



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Ηλεκτροπαραγωγή με Οργανικό Κύκλο Rankine με συνδυασμένη
χρήση ΑΠΕ και συμβατικών καυσίμων**

Φοιτητής: ΛΑΜΠΡΙΑΝΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΑΜ: 04 124

Επιβλέπων: Δρ. Αντώνιος Νάζος

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (Μάιος) (2022)

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
ΝΑΖΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	
ΚΑΒΒΑΔΙΑΣ ΚΟΣΜΑΣ	
ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος LAMBRIANOS ALEKSANDER του ΝΙΚΟΛΑ, με αριθμό μητρώου 04124 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών

 ALEXANDER
LAMBRIANOS
06/06/22.

Contents

Περίληψη	6
Abstract	7
Κεφάλαιο 1°	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Παραγωγή Ενέργειας	8
1.3 Ανάκτηση θερμότητας στον Βιομηχανικό Τομέα.....	11
1.3.1 Κατηγορίες ποιότητας θερμοκρασιών	12
1.4 Τρόποι αξιοποίησης των πηγών θερμότητας	12
1.5 Ωφέλη απο την αξιοποίηση των πηγών θερμότητας.....	14
1.6 Πηγές θερμότητας για παραγωγή μέσης θερμοκρασίας	15
1.6.1 Γεωθερμία.....	15
1.7 Ηλιακά Συστήματα	18
1.7.1 Παραβολικοί συλλέκτες.....	20
1.7.2 Γραμμικά συστήματα ανακλαστήρων Fresnel.....	22
1.7.3 Ευέλικτες μονάδες ORC σε ηλιακά συστήματα	23
1.7.4 Συστήματα ηλιακών δεξαμενών ή ηλιακής λίμνης.....	25
Κεφάλαιο 2° : Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Συμβατικός κύκλος Rankine.....	27
2.3 Θερμοδυναμική ανάλυση Οργανικού κύκλου Rankine.....	29
2.4 Συμβατικός κύκλος Rankine και προβλήματα από χαμηλές θερμοκρασίες	34
2.5 Διαφορές μεταξύ συμβατικού κύκλου Rankine - Οργανικό κύκλο Rankine.....	35
Κεφάλαιο 3° Επιλογή εργαζόμενων μέσων	36
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Οργανικά Ρευστά ως εργαζόμενα μέσα	36
3.3 Κριτήρια επιλογής εργαζόμενου ρευστού.....	39
Κεφάλαιο 4ο Σχετικές Μελέτες	41
4.1 Εισαγωγή	41
4.2 Συνεισφορά του ORC στην παραγωγή ηλεκτρισμού.....	42
4.3 Εφαρμογές του ORC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας μία γεωθερμική πηγή ενέργειας	43

4.4. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ORC από βιομάζα	46
4.5 Αποδόσεις ενέργειας και εξέργεια του ORC.....	49
4.5 Οικονομική πτυχή του ORC	50
Βιβλιογραφία	53

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η ηλεκτροπαραγωγή μέσω του Οργανικού Κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC), καθώς και η ενδεχόμενη αύξηση της απόδοσής του. Όπως φαίνεται και στη συνέχεια, η εν λόγω αύξηση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό συμβατικών καυσίμων. Αρχικά, γίνεται μια εκτενής αναφορά στην παραγωγή ενέργειας και κυρίως, όσον αφορά την θερμότητα και τα ηλιακά συστήματα. Έπειτα, ακολουθεί μία λεπτομερής περιγραφή τόσο του Οργανικού όσο και του Συμβατικού Κύκλου Rankine, η οποία καταλήγει σε μία σύγκριση μεταξύ των δύο Κύκλων. Μέσω αυτής, μπορούν να εξαχθούν προφανή συμπεράσματα, για τους λόγους που προτιμάται ο Οργανικός Κύκλος έναντι του Συμβατικού. Έχοντας πλέον αποδείξει την ανωτερότητα του ORC, κυρίως όσον αφορά τη θερμοκρασία, ακολουθεί μια περιγραφή των εργαζόμενων μέσων, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους. Τα εργαζόμενα μέσα (ρευστά εργασίας) χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με έναν Οργανικό Κύκλο Rankine, σε εγκαταστάσεις χαμηλών θερμοκρασιών. Τα εργαζόμενα μέσα είναι υψίστης σημασίας, διότι είναι άμεσα συνδεδεμένα με την απόδοση και την οικονομική βιωσιμότητα ενός Οργανικού Κύκλου Rankine. Επίσης, είναι γνωστά για τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες και ταξινομούνται σε υγρά, ξηρά και ισεντροπικά. Κλείνοντας, παρουσιάζονται ορισμένες μελέτες σχετικά με την συνεισφορά και τη σημασία του ORC, σε διάφορα είδη ενέργειας. Ειδικότερα, διερευνώνται οι εφαρμογές του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεωθερμικής πηγής και μιας δασικής και αγροτικής βιομάζας. Εκτός αυτού, αναφέρονται οι αποδόσεις του Οργανικού Κύκλου Rankine σχετικά με την ενέργεια και εξέργεια (είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της απόδοσης σε έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής ORC), καθώς και το κόστος της αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού.

Λέξεις Κλειδιά: Οργανικός Κύκλος Rankine, Παραγωγή Ηλεκτρισμού, Συμβατικά Καύσιμα

Abstract

The purpose of this thesis is the study of power generation through the Organic Rankine Cycle (ORC), as well as the potential increase of its efficiency. As shown below, this increase can be achieved using a combination of conventional fuels. First, there is an extensive report on energy production and in terms of heat and solar systems. This is followed by a detailed report of both the Organic and conventional Rankine cycle which ends-up in a comparison between the two cycles. Through it, obvious conclusions can be drawn, for the reasons that the Organic Rankine Cycle is preferred over the conventional one. Now, having proved the superiority of the ORC, especially in terms of temperature, a working fluids description is follow on, as well as their selection criteria. Working fluids are used in combination with an Organic Rankine Cycle, in low temperature systems. Working fluids are paramount, because are directly related to the performance and financial sustainability of an ORC. There are also known, for their thermodynamic properties and are classified into liquid, dry and isentropic. Lastly, some studies are presented on the contribution and importance of ORC in various types of energy. In particular, its applications for the production of electricity through a geothermal source and agricultural biomass are investigated. Moreover, there is reference about ORC efficiency regarding to energy and exergy. (which is required to evaluate the performance of an ORC in a power plant), as well as the purchasing cost and equipment installation.

Key words: Organic Rankine Cycle, Electric power production, Conventional fuels.

Κεφάλαιο 1°

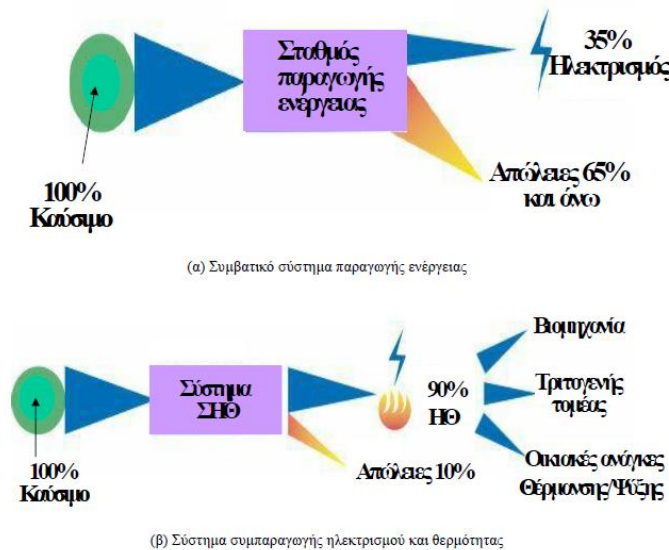
1.1 Εισαγωγή

Σε διάφορες βιομηχανικές, αλλά και σε οικιακές εγκαταστάσεις παράγονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας από εξοπλισμούς για θέρμανση, ψύξη, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κτλ. Η θερμότητα συνεπάγεται με το υποπροϊόν της λειτουργίας τους, η οποία το ποσοστό της εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 10% - 50% και διοχετεύεται ανεκμετάλλευτη στο περιβάλλον. Ωστόσο, ο όρος σπαταλούμενη Θερμότητα (Waste Heat) προσδιορίζει την θερμότητα που παράγεται από μια διεργασία κάυσης και έπειτα αποβάλλεται στο περιβάλλον, χωρίς να αξιοποιηθεί με οποιονδήποτε τρόπο.

1.2 Παραγωγή Ενέργειας

Κατά τη λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλα ποσά θερμότητας απορρίπτονται στο περιβάλλον διαμέσου των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπτηκνωτές ατμού, πύργοι ψύξης, ψυκτικά κυκλώματα των μηχανών κα.).

Ο όρος συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ, Αγγλικά Combined Heat and Power – CHP) χρησιμοποιείται όταν έχουμε ταυτόχρονη παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής (ή/και μηχανικής) ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας, στο πλαίσιο μιας ενιαίας διεργασίας. Παραγωγή χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας σημαίνει παραγωγή για την ικανοποίηση οικονομικά δικαιολογημένης ζήτησης για ηλεκτρισμό. Ιστορικά, τις περισσότερες γνωστές τις συναντάμε στις εργοβόρες βιομηχανίες, εκεί όπου σημαντικές ποσότητες ατμού χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία, όπως π.χ στη βιομηχανία χάρτου, υφαντουργία, διυλιστήρια, χημική βιομηχανία, βιομηχανία τροφίμων, κ.λπ. Όταν αναφερόμαστε στο χώρο της βιομηχανίας, συνήθως, χρησιμοποιείται ο όρος Συμπαραγωγή (Cogeneration) και ο συμβολισμός (CHP/IND).



Σχήμα 1.1 - Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος με συμπαραγωγή και χωρίς.(Fragopoulos 1994)

Η Συμπααραγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α γύρω στα 1890. Η ιδέα του CHP εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 1882 στο σταθμό Pearl Street του Thomas Edison, τον πρώτο κεντρικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το εργοστάσιο παρείχε ηλεκτρισμό και ατμό σε ένα τμήμα του κέντρου της Νέας Υόρκης. Όμως, καθώς εμφανίστηκε η εποχή του ηλεκτρισμού τον 20ο αιώνα, και οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής απομακρύνθηκαν από τις πόλεις προς τις αγροτικές περιοχές, η ζήτηση για την θερμότητα περιορίστηκε και η συμπααραγωγή ευνοήθηκε. βΑνφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπααραγωγής. (Fragopoulos,1994).

Μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση, αρχές της δεκαετίας του 1970, η διάδοση και ανάπτυξη της τεχνολογίας της συμπααραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού αποτελεί βασικό άξονα κάθε ενεργειακής πολιτικής, γιατί έχουμε:

- Αποδοτικότερη εκμετάλλευση της προσδιδόμενης ενέργειας, που συνεπάγεται με εξοικονόμηση καυσίμων και ενέργειας.
- Χαμηλότερο ενεργειακό κόστος και βελτίωση της ανταγωνιστικότητας της οικονομίας
- Τα πλεονεκτήματα που παρέχει μια Αποκεντρωμένη Παραγωγή . Χαρακτηριστικά αναφέρεται η βελτίωση της ασφάλειας τροφοδοσίας σε τοπικό επίπεδο, γιατί η συμπααραγωγή θα καλύπτει τοπικά τη ζήτηση σε περίπτωση βλάβης του συστήματος κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής, η εξοικονόμηση απωλειών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, γιατί η συμπααραγωγή βρίσκεται πλησίον της κατανάλωσης, ενώ παράλληλα εξοικονόμηση επενδύσεων σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής
- Τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ενεργειακών αποβλήτων (π.χ αέρια διυλιστηρίων , βιομάζα κ.λπ).
- Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου όπως SO₂, NO_x, και CO₂ λόγω της αποδοτικότερης χρησιμοποίησης της ενέργειας.

Στην Ελλάδα, οι πρόσφατες μονάδες Συμπααραγωγής δημιουργήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '70 στον βιομηχανικό τομέα, χωρίς καμία κρατική οικονομική βοήθεια. Όλοι οι συμπααραγωγοί ήταν αυτοπαραγωγοί και τα κύρια καύσιμα ήταν το πετρέλαιο ή τα προϊόντα πετρελαίου, ενώ εγκαταστάθηκαν, σε πιλοτική μορφή, και δυο μονάδες μικρής ΣΗΘ στον τριτογενή τομέα, με επιδότηση από Ευρωπαϊκά προγράμματα (VALOREN).

Το 1985, η εγκατεστημένη ισχύ της ΣΗΘ σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς ήταν 346,3 MWe όπου στα διυλιστήρια ήταν εγκατεστημένα 93,5 MWe (27%), στις βιομηχανίες χάλυβα 80 MWe (23%), στις βιομηχανίες τροφίμων 56 MWe (16%), σε χημικές βιομηχανίες 48 MWe (14%), σε βιομηχανίες χάρτου 43 MWe (12%), στην υφαντουργία 14,5 MWe (4%) και στο αλουμίνιο 11,3 MWe (3%).

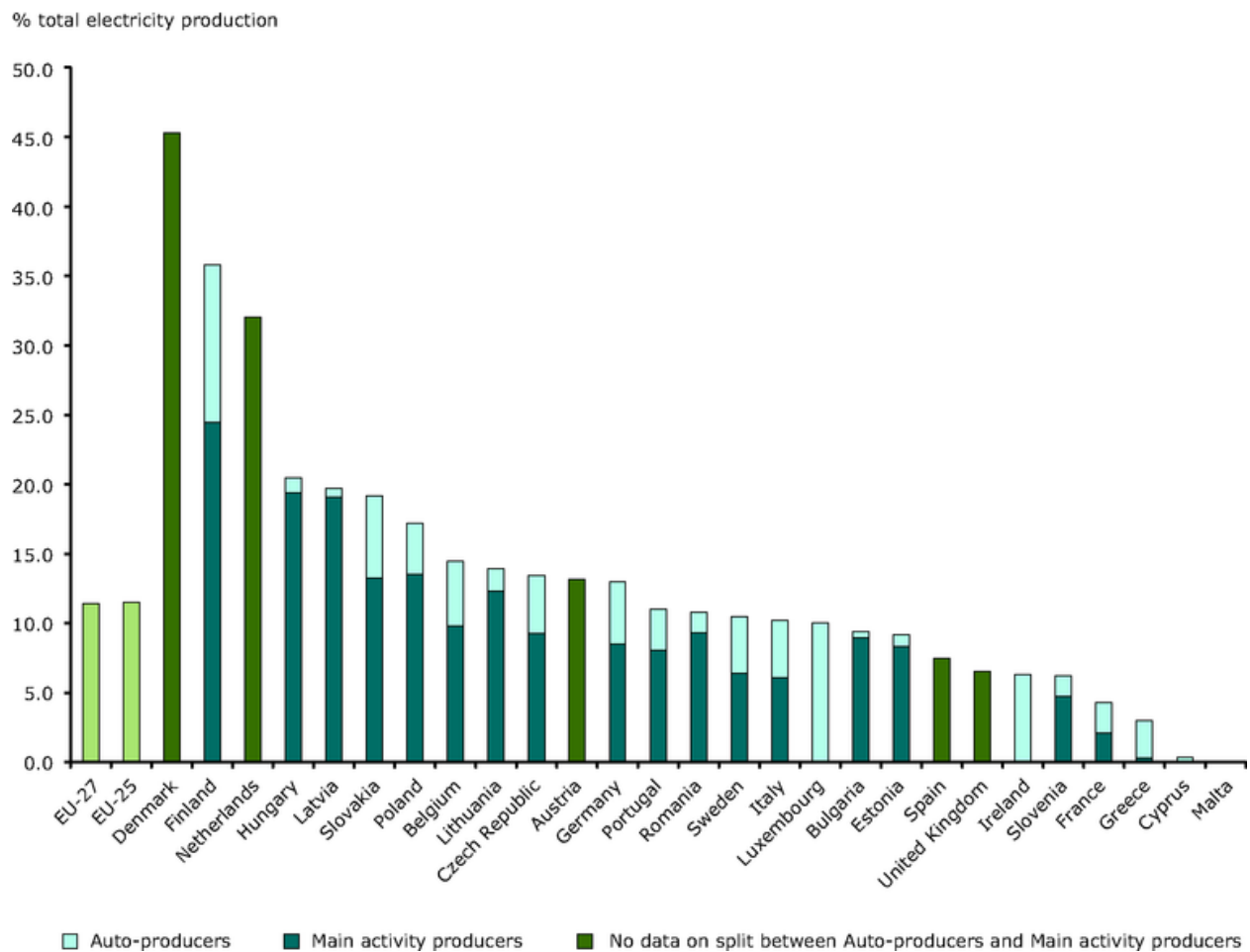
Το 1995, η αποβιομηχανοποίηση της χώρας είχε αρχίσει και πολλές βιομηχανίες που λειτουργούσαν με Συμπαραγωγή βγήκαν εκτός λειτουργίας για διαφορετικούς - οικονομικούς ή άλλους - λόγους.

Έτσι, ως αποτέλεσμα, το 1995, η εγκατεστημένη ΣΗΘ μειώθηκε σημαντικά και η εγκατεστημένη ισχύ μονάδων ΣΗΘ στους διάφορους βιομηχανικούς τομείς ήταν 116,4 MWe, όπου στα διυλιστήρια ήταν εγκατεστημένα 93,5 MWe (81%), στο αλουμίνιο 11,3 MWe (10%) και στη χημική βιομηχανία 11,6 MWe (9%).

Στις αρχές του 21ου αιώνα, η κατάσταση της ΣΗΘ βελτιώθηκε, με τη θέσπιση νομικού πλαισίου (Ν.2773/99, για την απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας) και της ασφάλειας τροφοδοσίας καυσίμου πχ προγραμματισμένη υποδομή για τη χρήση του φυσικού αερίου.

Η εγκατεστημένη ισχύ για ΣΗΘ, το 2005, ήταν στα 168,16 MWe, όπου στα διυλιστήρια ήταν εγκατεστημένα 93,5 MWe (56%), στο αλουμίνιο 11,3 MWe (7%), στη χημική βιομηχανία 11 MWe (7%), στις βιομηχανίες τροφίμων 4,5 MWe (3%), σε βιομηχανίες μετάλλου 3 MWe (2%). Αναφορά γίνεται, επίσης, στις εγκαταστάσεις ΣΗΘ στον τριτογενή τομέα (νοσοκομεία, πανεπιστήμια κλπ.) και σε μονάδες ΣΗΘ σε έξι διαφορετικές δημοτικές εταιρείες ύδρευσης σε όλη τη χώρα, όπου λειτουργούν μονάδες ΣΗΘ με αέριο από αστικά απόβλητα, που χρηματοδοτήθηκαν από τα ΚΠΣ.

Η δεκαετία του 2010 αλλάζει πολύ το ενεργειακό τοπίο, ιδιαίτερα αυτό που αφορά τις ΑΠΕ αλλά και τη ΣΗΘΥΑ. Ως αποτέλεσμα της οικονομικής ύφεσης, που ξεκίνησε το 2010, πολλές μονάδες ΣΗΘΥΑ έπαψαν τη λειτουργία τους, λόγω των οικονομικών δυσκολιών των εταιρειών και όσες παρέμειναν σε λειτουργία είχαν σοβαρά προβλήματα ιδιαίτερα στη πληρωμή των λογαριασμών Φ.Α., μετά από πολύμηνη καθυστέρηση από τον ΛΑΓΗΕ, στην πληρωμή των «Feed-in-Tariff» για τη συμπαραγόμενη ΗΕ, που εγχέεται στο Δίκτυο. Σημαντικό θέμα της περιόδου είναι ότι, από το 2014, έχει προστεθεί και κατανεμόμενη μονάδα ΣΗΘΥΑ (35 MWe) που λειτουργεί στο Αλουμίνιο της Ελλάδας, ισχύος 132,9 MWe.



