



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη συστήματος συμπαραγωγής με οργανικό
κύκλο Rankine (ORC) για εφαρμογή θερμοκηπίου**

ΠΑΝΤΕΛΕΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γκούντας Απόστολος

Σαρρής Ιωάννης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη συστήματος συμπαραγωγής με οργανικό
κύκλο Rankine (ORC) για εφαρμογή θερμοκηπίου**

Παντελής Δημήτριος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γκούντας Απόστολος

Σαρρής Ιωάννης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Οκτωβρίου
2023

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Γκούντας Απόστολος

.....
Σαρρής Ιωάννης

Copyright © - Παντελής Δημήτριος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παντελής Δημήτριος του Σοφιανού, με αριθμό μητρώου 272017155 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Παντελής Δημήτριος

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους ήταν δίπλα μου κατά την ολοκλήρωση της καθώς και τους επιβλέποντες καθηγητές μου οι οποίοι με καθοδηγούσαν κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της εργασίας.

Ειδικότερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κ. Γκούντα Απόστολο για την πολύτιμη βοήθειά του και τη διαρκή παρουσία του καθώς και για την άριστη επικοινωνία που είχαμε. Ο τρόπος διδασκαλίας του, αποτέλεσε κίνητρο και λόγο για να συνεργαστώ μαζί του και τον ευχαριστώ θερμά για την πρόταση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Με καθοδήγησε σε ότι απορία και προβληματισμό συνάντησα καθώς η παρουσία του έπαιξε καθοριστικό ρόλο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη, συγκεκριμένους καθηγητές του τμήματος όπου αναπτύχθηκαν φιλικές σχέσεις και μου έδωσαν τις γνώσεις τους απλόχερα. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, όπου χωρίς αυτούς αυτά τα χρόνια δεν θα είχαν πλάκα και ενδιαφέρον.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	4
1.1 Γενικά στοιχεία	4
1.2 Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση	5
1.3 Ανάγκες θέρμανσης και ηλεκτρισμού σε αγροτικές εφαρμογές	6
1.4 Τρέχουσα τεχνολογική στάθμη	7
1.4.1 Κύκλος Kalina	8
1.4.2 Κύκλος Brayton	9
1.4.3 Οργανικός κύκλος Rankine	10
1.5 Συστήματα ενεργειακής απόδοσης	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Μέρος	14
2.1 Τοπολογία θερμοκηπίου	14
2.2 Καλλιέργεια Θερμοκηπίου	16
2.2.1 Μορφολογικά στοιχεία βιομηχανικής κάνναβης	16
2.2.2 Χρήσεις και εφαρμογές της καλλιέργειας	17
2.2.3 Δεδομένα καλλιέργειας στην Ευρώπη	20
2.2.4 Δεδομένα καλλιέργειας στην Ελλάδα	20
2.2.5 Οικονομικά στοιχεία καλλιέργειας	22
2.3 Θερμοκήπιο	23
2.3.1 Είδη θερμοκηπίων	23
2.3.2 Θερμοκήπιο μελέτης	25
2.3.3 Διαστάσεις θερμοκηπίου	25
2.3.4 Υπολογισμός θερμικών απωλειών	29
2.4 Βιομάζα	34
2.5 Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)	35
2.5.1 Εφαρμογές χρήσης του κύκλου	37
2.6 Οργανικά ρευστά	37
2.6.1 Κατηγοριοποιήσεις οργανικών ρευστών	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντελοποίηση κύκλου	40

3.1 Περιγραφή συστήματος	40
3.2 Θερμοδυναμική μοντελοποίηση	41
3.3 Διερεύνηση ψυκτικών ρευστών	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα	48
4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	48
4.2 Καθαρή απόδοση κύκλου.....	48
4.2.1 Καθαρός βαθμός απόδοσης και υπερθέρμανση	50
4.2.2 Καθαρός βαθμός απόδοσης και υπόψυξη.....	52
4.3 Έργο στροβίλου και παροχή μάζας.....	53
4.4 Συμπυκνωτής.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Οικονομοτεχνική Ανάλυση	57
5.1 Οικονομοτεχνική μελέτη	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64

Πίνακας περιεχομένων εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ ΑΡΚΑΔΙΑΣ.....	14
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΑΡΚΑΔΙΑΣ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ.	22
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΜΦΙΡΡΙΚΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ.	23
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ.	24
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ.	24
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΚΑΤΟΨΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΠΡΟΣΟΨΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.	29
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ (ORC).....	36
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΑΠΛΗ ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ORC.	38
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΜΕ ΛΕΒΗΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.	41
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΕΣ.....	44

Πίνακας περιεχομένων σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ T-S ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΛΙΝΑ.....	9
ΣΧΗΜΑ 2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ P-V & T-S ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ BRAYTON.....	10
ΣΧΗΜΑ 3: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ T-S ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE.	11
ΣΧΗΜΑ 4: ΣΥΝΘΕΣΗ, ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ HEMPCRETE.....	17
ΣΧΗΜΑ 5: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ ΣΑΝ ΠΡΟΪΟΝ.....	18
ΣΧΗΜΑ 6: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗΣ.	19

Πίνακας περιεχομένων πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΠΛΕΥΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΟΡΟΦΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΤΙΜΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ GWP, ODP ΓΙΑ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ R-134A.	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΤΙΜΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ, ΓΙΑ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ R-134A.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΤΙΜΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ GWP, ODP ΓΙΑ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ R- 245FA.	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΚΟΣΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΠΟΣΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΈΣΟΔΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	59

Πίνακας περιεχομένων διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	4
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ.....	6
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΈΚΤΑΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΝΝΑΒΗ.....	20
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΈΚΤΑΣΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΑΡΚΑΔΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΝΝΑΒΗ.....	21
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΝΝΑΒΗ ΣΕ ΤΟΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΡΚΑΔΙΑΣ.....	21
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΗΣ ΗΜΕΡΑΣ.....	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΗΣ ΗΜΕΡΑΣ.....	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΙΔΕΑΤΟΥ-ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΚΑΘΑΡΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΛΟΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ.....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΚΑΘΑΡΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΛΟΣΗΣ – ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΚΑΘΑΡΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΛΟΣΗΣ - ΥΠΟΨΥΞΗΣ.....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΈΡΓΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ - ΠΑΡΟΧΗ ΜΑΖΑΣ.....	54

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΠΟΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗ, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΕΞΑΤΜΙΣΤΗ.....	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: ΜΕΡΙΔΙΟ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ.....	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΑΝΑ ΤΑ ΧΡΟΝΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	61

Περίληψη

Η μείωση των ορυκτών καυσίμων, η αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η ανάγκη για συστήματα υψηλής ενεργειακής απόδοσης, απασχολεί όλο και περισσότερο την παγκόσμια κοινότητα με στόχο την εύρεση εναλλακτικών λύσεων που θα αποφέρουν μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με τεχνολογίες πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία, μελετάται ένα σύστημα συμπαραγωγής για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων ενός θερμοκηπίου 480 m², στην περιοχή της Τρίπολης, χρησιμοποιώντας λέβητα βιομάζας σαν κύρια πηγή παροχής θερμικού φορτίου και έναν Οργανικό Κύκλο Rankine (ORC) για μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Αρχικά, μελετήθηκαν οι θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου ως κτηρίου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, τα τοπικά κλιματολογικά χαρακτηριστικά και το είδος της καλλιέργειας και υπολογίστηκαν στα 186,32 kW. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν παράμετροι που αφορούν τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος ORC και την παραγόμενη ισχύ, όπως η θερμοκρασία συμπύκνωσης-ατμοποίησης και η διερεύνηση πιθανών ψυκτικών ρευστών, τα οποία θα είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε οικονομοτεχνική μελέτη, προκειμένου να αξιολογηθεί η συγκεκριμένη επένδυση και να προσδιοριστεί η περίοδος αποπληρωμής της. Τα κύρια αποτελέσματα που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εργασία, είναι η αποδοτικότητα του ORC, η οποία φτάνει το 10,69% για θερμοκρασία πηγής θερμότητας 100°C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 30°C για το ρευστό R-245fa, η μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα όπου αυτόματα καθιστά την επένδυση φιλική στο περιβάλλον και ο χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης ο οποίος ορίζεται περίπου στα δύο έτη.

Λέξεις κλειδιά: Οργανικός κύκλος Rankine, ορυκτά καύσιμα, ενεργειακά συστήματα απόδοσης, οργανικά ρευστά, οικονομοτεχνική ανάλυση

Abstract

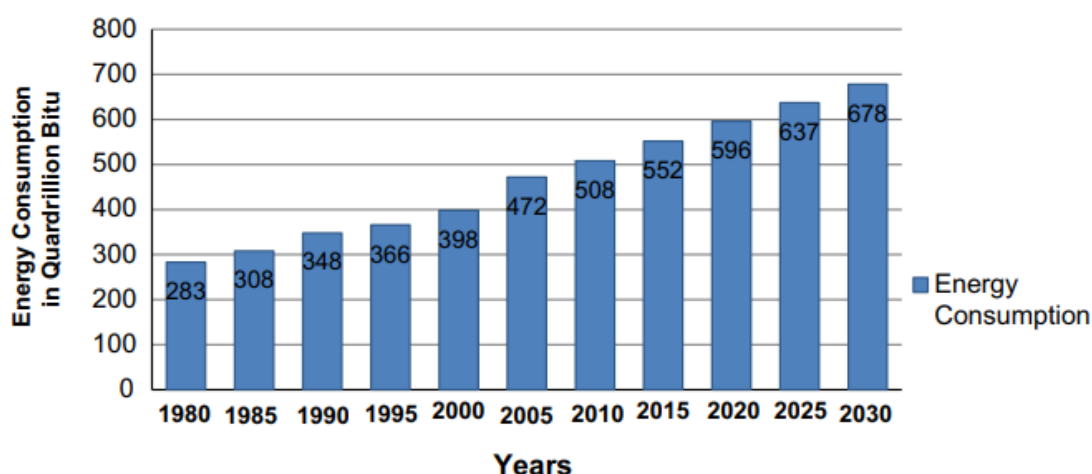
The reduction of fossil fuels, the increase in carbon dioxide emissions and the need for high energy efficiency systems are increasingly of concern to the global community in order to find alternatives that will reduce the carbon footprint and meet energy needs with more environmentally friendly technologies. In this paper, a cogeneration system is studied to meet the thermal and electrical requirements of a 480 m² greenhouse in the area of Tripoli, using a biomass boiler as the main source of heat load supply and an Organic Rankine Cycle (ORC) for heat to electricity conversion. Initially, the thermal needs of the greenhouse as a building were studied, taking into account all heat transfer mechanisms, local climatic characteristics and the type of crop, and were calculated at 186.32 kW. Then, parameters related to the overall efficiency of the ORC system and the generated power were considered, such as the condensation-evaporation temperature and the investigation of possible environmentally friendly refrigerant fluids. In addition, an economic and technical study was carried out in order to evaluate the investment and determine the payback period. The main results obtained from this work are the efficiency of ORC, which reaches 10.69% for a heat source temperature of 100°C and condensing temperature of 30°C for R-245fa fluid, the reduction of carbon dioxide emissions which automatically makes the investment environmentally friendly and the payback time of the investment which is set at about two years.

Keywords: Rankine organic cycle, fossil fuels, energy efficiency systems, organic fluids, econometric analysis

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας έχει ραγδαία αύξηση τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα την αισθητή μείωση των ορυκτών καυσίμων καθώς και την αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η ζήτηση ενέργειας αυξάνεται με ρυθμό ανάλογο με τον πληθυσμό και την οικονομική ανάπτυξη της χώρας. Σύμφωνα με τα στοιχεία που εξέδωσε η τεχνική έκθεση που εκδόθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ το 2009, η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί κατά 44% την περίοδο 2006-2030. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση την περίοδο των ετών 1980-2030.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα προβλεπόμενης παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.

Πηγή: (Khan & Arsalan, 2016)

Σύμφωνα με μια μαθηματική επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων της πλανητικής ενεργειακής κατανάλωσης (Πηγή: Δεύτερο Μέρος Ετήσιας Έκθεσης Εργαστηρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής) προκύπτει ότι τα επόμενα 40 έως 60 έτη, τα τωρινά αποθέματα ορυκτών καυσίμων θα εξαντληθούν. Ταυτόχρονα, μέχρι το 2030 οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αυξηθούν κατά περισσότερο από 40% (Πηγή: (Minea, 2014)). Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία η στροφή σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, με στόχο τη μείωση κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας.

Στο πλαίσιο αυτό, η υπολειμματική βιομάζα μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση για να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη

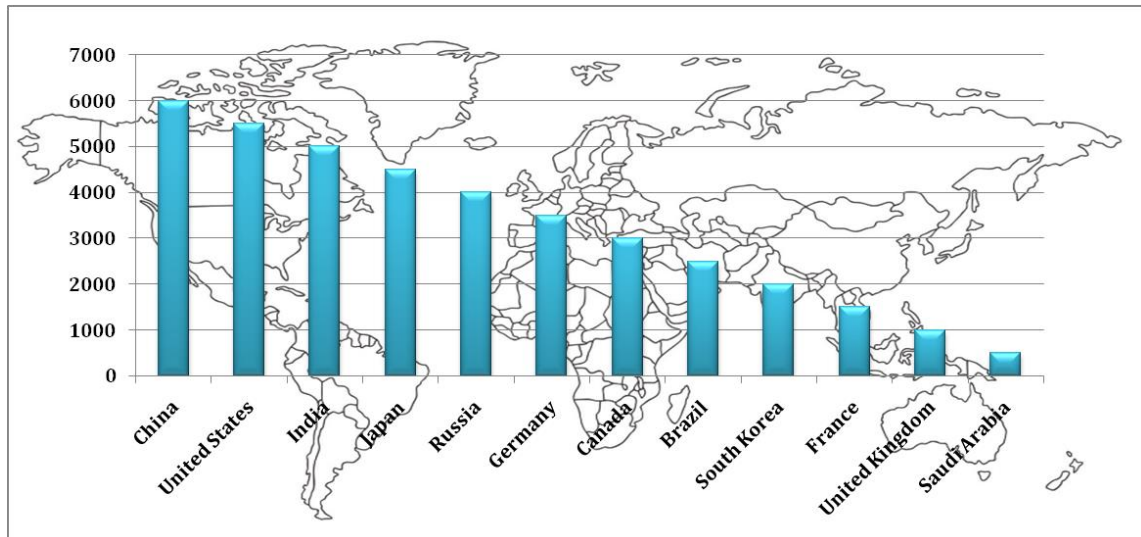
μελέτη ενός συστήματος συμπαραγωγής Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) για εφαρμογή θερμοκηπίου, με χρήση λέβητα βιομάζας, κατά την οποία πραγματοποιείται και οικονομοτεχνική μελέτη.

Ο όρος συμπαραγωγή, χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής από την ίδια πηγή. Η θερμική ενέργεια που θα παραχθεί θα αξιοποιηθεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου, ενώ η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί για τις ιδιοκαταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας του θερμοκηπίου ή θα πωληθεί στο δίκτυο με απώτερο σκοπό το κέρδος του παραγωγού.

Τέλος, τα κύρια αποτελέσματα που αναμένονται από την συγκεκριμένη εργασία, αφορούν την υψηλή θερμική απόδοση, η οποία προβλέπεται να είναι μεγαλύτερη του 15%, την μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα όπου αυτόματα θα καθιστά την επένδυση φιλική προς το περιβάλλον και τον χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης ο οποίος εκτιμάται να είναι μικρότερος των 5 χρόνων έτσι ώστε να καθίσταται η επένδυση ελκυστική.

1.2 Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση

Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό, ταχύτερο από την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (Πηγή: [U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](#)). Στη πρώτη θέση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως για το έτος 2023, βρίσκεται η Κίνα με τιμές που ξεπερνούν τις 5,56 Billion kWh ετησίως, σύμφωνα με τα στοιχεία της Index (Πηγή: [IndexMundi.com: Electricity - Consumption - Country Comparison](#)). Η Κίνα αντιπροσωπεύει σχεδόν το ένα τέταρτο της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Η λειτουργία της βασίζεται κυρίως στον άνθρακα, ενώ τα τελευταία χρόνια φαίνεται πως έχει στραφεί προς το φυσικό αέριο και τις ΑΠΕ. Την δεύτερη θέση στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση κατέχουν οι ΗΠΑ με περίπου 3,91 Billion kWh ετησίως, ενώ τρίτη σε σειρά βρίσκεται η Ινδία η οποία καταναλώνει περίπου 1,34 Billion kWh ετησίως. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η Ινδία, αποτελεί την πιο πυκνοκατοικημένη χώρα στον πλανήτη, σύμφωνα με τα στοιχεία της Index για το 2023, παρόλα αυτά βρίσκεται στην τρίτη θέση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις συνθήκες ζωής των κατοίκων της. Στην τέταρτη θέση της κατάταξης βρίσκεται η Ιαπωνία με κατανάλωση 943,7 Billion kWh ετησίως. Επιπλέον, βρίσκεται ανάμεσα στις τέσσερις μεγαλύτερες χώρες στην κατανάλωση βαρελιών πετρελαίου ανά ημέρα για το έτος 2022, σύμφωνα με την έρευνα που έγινε από ([Statistical Review of World Energy](#) - British Petroleum). Η Ρωσία καταναλώνει περίπου 909,6 Billion kWh ετησίως, η οποία αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές και παραγωγούς άνθρακα στο πλανήτη, καθώς επίσης διαθέτει μερικά από τα μεγαλύτερα αποθέματα φυσικού αερίου στο κόσμο. Λόγω της εμπόλεμης κατάστασης που επικρατεί στην Ευρώπη (Ουκρανία-Ρωσία) η ενεργειακή βιομηχανία της Ρωσίας που αποτελείται από ορυκτά καύσιμα έχει αρχίσει να αλλάζει εξαιτίας της μη προώθησής τους στην υπόλοιπη Ευρώπη, με αποτέλεσμα να επηρεάζει ενεργειακά όλο τον υπόλοιπο κόσμο. Τα στατιστικά στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, φαίνονται και σχηματικά στο διάγραμμα 1 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 2: Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση.

Πηγή δεδομένων: [IndexMundi.com: Electricity - Consumption - Country Comparison](https://www.indexmundi.com/electricity-consumption-country-comparison)

1.3 Ανάγκες θέρμανσης και ηλεκτρισμού σε αγροτικές εφαρμογές

Τα θερμοκήπια είναι πολύτιμες αγροτικές εφαρμογές που παρέχουν ελεγχόμενα περιβάλλοντα για την καλλιέργεια φυτών. Στη σημερινή σύγχρονη ελληνική γεωργία, τα θερμοκήπια αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ελληνικής γεωργικής παραγωγής, παρέχοντας στον παραγωγό τη δυνατότητα να ξεπεράσει τις περιβαλλοντικές προκλήσεις και προμηθεύοντας τους καταναλωτές με φρέσκα ποικίλα προϊόντα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Παράλληλα, όσο αυξάνεται ο πληθυσμός της γης τόσο κρίνεται αναγκαία η κάλυψη των απαιτήσεων σε τρόφιμα ώστε να καλυφθούν οι διατροφικές ανάγκες, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην επισιτιστική ασφάλεια.

Οι βασικές συνιστώσες ενός θερμοκηπίου είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Κατασκευή: Η κατασκευή του θερμοκηπίου αποτελείται από το υλικό κάλυψης και τον τύπο του. Το υλικό κάλυψης επιλέγεται ανάλογα με την τοπολογία του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια, ενώ ο τύπος του θερμοκηπίου εξαρτάται από τις διαστάσεις του και την καλλιέργεια.
- ❖ Θέρμανση: Η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, αλλά πολλά θερμοκήπια χρησιμοποιούν διάφορα θερμαντικά μέσα για να διατηρήσουν τις ανάγκες ανάπτυξης των φυτών.
- ❖ Αερισμός: Ο αερισμός αποτελεί μία σημαντική συνιστώσα ενός αποδοτικού θερμοκηπίου, ρυθμίζοντας τα ποσοστά υγρασίας και την ανταλλαγή αερίων μεταξύ του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Στις αγροτικές εφαρμογές παρουσιάζονται ανάγκες θέρμανσης και ηλεκτρισμού για τις διάφορες διεργασίες και τη σωστή ανάπτυξη της καλλιέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στο θερμοκήπιο τα συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση θερμοκρασίας και τη διατήρηση ελεγχόμενου και ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των φυτών, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες. Η αποτελεσματική πρόσβαση στη θέρμανση και την ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιείται με βάση ποικίλων τεχνολογιών, μία εκ των οποίων αποτελεί η θέρμανση με βάση τη βιομάζα.

Η βιομάζα αποτελεί την πιο διαδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Σύμφωνα με την έρευνα (Moradi κ.ά., 2020), η διάφορες μορφές βιομάζας (στερεή, αέρια, υγρή) αποτελούν σχεδόν το 70% της τελικής ενέργειας. Ωστόσο, το κύριο κόστος αποτελούν οι μεγάλες ανάγκες θέρμανσης των θερμοκηπίων οι οποίες αγγίζουν μέχρι και το 60% του συνολικού προϋπολογισμού.

Καθώς στα θερμοκήπια η κύρια πηγή θερμότητας είναι το ηλιακό φως, το οποίο περνά μέσα από το υλικό κάλυψης και θερμαίνει τον αέρα, είναι γνωστό ότι μεγάλο ποσοστό θερμότητας επιστρέφει στο εξωτερικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλα ποσά απώλειας θερμότητας. Αυτά τα ποσά απωλειών, είναι αδύνατο να καλυφθούν από συμβατικούς λέβητες βιομάζας, διότι αφήνουν μεγάλα ποσά ενέργειας ανεκμετάλλευτα. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη κάλυψης των απωλειών αυτών μέσω τις τεχνολογίας ORC. Ο ORC, θεωρείται η πιο διαδεδομένη και αποδοτική τεχνολογία για την μετατροπή της απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας σε ενέργεια και με αυτό τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα για την υποστήριξη μικρών μονάδων θερμοκηπίων με μικρό κόστος για τους επίδοξους επενδυτές.

1.4 Τρέχουσα τεχνολογική στάθμη

Με την αυξανόμενη ζήτηση και το αυξανόμενο κόστος της ενέργειας, η εκμετάλλευση των χαμηλής ποιότητας πηγών θερμότητας, όπως η βιομάζα, έχουν λάβει μεγαλύτερη προσοχή. Η τρέχουσα τεχνολογική στάθμη, αναφέρεται στην αξιολόγηση διάφορων θερμικών κύκλων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για την εκμετάλλευση των χαμηλής ποιότητας πηγών θερμότητας με στόχο την κάλυψη των θερμικών αναγκών τους. Ως θερμοδυναμικό κύκλο, ορίζουμε μια περιοδική ακολουθία διαδικασιών με αποτέλεσμα να φέρνει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση. Δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται οι θερμοδυναμικοί κύκλοι είναι:

- ❖ Κύκλος αερίου: Διατηρείται το ρευστό σε αέρια μορφή σε όλο το κύκλο.
- ❖ Κύκλος ατμού: Το ρευστό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση σε ένα μέρος του κύκλου και στην πορεία του γίνεται υγρό.

Ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου, βρίσκεται από τον τύπο:

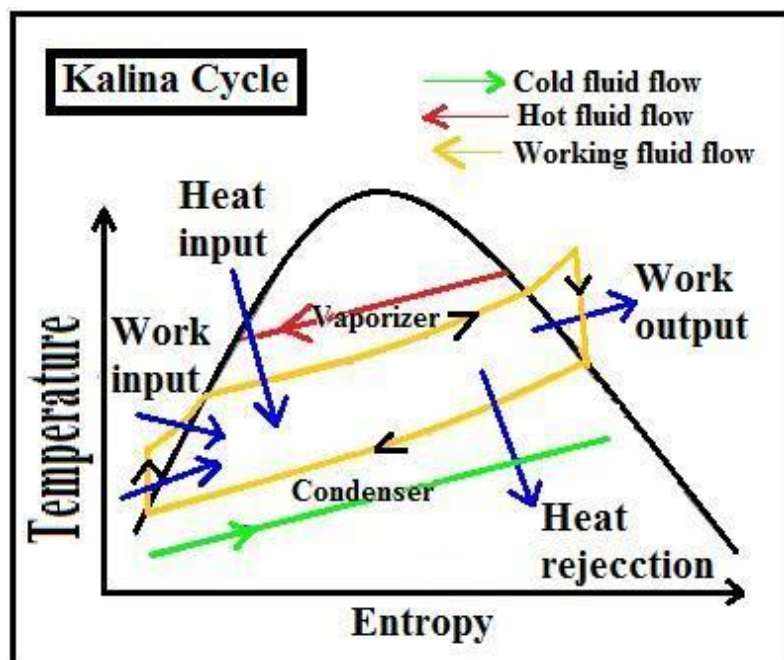
$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (1)$$

Όπου το W_{net} (kW) είναι το παραγόμενο έργο και το Q_{in} (kJ) είναι η εισερχόμενη θερμότητα.

