρος λειτουργίας του σε ότι αφορά την πίεση αλλά και την θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, ένας από τους κύριους παράγοντες που σχετίζονται με την επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι η διαθέσιμη πηγή θερμότητας, η οποία καθορίζει κυρίως τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στις οποίες θα λειτουργεί ο κύκλος.

Τα εργαζόμενα μέσα κατατάσσονται συνήθως σύμφωνα με την καμπύλη κορεσμού του διαγράμματος T-s. Εκείνα που εμφανίζουν καμπύλη με θετική κλίση αναφέρονται ως ξηρά, όσα εμφανίζουν μια σχεδόν κάθετη καμπύλη ονομάζονται ισεντροπικά και τέλος τα εργαζόμενα μέσα με καμπύλη με αρνητική κλίση περιγράφονται ως υγρά. Το νερό ανήκει στην τελευταία κατηγορία, η οποία περιλαμβάνει κυρίως εργαζόμενα μέσα χαμηλής μοριακής μάζας [16].

Τα υγρά εργαζόμενα μέσα που λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις χωρίς να υπερθερμανθούν, οδηγούν σε αύξηση του ποσοστού της υγρής κατάστασης στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου. Όταν το μείγμα περιέχει μεγάλο ποσοστό υγρού, τα πτερύγια κινδυνεύουν πολύ από τη διάβρωση και τη μηχανική φθορά. Ως εκ τούτου, η χρήση υγρού εργαζόμενου μέσου δεν συνιστάται χωρίς υπερθέρμανση [17].

Ένα τυπικό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ( T-s) που περιλαμβάνει και τους τρεις τύπους εργαζόμενων μέσων που αναφέρθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω. (Εικ. 1.4).



Εικ. 1.4. Διάγραμμα T-s για (α) υγρό, (β) ισεντροπικό and (γ) ξηρό εργαζόμενο μέσο [1]

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μια σημαντική διαδικασία που καθορίζει τη συνολική απόδοση του κύκλου και το εύρος λειτουργίας του, ορίζοντας έτσι την ικανότητα χρήσης του ενεργειακού περιεχομένου της διαθέσιμης πηγής θερμότητας. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του εργαζόμενου μέσου που χρησιμοποιείται. Η εξάντληση της ατμοσφαιρικής στιβάδας όζοντος και η συμβολή του ψυκτικού μέσου στην υπερθέρμανση του πλανήτη αποτελούν τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Δύο δείκτες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη συμβολή του εργαζόμενου μέσου

**Comment [em1]:** Αναφορά : Velez, F., *Selecting working fluids in an organic Rankine cycle for power generation from low temperature heat sources*. Vol. 81. 2014. 173-180.

σε αυτά τα αρνητικά περιβαλλοντικά φαινόμενα: το δυναμικό καταστροφής του όζοντος (ozone depletion potential «ODP») και το δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (global warming potential «GWP»), αντίστοιχα. Επιπλέον, μια ακόμη κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ασφάλεια των εργαζόμενων μέσων. Η τοξικότητα, η διαβρωτικότητα και η ευφλεκτότητα των ψυκτικών μέσων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερες, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφάλεια των ανθρώπων και του εξοπλισμού σε περίπτωση διαρροής και να αποφευχθεί η πιθανότητα έκρηξης σε ένα ατύχημα.

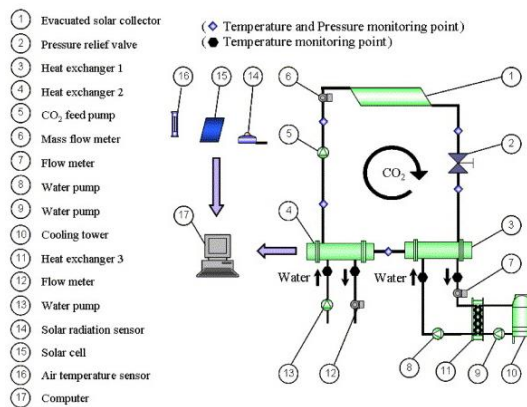
Μια άλλη παράμετρος που καθορίζει την επιλογή των υγρών εργαζόμενων μέσων είναι η διαθεσιμότητα και το κόστος για κάθε εφαρμογή. Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές διεργασίες χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος λόγω της μαζικής παραγωγής τους οδηγώντας έτσι στην εύκολη απόκτηση τους. Εργαζόμενα μέσα που είναι δαπανηρά μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης του κύκλου καθώς και σε πρακτικά προβλήματα εάν η αντικατάστασή τους είναι κρίσιμη, αλλά η διαθεσιμότητά τους είναι περιορισμένη.

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου καθορίζει και τον τύπο της εκτονωτικής μηχανής που είναι πιο κατάλληλος για την εφαρμογή λόγω του ότι ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, ένα εργαζόμενο μέσο μπορεί να μην είναι κατάλληλο για έναν συγκεκριμένο εκτονωτή. Οι μηχανές εκτόνωσης που είναι ευρέως εγκατεστημένες σε κύκλους ORCs είναι αξονικές και ακτινικές στροβιλομηχανές και κοχλιωτούς εκτονωτές (εκτονωτές θετικής εκτόπισης) [14].

### 1.3 Ηλιακά υποβοηθούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine

Η σύζευξη του ORC με ηλιακούς μη συγκεντρωτικούς συλλέκτες δεν έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, καθώς οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται από τους συλλέκτες έχουν σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες αποδόσεις του ORC και έτσι αποθαρρύνουν την εμπορική ανάπτυξη της σύζευξης σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι Yamaguchi et al. (2006) πρότειναν έναν υπερκρίσιμο κύκλο Rankine CO<sub>2</sub> τροφοδοτούμενο από ηλιακή ενέργεια για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες κενού, στροβίλους παραγωγής ενέργειας, σύστημα ανάκτησης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας, σύστημα ανάκτησης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας και αντλία τροφοδοσίας. Πέραν της παραγωγής ηλεκτρισμού μέσω του συμβατικού κύκλου Rankine με CO<sub>2</sub>, το σύστημα ανακτά θερμότητα (θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας και θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας), που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ψύξη, κλιματισμό, παροχή ζεστού νερού σε οικιακά ή εμπορικά κτίρια. Ένα πειραματικό πρωτότυπο έχει σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί υπό τις τυπικές συνθήκες του καλοκαιριού στο Κιότο της Ιαπωνίας. Ο εκτιμώμενος βαθμός απόδοσης είναι 0,25 και η απόδοση ανάκτησης θερμότητας είναι 0,65 [18].



**Εικ. 1.5.** Σχηματική απεικόνιση προτεινόμενου ORC με χρήση υπερκρίσιμου CO<sub>2</sub>. [17]

Οι Al-Sulaiman et al. [19] πραγματοποίησαν μια εξεργειακή μελέτη ενός υβριδικού συστήματος τροφοδοτούμενο με ηλιακή ενέργεια με τη βοήθεια ενσωμάτωσης παραβολικών ηλιακών συλλεκτών, ενός ORC και ενός ψύκτη απορρόφησης. Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε για τέσσερα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας: παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαραγωγή με θέρμανση, συμπαραγωγή με ψύξη και τριπαραγωγή. Εξετάστηκαν τρεις στρατηγικές λειτουργίας στη χρήση της ηλιακής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας και της ταυτόχρονης χρήσης ηλιακής ενέργειας και αποθήκευσης. Οι επιδράσεις της ελάχιστης θερμοκρασιακής διαφοράς του ατμοποιητή του ORC, της θερμοκρασίας της αντλίας και της θερμοκρασίας εισόδου του στροβίλου του ORC στην εξεργειακή απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις. Για το σενάριο παραγωγής αποκλειστικά ηλεκτρικής ενέργειας, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης της απευθείας χρήσης ηλιακής ενέργειας ήταν 7%. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης των άλλων δύο σεναρίων ήταν 3,5% (χρήση και αποθήκευση) και 3% (αποθήκευση).

Οι Al-Alī και Dincer [20] πραγματοποίησαν μια ενεργειακή και εξεργειακή μελέτη ενός βιομηχανικού συστήματος πολυπαραγωγής με βάση τη συνδυασμένη χρήση ηλιακής και γεωθερμικής ενέργειας. Το σύστημα καλύπτει πλήθος απαιτούμενων φορτίων, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας, της ψύξης, της θέρμανσης χώρου, του ζεστού νερού χρήσης και της παραγωγής θερμότητας για βιομηχανικές διεργασίες. Η μονάδα ORC που χρησιμοποιήθηκε, τροφοδοτούνταν από γεωθερμική και ηλιακή ενέργεια, ενώ ένας μονοβάθμιος ψύκτης απορρόφησης LiBr-H<sub>2</sub>O χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ψύξης. Σε κατάσταση λειτουργίας πολυ-παραγωγής, το σύστημα κατέγραψε βαθμό απόδοσης συμπαραγωγής 78%, σε σύγκριση με το 16,4%, που ήταν ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως προς την εξεργειακή ανάλυση, ο βαθμός απόδοσης ήταν ίσος με 36,6% για πολυπαραγωγή, σε σύγκριση με 26,2% για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, οι συγγραφείς αναγνώρισαν τους ηλιακούς συλλέκτες ως την πιο σημαντική πηγή εξεργειακών απωλειών.

Οι Calise et al. [21] διεξήγαγαν μια δυναμική προσομοίωση και μια οικονομική αξιολόγηση ενός ηλιακού-γεωθερμικού συστήματος τριπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρισμού, την αφαλάτωση νερού, και τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω δικτύου τηλεθέρμανσης. Το σύστημα αποτελούνταν από έναν ORC τροφοδοτούμενο με γεωθερμική και ηλιακή ενέργεια, ενώ η ψύξη παραγόταν από έναν ψύκτη απορρόφησης. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα κύρια πλεονεκτήματα του προτεινόμενου συστήματος ήταν η υψηλή ευελιξία και η αποδοτικότητά του. Από την άλλη πλευρά, τόνισαν ότι το σύστημα αυτό παρουσιάζει υψηλό κόστος κεφαλαίου.

Οι Eisavi et al. [22] επικεντρώθηκαν σε ένα ηλιακώς τροφοδοτούμενο σύστημα που αποτελείται από ένα ORC σε συνδυασμό με έναν διβάθμιο ψύκτη απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου-νερού. Οι συγγραφείς συνέκριναν την απόδοση του συστήματος με ένα παρόμοιο σύστημα που περιλάμβανε έναν μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκε ότι για την ίδια ποσότητα προσδιδόμενης θερμότητας, το σύστημα με το διβάθμιο ψύκτη απορρόφησης παρουσίασε αυξημένη ψυκτική ικανότητα κατά 48,5% σε σύγκριση με το σύστημα του μονοβάθμιου ψύκτη απορρόφησης. Επιπλέον, η ωφέλιμη θερμότητα ήταν 20,5% υψηλότερη. Ωστόσο, η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε κατά 27%. Τέλος, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η πρωταρχική πηγή καταστροφής της εξέργειας ήταν οι ηλιακοί συλλέκτες.

Οι Cioccolanti et al. [23] αξιολόγησαν ένα οικιακό ηλιακό τροφοδοτούμενο σύστημα αναπτύσσοντας ένα αριθμητικό μοντέλο. Το σύστημα που ερεύνησαν αποτελούνταν από σύνθετους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, μια μονάδα ORC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έναν ψύκτη απορρόφησης για την παραγωγή ψύξης. Οι συγγραφείς διεξήγαγαν δυναμικές και ημι-δυναμικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε ετήσια, μηνιαία και καθημερινή βάση. Υπολόγισαν ότι η λειτουργική ικανότητα του συστήματος ξεπερνά τις 2.500 ώρες το χρόνο. Παρά τη σχετικά μειωμένη απόδοση των συλλεκτών (λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τους), ο ORC είχε καλή απόδοση το χειμώνα. Από την άλλη πλευρά, η απόδοση του ORC μειώθηκε κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού λόγω της λειτουργίας του ψύκτη απορρόφησης.

Οι Yang et al. [24] διερεύνησαν τη λειτουργία ενός συστήματος ORC με συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου για διάφορα εργαζόμενα μέσα προς μεγιστοποίηση της απόδοσης του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι η προτεινόμενη λύση βελτίωσε την απόδοση του συστήματος κατά 4%, με αποτέλεσμα μέγιστη θερμική απόδοση 17,9% για θερμοκρασία λειτουργίας 375 °C χρησιμοποιώντας τολουόλιο ως εργαζόμενο μέσο.

## 1.4 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) (Life Cycle Analysis, LCA) αποτελεί μία συστηματική και αναλυτική μέθοδο η οποία στοχεύει στην αναγνώριση, εκτίμηση και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που είναι συνδεδεμένες με τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ως προϊόν μπορεί να οριστεί οποιοδήποτε υλικό ή άυλο αγαθό ή υπηρεσία [25]. Συνεπώς, αναπόσπαστα τμήματα της ανάλυσης που αναφέρθηκε αποτελούν όλες οι διαδικασίες που συνδέονται με την παραγωγή του προϊόντος, από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών μέχρι την παραγωγή, τη μεταφορά, τη χρήση, την επεξεργασία του μετά το τέλος της ζωής του και την τελική απόθεση των αποβλήτων.

Η SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) έχει δώσει έναν ορισμό για την ΑΚΖ, σύμφωνα με τον οποίο πρόκειται για «μία τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων οι οποίες είναι συνδεδεμένες με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα, προσδιορίζει και ποσοτικοποιεί την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, αλλά και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Η ΑΚΖ εκτιμά τις συνέπειες από την χρήση της ενέργειας και των υλικών αλλά και των αποβλήτων, αναγνωρίζει και εκτιμά τις δυνατότητες για περιβαλλοντικές βελτιώσεις»[26].

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι το πιο σημαντικό εργαλείο με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να εκτιμηθεί η βιωσιμότητα μίας διεργασίας ή η παραγωγής ενός προϊόντος, ενώ παράλληλα καλύπτει μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως βιομηχανικές εφαρμογές, ενεργειακά συστήματα, συστήματα μεταφοράς κλπ. [27].



**Εικ. 1.6.** Σχηματική απεικόνιση της μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. [28]

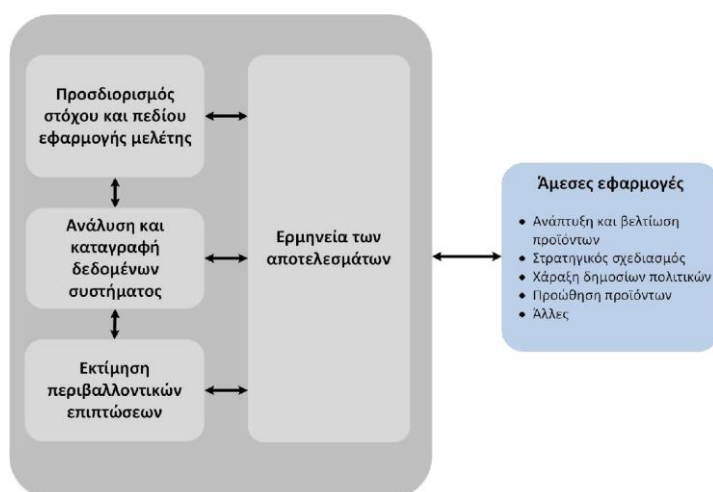


### 1.4.1 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) εισήγαγε μία τυποποιημένη διαδικασία για τη διεξαγωγή αναλύσεων κύκλου ζωής με σκοπό να αποφευχθούν οι όποιες αυθαιρεσίες από την πλευρά των ερευνητών. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040-14044, κάθε μελέτη ΑΚΖ αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, τα οποία και παρατίθενται παρακάτω:

- Προσδιορισμός στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (goal and scope definition)
- Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα (inventory analysis)
- Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος (impact assessment)
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος (interpretation)

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η συσχέτιση μεταξύ των σταδίων που προαναφέρθηκαν, καθώς και κάποιες από τις άμεσες εφαρμογές των αποτελεσμάτων των αναλύσεων κύκλου ζωής.



Εικ. 1.7. Στάδια μεθοδολογίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής [25]

Η προσθήκη των διπλών βελών στο διάγραμμα υποδεικνύει ότι η ΑΚΖ είναι μία επαναληπτική διαδικασία. Κάθε ένα από τα στάδια της ανάλυσης, χρησιμοποιεί αποτελέσματα από τα υπόλοιπα στάδια με αποτέλεσμα κανένα από αυτά να μην ολοκληρώνεται πριν την περάτωση ολόκληρης της μελέτης.

## **I. Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής της μελέτης**

Το πρώτο στάδιο σε κάθε μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής αποτελεί ο προσδιορισμός του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης. Με τον προσδιορισμό του σκοπού αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους πραγματοποιείται η συγκεκριμένη μελέτη, περιγράφεται η εφαρμογή για την οποία προορίζεται, το κοινό στο οποίο απευθύνεται καθώς και ο τρόπος αξιοποίησης των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, ο προσδιορισμός του πεδίου εφαρμογής της μελέτης, που αποτελεί μία συλλογή ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών, αποσκοπεί στην περιγραφή των περιεχομένων της μελέτης αλλά και αρκετών σημαντικών παραμέτρων που υποδεικνύουν το πώς ακριβώς αυτή διεξάγεται. Οι σημαντικότερες από αυτές τις παραμέτρους παρατίθενται παρακάτω:

- Το υπό εξέταση σύστημα (product system) και τα όρια του συστήματος (system boundaries)  
Το σύνολο των διεργασιών που παρέχουν μία ή περισσότερες καθορισμένες λειτουργίες ορίζουν ένα σύστημα [25]. Η λειτουργία (function) αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος. Στο παράδειγμα ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το ίδιο το εργοστάσιο αποτελεί το σύστημα με λειτουργία την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διεργασίες (processes) θεωρούνται όλες οι δραστηριότητες που μετατρέπουν εισόδους (ενέργεια, υλικά) σε εξόδους (ενέργεια, υλικά, εκπομπές). Τα όρια του συστήματος είναι αυτά που καθορίζουν ποιες είναι οι διεργασίες που περιλαμβάνονται και μελετούνται στο σύστημα. Τέλος, πρέπει να καθοριστούν τα γεωγραφικά και χρονικά όρια του συστήματος.
- Λειτουργική Μονάδα (functional unit)  
Η λειτουργική μονάδα ορίζει τη μονάδα αναφοράς για όλες τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση και διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της μελέτης που πραγματοποιείται. Επιπλέον, η επιλογή της πρέπει να πραγματοποιείται έτσι ώστε να είναι σύμφωνη με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, όπως αυτός έχει προσδιοριστεί προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση εξέτασης εναλλακτικών σεναρίων μέσω της AKZ, η λειτουργική μονάδα πρέπει να παραμένει σταθερή μεταξύ αυτών, ώστε να μπορούν αυτά να συγκριθούν μεταξύ τους, και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι εκφρασμένα ως προς την ίδια κοινή βάση.
- Διαδικασία κατανομής (Allocation)  
Η διαδικασία κατανομής η οποία επιλέγεται προς μοντελοποίηση του υπό εξέταση συστήματος, πρέπει να ορίζεται με σαφήνεια. Σύμφωνα με το πρότυπο (ISO 14044) [29], πρέπει να αποφεύγεται, όπου είναι δυνατό, είτε χωρίζοντας μία διεργασία σε υποδιεργασίες είτε διευρύνοντας τα όρια του συστήματος έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι επιπλέον διεργασίες οι οποίες σχετίζονται με τα παραπροϊόντα του υπό εξέταση συστήματος. Στις περιπτώσεις όπου αυτή δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί, η κατανομή πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο

τρόπο ώστε να αντικατοπτρίζει τις υποκείμενες φυσικές (ή χημικές ή βιολογικές) σχέσεις [30] ανάμεσα στα προϊόντα ή τις λειτουργίες του συστήματος.

## **II. Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα**

Το επόμενο στάδιο κατά την εκτέλεση μιας ΑΚΖ είναι η ανάλυση και καταγραφή δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τη λήψη δεδομένων και διαδικασιών υπολογισμού ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι σχετικές εισοδοι και έξοδοι σε κάθε μια από τις διαδικασίες που περιλαμβάνονται στο σύστημα που αναλύεται. Έτσι, η βασική ιδέα είναι να πραγματοποιηθεί ένας ισολογισμός ροών λαμβάνοντας υπόψη τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος καθ' όλο τον κύκλο ζωής για την επιλεγμένη λειτουργική μονάδα. Οι εισοδοι περιλαμβάνουν τις απαιτήσεις του συστήματος σε ενέργεια και πρώτες ύλες, ενώ οι έξοδοι περιλαμβάνουν τους ρύπους οι οποίοι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ή στα ύδατα, τα στερεά απόβλητα, καθώς και άλλες εκπομπές. Συνεπώς, προκύπτει ένας κατάλογος ο οποίος περιλαμβάνει τις ποσότητες των ρύπων οι οποίοι απελευθερώνονται στο περιβάλλον και τα εκάστοτε ποσά της ενέργειας αλλά και των υλικών που καταναλώθηκαν.

## **III. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων**

Αυτό το τρίτο στάδιο συνίσταται στην ομαδοποίηση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου σταδίου καθώς αξιολογείται η βαρύτητα και η σημασία των δυνατών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος, κάνοντας χρήση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί.

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- **Ταξινόμηση:** Αυτό το πρώτο βήμα συνίσταται στην καταχώρηση όλων των δεδομένων από το στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής δεδομένων σε επιλεγμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι τρεις βασικές κατηγορίες είναι το περιβάλλον, η ανθρώπινη υγεία και η εξάντληση των φυσικών πόρων στις οποίες επικεντρώνονται οι περισσότερες μελέτες. Ωστόσο, τα αποτελέσματα μπορούν να ταξινομηθούν σε περισσότερες κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων η οποία έχει επιλεγεί.
- **Χαρακτηρισμός:** Ο χαρακτηρισμός αποτελεί την αναλυτική προσέγγιση με τη την οποία πραγματοποιείται ποσοτικοποίηση των ταξινομημένων πλέον αποτελεσμάτων του προηγούμενου σταδίου και εκφράζονται σε κοινές μονάδες. Τα μετασχηματισμένα αποτελέσματα προστίθενται ανά κατηγορία επιπτώσεων με αποτέλεσμα την ανάδειξη ενός συγκεκριμένου δείκτη για την κάθε κατηγορία. Αυτός ο μετασχηματισμός γίνεται με τη χρήση επιστημονικά ορισμένων

παραγόντων χαρακτηρισμού (characterization factors), οι οποίοι είναι γνωστοί και με την ονομασία «παράγοντες ισοδυναμίας» (“equivalency factors”) [31].