Διάγραμμα 1.1 - Ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από ΣΗΘ στην Ευρώπη 2009.
 (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/share-of-combined-heat-and-3>)

1.3 Ανάκτηση θερμότητας στον Βιομηχανικό Τομέα

Στον βιομηχανικό τομέα πολλές διεργασίες απαιτούν θερμότητα παράλληλα με τις ανάγκες για ηλεκτρισμό. Οι κύριες βιομηχανίες στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί ή εφαρμόζεται ήδη ανάκτηση θερμότητας είναι οι εξής: (Yasmine Ammar 2012)

- Τσιμεντοβιομηχανία
- Βιομηχανία Αλουμινίου
- Υαλουργία
- Χαλυβουργία
- Βιομηχανία Τροφίμων
- Χημική Βιομηχανία
- Βιομηχανία Χάρτου
- Βιομηχανίες Μετάλλων

Τα καυσαέρια τα οποία έχουν υψηλές θερμοκρασίες κατά την έξοδο τους από τις βιομηχανικές συσκευές (φούρνοι, συσκευές ηλεκτρόλυσης, ψυκτικές συσκευές κ.λπ) είναι η κύρια θερμική απώλεια .

1.3.1 Κατηγορίες ποιότητας θερμοκρασιών

Ωστόσο οι πηγές θερμότητας οδηγούν στην ακόλουθη κατάταξη.

1. Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών (μικρότερων των 100οC), π.χ ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση ή ψύξη χώρων, θερμό νερό χρήσης.
2. Διεργασίες μέτριων θερμοκρασιών (100-300οC), π.χ διεργασίες στη χαρτοποιία, στην κλωστοϋφαντουργία, στα εργοστάσια ζάχαρης, σε μερικές χημικές βιομηχανίες, κ.λπ. Συνήθως οι διεργασίες αυτές απαιτούν θερμότητα με μορφή ατμού.
3. Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών (300-700οC), π.χ σε μερικές χημικές βιομηχανίες
4. Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από 700οC), π.χ σε εργοστάσια τσιμέντου, μεταλλουργικές βιομηχανίες, υαλουργία, κ.λπ

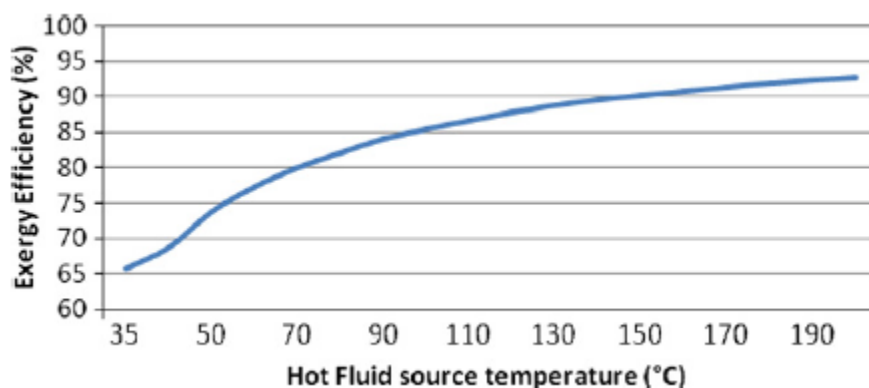
1.4 Τρόποι αξιοποίησης των πηγών θερμότητας

Λόγω της έντονης διάβρωσης που προκαλούν τα καυσαέρια στις χαμηλές θερμοκρασίες , η θερμότητα συνήθως μεταφέρετε σε κάποιο εργαζόμενο μέσο το οποίο τα χαρακτηριστικά του αυξάνουν την απόδοση στο σύστημα. Η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου δεν πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε η θερμότητα του να μπορεί να απορροφηθεί στο τέλος της διεργασίας ανταλλαγής.

Η γενική εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας από μία επιφάνεια είναι:

$$Q = U * A * \Delta T \quad \text{[Εξίσωση 1.1]}$$

Όπου Q είναι η μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα χρόνου (W), U είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ($W m^{-2}K^{-1}$) , A η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας (m^2) και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας (K).



Σχήμα 1.2 - Εξέλιξη της εξεργειακής απόδοσης της ηλεκτροπαραγωγής με τη θερμοκρασία του θερμού μέσου (Yasmine Ammar 2012).

Σύμφωνα με την εξ. (1.1), εάν η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ η πηγή θερμότητας και εργαζόμενου μέσου είναι χαμηλά, η μεταφορά θερμότητας μπορεί να μεγιστοποιηθεί είτε αυξάνοντας την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας περιοχή ή την αύξηση του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Το τελευταίο εξαρτάται από τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας (αγωγιμότητα, μεταφορά, συμπύκνωση, βράσιμο), στις ιδιότητες των υγρών, στη ροή του ρευστού ρυθμούς και τη διάταξη των ρευμάτων ροής ρευστού. Στο πλαίσιο χαμηλής ποιότητας θερμότητας, ένας σωλήνας θερμότητας προσφέρει υψηλή απόδοση σε σύγκριση με τους περισσότερους συμβατικούς εναλλάκτες θερμότητας, αν και τυπικά έχει υψηλότερο κόστος. Φέρνει σε επαφή δύο ροές μέσω ενός ρευστού που εκτελεί συμπύκνωση / εξάτμιση. Οι Reay και Kew ανέφεραν ότι χρησιμοποιείται ένας σωληνοειδής σωλήνας θερμότητας. Το νερό ως εργαζόμενο υγρό και λειτουργεί με θερμοκρασία 150°C έχει θερμική αγωγιμότητα μερικές εκατοντάδες φορές αυτό του χαλκού ». (Yasmine Ammar 2012)

Οι θερμικοί αγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλάκτες θερμότητας μέσα στην απορρόφηση και αντλίες θερμότητας με συμπίεση ατμού, ψυγεία και άλλα είδη συσκευή μεταφοράς θερμότητας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των θερμικών κύκλων. Ο υψηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τους καθιστά πιο συμπαγή (υπόκεινται σε φυσιολογικούς περιορισμούς στην πλευρά του φυσικού αερίου) και είναι ιδανικά για μικροσκοπικές αντλίες θερμότητας και εφαρμογές ψυγείων.

Η απορριπτόμενη θερμότητα ωστόσο μπορεί να επανακτηθεί με μία συσκευή η οποία ονομάζεται εναλλάκτης θερμότητας. Συναντάμε διάφορους τύπους και μεγέθη εναλλακτών, ενώ η επιλογή του ιδανικού εναλλάκτη προκύπτει αφού λάβουμε υπ' όψιν μας μια σειρά από οικονομοτεχνικά στοιχεία της εκάστοτε εγκατάστασης.

Αρχικά, στις εγκαταστάσεις οι οποίες διαθέτουν φούρνους στους οποίους γίνεται καύση για την διεκπεραίωση ενός σταδίου της παραγωγής, τα παραγόμενα καυσαέρια αγγίζουν τους 1000oC. Μέσω των καυσαερίων και με την βοήθεια εναλλάκτη θερμότητας επιτυγχάνεται η προθέρμανση του αέρα καύσης, όπου είναι ο κυριότερος τρόπος εκμετάλλευσης των καυσαερίων. Έτσι, μπορούμε να πετύχουμε 20% μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή που διευκολύνει τη διαδικασία ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. άλλο (π.χ από τα καυσαέρια στο νερό). Τα μέσα αυτά μπορούν να διαχωρίζονται στεγανά για να αποφεύγεται η ανάμειξη τους ή μπορεί να είναι σε άμεση επαφή. Η επανακτώμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πρωτεύον σύστημα παραγωγής θερμότητας αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης του ή να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση κάποιου χώρου του κτιρίου στο οποίο βρίσκεται ή ακόμα και να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Για παράδειγμα, στους κοχλιωτούς συμπιεστές με έγχυση λαδιού, το λάδι συγκρατεί περίπου το 70% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ανάκτηση της θερμικής αυτής ενέργειας, το

λάδι περνάει από πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας που μπορεί να θερμάνει νερό μέχρι και 50°C.

Πιο συγκεκριμένα, τα θερμά αέρια αποδίδουν την θερμότητά τους σε ένα εργαζόμενο μέσο το οποίο με την σειρά του εκτελεί έναν θερμοδυναμικό κύκλο (Rankine κατά κύριο λόγο) προς παραγωγή ενέργειας.

Όπως σε όλες τις επενδύσεις που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας, έτσι και στην περίπτωση μιας εφαρμογής ανάκτησης θερμότητας σκοπός είναι το καθαρό κέρδος, οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό, με το μικρότερο δυνατό τίμημα.

Οι αεροσυμπιεστές, κατά τη διαδικασία παραγωγής πεπιεσμένου αέρα παράγουν και θερμότητα (σημαντικό ποσοστό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας), η οποία πρέπει να απομακρυνθεί από τους χώρους όπου αυτοί είναι εγκατεστημένοι. Οι επιτρεπόμενες θερμοκρασίες περιβάλλοντος στο χώρο των συμπιεστών είναι από 5°C έως 40°C. Εάν η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή υπάρχει κίνδυνος να παγώσουν τα εξαρτήματα του συμπιεστή, ενώ αν είναι πολύ υψηλή μειώνεται η απόδοση του συμπιεστή και μπορεί να προκύψει και πρόβλημα υπερφόρτισής του.

1.5 Ωφέλη από την αξιοποίηση των πηγών θερμότητας

Αρχικά όσο μεγαλύτερη είναι η συνολική απόδοση του συστήματος αξιοποίησης της πηγής θερμότητας, τόσο μεγαλύτερη μείωση καυσίμων θα πετύχουμε. Με την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, είναι δυνατόν να μειώσουμε έως και το μισό των συνολικών δαπανών ενέργειας σε μια εγκατάσταση. Επιπλέον τέτοιες επενδύσεις είναι πολύ αποδοτικές, διότι δεν έχουν σχεδόν μηδενικά λειτουργικά κόστη. Το βασικό κόστος είναι η αρχική επένδυση η οποία είναι της τάξης των μερικών εκατομμυρίων ευρώ, ενώ δεν απαιτείται κόστος για καύσιμο και για επιπλέον προσωπικό.

Πρόσθετα η εξοικονόμηση λογαριασμών ενέργειας και οι πρόσθετες ροές εσόδων που παρέχονται από συστήματα ΣΗΘ μπορούν να επανεπενδύονται σε εγκαταστάσεις (ή σε εταιρείες γενικότερα) για την υποστήριξη της επέκτασης εγκαταστάσεων και άλλων επενδυτικών έργων, τη μίσθωση ή τη διατήρηση εργαζομένων ή σε άλλες πρωτοβουλίες που ενισχύουν την ανταγωνιστικότητα.