Οι κύκλοι παραγωγής ισχύος είναι θερμοδυναμικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή διαφόρων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε κύκλος παραγωγής ισχύος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που καθορίζονται από διάφορους παράγοντες (π.χ. πηγή θερμότητας, κόστος κ.ά.) και διαφορετικές κλίμακες kW. Οι κύκλοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητοι για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών και καθίστανται σύγχρονες τεχνολογίες για την παραγωγή ενέργειας. Πιο κάτω ακολουθεί η ανάλυση τριών τέτοιων κύκλων.

1.4.1 Κύκλος Kalina

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Kalina, είναι η εξέλιξη του κύκλου Rankine και εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980 από τον Dr Alexander Kalina και αποτελεί την πρώτη σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κύκλος Kalina παρουσιάζει μέγιστη ανταπόκριση σε θερμοκρασίες 80-130 °C. Χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο ρευστό μείγμα αμμωνίας – νερού και συγκριτικά με συμβατικούς θερμοδυναμικούς κύκλους μπορεί να προσφέρει αύξηση της απόδοσης κατά 10-50% για πηγές θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας (Lolos & Rogdakis, 2009). Ένα από τα πλεονεκτήματα του κύκλου είναι η υψηλότερη θερμική απόδοση συγκριτικά με συμβατικούς κύκλους Rankine για πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας. Η υψηλότερη απόδοση του κύκλου οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια σε χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μειονέκτημά του αποτελεί η πολυπλοκότητα, απαιτώντας εξειδικευμένο σχεδιασμό και μηχανική τεχνογνωσία με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος. Ο κύκλος Kalina χρησιμοποιείται σε εύρη kW από μικρής κλίμακας έως εφαρμογές μεγάλης κλίμακας τα οποία εξαρτώνται από παράγοντες όπως τη θερμοκρασία της πηγής και το ρυθμό ροής. Οι δυναμικότητές του κυμαίνονται από μερικά kW έως αρκετά MW.

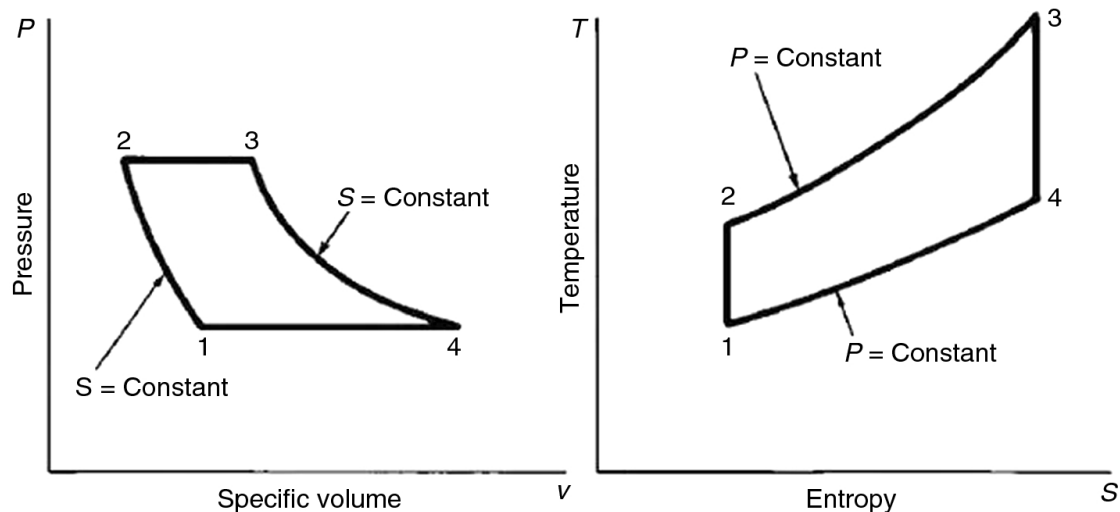


Σχήμα 1: Διάγραμμα T-S του κύκλου Kalina.

Πηγή:(Das κ.ά., χ.χ.)

1.4.2 Κύκλος Brayton

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Brayton, ο οποίος πήρε το όνομά του από τον Αμερικανό μηχανικό George Brayton το 1872, είναι επίσης γνωστός ως κύκλος Joule. Πρόκειται για έναν κύκλο παραγωγής ενέργειας, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως για τη μετατροπή της ενέργειας ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής θερμική απόδοση και ισχύς για ολόκληρη τη μονάδα (X. Li κ.ά., 2023). Ο κύκλος Brayton εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο πίεσης και την θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του κύκλου είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος καθιστώντας τον ιδανικότερο για εφαρμογές με περιορισμένο χώρο και βάρος, όπως οι κινητήρες αεροσκαφών, οι γρήγοροι χρόνοι εκκίνησης και απόκρισης, φτάνοντας έτσι την πλήρη λειτουργική τους ικανότητα σχετικά γρήγορα και τέλος, η χαμηλή κατανάλωσή τους σε νερό, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την κατανάλωση νερού σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, μερικά από τα μειονεκτημάτα του είναι η χαμηλότερη αποδοτικότητα και οι υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx). Τα τυπικά του εύρη διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή και την κλίμακα του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Μπορούν να βρεθούν σε κλίμακα μερικών kW και σε μεγάλη κλίμακα που κυμαίνεται από δεκάδες έως εκατοντάδες MW.



Σχήμα 2: Διαγράμματα P-V & T-S του κύκλου Brayton.

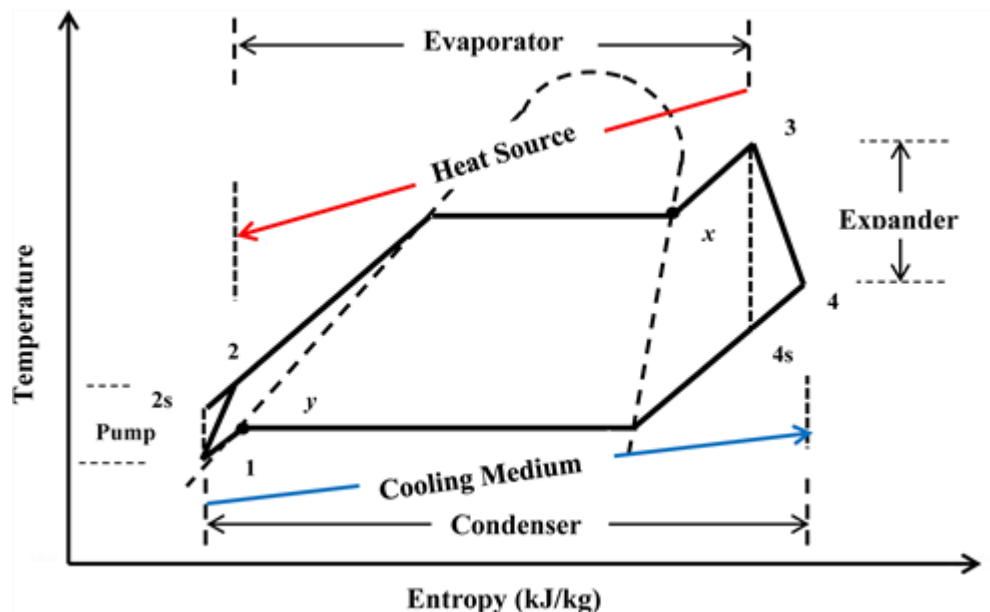
Πηγή:(Salek κ.ά., 2020)

1.4.3 Οργανικός κύκλος Rankine

Ο οργανικός κύκλος Rankine, είναι μια παραλλαγή του θερμοδυναμικού κύκλου Rankine. Η διαφορά των δύο κύκλων εντοπίζεται στο ρευστό που χρησιμοποιούν. Ο ORC χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο διάφορα ψυκτικά ρευστά ανάλογα με την πηγή θερμότητας, ενώ ο Rankine χρησιμοποιεί το νερό. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από τους Lucien Bronicki και Harry Zvi Tabor την δεκαετία του 1950, σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές.

Η παρούσα διπλωματική, θα ασχοληθεί αποκλειστικά με τον ORC καθώς είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία έχει τεράστιο δυναμικό στην αγορά και χαρακτηρίζεται ως φιλική προς το περιβάλλον.

Το σύστημα ORC είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από πηγές χαμηλής ποιότητας θερμικής ενέργειας, όπως είναι η βιομάζα που θα αναλυθεί στα παρακάτω κεφάλαια, η γεωθερμία, η ηλιακή ενέργεια κ.α. Περισσότερα για τον ORC θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 3: Διάγραμμα T-S του οργανικού κύκλου Rankine.

Πηγή:(Tarrad, 2020)

1.4.3.1 Εφαρμογή του ORC

Ο οργανικός κύκλος Rankine, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια τεχνολογία η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας από πηγές χαμηλής ποιότητας θερμικής ενέργειας. Διανύοντας μια εποχή με ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καθώς και την αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, ο οργανικός κύκλος Rankine προσφέρει έναν εναλλακτικό τρόπο για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Ο συγκεκριμένος κύκλος, συγκριτικά με άλλα συστήματα, υπερτερεί σε μικρές εφαρμογές και χαμηλές θερμοκρασίες. Ο ORC καθίσταται ιδανικότερος για πηγές θερμότητας με χαμηλή θερμοκρασία, έναντι του Rankine που είναι κατάλληλος για πηγές με μεγάλη θερμοκρασία. Επομένως, είναι και πιο φιλικός προς το περιβάλλον, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές του CO₂.

Καθώς ο ORC και ο κύκλος Rankine μπορεί να χρησιμοποιούν τις ίδιες αρχές, έχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ τους. Ο ORC συγκριτικά με τον κύκλο Rankine πετυχαίνει υψηλότερη θερμική απόδοση, διότι τα ψυκτικά μέσα δεν χρειάζονται υπερθέρμανση σε αντίθεση με το νερό. Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε (J. Li κ.ά., 2012) έδειξε ότι η απόδοση του κύκλου Rankine με θερμοκρασία στην είσοδο του εκτονωτή 200°C είναι 11,7% , ενώ στον ORC με εργαζόμενο ρευστό το R-123 στους 120°C είναι μεγαλύτερη. Ο ORC χρησιμοποιώντας πηγές χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως η βιομάζα, ανακουφίζει την παγκόσμια ενεργειακή «πίεση» και λόγω της απλουστευμένης τεχνολογίας του, δεν χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό. Ακολουθούν ορισμένα πλεονεκτήματα του ORC.

Πλεονεκτήματα:

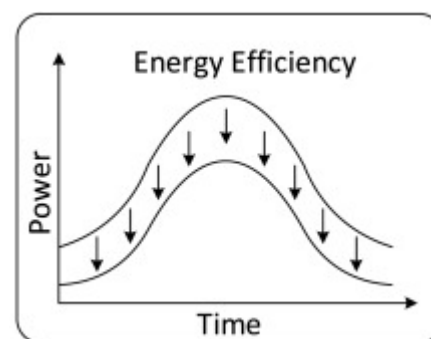
1. Αξιοποιεί πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η βιομάζα.
2. Ο ORC παρέχει ευελιξία στην επιλογή διαφορετικών οργανικών ρευστών εργασίας.
3. Δίνει τη δυνατότητα συμπαραγωγής με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήση της απορριπτόμενης ενέργειας για θέρμανση.
4. Η τεχνολογία των συστημάτων ORC είναι πιο απλουστευμένη και πιο οικονομική από αυτή των κύκλων Rankine για πηγές χαμηλής θερμότητας.

Ο ORC χρησιμοποιείται για δυνατότητα παραγωγής ενέργειας με εύρη που κυμαίνονται από μερικά kW έως αρκετά MW. Τα μικρής κλίμακας συστήματα χρησιμοποιούνται για εφαρμογές εκτός δικτύου ενώ τα μεγαλύτερα σε βιομηχανικές μονάδες συμπαραγωγής και εγκαταστάσεις μετατροπής βιομάζας σε ενέργεια.

1.5 Συστήματα ενεργειακής απόδοσης

Ο όρος ενεργειακή απόδοση σηματοδοτεί την χρήση λιγότερων ποσών ενέργειας για την εκτέλεση της ίδιας εργασίας. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των συστημάτων ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency systems), τα οποία σχεδιάζονται για να επιτύχουν την ίδια λειτουργία με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ή να βελτιώσουν την απόδοση των ενεργειακών συστημάτων. Ο λόγος της ύπαρξης αυτών των συστημάτων και η αναγκαιότητα της στροφής ως προς την χρήση τους, διαδραματίζει καίριο ρόλο στην μακροπρόθεσμη ενεργειακή ασφάλεια του πλανήτη, προκαλώντας μείωση της συνολικής ζήτησης. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται και η εξάρτηση από το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και γενικότερα από τα ορυκτά καύσιμα.

Πιο αναλυτικά, ένα από τα κύρια οφέλη των συστημάτων ενεργειακής απόδοσης είναι η δυνατότητα που παρέχουν για εξοικονόμηση του κόστους παραγωγής και την μείωση της αιχμής ζήτησης, σύμφωνα με σχετική έρευνα (Gilson Dranka κ.ά., 2022). Ένα ακόμη βασικό πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι η μείωση της ποσότητας ενέργειας που απαιτείται για την εκτέλεση ορισμένων εργασιών, περιορίζοντας έτσι τις εκπομπές CO₂ και κατά συνέπεια την κλιματική αλλαγή. Συμβάλλει ακόμη στην διατήρηση των φυσικών πόρων, καθώς μειώνει την ζήτηση για παραγωγή ενέργειας από πηγές ορυκτών καυσίμων. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης εξισορροπεί την ενεργειακή ασφάλεια με αποτέλεσμα οι χώρες να βελτιώνουν την ενεργειακή τους ανεξαρτησία, μειώνοντας τις εισαγωγές ενέργειας από άλλα κράτη. Τέλος, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν και στην οικονομία, δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας, οι οποίες θα πρέπει να στελεχωθούν από εξειδικευμένο προσωπικό.



Η χώρα που πρωτοπορεί στην ύπαρξη αυτών των συστημάτων και κατά συνέπεια στην εξισορρόπηση της ενεργειακής ασφάλειας, της ισότητας και της βιωσιμότητας είναι η Δανία, σύμφωνα με το υπουργείο εξωτερικών της Δανίας.

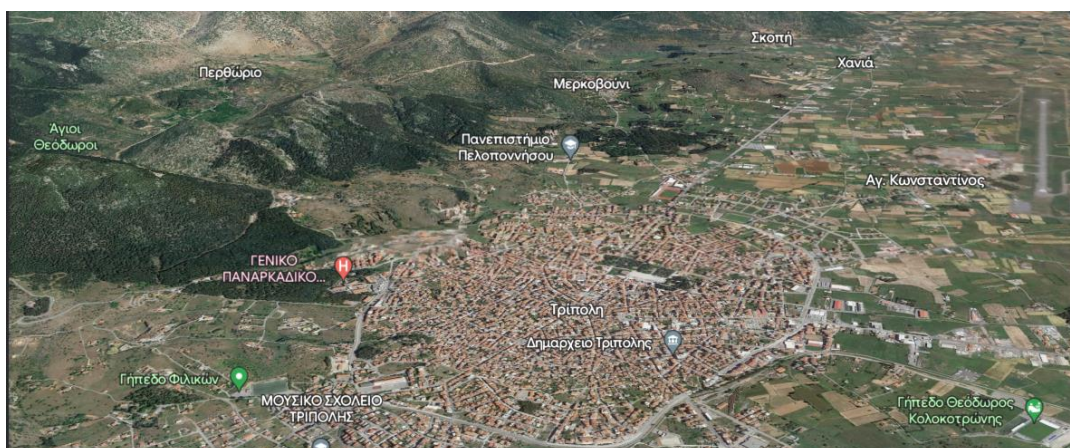
Η μείωση της κατανάλωσης και της σπατάλης ενέργειας αποκτά διαρκώς αυξανόμενη σημασία στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αποδέσμευσή της από τις εκπομπές του CO₂ μέχρι το 2050. Σύμφωνα με τους ενεργειακούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αναθεωρήθηκαν τον Δεκέμβριο του 2018, οι χώρες της Ε.Ε υποχρεώνονται να επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 0,8% κάθε χρόνο με την εξαίρεση της Κύπρου και της Μάλτας οι οποίες καλούνται να επιτυγχάνουν 0,24% κάθε χρόνο, για το χρονικό εύρος 2021-2030. (Πηγή: Energy efficiency directive - European Union)

Ένα ενεργειακό σύστημα απόδοσης που θα αναλυθεί παρακάτω είναι ο οργανικός κύκλος Rankine, ο οποίος συμβάλει στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας. Στη παρούσα διπλωματική, ο οργανικός κύκλος Rankine θα εφαρμοστεί και θα αξιοποιηθεί ως ένα σύστημα συμπαραγωγής σε θερμοκήπιο, καλύπτοντας τις θερμικές ανάγκες του και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, όπου αργότερα θα αποτελέσει κέρδος για τον παραγωγό. Αναλυτικότερα, ο στόχος της εργασίας είναι η συγκριτική ανάλυση των ψυκτικών ρευστών που θα οδηγήσουν σε διαφορετική απόδοση του συστήματος επομένως και διαφορετική ηλεκτροπαραγωγή. Έτσι, για συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας το χρόνο θα προκύψει η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε το σύστημα και εν τέλει το κέρδος που θα προκύψει για τον παραγωγό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Μέρος

2.1 Τοπολογία θερμοκηπίου

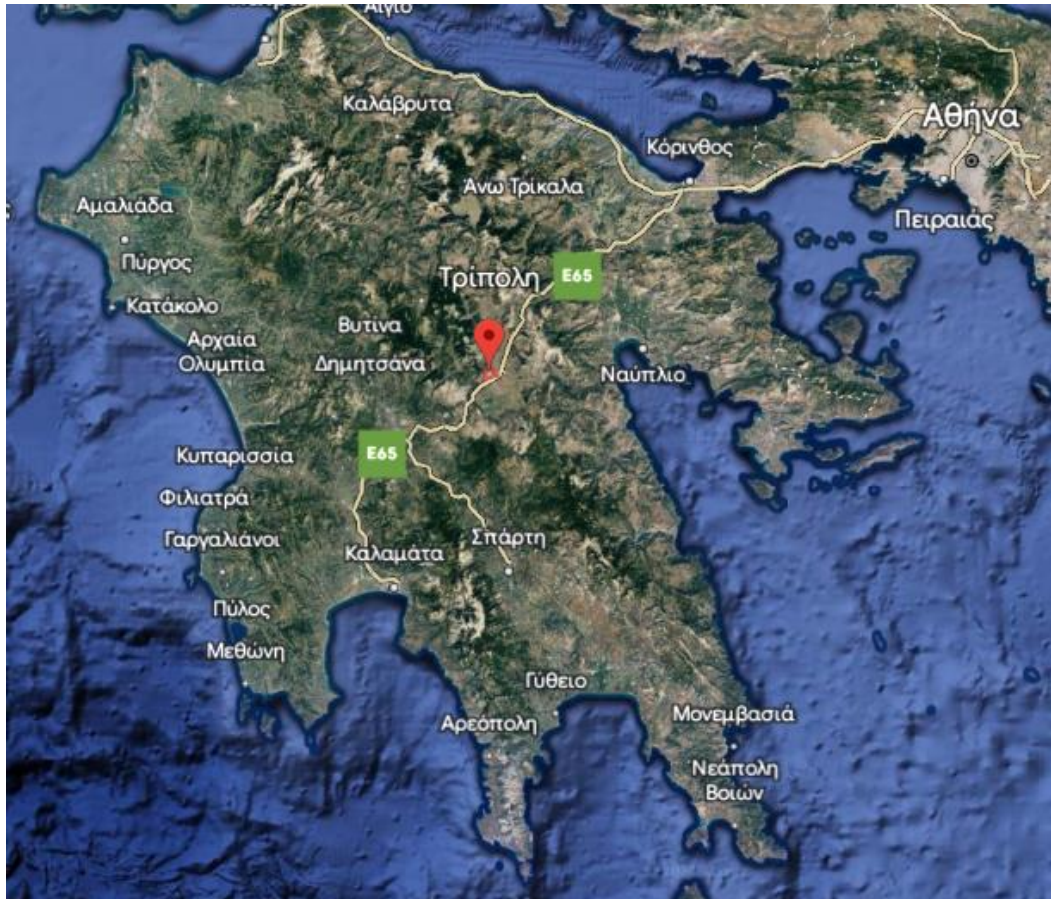
Η παρούσα μελέτη, όπως έχει προαναφερθεί, αφορά ένα σύστημα οργανικού κύκλου Rankine για εφαρμογή θερμοκηπίου με λέβητα βιομάζας. Η επιλογή της τοποθεσίας για την εφαρμογή και τον σχολιασμό της μελέτης έγινε σύμφωνα με την πηγή θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί στο κύκλο και τις ανάγκες που έχει η συγκεκριμένη καλλιέργεια, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Επομένως, βάσει αυτών των κριτηρίων έγινε η επιλογή της περιοχής Τρίπολης Αρκαδίας.



Εικόνα 1: Περιοχής της Τρίπολης Αρκαδίας.

Πηγή: Google Earth

Η Αρκαδία βρίσκεται στο κέντρο της Πελοποννήσου με την έκταση της να καλύπτει περίπου το 20% της περιοχής. Συνορεύει στο νοτιοδυτικό μέρος της με τους νομούς Ηλείας, Μεσσηνίας και Λακωνίας, στον ανατολικό τομέα με την Κορινθία και την Αργολίδα, ενώ στο βόρειο τμήμα με τον νομό της Αχαΐας. Η Αρκαδία απαρτίζεται συνολικά από πέντε δήμους, με μεγαλύτερο το δήμο της Τρίπολης, ο οποίος έχει πληθυσμό 44.165 κατοίκους, σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ.



Εικόνα 2: Γεωγραφική θέση της Αρκαδίας.

Πηγή: Google Earth

Το κλίμα που επικρατεί στην συγκεκριμένη περιοχή μεταβάλλεται ανάμεσα σε ηπειρωτικό και μεσογειακό, επιτρέποντας την καλλιέργεια πολλών διαφορετικών ειδών. Η γεωργική ενασχόληση είναι ιδιαίτερα αυξημένη και αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της οικονομίας της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, οι καλλιέργειες που αναπτύσσονται στη συγκεκριμένη τοποθεσία είναι κατά κύριο λόγο όσπρια, σιτηρά (δημητριακά) και φρούτα, όπως μήλα, αχλάδια κ.α.

Βρίσκεται σε υψόμετρο 650 μέτρων και περιστοιχίζεται από βουνά, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο χειμώνες με χαμηλές θερμοκρασίες και καλοκαίρια ζεστά και ξηρά. Τους χειμερινούς μήνες έχουν παρατηρηθεί θερμοκρασίες ακόμα και κάτω από -10 βαθμούς Κελσίου, πράγμα το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη για την εφαρμογή, καθώς σε τέτοιες θερμοκρασίες αναμένεται να υπάρχουν μεγάλα ποσά θερμικών απωλειών. Για αυτό το λόγο, πρέπει να πραγματοποιηθεί σωστός υπολογισμός των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα να καθοριστεί το μέγεθος του λέβητα βιομάζας.

2.2 Καλλιέργεια Θερμοκηπίου

Η επιλογή της καλλιέργειας η οποία θα αναλυθεί στη παρούσα εφαρμογή είναι η βιομηχανική κάνναβη (*Cannabis Sativa L.*). Η βιομηχανική κάνναβη αποτελεί ένα φυτό το οποίο έχει περάσει από διάφορα στάδια στην ιστορία της με τον άνθρωπο. Η κάνναβη είναι από τις παλαιότερες καλλιέργειες στον κόσμο και προέρχεται από την Κεντρική Ασία, στην οποία αξιοποιείται από το 10.000 π.Χ, σύμφωνα με την μελέτη (Okazaki κ.ά., 2011), καθώς έχουν βρεθεί ίνες κάνναβης και υπολείμματα σπόρων τα οποία χρονολογούνται από το 8.260 π.Χ . Λόγω της χρησιμότητάς της και των πολλαπλών ιδιοτήτων της, η κάνναβη διαδόθηκε σε όλο τον κόσμο. Χρησιμοποιούταν επίσης από τους Έλληνες και τους Ρωμαίους λόγω της αυξημένης ζήτησης για πανιά και σχοινιά πλοίων.

Την δεκαετία του 1980, παρατηρείται αισθητή μείωση στη καλλιέργεια της κάνναβης σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο, την δεκαετία του 1990, οι επιδοτήσεις από την Ευρωπαϊκή Ένωση είχαν ως αποτέλεσμα την αναβίωση της κλωστικής κάνναβης. Αυτό συνέβη διότι οι καλλιέργειες αυτές συμβάλλουν στον οικονομικό και περιβαλλοντικό τομέα, αυξάνοντας τη βιωσιμότητά του.

2.2.1 Μορφολογικά στοιχεία βιομηχανικής κάνναβης

Η βιομηχανική κάνναβη ανήκει στην οικογένεια των Κανναβίδων (*Cannabaceae*). Είναι ένα ετήσιο φυτό (Yazıcı, 2023) και είναι ιδιαίτερα γνωστό για τις χρήσεις του στην βιομηχανία και την ιατρική.