- **Κανονικοποίηση:** Η κανονικοποίηση εκφράζει κατά πόσο ο δείκτης κάθε κατηγορίας επιπτώσεων έχει σχετικά μεγάλη ή μικρή τιμή σε σχέση με μία τιμή αναφοράς, η οποία είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως τιμές αναφοράς, οι τιμές που σχετίζονται με τη μέση ετήσια επίπτωση στο περιβάλλον ενός ευρωπαίου πολίτη. Με την κανονικοποίηση καθίσταται δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν άμεσα μόνο εντός μίας κατηγορίας επιπτώσεων, καθώς οι τιμές των διαφόρων κατηγοριών εξαρτώνται από τις τιμές αναφοράς που έχουν επιλεγεί για κάθε κατηγορία.
- **Ομαδοποίηση (προαιρετικό)** Αφότου ολοκληρωθεί ο χαρακτηρισμός (ή και η κανονικοποίηση), σε περίπτωση που αυτός έχει προηγηθεί, οι κατηγορίες επιπτώσεων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ένα ή περισσότερα ευρύτερα σύνολα. Για να επιτευχθεί αυτό, οι κατηγορίες επιπτώσεων ταξινομούνται με κριτήρια κάποια χαρακτηριστικά τους όπως είναι η επίδραση που έχουν σε διεθνές ή τοπικό επίπεδο, είτε κατατάσσοντας τις βάσει μίας δεδομένης ιεραρχίας, όπως είναι μια υποκειμενικά ορισμένη ιεραρχία προτεραιότητας των επιπτώσεων σε υψηλής, μεσαίας και χαμηλής προτεραιότητας. Λόγω του ότι η ομαδοποίηση στηρίζεται σε συγκεκριμένες επιλογές για την εκτίμηση της προτεραιότητας των επιπτώσεων, αποτελεί μία υποκειμενική διαδικασία η οποία μπορεί να παρουσιάζει διαφορές ανάμεσα σε διάφορες μελέτες, οι οποίες εξαρτώνται από τις επιλογές που έχει κάνει ο εκάστοτε μελετητής. Παρόλα αυτά, όταν επιλέγονται πολλές κατηγορίες βλάβης, η ομαδοποίηση μπορεί να διευκολύνει την κατανόηση των αποτελεσμάτων από τον αναγνώστη ή τον ενδιαφερόμενο [31].
- **Στάθμιση:** Πρόκειται για το πιο υποκειμενικό μέρος αυτού του σταδίου της AKZ και συνίσταται στη στάθμιση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει για τις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων με σκοπό να γίνει μια πιο άμεση σύγκριση ή ακόμη και να συγκεντρωθούν σε έναν ενιαίο δείκτη. Σε αυτό το στάδιο, τα αποτελέσματα των κανονικοποιημένων δεικτών των διαφόρων κατηγοριών επιπτώσεων μετατρέπονται σε κοινές μονάδες χρησιμοποιώντας αριθμητικούς συντελεστές στάθμισης που καθορίζονται μέσω υποκειμενικών αξιολογήσεων ή εκτιμήσεων αξίας. Αυτοί οι αριθμητικοί παράγοντες αξιολόγησης μπορούν να ληφθούν από κοινωνικοοικονομικά δεδομένα, αλλά ούτως ή άλλως, αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν ως επιστημονικά σχετικοί παράγοντες. (Πρότυπο ISO 14044: 2006, περιβαλλοντική διαχείριση)

#### **IV. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος**

Στο στάδιο της ερμηνείας, όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια της AKZ συγκεντρώνονται και αξιολογούνται για να ληφθούν τα συμπεράσματα και οι χρήσιμες προτάσεις για το υπό μελέτη σύστημα. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικές στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, αλλά συγχρόνως και τα κοινωνικά, πολιτιστικά ή οικονομικά κριτήρια. Σε αυτή την τελευταία φάση, μπορούν να εντοπιστούν οι σημαντικές πτυχές του κύκλου ζωής του υπό εξέταση συστήματος και ορισμένες δραστηριότητες μπορούν να προσαρμοστούν, εφόσον απαιτείται. Όλα αποτελούν μέρος μιας επαναληπτικής διαδικασίας που οδηγεί στην επίτευξη του κύριου στόχου και βελτιώνει τη μελέτη αξιολόγησης κύκλου ζωής που έχει πραγματοποιηθεί.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να είναι συνεπής με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής που ορίζονται στην πρώτη φάση και περιλαμβάνει τρία θεμελιώδη στοιχεία: Αναγνώριση των σημαντικών μεταβλητών, επαλήθευση των αποτελεσμάτων και, τέλος, συμπεράσματα και προτάσεις.

#### **1.5 Βάσεις δεδομένων και λογισμικά**

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι απαραίτητη μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία ώστε να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα για το σύστημα, η οποία μπορεί να συνίσταται σε έρευνα, επίσκεψη σε εργοστάσια και επικοινωνία με ειδικούς. Ωστόσο, είναι σχεδόν αδύνατη, στην πραγματικότητα αυτή η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων που χρειάζονται για να μοντελοποιηθούν όλες οι διεργασίες που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα. Ένας από τους κυριότερους λόγους είναι ότι στις περισσότερες βιομηχανίες δεν γίνεται ακριβής καταγραφή ούτε της πλήρους λίστας των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλά ούτε και των επιμέρους ηλεκτρικών και θερμικών καταναλώσεων. Επιπλέον, το γεγονός ότι επιμέρους συνιστώσες, όπως για παράδειγμα εναλλάκτες θερμότητας, προμηθεύτηκαν από διαφορετικούς κατασκευαστές προκαλεί ακόμα μεγαλύτερα προβλήματα στην ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Αντίστοιχα, τόσο η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν όσο και ο υπολογισμός των επιπτώσεων αυτών δε μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα απλό λογισμικό. Συνεπώς, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, συνήθως πραγματοποιείται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών και υπαρχόντων βάσεων δεδομένων αλλά και με τη χρήση μιας σειράς παραδοχών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιείται το λογισμικό SimaPro v.9.0.0.49, ενώ ως πηγές δεδομένων χρησιμοποιούνται η βάση δεδομένων ecoinvent v.3.6 και η βιβλιογραφία για την εφαρμογή της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Η ολλανδική εταιρεία Pre Sustainability BV είναι αυτή που έχει αναπτύξει το λογισμικό SimaPro το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει έτοιμα σετ δεδομένων από κάποια

βάση δεδομένων (π.χ. ecoinvent), ή του δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει δικά του με την εισαγωγή διεργασιών σύμφωνα με δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από τον ίδιο. Επιπρόσθετα, υποστηρίζεται από το λογισμικό όλη η διαδικασία ανάλυσης κύκλου ζωής από τη δημιουργία του καταλόγου απογραφής έως την εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ τα αποτελέσματα αυτών γίνεται να παρουσιαστούν όχι μόνο γραφικά αλλά και σε μορφή πίνακα.

Η βάση δεδομένων ecoinvent αποτελεί την πιο πλήρη και τεκμηριωμένη βάση δεδομένων, καθώς έχει αναγνωριστεί σε διεθνές επίπεδο και αξιοποιείται από πολυεθνικές εταιρείες έως κορυφαία πανεπιστήμια σε περιβαλλοντικές μελέτες. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εκδόθηκε στις 12 Σεπτεμβρίου 2019 και περιλαμβάνει 2200 νέα και 2500 ανανεωμένα σετ δεδομένων τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, τα μεταλλεύματα και οι κατεργασίες αυτών.

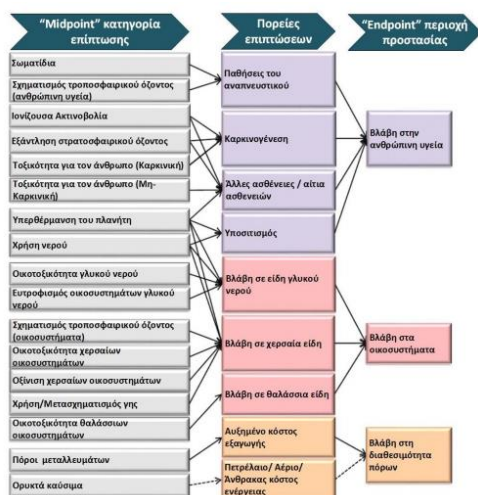
## 1.6 Η μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe 2016

Η ReCiPe 2016 αποτελώντας μια ενημερωμένη και πιο εκτενή έκδοση της ReCiPe 2008, την οποία ανέπτυξαν το Ολλανδικό Βασιλικό Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον (RIVM), το πανεπιστήμιο Ράντμπουντ του Ναϊμέγκεν στην Ολλανδία (Radboud University), το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών (CML) του πανεπιστημίου Λέιντεν στην Ολλανδία (Leiden University), και την Pre Sustainability BV συνδιάζει δύο μεθόδους εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων: την “midpoint” προσανατολισμένης CML 2002 και την “endpoint” προσανατολισμένης Eco-Indicator 99 [33].

Δεκαοκτώ (18) κατηγορίες επιπτώσεων εμπεριέχονται σε επίπεδο “midpoint”, οι οποίες ορίζονται στο σημείο εκείνο στο οποίο υπεισέρχονται μηχανισμοί κοινού για αρκετά είδη ουσιών. Παραδείγματος χάριν, η σειρά βημάτων που περιλαμβάνονται στην οξίνιση, ξεκινάει με την απελευθέρωση των όξινων ουσιών και τελειώνει με τις επιπτώσεις που αυτή επιφέρει στο οικοσύστημα. Στο ενδιάμεσο αυτής της πορείας (pathway), συναντάται ένα σημείο στο οποίο οι ουσίες οξίνισης επιδρούν στη διαδικασία κορεσμού κατιόντων βάσης του εδάφους (BCS). Παράλληλα, κάποιες άλλες ουσίες οξίνισης είναι δυνατό να έχουν διαφορετικές πορείες πριν φτάσουν σε αυτό το σημείο, ωστόσο όλες ακολουθούν την ίδια πορεία πέρα από αυτό. Στο επίπεδο “midpoint”, ο χαρακτηρισμός έχει πιο ισχυρή σχέση με τις περιβαλλοντικές ροές και παρουσιάζει σχετικά χαμηλή αβεβαιότητα.

Σε επίπεδο “endpoint”, όπως σχηματικά φαίνεται και στην **Εικ. 1.8**, πραγματοποιείται επεξεργασία των περισσότερων από τις κατηγορίες επιπτώσεων του προηγούμενου επιπέδου, και αθροίζονται σε τρεις κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιοχές προστασίας αποτελώντας τη βάση λήψης αποφάσεων στην πολιτική και την

αειφόρο ανάπτυξη. Τρεις περιοχές προστασίας περιλαμβάνονται στον περιβαλλοντικό τομέα της ReCiPe: η ανθρώπινη υγεία, η ποιότητα του οικοσυστήματος και η εξάντληση πόρων. Αν και ο χαρακτηρισμός στο επίπεδο “endpoint” παρέχει καλύτερη πληροφόρηση σε σχέση με την περιβαλλοντική συνάφεια των περιβαλλοντικών ροών, παρουσιάζει ωστόσο μεγαλύτερη αβεβαιότητα.



Εικ. 1.8. Επισκόπηση των κατηγοριών επιπτώσεων που καλύπτονται στη μεθοδολογία ReCiPe2016 και της σχέσης τους με τις περιοχές προστασίας. [34]

### 1.6.1 Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “midpoint”

Οι κατηγορίες βλάβης που παρατίθενται παρακάτω έχουν ληφθεί από την Pre Sustainability BV [34].

- **Κλιματική αλλαγή (Climate change):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της κλιματικής αλλαγής αποτελεί δυναμικό αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη. Τα ισοδύναμα kg CO<sub>2</sub> στον αέρα αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Εξάντληση του όζοντος (Ozone depletion):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της εξάντλησης του στρώματος του όζοντος αποτελεί η καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος της στρατόσφαιρας λόγω ανθρωπογενών εκπομπών ουσιών οι οποίες οδηγούν στην καταστροφή του όζοντος (Ozone Depleting Substances – ODS). Τα ισοδύναμα kg τριχλωροφθορομεθανίου (CFC – 11) αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Σχηματισμός σωματιδίων (Fine particulate matter formation):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού για τον σχηματισμό των σωματιδίων αποτελεί το ποσοστό λήψης σωματιδίων PM<sub>2.5</sub>. Τα ισοδύναμα kg σωματιδίων PM<sub>2.5</sub> αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού για την ιονίζουσα ακτινοβολία αποτελεί το επίπεδο έκθεσης για τον πληθυσμό

παγκοσμίως. Τα ισοδύναμα kBq κοβαλτίου-60 στον αέρα αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.

- **Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων (Terrestrial acidification):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της χερσαίας οξίνισης αποτελεί το Δυναμικό Οξίνισης (Acidification Potential – AP), το οποίο προέρχεται από τη χρήση του σταθμισμένου παγκοσμίου μέσου για τον παράγοντα πορείας (fate factor) του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>). Τα ισοδύναμα kg διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, χερσαίων οικοσυστημάτων (Photochemical ozone formation, terrestrial ecosystems):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού αποτελεί η δημιουργία όζοντος που οφείλεται στην εκπομπή πρόδρομων ουσιών – οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) καθώς και πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC). Τα ισοδύναμα kg NO<sub>x</sub> αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία (Photochemical ozone formation, human health):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού αποτελεί η δημιουργία του όζοντος που οφείλεται στην εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) καθώς και πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC).
- **Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Marine eutrophication):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού του θαλάσσιου ευτροφισμού αποτελεί η παραμονή των εκπεμπόμενων θρεπτικών ουσιών που περιέχουν φώσφορο στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Τα ισοδύναμα kg αζώτου (N<sub>2</sub>) σε θαλασσινό νερό αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Τοξικότητα για τον άνθρωπο και οικοτοξικότητα (Human toxicity and ecotoxicity):** Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της ανθρώπινης τοξικότητας και οικοτοξικότητας σχετίζεται με την παραμονή και συσσώρευση μιας χημικής ουσίας στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα αλλά και με την τοξικότητα αυτής. Τα kg εκπεμπόμενου 1,4 διχλωροβενζολίου (1,4 - DBC) αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού (Freshwater eutrophication):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού του ευτροφισμού γλυκού νερού αποτελεί η παραμονή των εκπεμπόμενων θρεπτικών ουσιών που περιέχουν φώσφορο στα οικοσυστήματα του γλυκού νερού. Τα ισοδύναμα kg φωσφόρου (P) σε γλυκό νερό αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Χρήση νερού (Water use):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού για την χρησιμοποίηση του νερού αποτελεί το καταναλισκόμενο γλυκό νερό. Τα κυβικά μέτρα (m<sup>3</sup>) καταναλισκόμενου νερού αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Εξάντληση ορυκτών πόρων (Fossil resource scarcity):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της έλλειψης ορυκτών πόρων αποτελεί η δυναμικότητα των ορυκτών καυσίμων, η οποία βασίζεται στην ανώτερη θερμογόνο δύναμη. Τα ισοδύναμα kg πετρελαίου αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.
- **Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων (Mineral resource scarcity):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού της έλλειψης πόρων μεταλλευμάτων αποτελεί η



δυναμικότητα του πλεονάζοντος μεταλλεύματος. Τα ισοδύναμα kg χαλκού (Cu) αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.

- **Χρήση γης (Land use):** Τον παράγοντα χαρακτηρισμού αποτελεί το η επιφάνεια της γης η οποία μετασχηματίζεται ή χρησιμοποιείται για δεδομένο χρονικό διάστημα. Τα τετραγωνικά μέτρα (m<sup>2</sup>) αποτελούν τη μονάδα αναφοράς.

### 1.6.2 Χαρακτηρισμός σε επίπεδο “endpoint” (Εκτίμηση βλαβών)

- **Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (Damage to Human Health):** Στην συγκεκριμένη κατηγορία γίνεται χρήση της έννοιας των «αναπροσαρμοσμένων λόγω αναπηρίας ετών ζωής» (disability-adjusted life years – DALY) έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της ζημιά στην ανθρώπινη υγεία. Τα DALY που σχετίζονται με μία ασθένεια προκύπτουν με βάση στατιστικά στοιχεία για την υγεία του ανθρώπου αναφορικά όχι μόνο με τα έτη που χάνονται αλλά και με εκείνα τα οποία βιώνονται με αναπηρία [33]. Η ζημιά ενός (1) DALY συνεπάγεται με την «απώλεια ενός έτους από τη ζωή ενός ατόμου, ή τέσσερα έτη ζωής με αναπηρία η οποία έχει βαρύτητα 0.25» [35].
- **Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων (Damage to Ecosystem Diversity):** Στη μέθοδο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων ReCiPe, λαμβάνεται υπόψιν η παραδοχή πως η ποιότητα των οικοσυστημάτων σχετίζεται άμεσα με την ποικιλία των ειδών [33]. Συνεπώς, η καταστροφή που προκύπτει στην ποιότητα των οικοσυστημάτων είναι εκφρασμένη μέσω της απώλειας (loss) των ειδών σε μία συγκεκριμένη περιοχή (χερσαία ή υδάτινη) και σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- **Βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων (Damage to Resource Availability):** Η καταστροφή που προκύπτει στη διαθεσιμότητα των πόρων βασίζεται στη γεωλογική κατανομή των μεταλλευμάτων και των ορυκτών πόρων και στην αξιολόγηση της αύξησης του οριακού κόστους της μελλοντικής εξόρυξης πόρων, ως αποτέλεσμα της διαρκούς εξόρυξης, δηλαδή της εξάντλησης των αποθεμάτων αναφορικά με τα μεταλλεύματα και της ανάγκης για εκμετάλλευση λιγότερο συμβατικών καυσίμων όσον αφορά τα ορυκτά καύσιμα [33]. Το κόστος αυτό είναι εκφρασμένο σε δολάρια (USD2013), με τη θεώρηση ότι το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι 3%.

### 1.6.3 Προοπτικές

Η χρήση των μοντέλων για τον καθορισμό των παραγόντων χαρακτηρισμού αποτελούν πηγή αβεβαιότητας και αντικατοπτρίζουν τη μη ολοκληρωμένη και αβέβαιη γνώση των περιβαλλοντικών μηχανισμών που συμμετέχουν στην κλιματική αλλαγή, την οξίνιση και σε άλλες κατηγορίες επιπτώσεων. Στη ReCiPe 2016, όπως και στην Eco-indicator 99, έχει ληφθεί η απόφαση να ομαδοποιούνται οι διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας και οι

διαφορετικές επιλογές σε ένα περιορισμένο αριθμό προοπτικών ή σεναρίων, σύμφωνα με την «Πολιτιστική Θεωρία» (“Cultural Theory”) του Thompson (1990) [36]. Οι προοπτικές αυτές δεν ισχυρίζονται ότι εκπροσωπούν αρχέτυπα της ανθρώπινης συμπεριφοράς, αλλά απλώς χρησιμοποιούνται για την ομαδοποίηση παρόμοιων τύπων υποθέσεων και επιλογών.

Στη ReCiPe 2016 συμπεριλαμβάνονται τρεις προοπτικές [37]:

- Η ατομικιστική (“individualist (I)”) προοπτική, βασιζόμενη στο βραχυπρόθεσμο ενδιαφέρον (20 χρόνια), στους τύπους επιπτώσεων που είναι αδιαμφισβήτητοι και στην τεχνολογική αισιοδοξία όσον αφορά την ανθρώπινη προσαρμογή.
- Η ιεραρχική (“hierarchist (H)”) προοπτική, βασιζόμενη στην επιστημονική συναίνεση, όσον αφορά το χρονικό πλαίσιο (100 χρόνια) και την αξιοπιστία των μηχανισμών επίπτωσης.
- Η εξισωτική (“egalitarian (E)”) προοπτική, η οποία είναι η πιο συντηρητική προοπτική, η οποία λαμβάνει υπόψη της το μεγαλύτερο χρονικό πλαίσιο (1000 χρόνια ή περισσότερο) και όλα τα είδη επιπτώσεων για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.

## 1.7 Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Οργανικό Κύκλο Rankine

Η εφαρμογή της ανάλυσης κύκλου ζωής σε συστήματα οργανικού κύκλου Rankine δεν έχει μελετηθεί εκτενώς, γεγονός που προσδίδει ακόμα μεγαλύτερη σημασία στην μελέτη που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Οι Hualing Zhang et al. [38] αξιολόγησαν την βιωσιμότητα ενός συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine για την παραγωγή ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα. Αναφορικά με τα όρια του συστήματος, στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν συμπεριληφθεί τα στάδια του κύκλου ζωής από την κατασκευή του συστήματος έως και την παύση λειτουργίας του κατά την οποία έχει ληφθεί υπόψη και η μεταφορά των συνιστωσών. Ένα από τα σημαντικά συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν είναι πως η βιωσιμότητα του συστήματος ORC είναι μικρότερη από αυτή ενός αιολικού, υδροηλεκτρικού και γεωθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, αλλά πολύ μεγαλύτερη από αυτή των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα.

Οι Yang Ding et al. [39] μελέτησαν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει το εργαζόμενο μέσο ενός Οργανικού Κύκλου Rankine ο οποίος προκαλείται κατά τη διάρκεια του σταδίου παραγωγής, κατά τη διαρροή στο στάδιο της λειτουργίας του κύκλου αλλά και κατά την απώλεια εκπομπών κατά την παύση λειτουργίας του συστήματος. Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη υψηλού βαθμού θερμικής απόδοσης, για τον λόγο αυτό μελετήθηκαν τέσσερα είδη HFC ψυκτικών μέσων (R134a, R227ea, R152a, and R245fa). Για τα R134a, R227ea, R152a, και R245fa, οι θερμικοί βαθμοί απόδοσης βρέθηκαν να είναι 10.62%, 10.21%,

10.32%, και 10.76%, αντίστοιχα. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των εργαζόμενων μέσων δεν μπορεί να αγνοηθεί και ότι την μεγαλύτερη επίπτωση στο περιβάλλον μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος την έχει ο συμπυκνωτής.

Οι A. Uusitalo et al. [40] πραγματοποίησαν μία μελέτη σχετικά με την δυνατότητα μείωσης του δυναμικού εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (δείκτης GHG) με τη χρήση Οργανικών κύκλων Rankine οι οποίοι εκμεταλλεύονται την αποβαλλόμενη θερμότητα από μηχανές βιοαερίου. Μελετήθηκαν δύο σενάρια όπου το πρώτο αφορούσε την εκμετάλλευση μόνο της ηλεκτρικής ενέργειας από την μηχανή βιοαερίου και το δεύτερο την εκμετάλλευση τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και της απορριπτόμενης θερμότητας της μηχανής αλλά και υποσενάρια αυτών που περιλαμβάνουν τη χρήση Οργανικού Κύκλου Rankine και την επιπλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλακτικές μεθόδους (ανανεώσιμες πηγές, βιοαέριο, άνθρακας). Οι μελετητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ORC οδηγεί στην μεγαλύτερη μείωση του δείκτη GHG συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια και πιο συγκεκριμένα σε μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου 16-35% ετησίως.