Τα συστήματα ΣΗΘ παράγουν ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, με αποτέλεσμα να μειώνουν τον κίνδυνο ηλεκτρικών διακοπών του δικτύου και να ενισχύουν την αξιοπιστία της ενέργειας.

Επίσης τα συστήματα ΣΗΘ έχουν την δυνατότητα να παρέχουν εφεδρική ισχύ χρησιμότητας, ικανή να λειτουργεί ακόμη και όταν υπάρχει μια διακοπή ρεύματος στο δίκτυο. Οι διακοπές ρεύματος μπορεί να γίνουν πολύ δαπανηρές για τις επιχειρήσεις – για παράδειγμα, μία ώρα

διακοπής σε μια βιομηχανική μονάδα παραγωγής μπορεί να κοστίσει πάνω από 50.000 ευρώ σε απώλειες και κάποιες φορές διακυβεύονται περισσότερα πράγματα από τα χρήματα.

Η αυξημένη αξιοπιστία που παρέχουν τα συστήματα ΣΗΘ είναι ιδιαίτερα σημαντική για εγκαταστάσεις όπου η δύναμη είναι κρίσιμης σημασίας, όπως τα νοσοκομεία, τα κέντρα δεδομένων και οι 24/7 βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Στην πραγματικότητα, κατά την διάρκεια του τυφώνα Κατρίνα τον Αύγουστο του 2005 και του Τυφώνα Sandy τον Οκτώβριο του 2012, εγκαταστάσεις με ΣΗΘ είχαν αδιάλειπτη πρόσβαση σε αξιόπιστη και βασική ενέργεια και θερμικές παροχές. Αυτές οι περιοχές περιελάμβαναν το Baptist Medical κέντρο στο Jackson, Mississippi, Co-Op City στο Bronx, New York, το νοσοκομείο South Oaks στο Amityville, NY, το νοσοκομείο Greenwich στο Greenwich, το κολλέγιο της New Jersey στο Ewing κ.α. Για το Πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης, τα κρίσιμα οφέλη της ΣΗΘ ήταν ολοφάνερα: ενώ η πανεπιστημιούπολη του Ουάσιγκτον είχε ενέργεια, το ιατρικό κέντρο του Langone έχασε την κεντρική και εφεδρική παρόχη ηλ. Ενέργειας, ωστόσο έπρεπε να εκκενώσει όλους τους ασθενείς του.

Τέλος, για την απομόνωση των εγκαταστάσεων από την αστάθεια των τιμών καυσίμων και πιθανούς κινδύνους εφοδιασμού, μπορούν να διαμορφωθούν συστήματα ΣΗΘ τα οποία λειτουργούν με πολλαπλά καύσιμα.

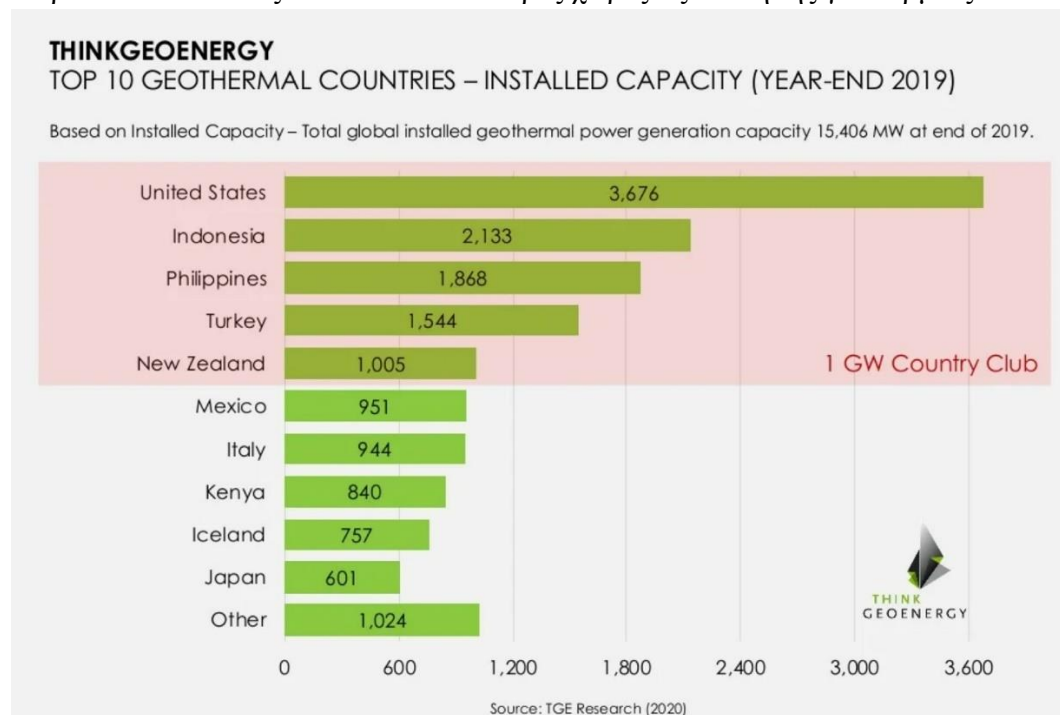
1.6 Πηγές θερμότητας για παραγωγή μέσης θερμοκρασίας

1.6.1 Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι ένας τύπος ανανεώσιμης ενέργειας που λαμβάνεται από τον πυρήνα της Γης. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται κατά τον αρχικό σχηματισμό του πλανήτη και τη ραδιενεργή αποσύνθεση των υλικών. Αυτή η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται σε πετρώματα και υγρά στο κέντρο της γης. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας στον πυρήνα της γης και την επιφάνεια οδηγεί σε μια συνεχή αγωγιμότητα της θερμικής ενέργειας από το κέντρο προς το εξωτερικό του πλανήτη. Για παράδειγμα στην Ισλανδία μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια υπάρχουν θερμοκρασίες της τάξης των 1000°C. Ο μέσος γεωθερμικός λόγος κοντά στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 300 K/Km, ο οποίος δεν είναι ομοιόμορφα διανεμημένος, γι'αυτό υπάρχουν περιοχές κατάλληλες και ακατάλληλες για γεωθερμικές εγκαταστάσεις (Bertrand F. Tchanche, 2011)

Το 1904-1905 στην Ιταλία έγιναν τα πρώτα βήματα για ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμική ενέργεια από τον Prince Ginori Conti με μία πειραματική διαδικασία. Η πρώτη εμπορική μονάδα των 250 kWε έχει καταγραφεί το 1913 στο Larderello της Ιταλίας.

Αυτήν την στιγμή η παγκόσμια εγκατεστημένη χωρητικότητα φθάνει τα 15.406MW (2019). Παρακάτω απεικονίζονται οι 10 καλύτερες χώρες αξιοποίησης γεωθερμίας.

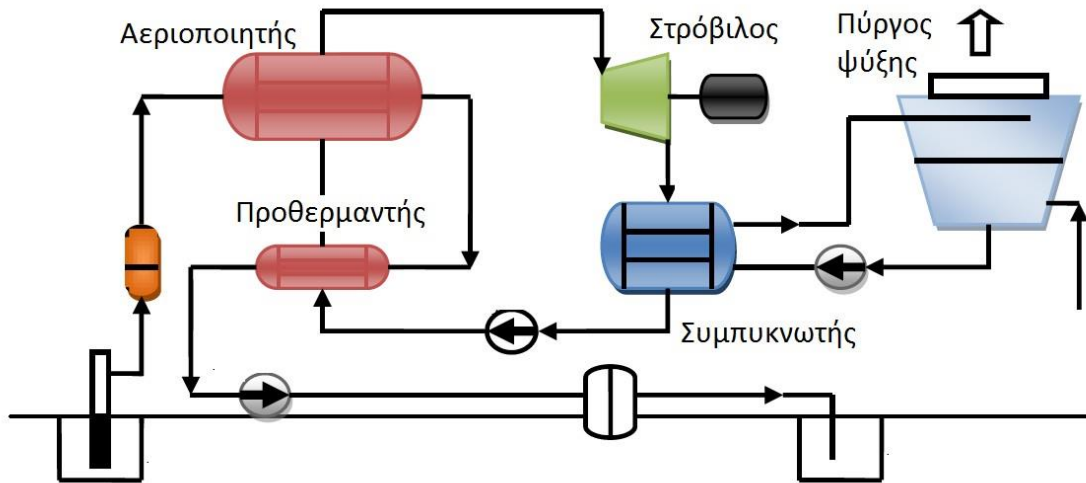


Εικόνα 1.3 - Οι πρώτες 10 χώρες με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη χωρητικότητα γεωθερμικών μονάδων (<https://www.thinkgeoenergy.com>)

Η αξιοποιήσιμη θερμότητα από γεωθερμικές πηγές καλύπτει μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών . Η χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί είναι 80°C και η υψηλότερη μπορεί να φτάσει και τους 350 °C. Κάτω απο τους 80 °C, οι γεωθερμικές μονάδες επιτυγχάνουν χαμηλό βαθμό απόδοσης και δεν είναι πλέον οικονομικά βιώσιμες. Στις γεωθερμικές μονάδες χαμηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούν κύκλους ORC παρατηρείται σχετικά μεγάλη κατανάλωση ενέργειας στα βοηθητικά συστήματα. Για παράδειγμα οι αντλίες καταναλώνουν 30% - 50% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Δηλαδή, όσο μειώνετε η θερμοκρασία αεριοποίησης η αντλία του εργαζόμενου μέσου η καταναλώνει περισσότερη ενέργεια γεγονός που οφείλετε στον λόγο μεταξύ κατανάλωσης της αντλίας και παραγωγής ενέργειας της μονάδας. Θερμοκρασίες υψηλότερες των 150°C γεωθερμικών πηγών επιτρέπουν το συνδυασμό παραγωγής θερμότητας και ενέργειας. Το φαινόμενο της συμπύκνωσης που παρουσιάζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες (π.χ. $\approx 60^{\circ}\text{C}$) επιτρέποντας την ε χρήση του νερού για τοπική θέρμανση. Σε αυτή την περίπτωση ο συνολικός βαθμός ανάκτηση θερμικής ενέργειας αυξάνεται, αλλά εις βάρος χαμηλότερου βαθμού απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας (Sylvain Quoilin, 2013).