Είναι φυτό ανοιξιάτικης σποράς, με βέλτιστες θερμοκρασίες ανάπτυξης 19-26 °C (*odhgos_kaliergeias2021_Cannabis.pdf*, χ.χ.). Φτάνει σε ύψος περίπου τα 2 έως και 4 μέτρα, ανάλογα με την ποικιλία και τις καλλιεργητικές συνθήκες. Είναι φωτόφιλο φυτό, το οποίο έχει ευαισθησία στο φως (Cheng κ.ά., 2023) και απαιτεί περίπου 14 ώρες ημερησίου φωτισμού. Οι ανάγκες της καλλιέργειας για νερό, είναι αντικρουόμενες ανάμεσα σε διαφορετικές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί. Σύμφωνα με την έρευνα (Gill κ.ά., 2022), η κάνναβη μπορεί να ανταπεξέλθει σε περιόδους ξηρασίας, χωρίς να μεταβληθεί η παραγωγικότητα της σε συνθήκες θερμοκηπίου. Με τα επίπεδα της ξηρασίας να αναμένονται αύξηση στο μέλλον, η καλλιέργεια της κάνναβης αποτελεί λύση στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών.

Ο κύκλος ανθοφορίας της κάνναβης πραγματοποιείται τους μήνες μεταξύ Ιουλίου και Σεπτεμβρίου (www.agriculture.ec.europa.eu) και η συγκομιδή της γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο κόβεται το πάνω μέρος του φυτού και στο δεύτερο κόβονται τα στελέχη του. Σύμφωνα με έρευνα (Amaducci κ.ά., 2015), καλύτερη ποιότητα ίνας προκύπτει κατά τη συγκομιδή στην άνθηση, ωστόσο οι καλλιέργειες

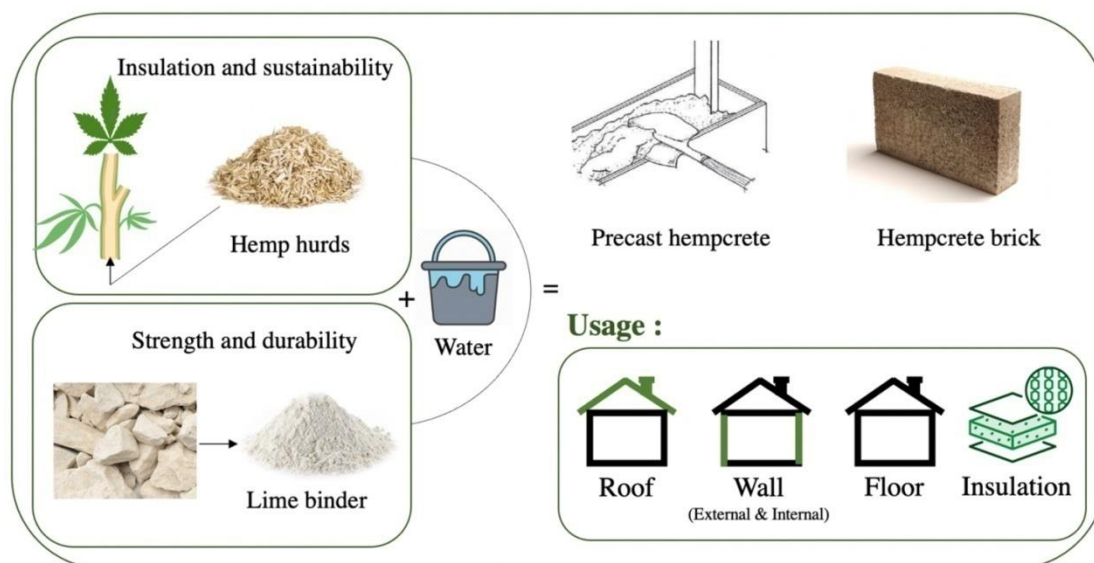
πρέπει να συγκομίζονται στην ωρίμανση των σπόρων προκειμένου οι καλλιεργητές να επωμίζονται μεγαλύτερο κέρδος, με την πώληση των σπόρων.

2.2.2 Χρήσεις και εφαρμογές της καλλιέργειας

Η βιομηχανική κάνναβη, έχει μεγάλη ποικιλία στις χρήσεις της και αποτελεί εργαλείο για πολλούς και διαφορετικούς τομείς. Μερικά παραδείγματα αυτών των χρήσεων θα αναλυθούν παρακάτω.

1. Υλικά κατασκευής: Σύμφωνα με την έρευνα (Fernea κ.ά., 2019), τα δομικά υλικά με βιώσιμο χαρακτήρα αποτελούν μεγάλη αναγκαιότητα, καθώς η ανάπτυξη βασίζεται στην απόκτηση του μεγαλύτερου δυνατού κέρδους χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές συνέπειες και οι συνέπειες στην ανθρώπινη ζωή.

Ένα χαρακτηριστικό υλικό κατασκευής είναι το κάνναβηλο (hemcrete), το οποίο είναι ένα βιοσύνθετο υλικό με εξαιρετικές περιβαλλοντικές και θερμικές ιδιότητες. Αποτελεί εναλλακτική λύση για το σκυρόδεμα. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιεί κλωστές κάνναβης για μόνωση και σταθερότητα και συνδετικό υλικό ασβέστη για στιβαρότητα και ανθεκτικότητα (Essaghouri κ.ά., 2023).



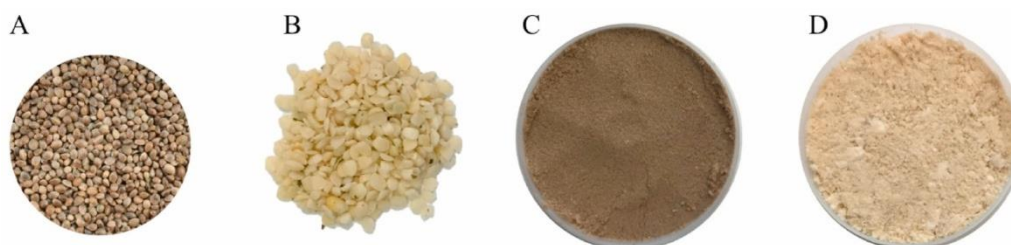
Σχήμα 4: Σύνθεση, χρήση και μέθοδοι κατασκευής του υλικού Hempcrete.

Πηγή: (Essaghouri κ.ά., 2023)

2. Καλλυντικά: Στον τομέα των καλλυντικών, ποικίλα προϊόντα χρησιμοποιούν εκχυλίσματα κάνναβης καθώς τα συστατικά που παράγονται από την κάνναβη έχουν δείξει οφέλη για το δέρμα και την υγεία του. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση κάνναβης στο δέρμα έχει αντιφλεγμονώδεις επιδράσεις οι οποίες σχετίζονται με δερματικές παθήσεις, προσφέρει ενυδάτωση και θρέψη ενώ διαθέτει και αντιοξειδωτικές επιδράσεις που βοηθούν στην προστασία του δέρματος. Επίσης, η τοπική εφαρμογή προϊόντων με κάνναβη μπορεί να προσφέρει ανακούφιση από τον πόνο.

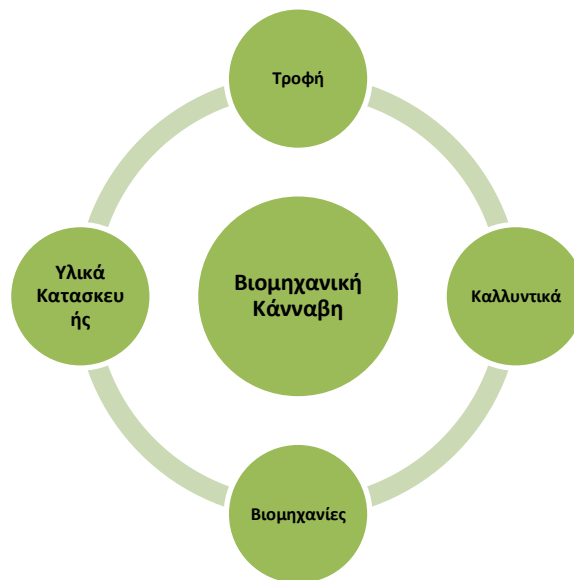


3. Τροφή: Εκτός από την υγεία του δέρματος και της ευεργετικές ιδιότητες της, οι σπόροι της κάνναβης αποτελούν πλούσιοι σε πρωτεΐνες και θρεπτικά στοιχεία. Βασική χρήση τους είναι η παρασκευή συμπληρωμάτων διατροφής. Οι σπόροι κάνναβης είναι πλούσιοι σε λιπαρά οξέα τα οποία συμβάλουν στην υγεία της καρδιάς, σε φυτικές ίνες που βοηθούν στη διατήρηση ενός υγιούς πεπτικού συστήματος, σε βιταμίνες και μέταλλα ενώ θεωρούνται καλή πηγή φυτικής πρωτεΐνης. Η βιταμίνη E και τα ωμέγα λιπαρά οξέα που περιέχονται στους σπόρους υποστηρίζουν και την υγιή ανάπτυξη των μαλλιών. Σύμφωνα με την έρευνα (Shen κ.ά., 2021) στη παρακάτω φωτογραφία παρουσιάζονται εικόνες από, βιομηχανικό σπόρο κάνναβης, αφυδατωμένο σπόρο κάνναβης, σκόνη πρωτεΐνης από όλο το σπόρο κάνναβης και σκόνη πρωτεΐνης από αφυδατωμένο σπόρο κάνναβης.



Σχήμα 5: Διαφορετικές χρήσεις κάνναβης σαν προϊόν.

4. Βιομηχανίες: Οι βιομηχανίες προμηθεύονται περίπου το 28% των παραγόμενων ινών της βιομηχανικής κάνναβης και τις αξιοποιούν στη παραγωγή σχοινιών, σπάγκων και στη δημιουργία πανιών σε ιστιοφόρα. Οι ίνες οι οποίες έχουν καλύτερη ποιότητα προωθούνται στην υφαντουργία, ενώ ένα μεγάλο μέρος των ινών αξιοποιούνται από χαρτοβιομηχανίες για την παραγωγή χαρτιού. Το χαρτί κάνναβης αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση από το χαρτί που παράγεται από δέντρα, καθώς απαιτεί λιγότερα χημικά και νερό κατά την παραγωγή, ενώ μπορεί να ανακυκλωθεί πολλές φορές. Τα υφάσματα που παράγονται από μεταποιημένες ίνες κάνναβης είναι γνωστά για την ανθεκτικότητα και την ελαστικότητά τους.



Σχήμα 6: Συσχέτιση βιομηχανικής κάνναβης.

Οι προαναφερθείσες εφαρμογές αποτελούν παραδείγματα αξιοποίησης της βιομηχανικής κάνναβης. Η τεχνολογία των εφαρμογών εξελίσσεται με ραγδαίο ρυθμό, με στόχο να αξιοποιηθεί η βιομηχανική κάνναβη στον έπακρο βαθμό της.

2.2.3 Δεδομένα καλλιέργειας στην Ευρώπη

Σύμφωνα με την πηγή της European Industrial Hemp Association (EiHA) (www.eiha.org), η βιομηχανική κάνναβη έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές με την πάροδο των χρόνων. Το 1940, η έκταση που καλλιεργούταν από βιομηχανική κάνναβη ήταν κοντά στα 4 εκατομ. στρέμματα, ενώ το 2000 μειώθηκε στα 100.000 στρέμματα. Το 2018, αυτό το ποσό αυξήθηκε στα 500.000 στρέμματα με την Γαλλία να αντιπροσωπεύει το 37% του ποσού. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι πρώτες δέκα χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε καλλιέργεια βιομηχανικής κάνναβης το έτος 2019, σύμφωνα με τα στοιχεία της EiHA σε εκτάρια. Τα εκτάρια είναι διεθνείς μονάδα μέτρηση και ισούται με 10.000 τετραγωνικά μέτρα.



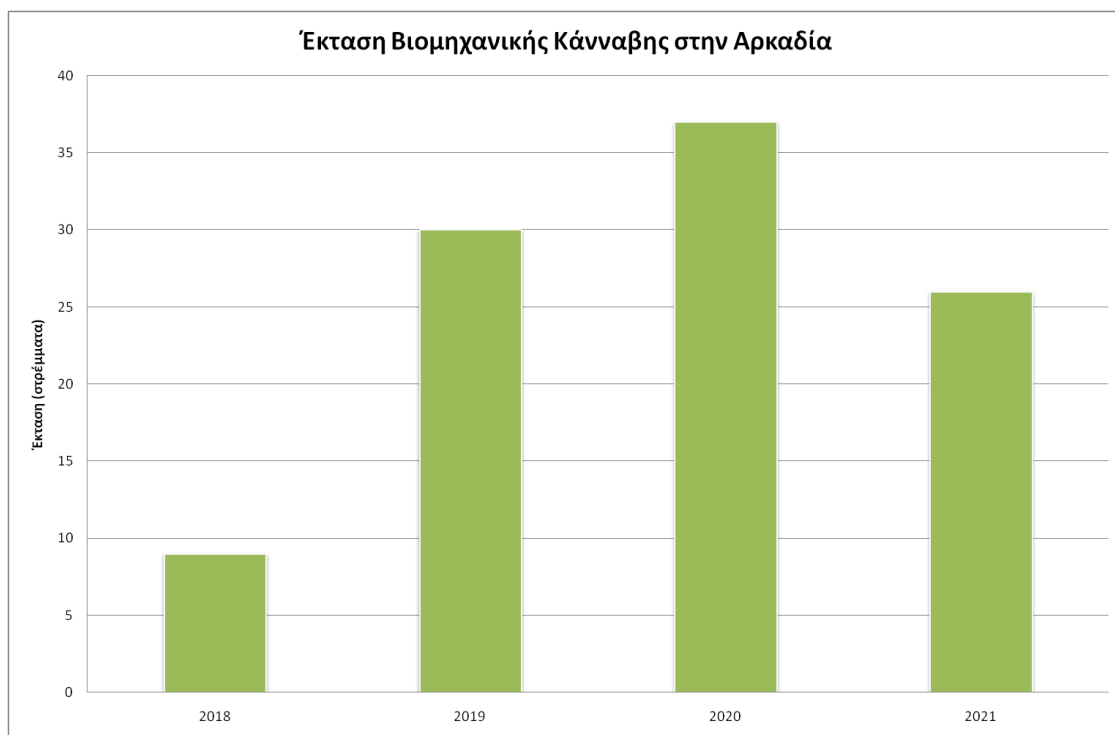
Διάγραμμα 3: Έκταση καλλιεργημένη στην Ευρώπη από βιομηχανική κάνναβη.

2.2.4 Δεδομένα καλλιέργειας στην Ελλάδα

Στην Ελληνική επικράτεια είχε γίνει απαγόρευση της συγκεκριμένης καλλιέργειας το 1957, την περίοδο που λειτουργούσαν ήδη επτά κανναβουργεία, προορίζοντας της ίνες από την καλλιέργεια της βιομηχανικής κάνναβης για παραγωγή τεχνικών υφασμάτων (MANTEΛΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗ .pdf, χ.χ.). Από το 1990 έως και σήμερα επιτράπηκε στην Ελλάδα η δημιουργία παραγωγικών μονάδων βιομηχανικής κάνναβης επιδοτούμενες από την Ε.Ε. Σήμερα το νομικό πλαίσιο που ισχύει φαίνεται στο ΦΕΚ 6021/31-12- 2020.

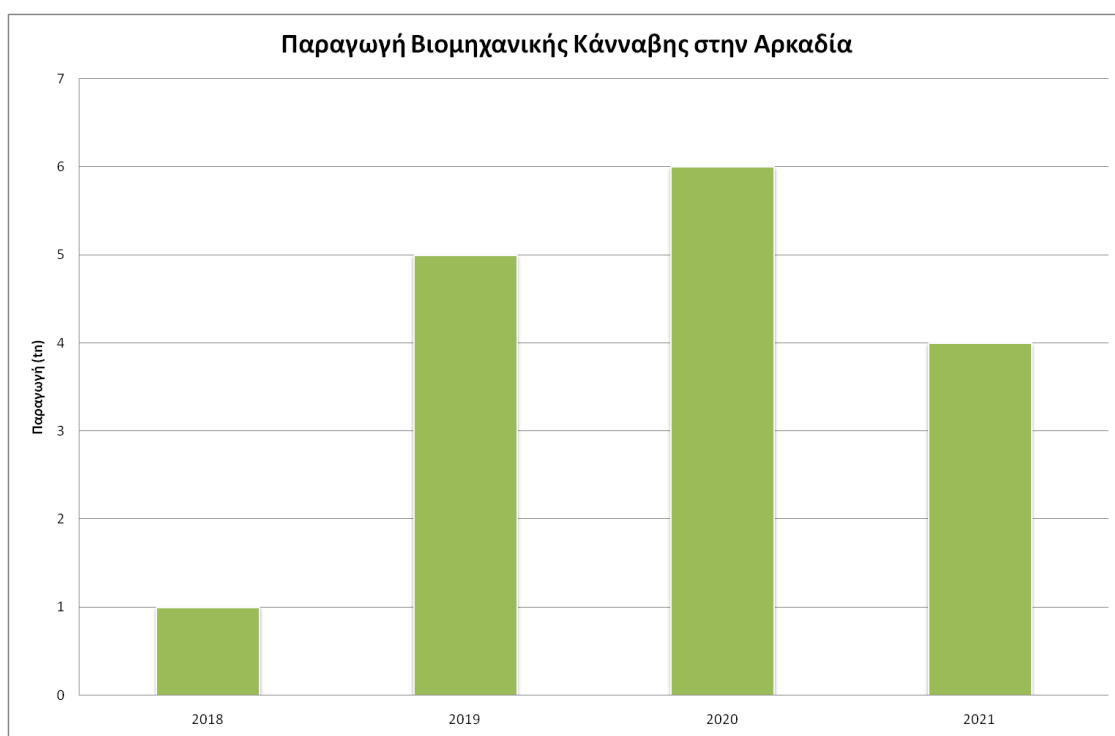
Πιο συγκεκριμένα, παρακάτω φαίνονται δυο γραφήματα που αναφέρονται στην έκταση και στη παραγωγή βιομηχανικής κάνναβης στην περιοχή της Αρκαδίας τα έτη

2018-2021, όπου είναι και η περιοχή που θα πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μελέτη.



Διάγραμμα 4: Έκταση καλλιεργημένη στην Αρκαδία από βιομηχανική κάνναβη.

Πηγή δεδομένων: <http://www.minagric.gr>



Διάγραμμα 5: Παραγωγή βιομηχανικής κάνναβης σε τόνους στην περιοχή της Αρκαδίας.

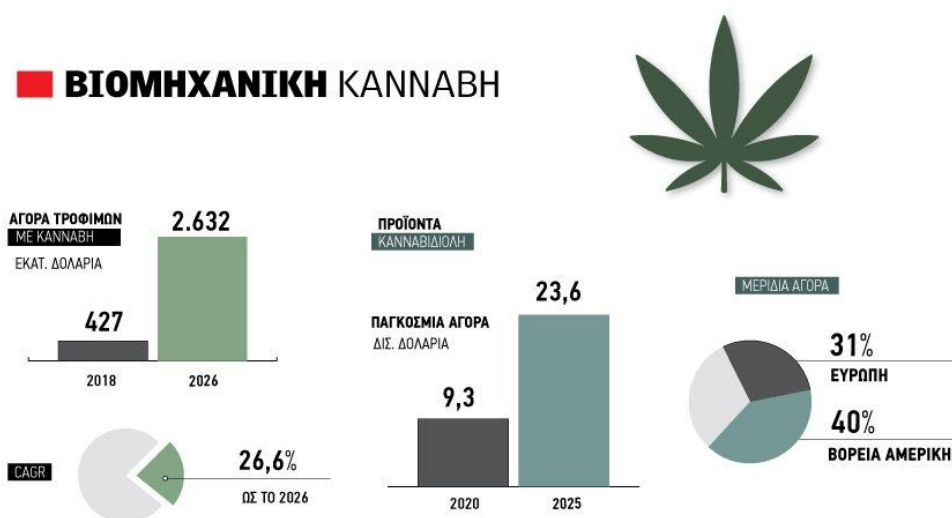
Πηγή δεδομένων: <http://www.minagric.gr>

2.2.5 Οικονομικά στοιχεία καλλιέργειας

Καθώς η παγκόσμια αγορά της βιομηχανικής κάνναβης εξελίσσεται διαρκώς και τα δεδομένα αλλάζουν, δεν είναι εύκολο να παρατηρηθεί ποια ήπειρος κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό της αγοράς.

Η Ευρώπη κατέχει σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας αγοράς με χώρες όπως την Γαλλία, τη Γερμανία και την Ιταλία να έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό. Ακόμη, οι Ηνωμένες Πολιτείες αποτελούν σημαντική αγορά στην βιομηχανική κάνναβη όπως και η βόρεια Αμερική με πρωτοπόρο τον Καναδά. Τέλος, άλλες περιοχές όπως η Ασία και η Λατινική Αμερική αποτελούν μικρότερο ποσοστό της αγοράς.

Σύμφωνα με την Royal Hemp (www.royalhemp.gr), στην παρακάτω εικόνα αναφέρονται τα οικονομικά στοιχεία της καλλιέργειας για την παγκόσμια αγορά και προβλέπει τα έσοδα για το 2025.



Εικόνα 3: Οικονομικά στοιχεία βιομηχανικής κάνναβης.

Πηγή: (www.royalhemp.gr)

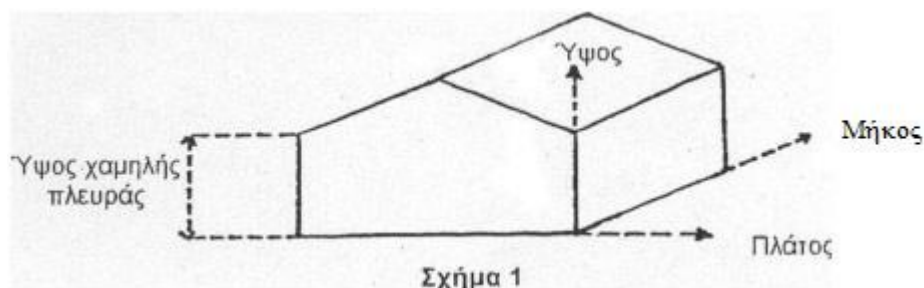
2.3 Θερμοκήπιο

Τα θερμοκήπια όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν δομές οι οποίες χρησιμοποιούνται για καλλιέργεια φυτών, με ελεγχόμενες συνθήκες για όλο το χρόνο. Υπάρχουν διάφορα είδη θερμοκηπίων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά το καθένα και διαφέρουν ανάλογα με τον σχεδιασμό, τις λειτουργικές απαιτήσεις και τα υλικά κατασκευής.

2.3.1 Είδη θερμοκηπίων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι θερμοκηπίων ο καθένας με το δικό του μοναδικό σχεδιασμό και χαρακτηριστικά. Η επιλογή του θερμοκηπίου εξαρτάται από παράγοντες όπως ο διαθέσιμος χώρος, το κλίμα και η προβλεπόμενη χρήση. Κάθε τύπος θερμοκηπίου προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα για την επιτυχή καλλιέργεια των φυτών. Μερικοί τύποι θα αναλυθούν παρακάτω:

- ❖ **Αμφίρρικτο:** Είναι θερμοκήπιο διπλής όψης, με διαμόρφωση τέτοια ώστε να επιτρέπει την διέλευση του φωτός και από τις δύο πλευρές του. Συνήθως σαν υλικό κάλυψης χρησιμοποιούν πλαστικό, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερη εκθετική επιφάνεια στη καλλιέργεια. Γίνεται χρήση τους σε καλλιέργειες που απαιτούν υψηλό ποσοστό ηλιακού φωτός. Παράδειγμα της δομής του φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία.

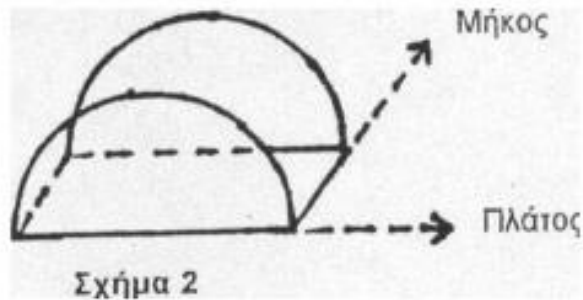


Εικόνα 4: Αμφίρρικτο θερμοκήπιο.

Πηγή: (www.plantpro.gr)

- ❖ **Αμφίρρικτο απλό:** Είναι η επαναληψιμότητα σε μήκος, του αμφίρρικτου θερμοκηπίου που αναλύθηκε παραπάνω.
- ❖ **Αμφίρρικτο πολλαπλό:** Είναι η επαναληψιμότητα σε μήκος και σε πλάτος, του αμφίρρικτου θερμοκηπίου.
- ❖ **Τοξωτό:** Είναι θερμοκήπιο που διακρίνεται από το σχήμα της καμπυλότητας στην κάλυψή του. Το συγκεκριμένο θερμοκήπιο έχει ένα

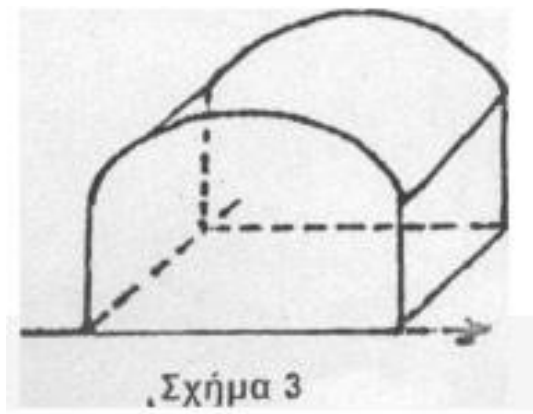
πλεονέκτημα συγκριτικά με το αμφίρρικτο, το οποίο λόγω της καμπυλότητάς του, του επιτρέπει μεγαλύτερη αντοχή σε ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ βροχή, άνεμο, χιόνι κ.α). Συνήθως, ως υλικό δομής έχει το μέταλλο, το οποίο παρέχει με αυτό τον τρόπο ανθεκτικότητα και σταθερότητα. Παράδειγμα της δομής του φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 5: Τοξωτό θερμοκήπιο.