Οι Chao Liu et al. [41] μελέτησαν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει ένα σύστημα Οργανικού Κύκλου Rankine για την παραγωγή ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι εξής δείκτες: GWP (δείκτης φαινόμενο του θερμοκηπίου), AP (δείκτης οξίνισης), EP (δείκτης ευτροφισμού), HTP (δείκτης τοξικότητας για τον άνθρωπο), SWP (δείκτης στερεών αποβλήτων) and SAP (δείκτης αιθάλης και σκόνης). Η φάση κατασκευής, λειτουργίας και η αποσυναρμολόγηση του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της ανακύκλωσης και της εναπόθεσης των στερεών αποβλήτων, λήφθηκαν υπόψη κατά την ανάλυση κύκλου ζωής και εξετάστηκαν επτά διαφορετικά ψυκτικά υγρά ως εργαζόμενο μέσο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φάση λειτουργίας έχει την μεγαλύτερη συνεισφορά στους δείκτες AP και HTP όταν ως εργαζόμενα μέσα χρησιμοποιούνται τα R114 και R245fa, ενώ η φάση κατασκευής συνεισφέρει περισσότερο στους δείκτες AP και HTP για τα υπόλοιπα εργαζόμενα μέσα (R123, R601a, Πεντάνιο, R141b και R113). Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του χρόνου αποπληρωμής των αερίων του θερμοκηπίου (pay back time) στο σύστημα του Οργανικού Κύκλου Rankine με πέντε άλλους τρόπους παραγωγής ενέργειας και οι μελετητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος απόπληρωμής του συστήματος ORC είναι ο μικρότερος.

Οι Conor Walsh et al. [42] εξέτασαν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine ο οποίος εκμεταλλεύεται την απορριπτόμενη θερμότητα από τη βιομηχανική διεργασία που υφίσταται ο οπτάνθρακας για την παραγωγή χάλυβα. Η ανάλυση κύκλου ζωής περιλαμβάνει τα 3 βασικά στάδια που είναι απαραίτητα για την παραγωγή οπτάνθρακα, την εξόρυξη του ίδιου του άνθρακα, τη μεταφορά του στα χαλυβουργεία και την ίδια τη διαδικασία παραγωγής οπτάνθρακα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειώθηκαν κατά 1,39% με την

ενσωμάτωση του Οργανικού Κύκλου Rankine, ωστόσο ο δείκτης GWP, ο οποίος έχει άμεση συσχέτιση με αυτές τις εκπομπές, μειώθηκε μόνο κατά 0,1% γεγονός που οι ερευνητές εξηγούν πως συμβαίνει λόγω της επίπτωσης των υλικών των συνιστωσών του συστήματος ORC και της κατεργασίας αυτών, το οποίο όμως θα μπορούσε να οδηγήσει σε ετήσια μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 43.100 τόνους. Τέλος, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine είναι μικρότερο από 1%, με σημαντικότερη βελτίωση στους δείκτες που σχετίζονται με την ακτινοβολία.

Οι Florian Heberle et al. [2] μελέτησαν την περιβαλλοντική απόδοση ενός συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine τροφοδοτούμενο από ένα γεωθερμικό εργοστάσιο στη Γερμανία. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν μονοβάθμιοι και διβάθμιοι υποκρίσιμοι και υπερκρίσιμοι Οργανικοί Κύκλοι Rankine και μελετήθηκαν ως σενάρια η αντικατάσταση του ψυκτικού μέσου με αντίστοιχα χαμηλού δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) ή υδρογονάνθρακες αλλά και η επίδραση που έχει η αύξηση του ποσοστού των απωλειών αυτού. Μετά την αντικατάσταση του ψυκτικού μέσου, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση τόσο του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη όσο και γενικότερα του περιβαλλοντικού αντίκτυπου του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η επίδραση του ORC στην υπερθέρμανση του πλανήτη μειώθηκε κατά 80% με τη χρήση του R1233zd αντί για το R245fa και ότι η χρήση του R1234yf στον υπερκρίσιμο κύκλο οδήγησε σε σημαντική μείωση του ισοδύναμου CO<sub>2</sub>.

Comment [em2]: Αναφορά

Σύστημα	Όρια LCA	Λειτουργική μονάδα	Συλλογή Δεδομένων	Μέθοδος αξιολόγησης ή και δείκτες	Μελέτη Σεναρίων	Σύστημα αναφοράς	Reference
<b>ORC για την παραγωγή ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα</b>	Κατασκευή-Αποσυναρμολόγηση	-	Βιβλιογραφία/υποθέσεις	Emergy indices 5.	Θερμοκρασία καυσαερίου στους 120°C /Σύγκριση με 6 συστήματα παραγωγής ενέργειας	-	
<b>Οργανικός Κύκλος Rankine</b>	Κατασκευή-Αποσυναρμολόγηση	-	REFPROP 8.0 Βιβλιογραφία/υποθέσεις	Eco-indicator 99	Τέσσερα διαφορετικά εργαζόμενα μέσα	-	
<b>ORC σε μηχανές βιοαερίου</b>			Βιβλιογραφία/υποθέσεις GaBi 6.0 database	Δείκτης GHG	Χρήση μόνο ηλεκτρικής ενέργειας/ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από τη μηχανή βιοαερίου	-	
<b>ORC για την παραγωγή ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα</b>	Κατασκευή-Αποσυναρμολόγηση (συμπεριλαμβανομένης της ανακύκλωσης/εναπόθεσης	1 kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας	Βιβλιογραφία/υποθέσεις	Δείκτες GWP, AP, EP, HTP, SWP και SAP	Εφτά διαφορετικά εργαζόμενα μέσα	-	
<b>ORC για την παραγωγή ενέργειας από αποβαλλόμενη θερμότητα</b>	Εξόρυξη πρώτων υλών-λειτουργία συστήματος	1 kg παραγόμενου άνθρακα	Βιβλιογραφία/υποθέσεις, Australian National Pollutant	-	Άνθρακας από διαφορετικά ορυχεία (επίγειο & υπόγειο)	Συμβατική βιομηχανική μονάδα	

από		Inventory (NPI)			
<b>βιομηχανική διεργασία</b>				Αύξηση ποσοστού απωλειών του ψυκτικού μέσου, αντικατάσταση ψυκτικού μέσου	-
<b>ORC για την παραγωγή ενέργειας από γεωθερμικό εργοστάσιο</b>	Κατασκευή-Αποσυναρμολόγηση	1 kWhe	Βιβλιογραφία/υποθέσεις, Ecoinvent, Probas	Υπερθέρμανση του πλανήτη, περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι, ευτροφισμός, οξίνιση	-

## 1.8 Επιστημονικό ερώτημα

Με βάση τα παραπάνω, η συγκεκριμένη μελέτη εστιάζει στην αποτίμηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου ενός συστήματος ORC χαμηλών θερμοκρασιών αξιοποιώντας δύο εναλλακτικές πηγές θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα τα επιστημονικά ερωτήματα που θα απαντηθούν στην συγκεκριμένη μελέτη είναι τα εξής:

- Ποιες είναι οι κύριες συνιστώσες που πρέπει να καταγραφούν στην ανάλυση κύκλου ζωής ενός ORC;
- Ποιες συνιστώσες του συστήματος έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο ανά κατηγορία επιπτώσεων;
- Πόσο συμφέρον είναι το σύστημα ORC για να υποκαταστήσει μέρος του φορτίου μιας ΜΕΚ σε ένα πλοίο;
- Ποιο το περιβαλλοντικό αντίκτυπο ενός ηλιακού ORC σε σχέση με ένα πεδίο φωτοβολταϊκών ίσης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας;
- Ποιες είναι οι κύριες παράμετροι βελτιστοποίησης για την περαιτέρω μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου για τα δύο μελετούμενα ORC;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ο ORC είναι ένας κύκλος παρόμοιος με το συμβατικό κύκλο Clausius-Rankine νερού-ατμού με βασική διαφορά ότι το εργαζόμενο μέσο είναι οργανικής φύσης. Ο ORC συνίσταται στην ατμοποίηση του οργανικού μέσου και κατόπιν την εκτόνωσή του σε στρόβιλο προς παραγωγή μηχανικού έργου. Το χαμηλής πίεσης ρεύμα που εξέρχεται από το στρόβιλο συμπυκνώνεται και μετά επανέρχεται με τη βοήθεια αντλίας στην υψηλή πίεση του κύκλου.

Βάσει των παραπάνω, είναι εύκολα κατανοητό ότι τα κύρια στοιχεία μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι παρόμοια με μίας συμβατικής ατμοηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε νεότερες εκδοχές το σύστημα περιλαμβάνει και έναν αναγεννητή με σκοπό την αύξηση της απόδοσης της εγκατάστασης. Αναφορικά με την πολυπλοκότητά του το σύστημα ORC είναι απλούστερο από αυτό ενός κύκλου ατμού καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη ύπαρξης τυμπάνου συνδεδεμένου με τον λέβητα, αντί αυτού αρκεί ένας μοναδικός εναλλάκτης θερμότητας για να υλοποιήσει τις τρεις φάσεις της θέρμανσης του εργαζόμενου μέσου.

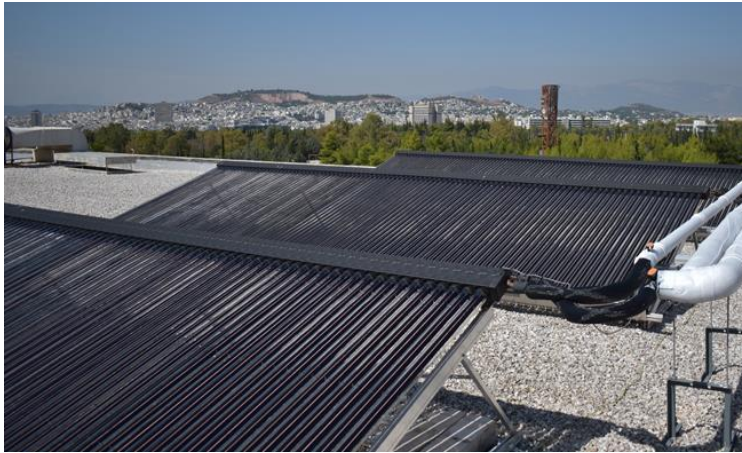
Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται η εν λόγω εγκατάσταση του Οργανικού Κύκλου Rankine κινούμενου από ηλιακούς συλλέκτες είναι τα εξής:

- Ηλιακοί συλλέκτες κενού
- Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας
- Ο Εκτονωτής
- Η Αντλία
- Ο Ατμοποιητής
- Ο Συμπυκνωτής

### 2.1 Ηλιακοί συλλέκτες κενού

Στην συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες που αναπτύχθηκαν από τη γερμανική εταιρία AcoTec GmbH. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για συλλέκτες κενού θερμικών σωλήνων (heat-pipe) με «αρθρωτή» (modular) σχεδίαση, δηλαδή ο σωλήνας συλλογής δεν είναι ενιαίος, αλλά σε κάθε σωλήνα κενού αντιστοιχεί ένα τμήμα του. Κατά τη συναρμολόγηση του συλλέκτη, τα επιμέρους τμήματα ενώνονται, με αποτέλεσμα να σχηματίσουν έναν ενιαίο σωλήνα συλλογής. Με αυτή την σχεδίαση, επιτρέπεται η εύκολη μεταβολή του αριθμού των σωλήνων κενού ανά συλλέκτη, η σύνδεση σε μία μονάδα έως και 250 σωλήνων με μέγιστη ισχύ έως 250 kW, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η μείωση των απαιτήσεων της εγκατάστασης σε στήριξη και σωληνώσεις [43]. Στην **Εικ. 2.1** παρουσιάζεται το ηλιακό πεδίο 40 m<sup>2</sup> που περιλαμβάνει η εγκατάσταση.





**Εικ. 2.1.** Ηλιακοί συλλέκτες στην οροφή του εργαστηρίου

## 2.2 Δεξαμενή αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Στην διάταξη περιλαμβάνεται επίσης μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με συνολική χωρητικότητα 1000 lt (**Εικ. 2.2**), την οποία κατασκευάζει η εταιρεία AkoTec GmbH. Κύριος σκοπός της δεξαμενής αποτελεί η αποθήκευση θερμότητας και η δυνατότητα παροχής θερμού νερού, κατά τα διαστήματα στα οποία δεν υπάρχει παραγωγή θερμότητας από τους συλλέκτες. Ως μέσο αποθήκευσης, η δεξαμενή χρησιμοποιεί το νερό, ενώ παράλληλα διαθέτει δύο εσωτερικούς εναλλάκτες (υπό μορφή περιελίξεων) μέσω των οποίων μεταφέρεται σε αυτό η θερμότητα που συλλέγουν οι συλλέκτες κενού, καθώς και μόνωση (άκαμπτου) αφρού πολυουρεθάνης (rigid PU foam) με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες προς το περιβάλλον. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής συγκεντρώνονται στον **Πιν. 2.1**.



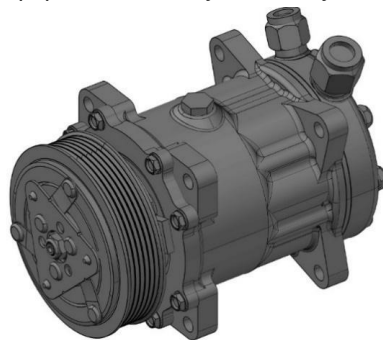
**Εικ. 2.2.** Απεικόνιση της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας

**Πιν. 2.1.** Χαρακτηριστικά δεξαμενής αποθήκευσης αισθητής θερμότητας

Τύπος	PSRR-1000	
<b>Βάρος (Άδειο)</b>	175	kg
<b>Ονομαστική Χωρητικότητα</b>	1000	lt
<b>Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας</b>	10	bar
<b>Μέγιστη Θερμοκρασία</b>	95	°C
<b>Πάχος Μόνωσης</b>	100	mm

## 2.3 Ελικοειδής Εκτονωτής

Για την παραγωγή έργου από ένα κύκλο Rankine είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο συσκευές, ο στρόβιλος ή ο εκτονωτής θετικής εκτόπισης. Οι στρόβιλοι αποτελούν μια εφαρμοσμένη τεχνολογία, αρκεί η εκτόνωση να λαμβάνει χώρα πλήρως μέσα στην υπέρθερμη περιοχή. Δεν είναι επιθυμητή η εκτόνωση μέσα στη διφασική περιοχή για τον λόγο ότι τα σταγονίδια τείνουν να διαβρώσουν τα περύγια του στρόβιλου. Οι πιο διαδεδομένοι εκτονωτές θετικής εκτόπισης, είναι ο ελικοειδής εκτονωτής (scroll), ο κοχλιωτός εκτονωτής (screw) και ο εμβολοφόρος εκτονωτής. Όλοι οι τύποι εκτονωτών θετικής μετατόπισης είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε οργανικούς κύκλους Rankine. Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά τους, είναι μικροί σε διαστάσεις, απλοί στην λειτουργία τους, χωρίς πολλά κινητά μέρη, εύκολοι στην συντήρηση και μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλα εύρη θερμοκρασίας και πίεσης. Η επιλογή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Στην εν λόγω εγκατάσταση που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν ελικοειδείς εκτονωτές.

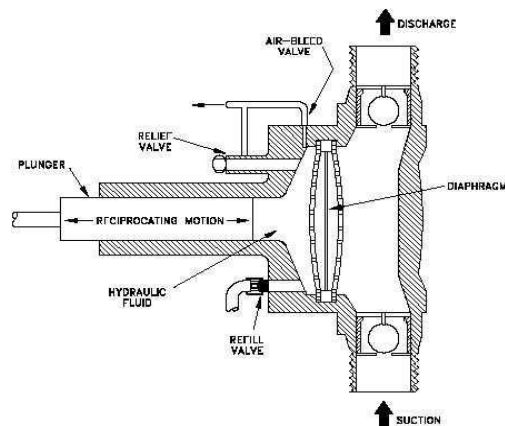


**Εικ. 2.3.** Απεικόνιση σπειροειδούς συμπιεστή

## 2.4 Αντλία διαφράγματος

Μία αντλία τύπου υδραυλικού διαφράγματος χρησιμοποιήθηκε για την κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου R-134a. Μέσω μια ελαστικής μεμβράνης, το έμβολο μεταδίδει την

ισχύ στο ρευστό (υδραυλικό διάφραγμα), με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επαφή μεταξύ του ρευστού και του εμβόλου, γεγονός που επιτρέπει την χρήση λιπαντικού. Οι βαλβίδες ελέγχου αποτελούνται από σφαιρίδια INOX για την απομόνωση του υγρού κατά την εισαγωγή και την συμπίεση (Εικ. 2.4). Ο σχεδιασμός αυτού του είδους των αντλιών αποσκοπεί στην εξασφάλιση ακρίβειας και η χρήση τους σε συνεχούς λειτουργίας εφαρμογές στην περιοχή της διαχείρισης ύδατος και πετροχημικής μηχανικής είναι αρκετά συχνή.



Εικ. 2.4. Σχηματικό διάγραμμα αντλίας κυκλοφορίας οργανικού ρευστού.

Με αυτό τον τρόπο, η αντλία σε ένα σύστημα ORC αποτελεί μια πολύ σημαντική συνιστώσα στην οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία και πιο συγκεκριμένα ως προς την επιλογή και την διαστασιολόγησή της. Δηλαδή, είναι μείζονος σημασίας η συμφωνία αυτής με τις απαιτήσεις του κύκλου σχετικά με την εκλεξιμότητα, την αποδοτικότητα, την στεγανότητα και το απαιτούμενο ύψος αναρρόφησης (NPSH) που πρέπει να έχει.

Στον Πιν. 2.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της αντλίας που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση.

Πιν. 2.2. Χαρακτηριστικά αντλίας κυκλοφορίας οργανικού ρευστού.

Τύπος	Hydra Cell D/G-10-X	
Ονομαστική παροχή λειτουργίας	20	lt/min
Μέγιστη παροχή	29	lt/min στα 50Hz
Πίεση εισόδου/εξόδου (ονομαστική λειτουργία)	9.5/25	bar
Μέγιστη πίεση εισόδου	250	psi
	250/17.3	bar
Κινητήρας	1	kW στα 50Hz
	1450	rpm στα 50Hz
Διάμετρος άξονα	7/8	"
Περιστροφή άξονα	Διπλής κατεύθυνσης	



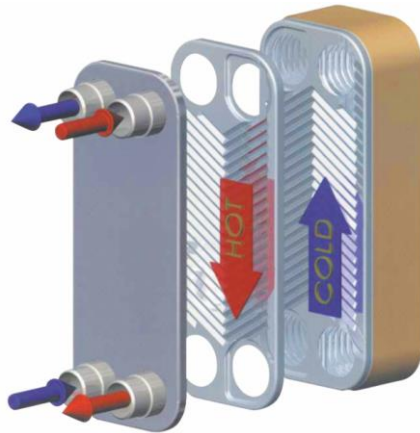
**Εικ. 2.5.** Εγκατεστημένη αντλία στην εργαστηριακή διάταξη

## 2.5 Ατμοποιητής

Δυο από τις κύριες συνιστώσες του κυκλώματος ORC που εξετάζονται είναι ο ατμοποιητής και ο συμπυκνωτής, οι οποίοι υλοποιούνται μέσω εναλλακτών θερμότητας, ενός πλακοειδούς εναλλάκτη θερμότητας και ενός εναλλάκτη θερμότητας κελύφους-αυλών.

Πιο συγκεκριμένα, ένας πλακοειδής εναλλάκτης (plate heat exchanger) συνίσταται σε ένα σύνολο από πλάκες με ραβδώσεις -για καλύτερη μεταφορά θερμότητας- που είναι πρεσαρισμένες, καθεμία εκ των οποίων διαθέτει τέσσερα στόμια για την επικοινωνία μεταξύ των πλακών, τα οποία είναι στεγανωμένα με φλάντζες ώστε να εξασφαλίζεται η κυκλοφορία των ρευστών ανάμεσα στις πλάκες κατά τον τρόπο που προβλέπεται να λειτουργεί ο εκάστοτε εναλλάκτης [44]. Η στεγάνωση της περιφέρειας των πλακών πραγματοποιείται είτε με φλάντζες είτε με συγκόλληση, με αποτέλεσμα οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες να λειτουργούν σε μικρότερες πιέσεις από τους εναλλάκτες κελύφους-αυλών (shell and tube heat exchanger). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πλακοειδών εναλλακτών είναι ότι έχουν αισθητά μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τους εναλλάκτες κελύφους-αυλών, και κατά συνέπεια απαιτούν πολύ μικρότερο χώρο για να επιτύχουν την ίδια μεταφορά θερμότητας σε σχέση με τους ογκώδεις εναλλάκτες κελύφους-αυλών.

Ο ατμοποιητής που έχει χρησιμοποιηθεί είναι το μοντέλο **CB60-90 H-F** της εταιρείας Alfa Laval. Τα χαρακτηριστικά του ατμοποιητή, καθώς και η παρουσίασή του εντός της εγκατάστασης ακολουθούν παρακάτω:



Εικ. 2.6. Σχηματική αναπαράσταση πλακοειδούς εναλλάκτη

Πιν. 2.3. Χαρακτηριστικά ατμοποιητή της εγκατάστασης

Τύπος	Alfa Laval CB60-90 H-F	
Θερμική Ισχύς	90	kW <sub>th</sub>
Επιφάνεια συναλλαγής	5,358	m <sup>2</sup>
	90	πλάκες
Διαστάσεις πλακών	0,466 x 0,05	L <sub>v</sub> x L <sub>h</sub>
Όριο πίεσης	30	bar



Εικ. 2.7. Ατμοποιητής στο κύκλωμα ORC της εγκατάστασης

## 2.6 Συμπυκνωτής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα από τα κύρια εξαρτήματα της εγκατάστασης. Ειδικότερα, ο συμπυκνωτής είναι ένας πλακοειδής εναλλάκτης, όπως και στην περίπτωση του ατμοποιητή με τα εξής χαρακτηριστικά:

**Πιν. 2.4.** Χαρακτηριστικά συμπυκνωτή της εγκατάστασης

<b>Τύπος</b>	<b>Bitzer K573HB</b>	
<b>Θερμική Ισχύς</b>	58.2	kW <sub>th</sub>
<b>Μέγιστη Θερμοκρασία</b>	120	°C
<b>Όριο πίεσης</b>	33	bar

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΚΖ ΓΙΑ ΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

### 3.1 Προσδιορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης

#### 3.1.1 Στόχος της μελέτης

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ηλιακά κινούμενου οργανικού κύκλου Rankine, τα κύρια μέρη του οποίου παρουσιάστηκαν παραπάνω καθώς και ο εντοπισμός των συνιστωσών εκείνων της διάταξης και των διεργασιών που συνεισφέρουν σε μεγαλύτερο βαθμό στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, αφού γίνει η ΑΚΖ του υπό μελέτη συστήματος, πραγματοποιείται σύγκριση με μία μηχανή diesel η οποία να παράγει ετησίως τις ίδιες MWh προκειμένου να διαπιστωθεί και να ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντικό όφελος της προτεινόμενης διάταξης.

#### 3.1.1 Πεδίο Εφαρμογής της μελέτης

##### *I. Λειτουργία του συστήματος*

Η κύρια λειτουργία του συστήματος, είναι η παραγωγή ενέργειας μέσω της ανάκτησης θερμότητας από το υδρόψυκτο σύστημα ψύξης και των βοηθητικών συστημάτων μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης Diesel ενός πλοίου, με σκοπό την αύξηση της απόδοσής του.