Στο δυαδικό σύστημα γεωθερμίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα η θερμότητα που έχει το γεωθερμικό υγρό μεταδίδεται σε ένα δευτερεύον εργαζόμενο μέσο, δια μέσου δύο εναλλακτών θερμότητας, το οποίο χρησιμοποιείται σε ένα κλασικό κύκλο Rankine. Το εργαζόμενο μέσο προθερμαίνεται στον θερμαντήρα, αεριοποιείται στον αεριοποιητή και εκτονώνεται πριν

συμπυκνωθεί και μεταφερθεί εκ νέου στον αεριοποιητή μέσω της αντλίας. Η συμπύκνωση επιτυγχάνεται μέσω αέρα, νερού ή ψυκτικών πύργων.



Εικόνα 1.4 - Σχηματικό διάγραμμα δυαδικού συστήματος γεωθερμίας (Πηγή: DiPippo, 2008)

Το πρώτο δυαδικό σύστημα γεωθερμίας λειτούργησε στην Paratunka της Ρωσίας το 1967. Υπολογίστηκε στα 680kWe χρησιμοποιώντας νερό σε θερμοκρασία 81°C όπου εκεί αποδείχθηκε η σκοπιμότητα του δυαδικού συστήματος. Σήμερα, τα δυαδικά συστήματα είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος μονάδας γεωθερμικής ενέργειας με 162 μονάδες παγκοσμίως, παράγοντας 373MW ενέργειας. Αποτελούν το 32,14% όλων των γεωθερμικών μονάδων που λειτουργούν, αλλά παράγουν μόνο το 4% της συνολικής ισχύος (DiPippo, 2008). Μερικές δυαδικές μονάδες δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1 - Εγκατεστημένα δυαδικά συστήματα γεωθερμίας ανά τον κόσμο

Plants/location	Resource temp. (°C)	Resource mass flow	Working fluid	Gross/Net power (MW)	Thermal efficiency (%)
Amedee, USA	104	205 l/s	R-114	2.0/1.5	-
Wineagle, USA	110	63 l/s	isobutane	0.75/0.6	-
Altheim, Austria	106	86 l/s	-	-/1.0	-
Otake, Japan	130	14.661 kg/s	isobutane	-/1.0	12.9
Nigorikawa, Japan	140	50 kg/s	R-114	-/1.0	9.81
Reno, NV, USA	158	556 kg/s	isobutane	27/21.744	10.2

(Πηγές: Bloomquist, 2003; DiPippo, 2004; Kanoglu and Bolatturk, 2008)

1.7 Ηλιακά Συστήματα

Ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να παραχθεί από μετατροπή συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα μέσω εργαζόμενου μέσου, με το οποίο παράγεται ατμός και ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά, αυτή είναι μια έμμεση μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί ‘καθρέπτες’ για τη συγκέντρωση του ηλιακού φωτός σε ένα μέσο για την παραγωγή ατμού και μετά χρησιμοποιήστε σε αμοστρόβιλους για να κινήσει ηλεκτρογεννήτριες.

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα κυμαίνονται από μικρά αυτόνομα συστήματα λίγων Killowatt έως και ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς εκατοντάδων MW συνδεδεμένους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η παραγωγή μικρών συγκεντρωτικών συστημάτων 3–25kW ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή καταναμημένων αυτόνομων συστημάτων ισχύος μετά από καταστροφές και τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές.



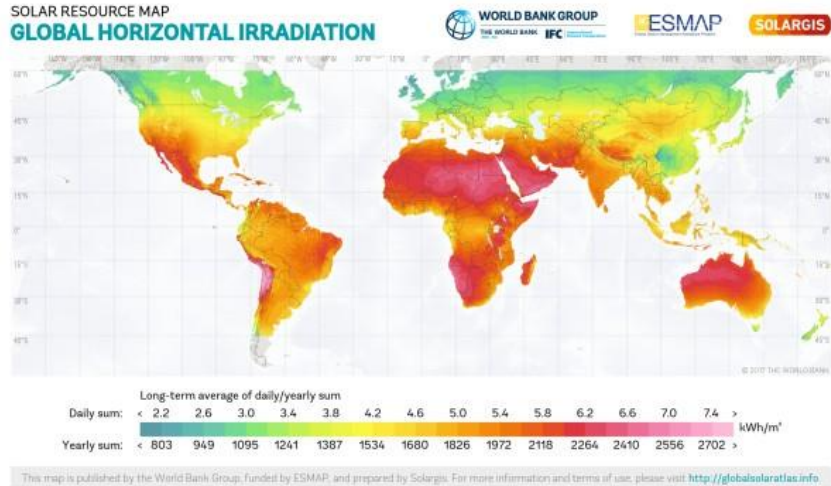
Εικόνα 1.5 - Επισκόπηση των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής με ηλιακά θερμικά συστήματα (Πηγή: Tchanche 2010)

Στις εφαρμογές ORC με ηλιακά συστήματα βασίζονται στην ίδια αρχή με τους παραβολικούς συλλέκτες, αλλά χρησιμοποιούν οργανικά μεσα αντί ατμού. Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι τα εξής:

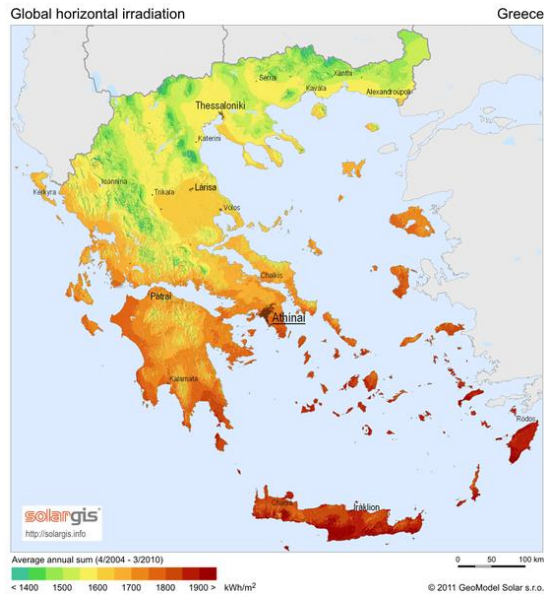
- Λειτουργία χαμηλής θερμοκρασίας (<300°C): ρευστά μεταφοράς θερμότητας όπως στο Caloria, ηλιακοί συλλέκτες χαμηλής θερμοκρασίας και χαμηλή θερμοκρασία μονάδων ORC που μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε περιοχές με χαμηλή ηλιακή ένταση ακτινοβολίας όπως οι περιοχές της Αφρικής στη Σαχάρα.
- Μεγάλα ηλιακά εργοστάσια ORC αρκετών MW ισχύς εξόδου μπορούν να κατασκευασθούν συνδυάζοντας στην ίδια περιοχή μεγάλο αριθμό μονάδων ORC
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν φθηνά υλικά – φθινό ρευστό μεταφοράς θερμότητας, φθηνά ηλιακά πανέλα και σχετικά φθηνά συστήματα ORC. Οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές

εξοικονομούν νερό , ενώ η απομακρυσμένη λειτουργία μειώνει τον αριθμό των χειριστών .

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι καταλληλότερα σε περιοχές με ετήσια άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω από 1800kWh/m² το χρόνο (Tchanche, 2010). Στις εικόνες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται ο παγκόσμιος και ο ευρωπαϊκός χάρτης αντίστοιχα που δείχνουν την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία. Στην Ευρώπη καταλληλότερες περιοχές για ηλιακά θερμικά συστήματα είναι οι νότιες περιοχές της ηπείρου.



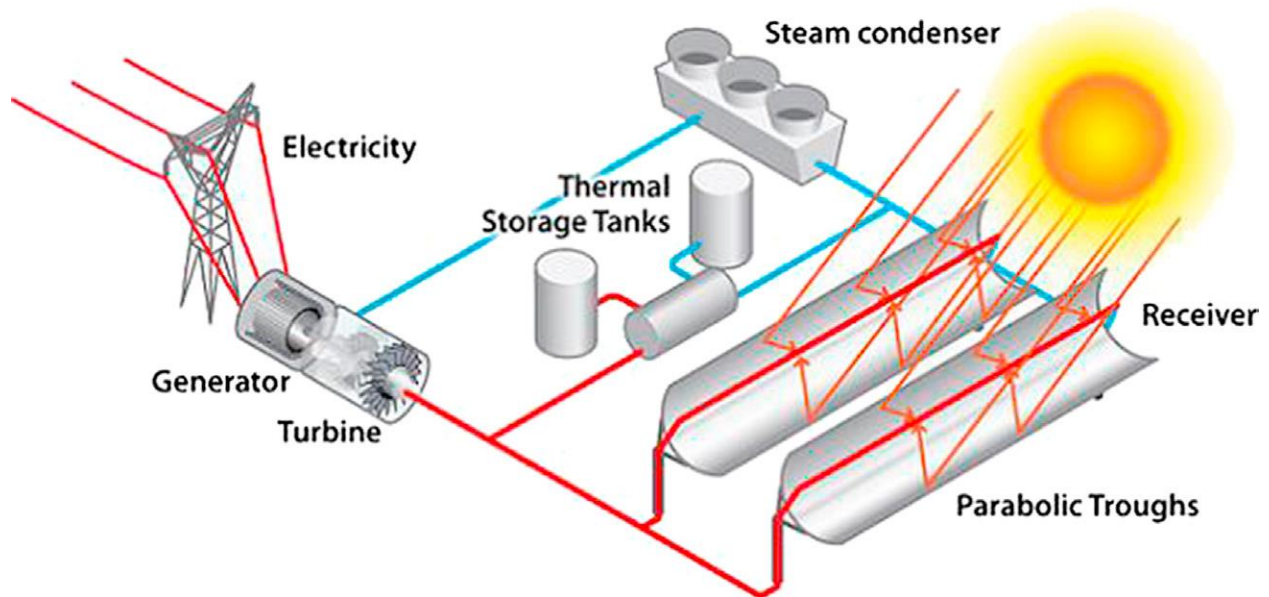
Εικόνα 1.6 - Παγκόσμιος χάρτης καταλληλότητας ηλιακών θερμικών εφαρμογών (Πηγή: www.solargis.info)



Εικόνα 1.7 - Ελληνικός χάρτης καταλληλότητας ηλιακών θερμικών εφαρμογών (Πηγή: www.solargis.info)

