



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής**  
**Σχολή: Μηχανικών**  
**Τμήμα: Μηχανολόγων Μηχανικών**

***Διπλωματική Εργασία***

**Ηλιοβοηθούμενοι Οργανικοί κύκλοι Rankine,  
ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση**

**Solar-driven Organic Rankine Cycle (SORC): energy  
and exergy analysis**

**Φοιτητής: Λόης Παναγιώτης / Α.Μ: 272017058**

**Εισηγητής: Ευάγγελος Σακελλαρίου**

**Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

<b>Κοσμάς Καββαδίας</b>	
<b>Αντώνιος Νάζος</b>	
<b>Ευάγγελος Σακελλαρίου</b> <b>Εισηγητής</b>	

## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Λόης Παναγιώτης** του Πέτρου, με αριθμό μητρώου **272017058**, 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».

Ημερομηνία

Ο Δηλών,

Λόης Παναγιώτης

## Περίληψη

Στη παρούσα εργασία διεξάγεται επιστημονική ανασκόπηση σχετικά με τους Ηλιοβοηθούμενου οργανικού κύκλου Rankine ενεργειακά και εξεργειακά. Πιο συγκεκριμένα, η ανασκόπηση εστιάζει στα συστήματα μικρής κλίμακας και μεγέθους που θα καλύπτουν ενεργειακές ανάγκες από μικρούς οικισμούς μέχρι και μεμονωμένες οικίες. Η εργασία είναι βασισμένη στην υπάρχον επιστημονική βιβλιογραφία, η οποία μελετήθηκε και αποδελτιώθηκε. Από την ανάλυση των στοιχείων που καταγράφηκαν προκύπτει ότι ένας οργανικός κύκλος Rankine με ηλιακό συλλέκτη (SORC), μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια σε έναν οικισμό ή σε μία κατοικία ανάλογα με το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Για τους ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες, με κατηγοριοποίηση και εκτενής ανάλυση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, διαπιστώθηκε ότι οι συλλέκτες που αποδίδουν καλύτερα σε αυτές τις εφαρμογές είναι ο Επίπεδος Συλλέκτης Κενού και ο Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης, ανάλογα τις προδιαγραφές και τον σκοπό του συστήματος. Επιπλέον τα οργανικά ρευστά που παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση είναι το R134a, το R245fa και υδρογονάνθρακες, όπως το βουτάνιο, το προπάνιο και το εξάνιο, με το κάθε ένα να παρουσιάζει μέγιστη απόδοση σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών λειτουργίας. Οι τοπολογίες που φαίνεται να είναι πιο αποδοτικές και με καλύτερο λόγο απόδοσης τιμής είναι ο Απλός Οργανικός Κύκλος και ο Αναγεννητικός Οργανικός Κύκλος. Παραλλαγές και τοπολογίες με περιπλοκότερες διατάξεις αυξάνουν πολύ το κόστος, με δυσανάλογη αύξηση στην απόδοση, επομένως δεν συνιστώνται. Επιπλέον ερευνήθηκε ο τρόπος που διεξάγεται μία εξεργειακή ανάλυση σε έναν SORC και εξήχθησαν αποτελέσματα σχετικά με την καταστροφή εξέργεια στο σύστημα.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιοβοηθούμενος Οργανικός κύκλος Rankine, Οργανικά ρευστά, Ηλιακός θερμικός συλλέκτης

## **Abstract**

In this paper, a scientific review is conducted on the Solar Assisted Organic Rankine Cycle energetic and exergetic. More specifically, the review focuses on small-scale (size) systems that cover energy needs from small settlements to individual houses. The work is based on the existing scientific literature, which was studied and refined. From the analysis of the data recorded, it appears that an organic Rankine cycle with a solar collector (SORC) can meet the energy needs for electricity in a settlement or a house depending on the size and characteristics of the system. For solar thermal collectors, by categorization and extensive analysis of the available literature, it was found that the collectors that perform best in these applications are the Flat Vacuum Collector and the Linear Parabolic Collector, depending on the specifications and purpose of the system. Additionally, the organic fluids that perform better are R134a, R245fa, and hydrocarbons such as butane, propane, and hexane, with each exhibiting maximum performance at different operating temperature ranges. The topologies that appear to be more efficient and with better value for money are the Simple Organic Cycle and the Regenerative Organic Cycle. Variations and topologies with more complex layouts greatly increase the cost, with a disproportionate increase in performance, so they are not recommended. In addition, the way an exergy analysis is carried out in a SORC was investigated and results regarding the exergy destruction in the system were derived.

Keywords: Solar-driven Organic Rankine cycle, organic fluids, Solar thermal collector

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα εικόνων .....	7
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων .....	8
Περιεχόμενα Πινάκων .....	8
Νομενκλατούρα .....	9
1 Εισαγωγή.....	10
1.1 Θεσμικά μέτρα για την κλιματική αλλαγή .....	13
1.2 Συστήματα παραγωγής ενέργειας .....	14
1.2.1 Πηγές ενέργειας .....	14
1.2.2 Μηχανές Παραγωγής Έργου .....	15
1.3 Θερμικές Μηχανές.....	15
1.4 Κύκλος Carnot .....	16
1.5 Κύκλος Rankine .....	17
1.5.1 Σκοπός της εργασίας .....	19
1.6 Σύνοψη Κεφαλαίων .....	20
2 Μεθοδολογία.....	21
3 Οργανικοί κύκλοι και η θερμοδυναμική τους ανάλυση .....	23
3.1 Σύγκριση ORC με Κύκλο ατμού-νερού.....	23
3.2 Ηλιοβοηθούμενοι Οργανικοί κύκλοι Rankine .....	24
3.3 Τοπολογίες οργανικού κύκλου Rankine .....	25
3.3.1 Οργανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση .....	25
3.3.2 Οργανικός κύκλος Rankine με ανάκτηση .....	26
3.3.3 Αναγεννητικός Οργανικός κύκλος Rankine .....	26
3.3.4 Οργανικός Κύκλος Διαχωρισμού (Flash Cycle) .....	27
3.3.5 Τριμερής Οργανικός κύκλος.....	28
3.3.6 Κρίσιμος Οργανικός κύκλος Rankine (TCORC) .....	28
3.3.7 Οργανικός κύκλος Rankine με πολλαπλές πιέσεις εξάτμισης (MP ORC)	29
3.3.8 Εγχυτήρες ατμού, αναθερμαντήρες και αλληλουχίες Οργανικών	
κύκλων Rankine .....	30
4 Ηλιακοί Θερμικοί συλλέκτες .....	32
4.1 Ηλιακή Ενέργεια.....	32
4.2 Κατηγοριοποίηση ηλιακών θερμικών συλλεκτών.....	32
4.3 Σταθεροί Ηλιακοί Θερμικοί Συλλέκτες .....	33

4.3.1	Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες (FPCs) .....	33
4.3.2	Συλλέκτες Σωλήνα Κενού (ETCs).....	35
4.3.3	Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες (CPCs) .....	36
4.4	Ηλιοστατικοί Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Θερμικοί Συλλέκτες (STCCs) .....	37
4.4.1	Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης (PTCs) .....	38
4.4.2	Συλλέκτης FRENSEL (LFRs) .....	39
4.4.3	Παραβολικός Συλλέκτης Πιάτο (PDCs).....	41
4.4.4	Πύργος Ισχύος (ST) .....	42
5	Εκτονωτές – Ατμοστρόβιλοι.....	45
5.1	Αξονικοί Στρόβιλοι .....	45
5.2	Ακτινικοί στρόβιλοι .....	46
5.3	Σπειροειδείς Εκτονωτές .....	46
5.4	Ελικοειδείς – Κοχλιοειδείς .....	47
5.5	Παλινδρομικοί Εμβολοφόροι εκτονωτές .....	48
5.6	Περιστροφικοί Πτερυγιοφόροι Εκτονωτές.....	48
6	Ρευστά λειτουργίας και αποθήκευση θερμότητας .....	50
6.1	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας συλλέκτη.....	51
6.2	Αποθήκευση Θερμότητας.....	53
6.2.1	Κατηγοριοποίηση και χαρακτηριστικά Συστήματος Θερμικής Αποθήκευσης.....	53
6.3	Οργανικά ρευστά λειτουργίας SORC .....	55
6.3.1	Κρίσιμοι παράμετροι ( θερμοκρασία, πίεση) .....	57
6.3.2	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (ενθαλπία εξάτμισης).....	57
6.3.3	Πυκνότητα .....	57
6.3.4	Μοριακό βάρος.....	58
6.3.5	Θερμική ευστάθεια και συμβατότητα με τα υλικά του συστήματος	58
6.3.6	Ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας του ρευστού .....	58
6.3.7	Ιδιότητες ασφαλείας .....	58
6.3.8	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	59
6.3.9	Απόδοση του συστήματος .....	59
6.3.10	Διαθεσιμότητα και οικονομικά κριτήρια .....	60
6.3.11	Φυσικοχημικές ιδιότητες των οργανικών ρευστών .....	60
7	Εγκατεστημένα Συστήματα SORC .....	67
7.1.1	Ηλιακοί Συλλέκτες .....	71
7.1.2	Ρευστά μεταφοράς θερμότητας (ηλιακό κύκλωμα) .....	71

7.1.3	Ισχύς SORC ανά επιφάνεια συλλέκτη .....	71
8	Θεωρητικές μελέτες SORC .....	74
8.1	Λογισμικό για την εξομείωση των SORC .....	82
8.2	Συμπεράσματα για τα οργανικά ρευστά των SORC στις θεωρητικές εργασίες .....	82
8.3	Τοπολογίες που έχουν επιλεγεί για θεωρητική μελέτη των SORC.....	83
9	Ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση .....	84
9.1	Βασικές Θερμοδυναμικές Αρχές .....	85
9.2	Παραδοχές Ανάλυσης .....	85
9.3	Ενεργειακή και Εξεργειακή Ανάλυση Συλλέκτη .....	86
9.4	Ενεργειακή και εξεργειακή Ανάλυση Οργανικού Κύκλου .....	87
10	Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Εργασίας .....	91
10.1	Εγκατάσταση SORC σε μικρές ενεργειακές κοινότητες ή οικίες.....	91
10.2	Ανασκόπηση της τεχνολογικής κατάστασης των SORC .....	91
10.3	Ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης SORC .....	93
	Αναφορές.....	94



## Περιεχόμενα εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1.1. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	10
ΕΙΚΟΝΑ 1.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ .....	15
ΕΙΚΟΝΑ 1.3. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE .....	17
ΕΙΚΟΝΑ 2.1. ΤΥΠΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SORC.....	21
ΕΙΚΟΝΑ 3.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΛΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ .....	24
ΕΙΚΟΝΑ 3.2. ΥΠΟΚΡΙΣΙΜΟΣ ORC .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 3.3. ORC ΜΕ ΑΝΑΚΤΗΣΗ .....	26
ΕΙΚΟΝΑ 3.4. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΟΣ ORC .....	27
ΕΙΚΟΝΑ 3.5. ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ FLASH .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 3.6. TRILATERAL (TRIANGULAR) CYCLE (TLC) .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 3.7. ΥΠΕΡΚΡΙΣΙΜΟΣ ORC.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 3.8. ORC ΜΕ ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΙΕΣΗΣ .....	29
ΕΙΚΟΝΑ 3.9. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΟΣ ORC ΜΕ ΕΚΧΥΣΗ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 4.1 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ, (ΠΗΓΗ: (HARISH KUMAR GHRITLAHRE, 2018)).....	33
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.ΤΥΠΙΚΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ .....	34
ΕΙΚΟΝΑ 4.3. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 4.4. ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ .....	36
ΕΙΚΟΝΑ 4.5. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΡΤC .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 4.6 ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FLESNEL (ΠΗΓΗ: SOLAR IMPULSE FOUNDATION) .....	40
ΕΙΚΟΝΑ 4.7. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΠΙΑΤΟ (PDR) .....	41
ΕΙΚΟΝΑ 4.8. ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ .....	43
ΕΙΚΟΝΑ 5.1. ΕΚΤΟΝΩΤΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 5.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΕΚΤΟΝΩΤΗ .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 5.3. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗΣ ΕΚΤΟΝΩΤΗ .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 5.4. ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΟΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΣ ΕΚΤΟΝΩΤΗΣ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 5.5. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΚΤΟΝΩΤΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 6.1. ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΟΣ SORC ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 6.2. ΤΥΠΟΙ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ( ΠΗΓΗ: (HUIJUAN CHEN, 2010)) .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 7.1. ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SORC .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 9.1. ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	84

## Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.1. ΤΑ ΠΟΣΑ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΚΑΤΑΝΑΛΩΝΟΝΤΑΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	11
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2019.....	12
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.3. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ CARNOT.....	16
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1.4. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ T-S ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE.....	18
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1. ΡΕΥΣΤΑ ORC.....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2. ΘΕΡΜΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ.....	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.3. ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (TES).....	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.1. ΙΣΧΥΣ ΕΚΤΟΝΩΤΗ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ SORC .....	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.2. ΙΣΧΥΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΕ REAL LIFE SORC.....	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8.1. ΧΡΗΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΣΕ SORC .....	82

## Περιεχόμενα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ASHRAE 34 .....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2. ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ .....	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ SORC .....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ SORC.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1. ΕΞΟΜΟΙΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SORC .....	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.2. ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ .....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ .....	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1. ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΑΝΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑ.....	90

## Νομενκλατούρα

ORC	Organic Rankine Cycle	Οργανικός κύκλος Rankine
SORC	Solar-driven organic Rankine Cycle	Ηλιοβοηθούμενος Οργανικός Κύκλος Rankine
FPC	Flat Plate Collector	Επίπεδος Συλλέκτης
ETC	Evacuated Tube Collector	Συλλέκτης Σωλήνα Κενού
CPC	Compound Parabolic Collector	Σύνθετος Παραβολικός Συλλέκτης
PTC	Parabolic Through Collector	Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης
LFR	Linear Fresnel Reflector	Συλλέκτης FRENSEL
PDC	Parabolic Disc Collector	Συλλέκτης Παραβολικό Πιάτο
ST	Solar Tower	Ηλιακός Πύργος
TES	Thermal Energy Storage	Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας

# 1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ανθρωπότητα έχει έρθει αντιμέτωπη με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Αυτό το φαινόμενο είναι ικανό να προκαλέσει ακραίες καιρικές συνθήκες και αύξηση της στάθμης της θάλασσας, με κίνδυνο να απειλήσει τις ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά και την επιβίωση του ανθρώπου στον πλανήτη (Luqman Jeffrey, 2021). Η κλιματική αλλαγή δεν είναι κάτι πρωτόγνωρο στην ιστορία της Γης, καθώς τα τελευταία 650.000 χρόνια υπήρξαν επτά παγετωνικές περίοδοι, όπου στην Γη είχαν αναπτυχθεί τεράστιοι όγκοι πάγου και η μέση θερμοκρασία της Γης είχε μειωθεί σημαντικά. (WWF, 2020) Ωστόσο σύμφωνα με τους επιστήμονες του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) και της NASA, η μέση αύξηση της θερμοκρασίας της Γης τα τελευταία χρόνια έχει προκληθεί από παράγοντες που οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και σχετίζονται κυρίως με την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές. (NASA, 2022) (ΕΕΑ, 2021).

Το αίτιο της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της μέση θερμοκρασίας του πλανήτη. Αυτή προκλήθηκε με την αύξηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Τα βασικά αέρια του θερμοκηπίου που προκαλούν το φαινόμενο αυτό είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και τα οξείδια του αζώτου καθώς και άλλα τα οποία έχουν μικρότερη συμβολή (WWF, 2020). Τα αέρια αυτά εγκλωβίζουν ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπει ο Ήλιος, και την επιστρέφουν ξανά μέσα στη Γη με αποτέλεσμα να παρατηρείται θέρμανση του πλανήτη, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

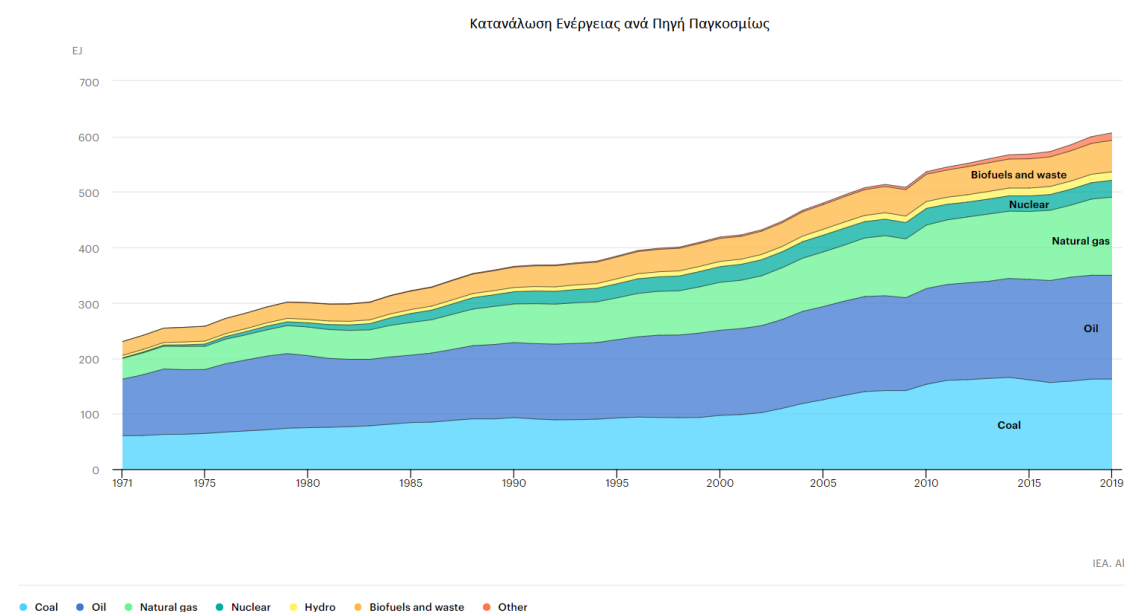
Όπως προαναφέρθηκε τα αίτια αυτού του φαινομένου είναι κυρίως η ανθρώπινη δραστηριότητα. Σε μεγαλύτερο βαθμό, για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατηγορείτε η καύση ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και

το κάρβουνο με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών του ανθρώπου. Με την καύση αυτών εκλύονται καυσαέρια που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα (Luqman Jeffry, 2021). Κατά την διαδικασία της καύσης οι οργανικές ενώσεις που περιέχονται στα καύσιμα αντιδρούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και παράγουν CO<sub>2</sub>, το οποίο είναι το βασικό αέριο για την δημιουργία του φαινομένου. Σε μικρότερο βαθμό συντελούν επίσης η κτηνοτροφία, η βιομηχανία και η διαχείριση των απορριμμάτων. (NASA, 2022)

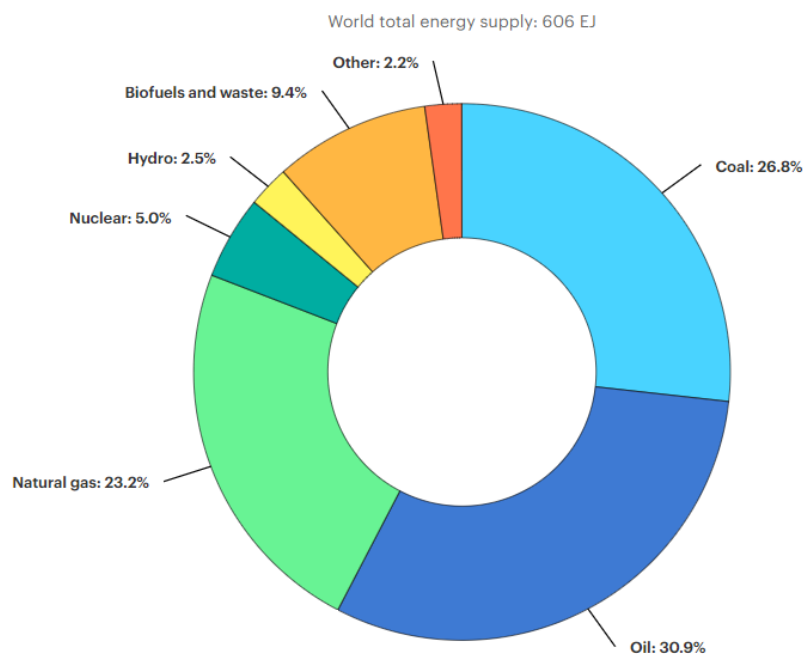
Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ενέργειας (IEE) η διαχρονική μεταβολή της ετήσιας ενέργειας σε EJ από το 1971 έως το 2019 φαίνεται στο Διάγραμμα 1.1.

Σε αυτό παρατηρούμε μία συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αύξησης του πληθυσμού αλλά και την ραγδαία αύξηση της βιομηχανίας που σημειώνεται τα τελευταία 100 χρόνια περίπου. Γενικότερα παρατηρούμε ότι διαχρονικά κάποιες πηγές ενέργειας όπως η πυρηνική και η υδροδυναμική έχουν μία αύξηση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και τις σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα. (NASA, 2022).

Στο Διάγραμμα 1.2 φαίνεται το ποσοστό που κατέχει κάθε πηγή ενέργειας στο ενεργειακό παγκόσμιο μείγμα το έτος 2019 σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ενέργειας (IEE).



Διάγραμμα 1.1. Τα ποσά της συνολικής ενέργειας που καταναλώνονται παγκοσμίως ανάλογα με την πηγή ενέργειας



Διάγραμμα 1.2. Ενεργειακό μείγμα για το έτος 2019

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ενεργειακό μείγμα παγκοσμίως στηρίζεται κατά κύριο λόγο στις συμβατικές πηγές ενέργειας, που είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο σε ποσοστό συνολικά 80,9% του συνολικού, ποσοστό που προβλέπεται να μειωθεί τα επόμενα χρόνια λόγω την κλιματικής αλλαγής αλλά και της έλλειψης του πετρελαίου που θα προκαλέσει αύξηση της τιμής του σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρούνται σαν μία εν δύναμη λύση για την καλύψει των ενεργειακών αναγκών με χαμηλούς ρύπους, αντικαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα. Για αυτόν το σκοπό την τελευταία 20ετία η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει την προσοχή της στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας όπως είναι η γεωθερμία, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.

## 1.1 Θεσμικά μέτρα για την κλιματική αλλαγή

Κινήσεις προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν γίνει από τα ευρωπαϊκά και εθνικά κοινοβούλια, αλλά και από παγκόσμιους οργανισμούς. Έχουν ψηφιστεί νομοσχέδια για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την σταδιακή αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Το 2015 υπογράφηκε από τουλάχιστον 55 χώρες η Συμφωνία των Παρισίων. Σύμφωνα με τη δέσμευση αυτή, οι χώρες που συμφώνησαν θα πρέπει να λάβουν μέτρα για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την συγκράτηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη πολύ κάτω από τους 2 °C σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης τα κράτη-μέλη υπέγραψαν και δεσμεύτηκαν ότι θα γίνει μείωση έως και 55% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030 σε σύγκριση με το 1990 με μακροπρόθεσμο σκοπό μιας κλιματικά ουδέτερης ΕΕ έως το 2050. Αυτό σημαίνει ότι, μέχρι το 2050, η ΕΕ θα μειώσει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και θα βρει τρόπους να αντισταθμίσει τις εναπομένουσες και αναπόφευκτες εκπομπές. Για τον λόγο αυτό τουλάχιστον το 30% των συνολικών δαπανών του μακροπρόθεσμου προϋπολογισμού 2021-2027 θα διοχετευτεί σε έργα για την προστασία του περιβάλλοντος (ΣΕΕ, 2020) (ΣΕΕ, 2015).

Επομένως κρίνεται σκόπιμο να γίνουν προσπάθειες για την εύρεση οικονομικά βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας και τον περιορισμό των συμβατικών καυσίμων. Καταλαβαίνουμε ότι είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν εναλλακτικοί τρόποι για την παραγωγή ενέργειας, έτσι ώστε να αποφευχθεί η κλιμάκωση της ενεργειακής κρίση αλλά ταυτόχρονα με σεβασμό και στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

Με τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τον Usman Muhammad (Usman Muhammad, 2015) και τον Bertrand F. Tchanche (Bertrand F. Tchanche, 2014), ο οποίος πραγματοποίησαν ανασκόπηση και τεχνοοικονομική μελέτη των οργανικών κύκλων Rankine με χρήση ΑΠΕ συμπέραναν ότι θα μπορούσαν να συντελέσουν στην παραγωγή ενέργειας με μηδενικούς ρύπους και ταυτόχρονα μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Στα παρακάτω κεφάλαια αναλύονται τι είναι οι οργανικοί κύκλοι Rankine, τα είδη που υπάρχουν και πώς λειτουργούν.

## 1.2 Συστήματα παραγωγής ενέργειας

### 1.2.1 Πηγές ενέργειας

Η ενέργεια αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ύπαρξη και την ανάπτυξη του ανθρώπου. Από τα πρώτα χρόνια, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε το ξύλο με σκοπό να παράξει θερμότητα και φως. Με την πάροδο του χρόνου κατάφερε να εξελιχθεί και να εκμεταλλευτεί το περιβάλλον του για να παράγει ενέργεια. Σε αυτή την εξελικτική διαδικασία και με την πάροδο των ετών σημειώνονται τρεις χαρακτηριστικές μεταβάσεις ως προς την διαχείριση των πόρων:

- α. η καύση κάρβουνου σε ατμομηχανές,
- β. η μετάβαση από το κάρβουνο στη χρήση πετρελαίου, δημιουργώντας μεγαλύτερες δυνατότητες μετακίνησης των ανθρώπων,
- γ. η χρήση ηλεκτρισμού, ξεκινώντας μια εποχή κατάλληλη για την εξέλιξη της της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών υπολογιστών (Khan, 2009).

Η αύξηση της βιομηχανίας, σε συνδυασμό με την αστικοποίηση, αύξησε σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις του ανθρώπου. Η κύρια τάση για την παραγωγή ενέργειας μέχρι την πετρελαϊκή κρίση του 1973 ήταν οι γνωστές ως συμβατικές πηγές ενέργειας, στις οποίες συγκαταλέγονται τα ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια. Ωστόσο λόγω των γεγονότων που συνέβησαν εκείνη την περίοδο, η τιμή του πετρελαίου εκτοξεύτηκε σε πρωτοφανή επίπεδα για τότε, δημιουργώντας σοβαρή ενεργειακή κρίση. Τότε ήταν και η πρώτη φορά που τέθηκε το ζήτημα εύρεσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας και αειφόρου ανάπτυξης (Khan, 2009). Σκοπός αυτής της αειφόρου ανάπτυξης είναι να επιτευχθεί μία καλή ποιότητα ζωής των ανθρώπων, διασφαλίζοντας όμως τις οικολογικές διαδικασίες που είναι η βάση για την ευημερία και την ζωή στον πλανήτη. Οι ανανεώσιμες πηγές (Α.Π.Ε) είναι η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η υδροδυναμική ενέργεια και η καύση βιομάζας. Το πλεονέκτημα των ΑΠΕ σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα είναι η μη εκπομπή ρύπων, που επιβαρύνουν το περιβάλλον και συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στην συγκεκριμένη εργασία θα επικεντρωθούμε στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.



### 1.2.2 Μηχανές Παραγωγής Έργου

Οι μηχανές παραγωγής έργου χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

α) Θερμική μηχανή ονομάζεται η διάταξη η οποία μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε μηχανικό έργο, όπως για παράδειγμα οι ατμοστρόβιλοι, οι κινητήρες των αυτοκινήτων κλπ.,

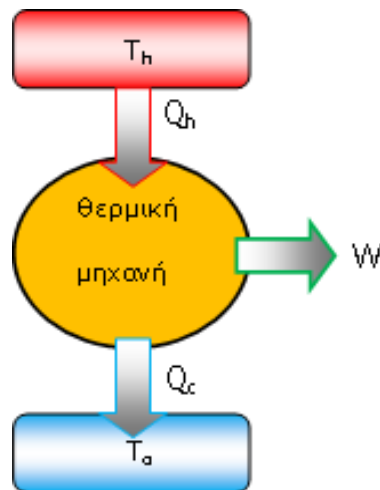
β) Υδραυλική μηχανή ονομάζεται η διάταξη που μετατρέπει την κινητική ενέργεια ενός ρευστού σε μηχανική ενέργεια,

γ) Ηλεκτρική μηχανή ή Ηλεκτροκινητήρας, είναι μια διάταξη η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική με την χρήση ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Στην παρούσα εργασία θα εστιάσουμε στις θερμικές μηχανές για την παραγωγή μηχανικού έργου.

### 1.3 Θερμικές Μηχανές

Η γενική αρχή λειτουργίας των θερμικών μηχανών είναι η μεταφορά ενέργειας από μία πηγή υψηλότερης θερμοκρασίας σε μία πηγή χαμηλότερης με την χρήση ενός εργαζόμενου μέσου. Από αυτή την διαδικασία ένα μέρος της ενέργειας μετατρέπεται με την κατάλληλη διάταξη σε μηχανικό έργο. Στο παρακάτω απλουστευμένο σχήμα (Εικόνα 1.2) εμφανίζεται το διάγραμμα ροής της ενέργειας σε μία θερμική μηχανή.



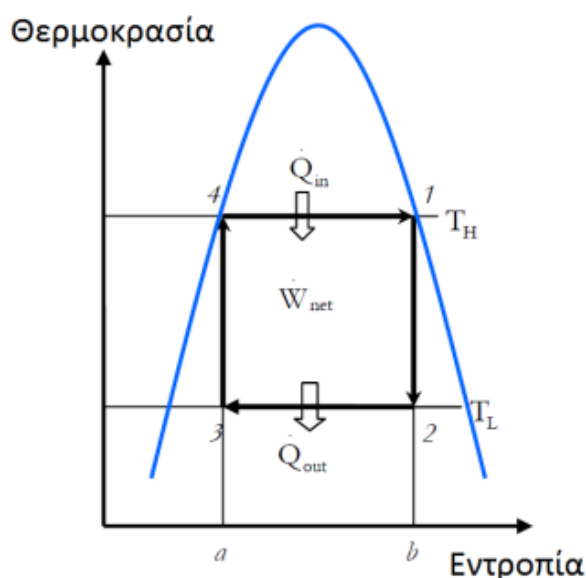
Εικόνα 1.2. Διάγραμμα ροής ενέργειας θερμικών μηχανών

Οι θερμικές μηχανές χωρίζονται στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης και σε Μηχανές Εξωτερικής Καύσης. Για να θεωρηθεί μία μηχανή εσωτερικής καύσης θα πρέπει η πρόσδοση θερμότητας να συμβαίνει στον ίδιο χώρο με την παραγωγή μηχανικού έργου. Αντιθέτως στις μηχανές εξωτερικής καύσης η πρόσδοση θερμότητας και η παραγωγή μηχανικού έργου συμβαίνει σε ξεχωριστό χώρο.

Για την μελέτη των μηχανών αυτών χρησιμοποιούνται οι γνωστοί ως "κύκλοι". Ουσιαστικά κάθε θερμική μηχανή πραγματοποιεί κάποιες θερμοδυναμικές διεργασίες έτσι ώστε να παράγει έργο. Στο τέλος ενός θερμοδυναμικού κύκλου η μηχανή επανέρχεται στην κατάσταση που βρισκόταν πριν ξεκινήσει ο κύκλος αυτός. Ένας κύκλος εξωτερικής καύσης είναι και ο κύκλος Rankine-Clausius, που θα αναπτυχθεί παρακάτω.