##### *II. Το υπό εξέταση σύστημα και τα όρια του συστήματος*

Το υπό εξέταση σύστημα, στην παρούσα μελέτη, περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες του οργανικού κύκλου Rankine, τη δεξαμενή αποθήκευσης, τους ηλιακοί συλλέκτες κενού, τον εκτονωτή, την αντλία, τον ατμοποιητή, τον συμπυκνωτή και τα υπόλοιπα μέρη.

Στη παρούσα μελέτη περιλαμβάνονται όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του οργανικού κύκλου Rankine, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την επεξεργασία τους, τη διαδικασία κατασκευής των επιμέρους συνιστωσών αυτού, τη χρήση, τη συντήρηση και τελικά τις διεργασίες που σχετίζονται με το τέλος της ζωής του, οι οποίες στην συγκεκριμένη μελέτη είναι η ανακύκλωση, και η αποτέφρωση των αποβλήτων.

Σε ότι αφορά τα γεωγραφικά όρια του υπό μελέτη συστήματος ισχύουν τα εξής: οι εκτονωτές κατασκευάζονται στη Γαλλία, η αντλία κατασκευάζεται στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι εναλλάκτες θερμότητας και οι γεννήτριες κατασκευάζονται στην Ελλάδα ενώ οι υπόλοιπες συνιστώσες της διάταξης σε ευρωπαϊκές χώρες. Η τελική σύνδεση των επιμέρους συνιστωσών γίνεται στην τοποθεσία εγκατάστασης της διάταξης, η οποία για την παρούσα μελέτη είναι η Ελλάδα. Η προέλευση των πρώτων υλών για την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων δεν είναι γνωστή, για τον λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί όπου είναι δυνατό δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την εκάστοτε χώρα, ενώ για τα υπόλοιπα έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα αντιπροσωπευτικά για την παγκόσμια αγορά.

Τέλος, οι κατεργασίες για την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών έχουν θεωρηθεί ότι πραγματοποιούνται εντός της ευρωπαϊκής ηπείρου.

Όσον αφορά τα χρονικά όρια του συστήματος, και για τα δύο συστήματα ψύξης έχει επιλεγεί διάρκεια ζωής ίση με είκοσι (20) χρόνια.

### **III. Λειτουργική μονάδα**

Η λειτουργική μονάδα για τη συγκεκριμένη μελέτη έχει επιλεγεί ίση με 12 ετήσιες MWh καθώς το συγκεκριμένο σύστημα είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις ώρες λειτουργίας του και κατά συνέπεια και κατά από το πλοίο στο οποίο λειτουργεί. Ως αποτέλεσμα, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η λειτουργική μονάδα δεν επιλέχθηκε με γνώμονα την ισχύ του πλοίου. Σημειώνεται ότι για την εξέταση του συστήματος όταν αυτό τροφοδοτείται από ηλιακούς συλλέκτες κενού, η λειτουργική μονάδα θεωρείται ίση με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια, δηλαδή 7937 kWh.

## **3.2 Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα**

### **3.2.1 Απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων**

Τα δεδομένα που αφορούν τις τεχνικές προδιαγραφές και την κατασκευή όλων των συνιστωσών της εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της μελέτης προέρχονται από τους κατασκευαστές των αντίστοιχων κομματιών, μέσω άλλων διπλωματικών εργασιών στις οποίες είχαν αναλυθεί συνιστώσες αυτού του συστήματος, αλλά και από τη βιβλιογραφία. Ακόμη, σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα που παρέχονταν δεν κρίθηκαν επαρκή, πραγματοποιήθηκαν προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη βιβλιογραφία καθώς και προσωπικές εκτιμήσεις.

Για τη μοντελοποίηση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από τις διάφορες πηγές χρησιμοποιείται η βάση δεδομένωνecoinvent v. 3.6. Ηecoinvent, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, είναι μία ώριμη και ευρέως αναγνωρισμένη βάση δεδομένων, τα δεδομένα της οποίας θεωρούνται έγκυρα έως τη στιγμή διεξαγωγής της μελέτης.

Ωστόσο, είναι αναμενόμενο, λόγω της διαφορετικής προέλευσης των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, να υπεισέρχονται σημεία αβεβαιότητας στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.

### **3.2.2 Περιορισμοί της μελέτης και υποθέσεις – προσεγγίσεις**

Μία μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα υλικά και την ενέργεια που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του εκάστοτε προϊόντος ή υπηρεσίας. Ωστόσο, στην πράξη είναι απαραίτητη η εφαρμογή παραδοχών και προσεγγίσεων για τη μοντελοποίηση των διεργασιών του συστήματος, κυρίως λόγω έλλειψης χρόνου, πόρων και δεδομένων.

Οι κύριες παραδοχές που έγιναν στη παρούσα μελέτη περιγράφονται παρακάτω:

- Η μοντελοποίηση του υπό εξέταση συστήματος, η οποία συνίσταται κυρίως στην μοντελοποίηση ή των πρώτων υλών από τις οποίες αποτελούνται τα



διάφορα μέρη του καθώς και των διαδικασιών κατασκευής αυτών, έγινε με απλοποιημένο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, λόγω έλλειψης δεδομένων, η μοντελοποίηση ορισμένων υλικών και κατεργασιών αυτών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πιο συναφές προς αυτά υλικό ή κατεργασία από τη βάση δεδομένων της ecoinvent. Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις στα σετ δεδομένων της ecoinvent όπου ήταν απαραίτητο έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά των διαδικασιών κατασκευής. Σχετικά με την προέλευση των πρώτων υλών, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα πιο αντιπροσωπευτικά σετ δεδομένων, για όσες υπήρχαν πληροφορίες, ενώ στις περιπτώσεις όπου η προέλευση ήταν άγνωστη χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα σετ δεδομένων για την παγκόσμια αγορά. Τέλος, οι κατεργασίες των πρώτων υλών (διαδικασίες παραγωγής) για την κατασκευή των συνιστωσών του υπό εξέταση συστήματος έχουν θεωρηθεί ότι πραγματοποιούνται εντός ευρωπαϊκού εδάφους.

- Σε ότι αφορά τις μεταφορές, λόγω έλλειψης δεδομένων, δεν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι μεταφορές που σχετίζονται με την κατασκευή των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine. Για τις πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται οι προσεγγιστικές αποστάσεις μεταφορών οι οποίες είναι ενσωματωμένες στα γενικευμένα “market” σετ δεδομένων της ecoinvent. Για τις υπόλοιπες αποστάσεις μεταφορών, και στις περιπτώσεις όπου αυτές δεν παρέχονται από τους κατασκευαστές, έχουν γίνει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές εκτιμήσεις .
- Σχετικά με τη λειτουργία του συμπυκνωτή, προκειμένου αυτή να επιτευχθεί, απαιτείται η χρήση θαλασσινού νερού το οποίο απορρίπτεται στην θάλασσα και κατά συνέπεια δεν λαμβάνεται υπόψιν στην κατανάλωση νερού.
- Η συντήρηση του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια ζωής της διάταξης λαμβάνεται υπόψη μόνο καθώς αυτή συνίσταται μόνο στην επαναπλήρωση του οργανικού υγρού λόγω των απωλειών που υφίσταται οι οποίες είναι της τάξεως του 2%.

Η συλλογή των δεδομένων για το κάθε μέρος του συστήματος αποτέλεσε την πιο χρονοβόρα διαδικασία κατά τη διάρκεια της μελέτης, κυρίως λόγω της ανάγκης συγκέντρωσης ποικίλων δεδομένων, η οποία πραγματοποιήθηκε τόσο από παλαιότερες διπλωματικές εργασίες στις οποίες είχαν αναλυθεί συνιστώσες του συγκεκριμένου συστήματος, τα δεδομένα των οποίων είχαν προέλθει από τις κατασκευάστριες εταιρίες, όσο και της εκτενούς βιβλιογραφικής έρευνας η οποία ήταν απαραίτητη για την κάλυψη ελλείψεων στα παρεχόμενα δεδομένα.

Ο κατάλογος απογραφής για το σύστημα δομείται με βάση τις τέσσερις κύριες φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος : την εξαγωγή των πρώτων υλών/κατασκευή του προϊόντος, τη μεταφορά, τη χρήση του και την επεξεργασία των αποβλήτων που προκύπτουν κατά το τέλος ζωής της διάταξης.

### 3.2.3 Εξαγωγή πρώτων υλών/Κατασκευή

Τα δεδομένα που αφορούν τις συνιστώσες του συστήματος ORC, όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι μάζες αυτών, η ενέργεια και οι διαδικασίες κατασκευής τους, καθώς και οι αποστάσεις μεταφοράς ορισμένων υλικών, και παρέχονται από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες και κατά συνέπεια από τις κατασκευάστριες εταιρίες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι εμπιστευτικά, ως εκ τούτου δε δημοσιεύονται στην παρούσα μελέτη.

Ωστόσο, παρατίθενται κάποια δεδομένα από τη βιβλιογραφία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση των παραπάνω δεδομένων.

#### I. Εναλλάκτες Θερμότητας

- Συμπυκνωτής/ Υποψύκτης

Οι συγκεκριμένοι εναλλάκτες θερμότητας είναι εναλλάκτες κελύφου-αυλών (shell and tube) αποτελούμενοι κυρίως από ανθρακοχάλυβα (carbon steel), ο οποίος μοντελοποιήθηκε με το σετ δεδομένων “Reinforcing steel GLO| market for| Cut-off, U” , χαλκό και νικέλιο. Τόσο οι σωληνώσεις χαλκού όσο και αυτές του νικελίου έχει θεωρηθεί ότι έχουν παρόμοια διαδικασία κατασκευής με τη διέλαση για την κατασκευή συρμάτων και ως εκ τούτου έχουν μοντελοποιηθεί με το σετ δεδομένων “Wire drawing, copper (GLO market for| Cut-off, U ”. Αναφορικά με τον ανθρακοχάλυβα, επειδή δεν ήταν γνωστές οι κατεργασίες του συγκεκριμένου μετάλλου έχει χρησιμοποιηθεί το σετ δεδομένων “Metal working, average for steel product manufacturing|GLO| market for| Cut-off, U”. Η ενέργεια κατασκευής των εναλλακτών κελύφους-αυλών λαμβάνεται ίση με 0.7336 MJ/kg και θεωρείται πως προέρχεται κατά το ήμισυ από ηλεκτρισμό και κατά το ήμισυ από καύση φυσικού αερίου σε βιομηχανικό κλίβανο. [45]

- Ατμοποιητής

Ο Ατμοποιητής είναι πλακοειδής εναλλάκτης αποτελούμενος κυρίως από ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό και ορείχαλκο. Σε ότι αφορά τις κατεργασίες των διαφόρων υλικών, αυτές συνίστανται στην έλαση του ανοξείδωτου χάλυβα (“hot rolling”) και στην διέλαση του χαλκού για την κατασκευή συρμάτων όπως και στους εναλλάκτες κελύφου-αυλών. Η ενέργεια κατασκευής του πλακοειδούς εναλλάκτη λαμβάνεται ίση με 0.4014MJ/kg μάζας εναλλάκτη και θεωρείται πως προέρχεται κατά κατά το ήμισυ από ηλεκτρισμό και κατά το ήμισυ από καύση φυσικού αερίου σε βιομηχανικό κλίβανο. [45]

#### II. Γεννήτριες

Οι γεννήτριες, ως συνιστώσες του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine από ηλεκτρικό χάλυβα (electrical steel), χυτοσίδηρο, αλουμίνιο και χαλκό. Οι κατεργασίες που έχουν ληφθεί υπόψιν είναι η χύτευση τόσο του αλουμινίου όσο και του σιδήρου αλλά και η διέλαση του χαλκού για την κατασκευή συρμάτων. Αναφορικά με την ενέργεια κατασκευής τους, αυτή μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το σετ δεδομένων “generator production, 200 kW electrical, GLO| production | Cut-off, U” αφότου προηγήθηκε αναλογία σύμφωνα με τα κιλά της εκάστοτε γεννήτριας.

### III. Αντλία

Σε ότι αφορά την αντλία, αυτή αποτελείται από ορείχαλκο και έλαιο. Η κατεργασία στην οποία υπόκειται ο ορείχαλκος είναι η χύτευση και πιο συγκεκριμένα, μοντελοποιείται με το σετ δεδομένων “Casting steel, lost-wax|GLO| market for| Cut-off, U”. Η ενέργεια κατασκευής της αντλίας μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το σετ δεδομένων “ water pump, 22kW, GLO| production | Cut-off, U” αφότου προηγήθηκε αναλογία σύμφωνα με τα κύλα της αντλίας και προέρχεται τόσο από ηλεκτρική ενέργεια όσο και καύση φυσικού αερίου.

### IV. Εκτονωτές

Οι εκτονωτές θεωρείται για απλούστευση ότι κατασκευάζονται κυρίως από ανοξείδωτο χάλυβα και περιέχει έλαιο και πως η κατεργασία η οποία πραγματοποιείται για την κατασκευή τους είναι η χύτευση του συγκεκριμένου μετάλλου. Επιπλέον πραγματοποιείται συγκόλληση για την κατασκευή τους η οποία μοντελοποιείται με το σετ δεδομένων “Welding, arc, steel GLO|Cut-off, U” για 0,16 m.

### V. Δεξαμενή Αποθήκευσης

Η δεξαμενή αποθήκευσης αποτελείται κυρίως από χάλυβα (Steel St 37-2) το οποίο μοντελοποιήθηκε με το σετ δεδομένων “Steel, unalloyed GLO| market for | Cut-off, U” και χαλκό λόγω του εναλλάκτη. Οι απαιτούμενες κατεργασίες υλικών περιλαμβάνουν, έλαση του χάλυβα (“hot rolling”) και στην διέλαση του χαλκού για την κατασκευή συρμάτων. Η ενέργεια κατασκευής της δεξαμενής αποθήκευσης προέρχεται τόσο από ηλεκτρισμό όσο και από καύση φυσικού αερίου σε βιομηχανικό κλίβανο.

### VI. Άλλες συνιστώσες

Οι σωληνώσεις του συστήματος είναι χάλκινες και για την κατασκευή τους απαιτείται έλαση του χαλκού. Ο κυκλοφορητής νερού μοντελοποιήθηκε με το σετ δεδομένων “Pump, 40W GLO| market for | Cut-off, U” αφού προηγήθηκε αναγωγή σύμφωνα με τα kW ισχύος του. Επιπλέον, αποτελείται κυρίως από κοχλιωτές συνδέσεις (συνδέσεις με σπείρωμα) και ως αποτέλεσμα δεν απαιτείται ηλεκτρική ή θερμική κατανάλωση για την κατασκευή του. Τέλος, το τροφοδοτικό δοχείο, θεωρείται για απλούστευση ότι αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα και η κατεργασία που πραγματοποιείται συνίσταται στην έλαση του ανοξείδωτου χάλυβα (“hot rolling”). Η ενέργεια κατασκευής του μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το σετ δεδομένων “hot water tank, 600l GLO| production | Cut-off, U” αφότου προηγήθηκε αναλογία σύμφωνα με τα λίτρα του δοχείου και προέρχεται τόσο από ηλεκτρική ενέργεια όσο και καύση φυσικού αερίου.

#### 3.2.4 Μεταφορά

Λόγω της μη επαρκούς γνώσης των τοποθεσιών παραγωγής των πρώτων υλών αλλά και αρκετών τοποθεσιών επεξεργασίας αυτών, δεν είναι δυνατή η αναλυτική και ακριβής καταγραφή όλων των αποστάσεων που σχετίζονται με το υπό εξέταση σύστημα. Οι αποστάσεις μεταφοράς για ορισμένα από τα μέρη των συνιστωσών του συστήματος παρέχονται από τους προμηθευτές και δε δημοσιοποιούνται στην παρούσα μελέτη.

- Σε ότι αφορά του εναλλάκτες θερμότητας, ο συμπυκνωτής και ο υποψύκτης μεταφέρονται από τη Σίνδο, Θεσσαλονίκης στον τελικό προορισμό (491 km) ενώ ο ατμοποιητής, από το Κορωπί, Αθήνα (40 km) .
- Οι γεννήτριες κατασκευάζονται στη Λυκόβρυση και διανύουν 14 km έως την τοποθεσία του εργαστηρίου.
- Οι εκτονωτές κατασκευάζονται στην Γαλλία και η μέση απόσταση από τον τόπο κατασκευής έως τον χώρο του εργαστηρίου λαμβάνεται ίση με 3229 km.
- Η αντλία διανύει μια απόσταση ίση με 3224 km από το εργοστάσιο κατασκευής της στο Ηνωμένο Βασίλειο έως τον χώρο του εργαστηρίου στην Αθήνα.
- Το ψυκτικό μέσο R-134a παράγεται στην Ολλανδία και μεταφέρεται μέσα σε δοχείο βάρους 22.5 kg, επομένως θεωρείται μέση απόσταση μεταφοράς έως την Αθήνα ίση με 2886 km.
- Για τις υπόλοιπες συνιστώσες, ο κυκλοφορητής νερού κατασκευάζεται στην Δανία (2594 km) ενώ οι σωληνώσεις και το τροφοδοτικό δοχείο κατασκευάζονται στα Οινόφυτα, Αθήνα (57 km).
- Η απόσταση μεταφοράς της δεξαμενής αποθήκευσης από τη Γερμανία στην Αθήνα λαμβάνεται ίση με 2450 km.

Οι μεταφορές μεγάλων αποστάσεων θεωρείται ότι πραγματοποιούνται οδικώς, με τη χρήση φορτηγού μέγιστου φορτίου μεγαλύτερου από 32 τόνους. Οι μεταφορές μικρών αποστάσεων που παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες θεωρείται ότι πραγματοποιούνται επίσης οδικώς με τη χρήση μικρού φορτηγού μέγιστου βάρους μικρότερου των 3.5 τόνων.

Όλες οι παραπάνω αποστάσεις μεταφοράς, καθώς και οι αντίστοιχες που αφορούν εγκατάσταση της διάταξης σε άλλες χώρες , έχουν υπολογιστεί προσεγγιστικά με τη χρήση των χαρτών της Google.

### 3.2.5 Τέλος Ζωής

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εξεταζόμενη διάταξη δεν έχει φτάσει στο τέλος του χρόνου ζωής της, δεν υπάρχουν δεδομένα σχετικά με τη διαχείριση αυτής μετά το τέλος της ζωής του . Συνεπώς, έγινε η υπόθεση πως όλες οι συνιστώσες ανακυκλώνονται μετά το τέλος ζωής του ORC, προκειμένου να συμπεριληφθεί στην AKZ του προϊόντος.

Αρχικά, λόγω του μικρού μεγέθους αυτών, θεωρείται ότι οι επιμέρους συνιστώσες της διάταξης αποσυναρμολογούνται και τα διάφορα υλικά διαχωρίζονται μηχανικά και χειροκίνητα στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Η φάση του διαχωρισμού δε λαμβάνεται υπόψη, καθώς η επίδρασή της στο συνολικό αντίκτυπο θεωρείται αμελητέα.

Κατά συνέπεια, θεωρείται πλήρης (100%) ανάκτηση και ανακύκλωση όλων των μετάλλων, ανάκτηση σε ποσοστό 90% του ψυκτικού R-134a και επαναχρησιμοποίηση αυτού, ενώ το υπόλοιπο 10% στέλνεται για καύση και πλήρης (100%) καύση για όλα τα μη μεταλλικά υλικά, όπως για παράδειγμα πλαστικά και λιπαντικά έλαια.

Σημειώνεται ότι για την ανακύκλωση των μετάλλων δε λαμβάνεται υπόψη κάποιο σετ δεδομένων καθώς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο συγκεκριμένο μοντέλο (“cut-off”) δεν υπάρχει κάποιο όφελος από αυτή, ενώ οι επιπτώσεις στο περιβάλλον που

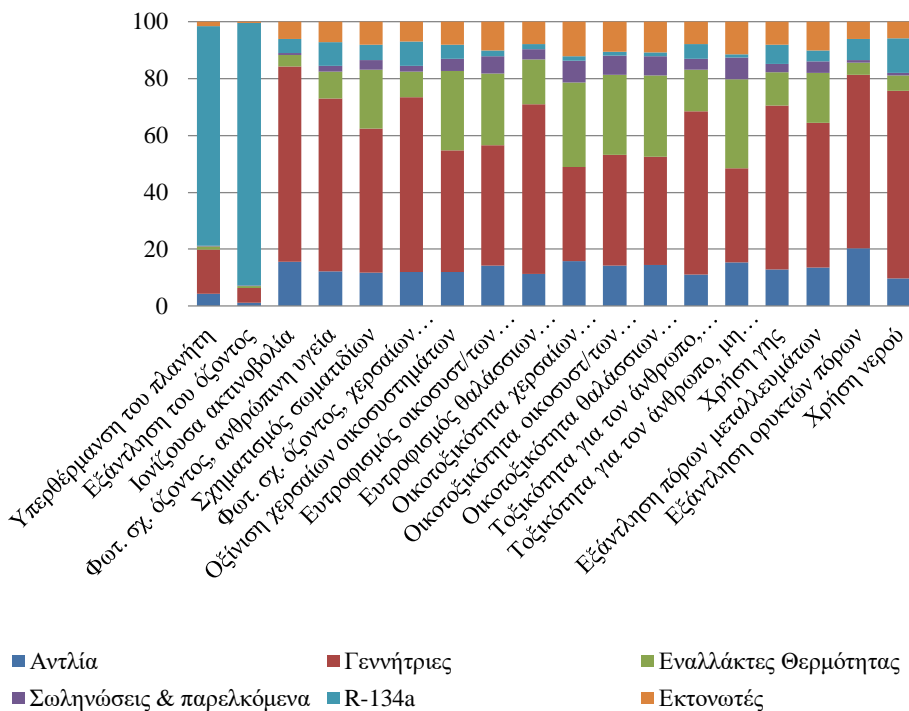
σχετίζονται με τη διαδικασία της ανακύκλωσης αποδίδονται στο ανακυκλωμένο προϊόν και όχι στον παραγωγό του μετάλλου προς ανακύκλωση. Για αυτό το λόγο τα σετ δεδομένων της ecoinvent που σχετίζονται με την ανακύκλωση είναι κενά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Αποτελέσματα

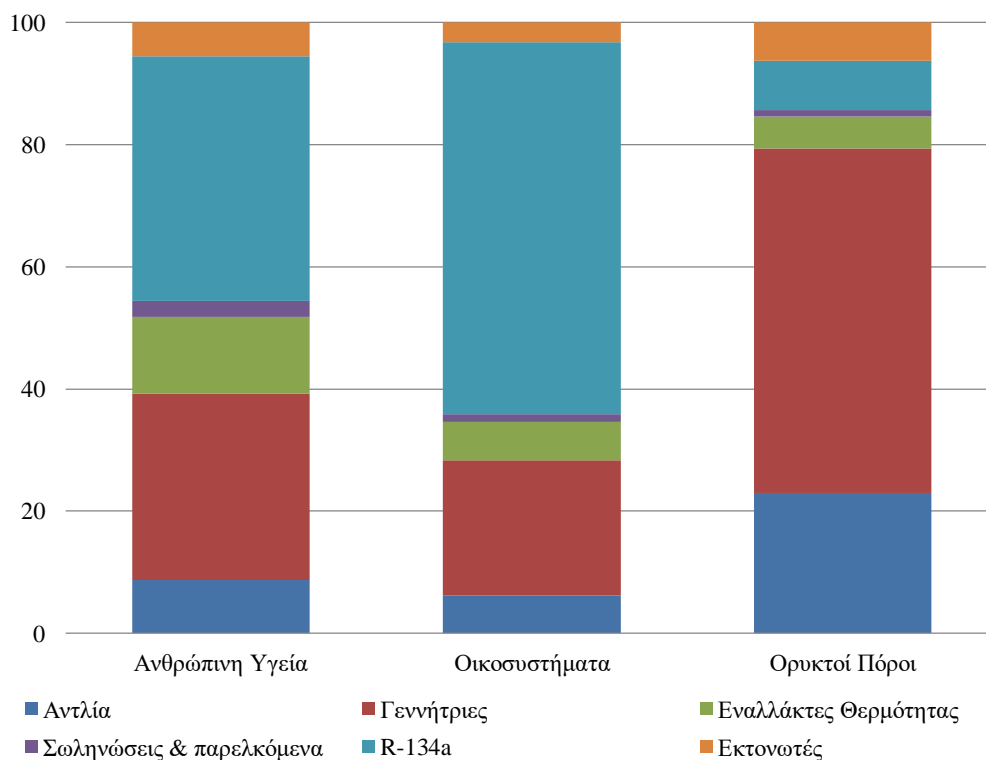
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής για το υπό εξέταση σύστημα, καθώς και για όλα τα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν.