1.7.1 Παραβολικοί συλλέκτες

Τα παραβολικά συστήματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8 είναι τα πιο οικονομικά αποδοτικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Αντοπροσωπεύει περίπου το 90% της εγκατεστημένης βάσης CSP. Αυτό το σύστημα αποτελείται από έναν μακρύ συλλέκτη παραβολικού σχήματος με καμπυλωτούς καθρέφτες που εστιάζει τις ακτίνες του ήλιου σε έναν σωλήνα απορρόφησης που βρίσκεται στο εστιακό σημείο των παραβολικών ‘γούρνων’. Αυτά τα δοχεία μπορούν να έχουν μήκος μεγαλύτερο από 600m και ο μεταλλικός απορροφητικός σωλήνας είναι συνήθως ενσωματωμένος σε έναν γυάλινο σωλήνα που εκκενώνεται για τη μείωση των απωλειών θερμότητας. Οι γούρνες περιστρέφονται καθ’όλη την διάρκεια της ημέρας καθώς ο ήλιος κινείται από ανατολικά προς δυτικά για μεγιστοποίηση της λήφθειςας ηλιακής ενέργειας. Ο μεταλλικός απορροφητικός σωλήνας γεμίζει με ρευστό, συνήθως συνθετικό λάδι, το οποίο μπορεί να θερμανθεί έως τους 400°C. Λόγω του παραβολικού σχήματος, οι κοιλότητες μπορούν να εστιάσουν τον ήλιο 30-100 φορές της κανονικής έντασης του. Στην συνέχεια το υγρό αντλείται μέσω εναλλάκτη θερμότητας που μεταφέρει θερμότητα σε νερό που παράγει ατμό όταν βράζει το νερό. Ο ατμός χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση στροβίλου έπειτα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση άλλων υγρών μεταφοράς θερμότητας όπως λιωμένα άλατα επιτρέπει τη λειτουργία έως τους 550°C, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της εγκατάστασης. Αυτά τα συστήματα μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ως υβρίδια χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα για την υποστήριξη της ηλιακής θερμικής παραγωγής κατά την διάρκεια της νύχτας ή κατά τη διάρκεια περιόδων συννεφισμένων ημερών. (Salahuddin, 2016)



Εικόνα 1.8 - Τυπικό σύστημα με παραβολικούς συλλέκτες. (Salahuddin, 2016)

Οι περισσότερες από τις τρέχουσες μονάδες θερμικής παραγωγής ενέργειας για μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναπτύχθηκαν από τη Lunz International, η οποία χρησιμοποιεί παραβολικό σχεδιασμό κατωφλιών που ονομάζεται συλλέκτες συστήματος LUZ (LS-1,2,3) κατασκευασμένο από γαλβανισμένο χάλυβα για την υποστήριξη της δομής του με βάση τη ροπή. Η Luz κατασκεύασε εννέα ηλιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (SEGS) με ισχύ 13–80 MW μεταξύ 1984 και 1990. Δύο πρόσθετες εγκαταστάσεις παραβολικών κατωφλιών λειτουργούν από τη δεκαετία του 1990 στις Ηνωμένες Πολιτείες στη Νεβάδα και τη Φλόριντα. Η Nevada Solar One (NSO) ξεκίνησε το 2007 και παράγει 64 MW. Το Martin Next Generation Solar Energy Center, Indiantown, Florida, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2010 με ισχύ 75 MW. Πρόκειται για το πρώτο εργοστάσιο υβριδικού συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου και CSP.

Στην Ισπανία, κατασκευάζονται περισσότερα από 1 GW παραβολικών κατώτατων ηλιακών εγκαταστάσεων μεταξύ 2007 και 2013 με τη βοήθεια κρατικών επιδοτήσεων με τη μορφή τιμολογίων. Τα περισσότερα από αυτά τα φυτά χρησιμοποιούν λιωμένο αλάτι για TES. Στα εργοστάσια παραβολικών κάτοπτρων στην Ισπανία περιλαμβάνονται ο σταθμός Solaben Solar Power 200 MW, ο σταθμός Solnova Solar Power 200 MW και ο σταθμός ηλιακής ενέργειας Andasol-1 50 MW που χρησιμοποιεί συλλέκτες Eurotrough. (Salahuddin, 2016)



Εικόνα 1.9 - Solnova CSP εγκατάσταση παραβολικών συλλεκτών. (Salahuddin, 2016)

1.7.2 Γραμμικά συστήματα ανακλαστήρων Fresnel

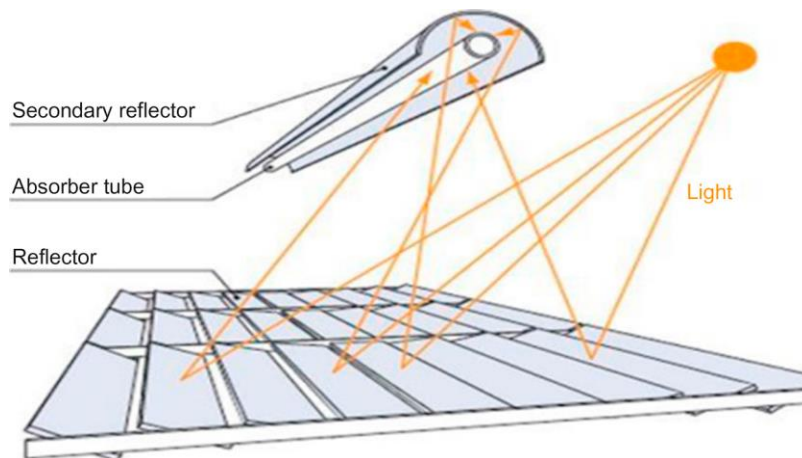
Η τεχνολογία γραμμικού ανακλαστήρα Fresnel έλαβε το όνομά της από τον φακό Fresnel, ο οποίος έχει πολλαπλά επίπεδα διάθλασης σχεδιασμένα για τη βελτίωση της συγκέντρωσης φωτός που προέρχεται από πολλές διαφορετικές γωνίες σε ένα μόνο σημείο ή γραμμή. Αυτός ο φακός αναπτύχθηκε από τον Augustin-Jean Fresnel τον 18ο αιώνα, και επιτρέπει σημαντική μείωση του πάχους, του όγκου και του βάρους του φακού, αλλά επίσης μειώνει την ποιότητα της απεικόνισης. Ο Giovanni Francia της Ιταλίας το εφάρμοσε για πρώτη φορά το 1960 για την ανάπτυξη γραμμικού και διπλού άξονα εντοπισμού συστήματος παραγωγής ατμού Fresnel.

Ο σχεδιασμός ενός γραμμικού ανακλαστήρα Fresnel βασίζεται σε μια αρχή μεταξύ του ηλιακών δεξαμενών και των παραβολικών συστημάτων συμπύκνωσης. Είναι παρόμοιο με το σύστημα παραβολικών κατόπτρων, αλλά περιέχει σταθερό σωλήνα απορρόφησης, ενώ το παρακολουθούν καθρέφτες-κάτοπτρα. Το σχήμα της κοιλότητας χωρίζεται σε πολλαπλές όψεις καθρεπτών. Αυτό το σύστημα που βασίζεται στον καθρέφτη χρησιμοποιεί την ίδια αρχή με έναν φακό Fresnel που χρησιμοποιείται για καθρέφτες επίπεδου επιπέδου που παρακολουθούν τον ήλιο ώστε να αντανακλούν το φως σε ένα σωλήνα. Ένας πρόσθετος δευτερεύων καθρέφτης χρησιμοποιείται σε ορισμένα συστήματα πίσω από το εστιακό επίπεδο που κατευθύνει το φως του ήλιου στον αγωγό απορρόφησης. Το γραμμικό σύστημα ανακλαστήρα Fresnel που φαίνεται στην Εικόνα 2.0 χρησιμοποιεί μεγάλες σειρές επίπεδων ή ελαφρώς καμπυλωτών καθρεπτών για να αντανακλά το φως του ήλιου σε έναν προς τα κάτω ανυψωμένο γραμμικό συλλέκτη που περιέχει δύο σωλήνες απορρόφησης από ανοξείδωτο χάλυβα.

Ο συλλέκτης σε αυτό το σύστημα είναι ένας σταθερός σωλήνας απορρόφησης που βρίσκεται στην κοινή εστιακή γραμμή των ανακλαστήρων εξοπλισμένος με ιχνηλάτη μονού ή διπλού άξονα για μεγιστοποίηση της ποσότητας της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ένας δευτερεύων συμπυκνωτής χρησιμοποιείται για να αντανακλά τις ακτίνες εντός της γωνίας αποδοχής. Οι ανακλαστήρες Fresnel συγκεντρώνουν ακτινοβολία δέσμης σε ένα σταθερό δέκτη. Ο δέκτης αποτελείται από δύο σωλήνες απορρόφησης από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάθε δέκτης έχει ένα δευτερεύον CPC ανακλαστήρα που κατευθύνει την ακτινοβολία δέσμης στον σωλήνα απορρόφησης. Ολόκληρο το οπτικό σύστημα περικλείεται σε ένα σφραγισμένο περίβλημα με τζάμια. Ο απορροφητικός σωλήνας περιέχει υγρό μέσο το οποίο θερμαίνεται για τη δημιουργία υπερθέρμανσης ατμού που τρέχει στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα νέα συστήματα έχουν σχεδιαστεί ώστε να θερμαίνει το νερό για την παραγωγή ατμού στους 285 ° C στους σωλήνες απορρόφησης, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν άμεσα για την οδήγηση ενός στρόβιλου για την παραγωγή ηλεκτρισμού αντί για τη χρήση εναλλάκτη θερμότητας για την παραγωγή ατμού από άλλα υγρά υψηλής θερμοκρασίας. Ολόκληρο το οπτικό σύστημα περικλείεται σε ένα σφραγισμένο περίβλημα με τζάμια.