Πηγή: (www.plantpro.gr)

- ❖ Τοξωτό απλό: Είναι η επαναληψιμότητα σε μήκος, του τοξωτού θερμοκηπίου που αναλύθηκε παραπάνω.
- ❖ Τροποποιημένο τοξωτό: Είναι παρόμοιο με το τοξωτό θερμοκήπιο, με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί ορθοστάτες. Παράδειγμα της δομής του φαίνεται στη παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 6: Τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο.

Πηγή: (www.plantpro.gr)

Αυτοί οι τύποι θερμοκηπίου που προαναφέρθηκαν είναι οι πιο γνωστοί, καλύπτοντας ένα μεγάλο ποσοστό των τύπων θερμοκηπίου σε σχέση με το σχήμα τους. Στην παρούσα εργασία, ο τύπος θερμοκηπίου που επιλέχθηκε είναι το αμφίρρικτο θερμοκήπιο, διότι ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες της καλλιέργειας και στην περιοχή της μελέτης. Επιπλέον, ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος συνέβαλε στην

επιλογή του συγκεκριμένου τύπου θερμοκηπίου, είναι το χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τις μονάδες θερμοκηπίων με τοξωτό σχήμα οι οποίες είναι πιο ακριβές στην κατασκευή τους λόγω της περίπλοκης δομής τους. Εξαιτίας της καμπυλότητας της κάλυψής τους, απαιτούν πιο εξειδικευμένα υλικά, με αποτέλεσμα να κοστολογούνται πιο ακριβά από τα θερμοκήπια αμφίρρικτου τύπου.

2.3.2 Θερμοκήπιο μελέτης

Όπως προαναφέρθηκε, επιλέχθηκε το αμφίρρικτο σχήμα για τη κατασκευή του θερμοκηπίου που θα αναλυθεί. Ακόμη ένας σημαντικός παράγοντας για την μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας όσον αφορά το θερμοκήπιο είναι και το υλικό κάλυψης που θα χρησιμοποιηθεί.

Το υλικό κάλυψης, είναι υπεύθυνο για την απόδοση και τη σωστή λειτουργία του θερμοκηπίου. Η χρήση του είναι η διαχείριση των επιτρεπόμενων ποσών ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμική μόνωση, η αντοχή στις καιρικές συνθήκες και γενικότερα η αύξηση όσο το δυνατόν περισσότερο της διάρκειας ζωής του θερμοκηπίου. Τα πιο κοινά υλικά κάλυψης είναι το γυαλί και το πολυαιθυλένιο. Το γυαλί, είναι δημοφιλές υλικό κάλυψης λόγω της διάρκειας ζωής του και της καλής θερμομόνωσης που παρέχει. Από την άλλη μεριά, είναι ιδιαίτερα βαρύ σαν υλικό και επιρρεπής στα χτυπήματα. Σύμφωνα με την μελέτη (Kim κ.ά., 2022) έδειξε ότι το γυαλί είναι το καταλληλότερο υλικό κάλυψης για εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης κατά την θερινή περίοδο.

Το πλαστικό, είναι ένα ελαφρύ και οικονομικό υλικό κάλυψης με ηλιακή διαπερατότητα 86%, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πίνακα 3 της συγκεκριμένης μελέτης (Rasheed κ.ά., 2018). Έχει καλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες και το βασικό μειονέκτημα του συγκριτικά με το γυαλί είναι η αντοχή του στο χρόνο, καθώς ο κύκλος ζωής του είναι σημαντικά μικρότερος. Ο κυριότερος λόγος που επιλέγεται το πλαστικό ως υλικό κάλυψης στην συγκεκριμένη μελέτη, είναι ότι συγκριτικά με τα άλλα υλικά κάλυψης είναι οικονομικότερο και το ποσοστό διαπερατότητας του είναι ικανοποιητικό για την συγκεκριμένη καλλιέργεια και περιοχή.

2.3.3 Διαστάσεις θερμοκηπίου

Οι διαστάσεις του αμφίρρικτου θερμοκηπίου που επιλέχθηκε αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Δεδομένα διαστάσεων θερμοκηπίου.

Δεδομένα Διαστάσεων		
Διάσταση Ανατολικού Προσανατολισμού (Μήκος)	24	m
Διάσταση Νότιου Προσανατολισμού (Πλάτος)	20	m
Ελάχιστο Ύψος Θερμοκηπίου	3	m
Μέγιστο Ύψος Θερμοκηπίου	5	m

Στην συνέχεια θα διαχωριστούν οι πλευρές του θερμοκηπίου για να υπολογισθούν ως εξής:

Μπροστά-Πίσω Επιφάνεια

Στην μπροστά επιφάνεια της μονάδας του θερμοκηπίου που θα αναλυθεί στη παρούσα εργασία διαπιστώνονται ορθογώνια παραλληλόγραμμα και τρίγωνα, όπου θα αναλυθούν παρακάτω.

➤ *Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο* = (2)
(Διάσταση Νότιου Προσανατολισμού (Πλάτος) ×
Ελάχιστο Ύ.Θ) × 2

$$\text{Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο} = 120 \text{ m}^2$$

➤ *Τρίγωνα* = $\left(\frac{\text{Διάσταση Νότιου Προσανατολισμού (Πλάτος)} \times (\text{Μέγιστο Ύ.Θ} - \text{Ελάχιστο Ύ.Θ})}{2} \right) \times 2$ (3)

$$\text{Τρίγωνα} = 40 \text{ m}^2$$

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των επιφανειών φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2: Επιφάνειες θερμοκηπίου.

Επιφάνεια (Μπροστά-Πίσω)		
Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο	120	m ²
Τρίγωνα	40	m ²

Πλευρές

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι πλευρές δεξιά και αριστερά, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση.

$$\begin{aligned} &\text{➤ Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο} = \\ &(\text{Διάσταση Ανατολικού Προσανατολισμού (Μήκος)} \times \\ &\text{Ελάχιστο Ύψος θερμοκηπίου}) \times 2 \end{aligned} \quad (4)$$

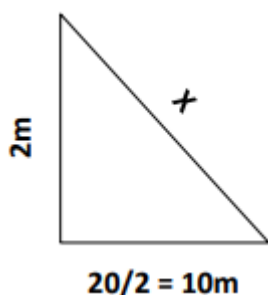
$$\text{Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο} = 144 \text{ m}^2$$

Πίνακας 3: Πλευρές θερμοκηπίου.

Πλευρές (Δεξιά-Αριστερά)		
Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο	144	m ²

Οροφή

Για να υπολογισθεί η ορθογώνια πλευρά της οροφής θα εφαρμοστεί το πυθαγόρειο θεώρημα στο μισό τρίγωνο της οροφής, καθώς είναι γνωστές οι δυο πλευρές και το τρίγωνο που σχηματίζεται είναι ορθογώνιο.



Οπότε προκύπτει ότι το $x=10,198 \text{ m}$.

Με βάση αυτό,

$$\begin{aligned} &\text{➤ Ορθογώνιο} = \\ &(\text{Διάσταση Ανατολικού Προσανατολισμού (Μήκος)} \times \\ &x) \times 2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Ορθογώνιο} = 489,504 \text{ m}^2$$

Πίνακας 4: Οροφή θερμοκηπίου.

Οροφή		
Από πυθαγόρειο $x=10,198$ m		
Ορθογώνιο	489,504	m²

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω διαστάσεις που υπολογίσθηκαν, προκύπτουν τα τελικά αποτελέσματα τα οποία είναι τα εξής:

$$\begin{aligned} &\text{➤ Επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου} = && (6) \\ &\quad (\text{Διάσταση Ανατολικού Προσανατολισμού(Μήκος)} \times \\ &\quad \text{Διάσταση Νότιου Προσανατολισμού (Πλάτος)}) \end{aligned}$$

$$\text{Επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου} = 480 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} &\text{➤ Επιφάνεια υλικού κάλυψης} = (\text{Ορθογώνιο(Οροφής)} + && (7) \\ &\quad \text{Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο(Πλευρές)} + \text{Τρίγωνα(Μπροστά επιφάνειας)} + \\ &\quad \text{Ορθογώνιο Παραλληλόγραμμο(Μπροστά επιφάνεια)}) \end{aligned}$$

$$\text{Επιφάνεια υλικού κάλυψης} = 793,5 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} &\text{➤ Όγκος Τριγ. Πρίσματος} = && (8) \\ &\quad \left(\frac{\text{Διάσταση Νότιου Προσανατολισμού (Πλάτος)} \times \text{Διάσταση Ανατολικού Προσανατολισμού (Μήκος)} \times 2}{2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Όγκος Τριγ. Πρίσματος} = 480 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} &\text{➤ Όγκος Θερμοκηπίου} = (\text{Επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου} \times \text{Ελάχιστο Υ.Θ}) + && (9) \\ &\quad \text{Όγκο Τριγ. Πρίσματος} \end{aligned}$$

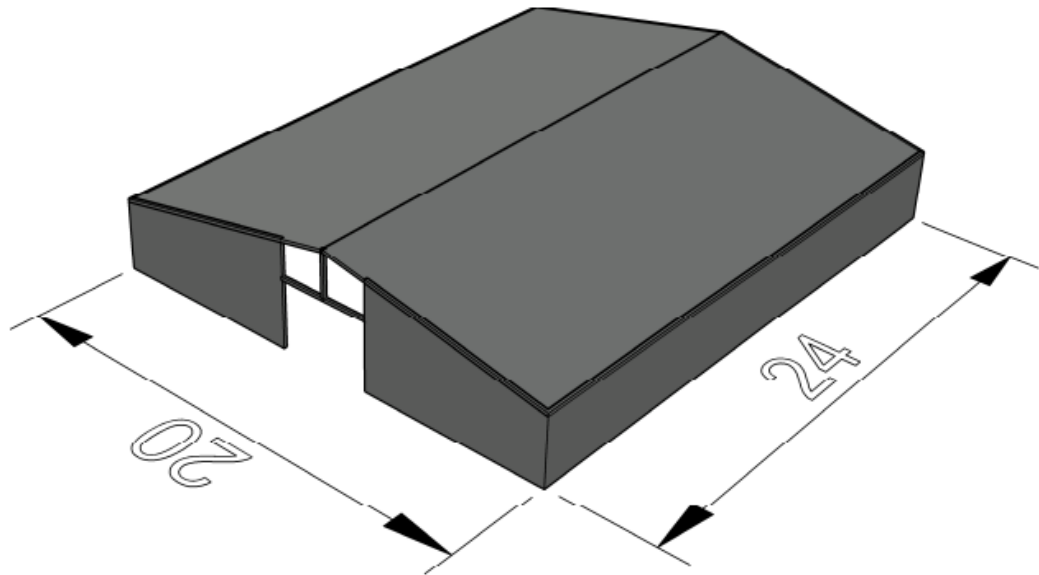
$$\text{Όγκος Θερμοκηπίου} = 1920 \text{ m}^3$$

Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα για διευκόλυνση των υπολογισμών.

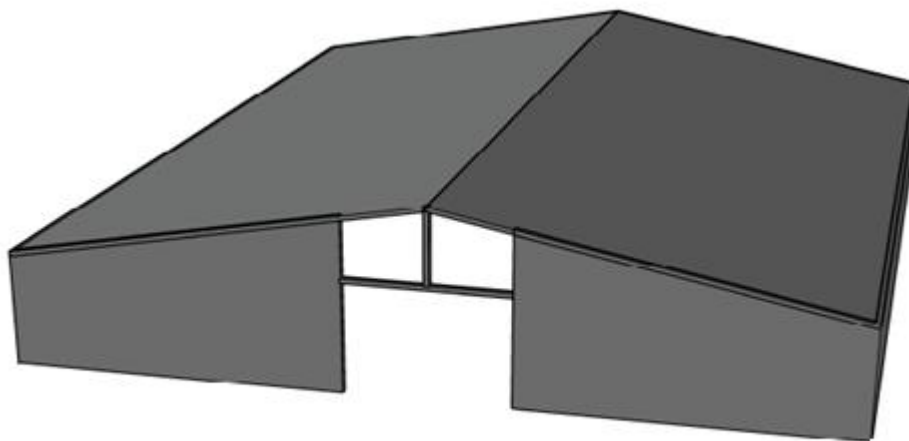
Επιφάνεια Εδάφους Θεμοκηπίου	480	m ²
Επιφάνεια Υλικού Κάλυψης	793,5	m ²
Όγκος Θεμοκηπίου	1920	m ³
Όγκος Τριγωνικού Πρίσματος	480	m ³

Πίνακας 5: Συνολικές διαστάσεις θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα και για λόγους κατανόησης και διευκόλυνσης, μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα AutoCAD το μοντέλο του θερμοκηπίου της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 7: Κάτοψη Θερμοκηπίου.



Εικόνα 8: Πρόσοψη Θερμοκηπίου.

2.3.4 Υπολογισμός θερμικών απωλειών

Τα θερμοκήπια είναι πολύπλοκα συστήματα που απαιτούν σημαντικές ποσότητες ενέργειας (Golzar κ.ά., 2018). Για να διατηρηθεί η ενεργειακή ισορροπία είναι σημαντικό να λαμβάνονται μερικοί παράγοντες που αφορούν το ενεργειακό ισοζύγιο κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του θερμοκηπίου.

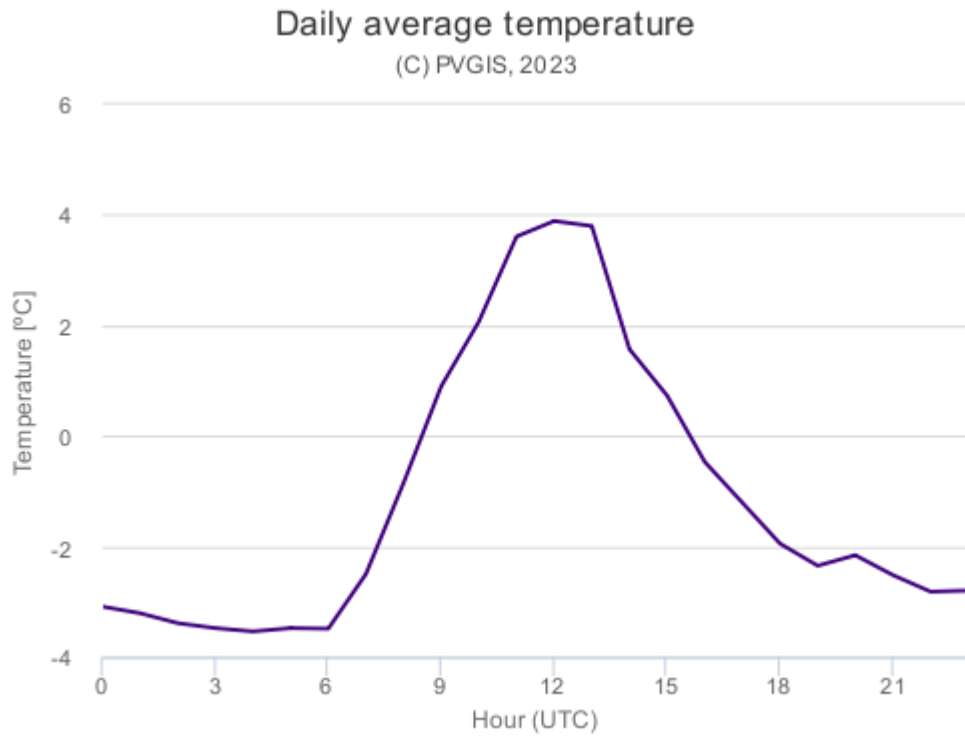
Το ενεργειακό ισοζύγιο ενός θερμοκηπίου αναφέρεται στην ισορροπία ανάμεσα στα ποσά θερμότητας από τα κέρδη και τις απώλειες του θερμοκηπίου. Κατανοώντας το ενεργειακό ισοζύγιο, μπορεί να γίνει η αξιολόγηση για την απόδοση και την θερμοκρασία του θερμοκηπίου.

Οι απώλειες θερμότητας, γίνονται κυρίως λόγω αερισμού, αγωγιμότητας, αγωγιμότητας του εδάφους και ακτινοβολίας. Κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών, η απώλεια θερμότητας γίνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό λόγω μετάδοσης από αγωγιμότητα και συναγωγή (Ahamed κ.ά., 2018a). Η αγωγιμότητα λόγω του εδάφους στο θερμοκήπιο, εξαρτάται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του και από την σύνθεση του (Al-Helal κ.ά., 2015). Η εκτίμηση όμως της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, καθίσταται ιδιαίτερα περίπλοκη διαδικασία εξαιτίας παραγόντων όπως το πλάτος θερμοκηπίου, την γωνία ηλιακού ύψους, το στάδιο ανάπτυξης του φυτού και των τύπο της καλλιέργειας, όπου επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος (Ahamed κ.ά., 2018b).

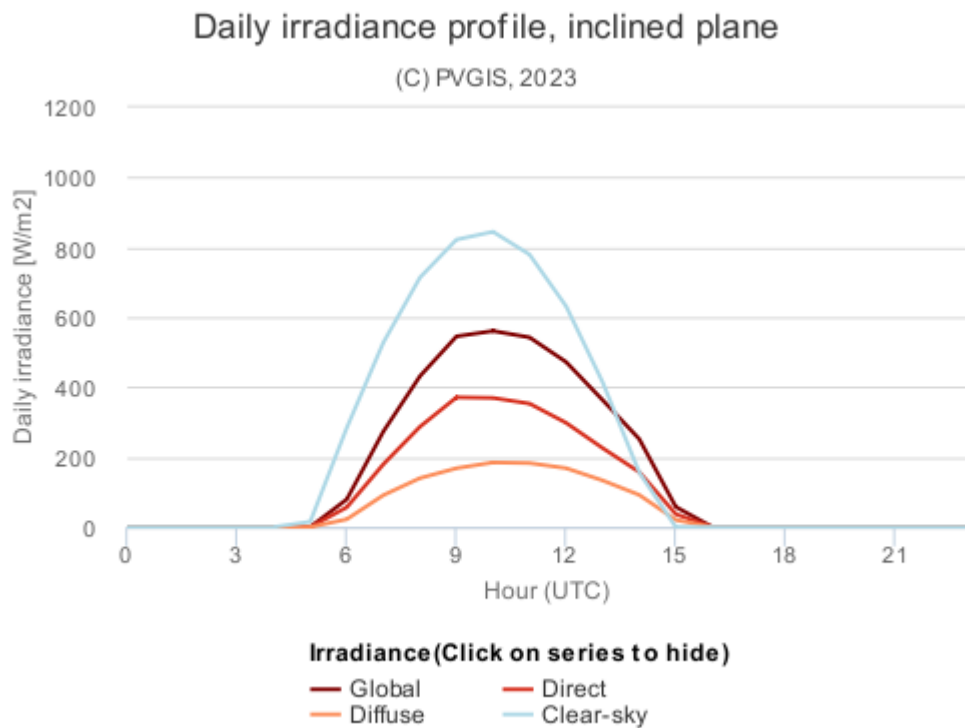
Τα κέρδη θερμότητας στο θερμοκήπιο, κατά κύριο λόγο προσδίδονται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη. Η αύξηση της θερμότητας του εσωτερικού αέρα, εξαρτάται από το σχήμα του θερμοκηπίου (Sethi, 2009).

Οι καλλιεργητές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους, τις συνιστώσες που προαναφέρθηκαν για την καλύτερη ανάπτυξη και παραγωγή της καλλιέργειας (Van Beveren κ.ά., 2015).

Για τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου και κατά συνέπεια του ποσού απωλειών που πρέπει να καλυφθεί από τον ORC στη συγκεκριμένη εργασία, αρχικά βρέθηκαν τα θερμοκρασιακά δεδομένα και τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, για την δυσμενέστερη ημέρα του έτους της περιοχής της Τρίπολης, από το site [PVGIS](#). Τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 6: Δεδομένα θερμοκρασίας δυσμενέστερης ημέρας.



Διάγραμμα 7: Δεδομένα ακτινοβολίας δυσμενέστερης ημέρας.

Η τιμή της θερμοκρασίας είναι $-3,49\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η τιμή της ακτινοβολίας είναι $56,49\frac{W}{m^2}$.
Στην συνέχεια υπολογίζεται ο Όγκος αέρα.

Όγκος αέρα = Εναλλαγών αέρα ανά ώρα \times Όγκος θερμοκηπίου

$$V_{a-Q} = n \times V_{\text{θερμοκηπίου}} = 1920\text{ }m^3$$

Ο αριθμός εναλλαγών αέρα, για υλικό κάλυψης πλαστικό είναι ίσο με 1.

Παρακάτω ακολουθεί ο πίνακας δεδομένων για τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου.

Πίνακας 6: Πίνακας δεδομένων

<u>ΔΕΔΟΜΕΝΑ</u>			
Πυκνότητα	ρ	1,2	$\frac{kg}{m^3}$
Ειδική θερμότητα του αέρα	cp	0,24	$\frac{kcal}{kg \times ^{\circ}C}$
Όγκος αέρα	Va-Q	1920	m^3
Εναλλαγών αέρα ανά ώρα	n	1	-
Όγκος θερμοκηπίου	V	1920	m^3
Θερμοκρασία αέρα στο εσωτερικό θερμοκηπίου	Ti	25	$^{\circ}C$
Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα (της πιο κρύας ημέρας)	Te	-3,49	$^{\circ}C$
Συντελεστής θερμοαγωγιμότητας του υλικού κάλυψης	K	5,7	$\frac{kcal}{m^2 \times h \times ^{\circ}C}$
Επιφάνεια καλύμματος θερμοκηπίου	Ac	793,5	m^2
Επιφάνεια εδάφους	Αεδάφους	480	m^2
Συντελεστής θερμοαγωγιμότητας του εδάφους	Κεδάφους	1,6	$\frac{kcal}{m^2 \times h \times ^{\circ}C}$
Εκπεμπτικότητα του εδάφους και των φυτών του θερμοκηπίου	εf	0,9	-
Εκπεμπτικότητα της ατμόσφαιρας	εa	0,8	-
Θερμοκρασία ουρανού	Tsky	-0,3586	$^{\circ}C$
Σταθερά Stefan-Boltzmann	σ	5,66797E-08	$\frac{KWh}{m^2 \times K}$
Ποσοστό περατότητας του καλύμματος στην ακτινοβολία	P	0,86	-
Εμβαδόν θερμοκηπίου	Αθερμοκηπίου	480	m^2
Ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά την διαφανή κάλυψη του θερμοκηπίου	T	86	%
Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	I	56,49	$\frac{W}{m^2}$

Ακολουθούν οι απώλειες θερμότητας σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν:

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

$$A) \quad \text{ΛΟΓΩ ΑΕΡΙΣΜΟΥ} \quad Q1 = \rho \times cp \times V_{a-q} \times (T_i - T_e) \quad (10)$$

$$B) \quad \text{ΛΟΓΩ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ} \quad Q2 = K \times A_c \times \Delta T \quad (11)$$

$$Γ) \quad \text{ΛΟΓΩ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ} \quad Q3 = K_{εδαφους} \times A_{εδαφους} \times \Delta T \quad (12)$$

$$Δ) \quad \text{ΛΟΓΩ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ} \quad Q4 = \sigma \times F_c \times A_{εδαφους} \times (\epsilon f \times T_i^4 - \epsilon a \times T_{sky}^4) \quad (13)$$

ή

$$Q4 = 25\% \times (Q1 + Q2 + Q3) \quad (14)$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα κέρδη θερμότητας:

ΚΕΡΔΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

$$Q_{κερδών} = q1 \times 30\% \quad (15)$$

$$\text{Όπου:} \quad q1 = A_{θερμοκηπίου} \times T \times I \quad (16)$$

Επομένως, ύστερα από τους υπολογισμούς προκύπτουν τα συνολικά ποσά απωλειών και κερδών του θερμοκηπίου:

$$Q_{ΑΠΩΛΕΙΩΝ} = 193,65 \text{ KW}$$

$$Q_{ΚΕΡΔΩΝ} = 7,32 \text{ KW}$$

Οπότε, οι συνολικές θερμικές ανάγκες του θερμοκηπίου που απαιτούνται για να καλυφθούν από τον ORC για την δυσμενέστερη ημέρα του έτους είναι ίσες με την διαφορά των απωλειών μείον των κερδών.

$$Q_{ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ} = 186,32 \text{ KW}$$

2.4 Βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας, προερχόμενη από φυσικές ιδιότητες ή από πόρους που προέρχονται από πηγές όπως φυτά, ζώα, μικροοργανισμούς ή απόβλητα. Θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας επειδή τα υλικά αυτά μπορούν να αναπληρώνονται συνεχώς μέσω βιώσιμων πρακτικών. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας, βιοκαυσίμων ή και άλλων προϊόντων.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της βιομάζας είναι ότι μέσω της καύσης της δεν απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα διοξείδιο του άνθρακα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης, οι πόροι βιομάζας είναι συνήθως τοπικά διαθέσιμοι, μειώνοντας την εξάρτηση από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Επόμενο πλεονέκτημα της βιομάζας αποτελεί η αμελητέα ποσότητα σε περιεκτικότητα του θείου, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο της όξινης βροχής. Επιπλέον, οι πόροι βιομάζας είναι ποικίλοι και άφθονοι, επιτρέποντας ευελιξία στην επιλογή των πρώτων υλών. Περιλαμβάνουν γεωργικά υπολείμματα, ειδικές ενεργειακές καλλιέργειες, δασικά υπολείμματα και ρεύματα οργανικών αποβλήτων. Το τελευταίο πλεονέκτημα της βιομάζας είναι το γεγονός ότι, αυξάνει την απασχόληση σε περιοχές αποκεντρωμένες, έτσι ώστε με αυτό τον τρόπο να συγκρατεί το πληθυσμό στο τόπο τους. Συμβάλλει έτσι στην τοπική οικονομία καθώς δημιουργούνται θέσεις εργασίας οι οποίες χρειάζονται κατά τη συλλογή, την επεξεργασία και την μετατροπή των υλικών βιομάζας.