### 4.1 Αποτελέσματα για το υπό εξέταση σύστημα

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine, τόσο μεμονωμένα όσο και σε σύγκριση με μία μηχανή εσωτερικής καύσης Diesel, η οποία παράγει ίσες MWh ισχύος όσες και το σύστημα marine ORC με τον Οργανικό κύκλο Rankine να υποκαθιστά ποσοστό περίπου 4% της συνολικής παραγωγής του ολικού συστήματος, για το σενάριο αναφοράς. Τα αποτελέσματα έχουν καταμεριστεί στις κύριες συνιστώσες του συστήματος. Για κάθε συνιστώσα, έχουν ληφθεί υπόψη οι πρώτες ύλες, η κατεργασία αυτών για την παραγωγή του τελικού προϊόντος, οι μεταφορές των πρώτων υλών στην τοποθεσία κατεργασίας αυτών καθώς και η μεταφορά του τελικού προϊόντος στην τοποθεσία εγκατάστασης της διάταξης αντίστοιχα, όπως και η μεταφορά και οι διαδικασίες επεξεργασίας των αποβλήτων στο χώρο διαχείρισης αυτών μετά το τέλος ζωής της διάταξης



**Εικ. 4.1.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε επίπεδο “midpoint”



**Εικ. 4.2.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε επίπεδο “endpoint”

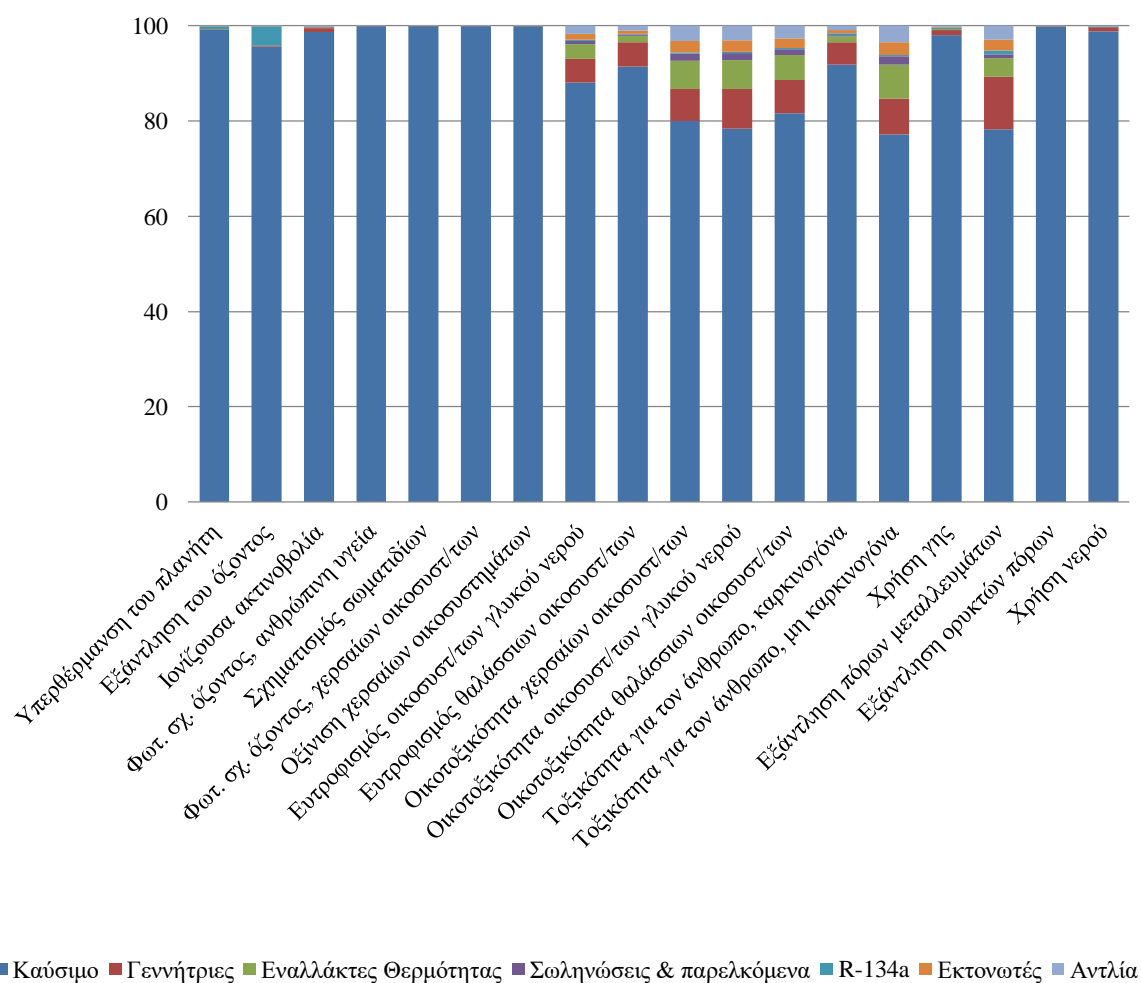
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται αυξημένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος στην υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP) και στην εξάντληση του όζοντος (ODP) που οφείλεται, επί το πλείστον, στο ψυκτικό μέσο R134a με ποσοστό που ξεπερνά το 75% και 90% αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη, οι απώλειες του ψυκτικού μέσου έχουν σημαντική επίδραση λόγω της μεγάλης τιμής του δυναμικού (GWP) υπερθέρμανσης του πλανήτη του R-134a (GWP = 1430 [46]). Αναφορικά με τη εξάντληση του όζοντος, οι απώλειες του ψυκτικού μέσου δεν έχουν κάποια επίδραση, καθώς το R-134a δεν περιέχει χλώριο και επομένως το δυναμικό εξάντλησης του όζοντος αυτού είναι μηδενικό (ODP = 0). Ωστόσο, άλλες ουσίες οι οποίες εκπέμπονται στον κύκλο ζωής αυτού, όπως το μονοχλωροτετραφθοροαιθάνιο (R-124) και το τριχλωροτριφθοροαιθάνιο (R-113) έχουν επίπτωση στην εξάντληση του όζοντος [47] και δικαιολογούν το αυξημένο ποσοστό. Η συνιστώσα με αξιοσημείωτη συνεισφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι οι γεννήτριες με ποσοστό 15%, καθώς αποτελούν συνολικά την μεγάλη σε μάζα συνιστώσα του συστήματος με αποτέλεσμα τόσο η εξόρυξη των μετάλλων όσο και οι κατεργασίες αυτών να συνεισφέρουν στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα το οποίο με την σειρά του αυξάνει τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο στην συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων.

Σε ό,τι αφορά την εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων, τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο έχουν οι γεννήτριες με ποσοστό 51% και ακολουθούν οι εναλλάκτες θερμότητας, η αντλία και οι εκτονωτές με ποσοστά 17%, 13% και 8%, αντίστοιχα. Ο παράγοντας χαρακτηρισμού της συγκεκριμένης κατηγορίας επιπτώσεων είναι η δυναμικότητα του πλεονάζοντος μεταλλεύματος, κατά συνέπεια είναι αναμενόμενη η φθίνουσα σειρά ποσοστών καθώς είναι ευθέως ανάλογα με τη μάζα των μετάλλων που αποτελείται η κάθε συνιστώσα. Πιο συγκεκριμένα, οι γεννήτριες αποτελούνται περίπου από 172 kg μέταλλα, οι εναλλάκτες θερμότητας από 97 kg μέταλλα, ενώ η αντλία και οι εκτονωτές από 21 kg και 16 kg μέταλλα αντίστοιχα. Αναφορικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, παρατηρείται πως ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αντίκτυπος οφείλεται στις γεννήτριες με ποσοστά που κυμαίνονται από 68% έως 33%. Τα αυξημένα αυτά ποσοστά οφείλονται κυρίως στο ότι οι γεννήτριες αποτελούν μια ενεργοβόρα κατασκευή.

Σε επίπεδο “endpoint” παρατηρείται ότι το ψυκτικό μέσο R134a επιδρά σημαντικά τόσο στην Ανθρώπινη Υγεία όσο και στα Οικοσυστήματα με ποσοστό 40% και 61% αντίστοιχα, γεγονός που εξηγείται λόγω των αυξημένων ποσοστών του στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην εξάντληση του όζοντος τα οποία επηρεάζουν και τις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες επιπτώσεων. Αναφορικά με την βλάβη στη διαθεσιμότητα πόρων, οι γεννήτριες έχουν το υψηλότερο ποσοστό περιβαλλοντικού αντικτύπου της τάξεως του 56% και ακολουθεί η αντλία με ποσοστό 23%.

Στην **Εικ. 4.3** παρουσιάζεται το διάγραμμα με την επιμέρους ανάλυση των συνιστωσών του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “midpoint”. Παράλληλα, επιλέγεται να εμφανίζεται ξεχωριστά η επίπτωση της κατανάλωσης καυσίμου diesel για τη λειτουργία του συστήματος. Παρατηρείται η επίδραση του καυσίμου είναι πολύ σημαντική σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων με ποσοστά από 77,2% έως και 99,9 %, με πιο σημαντική επίπτωση στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στο φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος και στην οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων.

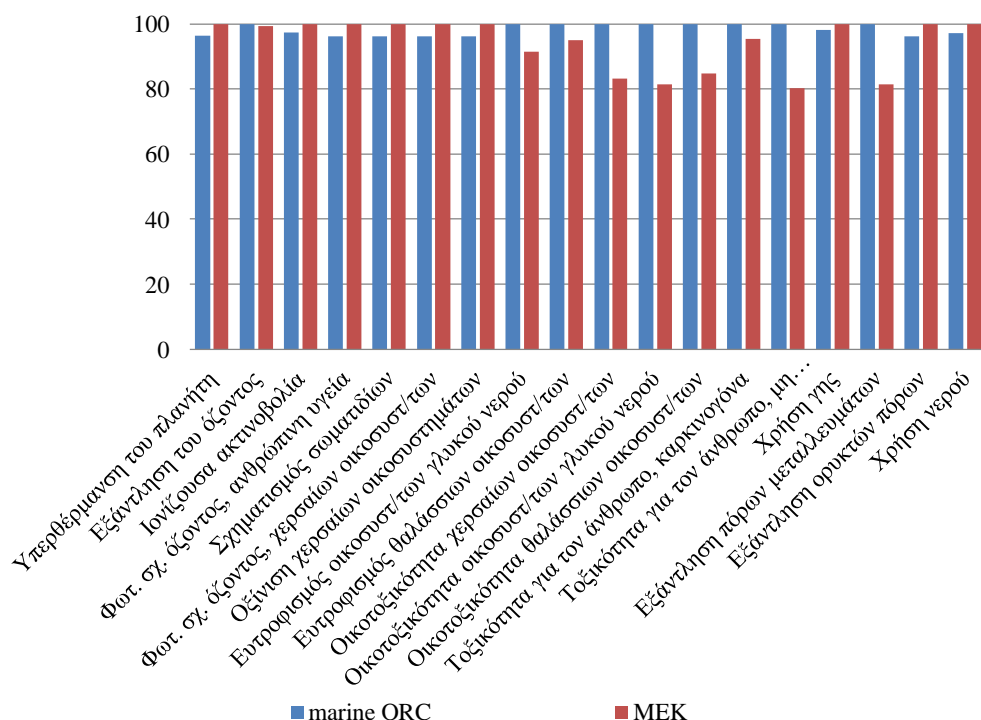




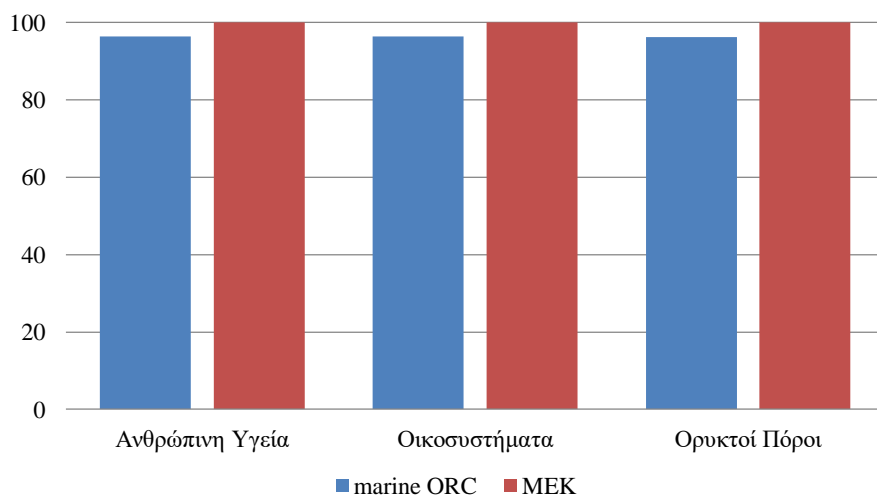
**Εικ. 4.3.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine και της επίδρασης του καυσίμου σε επίπεδο “midpoint”

Όσον αφορά τη σύγκριση της μηχανής εσωτερικής καύσης diesel η οποία παράγει 312 MWh ετησίως με το σύστημα marine ORC όπου ο Οργανικός Κύκλος Rankine παράγει 12 MWh ετησίως υποβοηθώντας την MEK, τα δύο συστήματα δεν έχουν σημαντικές διαφορές στις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις με την ποσοστιαία διαφορά τους σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων να κυμαίνεται από 1% έως 20%. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα marine ORC παρουσιάζει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά 19% στην εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων λόγω των μετάλλων των συνιστωσών του. Η MEK ωστόσο, συνεισφέρει περισσότερο στην υπερθέρμανση του πλανήτη, γεγονός που οφείλεται στις αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και στην εξάντληση ορυκτών πόρων, καθώς στην περίπτωση της MEK χρησιμοποιούνται 5 τόνους επιπλέον καυσίμου ετησίως. Παρατηρείται πως η MEK έχει καλύτερη επίδοση στις κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα, γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλκό που έχουν οι περισσότερες συνιστώσες του συστήματος του

Οργανικού Κύκλου Rankine. Σε επίπεδο “endpoint” φαίνεται πως το σύστημα marine ORC έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο συνολικά με ποσοστιαία διαφορά σε σχέση με την MEK η οποία είναι σχεδόν σταθερή, περίπου 4%, και στις τρεις κατηγορίες επιπτώσεων. Η μείωση του καυσίμου έχει σημαντική επίδραση σε σχεδόν όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων σε επίπεδο “midpoint” και παρόλο που ο Οργανικός Κύκλος Rankine υποκαθιστά μόνο το 4% της MEK, τελικά το σύστημα marine ORC είναι λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον.

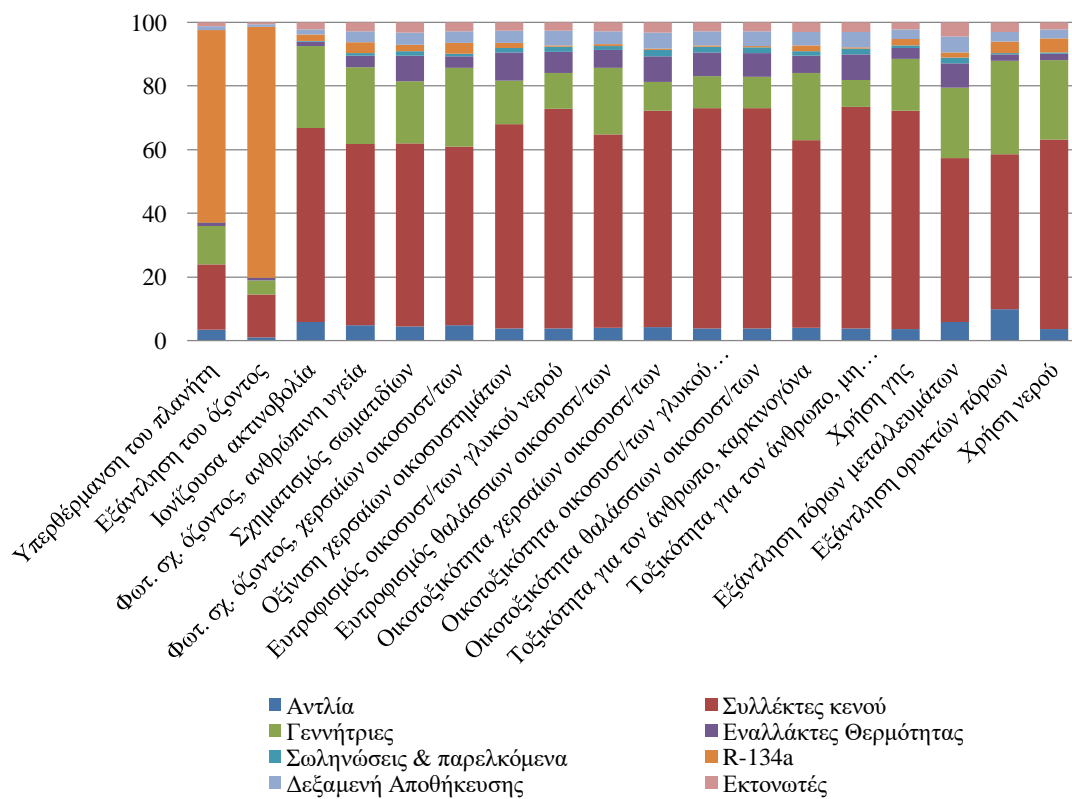


**Εικ. 4.4.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε αναφορά με μια MEK diesel σε επίπεδο “midpoint”

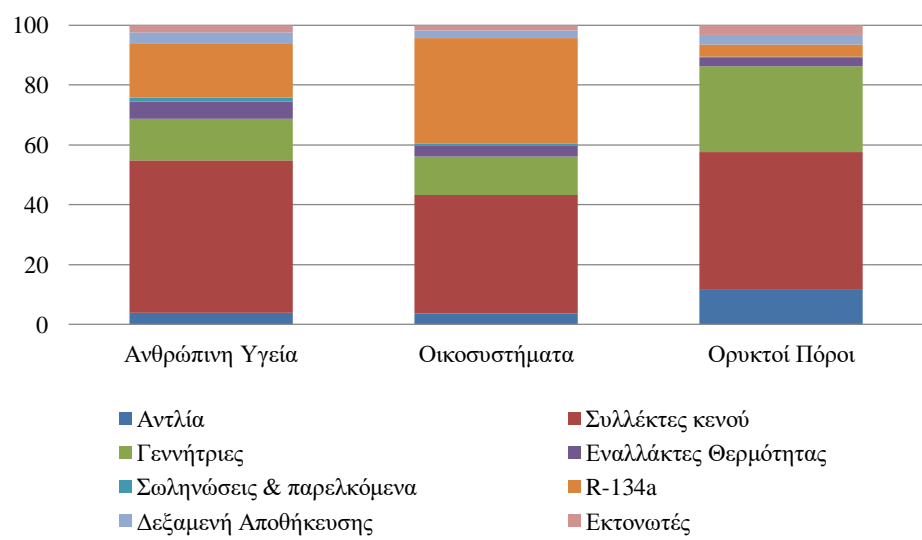


**Εικ. 4.5.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine σε αναφορά με μια MEK diesel σε επίπεδο “endpoint”

Εάν το σύστημα του οργανικού κύκλου Rankine τροφοδοτείται εναλλακτικά από ηλιακούς συλλέκτες κενού 78,2 m<sup>2</sup> και χρησιμοποιείται μια δεξαμενή αποθήκευσης 1000 lt., τότε προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα σε επίπεδο “endpoint” και “midpoint”, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

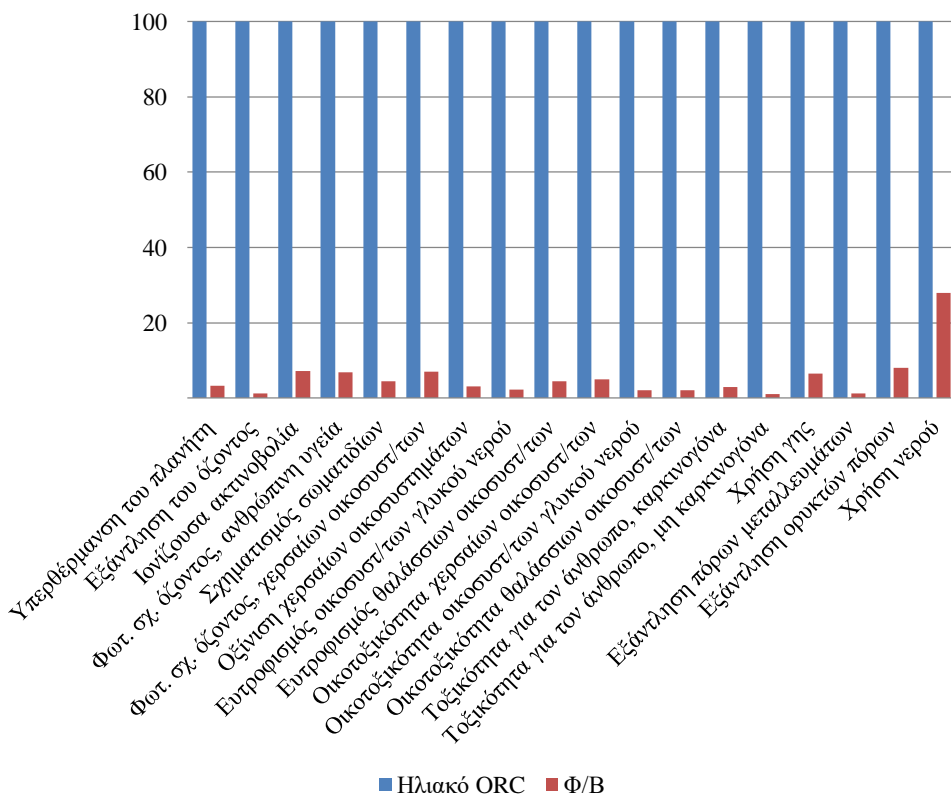


Εικ. 4.6. Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο "midpoint"