Υπάρχουν γραμμικές μονάδες Fresnel σε λειτουργία ή υπό κατασκευή στον κόσμο που παράγουν περισσότερα από 200 MW ισχύος. Το πρώτο εμπορικό σύστημα γραμμικού ανακλαστήρα Fresnel (LFR) που ονομάζεται Puerto-Errado 2 (PE 2) ολοκληρώθηκε στην Ισπανία το 2012 και κατασκευάστηκε από την Novatec Solar. Το PE 2 είναι μονάδα 30 MW με ηλιακό λέβητα επιφάνειας 302.000 m² καθρέφτη. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παράγει περίπου 50 εκατομμύρια kWh ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρόνο, αποτελώντας τη μεγαλύτερη

μονάδα CSP στον κόσμο με βάση το LFR. Το PE 2 αποτελείται από 28 σειρές γραμμικών συλλεκτών Fresnel και μήκος ηλιακού πεδίου 940 m. Το εργοστάσιο μπορεί να παρέχει καθαρή ενέργεια για να τροφοδοτήσει 12.000 ισπανικά σπίτια και να αποφύγει το ισοδύναμο άνω των 16.000 μετρικών τόνων εκπομπών CO₂ κάθε χρόνο. (Salahuddin, 2016)



Εικόνα 2.0 - Γραμμικό σύστημα κάτοπτρων Fresnel (Salahuddin, 2016)

1.7.3 Ευέλικτες μονάδες ORC σε ηλιακά συστήματα

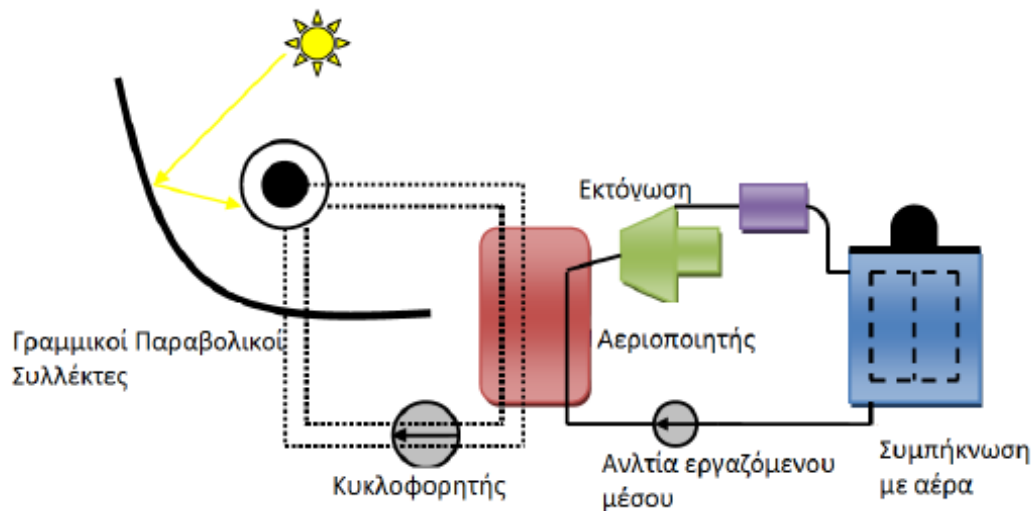
Υπάρχουν Διάφοροι παράγοντες που δημιουργούν αυξημένο δυναμικό αγοράς για τους μικρούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (Tchanche, 2010). Η ανάγκη καταναμημένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για αγροτικούς οικισμούς σε απομακρυσμένες περιοχές, η ανάγκη παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη για βιώσιμη ενέργεια για την οικονομική ανάπτυξη στις αναπτυσσόμενες χώρες και την απορρύθμιση και την ιδιωτικοποίηση του τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Οι ώριμες δυαδικές γεωθερμικές και μεσαίες τεχνολογίες συλλεκτών μπορούν να συγχωνευθούν για την παραγωγή καταναμημένων ευέλικτων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην περιοχή kW έως MW. Τα πλεονεκτήματα των μικρών ηλιακών συστημάτων κατώτατων/γραμμικών συστημάτων Fresnel ORC περιλαμβάνουν λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία (<300 °C), ευελιξία, μειωμένο κόστος κεφαλαίου, λειτουργίας, παραγωγής και καλή οικονομία κλίμακας. Ωστόσο, μέχρι τώρα έχουν διερευνηθεί πολύ λίγες μονάδες CSP που συνδυάζουν συλλέκτες μέσης θερμοκρασίας και μονάδες ORC. Οι ευέλικτοι οργανικοί κύκλοι Rankine σε μονάδες παραγωγής ενέργειας λειτουργούν με την ίδια αρχή όπως τα συμβατικά συστήματα παραβολικών συλλεκτών, αλλά χρησιμοποιούν οργανικό μέσο αντί του ατμού. Τα πλεονεκτήματα των μικρών ηλιακών συστημάτων με κύκλους ORC είναι:

- Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (<300°C),
- Ευελιξία αφού μεγάλα ηλιακά συστήματα μερικών MW μπορούν να γίνουν συνδυάζοντας μικρά συστήματα ORC
- Μείωση του αρχικού κεφαλαίου και του κόστους O&M λόγω των φτηνών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

- Φτηνά μέσα μεταφοράς θερμότητας, φτηνοί ηλιακοί συλλέκτες και σχετικά φτηνά συστήματα ORC
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας αντί νερού για τη συμπύκνωση

Ωστόσο οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με ηλιακά συστήματα και μονάδες ORC είναι περιορισμένες.

Μία από αυτές είναι η μονάδα που εγκαταστάθηκε στο Lesotho της Αφρικής από την Solar Turbine Group International . Με αυτήν την εφαρμογή η εταιρία απέδειξε ότι τα συστήματα ORC μικρής ακτινοβολίας (microsolar) είναι οικονομικά αποδοτικά σε περιοχές αναπτυσσόμενων χωρών χωρίς ηλεκτρικό δίκτυο, όπου δισεκατομμυρία κάτοικοι ζούν χωρίς πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η διάταξη της μονάδας και στην εικόνα 1.11 φαίνονται οι παραβολικοί συλλέκτες της εγκατάστασης.



Σχήμα 1.10 - Σχηματικό διάγραμμα ηλιακού συστήματος ORC (Orosz et al., 2009)



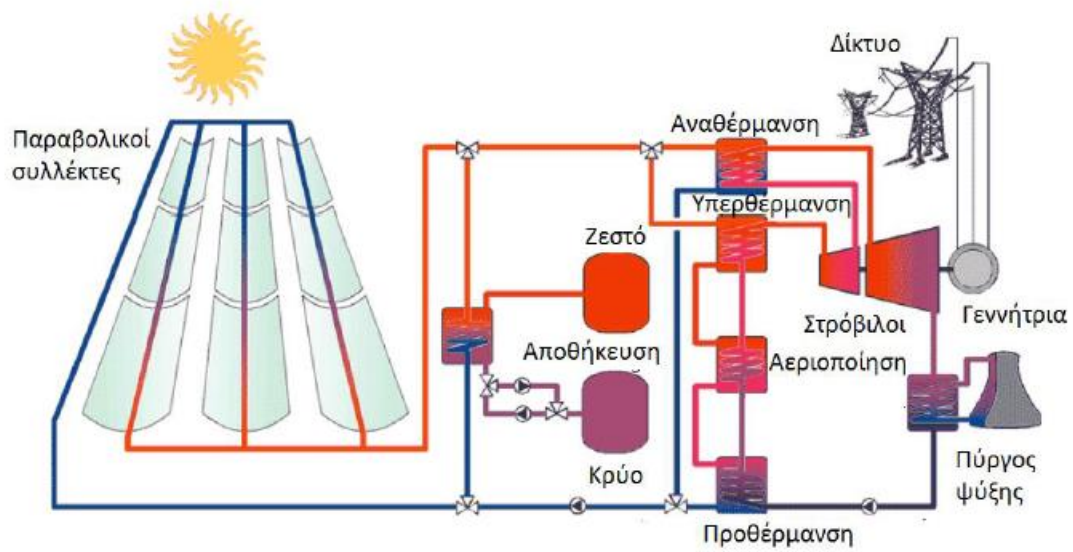
Εικόνα 1.11 – Παραβολικοί συλλέκτες εν λειτουργία. (S. Quoilin, 2011)

1.7.4 Συστήματα ηλιακών δεξαμενών ή ηλιακής λίμνης

Μία μονάδα ηλιακής δεξαμενής είναι σχετικά νέα τεχνολογία σε σχέση με τους γραμμικούς παραβολικούς συλλέκτες και συνιστάται για σταθμούς παραγωγής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Ένα σύστημα ηλιακής δεξαμενής αποτελείται από μεγάλους επίπεδους καθρέφτες ανίχνευσης του ήλιου που εστιάζουν το φως του ήλιου σε έναν δέκτη στην κορυφή του πύργου. Αυτοί οι καθρέφτες παρακολούθησης, που αριθμούνται σε εκατοντάδες έως και χιλιάδες, που ονομάζονται ηλιοστάτες, μπορούν να συγκεντρώσουν έως και 1500 φορές την ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο. Αυτή η τεράστια ποσότητα ενέργειας παράγει υψηλή θερμοκρασία 500-1500°C, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση ενός υγρού μέσου όπως νερό ή αραιωμένο άλας. Το θερμό υγρό μέσο στην δεξαμενή χρησιμοποιείται για να παράξει ατμό με τον οποίο στην συνέχεια γυρνάει έναν στρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας.

Η τεχνολογία ηλιακής δεξαμενής είναι μία από τις ηλιακές θερμικές τεχνολογίες που έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια η οποία της επιτρέπει να τροφοδοτεί ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο όταν χρειάζεται και κατά τη διάρκεια συννεφιασμένου καιρού ή νύχτας όταν δεν υπάρχει ήλιος. Είναι μία πολύ αποδοτική και απόλυτα οικολογική πηγή τροφοδότησης ενέργειας μεγάλης κλίμακας για περιοχές που είναι μη-παραγωγικές όπως η έρημος. Εκτιμάται ότι ένας μοναδικός πύργος ισχύος 100 MW με 12 ώρες αποθήκευσης απαιτεί μόνο 1000 στρέμματα γης για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε 50.000 σπίτια.

Η ηλιακή λίμνη ανακαλύφθηκε ως φυσικό φαινόμενο γύρω στα τέλη του περασμένου αιώνα στη λίμνη Medve στην Τρανσυλβανία στην Ουγγαρία. Στη λίμνη αυτή καταγράφηκαν θερμοκρασίες έως 70 °C σε βάθος 1,32 m στο τέλος της θερινής περιόδου. Η ελάχιστη θερμοκρασία ήταν 26 °C στις αρχές της άνοιξης. Ο πυθμένας αυτής της λίμνης είχε αλάτι NaCl με συγκέντρωση 26%. Η ηλιακή λίμνη είναι τεχνητά κατασκευασμένη. Για να αποφευχθεί η μεταφορά, χρησιμοποιείται αλμυρό νερό στη λίμνη. Αυτές οι λίμνες ονομάζονται «ηλιακή λιμνούλα με κλίση αλατιού». Στις μέρες μας κατασκευάζονται και μίνι ηλιακές λίμνες για διάφορες θερμικές εφαρμογές. Συνήχθη το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη τιμή αλατότητας στη μίνι ηλιακή λίμνη είναι 80 g/kg νερού.