#### 1.4 Κύκλος Carnot

Μία θερμική μηχανή είναι και η μηχανή Carnot. Το 1824 ο Γάλλος μηχανικός Sadi Carnot περιέγραψε έναν κύκλο στον οποίον δείχνει τα όρια του θερμικού βαθμού απόδοσης που μπορεί να φτάσει μία θερμική μηχανή όταν λειτουργεί μεταξύ δύο θερμοκρασιών, την  $T_H$  και την  $T_L$ . Ο κύκλος που εκτελεί αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές μεταβολές, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.3 που εμφανίζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 1.3. Θερμοδυναμικό διάγραμμα λειτουργίας της Μηχανής Carnot

Οι διεργασίες του κύκλου αναλυτικότερα έχουν ως εξής:

1-2: Ισεντροπική εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου και ταυτόχρονη παραγωγή έργου

2-3: Ισοθερμοκρασιακή απόρριψη θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο στο μέσο ψύξης

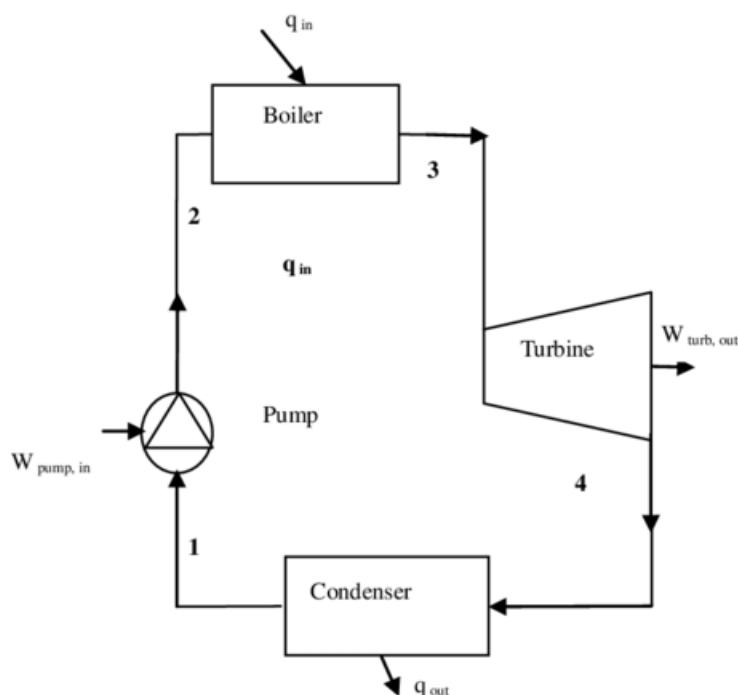
3-4: Ισεντροπική αύξηση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου

4-1: Ισοθερμοκρασιακή πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο από τη πηγή θερμότητας

Οι μεταβολές που πραγματοποιούνται στον κύκλο Carnot είναι αντιστρεπτές. Αντιστρεπτές μεταβολές δεν υπάρχουν στη φύση. Πρόκειται για ιδανικές θεωρητικές κατασκευές, για να μπορούμε να μελετήσουμε ευκολότερα τα φαινόμενα του πραγματικού κόσμου. Εκτός απ' τις ενεργειακές απώλειες, που πάντα έχουμε στα πραγματικά φαινόμενα, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής που συνεπάγεται de facto αύξηση της εντροπίας κάθε συστήματος αποκλείει την ύπαρξη αντιστρεπτών μεταβολών.

## 1.5 Κύκλος Rankine

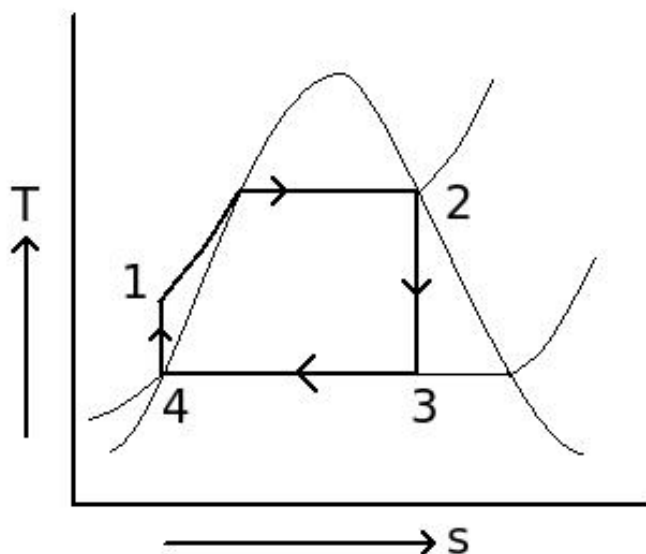
Ο κύκλος Rankine-Clausius ή απλώς Rankine είναι ένας από τους πολλούς κύκλους που έχουν αναπτυχθεί και στο μεγαλύτερο ποσοστό τους χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Nishith B. Desai, 2016). Ο βασικός κύκλος αποτελείται από έναν ατμοποιητή, που προσδίδει την ενέργεια, έναν στρόβιλο εκτόνωσης που παράγει το ωφέλιμο έργο, ένα συμπυκνωτή, ο οποίος απορροφάει θερμότητα από το εργαζόμενο ρευστό και το υγροποιεί και μία αντλία, που ο σκοπός της είναι να ανεβάσει την πίεση στο ρευστό και να δημιουργήσει την κυκλοφορία του. Το πιο συνηθισμένο εργαζόμενο μέσο στους κύκλους Rankine είναι το νερό, για αυτό και ονομάζεται και κύκλος ατμού-νερού. (Bertrand F. Tchanche, 2014). Παρακάτω στην Εικόνα 1.3 φαίνεται και σχηματικά ο βασικός κύκλος Rankine.



Εικόνα 1.3. Σχηματική αναπαράσταση κύκλου Rankine

Ο θεωρητικός κύκλος ατμού-νερού Rankine πραγματοποιεί 4 αντιστρεπτές διεργασίες όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.4. Το διάγραμμα αυτό είναι

θερμοκρασίας- εντροπίας και αποτελεί το βασικότερο διάγραμμα απεικόνισης του κύκλου.



Διάγραμμα 1.4. Διάγραμμα T-s του θεωρητικού κύκλου Rankine

Παρακάτω αναφέρονται οι μεταβολές που φαίνονται στο Διάγραμμα 1:

- Διεργασία 1-2: Ισοβαρής πρόσληψη θερμότητας

Στη διεργασία αυτή το εργαζόμενο μέσο απορροφά θερμότητα από τον λέβητα και αυξάνει την θερμοκρασία του διατηρώντας σταθερή την πίεση.

- Διεργασία 2-3: Ισεντροπική εκτόνωση

Στην διεργασία αυτή το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στον στρόβιλο, εκτονώνεται ισεντροπικά σε χαμηλότερη πίεση, παράγοντας έργο στον άξονα του στροβίλου.

- Διεργασία 3-4: Ισοβαρής απόρριψη θερμότητας

Στην διεργασία αυτή, το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται σε μία διάταξη που ονομάζεται συμπυκνωτής. Εντός του συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο αποβάλλει ενέργεια, έως ότου όλο το νερό να βρίσκεται σε υγρή μορφή. Αυτό συμβαίνει διότι στην επόμενη διεργασία δεν θα πρέπει να κανένα τρόπο να εισέλθει ατμός.

- Διεργασία 4-1: Ισεντροπική συμπίεση

Στην διεργασία αυτή το νερό συμπιέζεται ισεντροπικά σε μεγαλύτερη πίεση μέσω ενός συμπιεστή.

Οι κύκλοι Rankine ατμού έχουν εγκατασταθεί κυρίως σε μεγάλες μονάδες για ηλεκτροπαραγωγή (TCHANCHE, 2010) (Nishith B. Desai, 2016). Το νερό επιλέγεται ως εργαζόμενο μέσο καθώς είναι σε αφθονία στη φύση, είναι φθινό και έχει πολύ καλή χημική σταθερότητα. Επιπλέον έχει χαμηλό ιξώδες και υψηλή

θερμοχωρητικότητα, ιδιότητες που είναι απαραίτητες έτσι ώστε να μπορεί να γίνεται εύκολη μεταφορά και ικανοποιητική μετάδοση θερμότητας από και προς αυτού (TCHANCHE, 2010) (Bertrand F. Tchanche, 2014).

Ωστόσο για την λειτουργία ενός κύκλου Rankine ατμού-νερού χρειάζεται υπερθέρμανση του νερού σε θερμοκρασίες πάνω των 600°C, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει συμπύκνωση του νερού μέσα στον στρόβιλο. Αυτό το φαινόμενο θα δημιουργούσε πρόωρη φθορά στον στρόβιλο (TCHANCHE, 2010). Για την εκμετάλλευση των ήπιων μορφών στην παραγωγή ενέργειας θα έπρεπε το νερό να αντικατασταθεί με ένα άλλο εργαζόμενο μέσο χαμηλότερης θερμοκρασίας αεριοποίησης, με σκοπό ο κύκλος να μπορεί να λειτουργήσει σε μικρότερα εύρη θερμοκρασίας. Μία καλή πηγή θερμότητας για τους οργανικούς κύκλους Rankine είναι και η ηλιακή ενέργεια. Για την εκμετάλλευση αυτής απαιτείται ένα υποκύκλωμα ρευστού που θα μεταφέρει την θερμότητα από έναν ηλιακό θερμικό συλλέκτη, που θα αναλυθεί παρακάτω, στον ατμοποιητή του οργανικού κύκλου.

### 1.5.1 Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται επιστημονική διερεύνηση στους ηλιοβοηθούμενους οργανικούς κύκλους Rankine, με μεγαλύτερη εστίαση στα συστήματα μικρής κλίμακας, από 1 ως μερικά kW, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός της εργασίας είναι η διεξαγωγή ανασκόπησης και ανάλυση στην υπάρχουσα επιστημονική βιβλιογραφία, με στόχο να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η τεχνολογία αλλά και μελλοντικές τάσεις που μπορεί να ακολουθήσει. Επιπλέον γίνεται αναζήτηση των βασικών εξαρτημάτων που αποτελούν του Ηλιοβοηθούμενους ORC και γίνεται προσπάθεια να αναλυθούν, με στόχο να βρεθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας και τις τοπολογίες που ενδεχομένως να έχουν μεγαλύτερη απόδοση, τόσο ενεργειακά όσο και εξεργειακά. Επίσης βασικός στόχος είναι η ανάλυση των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιούνται στον οργανικό κύκλο, αλλά και άλλα ρευστά που μπορεί να εργάζονται σε δευτερεύοντα συστήματα για την λειτουργία του SORC. Τελικός στόχος της εργασίας αυτής είναι τα δεδομένα να συλλεχθούν σε πίνακες και να εξάγουμε αποτελέσματα τόσο για τα οργανικά ρευστά αλλά και την ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση των συστημάτων αυτών.

## 1.6 Σύνοψη Κεφαλαίων

[Κεφάλαιο 1ο](#): Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή στην εργασία θέτοντας το περιβαλλοντικό πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής και εστιάζοντας στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

[Κεφάλαιο 2ο](#) : Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζετε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε Όπου ως στόχο είναι την διερεύνηση, καταγραφή και ανάλυση των τις υπάρχουσας επιστημονικής βιβλιογραφίας.

[Κεφάλαιο 3ο](#) : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση των οργανικών κύκλων και θα παρουσιαστούν οι τοπολογίες που εμφανίζονται στους Ηλιοβοηθούμενους Οργανικούς Κύκλους Rankine αλλά και η σύγκριση τους με τους Κύκλους Ατμού-Νερού.

[Κεφάλαιο 4ο](#) : Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσιαστούν όλες οι τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που έχει η κάθε τεχνολογία αλλά και τις τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας τους.

[Κεφάλαιο 5ο](#) : Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στους εκτονωτές των οργανικών κύκλων Rankine. Παρουσιάζονται όλοι οι τύποι που αναφέρονται στην βιβλιογραφία και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε τύπου.

[Κεφάλαιο 6ο](#) : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανασκόπηση των ρευστών που εργάζονται σε έναν SORC. Αναλύονται και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την χρήση τους στα συστήματα. Επίσης αναλύονται τα κριτήρια για τη επιλογή του βέλτιστου ρευστού.

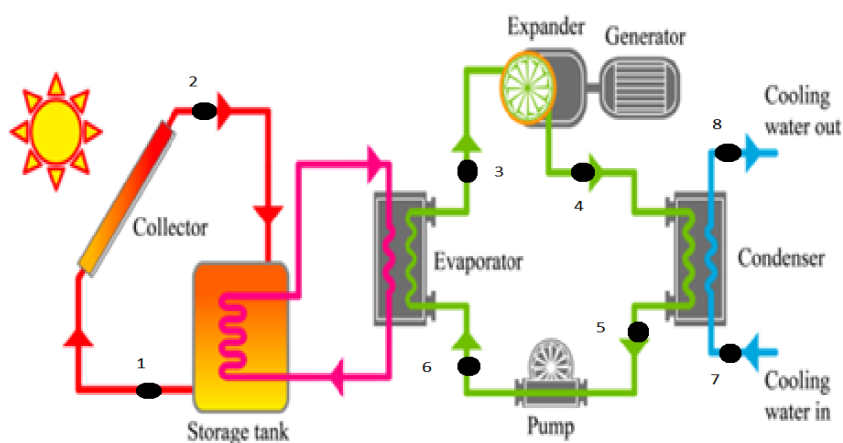
[Κεφάλαιο 7ο και 8ο](#) : Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανασκόπηση των Ηλιοβοηθούμενων Οργανικών Κύκλων Rankine (SORC). Τα συστήματα χωρίζονται σε εξομοιωτικά, πειραματικά και πραγματικά και διαμορφώνεται πίνακες με ιδιότητες κάθε συστήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού εξάγονται συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των SORC, τα οργανικά ρευστά και τους τύπους συλλέκτες που χρησιμοποιούνται περισσότερο αλλά και τις τοπολογίες που εμφανίζονται στην βιβλιογραφία.

[Κεφάλαιο 9ο](#) : Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος που πραγματοποιείται μία εξεργειακή ανάλυση ενός SORC και εξάγονται συμπεράσματα για την καταστροφή εξέργειας που πραγματοποιείται σε κάθε εξάρτημα ενός SORC.

[Κεφάλαιο 10ο](#) : Το κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνει όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην εργασία και απαντώνται οι στόχοι που είχαν τεθεί στην αρχή της εργασίας. Επιπλέον εξάγονται συμπεράσματα για επιπλέον ερωτήματα που προέκυψαν κατά την διάρκεια της εργασίας.

## 2 Μεθοδολογία

Για την απάντηση επί των ερευνητικών ερωτήσεων που δημιουργήθηκαν κατά την εμβάθυνση στο αντικείμενο των ηλιακών ORC, αναπτύχθηκε μία συγκεκριμένη μεθοδολογία. Αρχικά βρέθηκαν, μελετήθηκαν και καταγράφηκαν όλα τα επιστημονικά αλλά και μη επιστημονικά άρθρα και βιβλία σχετικά με τους SORC. Από την καταγραφή και αποδελτίωση του υλικού σε πρώτη φάση αναζητήθηκαν οι τοπολογίες που εμφανίζονται σε τέτοια συστήματα και τα εξαρτήματα που τα αποτελούν. Σε πρώτο στάδιο έγινε έρευνα στα βασικότερα στοιχεία ενός συστήματος SORC. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 τα βασικά μέρη ενός SORC είναι ο συλλέκτης, ο ατμοποιητής, ο εκτονωτής, ο συμπυκνωτής, και η αντλία κυκλοφορίας του ρευστού. Επιπλέον υπάρχουν τρία είδη ρευστών που εργάζονται στο σύστημα. Αρχικά είναι το ρευστό του κυκλώματος του ηλιακού θερμικού συλλέκτη (κόκκινο χρώμα), το εργαζόμενο μέσο που κυκλοφορεί στον οργανικό κύκλο (πράσινο χρώμα) και το ρευστό ψύξης (μπλε χρώμα).



Εικόνα 2.1. Τυπικό σχηματικό διάγραμμα SORC

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στον ηλιακό συλλέκτη (Collector). Το ψυχρό θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στο σύστημα του συλλέκτη διέρχεται μέσα από αυτόν, θερμαίνεται και στην συνέχεια αποθηκεύεται στην θερμική δεξαμενή (storage tank). Μέσω αντλίας το θερμό μέσο κυκλοφορείται στο κύκλωμα και περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας (ατμοποιητή - evaporator). Το οργανικό μέσο θερμαίνεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και ατμοποιείται. Στην συνέχεια οδηγείται στον εκτονωτή (expander), όπου και αποβάλλει ενέργεια για την παραγωγή έργου στην έξοδο της ατράκτου του εκτονωτή, παράγοντας ηλεκτρισμό σε μία γεννήτρια (generator). Εφόσον το οργανικό μέσο φύγει από τον εκτονωτή οδηγείται στον συμπυκνωτή (condenser) όπου αλλάζει φυσική φάση από αέριο σε υγρό αποβάλλοντας θερμότητα. Έπειτα το ρευστό εισέρχεται σε μία αντλία (pump) ή οποία εξαναγκάζει το ρευστό να κυκλοφορείται μέσα στο σύστημα και έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος.

Για τον ηλιακό συλλέκτη έγινε μία κατηγοριοποίηση με βάση την ύπαρξη ή όχι ηλιοστάτη στον συλλέκτη, δηλαδή συσκευή προσανατολισμού ανάλογα με την θέση του ηλίου. Με βάση αυτό αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του κάθε τύπου συλλέκτη και εξήχθησαν συμπεράσματα για την αποδοτικότητα και το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους. Για τους εκτονωτές έγινε κατηγοριοποίηση ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους και έτσι αναλύθηκαν τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους και τα πλεονεκτήματα του κάθε τύπου για χρήση σε οργανικούς κύκλους Rankine. Τα οργανικά ρευστά κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με την χημικούς τους σύσταση. Σε δεύτερο στάδιο αναζητήθηκαν εξομοιωτικά, πειραματικά και εφαρμοσμένα συστήματα. Δημιουργήθηκαν πίνακες που παρουσιάζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση και τα οργανικά ρευστά που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε έρευνα. Σε αυτά πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση και εξήχθησαν συμπεράσματα για τις τοπολογίες που χρησιμοποιούνται, τους συλλέκτες και τα πιο αποδοτικά εργαζόμενα μέσα. Στην συνέχεια γίνεται μία ενεργειακή και εξεργειακή αξιολόγηση των ηλιοβοηθούμενων οργανικών κύκλων Rankine, αντλώντας στοιχεία από την ανασκόπηση που έγινε παραπάνω. Έπειτα έγινε μία διερεύνηση του τρόπου που διεξάγεται μία εξεργειακή ανάλυση και στην συνέχεια αναζητήθηκαν στοιχεία για την καταστροφή εξεργειας που προκαλείται στα συστήματα αυτά. Μέσα από την αναζήτηση αυτή βρέθηκαν και παρουσιάστηκαν αποτελέσματα σε μορφή πίνακα. Τέλος, γίνεται μία συνολική συγκέντρωση των αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα σημεία και ευρήματα της εργασίας.



### 3 Οργανικοί κύκλοι και η θερμοδυναμική τους ανάλυση

#### 3.1 Σύγκριση ORC με Κύκλο ατμού-νερού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο κύκλος ατμού-νερού απαιτεί θερμοκρασίες άνω των 600°C διότι πρέπει να γίνει παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Για την παραγωγή ενέργειας με την χρήση ανανεώσιμων πηγών οι θερμοκρασίες αυτές είναι δύσκολο να επιτευχθούν. Το πρόβλημα εξαλείφεται αν αντί για νερό χρησιμοποιήσουμε ένα οργανικό ρευστό. Αυτά τα ρευστά είναι κατάλληλα για αξιοποίηση ενέργειας σε χαμηλή θερμοκρασία από τους 80 ως τους 300 °C (Bertrand F. Tchanche, 2014).

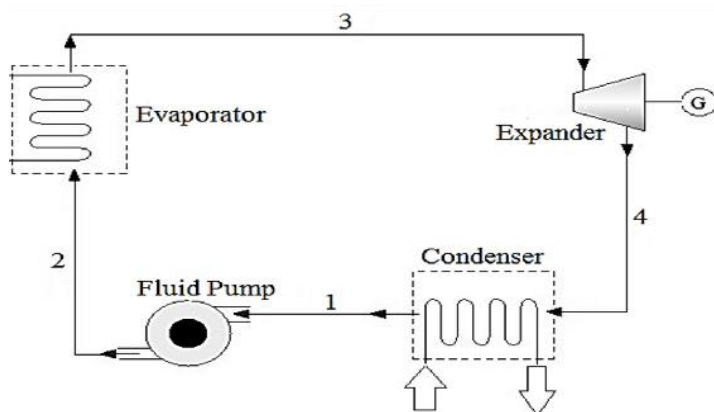
Οι κύκλοι Rankine με οργανικό μέσο δεν διαφέρουν σε σχέση με τους κύκλους ατμού-νερού Rankine, παρά μόνο στο εργαζόμενο μέσο (James Freeman, 2015) (A. Schuster, 2009). Τα βασικά πλεονεκτήματα των ORC σε σχέση με τους συμβατικούς είναι (Bertrand F. Tchanche, 2014), (Usman Muhammad, 2015):

1. Η ικανότητα προσαρμογής σε διαφορετικές πηγές ενέργειας. Μπορεί να γίνει χρήση και συμβατικών καυσίμων και ήπιων μορφών ενέργειας,
2. Φθηνότερη μηχανολογική εγκατάσταση και μικρότερα κόστη συντήρησης, λόγω χαμηλότερων πιέσεων και θερμοκρασιών λειτουργίας,
3. Οικολογικό και φιλικό προς το περιβάλλον,
4. Αυτοματοποιημένη λειτουργία, χωρίς την επίβλεψη μηχανικού,
5. Ωριμη τεχνολογία με εφαρμογές στην βιομηχανία,
6. Πιθανή δυνατότητα για χρήση σε μικρή κλίμακα,
7. Χρήση για ανάκτηση ενέργειας από καυσαέρια και θερμά ρεύματα στην βιομηχανία και στην ηλεκτροπαραγωγή σε θερμοκρασίες κάτω των 100°C.

Τα οργανικά ρευστά έχουν μοριακό βάρος υψηλότερο του νερού, επομένως για τον ίδιο εκτονωτή και συνεπώς την ίδια παροχή όγκου, το οργανικό μέσο έχει αυξημένη παροχή μάζας, με αποτέλεσμα να έχουμε και αυξημένο θερμικό βαθμό απόδοσης (Pammi Raj Gurta, 2022). Από την άλλη πλευρά τα οργανικά ρευστά έχουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς, είναι πιο επικίνδυνα στην χρήση τους (εύφλεκτα, τοξικά) και λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση το νερό. Επιπλέον, υπάρχουν οργανικά ρευστά που παρουσιάζουν χειρότερες ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας με συνέπεια την χρήση μεγαλύτερων εναλλακτών θερμότητας σε σύγκριση με τα συστήματα ατμού- νερού. Επίσης το υψηλότερο ιξώδες στην υγρή κατάσταση των οργανικών ρευστών δημιουργεί ανάγκη για μεγαλύτερες αντλίες, αυξάνοντας τις ανάγκες ενέργειας για μεταφορά του ρευστού.

Οι ORC έχουν αναπτυχθεί κυρίως στην Ευρώπη, τις ΗΠΑ, την Κίνα και την Ιαπωνία. Υπάρχει μία πληθώρα εταιριών που απασχολείται στον τομέα αυτό για διάφορες βιομηχανικές χρήσεις (Thomas Tartière, 2017).

Ένας βασικός ORC απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1. Σε αυτόν παρατηρούμε ότι αποτελείται από έναν συμπυκνωτή, μία αντλία, έναν αεριοποιητή, και έναν εκτονωτή. Σκοπός του αεριοποιητή είναι να αυξηθεί η ενθαλπία του οργανικού μέσου και να παραχθεί υπέρθερμο ρευστό. Μετά το ρευστό θα οδηγηθεί στον εκτονωτή για την παραγωγή έργου, μειώνοντας σημαντικά την πίεση του. Έπειτα το ρευστό εισέρχεται στον συμπυκνωτή που γίνεται απαγωγή θερμότητας και το ρευστό στην έξοδο του είναι κορεσμένο υγρό. Το υγρό περνάει από την αντλία, αυξάνεται η πίεση του και στην συνέχεια εισέρχεται στον αεριοποιητή έτσι ώστε να ολοκληρωθεί ο κύκλος.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα απλού Οργανικού κύκλου

Ανάλογα με το ρευστό που θα χρησιμοποιηθεί και την τοπολογία του συστήματος, ο κύκλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιοποίηση διάφορων πηγών ενέργειας, όπως της γεωθερμίας, την ηλιακής ενέργειας, της θερμότητας από καύση βιομάζας και την ανάκτηση ενέργειας από βιομηχανικά θερμά ρεύματα (Bertrand F. Tchanche, 2014). Στην εργασία αυτή γίνεται λόγος για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ενέργειας.

### 3.2 Ηλιοβοηθούμενοι Οργανικοί κύκλοι Rankine

Για την παραγωγή ενέργειας από την αξιοποίηση του Ηλίου υπάρχουν δύο τεχνολογίες, τα θερμικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται για την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα θερμικά συστήματα χρησιμοποιούνται για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για διάφορες χρήσεις, όπως θέρμανση και αφαλάτωση νερού (Evangelisti, et al., 2019). Στα θερμικά συστήματα η ηλεκτροπαραγωγή δεν γίνεται άμεσα με ένα σύστημα αλλά με συνδυασμό κύκλων, έτσι ώστε να μετατραπεί αρχικά η ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα και έπειτα σε ηλεκτρισμό σε μία θερμική μηχανή. Για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα χρησιμοποιούνται ηλιακοί συλλέκτες.

Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: του συγκεντρωτικούς και τους μη συγκεντρωτικούς. Παρακάτω θα γίνει αναλυτική ανασκόπηση των τεχνολογιών και των εφαρμογών που έχουν σε σχέση με τους οργανικούς κύκλους.

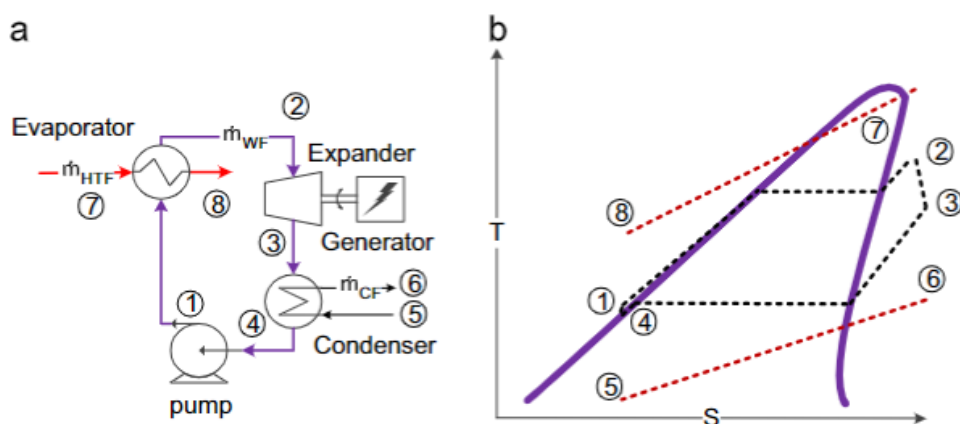
Στο παρελθόν έχουν ξεκινήσει προσπάθειες, που συνεχίζονται μέχρι σήμερα, ώστε να βρεθούν μέθοδοι για ηλεκτροπαραγωγή από πηγές χαμηλής θερμότητας, όπως ο κύκλος Kalina (Hadi Ghaebi, 2020), ο κύκλος Goswami (Saygaadi, 2020), ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) και ο κύκλος Stirling (Jing Li, 2016). Ο οργανικός κύκλος Rankine χρησιμοποιείται ευρέως και είναι οικονομικά συμφέρον τρόπος για την ηλεκτροπαραγωγή από ηλιακή ενέργεια (Christos Tzivanidis, 2016). Φαίνεται να είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την θερμότητα ενός ηλιακού συλλέκτη σε σχετικά μικρές προς μεσαίες θερμοκρασίες ως 400 °C (Pammi Raj Gupta, 2022).

### 3.3 Τοπολογίες οργανικού κύκλου Rankine

Εκτός από τον βασικό οργανικό κύκλο, στην βιβλιογραφία εμφανίζονται και άλλες αρχιτεκτονικές με σκοπό να αυξήσουν την ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος. Οι βασικότερες τοπολογίες παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 3.3.1 Οργανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση

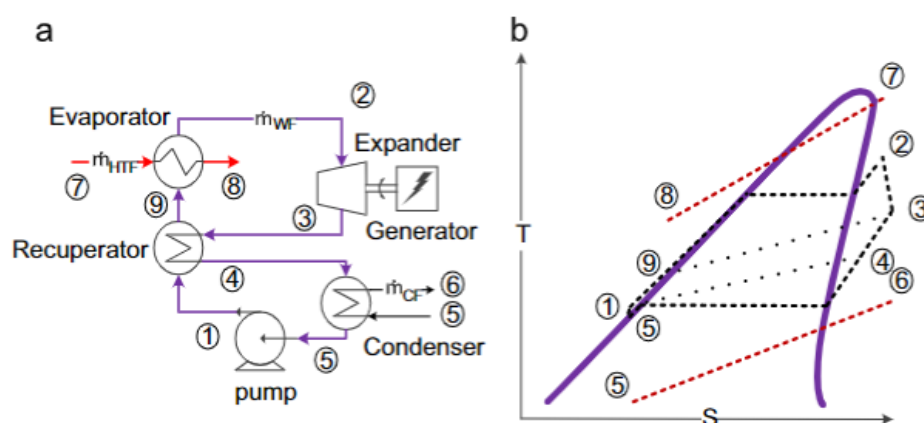
Στην βιβλιογραφία μια από τις επικρατέστερες τεχνολογίες για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και την μετατροπή της σε ηλεκτρισμό είναι ο υποκρίσιμος ORC (SCORC), που σημαίνει ότι ο κύκλος λειτουργεί κάτω από το κρίσιμο σημείο του εκάστοτε εργαζόμενου μέσου. Το σχηματικό και λειτουργικό του διάγραμμα εμφανίζεται στην Εικόνα 3.2. Ο ORC με υπερθέρμανση αποτελείται από μία αντλία, η οποία συμπιέζει το εργαζόμενο μέσο και το μεταφέρει στον ατμοποιητή. Στον ατμοποιητή το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται ως το σημείο του κορεσμένου ή υπέρθερμου ατμού. Στην συνέχεια το εργαζόμενο μέσο εκτονώνεται σε έναν εκτονωτή παράγοντας μηχανικό έργο. Στον άξονα του εκτονωτή είναι τοποθετημένη μία γεννήτρια και με αυτόν τον τρόπο παράγεται ηλεκτρισμός. Μετά την έξοδο από τον εκτονωτή το ρευστό εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Εκεί το ρευστό απάγει θερμότητα μέχρι να γίνει κορεσμένο υγρό. Από εκεί οδηγείται στην αντλία και έτσι κλείνει ο κύκλος. Η πηγή θερμότητας και το κύκλωμα ψύξης εμφανίζονται στο διάγραμμα ως ευθείες (7)-(8) και (5)-(6).



Εικόνα 3.2. Υποκρίσιμος ORC

### 3.3.2 Οργανικός κύκλος Rankine με ανάκτηση

Πολλοί συγγραφείς έχουν προτείνει την χρήση μίας συσκευής ανάκτησης για την επαναχρησιμοποίηση της θερμότητας που ρευστού μετά τον εκτονωτή για την προθέρμανση του οργανικού μέσου. Στην Εικόνα 3.3 εμφανίζεται το λειτουργικό και σχηματικό διάγραμμα αυτής της τεχνολογίας. Ένας ανακτητής θερμότητας αυξάνει της θερμική απόδοση, μειώνοντας την απορριπτόμενη θερμότητα στον συμπυκνωτή (B. Saleh, 2007). Για να μπορεί να εγκατασταθεί ένας ανακτητής θερμότητας σε οργανικό κύκλο θα πρέπει το εργαζόμενο μέσο μετά τον εκτονωτή να είναι σε υπέρθερμη κατάσταση, για αυτό και η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για ξηρά οργανικά ρευστά, όπου όπως θα δούμε αργότερα έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία βρασμού (Steven Lecompte, 2015).