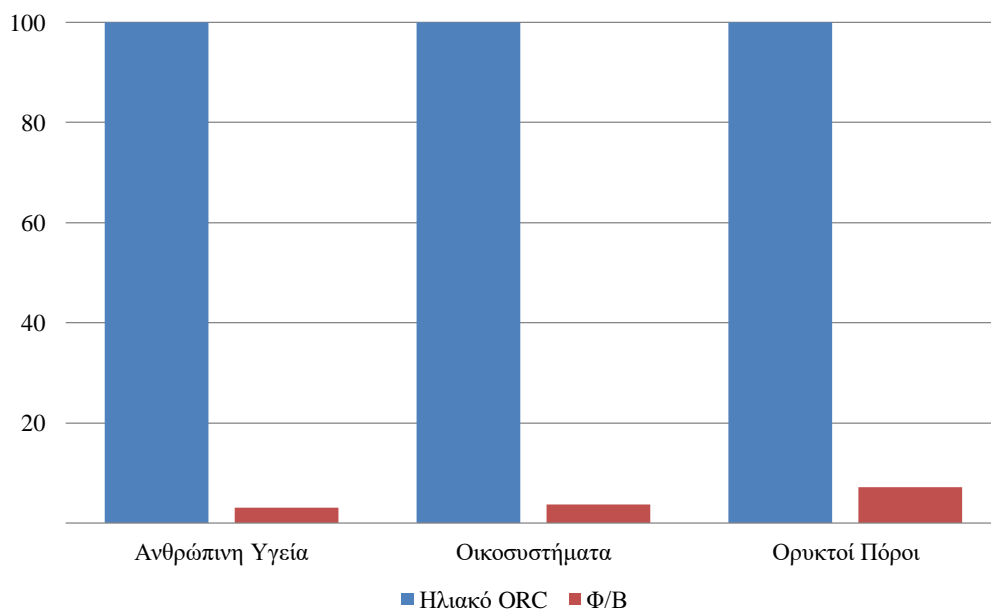


Εικ. 4.7. Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο "endpoint"

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, (Εικ. 4.6) αξιόλογο αντίκτυπο στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων παρουσιάζουν οι ηλιακοί συλλέκτες κενού με συνεισφορά από 13 % για την εξάντληση του όζοντος έως 69,5% για την καρκινογόνα τοξικότητα για τον άνθρωπο. Η επίπτωση των συλλεκτών στις διάφορες κατηγορίες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες καθώς είναι μία συνιστώσα του συστήματος, η οποία αποτελείται από μεγάλη μάζα πρώτων υλών, ενώ η κατασκευή αυτής συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρισμού, σύμφωνα με τα δεδομένα που παρασχέθηκαν από τους κατασκευαστές. Σε επίπεδο “endpoint”, οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν τη συνιστώσα με τον πιο σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε όλες τις κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, καταλαμβάνουν μεγαλύτερα ποσοστά ακόμα και από το ψυκτικό μέσο R134a το οποίο στο σύστημα marine ORC εμφάνιζε πολύ υψηλά ποσοστά τόσο στην κατηγορία επιπτώσεων την ανθρώπινης υγείας όσο και σε αυτή των οικοσυστημάτων τα οποία ήταν της τάξης του 40 και 61% , αντίστοιχα.



**Εικ. 4.8.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine αναφορικά με Φ/Β σε επίπεδο “midpoint”



**Εικ. 4.9.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine αναφορικά με Φ/Β σε επίπεδο “endpoint”

Για το σενάριο αναφοράς του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine εκκινούμενου από ηλιακούς συλλέκτες, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πολυκρυσταλλικά πάνελ ονομαστικής ισχύος  $300 W_p$  και συνολικής επιφάνειας  $8.3 m^2$ , τα οποία μοντελοποιήθηκαν με το σετ δεδομένων “Photovoltaic panel, multi-si, wafer | GLO | market for” και παράγουν την ίδια ενέργεια με το ηλιακό ORC. Όπως παρατηρείται και από τα διαγράμματα, το ηλιακό σύστημα ORC παρουσιάζει σημαντικά ισχυρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τα Φ/Β σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint”. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι το ηλιακό σύστημα ORC αποτελείται από πολλές συνιστώσες τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται, οι κατεργασίες αυτών καθώς και η απαιτούμενη ενέργεια συναρμολόγησης τους έχουν σημαντικά ισχυρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο έναντι στη πολύ πιο απλή κατασκευή των φωτοβολταϊκών πάνελ. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί οι συλλέκτες αποτελούν πιο βαριά και ενεργοβόρα κατασκευή σε σύγκριση με τα Φ/Β τα οποία έχουν μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το αντίστοιχο σετ της ecoinvent και κατά συνέπεια δεν είναι τόσο λεπτομερή όσο είναι οι συλλέκτες, τα δεδομένα των οποίων έχουν προέλθει από την κατασκευάστρια εταιρία.

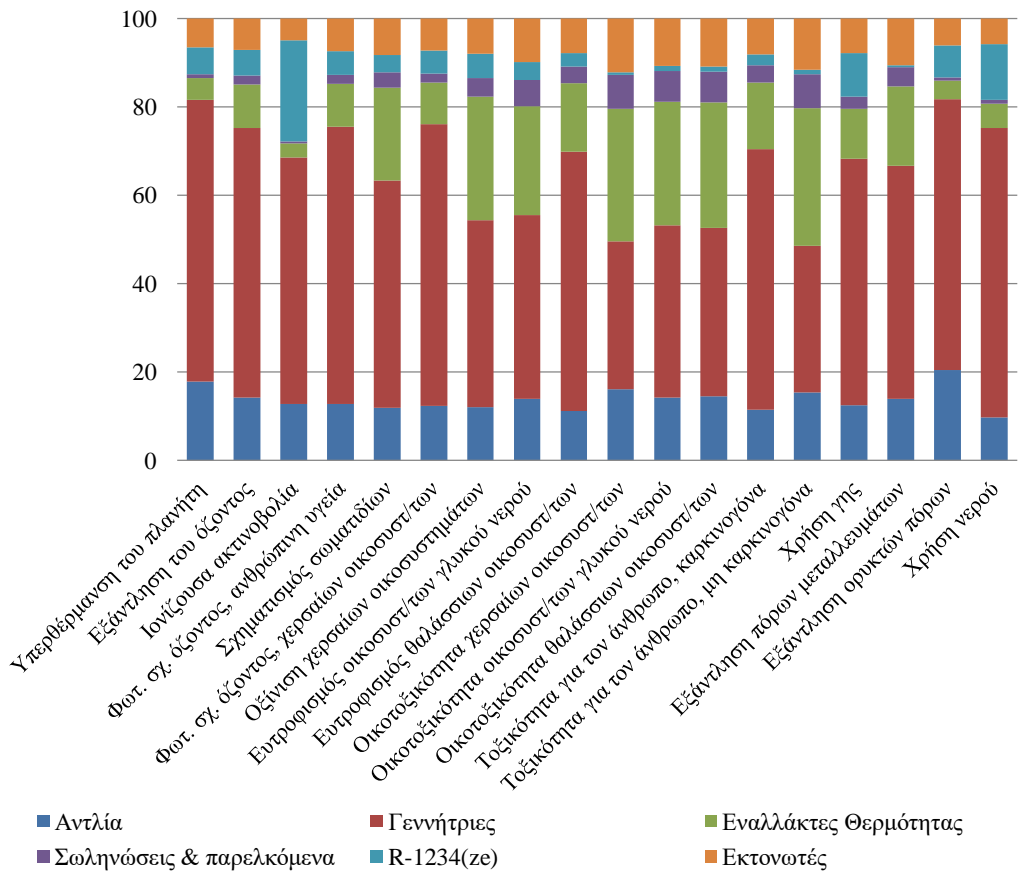
**Πιν. 4.1.** Ενδεικτικά περιεχόμενα του σετ δεδομένων “Photovoltaic panel, multi-Si wafer |GLO| production | Cut-off, U”

<b>Photovoltaic panel, multi-Si wafer  GLO  production   Cut-off, U</b>	<b>1</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
Aluminium alloy, AlMg3  GLO  market for   Cut-off, U	2,63	kg
Copper  GLO  market for   Cut-off, U	0,11	kg
Electricity, medium voltage  RER  market group for   Cut-off, U	4,7	kWh
Photovoltaic cell, multi-Si wafer  GLO  market for   Cut-off, U	0,932	m <sup>2</sup>
Solar glass, low-iron  GLO  market for   Cut-off, U	10,08	kg
Silicone product  RER  market for silicone product   Cut-off, U	0,122	kg
Tempering, flat glass  RER  processing   Cut-off, U	10,08	kg
Wire drawing, copper  RER  processing   Cut-off, U	0,11	kg
Heat, district or industrial, natural gas  RER  market group for   Cut-off, U	4,86	MJ
Ethylvinylacetate, foil  GLO  market for   Cut-off, U	1,01	kg
Waste plastic, mixture  RER  market group for waste plastic, mixture   Cut-off, U	1,69	kg
Waste mineral oil  CH  market for waste mineral oil   Cut-off, U	3,63	kg

## 4.2 Μελέτη Σεναρίων

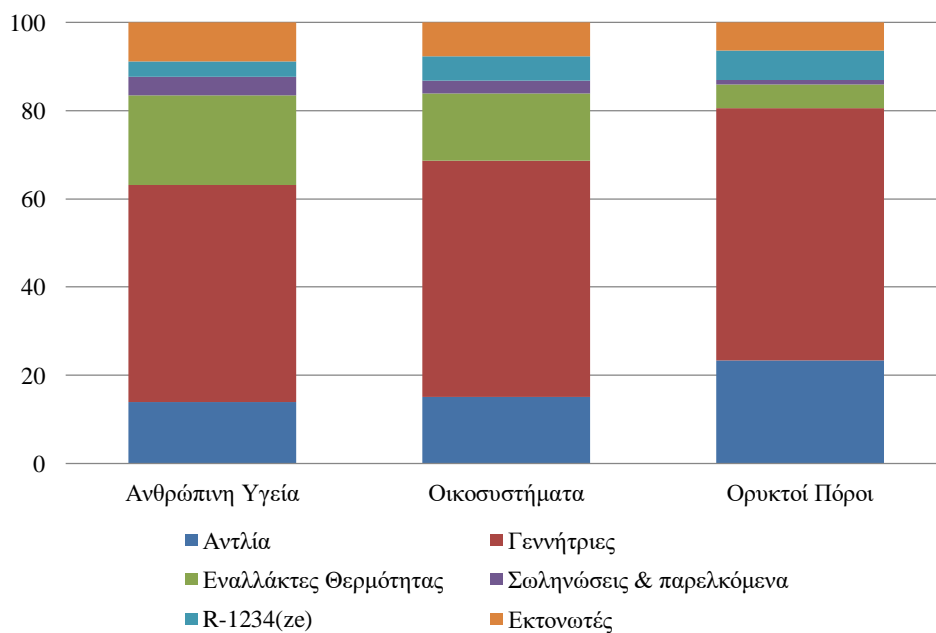
### 4.2.1 Επίδραση του ψυκτικού μέσου στο marine ORC

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα για την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος του marine ORC για την περίπτωση της αντικατάστασης του ψυκτικού μέσου R134a με R124ze(E). Το συγκεκριμένο ψυκτικό μέσο, λόγω έλλειψης στοιχείων από την βάση δεδομένων τηςecoinvent έχει μοντελοποιηθεί με τα εξής σετ δεδομένων “N-olefins |RER| production | Cut-off, U” και “Fluorine, liquid |RER| production Cut-off, U” με ποσότητες 20,98 kg και 41,97 kg αντίστοιχα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το σύστημα καταναλώνει ετησίως 783,9 MW που αντιστοιχούν σε 65.930 kg πετρέλαιο ως καύσιμο, δηλαδή περίπου μισό τόνο λιγότερο σε σχέση με τη λειτουργία με ψυκτικό μέσο R134a. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται σε επίπεδο “endpoint” και “midpoint” τόσο ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του συστήματος marine ORC με χρήση R1234ze(E) όσο και συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος marine ORC με τα δύο διαφορετικά ψυκτικά μέσα αναφορικά με μια μηχανή εσωτερικής καύσης diesel.



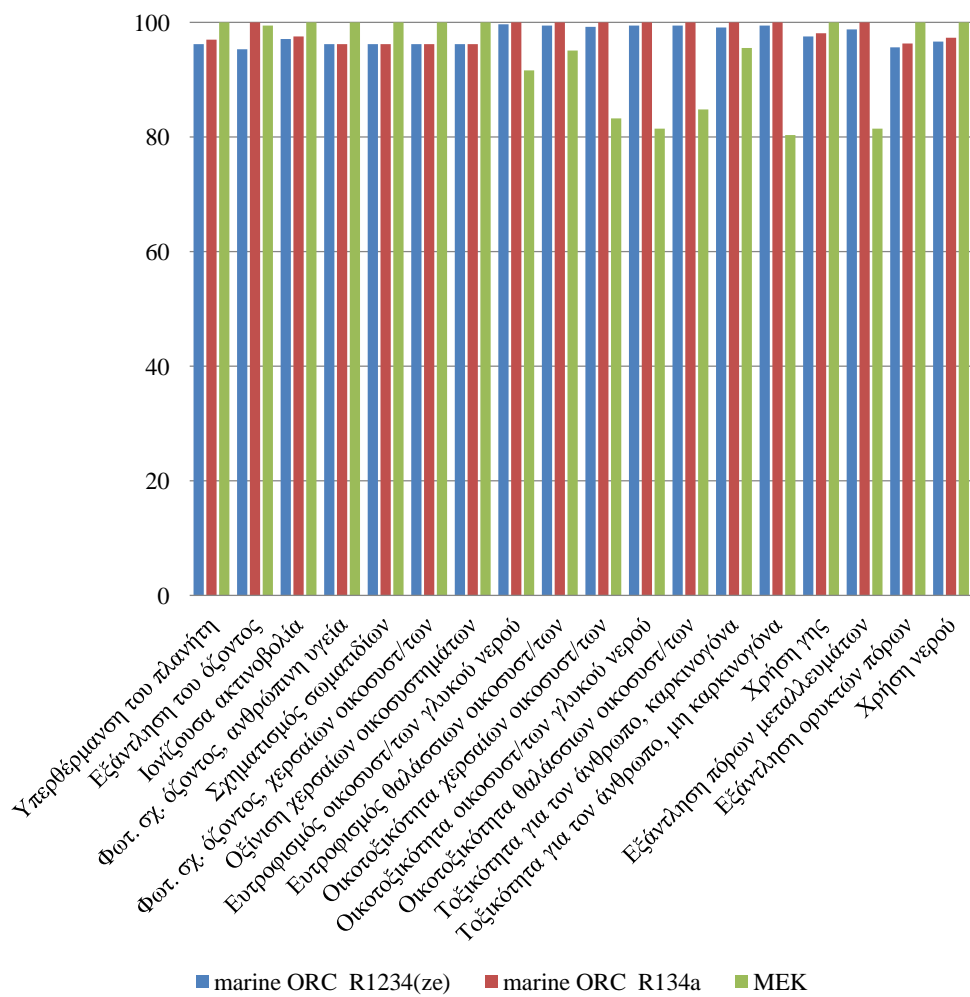
**Εικ. 4.10.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “midpoint”



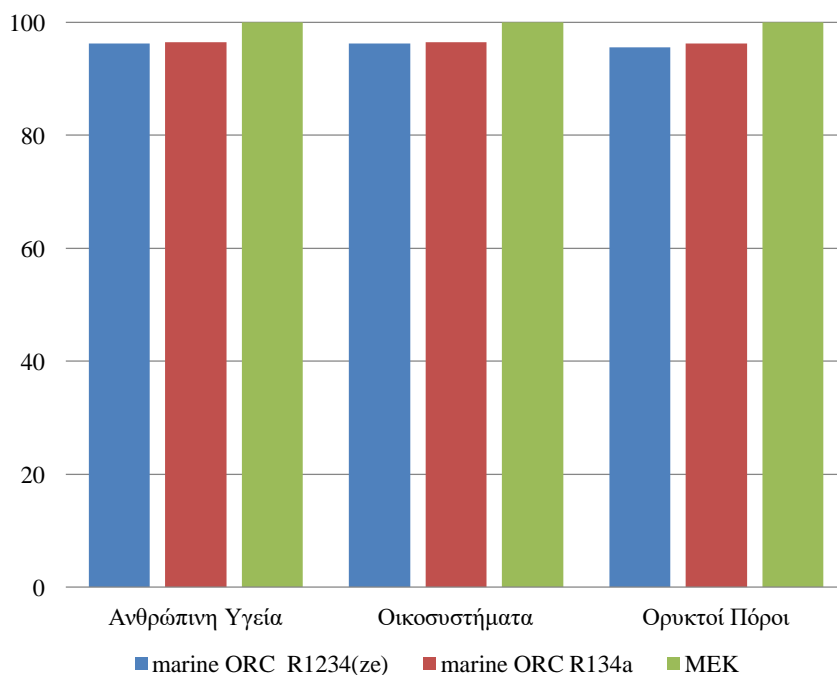


**Εικ. 4.11.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “endpoint”

Σε επίπεδο “midpoint”, από το διάγραμμα (Εικ. 4.10), συμπεραίνεται ότι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του ψυκτικού μέσου έχει περιοριστεί σημαντικά μετά την αντικατάστασή του. Πιο συγκεκριμένα, στην κατηγορία επιπτώσεων υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP), η επίδραση του εργαζόμενου μέσου έχει μειωθεί από 77% σε 6,2% και στην κατηγορία της εξάντλησης του όζοντος (ODP), από 92% σε 5,8% μετά την αντικατάστασή του R-134a με R-1234ze. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι το R-134ze είναι αισθητά λιγότερο βλαβερό για το περιβάλλον, γεγονός που επιβεβαιώνει την αρχική επιλογή της αντικατάστασης του ψυκτικού μέσου. Αναφορικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε σχέση με τη λειτουργία του συστήματος με χρήση του R-134a, με τις γεννήτριες να έχουν τον πιο ισχυρό αντίκτυπο. Σε επίπεδο “endpoint”, παρατηρείται συνοχή με τα αποτελέσματα του επιπέδου “midpoint”, με την επίδραση των γεννητριών να παρουσιάζουν κυρίαρχο ρόλο σε όλες τις κατηγορίες βλάβης.



**Εικ. 4.12.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “midpoint”



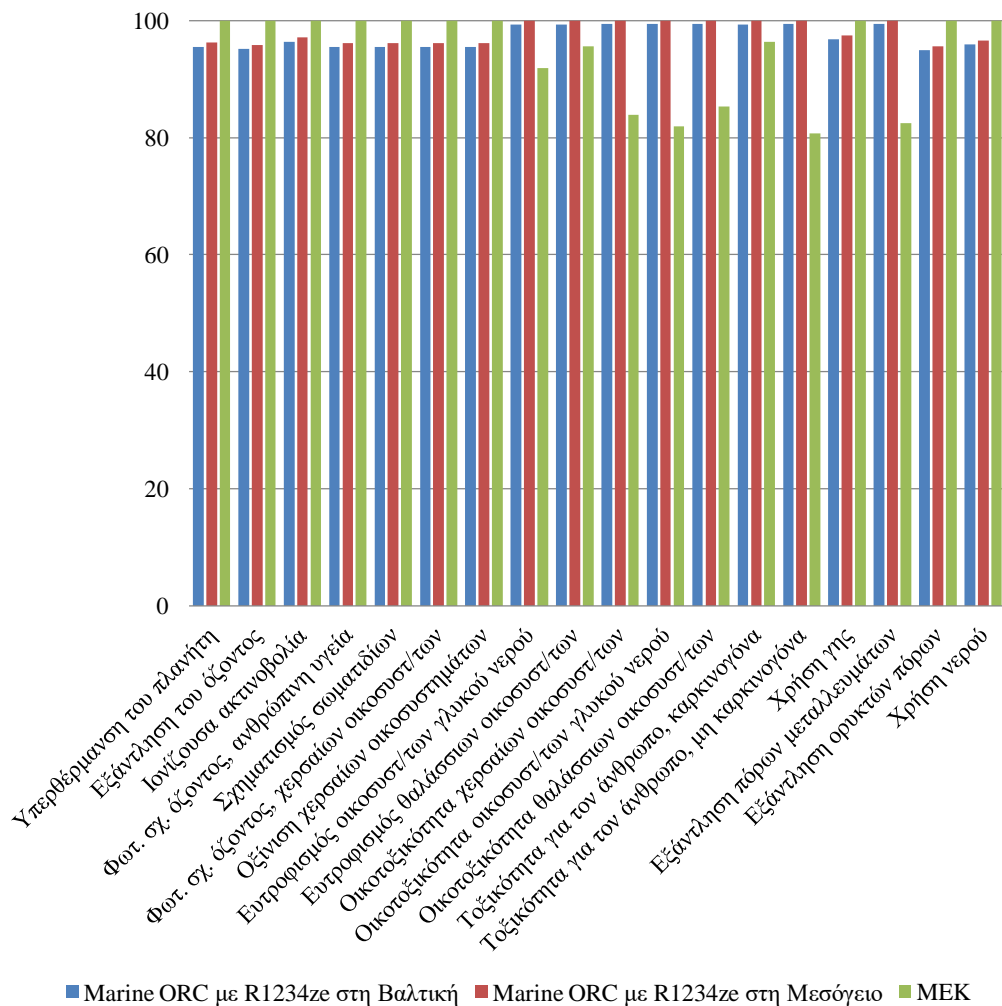
**Εικ. 4.13.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze σε επίπεδο “endpoint”

Αναφορικά με τα συγκριτικά αποτελέσματα των τριών συστημάτων, σε επίπεδο “midpoint”, το σύστημα marine ORC με χρήση R-1234ze παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη λειτουργία του συστήματος με χρήση R-134a σε όλες τις κατηγορίες βλάβης, γεγονός που οφείλεται στο λιγότερο βλαβερό ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη περίπτωση καθώς και στην μικρότερη ποσότητα καυσίμου που απαιτείται, ενώ και τα δυο προαναφερθέντα συστήματα έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με την MEK στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων. Στις κατηγορίες βλάβης που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα και την εξάντληση μεταλλευμάτων, μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο έχει η MEK, όπως ήταν αναμενόμενο αφού η χρήση του χαλκού αλλά και των υπόλοιπων μετάλλων είναι σαφώς μικρότερη στο συγκεκριμένο σύστημα. Στις προαναφερθείσες κατηγορίες, αμέσως μετά την MEK, ακολουθεί το σύστημα marine ORC με χρήση R-1234ze.