Οι τρόποι που μπορεί να μετατραπεί η βιομάζα σε ενέργεια είναι τρεις, σύμφωνα με την έρευνα (Hasanzadeh κ.ά., 2023). Οι διεργασίες αυτές είναι η πυρόλυση, η καύση και η αεριοποίηση. Στην παρούσα εργασία, ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθεί για την μετατροπή της βιομάζας σε ενέργεια είναι η καύση.

Η Ελλάδα, είναι μια χώρα με αναπτυγμένα τα διαθέσιμα αποθέματα βιομάζας. Η βιομάζα, μπορεί να συμβάλει έντονα στην επίτευξη του εθνικού στόχου για παραγωγή ηλεκτρισμού κατά 20%. Όμως, παραμένει ανεκμετάλλευτο το τεχνολογικό και οικονομικό δυναμικό της βιομάζας (Boukis κ.ά., 2009).

Η βιομάζα κατηγοριοποιείται σε δύο βασικές πηγές. Στις υπολειμματικές, όπου διαχωρίζονται σε τέσσερις μικρότερες κατηγορίες, (βιομάζα δασικής προέλευσης, γεωργικής, ζωικής και η βιομάζα από τα αστικά απόβλητα) , και στις ενεργειακές, όπου εκεί η κύρια κατηγορία είναι τα βιοκαύσιμα. Καθώς η γεωργία αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο κομμάτι εκτάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ο ενεργός πληθυσμός αυτού του κλάδου παράγει βασικά προϊόντα με κύριο λόγο την οικονομική τους αξία. Επίσης, βασικό ρόλο παίζουν και τα διαθέσιμα υπολείμματα της βιομάζας, εξαιτίας της ιδιότητάς τους στην διατήρηση των σωστών επιπέδων του οργανικού άνθρακα στο έδαφος (Αγορουλα - Διπλωματική Εργασία.pdf, χ.χ.).

Μια μορφή της υπολειμματικής βιομάζας είναι το pellet. Η συγκεκριμένη μορφή βιομάζας εμφανίζεται στην Ελλάδα σε μεγάλο βαθμό όπως και το πυρηνόξυλο, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Pellets Atlas, η Ελλάδα το 2008 παράγαγε περίπου 28.000 τόνους pellet και είχε εγκαταστημένη ισχύ για παραγωγή 87.000 τόνων. Το 2017 η παραγωγή έφτασε τους 36.000 τόνους και εγκαταστημένη ισχύ για παραγωγή είχε 130.000 τόνους.



Το pellet σαν μορφή βιομάζας είναι από τις πιο διαδεδομένες μορφές στην Ελλάδα, καθώς χρησιμοποιείται ως καύσιμο για θέρμανση και παραγωγή θερμότητας. Πλεονέκτημα του pellet αποτελεί η εύκολη μεταφορά του και η αποδοτικότητά του. Ακόμη, σαν επιλογή καυσίμου, το pellet αποτελεί λύση φιλική προς το περιβάλλον, καθώς μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Μία ακόμα μορφή υπολειμματικής βιομάζας είναι το πυρηνόξυλο. Η μορφή αυτή, προέρχεται από τον πυρήνα της ελιάς, όπου μετά από διάφορες επεξεργασίες παραμένει μόνο το ξύλο, δίνοντας ένα οικολογικό βιοκαύσιμο με υψηλή θερμική αξία, και έχει μικρό ποσοστό τέφρας και υγρασίας. Αποτελεί οικολογική πηγή ενέργειας και οικονομική συγκριτικά με το πετρέλαιο. Αποθηκεύεται σε σιλό και προσδίδει σταθερή απόδοση λόγω καθαρότητας.

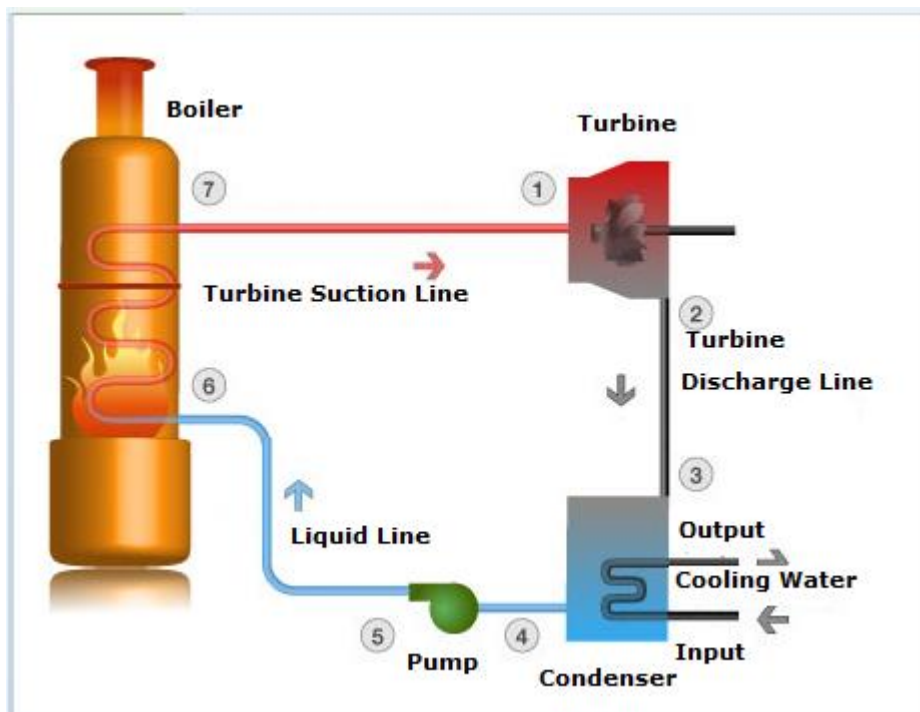


2.5 Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) είναι ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας και είναι σχεδιασμένος να μετατρέπει τη θερμότητα από πηγές χαμηλής ποιότητας θερμοκρασίας σε χρήσιμη ενέργεια. Τέτοιες πηγές είναι η γεωθερμία, η ηλιακή ακτινοβολία και η βιομάζα, όπου θα αναλυθεί.

Ο ORC, έχει σχεδόν ίδια αρχή με αυτή του κύκλου Rankine με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί οργανικά ρευστά για την λειτουργία του. Η λειτουργία του κύκλου ξεκινάει όταν το οργανικό ρευστό αρχίζει να θερμαίνεται από την πηγή χαμηλής θερμοκρασίας και μετατρέπεται σε ατμό. Στην συνέχεια ο ατμός προωθείται στον

στρόβιλο (turbine), όπου από εκεί γίνεται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος προωθείται στο συμπυκνωτή (condenser). Εκεί ο ατμός ψύχεται και συμπυκνώνεται έτσι ώστε να επιστρέψει στην αρχική υγρή του φάση και να επαναληφθεί ο κύκλος.



Εικόνα 9: Αναπαράσταση οργανικού κύκλου (ORC).

Πηγή: Φωτογραφία κύκλου από πρόγραμμα Genetron.

Κύριοι λόγοι προτίμησης του ORC συγκριτικά με άλλους κύκλους είναι η υψηλή απόδοσή του και η απλότητα του κύκλου για εκμετάλλευση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (<110°C), καθιστώντας τον έτσι ενεργειακά αποτελεσματικό και τα χαμηλά ποσοστά εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Ένας επίσης σημαντικός λόγος είναι η ευελιξία του κύκλου αυτού στην προσαρμογή του σε διαφορετικές πηγές θερμότητας.

Το εύρος θερμοκρασιών που καλύπτει ο κύκλος, διαφέρει ανάλογα με τις πηγές θερμότητας και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί. Κυμαίνεται από τους 80 °C, όπου εκεί αξιοποιεί συνήθως πηγές θερμότητας από ηλιακούς συλλέκτες ή γεωθερμία, και μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 300°C όπου εκεί η πηγή θερμότητας είναι κατά κόρον η βιομάζα. Ακόμη, σημαντικός παράγοντας καθορισμού του εύρος των θερμοκρασιών του κύκλου, είναι τα ψυκτικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν.

2.5.1 Εφαρμογές χρήσης του κύκλου

Η συγκεκριμένη τεχνολογία του ORC, σύμφωνα με την έρευνα (Tartière & Astolfi, 2017) αποτελεί έναν αξιόπιστο τρόπο για μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά κυμαίνονται, σε μικροκλίμακα μερικών kW για εφαρμογές ιδιωτών για συμπαραγωγή αλλά και για εφαρμογές μεγάλων βιομηχανικών μονάδων. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών του ORC είναι, η ναυτιλία όπου αξιοποιείται για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας (*Αρβανίτης Διπλωματική (1).pdf*). Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θέρμανσης και ψύξης. Μπορεί, ακόμα να λειτουργήσει ως σταθεροποιητής δικτύου και σε συνεργασία με μονάδες αποθήκευσης επιτυγχάνεται η βελτίωση της ισχύος (Salem κ.ά., 2021). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογή αυξημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αποθήκευση ζεστού νερού (Counreur κ.ά., 2020) και για πολλές ακόμα εφαρμογές.

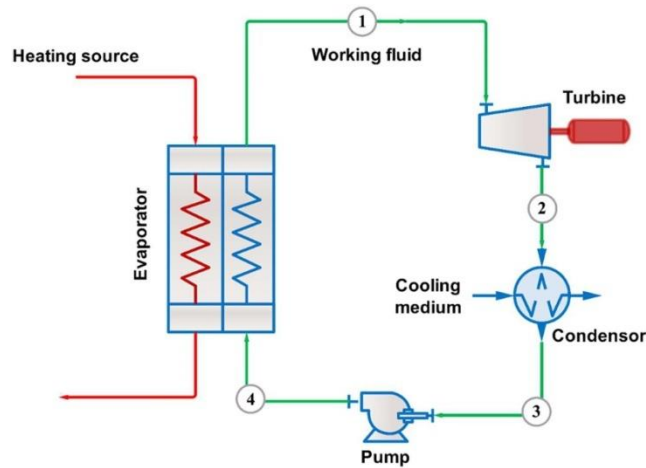
2.6 Οργανικά ρευστά

Τα εργαζόμενα μέσα χρησιμοποιούνται σε θερμοδυναμικούς κύκλους με στόχο την μετατροπή ή την αποθήκευση ενέργειας. Έτσι, με την χρήση τους διευκολύνουν στην μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Έχουν την δυνατότητα να βρίσκονται σε διαφορετικές καταστάσεις ανάλογα πάντα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Διαθέτουν ορισμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες που προσδιορίζουν την καταλληλότητά τους για την προβλεπόμενη χρήση τους. Τέτοιες θερμοδυναμικές ιδιότητες είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα τους, η κρίσιμη θερμοκρασία, η ενθαλπία και η εντροπία (Ma κ.ά., 2018).

Η επιλογή τους, γίνεται με βάση διάφορους παράγοντες όπως είναι το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, το οικονομικό κόστος τους, το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους και οι απαιτήσεις απόδοσης τους (Qyyum κ.ά., 2022).

Εν τέλει, τα εργαζόμενα ρευστά αποτελούν κύρια συστατικά για θερμοδυναμικά συστήματα, επιτρέποντας την μετατροπή ενέργειας από θερμική σε ηλεκτρική για την κάλυψη αναγκών της εκάστοτε εφαρμογής. Περισσότερα, θα αναλυθούν παρακάτω.



Εικόνα 10: Απλή σχηματική αναπαράσταση κύκλου ORC.

Πηγή:(Qyyum κ.ά., 2022)

2.6.1 Κατηγοριοποιήσεις οργανικών ρευστών

Η διαφοροποίηση τους, γίνεται με κριτήρια τη χημική τους σύνθεση, τις φυσικές τους ιδιότητες και τις εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθούν. Παρακάτω θα αναλυθούν μερικές κοινές κατηγοριοποιήσεις τους:

- ❖ **Ανόργανα ρευστά:** Πρόκειται για τα ρευστά που δεν περιλαμβάνουν ποσοστά άνθρακα στην σύστασή τους. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συστήματα ψύξης και αντλίες θερμότητας. Χαρακτηριστικά ανόργανα ρευστά είναι το νερό και η αμμωνία (NH₃).
- ❖ **Υπερκρίσιμα ρευστά:** Τα συγκεκριμένα ρευστά, βρίσκονται πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση, παρουσιάζοντας ιδιότητες υγρών και αερίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το διοξείδιο του άνθρακα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υπερκρίσιμου κύκλου ενέργειας CO₂ (Fang κ.ά., 2023).
- ❖ **Οργανικά ρευστά:** Η κατηγορία αυτή αποτελείται από ρευστά των οποίων η σύσταση είναι ο άνθρακας και κατηγοριοποιούνται σε μικρότερες κατηγορίες σύμφωνα με την χημική τους δομή.
 1. **Υδροφθοράνθρακες (HFCs):** Είναι συνθετικές ενώσεις άνθρακα, υδρογόνου και φθορίου και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ψύξης. Οι HFCs είναι πιο ελκυστικοί για συστήματα ORC, λόγω των πλεονεκτημάτων τους στην υψηλότερη απόδοση έργου, υψηλότερη απόδοση του κύκλου και χαμηλότερα ποσά απωλειών εξέργειας (Si κ.ά., 2022)
 2. **Μείγματα ψυκτικών μέσων (Refrigerant Blends):** Τα συγκεκριμένα, αφορούν ρευστά όπου προέκυψαν από οργανικές ενώσεις για επίτευξη ορισμένων χαρακτηριστικών απόδοσης. Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτες

που έχουν πραγματοποιηθεί, αποτελούν τα ρευστά με το καλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Mota-Babiloni κ.ά., 2023). Τέτοια ρευστά είναι τα R404A, R410A και το δημοφιλέστερο ψυκτικό είναι το R134a, το οποίο είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σε εφαρμογές θερμοδυναμικών κύκλων.

3. Χλωροφθοράνθρακες (CFC) και υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC): Τα συγκεκριμένα ρευστά, αποτελούνται από ενώσεις άνθρακα, υδρογόνου, χλωρίου και φθορίου. Εξαιτίας του δυναμικού τους να καταστρέφουν το όζον, έχουν εφαρμοστεί περιβαλλοντικοί κανονισμοί για την κατάργηση της χρήσης τους.
4. Υδροφθορολεφίνη (HFO): Είναι ένας συνθετικός τύπος ψυκτικού μέσου, όπου χρησιμοποιείται κυρίως σε αντλίες θερμότητας. Έχουν χαμηλό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) σε σύγκριση με τα HFC.

Για τα οργανικά ρευστά, έχει θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση ο κανονισμός F-Gas (F-Gas regulation). Ο κανονισμός αυτός αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών φθοριούχων αερίων και καθορίζει τα μέτρα για τη μείωση της χρήση των HFC ενώ ενθαρρύνει τη χρήση ρευστών όπως τα HFO. Στοχεύει κυρίως στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προωθώντας οργανικά ρευστά πιο φιλικά προς το περιβάλλον, με χαμηλότερο δείκτη GWP.

Συνολικά, σύμφωνα με τα παραπάνω, πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή του καταλληλότερου ρευστού γίνεται με βάση τους παράγοντες που τους καθορίζει η εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντελοποίηση κύκλου

3.1 Περιγραφή συστήματος

Η εφαρμογή του οργανικού κύκλου Rankine έχοντας ως πηγή θερμότητας λέβητα βιομάζας, συνιστά ειδική εφαρμογή του κύκλου αποτελώντας έναν βιώσιμο και αποτελεσματικό τρόπο για την μετατροπή της βιομάζας ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, η ενέργεια της βιομάζας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια προσδίδοντας με αυτό τον τρόπο οφέλη που προέρχονται από ένα σύστημα κλειστού κύκλου όπου συνεχώς ανακυκλώνεται το εργαζόμενο ρευστό. Η συγκεκριμένη εφαρμογή, αποτελεί ιδανική για περιοχές αποκεντρωμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο και για περιοχές όπου υπάρχουν διαθέσιμες πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

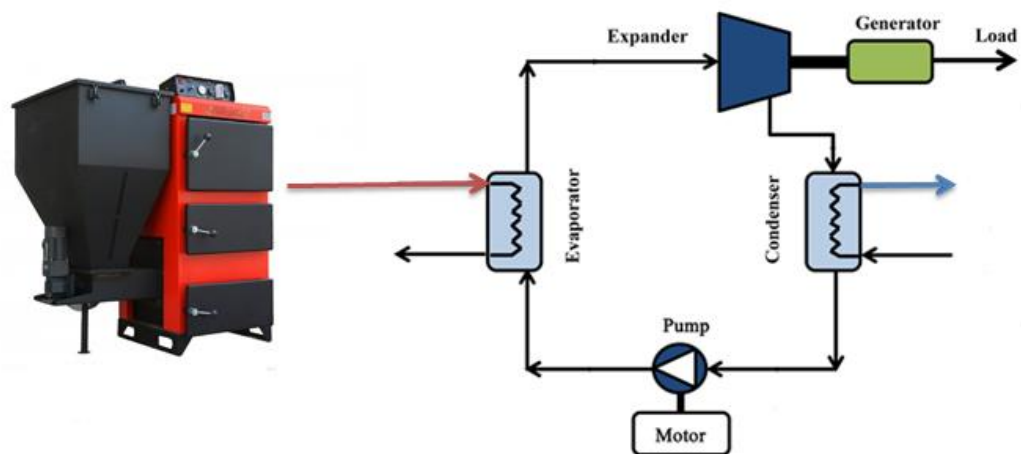
Στη παρούσα εργασία θα μελετηθεί η κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου, ποσό το οποίο έχει υπολογισθεί από προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας ρεύμα νερού από τον συμπυκνωτή (condenser). Θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση συγκεκριμένων ρευστών (R-134a, R-245fa και R-290) με κριτήρια που θα αναλυθούν παρακάτω. Τέλος θα μελετηθεί η ευαισθησία των παραμέτρων που θα οδηγήσει σε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος της απόδοσης.

Ακολουθεί ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος:

1. Λέβητας βιομάζας: Λέβητας με καθορισμένη θερμική ισχύ, από τον οποίο ξεκινά ο κύκλος. Ως πηγή θερμότητας έχει υλικά βιομάζας (pellet, πυρηνόξυλο) ή άλλη μορφή υπολειμματικής βιομάζας. Κατά τη διάρκεια της καύσης, η βιομάζα απελευθερώνει θερμική ενέργεια όπου μεταφέρεται από το ρευστό μεταφοράς.
2. Ρευστό μεταφοράς: Το ρευστό μεταφοράς του κύκλου, απορροφά την θερμική ενέργεια από τον λέβητα και μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό. Τέτοια ρευστά είναι συνήθως θερμικό έλαιο ή νερό.
3. Εξατμιστής (evaporator): Στον εξατμιστή, το ρευστό μεταφοράς μεταφέρει την θερμότητα στο επιλεγμένο οργανικό ρευστό καθώς έχει χαμηλότερο σημείο βρασμού.
4. Εκτονωτής (expander): Στον εκτονωτή, ο ατμός υψηλής πίεσης κινεί τον στρόβιλο παράγοντας με αυτόν τον τρόπο μηχανικό έργο, το οποίο έχει την δυνατότητα να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση γεννήτριας.
5. Συμπυκνωτής (condenser): Έπειτα από τον στρόβιλο, ο ατμός κατευθύνεται στον συμπυκνωτή. Εκεί ο ατμός ψύχεται και συμπυκνώνεται

σε υγρή φάση με την απόρριψη θερμότητας σε ένα μέσο ψύξης. Το ρεύμα νερού που εξέρχεται από την συμπυκνωτή, χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου, και αυτό που περισσεύει οδηγείται σε πύργο ψύξης.

6. Αντλία (pump): Τέλος, το υγρό κατευθύνεται στην αντλία και με την αύξηση της πίεσης οδηγείται στον εξατμιστή για την επανάληψη του κύκλου. Για την λειτουργία της αντλίας, χρησιμοποιούνται ποσά ηλεκτρικής ενέργειας αλλά είναι πολύ μικρότερα συγκριτικά με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το στρόβιλο.

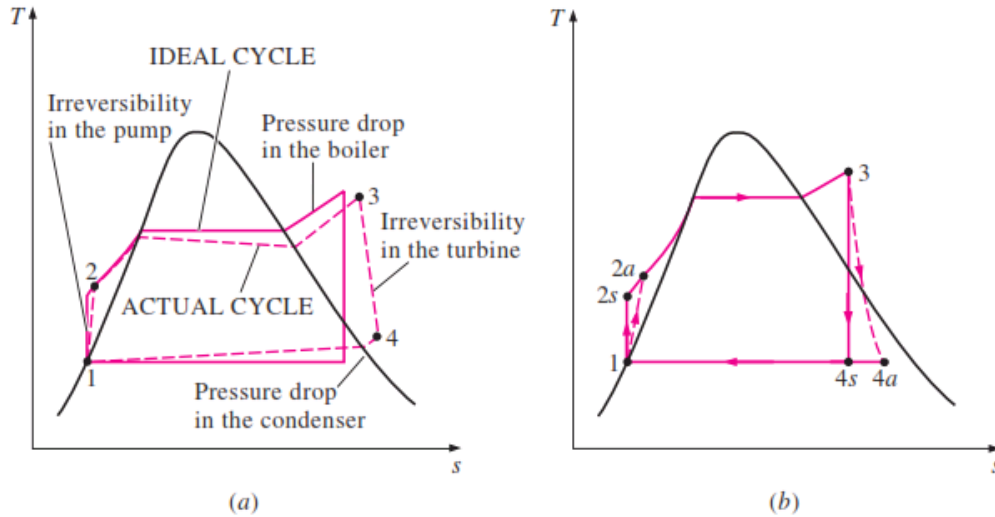


Εικόνα 11: Παρουσίαση οργανικού κύκλου με λέβητα βιομάζας.

3.2 Θερμοδυναμική μοντελοποίηση

Το ποσό του θερμοκηπίου που απαιτείται να καλυφθεί από τον κύκλο, θα συμπληρωθεί μέσω ενός ρεύματος νερού από τον συμπυκνωτή. Ακόμη, ο επόμενος στόχος της μελέτης είναι το κέρδος που μπορεί να έχει ο παραγωγός, πουλώντας την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Η ενέργεια αυτή, παράγεται από την γεννήτρια που βρίσκεται στον διαστολέα.

Ο κύκλος που μελετάται κατηγοριοποιείται στους πραγματικούς κύκλους και όχι στους ιδεατούς. Οι διαφορές ανάμεσα στις δύο κατηγορίες βρίσκονται κυρίως στο ότι ο ιδεατός κύκλος είναι ένα μοντέλο χωρίς απώλειες και χρησιμοποιείται κυρίως ως ένα θεωρητικό μοντέλο του κύκλου. Από την άλλη μεριά, ένας πραγματικός θερμοδυναμικός κύκλος, εξετάζει το θερμοδυναμικό σύστημα συμπεριλαμβάνοντας και παραμέτρους που αφορούν τις τριβές, τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον και τις απώλειες πίεσης. Η διαφορά των δύο κατηγοριών σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 8: Σχηματική αναπαράσταση ιδεατού-πραγματικού κύκλου.
 Πηγή: <https://www.arhse.com/rankine-cycle/>

Αναλυτικότερα, σε πρώτο στάδιο επιλέγεται ο λέβητας βιομάζας από την αγορά. Ο συγκεκριμένος λέβητας, έχει θερμική ισχύς **255 kW** και χρησιμοποιεί ως καύσιμη ύλη pellet, πυρήνα ελιάς και άλλες μορφές υπολειμματικής βιομάζας. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά διακρίνονται παρακάτω.