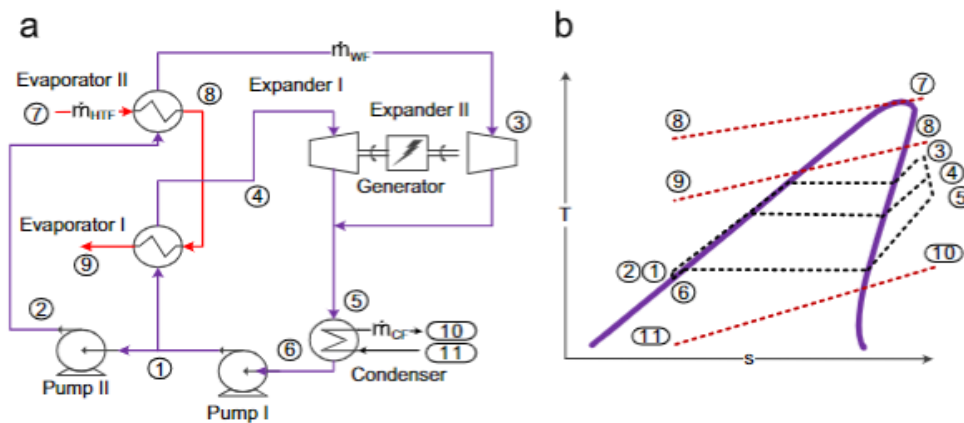


Εικόνα 3.3. ORC με ανάκτηση

### 3.3.3 Αναγεννητικός Οργανικός κύκλος Rankine

Οι ORC που χρησιμοποιούν αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου συνήθως ορίζονται ως αναγεννητικοί κύκλοι. Ένα λειτουργικό διάγραμμα και μία σχηματική απεικόνιση εμφανίζονται στην Εικόνα 3.4. Σε έρευνα που διεξήχθη από τον Pedro Mago (P.J. Mago, 2008), που σύγκρινε τον αναγεννητικό με τον απλό οργανικό κύκλο, έδειξε ότι ο αναγεννητικός ORC έχει μεγαλύτερη θερμική απόδοση και λιγότερη αντιστρεψιμότητα. Ωστόσο το διευκρίνισε ότι το ποσοστό της διαφοράς απόδοσης εξαρτάται πολύ από το εργαζόμενο μέσο που μελετάται. Για μερικά ρευστά, όπως το R245ca, η διαφορά απόδοσης είναι αμελητέα, ενώ σε άλλα, όπως το R123 η διαφορά μπορούσε να φτάσει το 5%.

Σε παρόμοια έρευνα του Pei (G. Pei, 2010), αναλύθηκε ένας ηλιοβοηθούμενος αναγεννητικός ORC χαμηλών θερμοκρασιών. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μία βέλτιστη θερμοκρασία εισαγωγής θερμότητας όπου ο ORC έχει μέγιστη θερμική απόδοση. Αυτή η απόδοση είναι 9% υψηλότερη για τον αναγεννητικό κύκλο



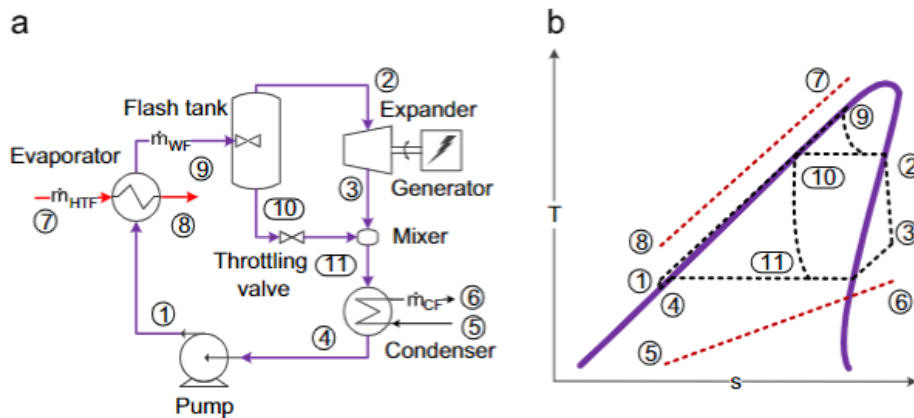
Εικόνα 3.4. Αναγεννητικός ORC

### 3.3.4 Οργανικός Κύκλος Διαχωρισμού (Flash Cycle)

Στην τοπολογία αυτή το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στον ατμοποιητή και εξερχόμενο απορροφά ενέργεια μέχρι την κατάσταση του κορεσμένου ατμού. Το κορεσμένο ρευστό εκτονώνεται στη βαλβίδα διαχωρισμού και διαχωρίζεται σε κεκορεσμένο υγρό και κορεσμένο ατμό στο δοχείο διαχωρισμού (flash tank). Από εκεί ο κορεσμένος ατμός εισέρχεται στον εκτονωτή και παράγει μηχανικό έργο που οδηγείται στην γεννήτρια. Στο κορεσμένο υγρό μειώνεται η πίεση μέσω στραγγαλιστικής βαλβίδας και αναμειγνύεται με την έξοδο του εκτονωτή. Στην συνέχεια το ρευστό περνάει από τον συμπυκνωτή και από την αντλία για να αυξηθεί η πίεση για να οδηγηθεί στον ατμοποιητή και έτσι να κλείσει ο κύκλος. Το διάγραμμα T-s του κύκλου αυτού αλλά και η σχηματική απεικόνιση εμφανίζονται στην Εικόνα 3.5.

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτής της τεχνολογίας ανάλογα τις απαιτήσεις και το κόστος (Arash Nemat, 2018). Για υγρά οργανικά ρευστά θα πρέπει να υπάρχουν ειδικής κατασκευής εκτονωτές με ενισχυμένα υλικά για να αποφεύγεται η φθορά του από το ρευστό. Αυτό θα προκαλούσε άνοδο του κόστους αλλά και σχετικά μειωμένη απόδοση. (Steven Lecompte, 2015).

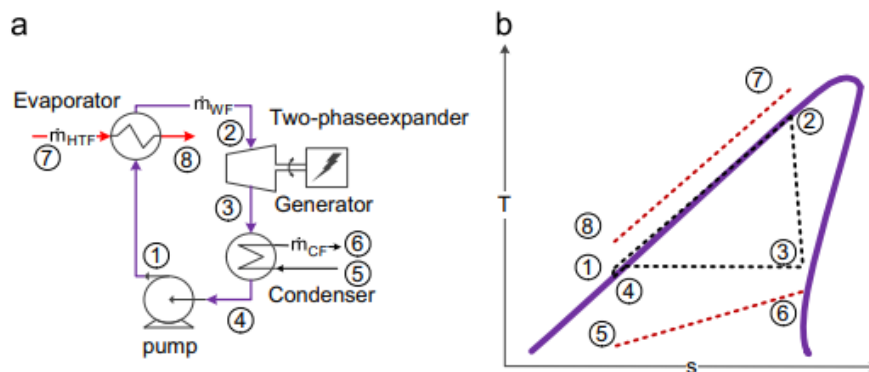
Μια παραλλαγή που εμφανίζεται στους Οργανικούς κύκλους Διαχωρισμού είναι η διάταξη expander-Flash ORC. Στη τοπολογία αυτή η βαλβίδα πριν την Flash Tank αντικαθίσταται από έναν εκτονωτή, που παράγει και αυτός μηχανικό έργο. Επίσης έχουν εμφανιστεί διατάξεις με δύο εκτονωτές και με περισσότερες δεξαμενές Flash.



Εικόνα 3.5. Οργανικός Κύκλος Flash

### 3.3.5 Τριμερής Οργανικός κύκλος

Ο τριγωνικός οργανικός κύκλος πήρε το όνομα του από το λειτουργικό διάγραμμα T-s, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Το σχηματικό διάγραμμα μοιάζει με τον βασικό ORC αλλά με την διαφορά ότι το ρευστό στον εκτονωτή δεν είναι κορεσμένος ατμός αλλά υπάρχουν και οι δύο φάσεις του ρευστού. Στον συγκεκριμένο τύπο οργανικού κύκλου το μειονέκτημα είναι η δυσκολία για την εύρεση διφασικού εκτονωτή με υψηλή ισεντροπική απόδοση. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω της καλύτερης αντιστοίχισης μεταξύ του εργαζόμενου ρευστού και της πηγής θερμότητας (Steven Lecompte, 2015).

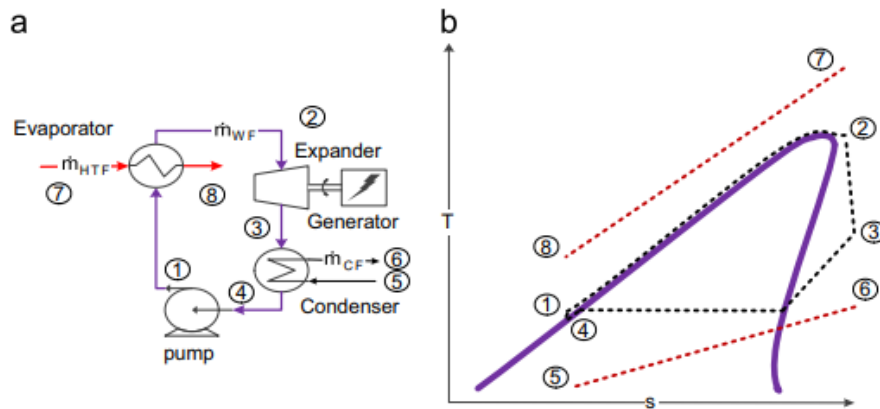


Εικόνα 3.6. Trilateral (triangular) cycle (TLC)

### 3.3.6 Κρίσιμος Οργανικός κύκλος Rankine (TCORC)

Η διαφορά ενός κρίσιμου οργανικού κύκλου (TCORC) από τον υπόκρισιμο έγκειται στην διαδικασία θέρμανσης του εργαζόμενου μέσου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.7, το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται και θερμαίνεται πάνω από την κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία, ξεπερνώντας ουσιαστικά την περιοχή των δύο φάσεων. Σύμφωνα με τον A. Schuster (Schuster A, 2010) στον TCORC έχουμε

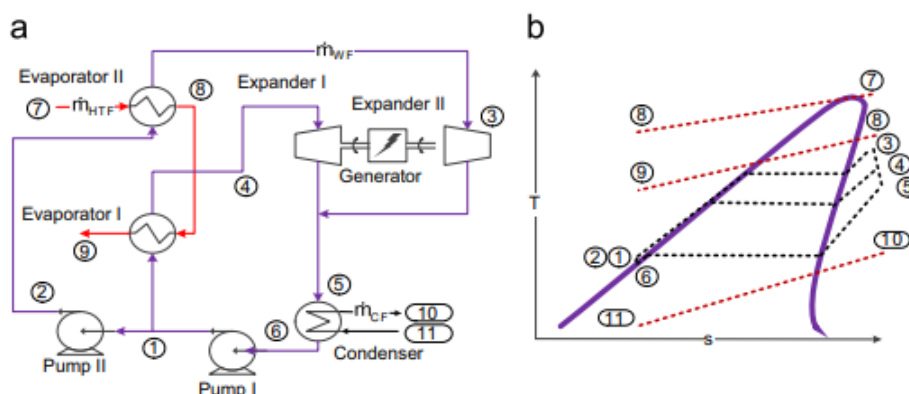
αυξημένη απόδοση σε σχέση με τον βασικό ORC λόγω της καλύτερης μεταφοράς θερμότητας από την πηγή στο εργαζόμενο μέσο.



Εικόνα 3.7. Υπερκρίσιμος ORC

### 3.3.7 Οργανικός κύκλος Rankine με πολλαπλές πιέσεις εξατμίσης (MP ORC)

Ένας τρόπος για να μειωθούν οι αντιστρεψιμότητες στην μετάδοση της θερμότητας για μία πεπερασμένη διαφορά θερμοκρασίας είναι να χωριστεί ο οργανικός κύκλος σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης (Jackson JD, 1975). Μία τοπολογία που εμφανίζεται στους ORC είναι ο κύκλος με δύο επίπεδα πίεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Επομένως έχουμε μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας στον κύκλο και καλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης (Steven Lecomppte, 2015). Σε σύγκριση με τον απλό ORC ο MP ORC εμφανίζει μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης, αλλά και αυξημένη ισχύς εξόδου σε θερμοκρασίες από 80 ως 200 °C (Becquin G, 2012). Ωστόσο για να επιτευχθεί διαφοροποίηση των πιέσεων μέσα στον κύκλο χρειάζεται μία περίπλοκη εγκατάσταση με δύο εκτονωτές, δύο αντλίες και μεγαλύτερη επιφάνεια μετάδοσης θερμότητας. Αυτό προκαλεί αυξημένο κόστος εγκατάστασης αλλά και μεγαλύτερη ισχύς εξόδου του ORC (Steven Lecomppte, 2015).



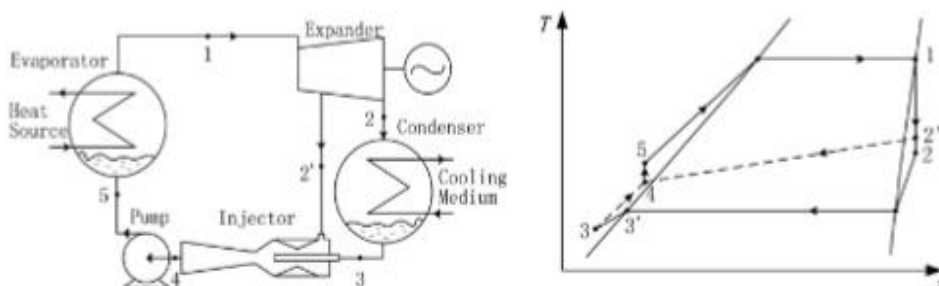
Εικόνα 3.8. ORC με δύο επίπεδα πίεσης

### 3.3.8 Εγχυτήρες ατμού, αναθερμαντήρες και αλληλουχίες Οργανικών κύκλων Rankine

Στην βιβλιογραφία εμφανίζονται και άλλες αρχιτεκτονικές ORC, οι οποίες όμως δεν εμφανίζονται συχνά και δεν έχουν διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό ακόμα. Οπότε παρακάτω θα αναλυθούν κάποιες πιο σπάνιες τοπολογίες.

Στην δημοσίευση του Rong-Ji Xu το 2011 προτάθηκε ένας ORC με εγχυτήρα ατμού. Στην έρευνα του, χρησιμοποιήθηκε το ρευστό R123. Ο κύκλος αποτελείται από τα γνωστά εξαρτήματα του βασικού ORC, με την προσθήκη απομάστευσης και ψεκαστήρα ατμού. Από τον εκτονωτή απομαστεύεται ατμός και κατευθύνεται στον ψεκαστήρα. Το οργανικό μέσο από τον συμπυκνωτή όταν εισέρχεται στον εγχυτήρα αυξάνεται η πίεση και η θερμοκρασία του. Τα αποτελέσματα που εξήγαγε ο ερευνητής είναι ότι ο Αναγεννητικός ORC με εγχυτήρα έχει αυξημένο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τον βασικό ORC, αν η θερμοκρασία εξόδου από τον εκτονωτή είναι λιγότερη από 390 kPa.

Μία άλλη τεχνολογία αναπτύχθηκε σε ηλιακούς συλλέκτες σε συνδυασμό ORC με αναθέρμανση από τους Price και Hassani (Price H., 2002). Στην Εικόνα 3.9 εμφανίζεται το σχεδιαστικό και λειτουργικό διάγραμμα της τεχνολογίας αυτής. Στην έρευνα αυτή προσδιορίστηκε ότι το σύστημα αυτό έχει λίγο μεγαλύτερο θερμικό βαθμό απόδοσης από ότι η χρήση βασικού ORC. Ωστόσο το κόστος για έναν ORC με αναθερμαντήρα είναι σχετικά υψηλότερο, γιατί υπάρχει ανάγκη για εκτονωτή υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας και πρόσθετη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Όμως οι συγγραφείς δεν απέκλεισαν την τεχνολογία αυτήν ως μία βιώσιμη εναλλακτική.



Εικόνα 3.9. Αναγεννητικός ORC με έκχυση

Μία άλλη διάταξη που εμφανίζεται είναι ο συνδυασμός παραπάνω από ενός ORC σε σειρά. Σε αυτό το σύστημα κάθε ORC αποτελεί διαφορετικό στάδιο. Σε αντίθεση με τον βασικό ORC, ο συμπυκνωτής του ενός ORC είναι ο ατμοποιητής του άλλου. Είναι προφανές ότι ο κάθε κύκλος θα λειτουργεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις, επομένως χρειάζεται ξεχωριστή ανάλυση και βελτιστοποίηση ως προς τα εξαρτήματα του και τα εργαζόμενα μέσα που θα χρησιμοποιηθούν. Στην έρευνα που πραγματοποίησαν οι ερευνητές G. Kosmadakis, D. Manolacos, S. Kyritsis, G.



Paradakis σε ένα σύστημα SORC για αφαλάτωση νερού, βρέθηκε ότι αυτή η διάταξη έχει αυξημένο θερμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τον βασικό ORC, αυξημένη κατά 75% την παραγωγή αφαλατωμένου νερού αλλά έχει 60% μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

Οι Ηλιακοί Οργανικοί Κύκλοι Rankine (SORC) έχουν πολλές εφαρμογές τόσο για ηλεκτροπαραγωγή αλλά και πολυπαραγωγή. Για την πολυπαραγωγή σε SORC έχουν γνωστοποιηθεί και αναγνωριστεί έξι εφαρμογές (ξηράνση, ψύξη, θέρμανση, ηλεκτροπαραγωγή, αφαλάτωση και παραγωγή υδρογόνου) (Pammi Raj Gurta, 2022).

## 4 Ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες

Σε αυτό το κεφάλαιο διεξάγεται μία σύντομη ανασκόπηση στην υπάρχουσα τεχνολογία ηλιακών συλλεκτών.

### 4.1 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία εκφράζεται σε ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ( $W/m^2$ ) που παραλαμβάνει η Γη από τον Ήλιο σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια, ένα μέρος την ενέργειας απορροφάτε από αυτήν, με αποτέλεσμα η εσωτερική ενέργεια του σώματος να αυξηθεί και η υπόλοιπη ενέργεια αντανακλάτε πίσω στο περιβάλλον.

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές, όπως την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας, την πρόγνωση του καιρού και την κλιματική μοντελοποίηση μία περιοχής (Yong Zhou, 2021).

Όμως μόνο ένα μέρος της ολικής ποσότητας ενέργειας που εκπέμπονται από τον ήλιο φτάνει στην επιφάνεια της Γη. Αυτό οφείλεται στην ατμόσφαιρα η οποία αντανακλά ένα μέρος της αλλά και σε άλλα αστρονομικά φαινόμενα. (Ορέστης, 2019).

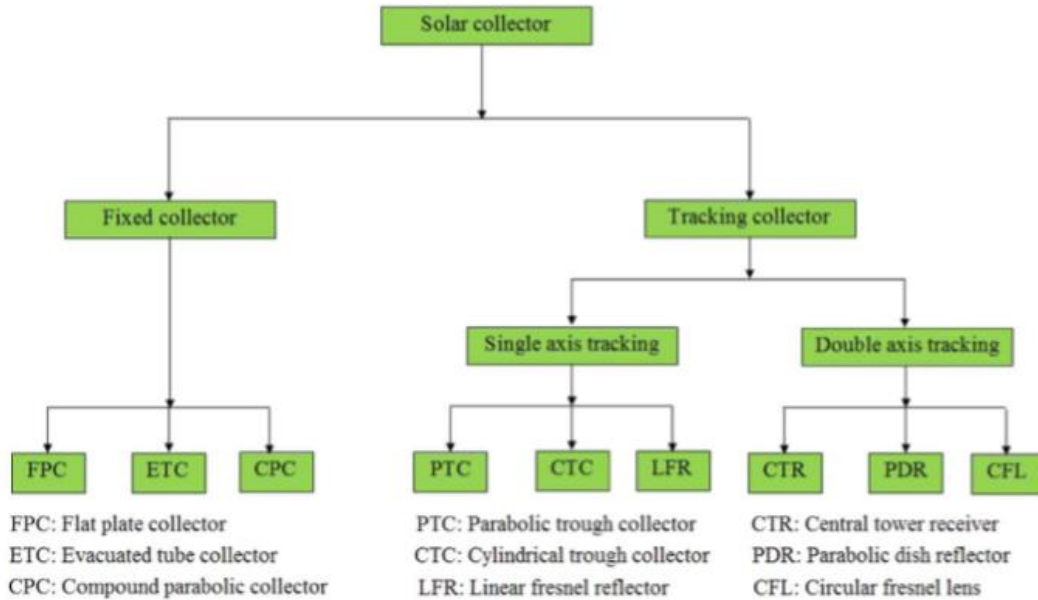
Η ολική ακτινοβολία που δέχονται όλα τα σώματα είναι ο συνδυασμός της άμεσης, της διάχυτης ακτινοβολίας. Η άμεση ακτινοβολία είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που φθάνουν στη Γη απευθείας από τον Ήλιο, χωρίς να έχουν υποστεί διάχυση μέσα στην ατμόσφαιρα. Όταν ο ουρανός είναι καθαρός, περίπου το 80% της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι άμεση. Ταυτόχρονα ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας υπόκειται σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα και φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους ως διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος είτε ανακλάται είτε απορροφάται από αυτό. Στην μία περίπτωση έχουμε ανακλώμενη ακτινοβολία. Στην δεύτερη περίπτωση, η επιφάνεια του εδάφους θερμαίνεται και εκπέμπει, με τη σειρά της, προς την ατμόσφαιρα ακτινοβολία που ονομάζεται γήινη ακτινοβολία. Τέλος, η ίδια η ατμόσφαιρα, θερμαινόμενη και αυτή, ακτινοβολεί με τη σειρά της προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται ατμοσφαιρική ακτινοβολία ή ακτινοβολία της ατμόσφαιρας. Οι παραπάνω ακτινοβολίες εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος η κάθε μία. Απ' αυτές, η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ονομάζονται ακτινοβολίες μικρού μήκους κύματος, ενώ η γήινη και η ατμοσφαιρική ακτινοβολία χαρακτηρίζονται σαν ακτινοβολίες μεγάλου μήκους κύματος.

### 4.2 Κατηγοριοποίηση ηλιακών θερμικών συλλεκτών

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα είδη των ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Η βασική κατηγοριοποίηση είναι σε Σταθερούς Συλλέκτες (Fixed Collectors-FC) και σε Ηλιοκαθοδηγούμενους (Solar Tracking Collectors-STC). Οι σταθεροί συλλέκτες έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό και κλίση και είναι συστήματα που δεν φέρουν μηχανισμό παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου. (Καλογίτου, 2004) (Yong Zhou, 2021). Για αυτόν τον λόγο είναι συνήθως τοποθετημένα προς την

κατεύθυνση του ησημερινού και σε γωνία που εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του συλλέκτη. Αντιθέτως οι STC μπορούν να παρακολουθήσουν την τροχιά του ήλιου και να στραφούν κάθετα σε αυτόν, αυξάνοντας έτσι την απόδοση τους (Καλογίρου, 2004).

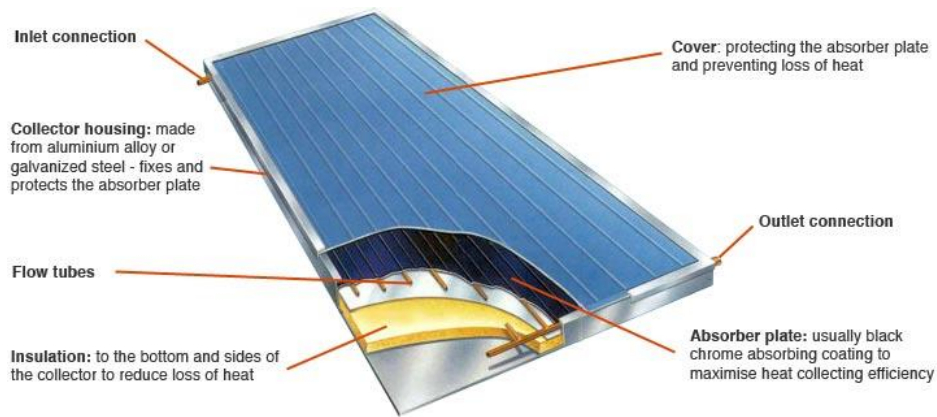


Εικόνα 4.1 Τύποι Ηλιακών Συλλεκτών, (πηγή: (Harish Kumar Ghritlahre, 2018))

### 4.3 Σταθεροί Ηλιακοί Θερμικοί Συλλέκτες

#### 4.3.1 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες (FPCs)

Τα κύρια μέρη του επίπεδου συλλέκτη είναι, το εξωτερικό διαφανή κάλυμμα, η απορροφητική πλάκα, η μόνωση, το εξωτερικό πλαίσιο, οι σωλήνες μεταφοράς και εισόδου και εξόδου του ρευστού (Κyoung Hoon Kim, 2015) .Μία τυπική διάταξη επίπεδου συλλέκτη εμφανίζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2. Τυπικός Επίπεδος Συλλέκτης

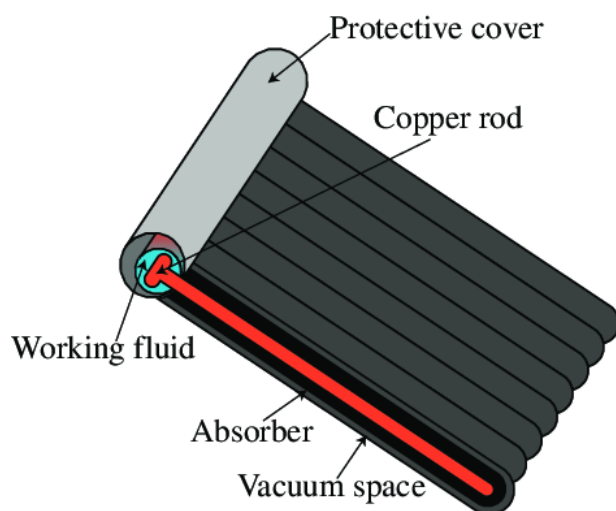
Όταν η ακτινοβολία διαπερνά το διαφανή κάλυμμα και προσκρούει στην απορροφητική πλάκα του συλλέκτη, με υψηλή απορροφητικότητα της ακτινοβολίας, ένα ποσοστό της ενέργειας απορροφάτε από την πλάκα και μεταφέρεται μέσο του σωλήνα στο εργαζόμενο ρευστό (Kalogirou, 2003). Η πίσω πλευρά και η πλαϊνή κάσα του συλλέκτη είναι καλά μονωμένη έτσι ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες θερμότητας. Το διαφανές κάλυμμα χρησιμοποιείται για τον περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας λόγω συναγωγής, μεταξύ του εξωτερικού αέρα και της απορροφητικής πλάκας και επιπλέον μειώνει τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας, διότι η επίπεδη γυάλινη επιφάνεια είναι περατή από το ηλιακό φως αλλά σχεδόν αδιαφανές για την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την απορροφητική πλάκα. Έτσι δημιουργείται φαινόμενο θερμοκηπίου, κάτι επιθυμητό εντός του συλλέκτη, διότι αυξάνεται η απόδοση του. Επίσης το διαφανές κάλυμμα προστατεύει τον συλλέκτη από τα καιρικά φαινόμενα που θα τον κατέστρεφαν σε μικρό χρονικό διάστημα (Kalogirou, 2004).

Τα FPC συνήθως είναι σταθερά τοποθετημένα σε μία κατεύθυνση, χωρίς να υπάρχει σύστημα μετακίνησης ανάλογα με την κλίση του ηλίου (Kyoung Hoon Kim, 2015), για αυτό θα πρέπει να μελετηθεί η τοποθέτησή τους με σκοπό να έχουμε την βέλτιστη απόδοση. Είναι κατάλληλα για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών έως τους 100 °C με ικανότητα αύξησης της θερμοκρασίας έως 50°C σε σχέση με το περιβάλλον (Pankaj Raj, 2018) (Kalogirou, 2004). Οι κύριες εφαρμογές αυτών των συστημάτων είναι η θέρμανση νερού χρήσης, η ξήρανση καλλιεργειών και βιομηχανικές επεξεργασίες που χρειάζονται ελαφρώς αυξημένη θερμοκρασία νερού (Muhammad Tanveer, 2013). Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία από σχεδιασμούς και πολλοί συνδυασμοί υλικών για το κάθε εξάρτημα. Χρησιμοποιείται για να θερμάνει ρευστά όπως το νερό, μείγματα νερού και αντιψυκτικών υγρών και αέρα (Kalogirou, 2004). Γενικότερα είναι φθηνότερα συστήματα από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες καθώς έχουν πιο απλή κατασκευή, δεν χρειάζονται συστήματα κίνησης και παρακολούθησης του ηλίου (Pankaj Raj, 2018) και έχουν μικρότερα έξοδα συντήρησης (Muhammad Tanveer, 2013).

### 4.3.2 Συλλέκτες Σωλήνα Κενού (ETCs)

Οι απλοί επίπεδοι συλλέκτες έχουν αναπτυχθεί και εγκατασταθεί σε θερμά κλίματα με υψηλή ηλιοφάνεια. Ωστόσο σε περιοχές που δεν υπάρχει τόσο ηλιακή ακτινοβολία και επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες έχουν σημαντικά μειωμένη απόδοση (Kalogirou, 2004) (Hassan Olfian, 2020).

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.3 οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από παράλληλες μονωμένες στήλες. Κάθε στήλη αποτελείται από δύο σωλήνες, έναν εξωτερικό και έναν εσωτερικό. Ο εσωτερικός σωλήνα είναι κατασκευασμένος ή επιστρωμένος με ειδικό θερμοαγωγίμο υλικό και ο εξωτερικός είναι διάφανος, έτσι ώστε να μπορεί η ακτινοβολία να εισέλθει εντός. Η κάθε στήλη καταλήγει σε έναν κεντρικό αγωγό (ή και δύο αγωγούς σε μερικού τύπους συλλέκτη). Η ακτινοβολία περνάει από τον εξωτερικό σωλήνα και απορροφάτε από τον εσωτερικό. Και οι δύο σωλήνες είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να έχουν την μικρότερη δυνατή αντανάκλαση. Ο εσωτερικός σωλήνας θερμαίνεται και μεταδίδει θερμότητα στο ρευστό που ρέει εντός του. Όμως λόγω του κενού που υπάρχει ενδιάμεσα των σωλήνων δεν υπάρχει μετάδοση θερμότητας από μέσα προς τα έξω, με αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες (Kalogirou, 2004).



Εικόνα 4.3. Συλλέκτης Κενού

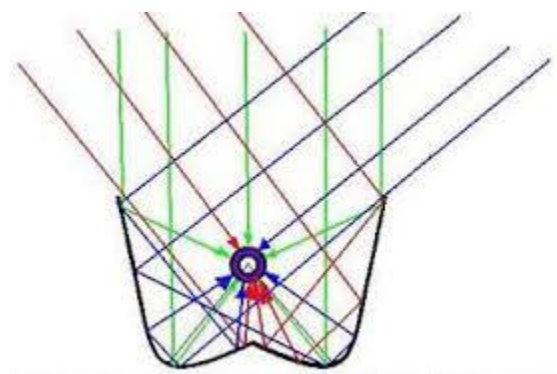
Εντός του εσωτερικού σωλήνα κυκλοφορεί μία μικρή ποσότητα ρευστού(πχ. μεθανόλη) η οποία με την θέρμανση της υφίσταται εξάτμιση. Το εξατμισμένο ρευστό εισέρχεται σε έναν συμπυκνωτή και αποδίδει την θερμότητα στο εργαζόμενο ρευστό. Το ρευστό υγροποιείται και επιστέφει πάλι στον συλλέκτη για να επαναληφθεί ο κύκλος αυτός.