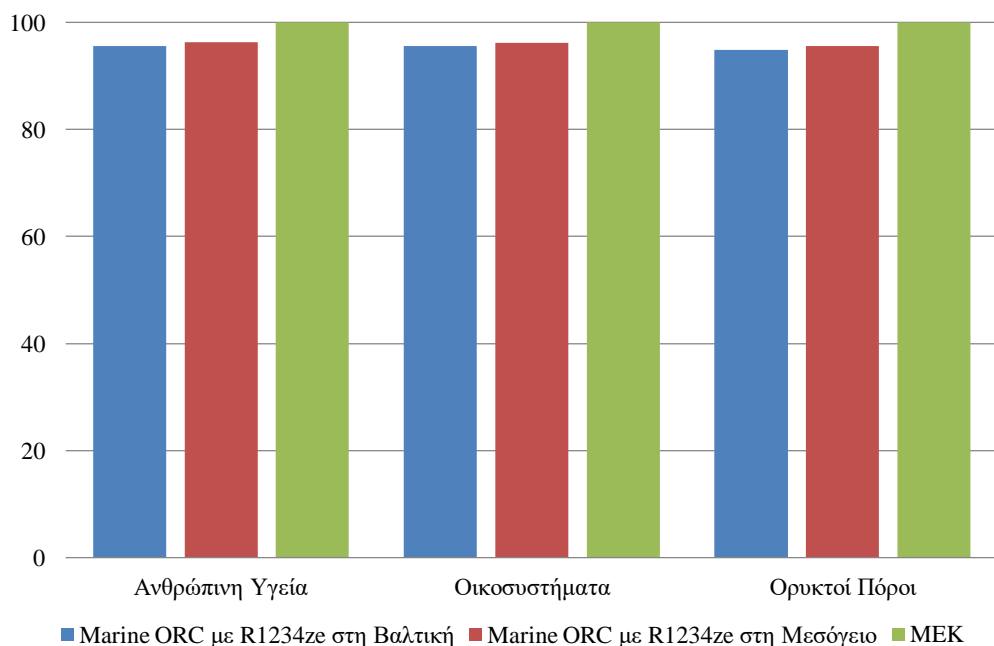
#### 4.2.2 Επίδραση του ψυκτικού μέσου και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο marine ORC

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αποτελέσματα για την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος του marine ORC με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze για την περίπτωση διαφοροποίησης της θερμοκρασίας του νερού κατά τη συμπύκνωση. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του συστήματος marine ORC είχε θεωρηθεί ότι πραγματοποιείται στη θάλασσα της Μεσογείου και πως η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού κατά τη

συμπύκνωση είναι στους 25 °C. Στο σενάριο αυτό, θεωρείται πως το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας όπου το νερό βρίσκεται σε θερμοκρασία 15-18 °C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ηλεκτροπαραγωγή του συστήματος σε ποσοστό της τάξεως του 8,5%.



**Εικ. 4.14.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze στην Βαλτική σε επίπεδο “midpoint”

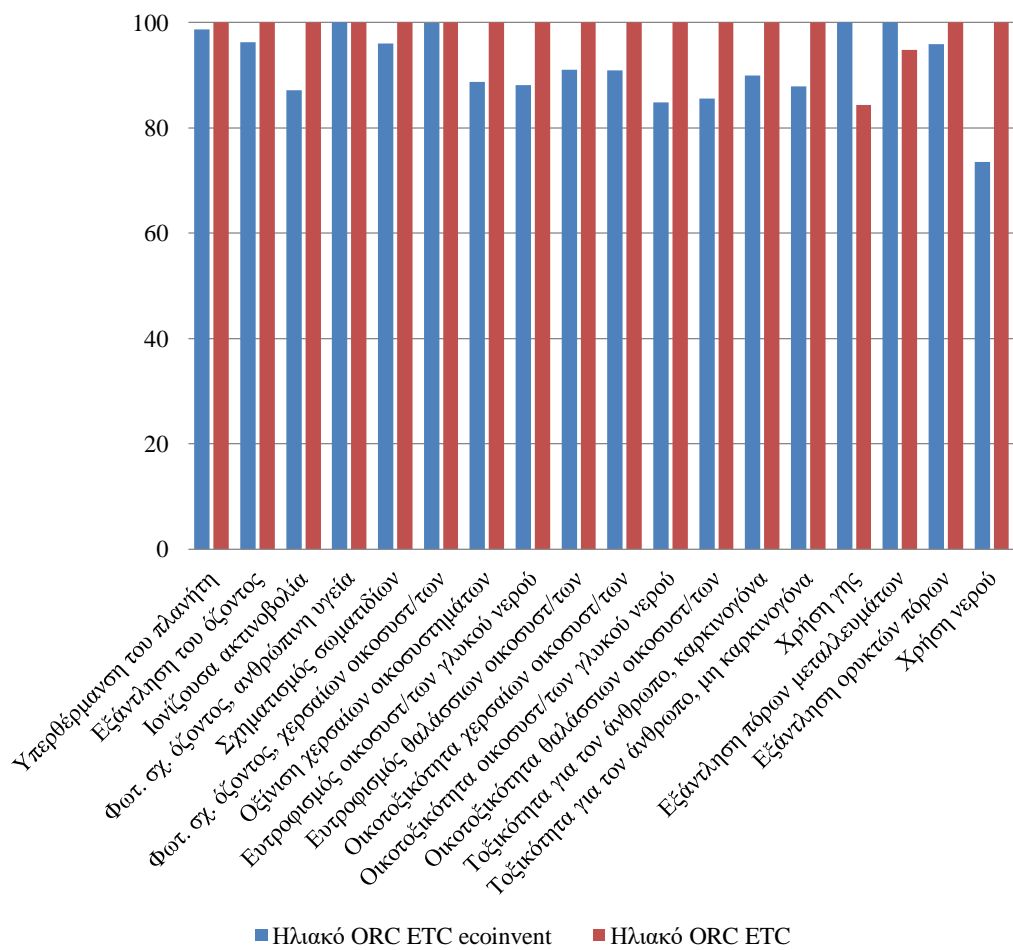


**Εικ. 4.15.** Συγκριτικά αποτελέσματα του συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine marine με χρήση ψυκτικού μέσου R-1234ze στην Βαλτική σε επίπεδο “endpoint”

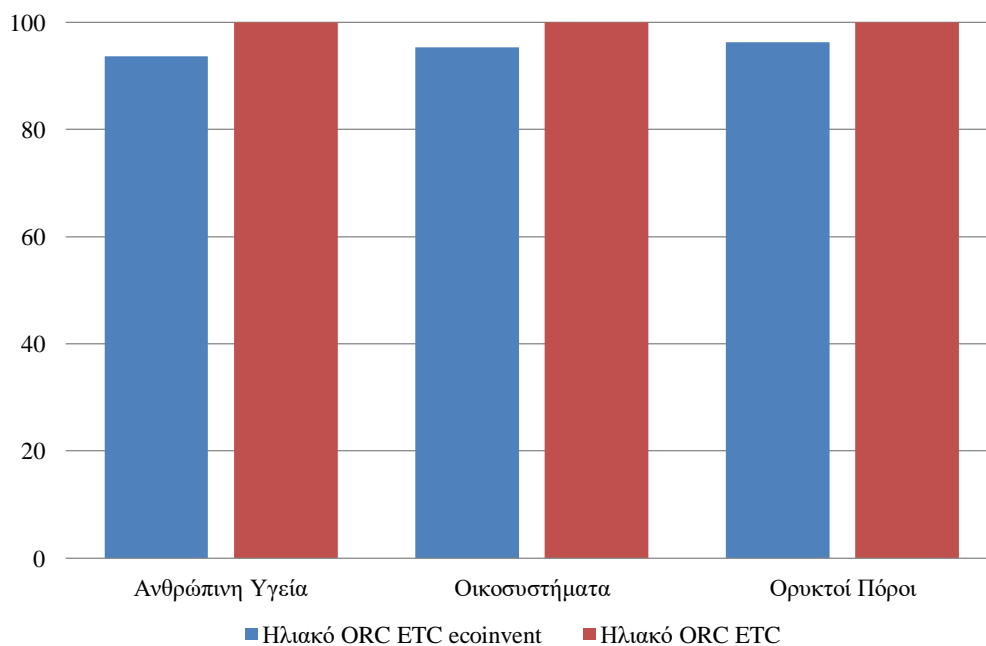
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, σε επίπεδο “midpoint”, όταν το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με την περίπτωση λειτουργίας του στην Μεσόγειο θάλασσα σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων με μέση ποσοστιαία διαφορά στις κατηγορίες βλάβης περίπου 0,65%, και αρκετά καλύτερη συγκριτικά με την MEK στις περισσότερες κατηγορίες βλάβης. Η MEK παρουσιάζει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο στις κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα και την εξάντληση μεταλλευμάτων, όπως και στο προηγούμενο σενάριο, ο οποίος οφείλεται στο ότι οι επιμέρους συνιστώσες του Οργανικού Κύκλου Rankine περιλαμβάνουν σημαντικές ποσότητες χαλκού και λοιπών μετάλλων. Επιπλέον, η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης οδηγεί σε αυξημένη ηλεκτροπαραγωγή και κατ’ επέκταση σε εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου, συνεπώς και μειωμένες εκπομπές στην ατμόσφαιρα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την γενικότερη καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint”.

#### 4.2.3 Επίδραση ηλιακών συλλεκτών στο ηλιακά εκκινούμενο ORC

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση του ηλιακά εκκινούμενου ORC με συλλέκτες κενού με πραγματικά δεδομένα [48] και με συλλέκτες κενού από το διαθέσιμο σετ δεδομένων της ecoinvent “Evacuated tube collector |GLO |market for, Cut-off, U”.



**Εικ. 4.16.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με συλλέκτες κενού σε επίπεδο “midpoint”



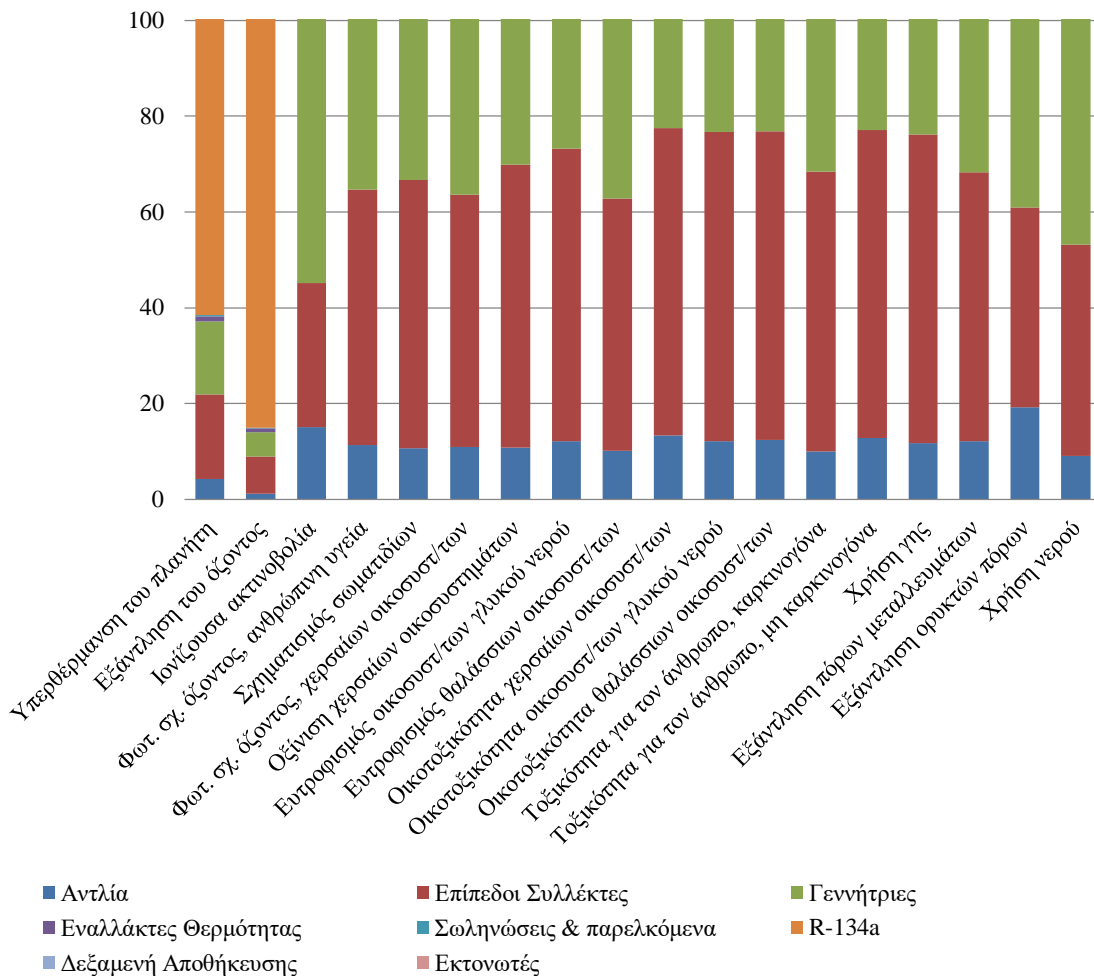
**Εικ. 4.17.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με συλλέκτες κενού σε επίπεδο “endpoint”

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το σύστημα του ηλιακά εκκινούμενου ORC με συλλέκτες κενού με το σετ δεδομένων της ecoinvent παρουσιάζει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint” σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα με πραγματικά δεδομένα για τους συλλέκτες κενού σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες βλάβης. Το συγκεκριμένο σετ δεδομένων δημιουργήθηκε το 2011 και τα στοιχεία που παρέχονται από το σετ δεδομένων είναι ελλιπή σε σχέση με τα πραγματικά γεγονότα που δικαιολογεί την καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα περιέχει 30% λιγότερο χαλκό σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Η συνολική μάζα των μετάλλων που περιλαμβάνονται στο σετ δεδομένων είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 35%, γεγονός που εξηγεί την χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση του solar ORC με συλλέκτες κενού της ecoinvent στην εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων και κατά συνέπεια και στη χρήση γης κυρίως λόγω των εξορύξεων αυτών.

#### 4.2.4 Επίδραση της αντικατάστασης των συλλεκτών στο ηλιακά εκκινούμενο ORC

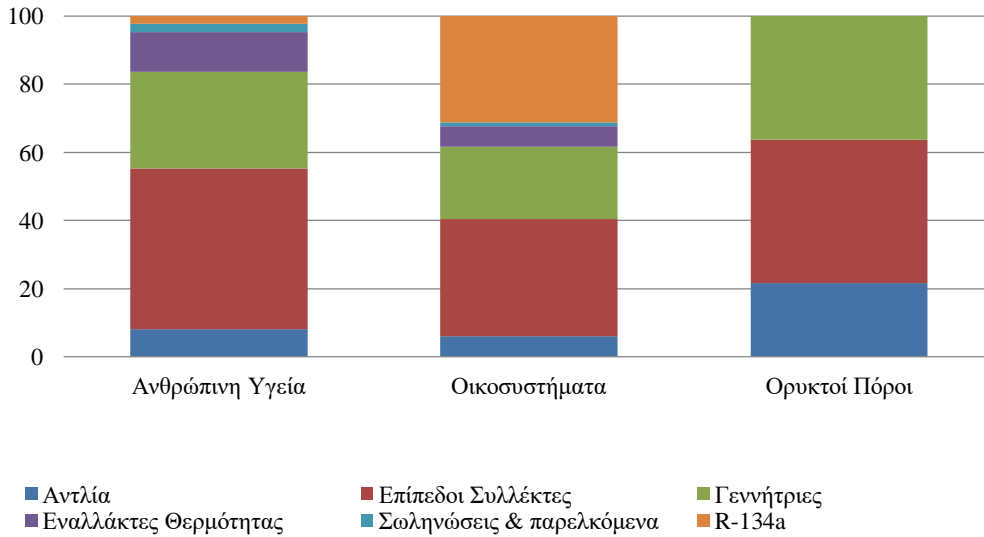
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine, στην περίπτωση που οι συλλέκτες κενού αντικατασταθούν από επίπεδους συλλέκτες, τόσο μεμονωμένα όσο και σε σύγκριση με Φ/Β αλλά και το αρχικό σύστημα του ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine

με συλλέκτες κενού για το σενάριο αναφοράς. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η συλλεκτική επιφάνεια είναι 76,48 m<sup>2</sup> και το σύστημα παράγει 7153,6 kWh ετησίως.

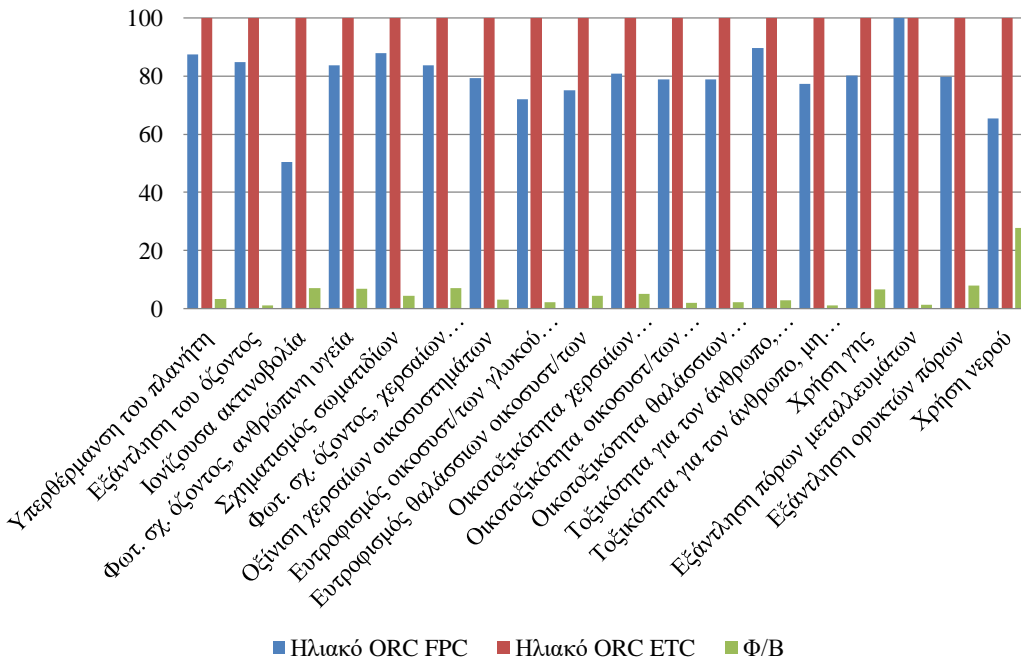


**Εικ. 4.18.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “midpoint”

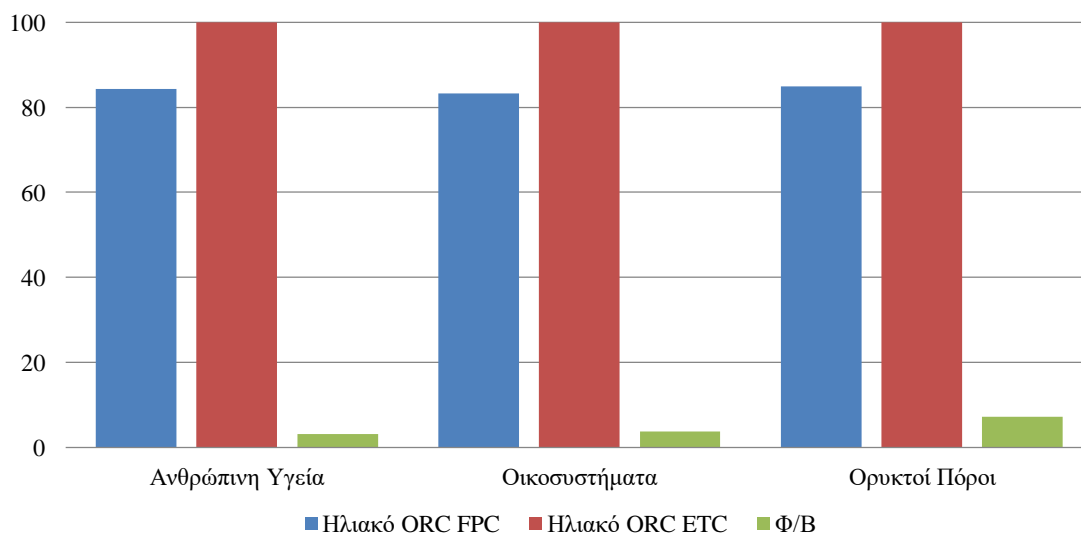




**Εικ. 4.19.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “endpoint”



**Εικ. 4.20.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “midpoint”



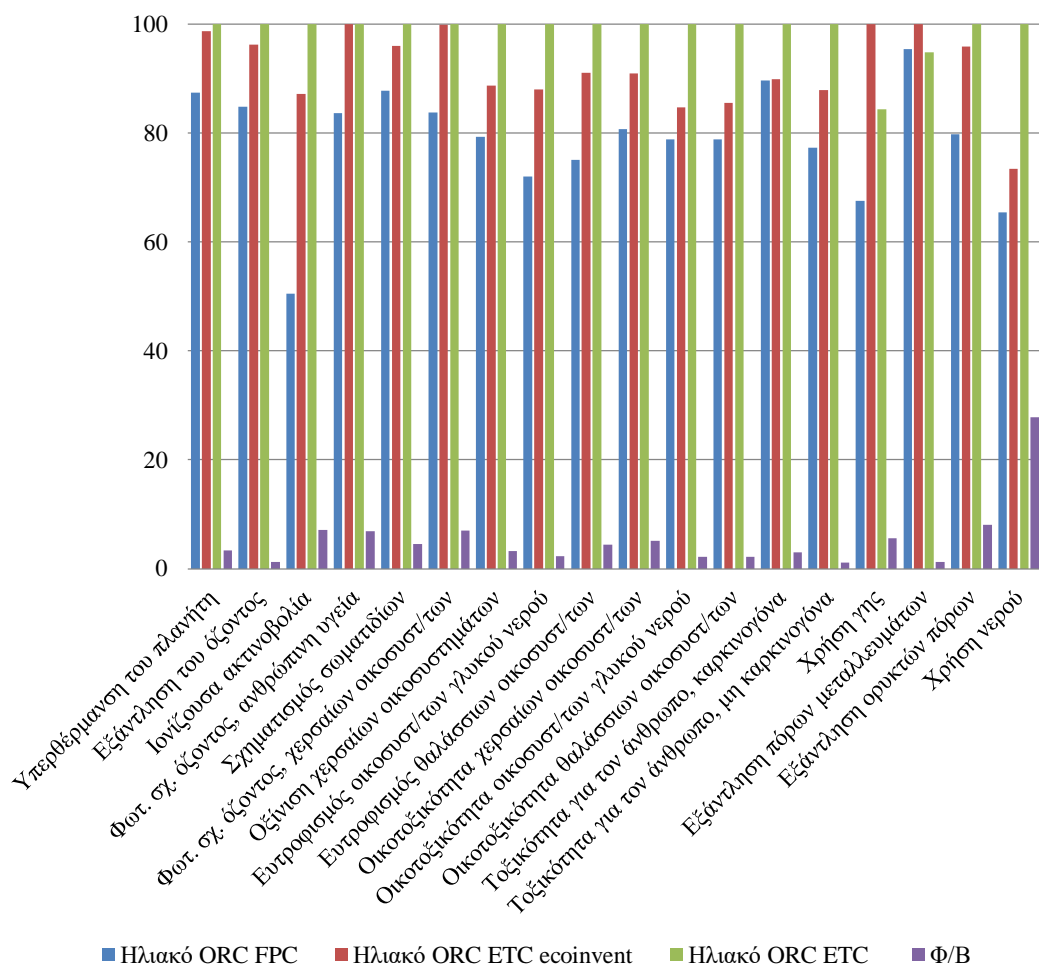
**Εικ. 4.21.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες σε επίπεδο “endpoint”

Έπειτα από την αντικατάσταση των συλλεκτών κενού με επίπεδους συλλέκτες στο σύστημα του ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine, παρατηρείται ότι και οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και πιο συγκεκριμένα, η συνεισφορά τους στις κατηγορίες βλάβης σε επίπεδο “midpoint” κυμαίνεται από 7,5% έως 64%, με μέσο όρο περίπου 50%. Ωστόσο, αναφορικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση του όζοντος, κυρίαρχο ρόλο κατέχει το ψυκτικό μέσο R-134a, όπως συνέβαινε και πριν την αντικατάσταση των συλλεκτών. Σε επίπεδο “endpoint”, παρατηρείται συνοχή με τα αποτελέσματα του επιπέδου “midpoint”, με τους επίπεδους συλλέκτες να συνεισφέρουν κατά 47% στην κατηγορία επιπτώσεων της ανθρώπινης υγείας.