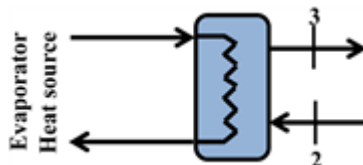


Τεχνικά Χαρακτηριστικά

1000m ³ και άνω	Ναι	Απόδοση στο νερό	217kw
Βαθμός Απόδοσης	85%	Βάρος καθαρό	1310kg
Διαστάσεις (Π x Υ x Β)	cm160 x 202 x 189cm	Θερμανόμενος χώρος	1225 τ.μ.
Καμινάδα	270mm	Κατανάλωση	13.5 - 55kg/h
Καύσιμο	<u>Πέλλετ ξύλου, πυρήνας ελιάς, κοκκούται, καλ...</u>	Μέγιστη ισχύς	255kw
Χωρητικότητα νερού	610lt	ως 300kw	Ναι

Στην συνέχεια, για να υπολογισθεί το ποσό της θερμότητας που εισάγεται στον εξατμιστή (evaporator) από τον λέβητα βιομάζας χρειάζεται η ενθαλπία εισόδου, εξόδου και ο ρυθμός παροχής μάζας του ρευστού.

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m} \times (h_3 - h_2) \quad (3.2.1)$$

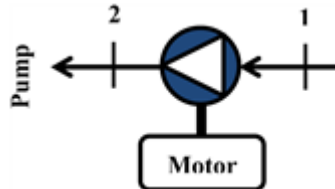


Έπειτα, υπολογίζεται το έργο που αξιοποιεί η αντλία για την λειτουργία της, αυξάνοντας την πίεση του ρευστού.

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m} \times (h_1 - h_2) \quad (3.2.2)$$

Δεδομένου ότι ο κύκλος είναι πραγματικός, η αντλία παρουσιάζει ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 60%, και η ενθαλπία εξόδου της υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{is_{pump}} = \frac{h_{2,is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.2.3)$$

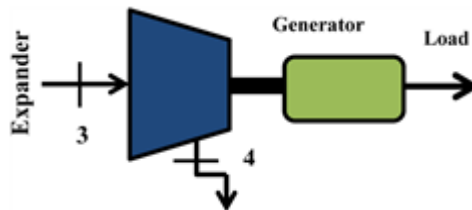


Στη πορεία του κύκλου, στον εκτονωτή παράγεται έργο και μέσω γεννήτριας παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Έχει ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 70% και για να υπολογισθεί η ενθαλπία στη έξοδο βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{is_{expander}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,is}} \quad (3.2.4)$$

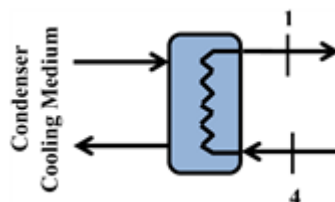
Και το έργο που παράγεται στον εκτονωτή, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{W}_{expander} = \dot{m} \times (h_3 - h_4) \quad (3.2.5)$$



Τελευταίο σύστημα που συναντάμε στον κύκλο είναι ο συμπυκνωτής (condenser). Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελεί το σημαντικότερο εξάρτημα του κύκλου, καθώς από εκεί αντλείται ένα ρεύμα νερού με στόχο την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου. Το πόσο αυτό, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{Q}_{condenser} = \dot{m} \times (h_4 - h_1) \quad (3.2.6)$$



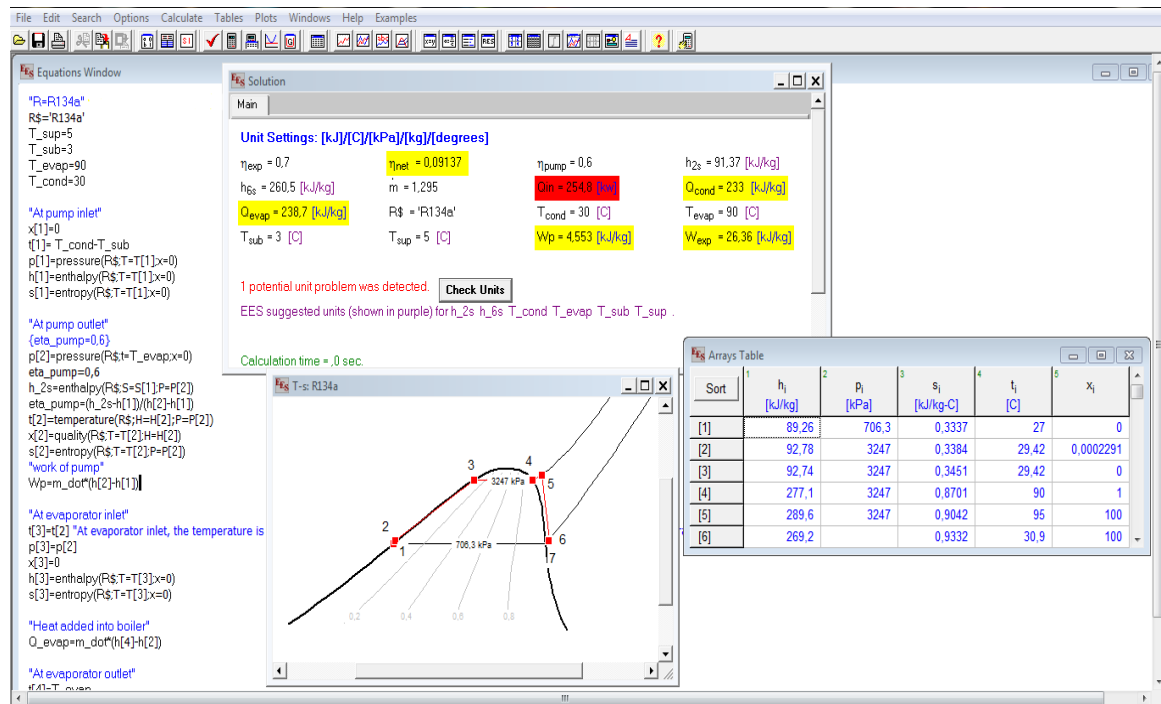
Η καθαρή θερμική απόδοση του κύκλου, υπολογίζεται διαιρώντας την διαφορά των έργων του εκτονωτή και της αντλίας, προς το ποσό θερμότητας του εξατμιστή.

$$\eta_{net} = \frac{\dot{W}_{exp} - \dot{W}_{pump}}{\dot{Q}_{evap}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.2.7)$$

Η καθαρή θερμική απόδοση του κύκλου μας δείχνει, πόσο αποτελεσματικά ο θερμοδυναμικός κύκλος μετατρέπει την θερμότητα σε ωφέλιμο έργο. Το \dot{W}_{net} είναι το καθαρά παραγόμενο έργο και αναφέρεται στην ποσότητα του χρήσιμου έργου που παράγεται από τον θερμοδυναμικό κύκλο.

Ο κώδικας για τον οργανικό κύκλο και τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο, έγινε στο πρόγραμμα EES (Engineering Equation Solver) (Behar κ.ά., 2015). Το EES, είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επίλυση θερμοδυναμικών προβλημάτων. Επιλύει εξισώσεις και παρέχει ολοκληρωμένη βιβλιοθήκη θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων ρευστών. Υποστηρίζει την μετατροπή των μονάδων και επίσης έχει την δυνατότητα για την παρουσίαση αποτελεσμάτων σε μορφή γραφικής αναπαράστασης. Τέλος, το βασικότερα προτερήματα του, είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες την παραμετρική μελέτη. Δηλαδή, μεταβάλλοντας μια παράμετρο αυτόματα παρατηρείται και αλλαγή στα αποτελέσματα. Το επόμενο προτέρημα είναι η ενσωμάτωση σε άλλα λογισμικά μηχανικής όπως είναι το Matlab και το Excel.

Ένα παράδειγμα του περιβάλλοντος του προγράμματος φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλυθούν ειδικότερα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη:



Εικόνα 12: Περιβάλλον του λογισμικού EES.

3.3 Διερεύνηση ψυκτικών ρευστών

Τα ψυκτικά ρευστά που χρησιμοποιούνται στο κύκλο παίζουν καθοριστικό ρόλο στην συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Η επιλογή του ψυκτικού μέσου γίνεται με διάφορους παράγοντες όπως οι θερμοδυναμικές τους ιδιότητες, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το οικονομικό κόστος των ρευστών.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών προκύπτουν με βάση διάφορα χαρακτηριστικά και δείκτες απόδοσης. Τέτοια βασικά χαρακτηριστικά είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα, όπου συμβολίζεται με “c” και δείχνει την ικανότητα του ρευστού να αποθηκεύει και να απελευθερώνει θερμότητα. Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό είναι η ενθαλπία, η οποία περιλαμβάνει την εσωτερική ενέργεια του ρευστού και το έργο που εκτελείται από ή προς το ρευστό κατά την διάρκεια μιας διεργασίας. Άλλα τέτοια χαρακτηρίστηκα είναι η εντροπία, η οποία σχετίζεται με την κατανομή της ενέργειας στο σύστημα, η πίεση, η θερμοκρασία, η οποία αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό στο ρευστό και η πυκνότητα. Τέλος, οι μεταβάσεις των φάσεων των ρευστών, είναι ζωτικής σημασίας κατανόησης καθώς και το ιξώδες τους, συμβολίζοντας το με “μ” και είναι απαραίτητο για την κατανόηση της ροής των ρευστών σε σωλήνες.

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους, διατυπώνεται από τους περιβαλλοντικούς δείκτες GWP (Global Warming Potential) και ODP (Ozone Depletion Potential). Ο δείκτης GWP, είναι ένα μέτρο του πόσο ένα αέριο του θερμοκηπίου συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα. Ο δείκτης ODP είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός ρευστού να καταστρέφει τα μόρια του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, έχει επιτευχθεί κατάργηση πολλών ρευστών που καταστρέφουν το όζον.

Τα ρευστά που αναλύονται παρακάτω και πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ τους, είναι το R-134a, R-245fa και R-290.

Το R-134a, ανήκει στην οικογένεια των ψυκτικών μέσων που δεν καταστρέφουν το όζον και αποτελεί φιλική λύση προς το περιβάλλον. Έχει μοριακό βάρος $102,03 \frac{g}{mol}$ και σημείο βρασμού $-26,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Το R-134a θεωρείται φιλικό προς το περιβάλλον και τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για τη χρήση του σε εφαρμογές. Επιπλέον, σύμφωνα με την μελέτη (Tchanche κ.ά., 2009) το R-134a θεωρείται ως το καταλληλότερο ρευστό για ηλιακές εφαρμογές μικρής κλίμακας.

α.α.	Οργανικό ρευστό	ODP (ozone depletion potential relative to R11)	GWP (Global Warming Potential relative to CO ₂)	Χρόνος ζωής στην ατμόσφαιρα (χρόνια)	Ιξώδεις (μPas, 25 °C, 1 bar)
1	pentane	0,00	20,0	0,009	199,54
2	isopentane	0,00	4,0	0,009	213,50
3	R-134a	0,00	1430,0	14,000	378,70
4	R-C138	0,00	10250,0	3000,000	109,00
5	R-611	0,00	25,0	0,197	355,00
6	R-31(1B)	0,00	8860,0	2600,000	465,00
7	R-E345	0,00	708,0	1,300	12,17
8	N-hexane	0,00	50,0	0,005	303,13
9	N-butane	0,00	4,0	0,017	203,41
10	Isobutane	0,00	3,0	0,018	227,77
11	R-227	0,00	3220,0	38,900	423,44
12	R-245cb	0,00	693,0	1,800	537,38
13	R-631	0,00	0,0	0,002	176,00
14	R-123	0,01	77,0	1,300	404,20
15	toluene	0,00	3,3	0,005	560,03

Πίνακας 7: Τιμή περιβαλλοντικών δεικτών GWP, ODP για το ρευστό R-134a.

Πηγή:(Προσομοίωση Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) με το λογισμικό ASPEN PLUS.pdf,)

α.α.	Οργανικό ρευστό	Τοξικότητα	Ευφλεκτότητα	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	κόστος (€/L)
1	pentane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	260	0,5
2	isopentane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	460	0,6
3	R-134a	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	μη εύφλεκτο	743	9,7
4	R-C138	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	700,0
5	R-611	ιδιαίτερα τοξικό	αρκετά εύφλεκτο	449	350,9
6	R-31(1B)	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	1300,0
7	R-E345	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	μη εύφλεκτο	770	400,0
8	N-hexane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	234	0,3
9	N-butane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	287	6,0
10	Isobutane	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	460	6,4
11	R-227	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	350,0
12	R-245cb	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	άφλεκτο	-	9000,0
13	R-631	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	385	380,0
14	R-123	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	730	16,7
15	toluene	τοξικό σε υψηλές συγκεντρώσεις	αρκετά εύφλεκτο	480	0,4

Πίνακας 8: Τιμή οικονομικού κόστους, για το ρευστό R-134a.

Πηγή:(Προσομοίωση Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) με το λογισμικό ASPEN PLUS.pdf,)

Το R-245fa είναι ένα ψυκτικό μέσο το οποίο αξιοποιείται κυρίως σε διάφορες βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές. Έχει μοριακό βάρος $134,04 \frac{g}{mol}$ και σημείο βρασμού 15,3 °C. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές χαμηλής θερμοκρασίας, όπως γεωθερμία και βιομηχανικά απόβλητα.

	Molecular Mass/(g·mol ⁻¹)	Critical Temperature/K	Critical Pressure/kPa	Normal Boiling Point/K	ODP	GWP
cyclopentane	70.13	511.7	4515	322.4	0	low
cyclohexane	84.16	553.6	4075	353.9	0	low
benzene	78.11	562.1	4894	353.2	0	low
toluene	92.14	591.8	4126	383.8	0	low
R1234ze(E)	114.04	382.5	3636	254.2	0	6
R600a	58.12	407.8	3629	261.4	0	low
R245fa	134.05	427.2	3651	288.3	0	950
R601a	72.15	460.4	3378	301.0	0	low

Πίνακας 9: Τιμή περιβαλλοντικών δεικτών GWP, ODP για το ρευστό R-245fa.

Πηγή:(Ge κ.ά., 2019)

Το ρευστό R-290 είναι επίσης γνωστό και ως προπάνιο. Είναι φυσικό ψυκτικό μέσο και δημοφιλές για την φιλικότητα προς το περιβάλλον. Έχει μοριακό βάρος 44,1 $\frac{g}{mol}$ και σημείο βρασμού $-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ορισμένες κοινές εφαρμογές που το χρησιμοποιούν είναι τα οικιακά ψυγεία, ο κλιματισμός και οι αντλίες θερμότητας. Στη φωτογραφία φαίνεται η τιμή των περιβαλλοντικών δεικτών ODP και GWP.

Refrigerant	ODP	GWP ₁₀₀
Natural refrigerants		
R717	0	0
R718	0	0
R744	0	1
HCs		
R290	0	3
R600	0	20
R600a	0	3
R601	0	20
R1270	0	2
HFCs		
R152a	0	124
R161	0	12
HFOs		
R1234yf	0	<1
R1234ze(E)	0	1
R1234ze(Z)	0	1
R1336mzz(E)	0	18
R1336mzz(Z)	0	2
HCFOs		
R1233zd(E)	0.00034	1
R1224yd(Z)	0.00012	<1

Πηγή: (Yadav κ.ά., 2022)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αποτελέσματα

4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως έχει προαναφερθεί, στη παρούσα εφαρμογή μελετήθηκαν τα οργανικά ρευστά R-134a, R-245fa και R-290, καθώς είναι ευρέως γνωστά για την χρήση τους σε οργανικούς κύκλους Rankine. Με βάση τον λέβητα βιομάζας και τη θερμοκρασία που μπορεί να εξασφαλίσει, η θερμοκρασία ατμοποίησης για την μοντελοποίηση του κύκλου θεωρήθηκε 90°C για όλα τα ψυκτικά ρευστά. Ο συμπυκνωτής για τη μοντελοποίηση του κύκλου λειτουργεί στους 30°C. Ο εκτονωτής κρίθηκε ότι θα έχει έναν ισεντροπικό βαθμό απόδοσης 70% και η αντλία 60%. Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης και υπόψυξης ορίστηκε στους 5°C και 3°C αντίστοιχα για όλα τα ρευστά. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν κατόπιν διερεύνησης βιβλιογραφικών πηγών και επικοινωνίας με προμηθευτές τέτοιου εξοπλισμού. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικά διαγράμματα, που θα αποτυπώνουν τα αποτελέσματα της παρούσας εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι συνθήκες σχεδιασμού του οργανικού κύκλου:

Πίνακας 10: Συνθήκες σχεδιασμού.

Συνθήκες σχεδιασμού			
Οργανικά ρευστά	R-134a	R-245fa	R-290
Εξατμιστής (Evaporator)	90 °C		
Ισεντροπική απόδοση εκτονωτή (Expander)	η=70%		
Συμπυκνωτής (Condenser)	30 °C		
Ισεντροπική απόδοση αντλίας (Pump)	η=60%		
Θερμοκρασία υπερθέρμανσης (Tsup)	5 °C		
Θερμοκρασία υπόψυξης (Tsub)	3 °C		
Θερμική ισχύς λέβητα	255		

4.2 Καθαρή απόδοση κύκλου

Η απόδοση, είναι κρίσιμη παράμετρος για τον οργανικό κύκλο καθώς μετρά την αποτελεσματικότητα και την απόδοση στη μετατροπή θερμότητας σε χρήσιμο έργο ή σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο καθαρός βαθμός απόδοσης, λαμβάνει υπόψη τις απώλειες που έχει ο κύκλος, δίνοντας με αυτό τον τρόπο μια ρεαλιστική εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος. Τέτοιες απώλειες μπορεί να είναι οι μηχανικές στον στρόβιλο και την αντλία καθώς και άλλες απώλειες που αφορούν τον σχεδιασμό λειτουργίας του συστήματος. Η υψηλότερη θερμική απόδοση υποδηλώνει καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων θερμικών πόρων και αποτελεσματικότερη μετατροπή

ενέργειας. Ο στόχος των παρακάτω διαγραμμάτων, είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης βρίσκοντας το βέλτιστο σημείο, σε θερμοκρασιακό εύρος του συμπυκνωτή 20-50 °C .

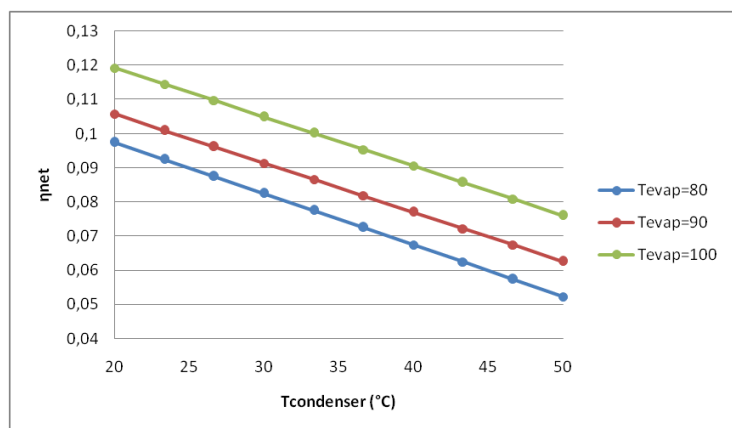
Τα διαγράμματα που ακολουθούν, αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την απεικόνιση της απόδοσης των οργανικών ρευστών και την σύγκριση ανάμεσά τους σε διαφορετικές θερμοκρασίες εξατμιστή. Τα σενάρια που προκύπτουν είναι για τρεις θερμοκρασίες εξατμιστή 80 °C, 90 °C και 100 °C και θερμοκρασιακό εύρος συμπυκνωτή 20-50 °C. Επίσης, καίριο ρόλο διαδραματίζει και ο ισηντροπικός βαθμός απόδοσης που έχει ο εκτονωτής (70%) και η αντλία (60%). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο οργανικό ρευστό R-290 δεν υπάρχει καμπύλη απόδοσης για $T_{evap}=100^{\circ}\text{C}$. Αυτό συμβαίνει διότι το συγκεκριμένο ρευστό έχει χαμηλότερο κρίσιμο σημείο, οπότε δεν υπάρχουν σημεία κορεσμού για θερμοκρασία εξατμιστή 100°C. Δηλαδή, η θερμοκρασία είναι πάνω από το κρίσιμο σημείο και δεν γίνεται να υπάρξει διφασική κατάσταση.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 8, στο οποίο παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης σε σχέση με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, προσδιορίζονται οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του κύκλου με στόχο την υψηλότερη απόδοση. Όπως παρατηρείται ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης. Σε συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για $T_{evap}=90^{\circ}\text{C}$, το ρευστό R-134a πετυχαίνει 100% στον βαθμό απόδοσης σε θερμοκρασία συμπύκνωσης 23,33°C. Το R-245fa το πετυχαίνει σε θερμοκρασία 30°C και το ρευστό R-290 σε θερμοκρασία 22°C.

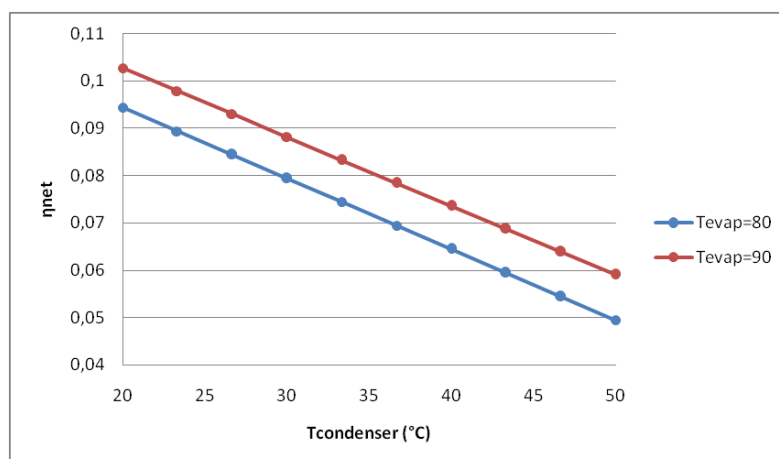
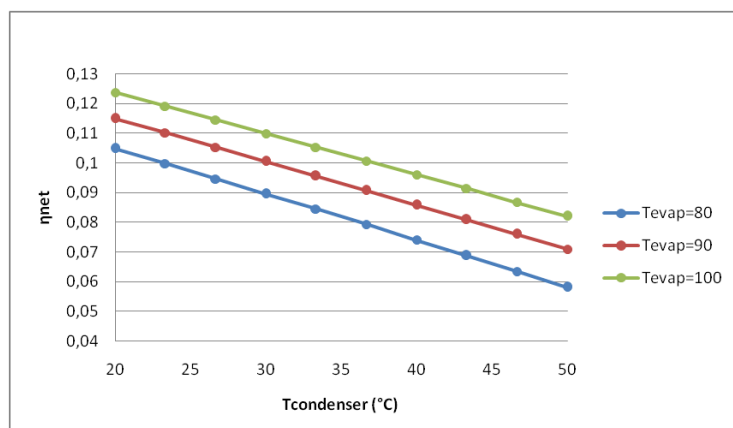
Συγκριτικά και για τα τρία ρευστά, το R-290 πετυχαίνει βαθμό απόδοσης 100%, στη χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Μια χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση και υψηλότερη αποδοτικότητα στον ORC. Υψηλότερη αποδοτικότητα στο κύκλο διότι, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας συμπύκνωσης εξάγεται περισσότερη ενέργεια κατά την διαδικασία της εξάτμισης και λόγω της αυξημένης εξαγωγής, δημιουργείται υψηλότερη απόδοση έργου από το στρόβιλο με αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, χαμηλότερες θερμοκρασίες συμπύκνωσης σημαίνουν και χαμηλότερες θερμοκρασίες απόρριψης θερμότητας από τον συμπυκνωτή. Επομένως, προκύπτουν και μειωμένες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Συνοπτικά, όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης, το R-290 σε θερμοκρασία εξατμιστή 90°C εμφανίζει 100% βαθμό απόδοσης σε χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης, συγκριτικά με τα άλλα ρευστά. Επιπλέον, πρέπει να σχολιασθεί ότι το R-245fa παρουσιάζει βαθμό απόδοσης 100% σε θερμοκρασία συμπύκνωσης 30°C, όπου και είναι η θερμοκρασία σχεδιασμού.

A) Οργανικό ρευστό R-134a



B) Οργανικό ρευστό R-245fa



Γ) Οργανικό ρευστό R-290

Διάγραμμα 9: Καθαρός βαθμός απόδοσης σε σχέση με θερμοκρασίες συμπυκνωτή, για διαφορετικά ρευστά και διαφορετικές θερμοκρασίες εξατμιστή.