Λόγω ότι δεν είναι δυνατή η εξάτμιση ή η συμπύκνωση πάνω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ρευστού, υπάρχει και μία παθητική ασφάλεια από το πάγωμα ή την υπερθέρμανση του συστήματος, πράγμα που είναι πλεονέκτημα σε σχέση με τα FPCs. (Kalogirou, 2004)

Οι συλλέκτες κενού έχουν μεγαλύτερη απόδοση της τάξεως του 10-15% σε σχέση με τους FPCs σε ίδιες συνθήκες λειτουργίας (L.M. Ayoupre, 2011) (S. E. Zubriski, 2012). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι από 50 έως 200 °C και μπορούν να αποδώσουν και σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα εξωτερικών θερμοκρασιών (M.A. Sabiha, 2015). Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές των συλλεκτών κενού είναι για θέρμανση- ψύξη βιομηχανικών χώρων ή κατοικιών σε περιοχές που επικρατούν νεφосκεπείς συνθήκες. Ωστόσο, το κόστος τους είναι σχεδόν διπλάσιο από αυτό των συμβατικών επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. (Ντάσκα, 2010)

#### 4.3.3 Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες (CPCs)

Οι CPCs είναι στατικοί ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούν δύο ανακλαστικές συμμετρικές επιφάνειες σε παραβολικό σχήμα, με σκοπό να ανακλάσουν την ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία επιφάνεια θέρμανσης. Μπορεί να δεχτεί ακτινοβολία σε ένα μεγάλο φάσμα γωνιών λόγω της γεωμετρίας του. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4 σε όποια γωνία και αν πέσει η ηλιακή ακτινοβολία, μικρότερη από την αποδεκτή οριακή γωνία, θα καταλήξει να προσκρούει στην κεντρική επιφάνεια θέρμανσης. Επομένως μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο η άμεση όσο και η διάχυτη ακτινοβολία. Η ελάχιστη γωνία της ακτινοβολίας που μπορεί να δεχτεί είναι 47 μοίρες, ωστόσο στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες γωνίες αποδοχής, με κόστος μικρότερη πυκνότητα δεσμών (Kalogirou, 2004). Σύμφωνα με τον E. Bellos (E. Bellos, 2016) έχουν σχεδιαστεί συστήματα με σχετική κίνηση στον έναν άξονα του που είχαν βελτιωμένη απόδοση 15% σε σχέση με τα σταθερά CPCs. Ωστόσο αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος του. (E. Bellos, 2016). Επιπλέον σύμφωνα με τον Y. Su (Y. Su, 2012) έχει σχεδιαστεί σύστημα φακών οι οποίοι μπορούν να αυξήσουν την ελάχιστη αποδεκτή γωνία, όμως έχει χαμηλότερη απόδοση σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.



Εικόνα 4.4. Σύνθετος Παραβολικός Συλλέκτης

Οι συλλέκτες συνήθως προστατεύονται από ένα γυάλινο περίβλημα ώστε να μην εισέρχεται σκόνη και άλλα υλικά στον συλλέκτη και να μην μειώνεται η ανακλαστικότητα των επιφανειών. (Kalogirou, 2004)

Μέχρι σήμερα έχουν σχεδιαστεί πάρα πολλοί τύποι σύνθετων παραβολικών συγκεντρωτών δισδιάστατοι ή τρισδιάστατοι. Ως δισδιάστατοι χαρακτηρίζονται οι επιμήκεις συλλέκτες που πραγματοποιούν γραμμική εστίαση ενώ τρισδιάστατοι αυτοί που πραγματοποιούν σημειακή εστίαση. Οι συγκεντρωτές CPC συνδυάζονται με διάφορους τύπους δέκτη όπως επίπεδους (οριζόντιους ή κάθετους) , κυλινδρικούς (κενού ή όχι ) και έτσι προκύπτουν πολλές παραλλαγές ηλιακών συλλεκτών. (N.B. Goodman, 1979)

Οι συλλέκτες τύπου CPC με κυλινδρικό δέκτη πλεονεκτούν έναντι αυτών με επίπεδο δέκτη (με εξαίρεση τον κάθετο επίπεδο δέκτη) διότι “φωτίζουν” όλη την επιφάνεια του απορροφητή περιφερειακά και κατ’ επέκταση απαιτούν λιγότερο υλικό απορροφητή. Ως αποτέλεσμα, ελαχιστοποιούνται απώλειες αγωγής προς την υπόλοιπη επιφάνεια του συλλέκτη (back losses), εξοικονομείται υλικό απορροφητικής επιφάνειας και παράλληλα παρουσιάζεται βελτίωση της χρονικής απόκρισης του συλλέκτη (M.J. Carvalho, 1985)

Η πιο διαδεδομένη εκδοχή των συλλεκτών τύπου CPC συνδυάζει τους σύνθετους παραβολικούς συγκεντρωτές με σωλήνες κενού τύπου U. Οι συλλέκτες αυτοί συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της οπτικής απόδοσης των συγκεντρωτών CPC και παράλληλα έχουν μειωμένες θερμικές απώλειες χάρη στην τεχνολογία κενού. Ορισμένοι κατασκευαστές εισήγαγαν το συγκεκριμένο τύπο ηλιακών συλλεκτών και σε συστήματα κύκλου οργανικού μέσου (ORC). (Ντάσκα, 2010)

Εμπορικά, οι συλλέκτες CPC συναντώνται συχνότερα σε συστοιχίες και αποτελούν ανταγωνιστική τεχνολογία για τους συλλέκτες κενού και ιδιαίτερα για τους επίπεδους συλλέκτες. Μπορούν να παρέχουν θερμότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τους επίπεδους συλλέκτες, διατηρώντας το πλεονέκτημα της σταθερής τοποθέτησης.

#### 4.4 Ηλιοστατικοί Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Θερμικοί Συλλέκτες (STCCs)

Στους ηλιακούς συλλέκτες η θερμοκρασία της ενέργειας που προσδίδουμε μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας την περιοχή που υπάρχουν θερμικές απώλειες (Kalogirou, 2004). Με αυτόν τον τρόπο οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες καθοδηγώντας μία μεγάλη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε μία σχετικά μικρή επιφάνεια συλλογής μπόρεσαν να πετύχουν θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες. Τα βασικά πλεονεκτήματα των STCS σε σχέση με τους FPC είναι (S.A.Kalogirou, 1994):

1. Το εργαζόμενο μέσο μπορεί να θερμανθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες με την ίδια επιφάνεια συλλογής ακτινοβολίας, αυξάνοντας έτσι και τον θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης.

2. Η θερμική απόδοση είναι μεγαλύτερη, επειδή η σχετικά μεγάλη επιφάνεια των επίπεδων συλλεκτών έχει μεγαλύτερες θερμικές απώλειες σε σχέση με την μικρότερη των συγκεντρωτικών συλλεκτών.
3. Οι επιφάνειες συλλογής είναι πιο απλές κατασκευές, με λιγότερα υλικά από έναν FPC και χωρίς την ανάγκη μόνωσης σε σχέση με τα FPC που η μόνωση των πλαισίων είναι απαραίτητη για την απόδοση των συστημάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και μικρότερο κόστος επένδυσης.

Ωστόσο υπάρχουν και μειονεκτήματα των STCCs έναντι των FPCs. Αυτά είναι (S.A.Kalogirou, 1994):

1. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συλλέγουν κυρίως την άμεση ακτινοβολία, και μικρό ποσοστό από την διάχυτη.
2. Στις περισσότερες εφαρμογές, υπάρχει ανάγκη για ένα σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου και μετακίνησης. Αυτό περιπλέκει την λειτουργία τους συνολικά και αυξάνει τον κίνδυνο κάποιας βλάβης.
3. Με τον καιρό οι επιφάνειες συλλογής της ακτινοβολίας χάνουν την ανακλαστικότητα τους. Επομένως χρειάζεται περιοδικό καθάρισμα και λείανση των επιφανειών.

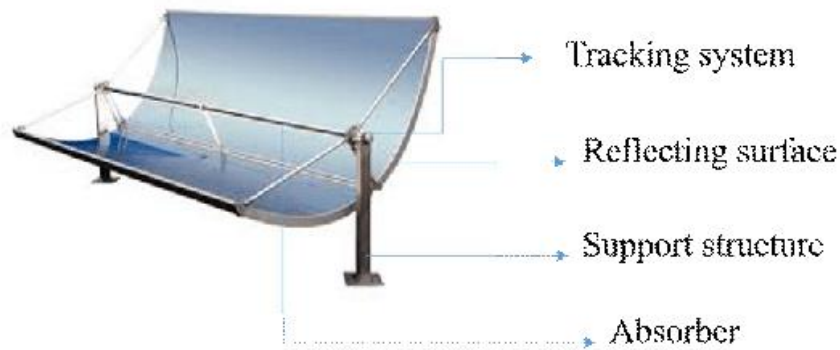
Υπάρχουν πολλές μορφές συγκεντρωτικών συλλεκτών. Οι συγκεντρωτές μπορεί να είναι διαθλαστές ή ανακλαστές. Μπορεί να έχουν κυλινδρικό σχήμα είτε παραβολικό. Οι αποδέκτες των ακτινών μπορεί να είναι κυρτοί, επίπεδοι, κυλινδρικοί ή κοίλοι και μπορούν να προστατεύονται από διαφανή επιφάνεια αλλά και όχι. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την μορφή των συλλεκτών είναι ο λόγος συγκέντρωσης. Αυξημένος λόγος συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σημαίνει και αυξημένη θερμοκρασία στην ενέργεια που μεταφέρεται στον δέκτη. (Kalogirou, 2004). Με αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε ευκολά ότι οι τοπολογίες των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι πολυπληθής. Παρακάτω θα γίνει εκτενής αναφορά στους τύπους των CSCs.

Στα επόμενα υποκεφάλαια αναλύονται τα είδη των συγκεντρωτικών συλλεκτών.

#### 4.4.1 Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης (PTCs)

Οι γραμμικοί παραβολικοί συλλέκτες (Parabolic Trough Collector) είναι αυτή την στιγμή η πιο ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή στην ηλεκτροπαραγωγή μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας (ESTELA, 2012). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από: α) τους ανακλαστήρες, β) τον δέκτη συγκέντρωσης της ακτινοβολίας, γ) τον σκελετό στήριξης και δ) το σύστημα παρακολούθησης του Ήλιου, ε) τον μηχανισμό κίνησης.





Εικόνα 4.5. Παραβολικός Συλλέκτης PTC

Οι ανακλαστήρες, οι οποίοι έχουν παραβολικό σχήμα, οδηγούνται από το σύστημα παρακολούθησης και περιστρέφονται ακολουθώντας την τροχιά του Ήλιου, ανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στον δέκτη. Ο δέκτης αποτελείται από έναν ευθύγραμμο μεταλλικό σωλήνα που περικλείεται από έναν μεγαλύτερο σε διάμετρο γυάλινο σωλήνα. Μεταξύ τους επικρατούν συνθήκες κενού, με σκοπό να υπάρχουν μειωμένες θερμικές απώλειες κατά την θέρμανση του εσωτερικού σωλήνα (F. Burkholder, 2009) (ESTELA, 2012). Οι σωλήνες αυτές είναι κατασκευασμένες να λειτουργούν σε θερμοκρασίες ακόμα και πάνω από 550 βαθμούς Κελσίου (ESTELA, 2012).

Στο εσωτερικό του σωλήνα κυκλοφορεί το θερμικό ρευστό, το οποίο θερμαίνεται από την απορροφηθείσα θερμότητα. Τα ρευστά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι έλαια, πεπιεσμένα αέρια, νερό και τηγμένο άλας. Ωστόσο κάποια από αυτά παρακαλούσαν και μόλυνση στο περιβάλλον αλλά και αυξημένο ρυθμό φθοράς στα συστήματα μεταφορά τους. Επομένως για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα, σε μερικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν αέρια ως θερμικά ρευστά σε PTC, όπως για παράδειγμα ο αέρας, το διοξείδιο του άνθρακα, το άζωτο, το ήλιο και το νέον που είναι μη τοξικά και σχετικά οικονομικά αέρια και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια συστήματα. (E. Bellos, 2016).

Για την λειτουργία των PTC είναι αναγκαίο να υπάρχει ένα σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του Ήλιου. Τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι αξιόπιστα και να έχουν όσο τον δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο στον εντοπισμό της βέλτιστης κλίσης αλλά και στην περιστροφή του συλλέκτη. Επιπλέον τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται και για την προστασία του συλλέκτη, όπως για παράδειγμα την αποφυγή υπερθέρμανσης, ή την διακοπή της επαφής του ήλιου με τον συλλέκτη σε περίπτωση βλάβης του συστήματος κυκλοφορίας του θερμικού μέσου. (Kalogirou, 2004).

#### 4.4.2 Συλλέκτης FRENSEL (LFRs)

Οι συλλέκτες Fresnel είναι συγκεντρωτικοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης, δηλαδή η ηλιακή ακτινοβολία οδηγείται από τα κάτοπτρα σε έναν ευθύγραμμο σωλήνα που λειτουργεί ως απορροφητής θερμότητας. Η βασική τους διάταξη αποτελείται από πολλαπλούς επίπεδους ή ελαφρώς καμπύλους ανακλαστήρες που είναι

τοποθετημένοι, παράλληλα ο ένας με τον άλλον, στο οριζόντιο επίπεδο και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία γραμμικά σε έναν σταθερό δέκτη. Μία τυπική μονάδα LFR εμφανίζεται στην Εικόνα 4.6. Οι ανακλαστήρες είναι καθρέπτες που μπορούν να περιστραφούν στον έναν ή σε δύο άξονες με σκοπό να οδηγήσουν την ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη. Εκτός από τους κεντρικούς καθρέπτες υπάρχει και ένας δευτερεύον ο οποίος βρίσκεται στο πάνω μέρος από την σωλήνα-δέκτη (Kalogirou, 2004). Γενικότερα οι LFR είναι φθηνότεροι από τους PTC καθώς δεν χρειάζεται να διαμορφωθεί μία ενιαία παραβολική επιφάνεια αλλά μικρά επίπεδα τμήματα που κοστίζουν σημαντικά λιγότερο (Kalogirou, 2004). Όμως έχουν υψηλότερες οπτικές απώλειες (EvangelosBellos, 2019).

Το θερμικό ρευστό που είναι συχνότερο στους LFR είναι το νερό, για παραγωγή ατμού ή κορεσμένου νερού. Ωστόσο για χρήσεις σε θερμοκρασίες μέχρι 400 βαθμούς Κελσίου χρησιμοποιούνται και θερμικά έλαια, όπως το Therminol VP-1. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τηγμένα άλατα ως θερμικό μέσο αλλά κυρίως χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας (EvangelosBellos, 2019). Σύμφωνα με τον E. Bellos (E. Bellos, 2018) βρέθηκε ότι η χρήση τυγμένων αλάτων αυξάνει τον βαθμό απόδοσης σε σχέση με τα έλαια και το νερό και σημειώνεται ότι τα άλατα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες και πάνω από τους 600 βαθμούς Κελσίου.



Εικόνα 4.6 Συλλέκτης FLESNEL (πηγή: [Solar Impulse Foundation](#))

#### Σύγκριση PTC με LFR

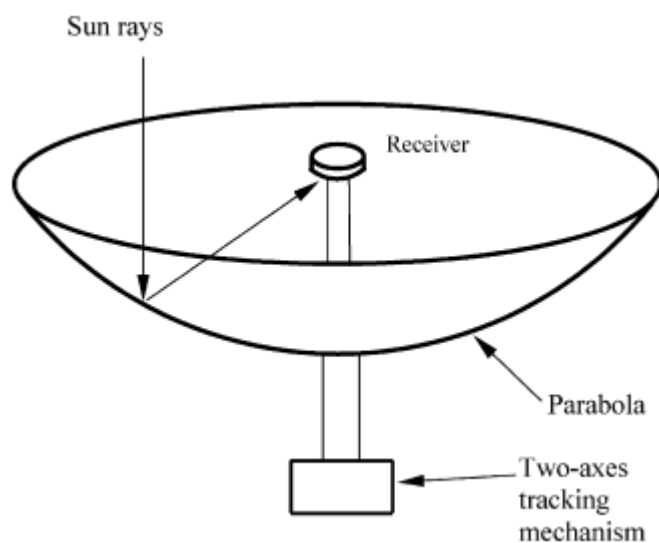
Οι δύο τεχνολογίες συλλεκτών έχουν κοινές ομοιότητες αλλά και διαφορές. Οι βασικές ομοιότητες τους είναι ότι και οι δύο είναι γραμμικοί συλλέκτες και έχουν τον ίδιο περίπου λόγο συγκέντρωσης (από 10 έως 50). Ωστόσο οι ανακλαστήρες του LFR δεν είναι ενιαίοι όπως του PTC. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα να μην δέχεται μεγάλες φορτίσεις από πλευρικούς ανέμους (M.J. Montes, 2017). Το σύστημα

παρακολούθησης τροχιάς και περιστροφής στους LFR είναι απλούστερο καθώς οι ανακλαστές πραγματοποιούν μικρές κινήσεις και κοντά στο έδαφος, επομένως δεν χρειάζονται ισχυροί και πολύπλοκοι μηχανισμοί. Επίσης η θερμική σωλήνα στο PTC μετακινείται μαζί με τον μηχανισμό, πράγμα που δημιουργεί κίνδυνο διαρροής του θερμικού ρευστού, ενώ στον LFR έχουμε σταθερές και μόνιμες ενώσεις με μειωμένο κίνδυνο ατυχήματος (G. Zhu, 2014). Στην ενεργειακή απόδοση ο PTC παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, λόγω των οπτικών απωλειών που έχει ο LFR. Από οικονομικής σκοπιάς ο LFR είναι οικονομικότερος με υπολογιζόμενο κόστος 175-200 €/m<sup>2</sup> σε σχέση με το PTC που υπολογίζεται στα 275 €/m<sup>2</sup> (EvangelosBellos, 2019).

Οι κύριες χρήσεις των συλλεκτών είναι στην ηλεκτροπαραγωγή, στην συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, σε ψυκτικά συστήματα και σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης νερού.

#### 4.4.3 Παραβολικός Συλλέκτης Πιάτο (PDCs)

Ένας τυπικός συλλέκτης πιάτο εμφανίζεται στην Εικόνα 4.7. Ο συλλέκτης πιάτο είναι σημειακός συλλέκτης, δηλαδή οι ακτίνες, με την βοήθεια του πιάτου παραβολικού σχήματος, συγκεντρώνονται σε ένα μικρό σημείο που είναι και το σημείο εστίασης της παραβολής. Ο συλλέκτης είναι πάντα προσανατολισμένος προς τον ήλιο με την βοήθεια ενός μηχανισμού παρακολούθησης του Ήλιου και στους δύο άξονες του επιπέδου. Οι συγκεκριμένοι συλλέκτες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, έως και 1500°C (Kalogirou, 2004) (KumarK.S.Reddy, 2008).



Εικόνα 4.7. Συλλέκτης Πιάτο (PDR)

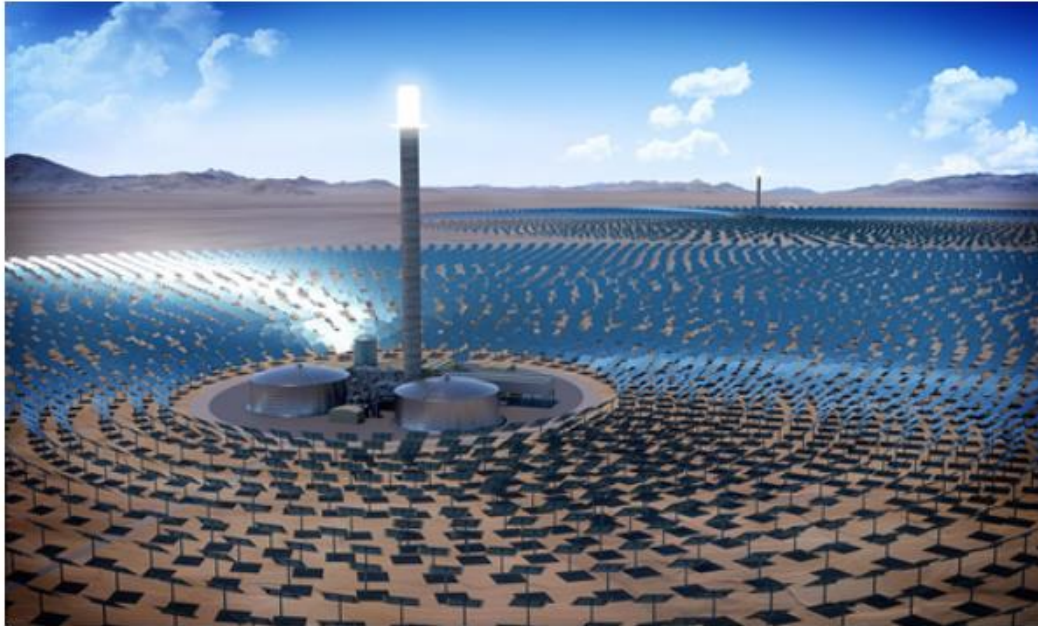
Τα πλεονεκτήματα τους σε σχέση με τους γραμμικούς συλλέκτες είναι τα εξής:

1. Είναι αποδοτικότεροι μηχανισμοί, διότι είναι πάντα κάθετοι στις ακτίνες του ηλίου,
2. Ο λόγος συγκέντρωσης τους είναι από 600 ως 2000, που σημαίνει ότι έχουν καλύτερη απόδοση στην απορρόφηση της θερμότητας,
3. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα πιάτα στην εγκατάσταση παράλληλα συνδεδεμένα αλλά και ξεχωριστά το κάθε ένα μόνο του (Καλογίγου, 2004).

Η πλειοψηφία των ORC που λειτουργούν με PDR προορίζονται για συμπαραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού και ψύξης ταυτόχρονα (Loni, et al., 2021). Γενικά οι βαθμοί απόδοσης είναι υψηλοί διότι οι SDC μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο ειδικά, ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης ενός μόνο ORC συστήματος μπορεί να είναι 37,5%, ενώ σε πολυπαραγωγικά συστήματα ο βαθμός απόδοσης να φτάνει έως και 70%. Ωστόσο αυτό έχει βρεθεί μέσω υπολογιστικών πειραμάτων και υπάρχει έλλειψη από πειραματικές διατάξεις, που θα μπορούσαν να επιβεβαιώσουν ότι μπορεί να επιτευχθεί τόσο μεγάλος βαθμός απόδοσης.

#### 4.4.4 Πύργος Ισχύος (ST)

Ο πύργος ισχύος είναι όπως και ο PDR σημειακός συλλέκτης, όμως δεν λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως ο συλλέκτης πιάτο. Αποτελείται από πολλούς ηλιοστάτες, που αντανακλούν την ακτινοβολία του ηλίου σε μία κεντρική στήλη ή πύργο. Ο κάθε ηλιοστάτης έχει σύστημα περιστροφής σε δύο άξονες με στόχο πάντα να αντανακλά το φως στον πύργο. Ο πύργος είναι υπεύθυνος για την απορρόφηση της ακτινοβολίας και την θέρμανση ενός θερμικού μέσου (Mohammad Hossein Ahmadi, 2018).



Εικόνα 4.8. Πύργος ισχύος για ηλεκτροπαραγωγή

Οι πύργοι ισχύος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες, λόγω του μεγάλου λόγου συγκέντρωσης που έχουν. Επομένως είναι δυνητικά μία τεχνολογία που θα προσφέρει υψηλούς εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης, και υψηλή απόδοση στην ηλεκτροπαραγωγή και την συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Συναντάται είτε σε συστήματα άμεσης παραγωγής ατμού (DSG) είτε με την χρήση τυγμένων αλάτων ως θερμικό μέσο (H.L. Zhang, 2013). Τα πλεονεκτήματα των ST είναι (Kalogirou, 2004), (H.L. Zhang, 2013):

1. Η μεταφορά ενέργειας γίνεται σε μία μικρή περιοχή πάνω στον πύργο, επομένως επιτυγχάνονται μικρές απώλειες μετάδοσης θερμότητας,
2. Έχουν λόγο συγκέντρωσης από 300-1500, επομένως μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, υψηλότερα από 1000 °C .
3. Για παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα ( γενικότερα πάνω των 10 MW) επιτυγχάνουν μία οικονομία κλίμακας, με αποτέλεσμα να θεωρείται και ο οικονομικότερος τρόπος μαζικής παραγωγής ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια.

Παρακάτω στον Πίνακα 4.1 εμφανίζονται σε σύνοψη οι θερμοκρασίες λειτουργίας της κάθε τεχνολογίας συλλέκτη και σε τι κατηγορία ανήκει (Kalogirou, 2004).

Πίνακας 4.1. Τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες

<b>Τεχνολογία</b>	<b>Ενδεικτική θερμοκρασία λειτουργίας (°C)</b>
<b>Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες (FPCs)</b>	30-80
<b>Συλλέκτες Σωλήνα Κενού (ETCs)</b>	50-200
<b>Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες (CPCs)</b>	60-240
<b>Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης (PTC)</b>	60-300
<b>Συλλέκτης FRENSEL (LFR)</b>	60-250
<b>Παραβολικός Συλλέκτης Πιάτο (PDR)</b>	100-500
<b>Πύργος Ισχύος (ST)</b>	150-2000

## 5 Εκτονωτές – Ατμοστρόβιλοι

Ο εκτονωτής είναι από τα βασικά μέρη ενός ORC και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον βαθμό απόδοσης του. Επομένως, η επιλογή του σωστού εκτονωτή είναι σημαντικό κεφάλαιο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την βελτίωση του βαθμού απόδοσης του συστήματος (Qiu, 2011). Οι εκτονωτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους:

- Εκτονωτές Δυναμικής Ροής (Turbo expanders)
- Εκτονωτές Θετικής Εκτόπισης (positive displacement expanders)

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από στροβίλους ακτινικής (axial) και αξονικής (radial) ροής, ενώ στη δεύτερη κατηγορία είναι οι σπειροειδείς (scroll), οι ελικοειδείς-κοχλιοειδείς (screw), οι εμβολοφόροι (piston/reciprocating) και διάφοροι άλλοι τύποι, ένας οι πτερυγιοφόροι εκτονωτές (vane expander) και οι (rolling piston) που εντοπίζονται σε λιγότερες εφαρμογές (Junjiang Bao, 2013).

### 5.1 Αξονικοί Στρόβιλοι

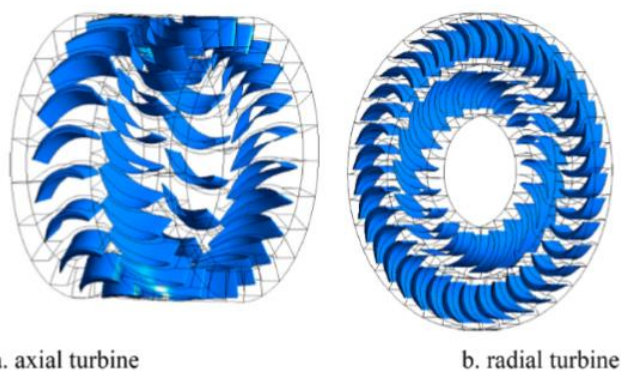
Οι αξονικοί στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται ένας ORC, έχουν διαφορές σε σχέση με έναν αντίστοιχο στροβίλο ατμού, στο μέγεθος και έναν συνθήκες λειτουργίας ένας. Ωστόσο η μεγαλύτερη διαφορά υπάρχει ένας ιδιότητες των εργαζόμενων μέσων που εργαζονται με τον εκτονωτή. Οι στρόβιλοι ένας ORC σε αντίθεση με του ατμοστροβίλου πρέπει να έχουν κάποια ειδικά χαρακτηριστικά ένας:

1. Επειδή τα οργανικά ρευστά έχουν μεγαλύτερη μοριακή μάζα από το νερό, επομένως η ταχύτητα του ήχου είναι μικρότερη σε αυτά από ότι στο νερό. Έτσι, στον σχεδιασμό του θα πρέπει να αποφεύγεται όσο τον δυνατό γίνεται η εμφάνιση υπερηχητικής ταχύτητας, που θα προκαλούσε εκτεταμένη φθορά στον στρόβιλο.
2. Για συγκεκριμένη διαφορά θερμοκρασίας, οι στρόβιλοι των ORC έχουν μεγαλύτερο λόγο συμπίεσης και μικρότερη πτώση εντροπίας από έναν στροβίλο ατμού.
3. Οι στρόβιλοι οργανικών ρευστών έχουν συνήθως μικρότερες διαστάσεις, λόγω ότι τα οργανικά ρευστά έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και μικρότερο ειδικό όγκο από αυτήν του νερού.
4. Μερικά οργανικά ρευστά είναι αναφλέξιμα ή εκρηκτικά, επομένως θα πρέπει να αποφευχθούν τυχόν διαρροές στο περιβάλλον. Για αυτό τον λόγο συνήθως οι στρόβιλοι ORC έχουν διπλό κέλυφος για επιπλέον στεγανοποίηση.

Παρακάτω γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση στα είδη των εκτονωτών, ένας αρχές λειτουργία του κάθε ένα και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ένας.

## 5.2 Ακτινικοί στρόβιλοι

Η αρχή λειτουργίας ένας και η βασική δομή των ακτινικών στρόβιλων είναι παρόμοια με ένας φυγοκεντρικούς συμπιεστές. Υπάρχει μια συνεχής ροή ρευστού στην πτερωτή του, στην οποία η ενέργεια μετατρέπεται σε ισχύ. Η κύρια κατεύθυνση ροής ένας ακτινωτούς στρόβιλου είναι ακτινική, γι' αυτό ονομάζουμε αυτόν τον τύπο στρόβιλου ως ακτινωτό. Ο ακτινωτός στρόβιλος αποτελείται από ένα εξωτερικό περίβλημα που περιέχει ένα τμήμα στάτορα και έναν ρότορα (πτερωτή και άξονας) (Yuanyang Zhao, 2019). Σε μικρά συστήματα ORC με μικρή ισχύς εξόδου στην κλίμακα των kW οι ακτινικοί στρόβιλοι δεν ενδείκνυνται. Αυτό συμβαίνει διότι η ταχύτητα του ακροπτερυγίου πρέπει να διατηρείται σταθερή οποιοδήποτε και αν είναι το μέγεθος ένας μηχανής (Fiaschi, 2012). Επομένως ένας ο τύπος συναντάται σπάνια σε τέτοια συστήματα και μόνο για εξειδικευμένες περιπτώσεις.

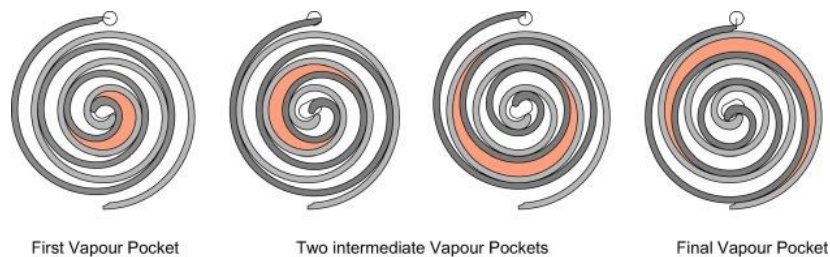


Εικόνα 5.1. Εκτονωτές Δυναμικής Ροής

## 5.3 Σπειροειδείς Εκτονωτές

Ένας και σε όλους ένας εκτονωτές θετικής εκτόπισης, και στον σπειροειδή, ο λόγος όγκων είναι σταθερός. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προκαλέσει δύο τύπους απωλειών: Την υπό-εκτόνωση, που συμβαίνει όταν ο κατασκευαστικός λόγος όγκων είναι μικρότερος από τον λόγο ειδικών όγκων του συστήματος και την υπερ-εκτόνωση, που συμβαίνει όταν ο κατασκευαστικός λόγος όγκων είναι μεγαλύτερος από τον λόγο ειδικών όγκων του συστήματος. Και οι δύο περιπτώσεις οδηγούν σε μειωμένη απόδοση εκτόνωσης. Σε σύγκριση με ένας εκτονωτές θετικής εκτόπισης οι σπειροειδείς εκτονωτές έχουν την πιο πολύπλοκη γεωμετρία. Οι σπείρες ένας είναι δύο ειδών: οι σταθεροί και οι κινητοί. Το ρευστό εισέρχεται σε έναν θάλαμο που δημιουργείται μεταξύ των δύο σπειρών. Η κινητή σπείρα περιστρέφεται έκκεντρα σε σχέση με την σταθερή με αποτέλεσμα ο όγκος του θαλάμου να αυξάνεται, αναγκάζοντας το ρευστό να εκτονωθεί. Ο όγκος του θαλάμου τη στιγμή που τελειώνει η εκτόνωση ένας τον όγκο του θαλάμου τη στιγμή που ξεκινάει η εκτόνωση καλείται κατασκευαστικός λόγος όγκου και συνήθως παίρνει τιμές από 2 ως 4. Η λειτουργία του φαίνεται και σχηματικά στην





Εικόνα 5.2. Λειτουργία Σπειροειδούς Εκτονωτή

#### 5.4 Ελικοειδείς – Κοχλιοειδείς

Ο εκτονωτής αποτελείται από ένα ζεύγος συνεργαζόμενων ελικοειδών δρομέων, ένας αρσενικού και ένας θηλυκού ρότορα, που εμπεριέχεται σε ένα περίβλημα με διάκενο ένας τάξης των 50 $\mu$ m, γεγονός που αυξάνει το κόστος κατασκευής. Οι δύο ρότορες, συνεργάζονται έτσι ώστε κατά την περιστροφή του αρσενικού ρότορα, ο όγκος του εργαζόμενου μέσου που έχει παγιδευτεί αυξάνει, προσδίδοντας έργο στην άτρακτο (Qiu, 2011). Η ταχύτητα περιστροφής ένας συνήθως είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής άλλων συστημάτων που είναι συνδεδεμένα, π.χ. μια γεννήτρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο ένα κιβώτιο ταχυτήτων για την μείωση ένας ταχύτητας περιστροφής. Η λίπανση είναι ένα σημαντικό ζήτημα σε αυτές ένας μηχανές. Για να υπάρχει η κατάλληλη στεγανοποίηση αλλά να μην υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ των σπειρών χρησιμοποιούνται δύο τρόποι: με ψεκασμό λαδιού και χωρίς λάδι. Ο πρώτος τρόπος με ψεκασμό λαδιού είναι ο πιο απλός τρόπος, φθηνότερος και σχετικά αποδοτικός. Η τεχνική ένας λίπανσης χωρίς λάδι επιτρέπει ένας σπείρες να μην έρχονται σε επαφή, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα χρονισμού. Αυτά τα επιπρόσθετα μέρη αυξάνουν το κόστος αλλά και την πολυπλοκότητα του εκτονωτή (Junjiang Bao, 2013).