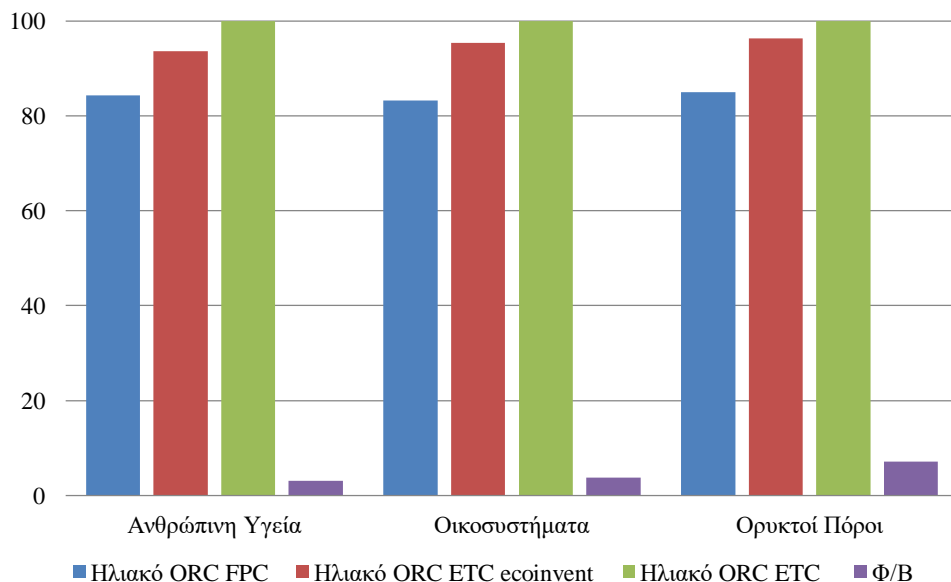
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση του προαναφερθέντος συστήματος με το σύστημα του ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με συλλέκτες κενού και με σύστημα φ/β. Από τα διαγράμματα (Εικ. 4.20-21) συμπεραίνεται ότι το σύστημα με τους επίπεδους συλλέκτες παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους συλλέκτες κενού σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων τόσο σε επίπεδο “midpoint” όσο και σε επίπεδο “endpoint”. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι επίπεδοι συλλέκτες είναι πιο απλοί στην κατασκευή τους και δεν απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας για την κατασκευή τους (π.χ. συγκολλήσεις) αλλά και στο ότι οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το σετ δεδομένων τηςecoinvent “Flat plate solar collector, Cu absorber |GLO| market for, Cut-off, U” το οποίο είναι ελλιπές συγκριτικά με τα πραγματικά δεδομένα.

Τέλος, ακολουθεί σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που έχουν τα εξής συστήματα:

- ηλιακά εκκινούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine με επίπεδους συλλέκτες
- ηλιακά εκκινούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine με συλλέκτες κενού με σετ δεδομένων της ecoinvent
- ηλιακά εκκινούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine με συλλέκτες κενού με πραγματικά δεδομένα
- φωτοβολταϊκά.



**Εικ. 4.22.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “midpoint”



**Εικ. 4.23.** Συγκριτικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού του συστήματος ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine σε επίπεδο “endpoint”

Όπως ήταν αναμενόμενο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σεναρίων που προηγήθηκαν, τον μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο παρουσιάζουν με διαφορά τα Φ/Β με ποσοστά που κυμαίνονται από 1,2% έως 27% σε επίπεδο “midpoint” και από 3% έως 7% σε επίπεδο “endpoint”. Ανάμεσα στα εναπομείναντα τρία συστήματα, την καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση έχει το σύστημα του ηλιακά εκκινούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine με επίπεδους συλλέκτες καθώς οι συγκεκριμένοι συλλέκτες είναι πιο απλοί στην κατασκευή τους, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και ακολουθεί το με συλλέκτες κενού με σετ δεδομένων της ecoinvent, το οποίο είναι περισσότερο ελλιπές συγκριτικά με το σύστημα με συλλέκτες κενού με πραγματικά δεδομένα. Σε επίπεδο “endpoint”, παρατηρείται συνοχή με τα αποτελέσματα του επιπέδου “midpoint”.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 5.1 Συμπεράσματα

Αναφορικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του marine ORC, το ψυκτικό μέσο R-134a παρουσιάζει την ισχυρότερη επίδραση στις κατηγορίες επιπτώσεων υπερθέρμανση του πλανήτη και εξάντληση του όζοντος λόγω της μεγάλης τιμής του δυναμικού (GWP) υπερθέρμανσης του πλανήτη του R-134a και της εκπομπής ουσιών κατά τον κύκλο ζωής του ψυκτικού μέσου, όπως το μονοχλωροτετραφθοροαιθάνιο (R-124) και το τριχλωροτριφθοροαιθάνιο (R-113), αντίστοιχα. Τα ποσοστά αυτά είναι της τάξης του 75% και 90% αντίστοιχα. Σε ότι αφορά την εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων, τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο έχουν οι γεννήτριες με ποσοστό 51% και ακολουθούν οι εναλλάκτες θερμότητας, η αντλία και οι εκτονωτές με ποσοστά 17%, 13% και 8%, αντίστοιχα, καθώς είναι ευθέως ανάλογα με τη μάζα των μετάλλων που αποτελείται η κάθε συνιστώσα. Όμως και στις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων παρατηρείται πως ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αντίκτυπος οφείλεται στις γεννήτριες, κυρίως λόγω του απαιτούν μια ενεργοβόρα κατασκευή. Στην περίπτωση που εξετάζεται ξεχωριστά η επίπτωση της κατανάλωσης καυσίμου diesel για τη λειτουργία του συστήματος, τα ποσοστά αυτής σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων κυμαίνονται από 77,2% έως και 99,9 % με πιο σημαντική επίπτωση στην υπερθέρμανση του πλανήτη, στο φωτοχημικό σχηματισμό όζοντος και στην οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων.

Όσον αφορά την περίπτωση αναφοράς, δηλαδή τη σύγκριση με μια μηχανή εσωτερικής καύσης diesel, παρατηρείται πως το σύστημα του Οργανικού Κύκλου Rankine παρουσιάζει συνολικά ελαφρώς καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα marine ORC παρουσιάζει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά 19% στην εξάντληση των πόρων μεταλλευμάτων λόγω των μετάλλων των συνιστωσών του ενώ η MEK συνεισφέρει περισσότερο στην υπερθέρμανση του πλανήτη, λόγω αυξημένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, και στην εξάντληση ορυκτών πόρων, λόγω της κατανάλωσης 5 τόνων επιπλέον καυσίμου ετησίως. Τέλος, η MEK έχει καλύτερη επίδοση στις κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα, γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλκό που έχουν οι περισσότερες συνιστώσες του συστήματος του Οργανικού Κύκλου Rankine. Συνοψίζοντας, το σύστημα marine ORC είναι λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον, και η μείωση του καυσίμου έχει σημαντική επίδραση σε σχεδόν όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων παρόλο που ο Οργανικός Κύκλος Rankine υποκαθιστά μόνο το 4% της MEK.

Το πρώτο σενάριο που μελετήθηκε στο σύστημα marine ORC ήταν η αντικατάσταση του ψυκτικού μέσου R-134a με R-1234ze, όπου συμπεραίνεται ότι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του ψυκτικού μέσου έχει περιοριστεί σημαντικά μετά την αντικατάσταση του. Πιο συγκεκριμένα στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση του όζοντος τα νέα ποσοστά είναι της τάξης του 6,2% και 5,8%, αντίστοιχα ενώ στις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τη

λειτουργία του συστήματος με R-134a. Συγκρίνοντας τα τρία συστήματα, το σύστημα marine ORC με χρήση R-1234ze παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη λειτουργία του συστήματος με χρήση R-134a σε όλες τις κατηγορίες βλάβης, γεγονός που οφείλεται στο λιγότερο βλαβερό ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη περίπτωση καθώς και στην μικρότερη ποσότητα καυσίμου που απαιτείται. Επί πλέον, το σύστημα marine ORC με χρήση R-1234ze έχει καλύτερη συνολική περιβαλλοντική απόδοση ανάμεσα και στα τρία συστήματα.

Στο δεύτερο σενάριο, κατά το οποίο μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής τοποθεσίας του marine ORC με χρήση R-1234ze από την περιοχή της Μεσογείου θάλασσας, στην περιοχή της Βαλτικής θάλασσας, όπου η θερμοκρασία του νερού συμπύκνωσης μειώθηκε κατά 7°C περίπου, παρατηρήθηκε πως η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος βελτιώθηκε ελαφρώς. Επί πλέον, συγκρίνοντας τα τρία συστήματα, η MEK παρουσιάζει μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο στις κατηγορίες επιπτώσεων που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα και την εξάντληση μεταλλευμάτων λόγω του ότι οι επιμέρους συνιστώσες του Οργανικού Κύκλου Rankine περιλαμβάνουν σημαντικές ποσότητες χαλκού και λοιπών μετάλλων. Τέλος, η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης οδηγεί σε αυξημένη ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση σε εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου, συνεπώς και μειωμένες εκπομπές στην ατμόσφαιρα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την γενικότερη καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση του συγκεκριμένου συστήματος.

Στην περίπτωση που το σύστημα τροφοδοτείται εναλλακτικά από ηλιακούς συλλέκτες κενού, αυτοί αποτελούν τη συνιστώσα με την ισχυρότερη επίδραση συνολικά με ποσοστά σε επίπεδο “midpoint” που κυμαίνονται από 13% έως 69,5%. Η σημαντική αυτή τους συνεισφορά οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι αποτελούν μία συνιστώσα του συστήματος, η οποία αποτελείται από μεγάλη μάζα πρώτων υλών, ενώ η κατασκευή αυτής συνεπάγεται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρισμού, σύμφωνα με τα δεδομένα που παρασχέθηκαν από τους κατασκευαστές. Οι γεννήτριες είναι η συνιστώσα η οποία ακολουθεί με σημαντική επίδραση στον συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του συστήματος, ενώ το ψυκτικό μέσο R-134a παρουσιάζει και εδώ υψηλά ποσοστά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την εξάντληση του όζοντος.

Όσον αφορά το σενάριο αναφοράς του ηλιακού ORC, δηλαδή όταν πραγματοποιείται σύγκριση με Φ/Β πάνελ, το ηλιακό σύστημα ORC παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τα Φ/Β σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Αυτό οφείλεται τόσο στο ότι οι συλλέκτες αποτελούν μια ενεργοβόρα κατασκευή, περιλαμβάνουν μεγάλη μάζα μετάλλων τα οποία απαιτούν συγκεκριμένες διεργασίες προς την κατασκευή των συλλεκτών, ενώ η κατασκευή των Φ/Β είναι πιο απλή, όσο και στο ότι τα δεδομένα των συλλεκτών παρέχονται από την κατασκευάστρια εταιρία ενώ τα Φ/Β έχουν μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το αντίστοιχο σετ τηςecoinvent το οποίο είναι λιγότερο λεπτομερές.

Συγκρίνοντας το ηλιακό σύστημα ORC με χρήση συλλεκτών κενού με πραγματικά δεδομένα με το αντίστοιχο σύστημα όπου οι συλλέκτες έχουν μοντελοποιηθεί με το

αντίστοιχο σετ δεδομένων της ecoinvent, παρατηρείται πως το πρώτο σύστημα έχει ισχυρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο καθώς καθώς τα στοιχεία που παρέχονται από το σετ δεδομένων είναι ελλιπή σε σχέση με τα πραγματικά. Μετά την αντικατάσταση των συλλεκτών κενού με επίπεδους συλλέκτες, παρατηρείται ότι οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και ότι η συνεισφορά τους στις κατηγορίες βλάβης κυμαίνεται από 7,5% έως 64%. Ωστόσο, σημειώνεται ότι το νέο σύστημα έχει συνολικά καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση, το οποίο οφείλεται στο ότι οι επίπεδοι συλλέκτες είναι πιο απλοί στην κατασκευή τους αλλά και στο ότι έχουν μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το αντίστοιχο σετ δεδομένων της ecoinvent το οποίο είναι ελλειπές σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα των συλλεκτών κενού.

Τέλος, μετά και από τη σύγκριση όλων των συστημάτων, συμπεραίνεται ότι τα Φ/B έχουν την καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση με σημαντική διαφορά έναντι όλων των υπολοίπων συστημάτων. Μεταξύ των υπολοίπων τριών συγκρίσιμων συστημάτων, παρατηρείται πως η καλύτερη επιλογή είναι οι επίπεδοι συλλέκτες, οι οποίοι παρουσιάζουν την μικρότερη συνεισφορά σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες βλάβης.

## 5.2 Προτάσεις

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μελλοντικά. Αρχικά, θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει μια παρόμοια μελέτη η οποία θα αφορά μεγαλύτερα συστήματα τόσο αναφορικά με marine ORC όσο και με το solar ORC σύστημα (scale up). Στην παρούσα εργασία, για παράδειγμα, η βοηθητική MEK του πλοίου είναι 5 MW, η οποία δεν ποτελεί αντιπροσωπευτική τιμή, αλλά ο σκοπός είναι να εξεταστεί αρχικά η βιωσιμότητα του συστήματος σε μικρή κλίμακα και στη συνέχεια να μελετηθεί ένα μεγαλύτερο σύστημα.

Δεδομένων των υψηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων τις οποίες συνεπάγεται η χρήση τόσο των επίπεδων συλλεκτών, όσο και των συλλεκτών κενού, θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί η αντικατάστασή τους με παραβολικούς συλλέκτες. Στην περίπτωση αυτή όμως, πραγματοποιούνται σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία του συστήματος καθώς αναφερόμαστε σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες με συνέπεια να μεταβάλλεται το προφίλ του συστήματος του ORC και γίνεται πλέον αναφορά σε τροποποιημένες τεχνολογίες.

Τέλος, η λειτουργία του συστήματος ηλιακού ORC μόνο προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι πολύ αποδοτική, για αυτό, ένα ακόμα σημείο για μελλοντική μελέτη είναι η εξέταση του συστήματος όταν αυτό λειτουργεί και προς παραγωγή θερμότητας (συμπαρογωγή). Ωστόσο, οι θερμοκρασίες του κύκλου δεν επιτρέπουν τη μελέτη αυτού του σεναρίου με το παρόν σύστημα, συνεπώς, θα έπρεπε και σε αυτή την περίπτωση να πραγματοποιηθούν τροποποιήσεις του συστήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kannan, N. and D. Vakeesan, *Solar energy for future world: - A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **62**: p. 1092-1105.
2. Evangelisti, L., R. De Lieto Vollaro, and F. Asdrubali, *Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **114**: p. 109318.
3. Kalogirou, S.A., *Solar thermal collectors and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2004. **30**(3): p. 231-295.
4. Karellas, S. and T.C. Roumpedakis, *Chapter 7 - Solar thermal power plants, in Solar Hydrogen Production*, F. Calise, et al., Editors. 2019, Academic Press. p. 179-235.
5. Karki, S., K.R. Haapala, and B.M. Fronk, *Technical and economic feasibility of solar flat-plate collector thermal energy systems for small and medium manufacturers*. Applied Energy, 2019. **254**: p. 113649.
6. Garcia, R.P., S.d.R. Oliveira, and V.L. Scalon, *Thermal efficiency experimental evaluation of solar flat plate collectors when introducing convective barriers*. Solar Energy, 2019. **182**: p. 278-285.
7. Sabiha, M.A., et al., *Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **51**: p. 1038-1054.
8. Kotb, A., M.B. Elsheniti, and O.A. Elsamni, *Optimum number and arrangement of evacuated-tube solar collectors under various operating conditions*. Energy Conversion and Management, 2019. **199**: p. 112032.
9. Foster, R., M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy : renewable energy and the environment*. 2010, CRC Press: Boca Raton .:
10. Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering : processes and systems*. 2014, Elsevier/Academic Press: Amsterdam .:
11. Haghghi, M.A., et al., *Thermodynamic investigation of a new combined cooling, heating, and power (CCHP) system driven by parabolic trough solar collectors (PTSCs): A case study*. Applied Thermal Engineering, 2019. **163**: p. 114329.
12. Qin, C., J.B. Kim, and B.J. Lee, *Performance analysis of a direct-absorption parabolic-trough solar collector using plasmonic nanofluids*. Renewable Energy, 2019. **143**: p. 24-33.
13. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. 2015, Αθήνα: Εκδόσεις Τσότρας.
14. Quoilin, S., et al., *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 168-186.
15. Braimakis, S.K.T.R.N.T.K., *Solar Cooling Technologies*. 2019, Boca Raton: CRC Press.
16. Braimakis, K., et al., *Comparison of Environmentally Friendly Working Fluids for Organic Rankine Cycles*, in *Advances in New Heat Transfer Fluids: from Numerical to Experimental Techniques*, A.A. Minea, Editor. 2016, CRC Press: Boca Raton. p. 377-426.
17. Douvartzides, S. and I. Karmalis, *Working fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) exhaust heat recovery of an internal combustion engine power plant*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. **161**: p. 012087.
18. Yamaguchi, H., et al., *Solar energy powered Rankine cycle using supercritical CO<sub>2</sub>*. Applied Thermal Engineering, 2006. **26**(17): p. 2345-2354.
19. Al-Sulaiman, F.A., I. Dincer, and F. Hamdullahpur, *Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system*. Solar Energy, 2011a. **85**(9): p. 2228-2243.
20. Al-Ali, M. and I. Dincer, *Energetic and exergetic studies of a multigenerational solar-geothermal system*. Applied Thermal Engineering, 2014. **71**(1): p. 16-23.



21. Calise, F., et al., *A novel solar-assisted heat pump driven by photovoltaic/thermal collectors: Dynamic simulation and thermoeconomic optimization*. Energy, 2016. **95**(Supplement C): p. 346-366.
22. Eisavi, B., et al., *Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy*. Applied Thermal Engineering, 2018. **129**: p. 1219-1229.
23. Cioccolanti, L., et al., *Performance assessment of a solar trigeneration system for residential applications by means of a modelling study*. Energy Procedia, 2017. **126**: p. 445-452.
24. Yang, J., et al., *Thermodynamic analysis and optimization of a solar organic Rankine cycle operating with stable output*. Energy Conversion and Management, 2019. **187**: p. 459-471.
25. International Organization for Standardization, *ISO:14040*, in *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. 2006: Geneva.
26. Κορωνάιος, Χ., *Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη*.
27. Κακαράς, Ε. and Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*. 2013, Αθήνα: ΤΣΟΤΡΑΣ.
28. Caro, D., *Carbon Footprint*, in *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, B. Fath, Editor. 2019, Elsevier: Oxford. p. 252-257.
29. International Organization for Standardization, *ISO:14044*, in *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. 2006: Geneva.
30. Finnveden, G., et al., *Recent developments in Life Cycle Assessment*. Journal of Environmental Management, 2009. **91**(1): p. 1-21.
31. Matthews, H.S., C.T. Hendrickson, and D.H. Matthews, *Life cycle assessment: quantitative approaches for decisions that matter*. Retrieved June. Vol. 1. 2015.
32. ecoinvent. [cited 2018 4/9/2018]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/>.
33. Goedkoop, M., et al., *Recipe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level Report I: Characterisation*. First ed. 2013. 126.
34. Pre Sustainability BV, v.a., *SimaPro Database Manual Methods Library*. 2018. 65.
35. Goedkoop, M. and R. Spriensma, *Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology report*. Third ed. 2001, Amersfoort, Ολλανδία: Pre Consultants B.V. 132.
36. Thompson M., E.R., Wildavsky A., *Cultural Theory*. 1990: Westview Print Boulder.
37. Huijbregts, M., et al., *ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. 2016.
38. Zhang, H., et al., *Energy analysis of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat power generation*. Journal of Cleaner Production, 2018. **183**: p. 1207-1215.
39. Ding, Y., et al., *Exergoenvironmental model of Organic Rankine Cycle system including the manufacture and leakage of working fluid*. Energy, 2018. **145**: p. 52-64.
40. Uusitalo, A., et al., *Greenhouse gas reduction potential by producing electricity from biogas engine waste heat using organic Rankine cycle*. Journal of Cleaner Production, 2016. **127**: p. 399-405.
41. Liu, C., et al., *The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment*. Energy, 2013. **56**: p. 144-154.

42. Walsh, C. and P. Thornley, *The environmental impact and economic feasibility of introducing an Organic Rankine Cycle to recover low grade heat during the production of metallurgical coke*. Journal of Cleaner Production, 2012. **34**: p. 29-37.
43. GmbH, A. [cited 2018 6/9/2018]; Available from: <https://akotec.eu/en/products/collectors/stc-single-tube-collector/>.
44. Mujumdar, A.S., *Heat Exchanger Design Handbook T. Kuppan Marcel Dekker Inc., New York 2000, 1118 pages*. Drying Technology, 2000. **18**(9): p. 2167-2168.
45. Adolfsson, M. and S. Rashid, *Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Heat Exchangers, A Case for Inter Terminals Sweden AB Located in Port of Gothenburg*, in *Department of Energy and Environment, Division of Environmental Systems Analysis 2016*, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden
46. Panato, V.H., M.P. Porto, and E.P. Bandarra Filho, *Experimental performance of an R-22-based refrigeration system for use with R-1270, R-438A, R-404A and R-134a*. International Journal of Refrigeration, 2017. **83**: p. 108-117.
47. Greening, B. and A. Azapagic, *Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK*. Energy, 2012. **39**(1): p. 205-217.
48. Roumpedakis, T.C., et al., *Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC*. Renewable Energy, 2020. **157**: p. 1008-1024.