4.2.1 Καθαρός βαθμός απόδοσης και υπερθέρμανση

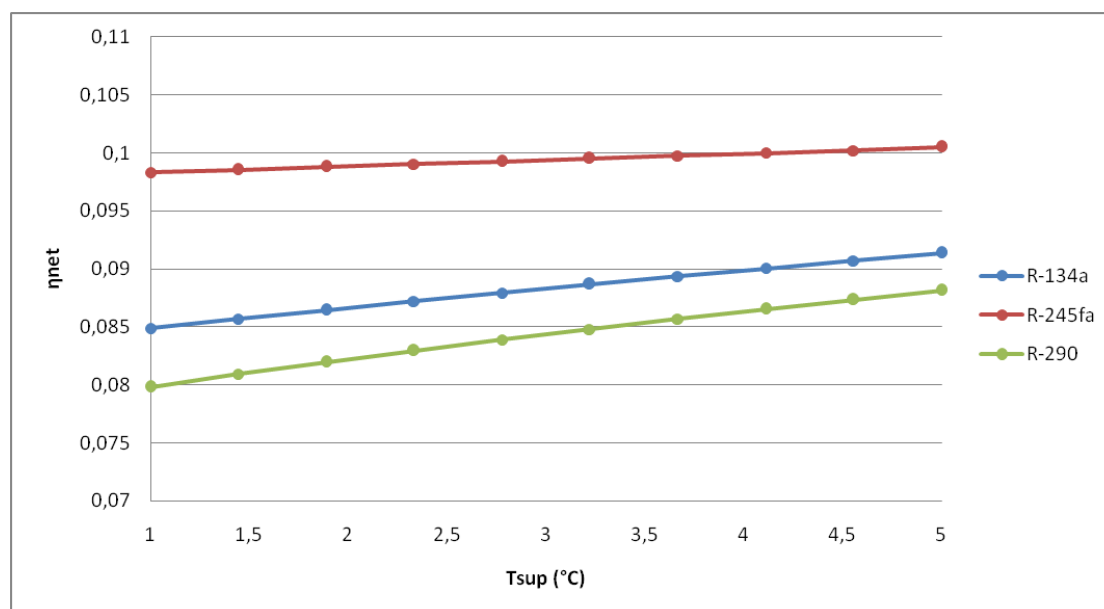
Υπερθέρμανση, ονομάζεται μια κατάσταση στην οποία τα ρευστά θερμαίνονται παραπάνω του σημείου βρασμού τους, χωρίς να υφίστανται αλλαγή φάσης.

Η υπερθέρμανση για ένα οργανικό κύκλο, αποτελεί κρίσιμη διαδικασία του σχεδιασμού του κύκλου. Επιτρέπει το ρευστό να λειτουργεί σε υψηλότερο θερμοκρασιακό εύρος και έτσι να εξάγει περισσότερη ενέργεια στο στρόβιλο. Με

αυτό τον τρόπο, οδηγείται σε αυξημένη απόδοση του κύκλου και καλύτερη αξιοποίηση των πηγών θερμότητας χαμηλής ποιότητας.

Η διαδικασία υπερθέρμανσης πραγματοποιείται στον εξαμιστή και το εργαζόμενο ρευστό αυξάνεται πάνω από την θερμοκρασία κορεσμού, δημιουργώντας έτσι υπέρθερμος ατμός. Ο υπέρθερμος ατμός, διαστέλλεται στον στρόβιλο παράγοντας μηχανικό έργο το οποίο αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω, παρουσιάζεται το διάγραμμα απόδοσης – υπερθέρμανσης και για τα τρία ρευστά σε συνθήκες σχεδιασμού.

Αυτό που παρατηρείται από το ακόλουθο διάγραμμα, είναι ότι τα ρευστά R-290 και R-134a παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά και δεν επιτυγχάνουν το 100% του βαθμού απόδοσης ούτε στην θερμοκρασία σχεδιασμού για την υπερθέρμανση. Από την άλλη μεριά το R-245fa, από την χαμηλότερη τιμή υπερθέρμανσης έχει πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Πετυχαίνεται το 100% στους 4,12°C, ενώ σε αντίθεση με τα άλλα ρευστά παρουσιάζει μια καμπύλη με απότομο αυξανόμενο ρυθμό. Επειδή δεν υπάρχει μονοσήμαντη απάντηση για τον καλύτερο συνδυασμό απόδοσης και υπερθέρμανσης, δεν μπορεί να αποφασιστεί το καλύτερο ρευστό. Σύμφωνα όμως με τις συνθήκες σχεδιασμού που έχουν οριστεί, στους 5°C ο μέγιστος βαθμό απόδοσης επιτυγχάνεται από το ρευστό R-245fa. Σε τελικό στάδιο, η επιλογή του ρευστού θα γίνει και από άλλους παράγοντες.



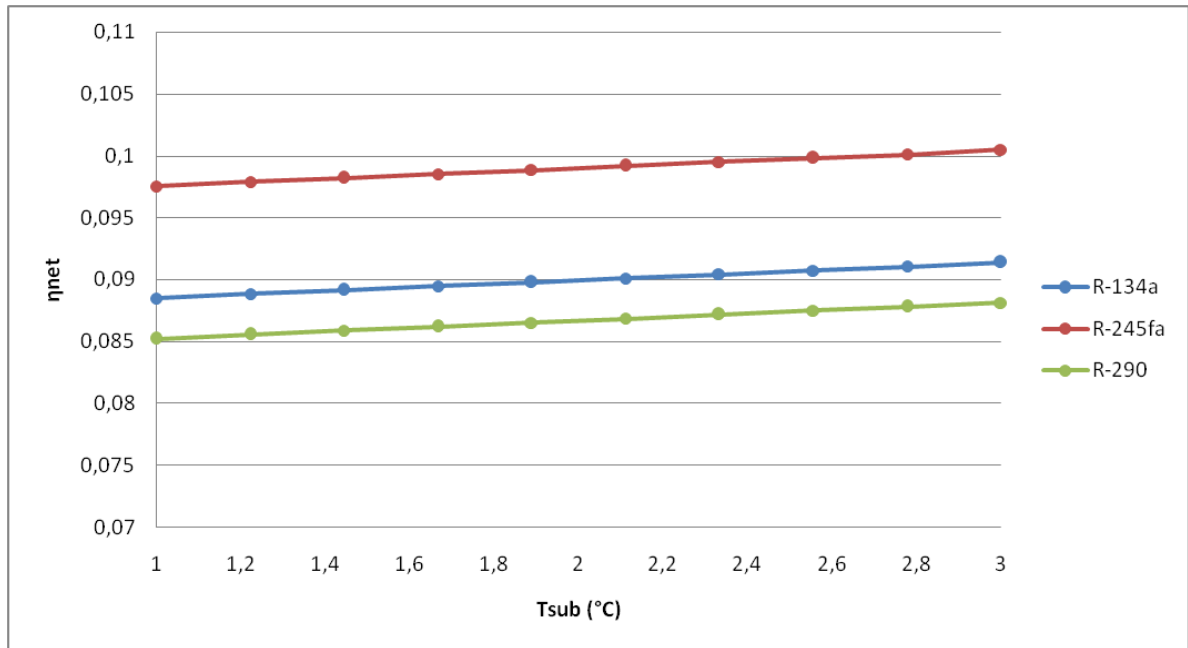
Διάγραμμα 10: Καθαρός βαθμός απόδοσης – υπερθέρμανσης.

4.2.2 Καθαρός βαθμός απόδοσης και υπόψυξη

Από την άλλη μεριά, η υπόψυξη είναι μια κατάσταση στην οποία τα ρευστά ψύχονται πιο χαμηλά από τη θερμοκρασία κορεσμού τους σε δεδομένη πίεση. Με άλλα λόγια, η υπόψυξη δημιουργείται όταν ένα ρευστό ψύχεται κάτω από την θερμοκρασία στην οποία κανονικά θα συμπυκνώταν ή θα δεχόταν αλλαγή φάσης από ατμό σε υγρό.

Η υπόψυξη, ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα της πραγματικής θερμοκρασίας με την θερμοκρασία κορεσμού του υγρού στην ίδια πίεση. Το φαινόμενο της υπόψυξης, είναι συνηθισμένο σε συστήματα ψύξης και πιο συγκεκριμένα, σε οργανικό κύκλο συναντάται στο εξάρτημα του συμπυκνωτή. Με την υπόψυξη του υγρού στο συμπυκνωτή, το ρευστό γίνεται πυκνότερο και απορροφάει περισσότερη θερμότητα όταν εξατμίζεται δημιουργώντας έτσι καλύτερη ψυκτική απόδοση. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα απόδοσης – υπόψυξης των ρευστών που αναφέρονται παραπάνω σε συνθήκες σχεδιασμού, με θερμοκρασιακό εύρος υπόψυξης 1 - 3°C.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι τα ρευστά R-290 και R-134a παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά όπως και στο διάγραμμα της υπερθέρμανσης, αλλά ξεκινούν από μεγαλύτερο ποσοστό βαθμού απόδοσης και όπως και στην υπερθέρμανση δεν καταφέρνουν να επιτύχουν το 100% του βαθμού απόδοσης μέχρι την θερμοκρασία της υπόψυξης των 3°C. Το R-245fa, από την άλλη μεριά ακολουθεί την ίδια ανοδική πορεία όπως και με την υπερθέρμανση. Καταφέρει να πετύχει το 100% του βαθμού απόδοσης στους 2,6°C, δηλαδή σε θερμοκρασία πολύ κοντά σε αυτή που έχει οριστεί από τον σχεδιασμό του κύκλου. Όπως και στην υπερθέρμανση, έτσι και στην υπόψυξη δεν υπάρχει καλύτερος συνδυασμός απόδοσης και υπόψυξης, καθώς κρίνεται από πολλούς παράγοντες. Για αυτό το λόγο δεν μπορεί να αποφασιστεί το καλύτερο ρευστό σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες σχεδιασμού που έχουν οριστεί, στους 3°C ο μέγιστος βαθμός απόδοσης επιτυγχάνεται από το ρευστό R-245fa. Σε τελικό στάδιο όμως, η επιλογή του ρευστού θα γίνει από ποικίλους παράγοντες.



Διάγραμμα 11: Καθαρός βαθμός απόδοσης - υπόψυξης.

4.3 Έργο στροβίλου και παροχή μάζας

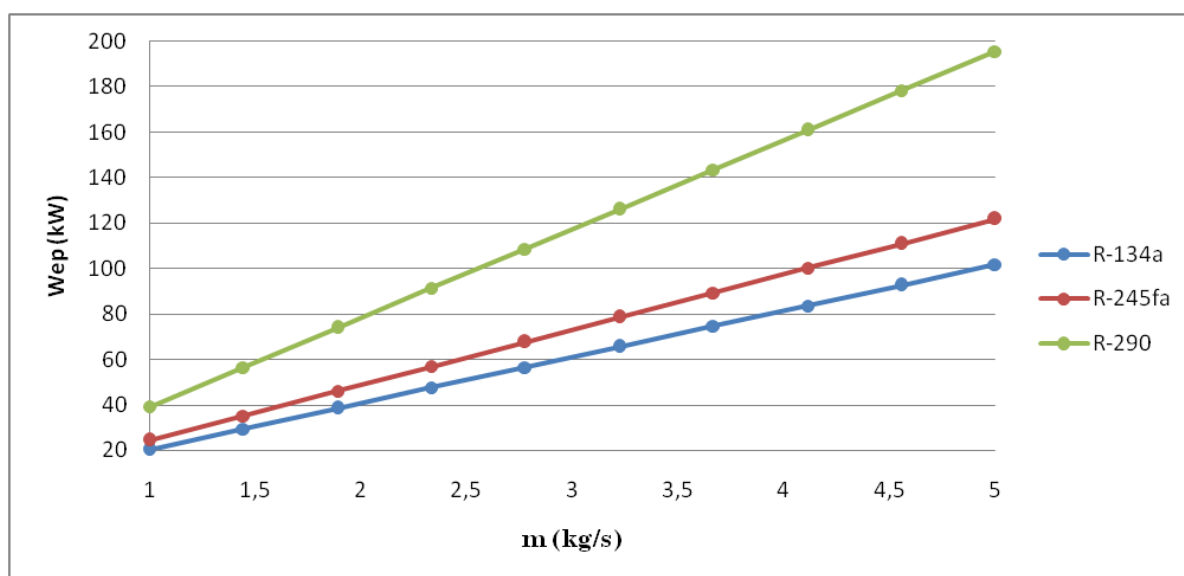
Ως έργο στροβίλου, ορίζεται το μηχανικό έργο που παράγεται από την διαδικασία διαστολής και συμβολίζεται ως W_{exp} με μονάδα μέτρησης τα kW. Στον οργανικό κύκλο, ο ατμός που παράγεται από το εργαζόμενο ρευστό, εισέρχεται στον εκτονωτή και κατά την διάρκεια εκτόνωσης εκτελεί μηχανικό έργο στον στροβίλο. Έτσι, έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του στροβίλου και την παραγωγή ισχύος στον άξονα, όπου η ισχύς αυτή αξιοποιείται για την κίνηση γεννήτριας και εν τέλει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όποτε, με λίγα λόγια το έργο του στροβίλου αντιπροσωπεύει την ενέργεια που έχει το ρευστό, καθώς διαστέλλεται και εκτελεί χρήσιμο έργο. Επίσης, στο κύκλο ζητείται η μεγιστοποίηση του έργου για την βελτίωση της συνολικής απόδοσης και τις δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού, καθίσταται θεμελιώδης παράμετρος του κύκλου και αναφέρεται στην ποσότητα του ρευστού που διέρχεται στον οργανικό κύκλο ανά μονάδα χρόνου. Συμβολίζεται ως \dot{m} και οι μονάδες του είναι $\frac{kg}{s}$.

Ακόμη, είναι γνωστό πως η θερμοκρασία του συμπυκνωτή με το έργο του στροβίλου είναι αντιστρόφως ανάλογα, δηλαδή όσο αυξάνεται το έργο τόσο μειώνεται η θερμοκρασία. Σε αντίθεση όμως, το έργο του στροβίλου με την παροχή μάζας είναι ανάλογα όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, συμβολίζεται στον άξονα x η παροχή μάζας και στον άξονα y το έργο του στροβίλου. Αναπαρίστανται και τα τρία οργανικά ρευστά που γίνεται η μελέτη, σε συνθήκες σχεδιασμού.

Οι καμπύλες αναπαριστούν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το έργο του expander, καθώς και η παροχή μάζας μεταβάλλεται καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου. Για όλους τους λόγους που προαναφέρθηκαν, αυτό που ζητείται είναι η μεγαλύτερη τιμή σε kW που μπορεί να δώσει το έργο του expander. Ολοφάνερα, διακρίνεται ότι το ρευστό R-290 σε όλες τις τιμές της παροχής μάζας διατηρεί υψηλότερες τιμές έργου συγκριτικά με τα άλλα ρευστά. Αυτός είναι και ο λόγος που το συγκεκριμένο ρευστό είναι προτιμητέο συγκριτικά με τα άλλα δύο, καθώς επικρατεί ανάμεσά τους με διαφορά των 20kW και όσο αυξάνονται οι τιμές της παροχής να μεγαλώνει και η διαφορά, καταλήγοντας σε διαφορά περίπου ίση με 100 kW ανάμεσα στο R-290 και στο R-134a.



Διάγραμμα 12: Έργο στροβίλου - παροχή μάζας.

4.4 Συμπυκνωτής

Καθώς ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα του κύκλου, θα παρουσιαστεί διάγραμμα που θα αναπαριστούνται τα ποσά ενέργειας του συμπυκνωτή για θερμοκρασιακό εύρος 20-50°C. Ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα διότι από εκεί θα αντληθεί ρεύμα νερού το οποίο καλείται να καλύψει τις ανάγκες του θερμοκηπίου.

Το ποσό ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την διαδικασία συμπίκνωσης συμβολίζεται με Q_{cond} και έχει μονάδα μέτρησης kW. Το ποσό αυτό, αντιπροσωπεύει την ποσότητα θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται από το ρευστό μέσω ψύξης.

Η ποσότητα θερμοκρασίας του συμπυκνωτή στον κύκλο συμβολίζεται ως $T_{condenser}$ και μονάδα μέτρησης έχει τους °C. Η θερμοκρασία είναι αυτή η οποία υφίσταται το

ρευστό κατά την διάρκεια συμπύκνωσής του και της μετατροπής του από ατμό σε υγρή κατάσταση.

Ο στόχος των παρακάτω διαγραμμάτων, είναι η σύγκριση των ρευστών σε διαφορετικές θερμοκρασίες εξατμιστή, με αποτέλεσμα την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου (186,32 kW) για θερμοκρασιακό εύρος συμπυκνωτή 20-50 °C

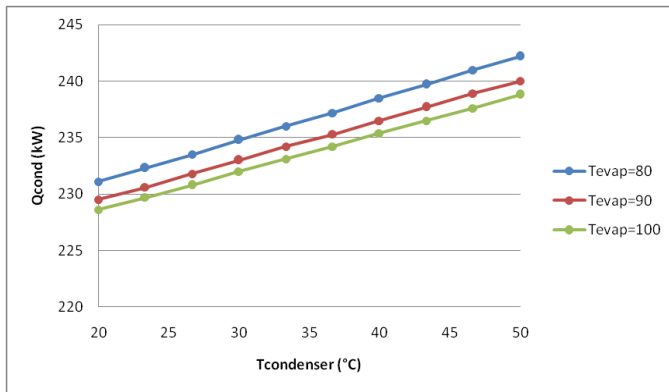
Τα σενάρια που προκύπτουν είναι για τρεις θερμοκρασίες εξατμιστή 80°C, 90°C και 100 °C και θερμοκρασιακό εύρος συμπυκνωτή 20-50 °C. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο οργανικό ρευστό R-290 δεν υπάρχει καμπύλη απόδοσης για $T_{evap}=100^{\circ}\text{C}$, για τους ίδιους λόγους που προαναφέρθηκαν και στα διαγράμματα της απόδοσης.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 12, το οποίο παρουσιάζει το ποσό ενέργειας του συμπυκνωτή σε σχέση με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, μπορούν να προσδιορισθούν οι βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίες του συμπυκνωτή, με αποτέλεσμα αυτός να παράγει το κατάλληλο ποσό ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του συμπυκνωτή, τα ποσά ενέργειας αυξάνονται επίσης. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλα τα ρευστά και σε όλες τις θερμοκρασίες του εξατμιστή, βρίσκονται σε ποσά ενέργειας συμπυκνωτή μεγαλύτερα των απαιτούμενων και αυτό έχει δημιουργηθεί με την σκέψη της υπερδιαστασιολόγησης για πιο κρύες ημέρες. Τα περίσσεια ποσά ενέργειας, κατευθύνονται σε ένα πύργο ψύξης.

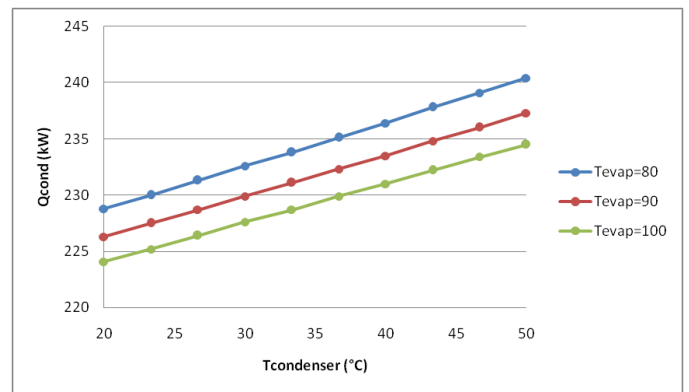
Φαίνεται ότι σε όλα τα ρευστά, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εξατμιστή, τόσο πιο χαμηλά ποσά ενέργειας συμπυκνωτή έχουν. Σε συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για $T_{evap}=90^{\circ}\text{C}$, το ρευστό R-134a ξεκινάει από τα 230 kW όπως και το R-290. Σε αντίθεση με το R-245fa το οποίο ξεκινάει από τα 226 kW.

Συγκριτικά και για τα τρία ρευστά στις συνθήκες σχεδιασμού, δηλαδή $T_{evap}=90^{\circ}\text{C}$ και $T_{cond}=30^{\circ}\text{C}$ το R-290, πετυχαίνει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Το ποσό ενέργειας επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου και επιπλέον υπάρχουν περισευόμενα ποσά ενέργειας για να μπορεί την κάλυψη των αναγκών του θερμοκηπίου σε πιο ημέρες με δυσμενέστερες θερμοκρασίες.

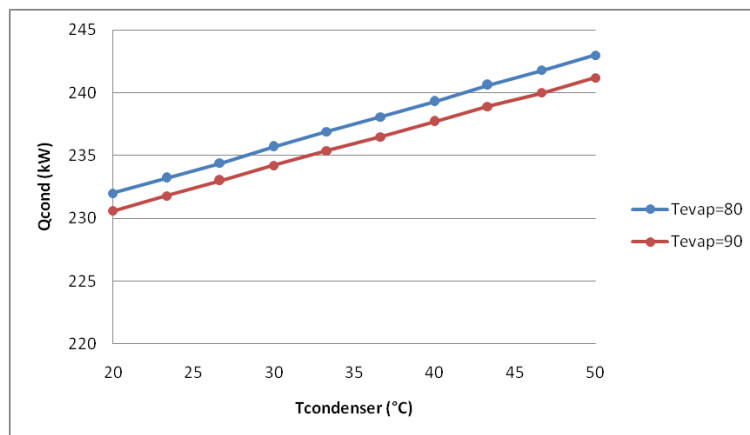
A) Οργανικό ρευστό R-134a



B) Οργανικό ρευστό R-245fa



Γ) Οργανικό ρευστό R-290



Διάγραμμα 13: Πόσα ενέργειας συμπυκνωτή σε σχέση με θερμοκρασίες συμπυκνωτή, για διαφορετικά ρευστά και διαφορετικές θερμοκρασίες εξατμιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Οικονομοτεχνική Ανάλυση

5.1 Οικονομοτεχνική μελέτη

Η οικονομοτεχνική μελέτη, είναι ύψιστης σημασίας ιδιαίτερα σε πολύπλοκες εφαρμογές όπως είναι ένας οργανικός κύκλος Rankine. Οι λόγοι που αποτελούν την μελέτη απαραίτητη είναι διότι η οικονομοτεχνική μελέτη έχει τη δυνατότητα να καθορίζει και να προβλέπει την βιωσιμότητα της επένδυσης με βάση το οικονομικό κριτήριο. Επιπλέον, έχει την δυνατότητα να παρουσιάσει το κατά πόσο μπορεί να αποφέρει κέρδος σε επίδοξους επενδυτές, καθιστώντας την ελκυστική.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, οι υπεύθυνοι λήψεων αποφάσεων θα είναι σε θέση να συγκρίνουν το κόστος της εφαρμογής με τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει. Τέλος, αφού μελετηθούν τα αποτελέσματα θα μπορεί να επιλεγεί ο προτιμότερος, αποδοτικότερος και οικονομικότερος συνδυασμός για την εφαρμογή.

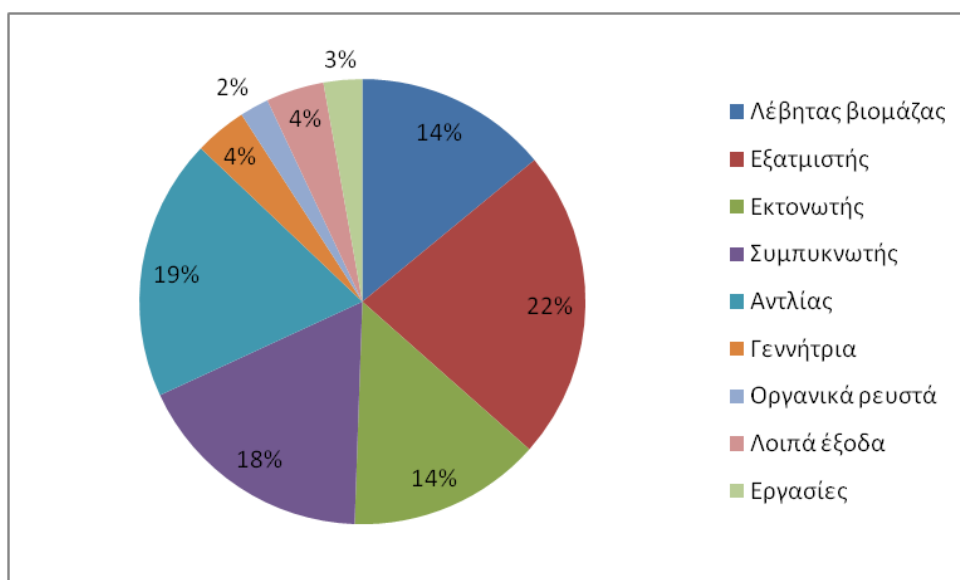
Στην συνέχεια, θα αναλυθούν τρία διαφορετικά σενάρια για τα τρία ρευστά που μελετώνται. Θα παραχθούν διαγράμματα, τα οποία έχουν στόχο την εύρεση της απόσβεσης της επένδυσης του αρχικού κόστους και τι κέρδος θα προκύψει στο πέρας των πέντε ετών.

Η μελέτη γίνεται για πέντε χρόνια με μεταβαλλόμενη την τιμή της kwh ($0,18\text{€/kwh}$, $0,20\text{ €/kwh}$, $0,22\text{ €/kwh}$, $0,25\text{€/ kwh}$ και $0,28\text{ €/kwh}$) ανά έτος και για τα τρία ρευστά.

Αρχικά, στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κόστη των εξαρτημάτων του κύκλου. Τα κόστη της εγκατάστασης προέκυψαν μέσω επικοινωνίας με κατασκευάστρια εταιρία και μελέτη στο διαδίκτυο.

Πίνακας 11: Κόστη εγκατάστασης.