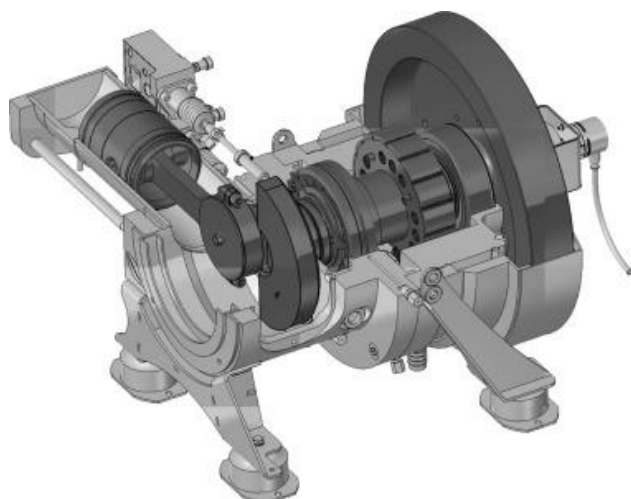
Εικόνα 5.3. Λειτουργία του Ελικοειδής Εκτονωτή

## 5.5 Παλινδρομικοί Εμβολοφόροι εκτονωτές

Οι παλινδρομικοί εμβολοφόροι εκτονωτές είναι συσκευές που φέρουν βαλβίδες για την εισαγωγή και εξαγωγή του εργαζόμενου μέσου. Για αυτό χρειάζονται ακριβή χρονισμό ένας βαλβίδες αναρρόφησης και εκρόφησης ώστε να γίνει παραγωγή έργου. Οι αρχές λειτουργίας ένας είναι παρόμοιες με μία μηχανής εσωτερικής καύσης. Στην Εικόνα 5.4 απεικονίζεται ένας τυπικός εμβολοφόρος εκτονωτής. Τα βασικά μειονεκτήματα ένας έναντι των υπολοίπων είναι (Junjiang Bao, 2013):

1. Αυξημένες απώλειες λόγω τριβής
2. Αυξημένες απώλειες ροής λόγω του συστήματος βαλβίδων
3. Έλλειψη αξιοπιστίας λόγω πολυπλοκότητας και πολλών κινούμενων μερών
4. Ανάγκη για ζυγοστάθμιση των δυνάμεων και των ροπών που προκαλούνται από την παλινδρομική κίνηση του εμβόλου

Ωστόσο, ο συγκεκριμένος εκτονωτής μπορεί να λειτουργήσει σε μεγαλύτερους λόγους πιέσεων σε σχέση με ένας. Επομένως αυτοί οι εκτονωτές είναι κατάλληλοι για συστήματα με υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ένας σε μία ΜΕΚ.



Εικόνα 5.4. Παλινδρομικός Εμβολοφόρος εκτονωτής

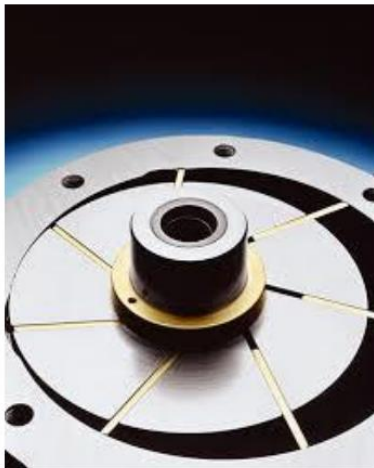
## 5.6 Περιστροφικοί Πτερυγιοφόροι Εκτονωτές

Οι περιστροφικοί πτερυγιοφόροι εκτονωτές έχουν μεγάλες ανοχές σε ένα ευρύ φάσμα οργανικών μέσων. Αποτελούνται από έναν δρομέα, έναν στάτη και ακτινικά πτερύγια. Ο δρομέας τοποθετείται έκκεντρα στο στάτη και έχει ακτινικές αυλακώσεις ένας οποίες τοποθετούνται τα πτερύγια, ένας φαίνεται και στην Εικόνα 5.5. Έτσι, καθώς το εργαζόμενο μέσο εισάγεται στον εκτονωτή μέσω ένας θύρας εισόδου, ο ρότορας και τα πτερύγια περιστρέφονται και διαμορφώνουν τον θάλαμο εκτόνωσης. Λόγω ένας συνεχούς περιστροφής η περιοχή του θαλάμου αυξάνεται έως ότου το εργαζόμενο μέσο αρχίσει να ρέει από την θύρα εξόδου. Έπειτα, ο θάλαμος εκτόνωσης αρχίζει να μειώνεται και στο τέλος το πτερύγιο

κλείνει το θάλαμο εκτόνωσης και έτσι κλείνει ο κύκλος εκτόνωσης (P., 2015). Τα πλεονεκτήματα του είναι:

1. Σχετικά σταθερή απόδοση σε ένα μεγάλο εύρος στροφών
2. Χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν άμεσα με μία ηλεκτρογεννήτρια
3. Μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά με παρουσία υγρής φάσης κατά την εκτόνωση
4. Μικρές ανάγκες συντήρησης και λίπανσης
5. Καλή συμβατότητα με τα οργανικά ρευστά.
6. Υψηλούς λόγους συμπίεσης ως και 10.
7. Ικανότητα λειτουργίας σε υψηλές πιέσεις.
8. Χαμηλό κόστος, απλή κατασκευή.

Επιπλέον έχει και κάποια άλλα θετικά χαρακτηριστικά, ένας χαμηλά επίπεδα θορύβου, ικανότητα αυτό-εκκίνησης και σχετικά ομαλή λειτουργία. Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι ένας τέτοιος εκτονωτής είναι κατάλληλος για χρήση σε μικρά ηλιακά ORC.



*Εικόνα 5.5. Περιστροφικός εκτονωτής πολλαπλών πτερυγίων*

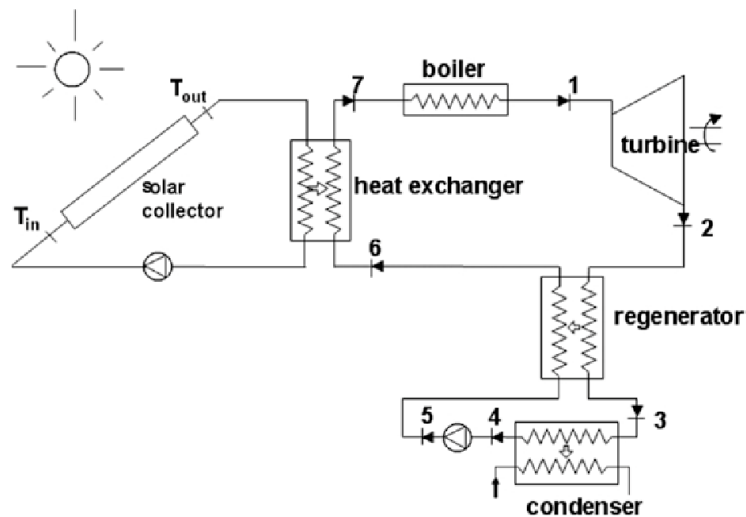
## 6 Ρευστά λειτουργίας και αποθήκευση θερμότητας

Σε ένα SORC συνήθως έχουμε τρία διαφορετικά ρευστά σε τρία διαφορετικά υδραυλικά, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6.1, τα θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στον συλλέκτη, το εργαζόμενο του οργανικού κύκλου και το ρευστό του συμπυκνωτή, που απάγει την απορριπτόμενη θερμότητα από το κύκλωμα.



Διάγραμμα 6.1. Ρευστά ORC

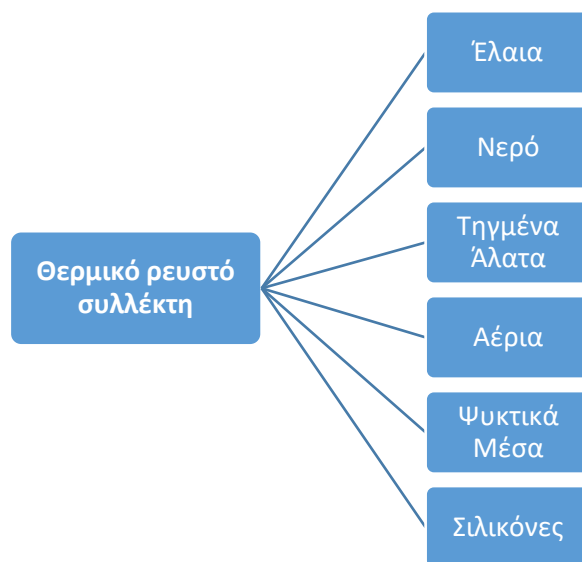
Στην Εικόνα 6.1 φαίνονται τα κυκλώματα που αποτελείται μία απλή διάταξη οργανικού κύκλου Rankine με αναγέννηση και χρήση ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 6.1. Αναγεννητικός SORC με επίπεδο συλλέκτη

## 6.1 Ρευστό μεταφοράς θερμότητας συλλέκτη

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας του κυκλώματος του συλλέκτη ή αλλιώς θερμικό ρευστό του συλλέκτη είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της θερμότητας που προσδίδει ο Ήλιος από τον συλλέκτη στον ατμοποιητή του οργανικού κύκλου. Παρακάτω γίνεται μια κατηγοριοποίηση των θερμικών μέσων ανάλογα με την χημική τους σύσταση και στην συνέχεια αναλύονται οι ιδιότητες και οι περιορισμοί για κάθε ένα ρευστό.



Διάγραμμα 6.2. Θερμικά Ρευστά

Θερμικά Έλαια. Τα θερμικά έλαια χρησιμοποιούνται για θερμικά μέσα από την δεκαετία του 1970 και ήταν τα πρώτα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για μεταφορά θερμότητας σε ηλιακούς συλλέκτες. Με την ανάπτυξη των υλικών και την έρευνα τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί θερμικά έλαια που μπορούν να λειτουργήσουν και σε θερμοκρασίες μέχρι και τους 400 °C (Manuel J. Blanco, 2017). Οι λόγοι που χρησιμοποιούνται τα έλαια είναι διότι έχουν χαμηλή πίεση εξάτμισης και έχουν σχετικά σταθερή θερμική συμπεριφορά σε όλο το εύρος λειτουργίας τους. (Manuel J. Blanco, 2017). Οι βασικές κατηγορίες τους είναι συνθετικοί υδρογονάνθρακες, υδρογονάνθρακες από παραφίνη και αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Από αυτούς οι συνθετικοί είναι σχετικά μη-τοξικοί και χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση. Οι υδρογονάνθρακες από παραφίνη έχουν ευρύτερο θερμοκρασιακό πεδίο μεταξύ πήξης και βρασμού, συγκριτικά πάντα με το νερό. Ωστόσο είναι τοξικοί και απαιτούν ειδικά διπλά τοιχώματα στον εναλλάκτη θερμότητας. Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι εκείνοι με το χαμηλότερο ιξώδες από τους τρεις. Επιπλέον είναι εύφλεκτα και σε μία πιθανή διαρροή μπορεί να υπάρξει ατύχημα (ESTELA, 2012).

Ατμός/νερό. Το νερό χρησιμοποιείται ως θερμικό ρευστό λόγω της σχετικά καλής θερμοχωρητικότητας του (  $4.185 \text{ J/kg K}$  ) και της εύκολης μεταφοράς. Σύμφωνα με τον E. Bellos (Evangelos Bellos, 2016) και τον G. Coccia (G. Coccia, 2015) που διενέργησαν έρευνες για την παραγωγή ατμού μέσω PTC έδειξαν ότι το νερό είναι το αποδοτικότερο μέσο σε σχέση με τα υπόλοιπα μέσα (έλαια, άλατα και αέρια) για θερμοκρασίες μέχρι  $277 \text{ }^\circ\text{C}$ . Επιπλέον το νερό είναι φιλικό προς το περιβάλλον, σχετικά φτηνό και μη εύφλεκτο, επομένως η χρήση του δεν επιφέρει κινδύνους μόλυνσης και έκρηξης στο σύστημα (Rajkumar Malviya, 2020). Ένας άλλος λόγος χρήσης του χρησιμοποιείται είναι το χαμηλότερο σημείο τήξης σε σχέση με τα έλαια και τα άλατα. Αυτό είναι σημαντικό πλεονέκτημα καθώς δεν χρειάζεται σημαντική προσπάθεια για την κυκλοφορία του ρευστού σε συνθήκες μη λειτουργίας του συλλέκτη. Ωστόσο, το νερό εμφανίζει ορισμένες χημικές ενώσεις, όπως διάφορες προσμίξεις του ασβεστίου και του μαγνησίου, των οποίων η διαλυτότητα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και μπορούν επομένως να οδηγήσουν σε εμφάνιση διάβρωσης, που αποτελεί αρκετά μεγάλο πρόβλημα (ESTELA, 2012).

Τηγμένα Άλατα. Τα άλατα που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι τα νιτρικά, τα οποία έχουν την δυνατότητα χρήσης ως μέσα μεταφορά αλλά και αποθήκευσης θερμότητας, λόγω της χημικής σύστασης τους. (Yathin Krishna, 2019). Τα άλατα παρουσιάζουν επιθυμητές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως υψηλή πυκνότητα, εξαιρετική θερμοχωρητικότητα, σταθερή συμπεριφορά και χαμηλή πίεση ατμών. Σε σύγκριση με τα έλαια τα άλατα είναι φθηνότερα και πιο φιλικά προς το περιβάλλον, διότι δεν ρυπαίνουν, δεν είναι εύφλεκτα, είναι σε αφθονία στην φύση. Επιπλέον λόγω της υψηλής θερμοχωρητικότητας τους έχουν την δυνατότητα να μειωθεί το μέγεθος της αποθηκευτικής δεξαμενής, εξοικονομώντας χρήματα και πόρους από την εγκατάσταση.

Το μεγάλο αρνητικό των αλάτων είναι το υψηλό σημείο τήξης. Για αυτό χρειάζεται προθέρμανση και διατήρηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης κατά την διάρκεια της νύχτας ή σε μέρες με χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς ηλιοφάνεια. Αυτό οδηγεί σε υψηλά λειτουργικά κόστη και γενικότερα λειτουργία της εγκατάστασης σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των περισσότερων αλάτων είναι από  $222$  ως  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Yathin Krishna, 2019).

Αέρια θερμικά μέσα. Η χρήση αερίων θερμικών μέσων προέκυψε από την ανάγκη αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας, Με τα υπόλοιπα μέσα υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί (P. Good, 2014), όπως:

- Το νερό χρειάζεται να διατηρείται σε υψηλή πίεση ώστε να είναι υγρό
- Τα έλαια έχουν χημική αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες
- Τα άλατα έχουν υψηλό σημείο τήξης
- Τα συστήματα που λειτουργούν με έλαια ή τηγμένα άλατα έχουν μεγάλες φθορές, είτε χημικής διάβρωσης είτε λόγω τριβής.
- Εκτός του νερού τα υπόλοιπα μέσα μολύνουν το περιβάλλον και είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο.

Ψυκτικά ρευστά : Αυτά χρησιμοποιούνται γενικότερα ως το μέσο μεταφοράς θερμότητας σε ψυγεία, κλιματιστικά και αντλίες θερμότητας. Συνήθως, παρουσιάζουν χαμηλό σημείο βρασμού και μεγάλο δείκτη μεταφοράς θερμότητας. Τα ψυκτικά ανταποκρίνονται γρήγορα στην ηλιακή θερμότητα, κάτι που τους καθιστά ποιο αποτελεσματικούς κατά τη διάρκεια ημερών που έχει σχετική συννεφιά. Η απορρόφηση της θερμότητας πραγματοποιείται όταν το ρευστό βράζει (αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο) στον ηλιακό συλλέκτη. Η απελευθέρωση της θερμότητας αυτής λαμβάνει χώρα όταν το αέριο πλέον ψυκτικό συμπυκνώνεται σε υγρό στον εναλλάκτη θερμότητας (Yathin Krishna, 2019).

Σιλικόνες. Οι σιλικόνες έχουν πολύ χαμηλό σημείο πήξης και πολύ υψηλό σημείο βρασμού. Δεν παρουσιάζουν διάβρωση και έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, Επειδή οι σιλικόνες έχουν υψηλή τιμή ιξώδους και χαμηλές θερμικές ιδιότητες, απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργεια για την άντληση και την κυκλοφορία τους. Επίσης, ακόμα ένα μειονέκτημα είναι ότι εμφανίζουν εύκολα φαινόμενα διαρροής, ακόμα και μέσα από μικροσκοπικές τρύπες (Ορέστης, 2019).

Κάθε τύπος ρευστού μεταφοράς θερμότητας έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με διαφορετικούς τύπους συστημάτων ηλιακής-θερμικής ενέργειας. Τα έλαια, το νερό ή τα τηγμένα άλατα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους παραβολικούς συλλέκτες ή τους συλλέκτες τύπου Fresnel, ενώ τα τηγμένα άλατα, το νερό και ο αέρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύστημα πύργου ισχύος. Τα ψυκτικά μέσα και οι σιλικόνες χρησιμοποιούνται σπάνια σε συστήματα συλλέκτη επίπεδης πλάκας και δεν χρησιμοποιούνται σε συστήματα συγκεντρωτικών συλλεκτών.

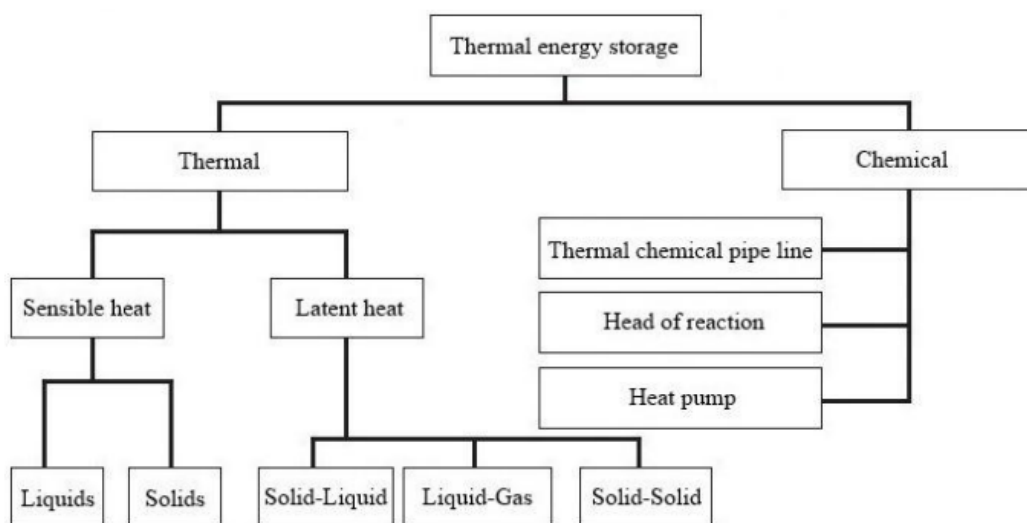
## 6.2 Αποθήκευση Θερμότητας

Παρόλο που η ηλιακή ακτινοβολία είναι από τις αποδοτικότερες ήπιες μορφές για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, σε σχέση με τις υπόλοιπες, έχει το μειονέκτημα ότι είναι διακοπτόμενη πηγή. Ως πηγή ενέργειας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την διάρκεια της ημέρας, την περίοδο του χρόνου αλλά και το κλίμα της περιοχής (Ali Mohammed Hayder, 2017). Επομένως, σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητο να υπάρχει ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητα, ώστε να λύσει το πρόβλημα της ασυνεχούς παροχής ενέργειας (Ali Mohammed Hayder, 2017), (Θεόδωρος, 2020).

### 6.2.1 Κατηγοριοποίηση και χαρακτηριστικά Συστήματος Θερμικής Αποθήκευσης

Η αποθήκευση θερμότητας προκαλεί σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, διότι αυξάνει την ενεργειακή διαθεσιμότητα, μειώνει την αναντιστοιχία της πηγής και του συστήματος και βελτιώνει την απόκριση σε ξαφνικές αυξήσεις του φορτίου λειτουργίας ή απώλειας ηλιακής εισόδου στο σύστημα (Kyoung Hoon Kim, 2015). Οι βασικοί τύποι των συστημάτων αποθήκευσης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.3. Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψιν για την επιλογή του κατάλληλου τύπου συστήματος ακολουθούν παρακάτω:

1. Χωρητικότητα. Η χωρητικότητα ορίζει πόση ενέργεια θα αποθηκεύεται στο σύστημα και εξαρτάται από την διαδικασία αποθήκευσης, το μέσο και το μέγεθος του συστήματος
2. Ισχύς. Η ισχύς ορίζει πόσο γρήγορα θα αποθηκεύεται-αποδεσμεύεται η θερμότητα στο TES.
3. Απόδοση. Η απόδοση είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται στον χρήστη προς την ενέργεια που απαιτείται για την φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης. Πρακτικά αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας κατά την περίοδο της αποθήκευσης και την μεταφορά της θερμότητας στην φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος.
4. Περίοδο αποθήκευσης. Η περίοδος αποθήκευσης είναι ο χρόνος που θα μείνει η θερμότητα αποθηκευμένη στο TES. Αυτή η περίοδος μπορεί να είναι από λεπτά ως μήνες.
5. Χρόνος φόρτισης/ εκφόρτισης. Αυτός ο χρόνος αφορά τον πόσο χρόνο χρειάζεται για να γίνει η φόρτιση ή η αποφόρτιση του συστήματος
6. Κόστος. Τελευταίο κριτήριο είναι το κόστος εγκατάστασης ενός TES. Το κόστος κυρίως μεταφράζεται σε Ευρώ/KWh και εξαρτάται κυρίως από το διαθέσιμο κεφάλαιο, τα λειτουργικά έξοδα και τον χρόνο ζωής του.



Διάγραμμα 6.3. Τύποι συστημάτων θερμικής αποθήκευσης (TES)

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρά, στερεά ή υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Παρακάτω γίνεται μία ανάλυση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση θερμότητας στους ηλιοβοηθούμενους ORC.

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 6.3 υπάρχουν δύο τρόποι θερμικής αποθήκευσης. Ο πρώτος τρόπος είναι τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, ενώ ο δεύτερος τρόπος τα συστήματα αποθήκευσης της αισθητής θερμότητας. Τα συστήματα λανθάνουσας θερμότητας χωρίζονται σε συστήματα: α)στερεού σε υγρού, β) υγρού σε αέριου και γ) στερεού σε στερεού, ενώ τα



συστήματα αισθητής θερμότητας περιλαμβάνουν υγρά ή στερεά υλικά (M. Nogo, 2014), (M. M. Alkilani, 2011).

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι:

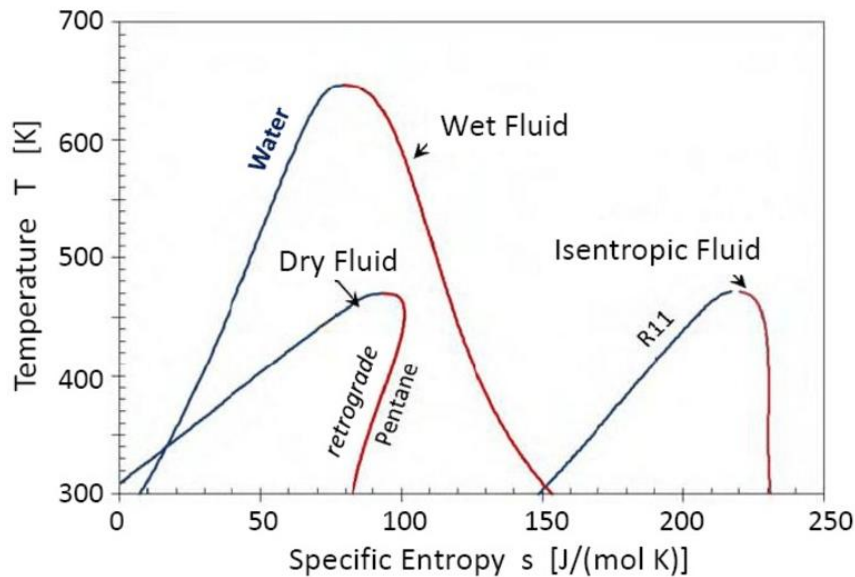
1. Η δυνατότητα να παρέχουν υψηλή αποθήκευση ενέργειας με λειτουργία σε σταθερή θερμοκρασία (S. Esakkimuthu, 2013),
2. Μεγάλη χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου και μονάδα μάζας
3. Αποδοτικότητα λειτουργίας για μεγάλες περιόδους (Ali Mohammed Hayder, 2017),
4. Χαμηλές απώλειες ενέργειας μέσω ισόθερμων μεθόδων σε φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος (R. M. Reddy, 2012).

Από την άλλη, τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας έχουν καλύτερες χημικές ιδιότητες, ωστόσο δεν χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω των μεγάλων θερμικών απωλειών και του υψηλού κόστους (Ramteke, 2016). Αυτό καθιστά τα PCM την πιο διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας στους οργανικούς κύκλους Rankine (Ali Mohammed Hayder, 2017). Για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αποθήκευσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλοί παράγοντες, όπως οι θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος, η αποθηκευτική ισχύς, το κόστος και η σημαντικότητα της αποθήκευσης. Με την σημαντικότητα της αποθήκευσης εννοούμε ότι σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητο να υπάρχει αποθήκευση θερμότητας διότι θα πρέπει ο ORC να παράγει ενέργεια σταθερά και συνεχόμενα, πράγμα που μπορεί να γίνει μόνο με ικανοποιητική αποθήκευση θερμότητας.

### 6.3 Οργανικά ρευστά λειτουργίας SORC

Η ενεργειακή και οικονομική απόδοση ενός ORC είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και την απόδοση του εργαζόμενου μέσου (TCHANCHE, 2010). Αυτό καθιστά την επιλογή του οργανικού ρευστού ένα από τα κρισιμότερα σημεία της μελέτης ενός ORC.

Τα οργανικά ρευστά που χρησιμοποιούνται στους ORC χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα ξηρά, τα υγρά και τα ισεντροπικά. Αυτή η κατηγοριοποίηση ενός εργαζόμενου μέσου γίνεται ανάλογα με την κλίση της καμπύλης κορεσμού σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας -εντροπίας (T-S). Επομένως όταν η κλίση είναι θετική το εργαζόμενο ρευστό είναι υγρό. Αντιστοίχως αν η κλίση είναι αρνητική είναι ξηρό και αν η κλίση είναι άπειρη ονομάζεται ισεντροπικό. Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται αυτό που εξηγήθηκε παραπάνω, δηλαδή η διαφορά στην κλίση της καμπύλης κορεσμού.



Εικόνα 6.2. Τύποι οργανικών ρευστών( πηγή: (Huijuan Chen, 2010))

Τα υγρά ρευστά πρέπει συνήθως να υποστούν υπερθέρμανση, διότι κατά την εκτόνωση παρατηρείται υγροποίηση του εργαζόμενου μέσου. Η παρουσία υγρού εντός του εκτονωτή μπορεί να οδηγήσει σε φθορά του συστήματος, αλλά και μειωμένο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του (Huijuan Chen, 2010). Τα πιο αντιπροσωπευτικά ρευστά για αυτήν την κατηγορία είναι το νερό και η αμμωνία.

Στα ξηρά ρευστά, συνήθως δεν απαιτείται υπερθέρμανση λόγω ότι με την εκτόνωση του ρευστού θα οδηγηθεί σε υπέρθερμος ατμός. Ωστόσο κάποια ρευστά είναι, όπως ονομάζεται "πολύ ξηρά" πράγμα όμως που δημιουργεί πολλή απορριπτόμενη θερμότητα και επιβαρύνει τον συμπυκνωτή. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος συνήθως χρησιμοποιείται αναγέννηση, με σκοπό να αξιοποιηθεί η θερμότητα και να αυξηθεί ο θερμοκός βαθμός απόδοσης. (Junjiang Bao, 2013)

Η επιλογή του κατάλληλου εργαζόμενου για έναν ORC δεν αποτελεί εύκολη διαδικασία, καθώς για κάθε θερμοκρασιακό εύρος υπάρχουν πολλά δυνητικά κατάλληλα οργανικά ρευστά. Επίσης οι συνθήκες λειτουργίας του οργανικού κύκλου εξαρτάται από την τοπολογία του και την θερμοκρασία εισαγωγής της θερμότητας (Junjiang Bao, 2013). Οι θερμοκρασία της πηγής μπορεί να ποικίλει από χαμηλής θερμοκρασίας (κάτω από 80 °C) ως και σε υψηλές θερμοκρασίες (ως και 500 °C) (Junjiang Bao, 2013). Εκτός από κάποια ρευστά που η κρίσιμη θερμοκρασία τους είναι πολύ χαμηλή ή πολύ υψηλότερη από την θερμοκρασία πηγής, χιλιάδες ρευστά μπορούν να θεωρηθούν υποψήφια για χρήση σε ORC. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται υδρογονάνθρακες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αιθέρες, υπερφθοράνθρακες, CFCs, αλκοόλες, σιλοξάνες αλλά και ανόργανες ουσίες ( που κανονικά δεν θα έπρεπε να αναφέρονται, αλλά λόγω της ομοιότητας τους με τα οργανικά ρευστά συμπεριλαμβάνονται) (Junjiang Bao, 2013).

Τα κριτήρια επιλογής του εργαζόμενου μέσου περιλαμβάνουν τις θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες τους. Αναλυτικότερα τα κριτήρια επιλογής και πως αυτά επηρεάζουν τη λειτουργία του κύκλου αναλύονται στη συνέχεια (TCHANCHE, 2010), (Omar Aboelwafa, 2018):

### 6.3.1 Κρίσιμοι παράμετροι ( Θερμοκρασία, πίεση)

Κρίσιμο σημείο είναι το σημείο πάνω σε ένα θερμοδυναμικό διάγραμμα στο οποίο η υγρή και η αέρια φάση του μέσου συνυπάρχουν και οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες δεν μπορούν να προβλεφθούν. Σε αυτό το σημείο η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η σύσταση του μέσου είναι ίδια είτε αυτό είναι υγρό είτε αέριο. Οι ιδιότητες του μέσου σε αυτό το σημείο ονομάζονται κρίσιμη πυκνότητα, κρίσιμη θερμοκρασία, κρίσιμος όγκος και κρίσιμη πίεση. Ανάλογα αν ο κύκλος λειτουργεί πάνω ή κάτω από αυτό το σημείο τότε ονομάζεται υπερκρίσιμος ή υποκρίσιμος αντίστοιχα. Στη περίπτωση του υποκρίσιμου κύκλου η θερμοκρασία ατμοποίησης του μέσου πρέπει να είναι πιο κάτω από την κρίσιμη ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη μεταφορά θερμότητας.