Εξαρτήματα	Κόστος (€)
Λέβητας βιομάζας	10.000,00 €
Εξατμιστής	16.000,00 €
Εκτονωτής	10.000,00 €
Συμπυκνωτής	12.500,00 €
Αντλίας	13.500,00 €
Γεννήτρια	2.700,00 €
Οργανικά ρευστά	1.500,00 €
Λοιπά έξοδα	3.000,00 €
Εργασίες	2.000,00 €
Σύνολο	71.200,00 €



Διάγραμμα 14: Μερίδιο εξαρτημάτων με γνώμονα το κόστος.

Σε επόμενο βήμα, υπολογίστηκε τα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται από τον κύκλο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αρχικά ο υπολογισμός του έργου του στροβίλου για κάθε ρευστό σε συνθήκες σχεδιασμού, εφόσον από εκεί γίνεται η παραγωγή με την βοήθεια γεννήτριας.

Με την βοήθεια του λογισμικού EES (Engineering equation solver) υπολογίστηκε το έργο του στροβίλου για το ρευστό R-134a στα $W_{exp} = 26,36 kW$, για το R-245fa στα $W_{exp} = 26,06 kW$ και τέλος για το R-290 $W_{exp} = 27,11 kW$. Παρατηρείται ότι το ρευστό R-290 έχει παραγόμενο έργο μεγαλύτερο από τα άλλα δυο ρευστά, οπότε κατά συνέπεια αναμένεται και μεγαλύτερο κέρδος.

Για να υπολογισθούν τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, πρώτα πρέπει να οριστεί το πόσο που παράγει κάθε ρευστό ανά έτος (kWh/έτος). Ο οργανικός κύκλος, είναι μια εφαρμογή η οποία για να καλύψει τις ανάγκες του θερμοκηπίου απαιτείται να λειτουργεί όλες τις μέρες του έτους και όλες τις ώρες. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας, με συνοπτικά το παραγόμενο πόσο ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος.

Πίνακας 12: Παραγόμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας.

Ηλεκτρική Ενέργεια			
	R-134a	R-245fa	R-290
W_{exp} (kW)	26,36	26,06	27,11
Ημέρες λειτουργίας	365		
Ώρες λειτουργίας (h)	24		
Ηλεκτρική ενέργεια (Kwh/έτος)	230914	228286	237484
Ηλεκτρική ενέργεια (Mwh/έτος)	230,9136	228,2856	237,4836

Γνωρίζοντας τις Kwh/ έτος για κάθε ρευστό καθώς και την τιμή της Kwh ενδεικτικά για κάθε έτος, τότε μπορούν να βρεθούν τα έσοδα που θα προκύψουν ανά έτος και ανά ρευστό. Παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή πίνακα.

Πίνακας 13: Έσοδα εγκατάστασης.

Έσοδα					
Τιμή €/Kwh	0,18	0,2	0,22	0,25	0,28
R-134a (€/έτος)	41.564,45 €	46.182,72 €	50.800,99 €	57.728,40 €	64.655,81 €
R-245fa (€/έτος)	41.091,41 €	45.657,12 €	50.222,83 €	57.071,40 €	63.919,97 €
R-290 (€/έτος)	42.747,05 €	47.496,72 €	52.246,39 €	59.370,90 €	66.495,41 €

Παρατηρείται, όπως είναι και αναμενόμενο από το έργο του στροβίλου, ότι το ρευστό με το μεγαλύτερο οικονομικό ενδιαφέρον είναι το R-290 και παρουσιάζει μέγιστη τιμή για 0,28 €/kwh στα 66.495,41€.

Καθώς το ρευστό ενδιαφέροντος είναι το R-290, σύμφωνα με τα οικονομικά του δεδομένα, θα παρουσιαστεί με την βοήθεια του οικονομικού δείκτη NPV (Net present value) το ποσό των κερδών που θα έχει ο επενδυτής στο πέρας των πέντε ετών. Το τελικό ποσό που προκύπτει είναι 197.156,47€.

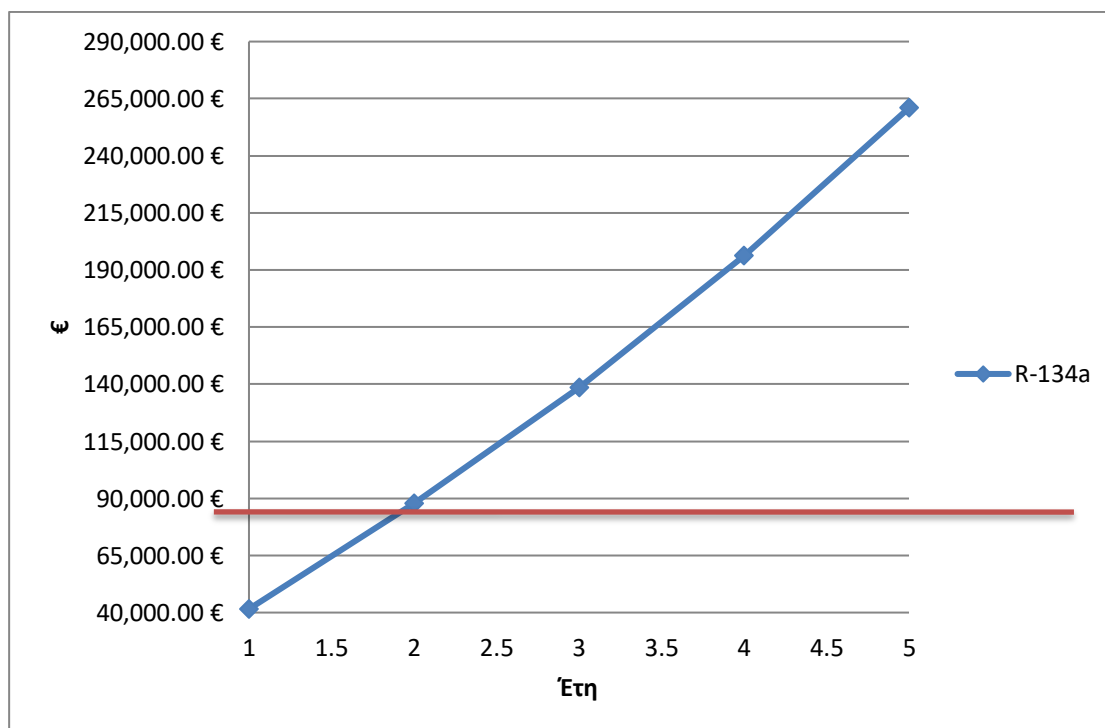
Αναλυτικότερα, θα παρουσιαστούν ξεχωριστά διαγράμματα για κάθε ρευστό. Πρώτα ακολουθεί το διάγραμμα για το R-134a.

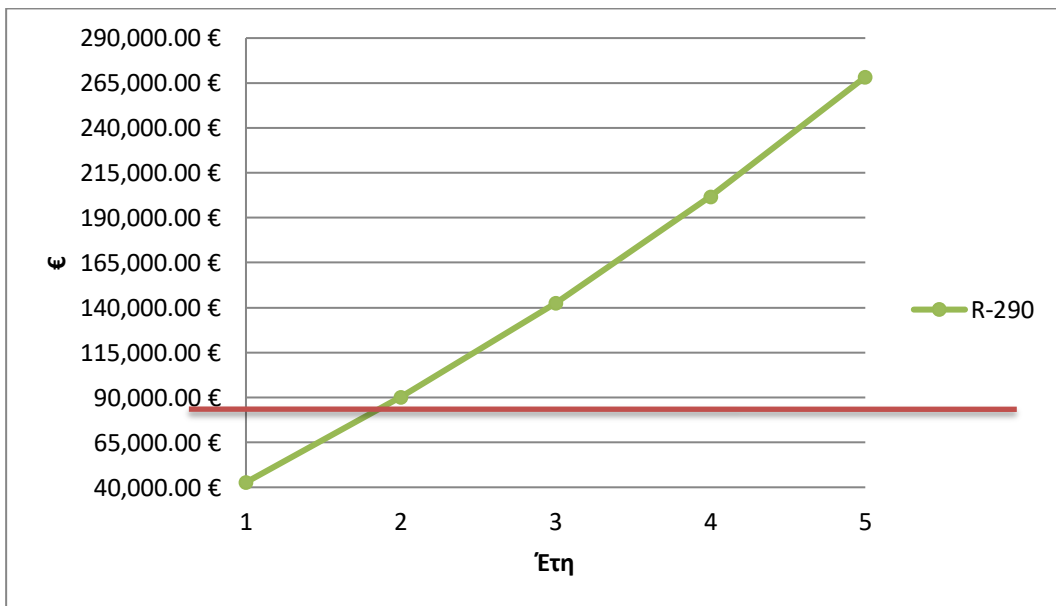
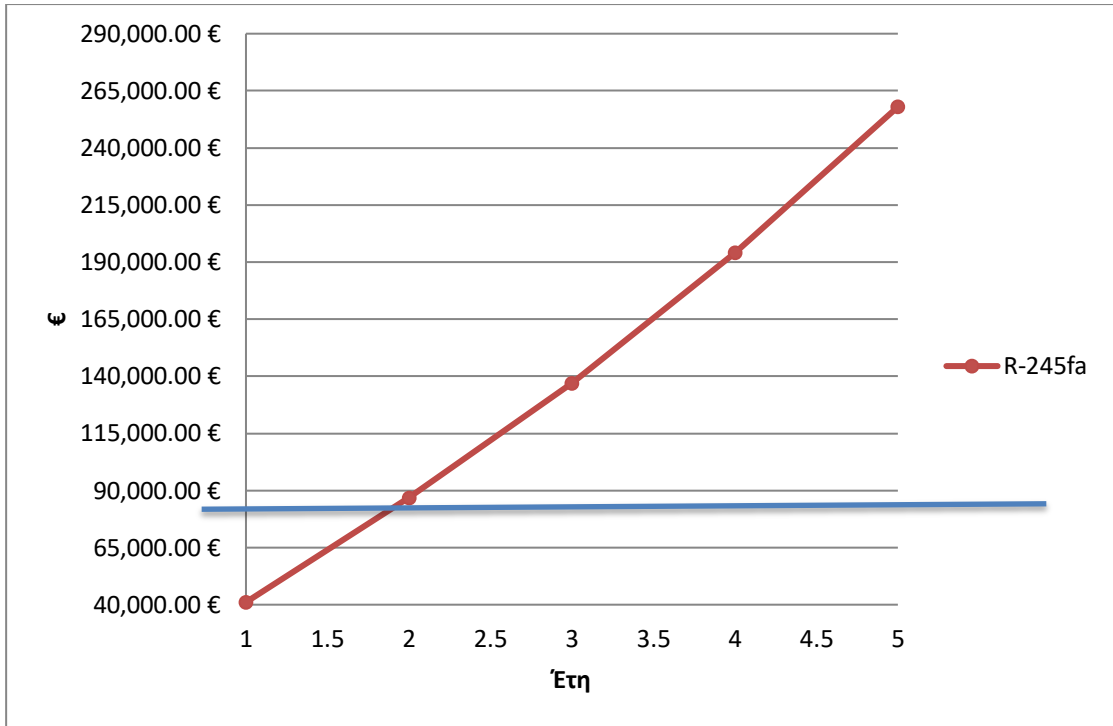
Η κόκκινη γραμμή συμβολίζει το αρχικό κόστος της επένδυσης και συνδυαστικά με τον άξονα x, μπορεί να οριστεί ότι η πλήρης απόσβεση γίνεται λίγο πριν το δεύτερο χρόνο λειτουργίας της. Αυτό το σημείο ονομάζεται ως νεκρό σημείο και πέραν αυτού του σημείου, ο επενδυτής τα υπόλοιπα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης θα λαμβάνει κέρδος.

Στο επόμενο διάγραμμα, παρουσιάζεται η οικονομική συμπεριφορά στο εύρος των πέντε ετών λειτουργίας του ρευστού R-245fa. Παρατηρείται πανομοιότυπη συμπεριφορά με το R-134a, έχοντας το νεκρό σημείο της επένδυσης στα ίδια χρόνια λειτουργίας. Συγκριτικά με τα τρία ρευστά, το συγκεκριμένο είναι το λιγότερο οικονομικά αποδοτικό, με μικρή διαφορά από το R-134a.

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα για το R-290. Συμβολίζοντας η κόκκινη γραμμή, όπως προαναφέρθηκε, το νεκρό σημείο της επένδυσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι συγκριτικά με τα προηγούμενα ρευστά, το ποσό της απόσβεσης επιτυγχάνεται νωρίτερα. Ήδη, στον δεύτερο χρόνο λειτουργίας της ο επενδυτής έχει καλύψει το αρχικό κόστος και έχει έσοδα περίπου 20.000€.

Εν κατακλείδι, σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι για τα ρευστά R-134a και R-245fa γίνεται η απόσβεση του αρχικού κόστους περίπου στον 1,5 χρόνο. Από την άλλη μεριά, το R-290, παρουσιάζει νωρίτερα την απόσβεση του ποσού και ήδη τον δεύτερο χρόνο ο επενδυτής έχει κέρδος.





Διάγραμμα 15: Οικονομική συμπεριφορά των ρευστών ανά τα χρόνια λειτουργίας της εφαρμογής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αποδεικνύει ότι τα συστήματα ORC είναι βιώσιμη επιλογή για εφαρμογές θερμοκηπίου, ιδίως όταν ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιούνται πηγές χαμηλής ποιότητας όπως λέβητας βιομάζας. Ο ORC είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό σύστημα και η εφαρμογή του σε θερμοκήπιο οδηγεί σε αυξημένη ενεργειακή απόδοση συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Ένα σημαντικό κομμάτι της εργασίας είναι η επιλογή των οργανικών ρευστών. Τα ρευστά που μελετήθηκαν είναι R-134a, R-245fa και R-290 και έγιναν μεταξύ τους θερμοδυναμικοί υπολογισμοί. Η μελέτη των ρευστών πραγματοποιήθηκε για διάφορα σενάρια με θερμοκρασιακό εύρος εξατμιστή 80°C, 90°C, 100°C και θερμοκρασία συμπυκνωτή 30°C προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους. Ωστόσο οι συνθήκες σχεδιασμού της εφαρμογής όπου αναλύονται περαιτέρω είναι $T_{\text{evaporator}}=90^{\circ}\text{C}$ και $T_{\text{condenser}}=30^{\circ}\text{C}$. Σε αυτές τις τιμές παρουσιάζεται διαφορά στον βαθμό απόδοσης, με μεγαλύτερο στο ρευστό R-245fa.

Η απορριπτόμενη θερμότητα που ανακτάται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το θερμοκήπιο ανεξάρτητο από το δίκτυο και μειώνοντας το συνολικό ενεργειακό κόστος. Μεγαλύτερο έργο στροβίλου συναντάται με τη χρήση του R-290, άρα και μεγαλύτερα ποσά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συγκεκριμένο ρευστό να κρίνεται πιο συμφέρον από οικονομική πλευρά, καθώς μεγιστοποιεί το κέρδος.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος είναι η συμβολή στην μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου και η μείωση της ανάγκης για ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα, καθιστώντας έτσι μια πιο πράσινη προσέγγιση στη λειτουργία θερμοκηπίου. Όσον αφορά την οικονομική βιωσιμότητα, λαμβάνοντας το αρχικό κόστος της επένδυσης και ως έσοδα την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης γίνεται σε λιγότερο από 2 έτη, καθιστώντας την εφαρμογή ελκυστική για τους ιδιοκτήτες θερμοκηπίου και επίδοξους επενδυτές. Οι τεχνικές προκλήσεις και ευκαιρίες που παρουσιάζονται στη μελέτη είναι επιλογή του εργαζόμενου ρευστού και ενσωμάτωσή του στο σύστημα, δημιουργώντας περαιτέρω ευκαιρίες για έρευνα.

Σαν συνέχεια της εργασίας, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση σε άλλα οργανικά ρευστά με στόχο την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και την αύξηση του έργου του στροβίλου. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να περιλαμβάνουν λεπτομερές ρυθμίσεις των παραμέτρων του συστήματος, με στόχο τα μεγαλύτερα ποσά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί ως πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αξιολόγηση αυτή, θα μπορούσε να περιλαμβάνει παράγοντες όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και η χρήση πόρων. Με την επιδίωξη τέτοιων κατευθύνσεων, η συνέχιση της εργασίας μπορεί να συμβάλει στη προώθηση βιώσιμων ενεργειακών λύσεων και της ενεργειακής απόδοσης στη

γεωργία και στη διευκόλυνση της μετάβασης προς πιο πράσινες πρακτικές θερμοκηπίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Αγορουλα—Διπλωματική Εργασία.pdf*. (χ.χ.).
2. *Αρβανίτης Διπλωματική (1).pdf*. (χ.χ.).
3. *ΜΑΝΤΕΛΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΤΕΛΙΚΟ.pdf*. (χ.χ.).
4. *Προσομοίωση Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) με το λογισμικό ASPEN PLUS.pdf*. (χ.χ.).
5. Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018a). A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Information Processing in Agriculture*, 5(1), 33–46.
<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.003>
6. Ahamed, Md. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018b). Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 235–244.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.025>
7. Al-Helal, I. M., Waheeb, S. A., Ibrahim, A. A., Shady, M. R., & Abdel-Ghany, A. M. (2015). Modified thermal model to predict the natural ventilation of greenhouses. *Energy and Buildings*, 99, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.013>
8. Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F. H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *FIBRE CROPS: from production to end use*, 68, 2–16.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041>
9. Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2015). A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). *Energy Conversion and Management*, 106, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>
10. Boukis, I., Vassilakos, N., Kontopoulos, G., & Karellas, S. (2009). Policy plan for the use of biomass and biofuels in Greece: Part I: Available biomass and methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 971–985.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.007>
11. Cheng, X., Zhao, K., He, X., Zheng, H., Wang, R., Liu, C., Zhou, L., Fahad, S., & Deng, G. (2023). Differential protein response to different light quality conditions of industrial hemp cultivation based on DIA technology. *Industrial Crops and Products*, 197, 116650.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116650>

12. Couvreur, K., Beyne, W., De Paepe, M., & Lecompte, S. (2020). Hot water storage for increased electricity production with organic Rankine cycle from intermittent residual heat sources in the steel industry. *Energy*, 200, 117501. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117501>
13. Das, R., Gupta, R. K., Gupta, T., Maji, C., & Chaudhuri, H. (χχ). *STUDY ON GEOTHERMAL POWER GENERATION TECHNIQUES RELATED TO BAKRESWAR-TANTLOI GEOTHERMAL AREA*.
14. Essaghouri, L., Mao, R., & Li, X. (2023). Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction: An LCA-based comparative case study in Morocco. *Environmental Impact Assessment Review*, 100, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107085>
15. Fang, Z., Dong, X., Tang, X., Lv, Z., Qiao, X., Wang, L., Sun, C., & Yu, X. (2023). Study on supercritical CO₂ power cycles for natural gas engine energy cascade utilization. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120255. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120255>
16. Fernea, R., Manea, D. L., Tămaş-Gavrea, D. R., & Roşca, I. C. (2019). Hemp-clay building materials—An investigation on acoustic, thermal and mechanical properties. *12th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2018, 4–5 October 2018, Tirgu Mures, Romania*, 32, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.205>
17. Ge, Z., Li, J., Duan, Y.-Y., Yang, Z., & Xie, Z. (2019). Thermodynamic Performance Analyses and Optimization of Dual-Loop Organic Rankine Cycles for Internal Combustion Engine Waste Heat Recovery. *Applied Sciences*, 9, 680. <https://doi.org/10.3390/app9040680>
18. Gill, A. R., Loveys, B. R., Cowley, J. M., Hall, T., Cavagnaro, T. R., & Burton, R. A. (2022). Physiological and morphological responses of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) to water deficit. *Industrial Crops and Products*, 187, 115331. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115331>
19. Gilson Dranka, G., Ferreira, P., & Vaz, A. I. F. (2022). Co-benefits between energy efficiency and demand-response on renewable-based energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112936. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112936>
20. Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., & Roshandel, R. (2018). A novel integrated framework to evaluate greenhouse energy demand and crop yield production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 487–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.046>
21. Hasanzadeh, A., Mehrara, M., Irani, M., Chitsaz, A., & Parham, K. (2023). An innovative biomass-fueled gas turbine-ORC system equipped with

- electrochemically mediated amine regeneration (EMAR) for CO₂ capture. *Journal of CO₂ Utilization*, 68, 102365. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102365>
22. Khan, J., & Arsalan, M. (2016). Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>
23. Kim, H.-K., Lee, S.-Y., Kwon, J.-K., & Kim, Y.-H. (2022). Evaluating the Effect of Cover Materials on Greenhouse Microclimates and Thermal Performance. *Agronomy*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy12010143>
24. Li, J., Pei, G., Li, Y., Wang, D., & Ji, J. (2012). Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy*, 38(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.032>
25. Li, X., Zhang, D., Yun, S., Zhou, X., Jiang, D., Lv, X., Feng, Z., Wu, W., Tian, W., Qiu, S., Su, G. H., Zhao, Q., & Liu, X. (2023). Design and optimal thermal efficiency contrastive analysis on closed Brayton cycle systems with different fluids of fluoride-salt-cooled high-temperature advanced reactor. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120291>
26. Lolos, P., & Rogdakis, E. (2009). Thermodynamic analysis of a Kalina power unit driven by low temperature heat sources. *Thermal Science - THERM SCI*, 13, 21–31. <https://doi.org/10.2298/TSCI0904021L>
27. Ma, W., Liu, T., Min, R., & Li, M. (2018). Effects of physical and chemical properties of working fluids on thermodynamic performances of medium-low temperature organic Rankine cycles (ORCs). *Energy Conversion and Management*, 171, 742–749. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.032>
28. Minea, V. (2014). Power generation with ORC machines using low-grade waste heat or renewable energy. *Applied Thermal Engineering*, 69(1), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.054>
29. Moradi, R., Marcantonio, V., Cioccolanti, L., & Bocci, E. (2020). Integrating biomass gasification with a steam-injected micro gas turbine and an Organic Rankine Cycle unit for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 205, 112464. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112464>
30. Mota-Babiloni, A., Fernández-Moreno, A., Giménez-Prades, P., Udriou, C.-M., & Navarro-Esbrí, J. (2023). Ternary refrigerant blends for ultra-low temperature refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 148, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.006>

31. *Odhgos_kaliergeias2021_Cannabis.pdf*. (χ.χ.).
32. Okazaki, H., Kobayashi, M., Momohara, A., Eguchi, S., Okamoto, T., Yanagisawa, S., Okubo, S., & Kiyonaga, J. (2011). Early Holocene coastal environment change inferred from deposits at Okinoshima archeological site, Boso Peninsula, central Japan. *Quaternary Sea Level and Palaeoenvironmental Reconstructions in the Coastal Zone of East and Southeast Asia*, 230(1), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.11.002>
33. Qyyum, M. A., Khan, A., Ali, S., Khurram, M. S., Mao, N., Naquash, A., Noon, A. A., He, T., & Lee, M. (2022). Assessment of working fluids, thermal resources and cooling utilities for Organic Rankine Cycles: State-of-the-art comparison, challenges, commercial status, and future prospects. *Energy Conversion and Management*, 252, 115055. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115055>
34. Rasheed, A., Lee, J., & Lee, H. W. (2018). Development and Optimization of a Building Energy Simulation Model to Study the Effect of Greenhouse Design Parameters. *Energies*, 11, 2001. <https://doi.org/10.3390/en11082001>
35. Salek, F., Babaie, M., Ghodsi, A., Hosseini, S., & Zare, A. (2020). Energy and exergy analysis of a novel turbo-compounding system for supercharging and mild hybridization of a gasoline engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10178-z>
36. Salem, M., Alavi, M., Mahariq, I., Accouche, O., & El Haj Assad, M. (2021). Applications of Thermal Energy Storage in Solar Organic Rankine Cycles: A Comprehensive Review. *Frontiers in Energy Research*, 9, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.766292>
37. Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>
38. Shen, P., Gao, Z., Fang, B., Rao, J., & Chen, B. (2021). Ferreting out the secrets of industrial hemp protein as emerging functional food ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.022>
39. Si, M., Kuai, L., Huo, E., Li, L., & Bai, M. (2022). Thermal decomposition and interaction mechanism of HFC-134a/HFC-32 mixture in Organic Rankine Cycle. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108947. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108947>
40. Tarrad, A. H. (2020). A Steady-State Evaluation of Simple Organic Rankine Cycle (SORC) with Low-Temperature Grade Waste Heat Source. *Journal of*

Power and Energy Engineering, 08(07), 15–31.
<https://doi.org/10.4236/jpee.2020.87002>

41. Tartière, T., & Astolfi, M. (2017). A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *4th International Seminar on ORC Power Systems September 13-15th 2017 POLITECNICO DI MILANO BOVISA CAMPUS MILANO, ITALY*, 129, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.159>
42. Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G., & Frangoudakis, A. (2009). Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(11), 2468–2476.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025>
43. Van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., Van Straten, G., & Van Henten, E. J. (2015). Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied Energy*, 137, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.083>
44. Yadav, S., Liu, J., & Kim, S. C. (2022). A comprehensive study on 21st-century refrigerants—R290 and R1234yf: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121947.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121947>
45. Yazici, L. (2023). Optimizing plant density for fiber and seed production in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of King Saud University - Science*, 35(1), 102419. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102419>