### 6.3.2 Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (ενθαλπία εξάτμισης)

Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα επιτρέπει την μεταφορά του μεγαλύτερου ποσοστού θερμότητας κατά την διαδικασία αλλαγής φάσης του ρευστού. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ανάγκη για την ρύθμιση την υπερθέρμανσης και εκτόνωσης του μέσου μέσω αναγεννητικής θέρμανσης με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Σε όρους παραγόμενου έργου, για τις ίδιες θερμοκρασίες λειτουργίας, έχει αποδειχθεί ότι παράγεται περισσότερο έργο όταν το εργαζόμενο μέσο έχει υψηλότερη ενθαλπία εξάτμισης. Στην περίπτωση όμως όπου υπάρχει διακύμανση στις θερμοκρασίες στην πηγή θερμότητας προτιμώνται ρευστά με χαμηλή ενθαλπία εξάτμισης. Χαμηλότερη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του εργαζόμενου μέσου οδηγεί στην πραγματοποίηση της μεταφοράς θερμότητας στον ατμοποιητή με μεταβλητή θερμοκρασία. Κατά συνέπεια το θερμοκρασιακό προφίλ του εργαζόμενου μέσου στον ατμοποιητή ακολουθεί καλύτερα το θερμοκρασιακό προφίλ της πηγής θερμότητας. Επομένως για την βέλτιστη απόδοση του ORC , σε εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας προτιμώνται ρευστά με κατάλληλη αλλά όχι υψηλή θερμότητα εξάτμισης ενώ σε εφαρμογές ηλιακού ORC που συνδυάζονται με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τα οποία παρέχουν σταθερή ποσότητα θερμότητας επιλέγονται ρευστά με υψηλή θερμότητα εξάτμισης.

### 6.3.3 Πυκνότητα

Χαμηλή πυκνότητα ατμού οδηγεί σε μεγαλύτερες ογκομετρικές παροχές του οργανικού μέσου οι οποίες προκαλούν μεγαλύτερη πτώση πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας και καθιστούν αναγκαία την χρήση μεγαλύτερων στροβίλων. Οι επιπτώσεις αυτές έχουν αντίκτυπο στο κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον, μεγάλη πυκνότητα επιδρά θετικά στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου.

#### 6.3.4 Μοριακό βάρος

Το μεγάλο μοριακό βάρος έχει θετική επίπτωση στην απόδοση του στροβίλου αλλά τα ρευστά με μεγάλο μοριακό βάρος και μεγάλη κρίσιμη πίεση χρειάζονται μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας. Για εγκαταστάσεις με υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλες ισχύς και πολυβάθμιους στροβίλους προτιμώνται οργανικά ρευστά με χαμηλό μοριακό βάρος (<90kg/Mol ), ενώ σε μικρές εγκαταστάσεις με χαμηλές θερμοκρασίες και μονοβάθμιους στροβίλους εργαζόμενα μέσα με μεγάλο μοριακό βάρος (>90kg/Mol ) είναι καταλληλότερα.

#### 6.3.5 Θερμική ευστάθεια και συμβατότητα με τα υλικά του συστήματος

Η θερμική ευστάθεια του ρευστού που χρησιμοποιείται σε έναν ORC μπορεί να περιορίσει δραστικά την θερμοκρασία της πηγής θερμότητας. Πάνω από μία θερμοκρασία η χημική σύσταση του οργανικού ρευστού μπορεί να μεταβληθεί επηρεάζοντας την λειτουργία του κύκλου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε φθορά του συστήματος αλλά και δημιουργία τοξικών ουσιών που μπορούν να βλάψουν το περιβάλλον και τον άνθρωπο (Θεόδωρος, 2020). Επιπλέον το εργαζόμενο μέσο πρέπει να έχει συμβατότητα με το μέσο λίπανσης. Η επιλογή εργαζόμενου μέσου-λιπαντικού-υλικών πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή ώστε να διασφαλιστεί ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης. Το λιπαντικό μπορεί να είναι αναμίξιμο ή μη αναμίξιμο με το εργαζόμενο μέσο αλλά για μείωση της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης συνήθως επιλέγεται αναμίξιμο λιπαντικό. Η περίπτωση χημικής αποσύνθεσης του εργαζόμενου μέσου δεν έχει αντίκτυπο μόνο στην απόδοση του συστήματος, λόγω ανάγκης αντικατάστασης του, αλλά επιφέρει και προβλήματα διάβρωσης στα υλικά εξαιτίας της δημιουργίας μη συμπεκνώσιμων αερίων (TCHANCHE, 2010).

#### 6.3.6 Ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας του ρευστού

Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι οι θερμικές ιδιότητες. Θα πρέπει το ρευστό να έχει χαμηλό ιξώδες, χαμηλή τάση επιφανείας, χαμηλή ειδική θερμότητα υγρής φάσης, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Αυτές οι ιδιότητες επιτρέπουν μεγαλύτερη ροή θερμότητας από την πηγή στο εργαζόμενο μέσο και την μείωση του ποσού θερμότητας που χρειάζεται το ρευστό για να θερμανθεί.

#### 6.3.7 Ιδιότητες ασφαλείας

Η συχνότερη κατηγοριοποίηση για την αξιολόγηση της ασφαλείας ενός εργαζόμενου μέσου είναι κατά ASHRAE 34. Η κατηγοριοποίηση αυτή βασίζεται σε δυο παραμέτρους: την τοξικότητα και την αναφλεξιμότητα. Η τοξικότητα μπορεί να παρατηρηθεί από μερικούς αριθμούς όπως TLV (Threshold Limit Value). Η αναφλεξιμότητα αναγνωρίζεται γενικά από τους αριθμούς LFL (Lower Flammability Limit) και HOC (Heat Of Combustion). Ο **Error! Reference source not found.** παρουσιάζει τις κατηγορίες που χωρίζονται τα εργαζόμενα μέσα. Το γράμμα A σημαίνει ότι δεν παρατηρείται τοξικότητα σε συγκέντρωση μεγαλύτερη των 400 ppm, ενώ το B η συγκέντρωση τοξικότητας υπερβαίνει το όριο αυτό. Η αναφλεξιμότητα χωρίζεται σε τρεις τάξεις. Η πρώτη τάξη (1) δείχνει ότι το ρευστό δεν έχει τάση διάδοσης φλόγας όταν εξεταστεί σε STP συνθήκες (T=21 °C, p=1 atm).

Η δεύτερη τάξη (2) παρουσιάζει  $LFL > 0,1 \text{ kg/m}^3$  και  $HOC < 19 \text{ kJ/kg}$  σε STP συνθήκες. Στην τρίτη τάξη (3) είναι τα ρευστά με υψηλή αναφλεξιμότητα, δηλαδή  $LFL < 0,1 \text{ kg/m}^3$  ή  $HOC > 19 \text{ kJ/kg}$ . Σε όλα αυτά προστίθεται ότι το ρευστό δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι ραδιενεργό ή εκρηκτικό.

Πίνακας 6.1. Κατηγορίες Ασφάλειας κατά ASHRAE 34

ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑ	ΧΑΜΗΛΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ	ΥΨΗΛΗ ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ
ΥΨΗΛΗ	A3	B3
ΧΑΜΗΛΗ	A2	B2
ΚΑΘΟΛΟΥ	A1	B1

### 6.3.8 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Για να μετρηθεί το περιβαλλοντικό αντίκτυπο μίας ουσίας λαμβάνονται υπόψιν δύο παράμετροι. Η πρώτη παράμετρος είναι η δυνατότητα μίας ουσίας να καταστρέψει μόρια του όζοντος στην ατμόσφαιρα (ozone depletion potential - ODP). Ως επίπεδο αναφοράς για το ODP ορίζεται το μέσο R11 με  $ODP=1$ .

Η δεύτερη παράμετρος είναι ο δείκτης GWP και λαμβάνει υπόψιν κατά πόσο η ουσία αυτή επιδρά στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου (global warming potential - GWP). Σημείο αναφοράς του δείκτη αυτού είναι ο χρόνος ζωής του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) στην ατμόσφαιρα (atmospheric lifetime - ALT) και στην πράξη δείχνει πόσο χρόνο παραμένει η ουσία μέχρι την αποσύνθεση της, αντιδρώντας με άλλα στοιχεία στο περιβάλλον της.

### 6.3.9 Απόδοση του συστήματος

Για να θεωρηθεί ένα ρευστό καταλληλότερο για την χρήση σε ένα συγκεκριμένο σύστημα θα πρέπει να πληροί όσο το δυνατό περισσότερες από τις παραπάνω προϋποθέσεις. Ωστόσο, το πιο σημαντικό βήμα που απομένει είναι να βρεθεί πως το ρευστό αυτό θα αποδίδει στο σύστημα. Ο ευκολότερος και γρηγορότερος τρόπος είναι να γίνει μία εξομοίωση του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις θερμοδυναμικές και φυσικές ιδιότητες του ρευστού. Μέσο αυτού μπορεί να αξιολογηθεί το ρευστό με βάση τον 1<sup>ο</sup> και τον 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο και να βρεθεί ένα συμπέρασμα για την αποδοτικότητα του ως εργαζόμενο μέσο σε έναν ORC. Φυσικά από μία εξομοίωση δεν μπορούν πάντα να ληφθούν ασφαλή συμπεράσματα, καθώς στην πραγματικότητα υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος αλλά σε μία υπολογιστική μελέτη να μην μπορούν να ληφθούν. Για αυτός και πολλοί ερευνητές σχεδιάζουν πειραματικές διατάξεις και μέσω πειραμάτων, εξάγουν συμπεράσματα. Στην παρακάτω ενότητα θα αναλυθούν εκτενέστερα οι πειραματικές και εξομοιωτικές μελέτες και θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ τους.

### 6.3.10 Διαθεσιμότητα και οικονομικά κριτήρια

Θα πρέπει το εργαζόμενο ρευστό που θα επιλεγεί να είναι εμπορικά διαθέσιμο και να έχει αποδεκτή τιμή σύμφωνα με τον το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Κάποια ψυκτικά μέσα για παράδειγμα είναι πολύ ακριβά και αυτό αποτελεί βασικό μειονέκτημα για την επιλογή τους.

### 6.3.11 Φυσικοχημικές ιδιότητες των οργανικών ρευστών

Τα ρευστά που εμφανίζονται στην βιβλιογραφία χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την χημική τους σύσταση, σε καθαρά ρευστά και σε μείγματα (solutions). Γενικότερα, όπως αναφέρει ο X.D.Wang στην ανασκόπηση του (X.D.Wang, 2009), οι ερευνητές τείνουν να ερευνούν περισσότερο τα καθαρά ρευστά. Ωστόσο κανένα ρευστό δεν μπορεί να θεωρηθεί ως το ιδανικό για έναν ORC, διότι υπάρχει μεγάλη αλληλεξάρτηση μεταξύ των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος, της τοπολογίας του και του οργανικού ρευστού (Quoilin, et al., 2011).

Τα εργαζόμενα μέσα στους ORC κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την χημική τους δομή με τον εξής τρόπο:

1. Ανόργανα
2. Υδρογονάνθρακες
3. Αλκοόλες
4. Κετόνες
5. Υδροφθοράνθρακες
6. Χλωροφθοράνθρακες
7. Υδροχλωροφθοράνθρακες
8. Υπερφθοράνθρακες
9. Υδροφθοροολεφίνες
10. Σιλοξάνες
11. Αιθέρες
12. Φθοριωμένοι Αιθέρες

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα οργανικά ρευστά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ηλιακά ORC, οι τεχνολογίες συλλέκτη και το εύρος θερμοκρασίας που πέτυχαν στην είσοδο του ρευστού στον εκτονωτή (Omar Aboelwafa, 2018).

Πίνακας 6.2. Εργαζόμενα μέσα

Εργαζόμενο ρευστό	Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου στον εκτονωτή (°C)
<b>Ανόργανα</b>		
Νερό (R718)	FPC PTC LFR PD	312-390 250 340 75
CO2	ETC PTC	125-200 130
Αμμωνία (R744)	ETC FPC CPC PTC	70-120 85 - 150
<b>Υδρογονάνθρακες</b>		
Αιθάνιο (R170)	PTC	70-150
Προπυλένιο (R1270)	ETC PTC	86.4 68.2-120
Πρόπάνιο (R290)	ETC FPC CPC PTC	85 68.2-120 - -
Βουτάνιο (R600)	ETC FPC CPC PTC	70-120 - - 137-170
Βουτένιο	-	125
Ισοβουτάνιο	ETC FPC CPC PTC	120-145 80-100 95-124 140-150
Ισοβουτένιο	-	100-150
2- βουτένιο	-	100-150
Τρανς- βουτένιο	-	100-150
Πεντάνιο	ETC FPC CPC PTC LFR PD	- 70-75 - 70-214 - -
Ισοπεντάνιο	ETC	145

Εργαζόμενο ρευστό	Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου στον εκτονωτή (°C)
	FPC CPC PTC	95-118 95 119-289
Κυκλοπεντάνιο	PTC	140
Νεοπεντάνιο	ETC FPC CPC	152 - -
Εξάνιο	ETC FPC CPC PTC LFR	- - 130-150 140-236 216
Ισοεξάνιο	PTC LFR	140-246 206
Κυκλοεξάνιο	ETC FPC CPC PTC LFR	- - - 140-302 262
Μεθυλο- κυκλοεξάνιο	PTC	-
Προπυλο- Κυκλοεξάνιο	PTC	-
n- Επτάνιο	ETC FPC PTC LFR	- - 263.7-288 248
Βενζόλιο	CPC PTC LFR	- 287-294 264
n- Οκτάνιο	ETC FPC PTC	- - 291.9
n-Νονυλένιο	PTC	-
Δεκάνιο	-	-
Δωδεκάνιο	PTC	-
Τολουόλιο	ETC FPC PTC LFR PD	- - 280-380 297 320
Ο- ξυλένιο	PTC	306



Εργαζόμενο ρευστό	Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου στον εκτονωτή (°C)
Εθυλοβενζόλιο	ETC	-
	FPC	-
	PTC	341,9
N- προπυλοβενζόλιο	PTC	360-377,34
N- βουτιλοβενζόλιο	ETC	-
	FPC	-
	PTC	388,2
<b>Αλκοόλες</b>		
Μεθανόλη	ETC	120
	PD	-
Αιθανόλη	ETC	100-150
	CPC	-
	PD	-
ν-βουτανόλη	PTC	150,3
<b>Κετόνες</b>		
Ακετόνη	PTC	250-400
<b>Υδροφθοράνθρακες</b>		
R32	-	75
R161	PTC	150
R134a	ETC	70-120
	FPC	70-85
	CPC	-
	PTC	70-200
R152a	ETC	70-120
	FPC	70-85
	CPC	-
	PTC	70-200
R227ea	ETC	120
	FPC	70-88.4
	CPC	-
R236fa	ETC	-
	FPC	101.5
R236ea	ETC	-
	FPC	111.65
	PTC	179.1
R245fa	ETC	75-150
	FPC	70-125

Εργαζόμενο ρευστό	Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου στον εκτονωτή (°C)
	CPC PTC LFR	95-100 75-250 125-170.15
R245ca	ETC FPC CPC PTC	145 10-119 95 110
RC318	ETC FPC PTC	120 85-98.8 146.3
R365mc	FPC	70
<b>Χλωροφθοράνθρακες</b>		
R11	ETC PD	120 -
R12	ETC FPC PTC	70-120 70-85 70
R113	CPC PTC LFR PD	136 200-242 202 -
R114	-	75
<b>Υδροχλωροφθοράνθρακες</b>		
R22	FPC PTC	70-85 70
R123	ETC PTC FPC CPC Δυβάθμιο CPC	100-150 180-200 - 99-124 120
R141b	ETC CPC PD	100-150 - -
<b>Υπερφθοράνθρακες</b>		
R218	ETC FPC	113.7 59.1-87.4

Εργαζόμενο ρευστό	Τύπος Συλλέκτη	Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες εισόδου του θερμικού μέσου στον εκτονωτή (°C)
	PTC	75.7-150
C4F10	-	107
C5F12	-	141
<b>Υδροφθοροολεφίνες</b>		
R1234yf	FPC PTC	70 115-140
R1234ze	FPC PTC	70 115-140
<b>Σιλοξάνες</b>		
MM	ETC FPC PTC	- - 235-400
MDM	ETC FPC PTC	- - 307.3-312.7
MD2M	ETC FPC PTC	- - 336.4
MD4M	PTC	-
D4	PTC	280-365
D6	PTC	312.7
OMTS	PTC LFR	300 260
HMDS	PTC LFR	225 215
<b>Αιθέρες</b>		
R610	ETC FPC PTC	- - 200
<b>Φθοριωμένοι Αιθέρες</b>		
RE134	ETC FPC PTC	- - 143.7
RE245	ETC DPC PTC	- - 188.2



## 7 Εγκατεστημένα Συστήματα SORC

Παρακάτω γίνεται μία ερευνητική ανασκόπηση των εγκατεστημένων συστημάτων. Για την καλύτερη και εγκυρότερη ανάλυση των υπάρχοντων εγκατεστημένων συστημάτων κρίνεται αναγκαίος ο διαχωρισμός σε πειραματικά και σε αυτά που λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες. Τα συστήματα που λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες για την παραγωγή ηλεκτρισμού στο εξής θα τα αποκαλούμε ως κανονικά.

Στον Πίνακα 7.1 εμφανίζονται τα πειραματικά SORC συστήματα, ενώ στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα πραγματικά συστήματα που έχουν εγκατασταθεί για συμπαραγωγή ενέργειας, λαμβάνοντας θερμότητα από τον ήλιο.

Πίνακας 7.1. Πειραματικά SORC

Τοποθεσία (έτος)	Τύπος Συλλέκτη	Επιφάνεια συλλογής(m <sup>2</sup> )	Θερμικό ρευστό	Ισχύς εξόδου (kW)	Εργαζόμενο οργανικό μέσο	Παρατηρήσεις	Αναφορές
Pasaden, CA - USA (1978)	PTC	116,9	Toluene	30	Toluene	Βαθμός απόδοσης ORC μέσο όρο 30%	(Kiceniuk, 1985)
Lausanne, Switzerland (2001)	LFC	100	Νερό	15	R123/R134a	Βαθμός απόδοσης περίπου 13% και εξεργειακή απόδοση 46%	(Kane, 2003)
Sendai, Japan (2002)	CPC	5,75	Νερό	1	R113	Βαθμός απόδοσης συστήματος 7% και για συμπαραγωγή θερμότητας 42%	(Saitoh, 2002)
Newcastle, Australia (2006)	PTC	132	Mineral oil	6	HFE 7100	-	(Kohlenbach, χ.χ.)
Almeria, Spain (2007)	PTC	Δεν αναφέρεται	Thermal oil	5	SES36	-	(Galvez, 2010)
Tianjin, China (2008)	FPC	0,6	R245fa	0,13	R245fa	Μέγιστος συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος: 3%	(X.D.WangL.Zhao, 2011)
Tianjin, China (2009)	FPC, ETC	44	R245fa	1,7	R245fa	Βαθμός απόδοσης ORC: 13% Βαθμός απόδοσης συλλέκτη μέσο όρο 71,6% Συνολικός β.α.: Για ETC: 4,2%Για FPC: 3,2%	(Wang, 2010)

Athens, Greece (2009)	ETC	216	Νερό	2,5	R134a	Μέγιστος βαθμός απόδοσης ORC: 1,2%	(D. Manolakos, 2009)
Burkina, Faso (2012)	SCT	180	Mineral oil	10	R245fa	-	(N'Tsoukroε, 2014)
Liege, Belgium (2015)	PTC	78	Synthetic oi	0,92	R245fa	Μέγιστος β.α ORC 4,5%	(Rémi Dickes, 2014)
Busan, Korea (2015)	ETC	-	Νερό	1,5	R245fa	Μέγιστος β.α ORC: 6% για θερμοκρασία συλλέκτη 120 °C	(Suresh Baral, 2015)
Florence, Italy (2016)	PTC	98	Έλαιο	0,67	R245fa	Μέγιστος βαθμός απόδοση συστήματος: 8%	(Taccani, et al., 2016)
Perak, Malaysia (2020)	PDC	-	Νανο-ρευστό, έλαιο	-	R113	Συνολικός Βαθμός απόδοσης συστήματος -Για Νανορευστό 17,8% -Για έλαιο 15,8%	(Alireza Refiei, 20202)

Στον παρακάτω γίνεται παράθεση των εγκατεστημένων συστημάτων:

Πίνακας 7.2. Εγκατεστημένα SORC

Τοποθεσία (έτος)	Τύπος Συλλέκτη	Επιφάνεια συλλογής(m <sup>2</sup> )	Θερμικό ρευστό	Ισχύς εξόδου (kW)	Εργαζόμενο οργανικό μέσο	Παρατηρήσεις	Αναφορές
Willard, NM - USA (1979)	PTC	1276	Mineral oil	19	R113	Συνολικός βαθμός απόδοσης μέσο όρο 15%	(Fenton, 1984)
Kuwait city, Kuwait (1981)	PDC	1100	Synthetic oil	100	Toluene	Εξεργειακός β.α. 42%	(Moustafa, 1984)
Red Rock, USA (2006)	LFR	10340	Mineral oil	1000	n-pentane	-	(Canada, 2005)
Thirasia, Greece (2008)	ETC	90	-	100	R134a	Μέγιστος β.α 7% Μέγιστος εξεργειακός β.α: 44%	(Manolakos, et al., 2008)
Berea, Lesotho (2012)	PTC	75	Glycol	3	R245fa	-	(Orosz, 2013)
Crowley, LA-USA (2013)	PTC	1051	Νερό	50	R245fa	Βαθμός απόδοσης ORC μέσο όρο στο 7%	(Terrence L. Chambers, 2014)
Honolulu, Hawaii (2013)	PTC	Δεν αναφέρεται	Δεν αναφέρεται	50	Δεν αναφέρεται	Μέσος β.α ORC: 25% Μέγιστος εξεργειακός β.α: 23%	(Goswami, 2013)
Ait-Baha, Morocco (2014)	PTC	6159	Αέρας	3000	Δεν αναφέρεται		(Plant, 2014)
Rasht, Iran (2020)	PTC	5540	Νερό	782	Cyclohexane	Μέγιστη εξεργειακή απόδοση συστήματος 18,61%	(Habibi, et al., 2020)

Από την σύγκριση των πινάκων 4 και 5 προκύπτει ότι τα πειραματικά συστήματα χρησιμοποιούνται ως επί τω πλείστων μικρότερες επιφάνειες συλλέκτη σε σχέση με τα πραγματικά. Αυτό παρατηρείται διότι ο ρόλος αυτών των συστημάτων δεν είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού ή θερμότητας, αλλά η προσέγγιση και διερεύνηση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας ενός SORC.



Στις επικείμενες παραγράφους αναλύονται τα δεδομένα που καταγράφηκαν από την μελέτη της βιβλιογραφία. Η ανάλυση τους και τα συμπεράσματα παρουσιάζονται ανά κατηγορία και υποσύστημα.

### 7.1.1 Ηλιακοί Συλλέκτες

Στα πειραματικά συστήματα ο τύπος συλλέκτη που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι ο PTC (Γραμμικός Παραβολικός Συλλέκτης), με ποσοστό 35%, ενώ στα πραγματικά συστήματα το ποσοστό αυτό είναι σχεδόν 80%. Στον Πίνακα 7.3, φαίνεται ότι οι συλλέκτες PTC (είδος) και LFR, στα πειραματικά δεδομένα έχουν σχεδόν τον ίδιο μέσο όρο βαθμών αποδόσεων. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχή λειτουργίας αυτών και ο τρόπος που απορροφούν την θερμότητα από τον ήλιο είναι παρόμοιος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε πειραματικές και αριθμητικές μελέτες να παρουσιάζουν σχεδόν τον ίδιο βαθμό απόδοσης, με τον PTC να είναι ελάχιστα αποδοτικότερος από τον LFR.

Πίνακας 7.3. Πειραματικά Συστήματα

Τύπος Συλλέκτη	Μέσος όρος βαθμού απόδοσης Συστήματος SORC $\eta_{sys}$ (%)
PTC	13,4
LFR	13,1
CPC	7,0
FPC	3,0
PDC	15

### 7.1.2 Ρευστά μεταφοράς θερμότητας (ηλιακό κύκλωμα)

Από τον πίνακα των πειραματικών συστημάτων SORC, παρατηρείται ότι το επικρατέστερο θερμικό ρευστό είναι το νερό και έπειτα τα θερμικά έλαια. Το νερό έχει την μεγαλύτερη χρήση λόγω του χαμηλού του κόστους αλλά και των ικανοποιητικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων στην μεταφορά και την μετάδοση θερμότητας. Το λάδι βέβαια θεωρείται καλύτερο θερμικό ρευστό λόγω της καλής θερμικής συμπεριφοράς του, όμως το κόστος του και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με το νερό είναι πολύ μεγαλύτερες.

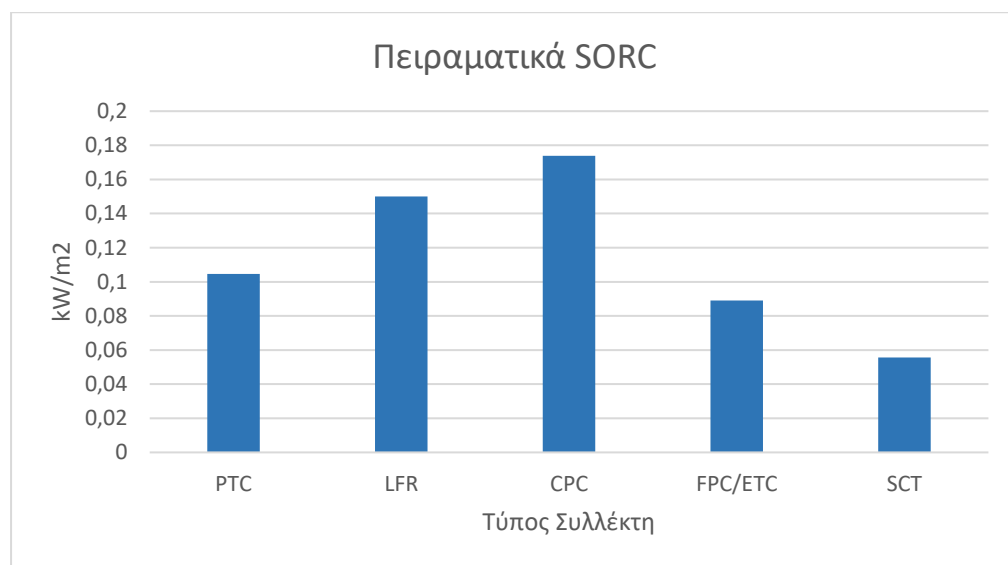
### 7.1.3 Ισχύς SORC ανά επιφάνεια συλλέκτη

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες των πειραματικών και πραγματικών SORC. Γενικότερα συγκρίνοντας τα δύο αυτά διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα πειραματικά ευρήματα έχουν υψηλότερες τιμές στον λόγο εγκατεστημένης ισχύος ανά μονάδα επιφάνεια συλλέκτη, σε σχέση με τα πραγματικά. Αυτή η διαφορά, της τάξεως του 25%, εμφανίζεται διότι τα πειραματικά στοιχεία αντλήθηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον με εξιδανικευμένες συνθήκες, χωρίς απότομες μεταβολές φορτίου και ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πράξη όμως οι καιρικές συνθήκες και η ηλιακή

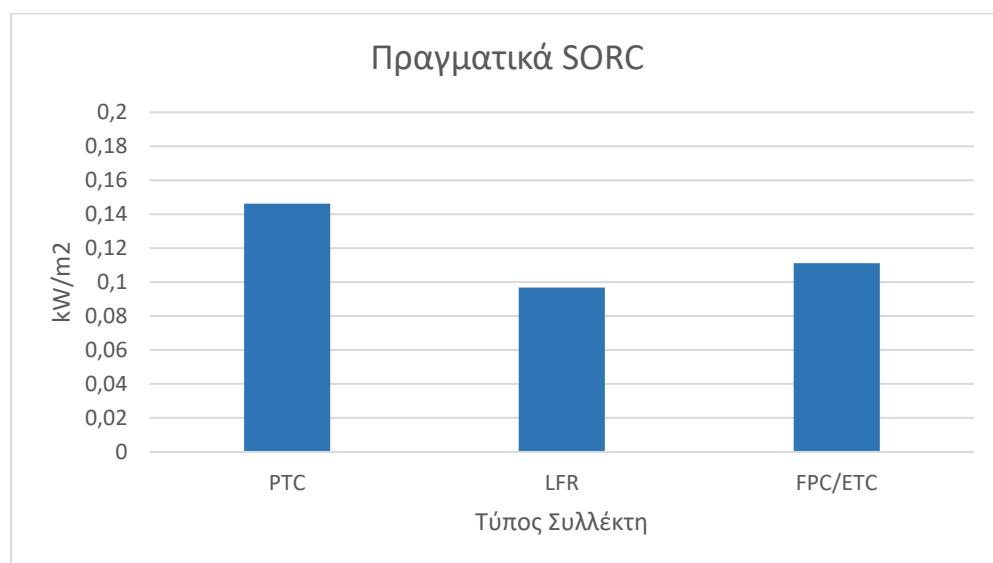
ακτινοβολία μπορεί να μεταβάλλεται συχνά, οδηγώντας το σύστημα σε μεταβατική κατάσταση με μειωμένη απόδοση.

Στο Διάγραμμα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών ερευνών. Σε αυτό προκύπτει ότι η τεχνολογία CPC έχει μεγαλύτερο λόγος ισχύος ανά επιφάνεια συλλέκτη και ακολουθούν οι συλλέκτες LFR και PTC. Στα πραγματικά συστήματα δεν υπάρχει διαθέσιμο σύστημα που χρησιμοποιεί CPC, επομένως δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση με αυτά των πειραματικών.

Στο διάγραμμα των πειραματικών συστημάτων ο λόγος ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη για τους LFR δείχνει να είναι μεγαλύτερος από τον PTC. Όμως στα πραγματικά συστήματα εμφανίζεται ακριβώς το αντίθετο. Αυτό δείχνει ότι η τεχνολογία PTC ανταποκρίνεται καλύτερα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Διάγραμμα 7.1. Ισχύς εκτονωτή ανά μονάδα επιφάνειας σε πειραματικά SORC



Διάγραμμα 7.2. Ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας σε real life SORC

#### 7.1.4 Τοποθεσίες SORC

Οι τοποθεσίες που έχουν εγκατασταθεί συστήματα SORC είναι κυρίως σε θερμές περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια τις περισσότερες μέρες του χρόνου, όπως φαίνεται και στον παρακάτω χάρτη. Η σχετικά υψηλή θερμοκρασία και ηλιοφάνεια είναι δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες για την λειτουργία των ηλιακών ORC, καθώς η κύρια πηγή ενέργειας αυτού του συστήματος είναι η ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 7.1. Χάρτης με τα συστήματα SORC

## 8 Θεωρητικές μελέτες SORC

Στον Πίνακα 8.1 εμφανίζονται μελέτες σε ηλιακούς ORC με την χρήση εξομοιωτικών προγραμμάτων. Στον πίνακα αυτόν σημειώνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων, όπως ο τύπος συλλέκτη που χρησιμοποιήθηκε, το εργαζόμενο μέσο, οι βαθμοί απόδοσης που επιτεύχθηκαν με αυτά τα δεδομένα και τα τελικά σχόλια του εκάστοτε μελετητή για την έρευνα που πραγματοποίησε.

Πίνακας 8.1. Εξομοιωτικά συστήματα SORC

Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφείς)
Yang et al (Yang, et al., 2019)	PTC	MATLAB	Toluene, cyclohexane, hexamethyldisiloxane, και pentane	Απόδοση ORC σε σταθερές συνθήκες: $\eta = 17.9\%$	Η σταθερή παραγωγή ισχύος για μία ημέρα αυξάνει τον β.α του συστήματος κατά 4,2% σε σχέση με την ασταθή λειτουργία
Xu et al. (Xu, et al., 2015)	LFR	MATLAB	Isopentane, n-Pentane, n-Hexane, n-Heptane, Cyclohexane, Toluene	Συνολική απόδοση 19,65%	Το Isopentane έχει την μεγαλύτερη παροχή μάζας και την μεγαλύτερη απόδοση
Wang et al. (Wang, et al., 2013)	FPC	REFPROP	R245fa, R152, R12, R123	Μέγιστος βαθμός απόδοσης ORC $\eta = 7,8\%$ για το R245fa	R245fa και R123 είναι τα πιο κατάλληλα ρευστά
Ustaoglu et al (Ustaoglu, et al., 2019)	CPC	FORTRAN	R-113, R-141b, water, benzene, methanol και cyclohexane	Βαθμός απόδοσης συστήματος: $\eta = 16,7\%$	Καλύτερα αποτελέσματα με το R-141b
Tzivanidis et al. (Tzivanidis, et al., 2016)	PTC	ESS Program	Cyclohexane, Toluene, MM, Water, Isohexane, MDM, n-Pentane, Isopentane, MD4D	Μέγιστη απόδοση ORC: 25,4% για Cyclohexane Συνολική απόδοση 15%	Θερμοκρασία εισόδου στον εκτονωτή 300°C, 9 έτη απόσβεσης της επένδυσης

Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφείς)
Tiwari et al (Tiwari, et al., 2017)	CPC	MATLAB	cyclohexane/R245f	Μέγιστος βαθμός απόδοσης συστήματος περίπου 8%. Θερμικός βαθμός απόδοσης: 40,9% Εξεργειακός β.α: 36,28%	-
Singh et al (Singh & Mishra, 2018)	PTC	EES Software	R134a, R1234yf, R407c, R1234ze, and R245fa	$\eta_{ex} = 9,72-8,54\%$	Max power: 3740 W (R407c)
Singh and Mishra et al. (Singh H, 2017)	PTC	MATLAB	R134a, R1234yf, R407c, R1234ze και R245fa	Καταλληλότερο ρευστό για συνδυασμένο κύκλο (SCO2-ORC) το R407c με εξεργειακό και ενεργειακό β.α του οργανικού κύκλου:75,87% και 42% αντίστοιχα.	Παρατηρείται ότι το 25% της εξεργειακής καταστροφής πραγματοποιείται στον συλλέκτη.
Scardigno et al (Scardigno, et al., 2015)	ETC	NSGA 2	Cyclopropane, R32 και R143a	Μέγιστος β.α: 9,7 %, με ρευστό Cyclopropane	Το Cyclopropane δίνει τον μεγαλύτερο ενεργειακό βαθμό απόδοσης αλλά τον μικρότερο εξεργειακό
Roy et al. (Roy, et al., 2011)	PTC	MATLAB	R-12, R-123, R-134a και R-71	Μέγιστη απόδοση περίπου 19% για R-123	Θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο 470K

Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφείς)
Quoilin et al. (Quoilin, et al., 2011)	PTC	MATLAB	R134a, R245fa, Solkatherm (SES36) και n-pentane	Μέγιστη απόδοση ORC: 13,1 % και συνολική μέγιστη απόδοση 7,9%.	Οι μέγιστες αποδόσεις επιτεύχθηκαν ως εργαζόμενο μέσο το SES36.
Pei et al (Pei, et al., 2010)	CPC	MATLAB	HCFC-123	Απόδοση συστήματος 8,6% με αναγέννηση και 4,9 χωρίς.	-
Ozturk et al. (MuratOzturk, 2013)	SDC	ESS software	Isobutane	Απόδοση ORC 13,51%, Εξεργειακό β.α. ORC 44,88%	Συμπαγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και υδρογόνου. Συνολική ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος 52,7% και 57,4% αντίστοιχα.
Marion et al (Marion, et al., 2012)	FPC	Solkane software	R134a, R227ea and R365mf	Μέγιστος βαθμός απόδοσης συστήματος 11%, με το R365mf	Το R365mf έχει μέγιστη απόδοση σε σχέση με τα άλλα δύο ρευστά. Εξεργειακή απόδοση παρόμοια με φωτοβολταϊκά πάνελ
Manolakos et al (Manolakos, et al., 2005)	ETC	TRNSYS 15.0	HFC-134	Μέγιστος β.α. 7%	Χρήση σε αφαλάτωση νερού
Majumdar et al. (Majumdar, et al., 2018)	PTC	MATLAB	R134a	Συνολική απόδοση συστήματος 21%	Περίπου 17 έτη για την απόσβεση της εγκατάστασης, με ονομαστική ισχύς 750 kW.

Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφέας)
Loni et al (R.Lonia, 2016)	SDC	SolTrace software, REFPROP 8	R113, R601, R11, R141b, Ethanol και Methanol	Μέγιστη απόδοση συστήματος με Methanol: 37,5%	Έναντι των άλλων ρευστών ο Methanol είχε την ελάχιστη αντιστρεψιμότητα.
Lizana et al (Lizana, et al., 2020)	PTC	TRNSYS 8.0 και ASPEN	Toluene	β.α συστήματος 14,6%, $\eta_{ex} = 7,37\%$	Μπορεί να αυξηθεί με την βελτίωση του συλλέκτη
Jing et al (Jing, et al., 2010)	CPC	Dittus-Boelter equations-MATLAB	HCFC-123	Απόδοση συστήματος 7,5%	Αύξηση απόδοσης με την μέθοδο two stage collectors
Helvaci et al (Helvaci & Khan, 2017)	FPC	MATLAB	1-butene, trans-2-butene, cis-2-butene, R600, R600a, R601, R601a, (HC), (HFC), (PFC) and (HFO)	1-butene ( $\eta_{sys}=3.78\%$ ) trans-2-butene ( $\eta_{sys}=3.69\%$ ) cis-2-butene ( $\eta_{sys}=3.72\%$ )	Υψηλότερη απόδοση με 1-butene
Hajabdollahi et al (Hajabdollahi, et al., 2015)	FPC	RPGA	R123, R245fa και isobutan	Το isobutan είχε την μεγαλύτερη οικονομική απόδοση	Το μεγαλύτερο ποσοστό της ετήσιας ενέργειας παράγεται από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο
Eldighidy et al (Eldighidy & Taha, 1983)	FPC	Matlab	R-113, R-11, R21	Μέγιστος βαθμός απόδοσης συστήματος 6% με το R-113	Δεν υπολογίστηκαν οι θερμικές απώλειες του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας



Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφέας)
Cocco et al. (Cocco, et al., 2017)	LFR	Aspen Plus simulation tool	C6H18OSi2	Συνολική απόδοση 20,67%	
Cioccolanti et al. (Cioccolanti, et al., 2017)	LFR	TRNSYS	Novec649	Ετήσια απόδοση ORC: 7,46% Συνολική απόδοση συστήματος: 4,5%	Χρήση για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας
Caldino-Herrera et al. (Caldino-Herrera U, 2017)	PTC	Matlab, CoolProp	Butane, isobutene, R245fa και R245ca	Συνολική απόδοση συστήματος περίπου 8%. Εξεργειακός β.α περίπου 58%.	Σύστημα ισχύος 10,4 kW για παραγωγή ηλεκτρισμού και 124 kW θερμό νερό. Εν δυνάμει οικιακή χρήση
Boyaghchi et al (Fateme Ahmadi Boyaghchi, 2017)	FPC	EXCEL	R134a, R423A, R1234ze και R134yf.	Εξεργειακός β.α: 4,2 %	
Bellos and Tzivanidis et al. (Bellos & Tzivanidis, 2017)	PTC	ESS Program	toluene, MDM, cyclohexane και n-pentane	Ο συνδυασμός εργαζόμενου μέσου toluene με θερμικό ρευστό CuO δίνει απόδοση 20,11%	Αυξημένη απόδοση συλλέκτη 1,74% χρησιμοποιώντας CuO αντί για θερμικά έλαια

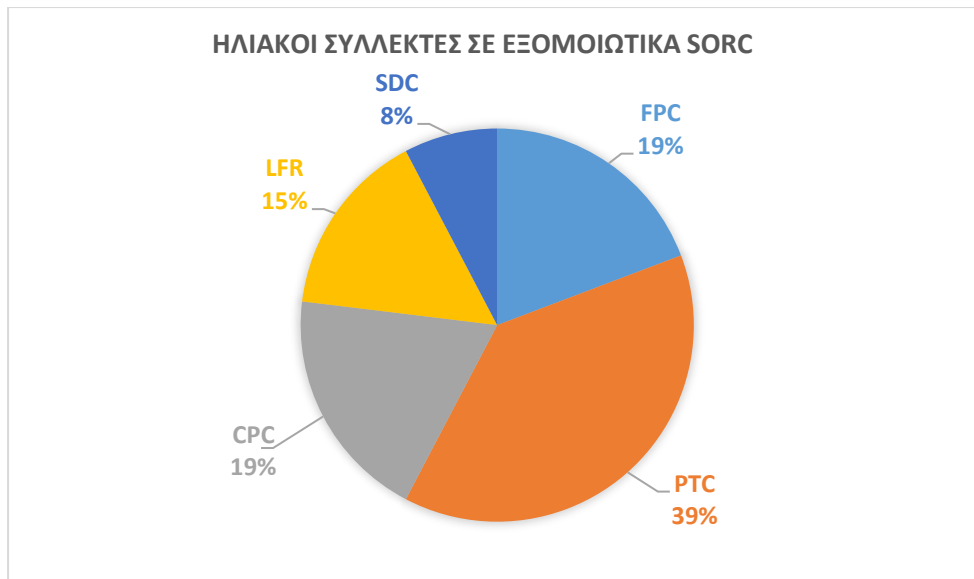
Πηγή	Τύπος συλλέκτη	Εργαλείο Εξομοίωσης	Εργαζόμενο μέσο	Βαθμοί απόδοσης	Σχόλια (με βάση του συγγραφείς)
Antonelli et al. (Antonelli, et al., 2015)	CPC	AMESim v.12.0	R-600a, R134a,	Απόδοση ORC 8,2% Απόδοση συστήματος 3,4%	Η μέγιστη ηλεκτροπαραγωγή γίνεται όταν βελτιστοποιηθούν οι συντελεστές C και β στον συλλέκτη.
Alvi et al (Alvi, et al., 2020)	ETC	Matlab	Benzene, Cyclohexane, Heptane, Hexane, Isohexane, Pentane, Isopentane, R245ca, RE245fa2, R1233zdε, R245fa, Butane	Μέγιστος β.α συστήματος: η=12%	Η μέγιστη απόδοση παρατηρείται στο Heptane

Από το Διάγραμμα 8.1, που εμφανίζεται παρακάτω μπορεί να παρατηρηθεί ότι από το σύνολο των συστημάτων που εμφανίζονται, το 39% αυτών χρησιμοποιεί την τεχνολογία των γραμμικών παραβολικών ηλιακών συλλεκτών (PTC). Όπως φαίνεται και από τον **Error! Reference source not found.**, τα συστήματα που λαμβάνουν θερμότητα από τους PTC έχουν τον μεγαλύτερο ενεργειακό βαθμό απόδοσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της καλύτερης συμβατότητας στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας που έχουν ο συλλέκτης και ο ORC (Singh & Mishra, 2018).

Έπειτα από τους PTC ακολουθούν οι FPC και οι CPC. Σε σχέση με τον FPC, ο PTC εμφανίζει μικρότερη εξεργειακή καταστροφή και ταυτόχρονα σχεδόν ίσο κόστος απόκτησης και εγκατάστασης. Οι PTC σε σχέση με τους CPC φαίνεται να έχουν καλύτερη ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση. Σε θέμα κόστους οι PTC τείνουν να είναι φθηνότεροι λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής τους και της καλύτερης απόδοσης. Οι PTC σε σχέση με τους LFR έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, όμως το κόστος των LFR είναι σημαντικά μικρότερο. Ωστόσο η τεχνολογία των LFR είναι λιγότερο “ώριμη” ερευνητικά από την PTC.

Πίνακας 8.2. Βαθμοί Απόδοσης Συλλεκτών

Τύπος συλλέκτη	Μέσος όρος βαθμού απόδοσης Συστήματος $SORC, \eta_{sys}$ (%)
FPC	7
PTC	16,7
LFR	15
CPC	8,9
Συνολικός Μ.Ο $\eta_{sys}$	11,9



Διάγραμμα 8.1. Χρήση Συλλεκτών σε SORC

### 8.1 Λογισμικό για την εξομοίωση των SORC

Τα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξομοίωση λειτουργίας των ηλιακών ORC επιλέγονται με διάφορα κριτήρια από τους ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα τα βασικότερα κριτήρια είναι το κόστος του λογισμικού, η ευκολία χρήσης του και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία το πιο συχνό λογισμικό εξομοίωσης είναι το MATLAB, με ποσοστό περίπου 40% των μελετών να χρησιμοποιούν αυτό για τις εξομοιώσεις τους. Τα βασικά πλεονεκτήματα του είναι:

1. η χαμηλή τιμή απόκτησης του, λαμβάνοντας υπόψιν ότι σε πολλά πανεπιστήμια το λογισμικό αυτό δίνεται δωρεάν,
2. Η εύκολη εύρεση έτοιμων πακέτων κώδικα, κάνοντας ευκολότερη την εξομοίωση,
3. Σχετικά υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων, με δυνατότητες προσαρμογής του κώδικα και βελτιστοποίησης των αποτελεσμάτων.

### 8.2 Συμπεράσματα για τα οργανικά ρευστά των SORC στις θεωρητικές εργασίες

Τα ρευστά που προτείνονται σύμφωνα με τους ερευνητές για χρήση σε ηλιακούς ORC επισημαίνονται, ανάλογα με τον ηλιακό συλλέκτη που θα χρησιμοποιηθεί, στον Πίνακα 8.3. Η επιλογή του ρευστού δεν αποτελεί κάτι απλό και τα κριτήρια για την επιλογή του συμπεριλαμβάνουν πολλές παραμέτρους, όπως επισημάνθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας. Επομένως, σύμφωνα με τα case studies που αναλύθηκαν, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τα προτεινόμενα μέσα για χρήση σε ηλιακό οργανικό κύκλο Rankine ανάλογα με τον συλλέκτη που θα χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 8.3. Προτεινόμενα εργαζόμενα μέσα

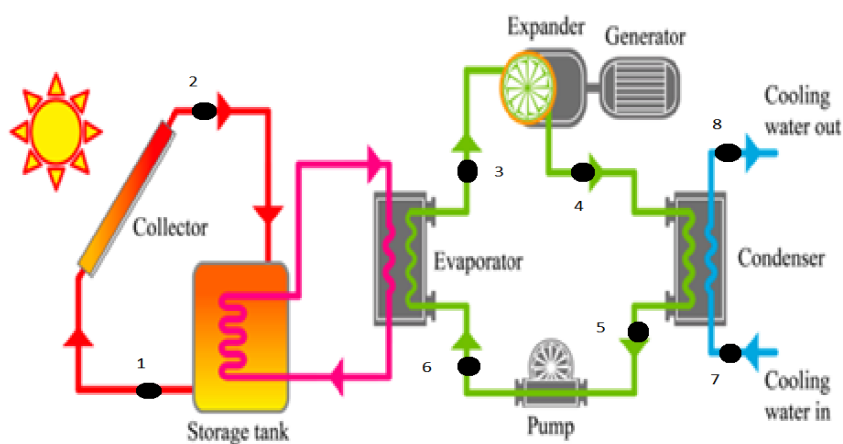
Τύπος Συλλέκτη	Εργαζόμενο μέσο
FPC	1-βουτάνιο, R134a, R423A, R1234ze, R134yf, R-113, R365mf, R245fa
PTC	R407c, Toluene, κυκλοεξάνιο, πεντάνιο, R-123, R245fa, R134a, R407c, R245ca
ETC	Επτάνιο, κυκλοπροπάνιο, R134a
CPC	R-141b, R245f, R123
LFR	Ισοπεντάνιο, εξάνιο, Toluene, Novac649
SDC	Ισοβουτάνιο, R113, R601, R11, R141b, αιθανόλη, μεθανόλη

### 8.3 Τοπολογίες που έχουν επιλεγεί για θεωρητική μελέτη των SORC

Στο Υποκεφάλαιο 3.3 έγινε αναφορά στις τοπολογίες που μπορούν να εντοπιστούν στα ηλιακά συστήματα οργανικών κύκλων. Στις περισσότερες αναφορές του **Error! Reference source not found.**, οι τοπολογίες που χρησιμοποιούνται είναι ο Απλός Οργανικών Κύκλος Rankine, με ή χωρίς υπερθέρμανση και ο Αναγεννητικός Κύκλος Rankine. Από τις εξομοιωτικές αναφορές προκύπτει ότι οι πιο περίπλοκοι οργανικοί κύκλοι, όπως ο Κύκλος Διαχωρισμού, πετύχαιναν μεν λίγο μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τους προαναφερόμενους, αλλά διατηρούσαν υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα.

## 9 Ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση

Στην Εικόνα 9.1 εμφανίζεται ένα τυπικό διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλιακού ORC. Οι διεργασίες που εκτελούνται σε αυτό το σύστημα μπορούν να χαρακτηριστούν παρακάτω. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στον ηλιακό συλλέκτη (Collector). Το ψυχρό θερμικό ρευστό που κυκλοφορεί στο σύστημα του συλλέκτη διέρχεται μέσα από αυτόν, θερμαίνεται και στην συνέχεια αποθηκεύεται στην θερμική δεξαμενή (storage tank). Μέσω αντλίας το θερμό μέσο κυκλοφορεί στο κύκλωμα και περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας (ατμοποιητή - evaporator). Το οργανικό μέσο θερμαίνεται μέσω του εναλλάκτη θερμότητας και ατμοποιείται. Στην συνέχεια οδηγείται στον εκτονωτή (expander), όπου και αποβάλλει ενέργεια για την παραγωγή έργου στην έξοδο της ατράκτου του εκτονωτή, παράγοντας ηλεκτρισμό σε μία γεννήτρια (generator). Εφόσον το οργανικό μέσο φύγει από τον εκτονωτή οδηγείται στον συμπυκνωτή (condenser) όπου αλλάζει φυσική φάση από αέριο σε υγρό αποβάλλοντας θερμότητα. Έπειτα το ρευστό εισέρχεται σε μία αντλία (pump) ή οποία εξαναγκάζει το ρευστό να κυκλοφορεί μέσα στο σύστημα και έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος.



Εικόνα 9.1. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ηλιακού οργανικού κύκλου Rankine μικρής κλίμακας.

## 9.1 Βασικές Θερμοδυναμικές Αρχές

### 9.2 Παραδοχές Ανάλυσης

Για να αναλυθεί ο ηλιοβοηθούμενος οργανικός κύκλος θα πρέπει αρχικά να αναφερθούν οι παραδοχές που λήφθηκαν υπόψιν.

- Όλα οι θερμοδυναμικά συστήματα και διεργασίες είναι σε σταθερή κατάσταση
- Οι αντλία του οργανικού ρευστού και ο εκτονωτής είναι αδιαβατικές συσκευές
- Ο οργανικός κύκλος και το κύκλωμα του συλλέκτη έχουν αμελητέα πτώση πίεσης λόγω απωλειών εντός των σωληνώσεων της εγκατάστασης και στους εναλλάκτες θερμότητας (ατμοποιητή, συμπυκνωτή)
- Η κατάσταση αναφοράς (dead state) θεωρείται με θερμοκρασία 25 βαθμούς Κελσίου και πίεση 1 ατμόσφαιρα.

Εφόσον τέθηκαν οι παραδοχές που εφαρμόστηκαν σε αυτή την ανάλυση παρακάτω παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση ενός SORC.

Το ενεργειακό ισοζύγιο για όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος βασίζονται στον 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο. Η γενική εξίσωση σε σταθερή κατάσταση για κάθε εξάρτημα μπορεί να γραφτεί ακολούθως:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum (\dot{m}_{in} h_{in}) - \sum (\dot{m}_{out} h_{out}) = 0 \quad (2)$$

Όπου:

- οι δείκτες in και out συμβολίζουν την εισαγωγή και την εξαγωγή αντίστοιχα
- $\dot{m}$  και  $h$  συμβολίζουν την ροή μάζας και την ειδική ενθαλπία του οργανικού μέσου αντίστοιχα
- $\dot{Q}$  και  $\dot{W}$  συμβολίζει την μεταφορά θερμότητας που υφίσταται το εξάρτημα και την παραγωγή έργου αντίστοιχα.

Η εξεργειακή ανάλυση είναι μία τεχνική θερμοδυναμικής ανάλυσης που βασίζεται στον 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Αξίωμα. Η βασική της χρησιμότητα είναι να γίνεται αξιολόγηση και σύγκριση διεργασιών και συστημάτων μεταξύ τους (Ibrahim, 2012).

Με το βαθμό της εξεργειακής απόδοσης μπορούμε να αξιολογήσουμε ένα σύστημα ή την μετατροπή ενέργειας, κατά το πόσο αποδοτικά λειτουργεί ή διεξάγεται ή μεταβολή. Αυτό που θα δείξουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι ο δείκτης που μπορεί να αξιολογήσει ένα σύστημα στο σύνολο του, όπου μπορεί να έχει πολλές μορφές

ενέργειας (ηλεκτρισμό, θερμότητα, κινητική κτλ.). Ο όρος: second law efficiency είναι συνώνυμο της εξεργειακής απόδοσης. (άλλαξε το κατάλληλα)

Επιπλέον προσδιορίζει τις αιτίες και τα σημεία που υπάρχουν οι θερμοδυναμικές απώλειες με μεγαλύτερη σαφήνεια από την ενεργειακή ανάλυση (Ibrahim, 2012). Ως το ιδανικό σύστημα είναι αυτό που μπορεί να παράγει το μέγιστο θεωρητικό έργο, όταν αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον του. Η εξεργειακή καταστροφή σε κάθε εξάρτημα του συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί εφαρμόζοντας εξεργειακό ισοζύγιο σε αυτό και για σταθερές συνθήκες εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\dot{E}_Q + \dot{W} = \sum \dot{E}_{out} - \sum \dot{E}_{in} + \dot{E}_d \quad (3)$$

Όπου  $E_d$  το ποσοστό μη αντιστρεψιμότητας της συσκευής και  $E$  η τιμή της εξέργειας.

Η ειδική εξεργειακή ροή  $ef$  δίνεται από την σχέση  $ef = h - h_0 - T_0(s - s_0)$  και η τιμή της εξέργειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\dot{E}f = \dot{m} ef \quad (4)$$

Η μεταφορά εξέργειας λόγω θερμότητας και έργου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\dot{E}_Q = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q} \quad (5)$$

Όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία νεκρής κατάστασης, που περιγράφει την κατάσταση του συστήματος όταν είναι σε ισορροπία με το περιβάλλον, και  $T_b$  είναι η οριακή θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η μεταφορά θερμότητας.

### 9.3 Ενεργειακή και Εξεργειακή Ανάλυση Συλλέκτη

Ο ρυθμός μεταφοράς ωφέλιμης ενέργειας από τον συλλέκτη υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c C_p (T_o - T_i) \quad (6)$$

Όπου  $C_p$  ορίζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα,  $\dot{m}_c$  η παροχή μάζας που κυκλοφορείται στον συλλέκτη και  $T_o$  και  $T_i$  είναι οι θερμοκρασίες εξόδου και εισόδου του θερμικού μέσου στον συλλέκτη.



Το ενεργειακό ισοζύγιο του συλλέκτη μπορεί να με βάση την εξίσωση 7:

$$\dot{m}_c (h_i - h_o) + Q_{loss} = G_b \eta_c A_c \quad (7)$$

Όπου  $\eta_c$ ,  $A_c$  και  $G_b$  είναι ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη, η επιφάνεια του συλλέκτη και η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στον συλλέκτη, αντίστοιχα και  $h_o, h_i$  οι ειδικές ενθαλπίες του θερμικού μέσου στην έξοδο και στην είσοδο αντίστοιχα.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος λαμβάνει υπόψιν τις ενεργειακές απώλειες σε όλα τα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος και υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\eta_{SORC} = \eta_c \times \eta_{ORC} \quad (8)$$

Η εξέργεια που λαμβάνεται στον συλλέκτη από τον ήλιο, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του εξωτερικού φλοιού του ήλιου ( $T_s = 5800 K$ ) και υπολογίζεται με την παρούσα σχέση (Suresh Baral, 2015):

$$E_{sun} = A_c G_b \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_0}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{T_0}{T_s} \right) \right] \quad (9)$$

Ο καθαρός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος ορίζεται ως:

$$\eta_{ex,el} = \frac{W_{net}}{Ex_{in}} \quad (10)$$

#### 9.4 Ενεργειακή και εξεργειακή Ανάλυση Οργανικού Κύκλου

Το ισοζύγιο θερμότητας και εξέργειας στον ατμοποιητή και τον συμπυκνωτή χαρακτηρίζεται από τις εξής σχέσεις:

$$Q_{eva} = \dot{m}_c (h_1 - h_2) = \dot{m}_f (h_3 - h_6) \quad (11)$$

$$E_{eva} = (\dot{E}_1 - \dot{E}_2) - (\dot{E}_3 - \dot{E}_6) \quad (12)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_w (h_8 - h_7) = \dot{m}_f (h_4 - h_5) \quad (13)$$

$$E_{cond} = (\dot{E}_7 - \dot{E}_8) - (\dot{E}_5 - \dot{E}_4) \quad (14)$$

Όπου  $E_{eva}$  και  $E_{cond}$  είναι η μη αναστρεψιμότητα στον ατμοποιητή και στον συμπυκνωτή αντίστοιχα και  $m_c$ ,  $m_f$ ,  $m_w$  είναι οι παροχές μάζας του συλλέκτη, του εργαζόμενου μέσου και του νερού ψύξης αντίστοιχα.

Η εξεργειακή απόδοση στον ατμοποιητή και τον συμπυκνωτή μπορούν να εκφραστούν με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\eta_{eva} = 1 - \frac{E_{eva}}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2} \quad (15)$$

$$\eta_{cond} = 1 - \frac{E_{cond}}{\dot{E}_4 - \dot{E}_5} \quad (16)$$

Η ενεργειακή μετατροπή, το εξεργειακό ισοζύγιο και η εξεργειακή ανάλυση του εκτονωτή ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$W_{ex} = \dot{m}_f(h_3 - h_6) \quad (17)$$

$$E_{ex} = \dot{E}_3 - (\dot{E}_4 + W_{ex}) \quad (18)$$

$$\eta_{ex} = \frac{W_{ex}}{\dot{E}_3 - \dot{E}_4} \quad (19)$$

Επιπλέον, το ενεργειακό και εξεργειακό ισοζύγιο και η εξεργειακή απόδοση της αντλίας ορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$W_p = \dot{m}_f(h_6 - h_5) \quad (20)$$

$$E_{pump} = (\dot{E}_5 + W_{pump}) - \dot{E}_6 \quad (21)$$

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_4}{W_{pump}} \quad (22)$$

Το καθαρό έργο από το σύστημα δίνεται από την σχέση:

$$W_{net} = W_{ex} - W_{pump} \quad (23)$$

Η συνολική θερμοδυναμική απόδοση του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από τους ενεργειακούς και εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης. Ο συνολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος ORC εκφράζεται με τη σχέση:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{eva}} \quad (24)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης, ορίζεται ως η χρήσιμη έξοδος εξέργειας από το σύστημα, που στην ουσία είναι το καθαρό έργο από το σύνολο της εξέργειας που εισήλθε στο σύστημα. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_h[(h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2))]} \quad (25)$$

Η συνολική καταστροφή εξέργειας στο όλον τον κύκλο είναι το άθροισμα της καταστροφής εξέργειας στα επιμέρους εξαρτήματα του:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{eva} + \dot{E}_{cond} + \dot{E}_{ex} + \dot{E}_{pump} \quad (26)$$

Επιπλέον είναι σημαντική η αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός ηλιακού ORC. Στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης απαιτείται η αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Αυτή μπορεί να γίνει μέσω του δείκτη βιωσιμότητας (SI), ο οποίος ορίζεται ως συνάρτηση της αποτελεσματικότητας της εξέργειας (Ibrahim, 2012). Με άλλα λόγια είναι μέσο μέτρησης της βιωσιμότητας του συστήματος και των διεργασιών που πραγματοποιούνται στο σύστημα που βασίζεται στην εξέργεια. Αυτή η αξιολόγηση μπορεί να υποδείξει πιθανούς τρόπους βελτίωσης του κύκλου και σχεδιασμό καλύτερών του. Όσο υψηλότερος είναι ο δείκτης βιωσιμότητας τόσο καλύτερο είναι το σύστημα (Ibrahim, 2012):

$$SI = \frac{1}{1 - \eta_{exg}} \quad (27)$$

$$SI = \frac{\dot{m}_h[(h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2))]}{\dot{m}_f T_0 \left[ \frac{h_3 - h_6}{T_H} + \frac{h_4 - h_5}{T_C} \right]} \quad (27a)$$

Όπου  $T_H$  και  $T_C$  οι θερμοκρασίες πηγής θερμότητας(θερμό ρευστό) και ψύχρας (ψυχρό ρευστό).

Σύμφωνα με την ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα ηλιακά συστήματα ORC και με βάση τους πίνακες 3,4 και 5 φαίνεται ότι η μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας παρουσιάζεται στον συλλέκτη με μέσο όρο το 70-75% της καταστροφής να προκαλείται εκεί. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει ουσιαστική ανάγκη για καλύτερο και αποδοτικότερο σχεδιασμό των συλλεκτών προκειμένου να μειωθεί η απώλεια εξέργειας. Έπειτα από τους ηλιακούς συλλέκτες ο συμπυκνωτής παρουσιάζει και

αυτός μεγάλες εξεργειακές απώλειες με μέσο όρο περίπου το 18-20% της καταστροφής να προκαλείται εκεί.

Πίνακας 9.1. Μέσες τιμές εξεργειακής καταστροφής ανά εξάρτημα

Εξαρτήματα	Ποσοστό εξεργειακής καταστροφής(%)
Ηλιακός Συλλέκτης	75%
Ατμοποιητής	3,5%
Εκτονωτής	3%
Συμπυκνωτής	18%
Αντλία ORC	0,3%
Αντλία Συλλέκτη	0,04%

Στα περισσότερα συστήματα που μελετήθηκαν οι συνολική εξεργειακή απόδοση κυμαίνεται από 40-46%, με ελάχιστες εξαιρέσεις να πετυχαίνουν βαθμούς απόδοσης αρκετά ή λίγο χαμηλότερους από τον μέσο όρο. Ως αναφορά τον συνολικό ενεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος, ο μέσος όρος που προκύπτει από τα εξεταζόμενα συστήματα προκύπτει 9,6%. Ωστόσο υπάρχει μεγάλη διασπορά στις τιμές που παρουσιάζουν τα συστήματα. Η ελάχιστη τιμή του βαθμού απόδοσης που εμφανίζεται στην ανασκόπηση είναι το 3%, ενώ σε μία έρευνα παρουσιάστηκε βαθμός απόδοσης συστήματος 21%.

## 10 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την επιστημονική ανασκόπηση των Ηλιοβοηθούμενων Οργανικών κύκλων Rankine, με μεγαλύτερη εστίαση στα συστήματα μικρής κλίμακας. Οι αρχικοί στόχοι που τέθηκαν στην αρχή της εργασίας είναι η διεξαγωγή ανασκόπησης και ανάλυση στην υπάρχουσα επιστημονική βιβλιογραφία, με σκοπό να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η τεχνολογία αλλά και μελλοντικές τάσεις που μπορεί να ακολουθήσει. Η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα παραπάνω αποσκοπεί να απαντήσει στο ερώτημα, αν τα συστήματα SORC μπορούν να εγκατασταθούν για την αξιοποίησή τους σε οικιακή ή μικρή κοινοτική κλίμακα. Επιπλέον έγινε προσπάθεια αναζήτησης των βασικών εξαρτημάτων που αποτελούν του Ηλιοβοηθούμενους ORC και η ανάλυση τους, με στόχο να βρεθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας και τις τοπολογίες που ενδεχομένως να έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Επίσης βασικός στόχος είναι η ανάλυση των οργανικών ρευστών που χρησιμοποιούνται στον οργανικό κύκλο, αλλά και άλλα ρευστά που μπορεί να εργάζονται σε δευτερεύοντα συστήματα για την λειτουργία του SORC. Για την απάντηση των ερευνητικών ερωτήσεων που τέθηκαν στην αρχή της εργασίας, ακολουθήθηκε μία μεθοδολογία και εξήχθησαν συμπεράσματα, συνολικά για τα συστήματα ηλιοβοηθούμενων οργανικών κύκλων Rankine, αλλά και για τα επιμέρους εξαρτήματα αυτών, ενεργειακά και εξεργειακά. Πιο συγκεκριμένα ερευνήθηκαν δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά σε σχέση με το συγκεκριμένο θέμα και αναγνώστηκαν βιβλία που βοήθησαν στην κατανόηση του θέματος.

### 10.1 Εγκατάσταση SORC σε μικρές ενεργειακές κοινότητες ή οικίες

Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα που έγινε προσπάθεια να απαντηθεί είναι κατά πόσο οι SORC μπορούν να εφαρμοστούν ως μικρές εγκαταστάσεις σε κτήρια ή συνοικίες. Με βάση τα αποτελέσματα της ανασκόπησης πολλά συστήματα που μελετήθηκαν είχαν εγκατασταθεί ή είχαν σχεδιαστεί για να εγκατασταθούν για αυτή την χρήση. Η τεχνολογία έχει την δυνατότητα να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις που ζητούνται για οικιακή χρήση. Ωστόσο στην παρούσα εργασία έγινε ενεργειακή ανάλυση χωρίς να ληφθεί υπόψιν το οικονομικό σκέλος. Επομένως για να υπάρχουν ασφαλή συμπεράσματα για την βιωσιμότητα των SORC ως επένδυση θα πρέπει να εξεταστεί και από οικονομικής σκοπιάς. Σε μελλοντική εργασία ή σε συνέχεια αυτής θα μπορούσε να εξεταστεί από τεχνοοικονομικής σκοπιάς το συγκεκριμένο θέμα δημιουργώντας έτσι ολοκληρωμένα συμπεράσματα.

### 10.2 Ανασκόπηση της τεχνολογικής κατάστασης των SORC

Οι τοπολογίες που εμφανίζονται κυρίως στα ηλιακά συστήματα με οργανικό κύκλο Rankine φαίνεται να είναι ο απλός οργανικός κύκλος, που αποτελεί την οικονομικότερη αλλά λύση με σχετικά καλή απόδοση και ο αναγεννητικός κύκλος Rankine, ο οποίος καταφέρνει να έχει λίγο μεγαλύτερο επενδυτικό κόστος συγκριτικά με τον απλό αλλά μπορεί να πετύχει αρκετά μεγαλύτερες αποδόσεις, ανάλογα φυσικά και τα χαρακτηριστικά που έχει το σύστημα. Σε σπανιότερες

περιπτώσεις εμφανίζονται και πιο περίπλοκες τοπολογίες αλλά κυρίως αναφέρονται σε μεμονωμένες ειδικές περιπτώσεις που χρησιμοποιούν αυτά τα συστήματα για πολυπαραγωγή, όπως για παράδειγμα ηλεκτρισμό σε συνδυασμό με παροχή θερμού νερού και συστήματος ψύξης. Σε συστήματα που η υψηλή απόδοση είναι προτεραιότητα φαίνεται να κυριαρχεί ο κρίσιμος και υπερκρίσιμος οργανικός κύκλος, όπου το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται και θερμαίνεται πάνω από την κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία, ξεπερνώντας ουσιαστικά την περιοχή των δύο φάσεων και πετυχαίνοντας καλύτερες αποδόσεις λόγω της καλύτερης μεταφορά θερμότητας από την πηγή στο εργαζόμενο μέσο. Όπως παρατηρήθηκε δεν υπάρχει η καλύτερη τοπολογία για τα ηλιακά συστήματα ORC, αλλά εξαρτάται από την χρήση που προορίζονται, το κόστος και τον τρόπο λειτουργίας τους. Επομένως η τοπολογία είναι ένα μέρος του συστήματος που πρέπει να γίνει εξατομικευμένη μελέτη για κάθε ένα σύστημα, εάν ο στόχος είναι η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση με όσο γίνεται μικρότερο κόστος.

Στο κεφάλαιο των ηλιακών συλλεκτών, έγινε ανασκόπηση στις τεχνολογίες και στα συστήματα για την πρόσληψη θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία. Από την έρευνα που έγινε οι δύο βασικότερες τεχνολογίες ηλιακών συλλεκτών είναι ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης κενού (ETC) και ο γραμμικός παραβολικός συλλέκτης (PTC).

Το βασικό πλεονέκτημα του πρώτου είναι η απλότητα της κατασκευής και το σχετικά μικρό κόστος απόκτησης του. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας που μπορεί να φτάσει ένας συλλέκτης αυτού του τύπου είναι 100-120 βαθμούς κελσίου. Επομένως προορίζεται για χρήση σε οργανικούς κύκλους με χαμηλές θερμοκρασιακές απαιτήσεις.

Ο δεύτερος τύπος συλλέκτη αποτελεί την καλύτερη λύση για παραγωγή ενέργειας μέσω ενός συστήματος SORC. Έχει την υψηλότερη απόδοση, εξαιρουμένου του παραβολικού πιάτου (βλ. 4.4.3). Το κόστος του σχετικά με τον ETC είναι υψηλότερο αλλά όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 0 η απόδοση του είναι αρκετά υψηλότερη. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας αυτού του συλλέκτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο συγκέντρωσης των ακτινών του ηλίου πάνω στον θερμικό δέκτη και κυμαίνεται από 60 °C που είναι το κατώτατο όριο έως και 300 °C, που εμφανίζεται σε συστήματα υψηλής απόδοσης για παραγωγή ενέργειας. Άξιο για περαιτέρω διερεύνηση είναι η τεχνολογία των συλλεκτών Fresnel (LFR). Η τεχνολογία αυτή περιέχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τους PTC, αλλά ακόμα βρίσκεται σε αρχικό πειραματικό στάδιο με πολύ λίγες εφαρμογές σε πραγματικά συστήματα. Ωστόσο τα δεδομένα δείχνουν ότι αποτελεί οικονομικότερη λύση με σχεδόν την ίδια ενεργειακή απόδοση με τους PTC, όπως συμπεραίνεται στην σύγκριση που έγινε στο Κεφάλαιο 3.

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου που θα κυκλοφορεί στον οργανικό κύκλο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και πρέπει πρώτα να γίνει ανάλυση των προδιαγραφών που απαιτείται να έχει ένα εργαζόμενο μέσο για κάθε σύστημα. Στην ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε τα πιο συχνά οργανικά ρευστά που εμφανίζονται σε οργανικούς κύκλους με ηλιακούς συλλέκτες είναι τα R134a, το

R245fa και υδρογονάνθρακες όπως το βουτάνιο, το προπάνιο και το εξάνιο. Το R123a είναι το συχνότερο σε εφαρμογές με χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας έως 100 °C καθώς έχει την καλύτερη απόδοση και τις καλύτερες δυνατές ιδιότητες για την ασφαλή χρήση του. Ωστόσο για υψηλότερες θερμοκρασίες πάνω από 200 °C ως και 400 °C το καταλληλότερο οργανικό ρευστό είναι το Toluene.

### 10.3 Ενεργειακός και εξεργειακός βαθμός απόδοσης SORC

Τα συστήματα που φαίνεται να παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης είναι αυτά που χρησιμοποιούν τους συλλέκτες PDC. Αυτός ο τύπος συλλέκτη όμως εργάζεται σε υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να φτάνουν από 600-1000 °C. Η λειτουργία ενός οργανικού κύκλου Rankine σε αυτές τις θερμοκρασίες εμπεριέχει πολλούς κινδύνους καθώς τα περισσότερα οργανικά ρευστά στις θερμοκρασίες αυτές αυταναφλέγονται. Επιπλέον τα συστήματα για να υποστηρίξουν αυτά τα ποσά θερμότητας θα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένα με μελετημένα υλικά ώστε να αντέχουν τις θερμικές καταπονήσεις. Επομένως ως τεχνολογία συλλέκτη έχει σχεδόν εξαφανιστεί, δίνοντας την θέση τους στους PTC, οι οποίοι έχουν καλή απόδοση και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Γενικότερα τα συστήματα οργανικών κύκλων Rankine με πρόσδοση θερμότητας από ηλιακό συλλέκτη (SORC) έχουν θερμική απόδοση από 3-15%, ανάλογα την τοπολογία του οργανικού κύκλου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των εξαρτημάτων του. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σχεδόν σε όλα τα συστήματα που μελετήθηκαν από 5-15 %. Οι περισσότερες εξεργειακές απώλειες παρατηρούνται στον ηλιακό συλλέκτη, σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 70% και στην συνέχεια στον συμπυκνωτή. Επομένως η προσοχή των μελετητών όσο αναφορά την βελτιστοποίηση των SORC είναι να αναπτυχθούν τεχνολογικά οι συλλέκτες ώστε το ποσοστό αυτό να μειωθεί σημαντικά. Με αυτό ως αποτέλεσμα η απόδοση των SORC μπορεί να φτάσει και στα υψηλά επίπεδα του 20-30%. Με αυτό τον τρόπο τα συστήματα αυτά θα είναι περισσότερο ελκυστικά ως επενδύσεις και επομένως θα μπορούσαν να λάβουν μεγάλο μέρος της παραγωγής ενέργειας με την χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας.

## Αναφορές

A. Schuster, S. K. E. K. H. S., 2009. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, 31 8, pp. 1809-1817.

Ali Mohammed Hayder, A. B. S. Q. A. A., 2017. REVIEW OF SOLAR THERMAL STORAGE TECHNIQUES. *N Journal of Engineering and Applied Sciences*, Issue 12, pp. 6103-6119.

Alireza Refiei, R. L. G. N. A. S. E. B., 2020. Effect of use of MWCNT/oil nanofluid on the performance of solar organic Rankine cycle. *Energy Reports*, Τόμος 6, pp. 782-794.

Alvi, J. Z. και συν., 2020. Modelling, simulation and comparison of phase change material storage based direct and indirect solar organic Rankine cycle systems. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 170, p. 114780.

Antonelli, M. και συν., 2015. Electrical production of a small size Concentrated Solar Power plant with compound parabolic collectors. *Renewable Energy*, Τόμος 83, pp. 1110-1118.

Arash Nemati, H. N. M. Y., 2018. Assessment of different configurations of solar energy driven organic flash cycles (OFCs) via exergy and exergoeconomic methodologies. *Renewable Energy*, Issue 115, pp. 1231-1248.

B. Saleh, G. K. M. W. a. J. F., 2007. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles`. *Energy*, Issue 32, pp. 1210-1221.

Becquin G, F. S., 2012. *Comparative performance of advanced power cycles for low-temperature heat sources*. s.l., s.n.

Bellos, E. & Tzivanidis, C., 2017. Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, Τόμος 114, pp. 1376-1393.

Bertrand F. Tchanche, M. P. G. P., 2014. Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9 8, pp. 1186-1198.

Caldino-Herrera U, C. L. J. O. G. J. U. G. F. F., 2017. Small Organic Rankine Cycle Coupled to Parabolic Trough Solar Concentrator. *Energy Procedia*, Issue 129, pp. 700-707.

Canada, S. B. D. K. G. M. L. C. R. P., 2005. Status of APS 1-Mwe parabolic trough project. *Solar Energy Technologies*.

Christos Tzivanidis, E. B. K. A. A., 2016. Energetic and financial investigation of a stand-alone solar-thermal Organic Rankine Cycle power plant. *Energy Conversion and Management*, Issue 126, pp. 421-433.



Cioccolanti, L., Tascioni, R. & Arteconi, A., 2017. Simulation analysis of an innovative micro-solar 2kWe Organic Rankine Cycle plant for residential applications. *Energy Procedia*, Τόμος 142, pp. 1629-1634.

Cocco, D., Petrollese, M. & Tola, V., 2017. Exergy analysis of concentrating solar systems for heat and power production. *Energy*, Τόμος 130, pp. 192-203.

D. Manolakos, G. K. S. K. G. P., 2009. On site experimental evaluation of a low-temperature solar organic Rankine cycle system for RO desalination. *Solar Energy*, Issue 83, pp. 646-656.

E. Bellos, C. T. a. A. P., 2018. Optical and thermal analysis of a linear Fresnel reflector operating with thermal oil, molten salt and liquid sodium. *Appl. Therm. Eng.*, Issue 123, pp. 70-80.

E. Bellos, C. T. K. A. a. I. D., 2016. The use of gas working fluids in parabolic trough collectors—An energetic and exergetic analysis. *Appl. Therm. Eng.*, Issue 109, pp. 1-14.

E. Bellos, D. K. C. T. K. A., 2016. Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19 3, Issue 16, pp. 53-63.

EEA, E. E. A., 2021. *Climate change mitigation*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.eea.europa.eu/themes/climate> [Πρόσβαση 27 2 2022].

Eldighidy, S. M. & Taha, I. S., 1983. Optimum mass flow rate of water in a flat plate solar collector coupled with a storage tank and an organic Rankine cycle power loop. *Solar Energy*, Τόμος 31, pp. 455-461.

ESTELA, E. S. T. E., 2012. *Strategic research agenda 2020-2025*, Bruxelles, Belgique: European Solar Thermal Electricity Association.

Evangelisti, L., Vollaro, R. D. L. & Asdrubali, F., 2019. Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review. Τόμος 114, p. 109318.

Evangelos Bellos, C. T. K. A. A., 2016. A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough. *Applied Thermal Engineering*, Issue 114, pp. 374-386.

Evangelos Bellos, 2019. Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors – A critical review. *Thermal Science and Engineering Progress*, Issue 10, pp. 112-137.

F. Burkholder, C. K., 2009. *Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver*, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory.

Fateme Ahmadi Boyaghchi, M. C., 2017. Multi-criteria optimization of a micro solar-geothermal CCHP system applying water/CuO nanofluid based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental concepts. *Applied Thermal Engineering*, Issue 112, pp. 660-675.

- Fenton, D. A. G. K. G. O. J., 1984. Operation and evaluation of the Willard solar thermal power irrigation system. *Solar Energy*, Issue 32, pp. 735-751.
- Fiaschi, D. G. M. F. M., 2012. Thermo-fluid dynamics preliminary design of turbo-expanders for ORC cycles. *Applied Energy*, Issue 97, pp. 601-608.
- G. Coccia, G. D. N. a. M. S., 2015. Design, manufacture, and test of a prototype for a parabolic trough collector for industrial process heat. *Renew. Energy*, Issue 74, pp. 727-736.
- G. Pei, J. L. a. J. J., 2010. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. *Appl Therm Eng*, Τόμος 30, pp. 998-1004.
- G. Zhu, T. W. M. W. a. C. K., 2014. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. *Solar Energy*, Issue 103, pp. 639-652.
- Galvez, J., 2010. *Powersol: Mechanical Power Generation Based on Solar Thermodynamic Engines- Final Report*, Almeria, Spain: s.n.
- Goswami, D. S. E. R. M. A. S. R., 2013. *Design, Construction and Operation of CSP Solar Thermal Power Plants in Florida*, Florida, USA: USF, Tampa, Fl.
- H.L. Zhang, , J. B. J. D. G. C., 2013. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 3, pp. 466-481.
- H.L. Zhang, J. B. J. D. G. C., 2013. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 22, pp. 466-481.
- Habibi, H., Zoghi, M., Chitsaz, A. & Shamsaiee, M., 2020. Thermo-economic performance evaluation and multi-objective optimization of a screw expander-based cascade Rankine cycle integrated with parabolic trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 180, p. 115827.
- Hadi Ghaebi, H. R., 2020. Performance comparison of two new cogeneration systems for freshwater and power production based on organic Rankine and Kalina cycles driven by salinity-gradient solar pond. *Renewable Energy*, pp. 748-767.
- Hajabdollahi, H., Ganjehkaviri, A. & Jaafar, M. N. M., 2015. Thermo-economic optimization of RSORC (regenerative solar organic Rankine cycle) considering hourly analysis. *Energy*, Τόμος 87, pp. 369-380.
- Harish Kumar Ghritlahre, R. K. P., 2018. Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 84, pp. 75-88.
- Hassan Olfian, S. S. M. A. M. E., 2020. Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids. *Solar Energy*, Issue 211, pp. 265-282.

Helvacı, H. U. & Khan, Z. A., 2017. Thermodynamic modelling and analysis of a solar organic Rankine cycle employing thermofluids. *Energy Conversion and Management*, Τόμος 138, pp. 493-510.

Huijuan Chen, D. Y. G. E. K. S., 2010. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 14, pp. 3059-3067.

Ibrahim, D., 2012. *Exergy*,. Second Edition επιμ. s.l.:Elsevier Science.

Jackson JD, H. W. F. J. W. A. W. M., 1975. *Heat transfer to supercritical pressure fluids*, s.l.: U.K.A.E.A.

James Freeman, K. H. C. N. M., 2015. An assessment of solar-powered organic Rankine cycle systems for combined heating and power in UK domestic applications. *Applied Energy*, 12 11, pp. 605-620.

Jing Li, J. Z. A. G. P. Y. S. P. L. G. G. J. J., 2016. Modelling of organic Rankine cycle efficiency with respect to the equivalent hot side temperature. *Energy*, Issue 115, pp. 668-683.

Jing, L., Gang, P. & Jie, J., 2010. Optimization of low temperature solar thermal electric generation with Organic Rankine Cycle in different areas. *Applied Energy*, Τόμος 87, pp. 3355-3365.

Junjiang Bao, L. Z., 2013. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 24, pp. 325-342.

Kalogirou, S., 2003. The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, Issue 76, pp. 337-361.

Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 10 2, Issue 30, pp. 231-295.

Kane, M. L. D. F. D. A., 2003. Small hybrid solar power system. *Energy*, Issue 28, pp. 1427-1443.

Khan, B. H., 2009. *Non-Conventional Energy Resources*. Νέο Δελχί : Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Kiceniuk, T., 1985. *Development of an organic Rankine-cycle power module for a small community solar thermal power experiment*, Pasadena, CA (United States): California Institute of Technology (CalTech).

Kohlenbach, P. M. S. S. W. B. A. W. K. L. K. B., χ.χ. A new parabolic trough solar collector. *Australian and New Zealand Solar Energy Society*, pp. 1-8.

KumarK.S.Reddy, N., 2008. Comparison of receivers for solar dish collector system. *Energy Conversion and Management*, Issue 49, pp. 812-819.

Kyoung Hoon Kim, C. H. H., 2015. A Review on Solar Collector and Solar Organic Rankine Cycle (ORC) Systems. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2.

L.M. Ayompe, A. D. M. M. K. M. C. .. M., 2011. Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate. *Energy*, 11 5, Issue 36, pp. 3370-3378.

Lizana, J., Bordin, C. & Rajabloo, T., 2020. Integration of solar latent heat storage towards optimal small-scale combined heat and power generation by Organic Rankine Cycle. *Journal of Energy Storage*, Τόμος 29, p. 101367.

Loni, R. και συν., 2021. A review of solar-driven organic Rankine cycles: Recent challenges and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 150, p. 111410.

Luqman Jeffry, M. Y. O. S. N. M. M. M. M. P. L. S., 2021. Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 12 10.

M. M. Alkilani, K. S. M. A. A. M. S. M. H. R., 2011. Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 15, pp. 1476-1488.

M. Noro, R. M. L. a. F. B., 2014. Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage. *International Journal of Refrigeration*, Issue 39, pp. 104-116.

M.A. Sabiha, R. S. S. M. O. M., 2015. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 7, Issue 51, pp. 1038-1054.

M.J. Carvalho, M. C.-P., 1985. Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection. *Solar Energy*, Issue 35, pp. 393-399.

M.J. Montes, R. A. M. M. J. M.-A. a. J. M.-V., 2017. Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers. *Energy Convers. Manage.*, Issue 49, pp. 318-333.

Majumdar, R., Saha, S. K. & Singh, S., 2018. Evaluation of transient characteristics of medium temperature solar thermal systems utilizing thermal stratification. *Applied Energy*, Τόμος 224, pp. 69-85.

Manolakos, D., Mohamed, E. S., Karagiannis, I. & Papadakis, G., 2008. Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island. *Desalination*, Τόμος 221, pp. 37-46.

Manolakos, D. και συν., 2005. Design of an autonomous low-temperature solar Rankine cycle system for reverse osmosis desalination. *Desalination*, Τόμος 183, pp. 73-80.

Manuel J. Blanco, L. R. S., 2017. *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. s.l.:Woodhead Publishing.

Marion, M., Voicu, I. & Tiffonnet, A.-L., 2012. Study and optimization of a solar subcritical organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, Τόμος 48, pp. 100-109.

Md ArbabIqbal, S. R. M. A. A. D. A. A., 2020. Experimental study on the prospect of low-temperature heat to power generation using Trilateral Flash Cycle (TFC). *Applied Thermal Engineering*, Issue 172, p. 115139.

Mohammad Hossein Ahmadi, M. G. M. S. M. A. N. R. K. A. N. T. M., 2018. Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science & Engineering*, Issue 6, pp. 340-361.

Moustafa, S. H. W. E.-M. H. K. A. J. D. H. H. Z., 1984. Design specifications and application of a 100 kWe (700 kWth) cogeneration solar power plant. *Solar Energy*, Τόμος 32, pp. 263-269.

Muhammad Tanveer, G. T. G., 2013. Solar assisted photo degradation of wastewater by compound parabolic collectors: Review of design and operational parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27 4, Τόμος 24, pp. 534-543.

MuratOzturk, I. D., 2013. Thermodynamic analysis of a solar-based multi-generation system with hydrogen production. *Applied Thermal Engineering*, Issue 51, pp. 1235-1244.

N.B. Goodman, R. W., 1979. PRACTICAL DESIGN CONSIDERATIONS FOR CPC SOLAR COLLECTORS. *Solar Energy*, 8, Issue 22, pp. 373-381.

N'Tsoukpoe, K. A. K. C. E. Z. J. G. M. S. Y. K., 2014. *CSP4Africa : développement d'un pilote économiquement viable d'une mini-CSP pour la production d'électricité pour mini-réseau en Afrique..* [Ηλεκτρονικό].

NASA, 2022. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://climate.nasa.gov/evidence/>  
[Πρόσβαση 27 2 2022].

Nishith B. Desai, S. B., 2016. Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 1 11, pp. 471-481.

Nobuo Tanaka, E. D. I., 2010. *Technology Roadmap - Concentrating Solar Power*, Paris, France : IEA.

Omar Aboelwafa, S.-E. K. F. A. S. I. M. I., 2018. A review on solar Rankine cycles: Working fluids, applications, and cycle modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 82, pp. 868-885.

Orosz, M. Q. S. H., 2013. Technologies for heating, cooling and powering rural health facilities in sub-Saharan Africa. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-journal of Powerand Energy*, Issue 227, pp. 717-726.

- P. Good, G. Z. G. A. M. B. A. P. a. A. S., 2014. Towards a commercial parabolic trough CSP system using air as heat transfer fluid. *Energy Procedia*, Issue 49, pp. 381-385.
- P.J. Mago, L. C. K. S. a. C. S., 2008. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Appl Therm Eng*, Issue 28, pp. 998-1007.
- P., K., 2015. The Influence of the Heat Source Temperature on the Multivane Expander Output Power in an Organic Rankine Cycle (ORC) System. *Energies*, Issue 8, pp. 1-19.
- Pammi Raj Gupta, A. K. T. Z. S., 2022. Solar organic Rankine cycle and its poly-generation applications – A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Issue 49, p. 101732.
- Pankaj Raj, S. S., 2018. A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 84, pp. 54-74.
- Pedro J. Mago, L. M. C. K. S. C. S., 2008. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. *Applied Thermal Engineering*, Issue 28, pp. 998-1007.
- Pei, G., Li, J. & Ji, J., 2010. Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 30, pp. 998-1004.
- Plant, A. E. A.-B. P., 2014. *SCP Focus*. [Ηλεκτρονικό] Available at: [http://www.cspfocust.com/en/study/detail\\_162.htm](http://www.cspfocust.com/en/study/detail_162.htm)
- Price H., H. V., 2002. *Modular Trough Power Plant Cycle and Systems Analysis*, s.l.: National Renewable Energy Lab., Golden, CO. (US).
- Qiu, G. H. L. S. R., 2011. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, Issue 31, pp. 3301-3307.
- Quoilin, S., Orosz, M., Hemond, H. & Lemort, V., 2011. Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation. *Solar Energy*, Τόμος 85, pp. 955-966.
- R. M. Reddy, N. N. K. H. R., 2012. Experimental Studies on Phase Change Material-Based Thermal Energy Storage System for Solar Water Heating Applications. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, Issue 2, pp. 1-6.
- R.Lonia, A. B. K., 2016. Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy*, Issue 112, pp. 1259-1272.
- Rajkumar Malviya, A. A. P. V. B., 2020. A comprehensive review of different heat transfer working fluids for. *Materials Today: Proceedings*, Issue 46, pp. 5490-5500.
- Ramteke, R. T., 2016. Review on Phase Change Materials in Different Solar Gadgets. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Issue 37, pp. 197-201.

Rémi Dickes, O. D. S. D. S. Q., 2014. *Experimental investigation of an ORC system for a micro-solar power plant*. Purdue Univeristy, Indiana, USA, s.n.

Roy, J. P., Mishra, M. K. & Misra, A., 2011. Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions. *Applied Energy*, Τόμος 88, pp. 2995-3004.

S. E. Zubriski, K. J. D., 2012. MEASUREMENT OF THE EFFICIENCY OF EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS. *Journal of Green Building*, 1 10, pp. 114-130.

S. Esakkimuthu, A. H. H. C. P. M. S. J. B. R. V., 2013. Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, Issue 88, pp. 144-153.

S.A.Kalogirou, S. J. P., 1994. Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system. *Applied Energy*, Issue 47, pp. 341-354.

Saitoh, T. Y. N. W., 2002. Solar Rankine cycle system using scroll expander. *r. Journal of Environmental Engineering*, Issue 2, pp. 708-719.

Sayyaadi, H., 2020. Solutions for thermal energy exploitation from the exhaust of an industrial gas turbine using optimized bottoming cycles. *Energy conversion and management*, p. 112523.

Scardigno, D. και συν., 2015. A genetic optimization of a hybrid organic Rankine plant for solar and low-grade energy sources. *Energy*, Τόμος 91, pp. 807-815.

Schuster A, K. S. A. R., 2010. Efficiency optimization potential in supercritical Organic Rankine Cycles. *Energy*, Issue 35, pp. 1033-1039.

Singh H, M. R., 2017. Thermodynamic and economic investigation of a screw expander-based direct steam generation solar cascade Rankine cycle system using water as thermal storage fluid. *Applied Energy*, Issue 195, pp. 137-151.

Singh, H. & Mishra, R. S., 2018. Performance analysis of solar parabolic trough collectors driven combined supercritical CO<sub>2</sub> and organic Rankine cycle. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Τόμος 21, pp. 451-464.

Steven Lecompte, H. H. M. d. B. B. V. M. D. P., 2015. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 47, pp. 448-461.

Suresh Baral, D. K. E. Y. K. C. K., 2015. Energy, Exergy and Performance Analysis of Small-Scale Organic Rankine Cycle Systems for Electrical Power Generation Applicable in Rural Areas of Developing Countries. *Energies*, Issue 8, pp. 684-713.

Suresh Baral, D. K. E. Y. K. C. K., 2015. Experimental and Thermo-economic Analysis of Small-Scale Solar Organic Rankine Cycle (SORC) System. *Entropy*, Issue 17, pp. 2039-2061.

Suresh Baral, D. K. E. Y. K. C. K., 2015. Experimental and Thermo-economic Analysis of Small-Scale Solar Organic Rankine Cycle (SORC) System. *Entropy*, Issue 17, pp. 2039-2061.

Taccani, R. και συν., 2016. Development and Experimental Characterization of a Small Scale Solar Powered Organic Rankine Cycle (ORC). *Energy Procedia*, Τόμος 101, pp. 504-511.

TCHANCHE, B. F., 2010. *Low-Grade Heat Conversion into Power Using Small Scale Organic Rankine Cycles*, Athens: s.n.

Terrence L. Chambers, J. R. R. ,. R. B., 2014. Installation and Operation of Parabolic Trough Organic Rankine Cycle Solar Thermal Power Plant in South Louisiana. *Energy Procedia*, Issue 49, pp. 1107-1116.

Thomas Tartière, M. A., 2017. A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market. *Energy Procedia*, Issue 129, pp. 2-9.

Tiwari, D., Sherwani, A. F., Atheaya, D. & Arora, A., 2017. Energy and exergy analysis of solar driven recuperated organic Rankine cycle using glazed reverse absorber conventional compound parabolic concentrator (GRACCPC) system. *Solar Energy*, Τόμος 155, pp. 1431-1442.

Tzivanidis, C., Bellos, E. & Antonopoulos, K. A., 2016. Energetic and financial investigation of a stand-alone solar-thermal Organic Rankine Cycle power plant. *Energy Conversion and Management*, Τόμος 126, pp. 421-433.

Usman Muhammad, M. I. D. H. L. B. S. P., 2015. Design and experimental investigation of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam. *Energy Conversion and Management*, 29 6, pp. 1089-1100.

Ustaoglu, A., Okajima, J., Zhang, X.-R. & Maruyama, S., 2019. Assessment of a solar energy powered regenerative organic Rankine cycle using compound parabolic involute concentrator. *Energy Conversion and Management*, Τόμος 184, pp. 661-670.

Wang, M. και συν., 2013. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 50, pp. 816-825.

Wang, X. D. και συν., 2010. Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa. *Solar Energy*, Τόμος 84, pp. 353-364.

Wang, X. Z. L. W. J. Z. W. Z. X. W. W., 2010. Performance evaluation of a low-temperature solar Rankine cycle system utilizing R245fa. *Solar Energy*, Issue 84, pp. 353-364.

WWF, 2020. *Causes of global warming*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.wwf.org.au/what-we-do/climate/causes-of-global->



warming

[Πρόσβαση 27 2 2022].

X.D.WangL.Zhao, 2011. Experimental investigation on the low-temperature solar Rankine cycle system using R245fa. *Energy Conversion and Management*, Issue 52, pp. 946-952.

X.D.Wang, L., 2009. Analysis of zeotropic mixtures used in low-temperature solar Rankine cycles for power generation. *Solar Energy*, Issue 5, pp. 605-613.

Xu, G. και συν., 2015. Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator. *Applied Thermal Engineering*, Τόμος 80, pp. 196-204.

Y. Su, S. R. a. G. P., 2012. Comparative study on annual solar energy collection of a novel lens-walled compound parabolic concentrator (lens-walled CPC). *Sustainable Cities and Society*, Issue 4, pp. 25-40.

Yang, J., Li, J., Yang, Z. & Duan, Y., 2019. Thermodynamic analysis and optimization of a solar organic Rankine cycle operating with stable output. *Energy Conversion and Management*, Τόμος 187, pp. 459-471.

Yathin Krishna, M. F. R. S. K. C. N. N. A., 2019. State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Issue 152.

Yong Zhou, Y. L. D. W. X. L. Y. W., 2021. A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. *Energy Conversion and Management*, Issue 235.

Yuanyang Zhao, G. L. L. L. Q. Y. B. T. Y. L., 2019. Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review. *Energy Conversion and Management*, Issue 199.

Θεόδωρος, Π., 2020. *Μοντελοποίηση οργανικού κύκλου Rankine για μικρά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα*, Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Θεόδωρος, Π., 2020. *Μοντελοποίηση οργανικού κύκλου Rankine για μικρά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα*, Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ.

Ντάσκα, Π. Χ., 2010. *Επισκόπηση ηλιακών συλλεκτών*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ορέστης, Π., 2019. *Μελέτη και Βελτιστοποίηση Συστήματος Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας με Χρήση Ηλιακών Συλλεκτών Κενού*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .

Ορέστης, Π., 2019. *Μελέτη και Βελτιστοποίηση Συστήματος Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας με Χρήση Ηλιακών Συλλεκτών Κενού*, Αθήνα: ΕΜΠ.

ΣΕΕ, Σ. τ. Ε. Έ., 2015. *Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή*, s.l.: s.n.

ΣΕΕ, Σ. τ. Ε. Έ., 2020. *Κλιματική αλλαγή: Η δράση της ΕΕ*, σ.λ.: σ.η.