Σχήμα 1.13 – Αρχή λειτουργίας μονάδας παραβολικών συλλεκτών (HANS MÜLLER-STEINHAGEN, 2004)

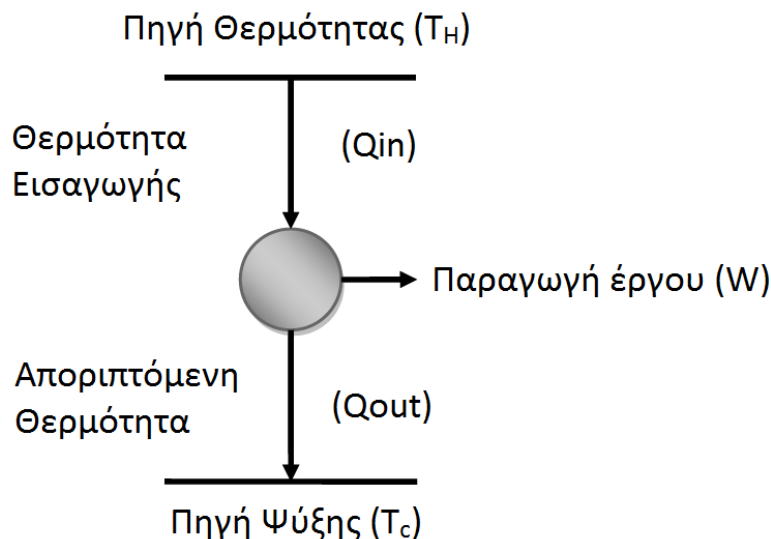
Κεφάλαιο 2^ο : Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)

2.1 Εισαγωγή

Οι θερμικές μηχανές στην εποχή μας συμβάλλουν σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας, μετατρέποντας την θερμική ενέργεια σε μηχανικό έργο και έπειτα σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά όσο και ένας πυρηνικός ή ένας λιγνιτικός σταθμός παραγωγής ενέργειας. Σε τέτοιες μηχανές χρησιμοποιούμε καύσιμο για την θέρμανση ενός δοχείου νερού, ώστε να παράξουμε ατμό με αποτέλεσμα την κίνηση στροβίλου και παράλληλα γεννήτριας. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε και θα μελετήσουμε τέτοιου είδους μηχανές στην κλασική τους, αλλά και στην εξελιγμένη τους μορφή.

2.2 Συμβατικός κύκλος Rankine

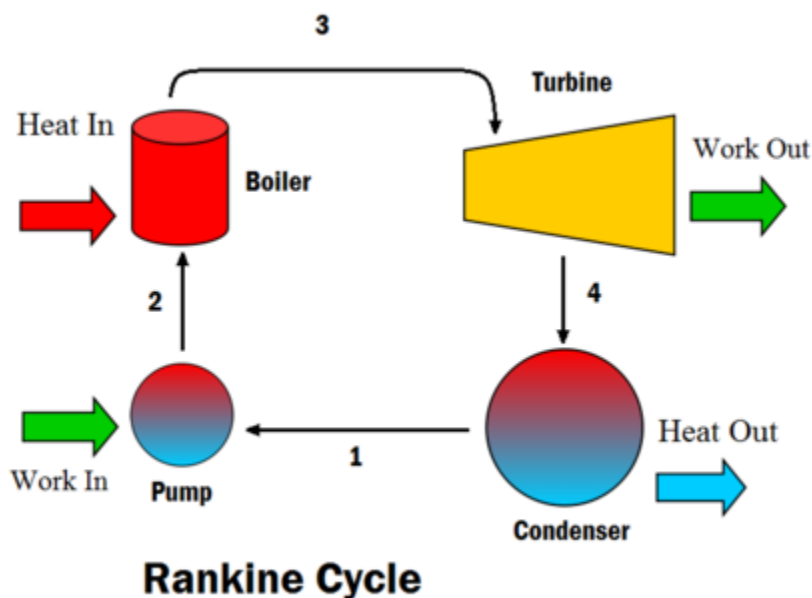
Το 1859, ο Σκωτσέζος μηχανικός William John Macquorn Rankine, με την έκδοση ενός βιβλίου άλλαξε ριζικά την θεωρία των ατμομηχανών. Ο κύκλος Rankine ή ο κύκλος της ενέργειας με ατμό έχει χρησιμοποιηθεί από καιρό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα και πυρηνικά καύσιμα. Η απόδοση μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ισχύ ενός κύκλου Rankine που χρησιμοποιεί νερό ως υγρό λειτουργίας γίνεται αντιοικονομικά χαμηλή για θερμοκρασίες λέβητα κάτω των 370 C. Συγκεκριμένα το εργαζόμενο μέσο λόγω των θερμοφυσικών ιδιοτήτων, απορροφά την ενέργεια από την πηγή θερμότητας και την μεταβιβάζει τη πηγή ψύξης, ενώ μέρος της ενέργειας του που αφαιρείται μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Συνήθως εάν η διαφορά θερμοκρασίας των δύο πηγών είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος.



Σχήμα 1.14 - Ενεργειακό ισοζύγιο

Ενώ πολλές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαζόμενο υγρό στον κύκλο Rankine (ανόργανες ή ακόμη και οργανικές), το νερό είναι συνήθως το υγρό επιλογής λόγω των ευνοϊκών ιδιοτήτων του, όπως η μη τοξική και αδρανής χημεία, η αφθονία και το χαμηλό κόστος, καθώς και οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες. Για παράδειγμα, το νερό έχει την υψηλότερη ειδική θερμότητα οποιασδήποτε κοινής ουσίας - 4,19 kJ / kg K. Επιπλέον, έχει πολύ υψηλή θερμότητα εξάτμισης, γεγονός που το καθιστά ένα αποτελεσματικό ψυκτικό και μέσον στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και στην άλλη ενεργειακή βιομηχανία. Στην περίπτωση του κύκλου Rankine, ο νόμος για το ιδανικό αέριο σχεδόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (ο ατμός δεν ακολουθεί $pV = nRT$), επομένως όλες οι σημαντικές παράμετροι του νερού και του ατμού καταγράφονται σε λεγόμενα "Πίνακες Ατμού".

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του κύκλου Rankine είναι ότι η διαδικασία συμπίεσης στην αντλία λαμβάνει χώρα σε ένα υγρό. Με τη συμπύκνωση του ατμού εργασίας σε ένα υγρό (εντός συμπυκνωτή) μειώνεται η πίεση στην έξοδο στροβίλου και η ενέργεια που απαιτείται από την αντλία τροφοδοσίας καταναλώνει μόνο το 1% έως 3% της ισχύος εξόδου του στροβίλου και οι παράγοντες αυτοί συμβάλλουν σε υψηλότερη απόδοση τον κύκλο.



Σχήμα 1.15 - Σχηματικό διάγραμμα τυπικού κύκλου Rankine (https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine_cycle)

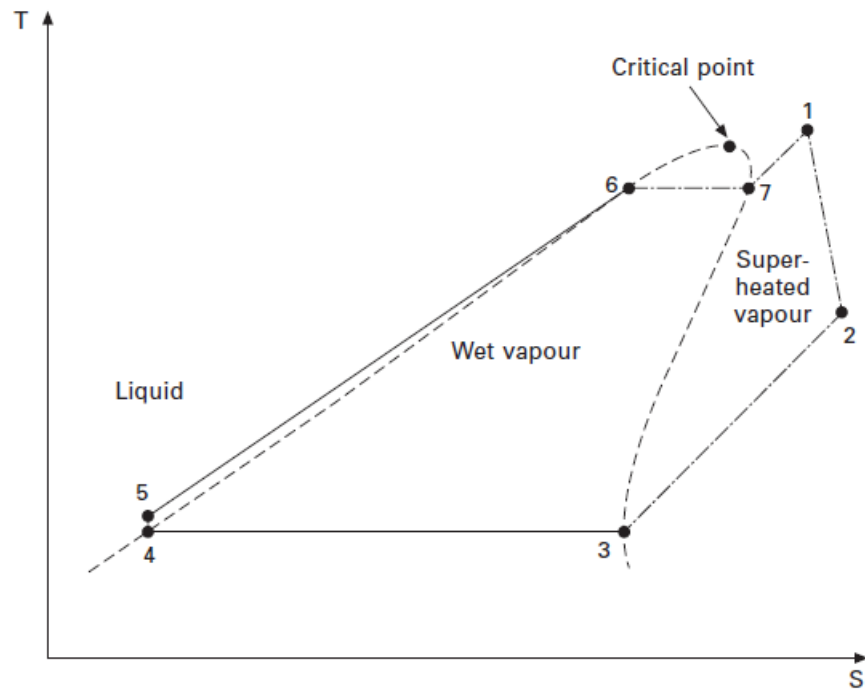
Το ρευστό εισέρχεται στην αντλία (1) ως κορεσμένο υγρό και συμπιέζεται ισεντροπικά ως την πίεση λειτουργίας του αεριοποιητή. Κατά την διάρκεια αυτής της ισεντροπικής συμπίεσης εξαιτίας της μικρής μείωσης στον ειδικό όγκο του υγρού, η θερμοκρασία του υγρού αυξάνεται ελάχιστα. Το ρευστό στην συνέχεια εισέρχεται στον αεριοποιητή ως συμπιεσμένο υγρό (2) και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός (3).

Ο λεγόμενος αεριοποιητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος διαρρέεται από υγρά ή αέρια χαμηλής έως και υψηλής θερμοκρασίας που προέρχονται από καυσαέρια, πυρηνικούς αντιδραστήρες, ή άλλες πηγές και μεταφέρεται στο εργαζόμενο μέσο ιδανικά ισεντροπικά. Ο αεριοποιητής με το τμήμα στο οποίο οι υδρατμοί υπερθερμαίνονται συνήθως αποκαλείται ως γεννήτρια ατμού (steam generator). Ο υπέρθερμος ατμός (3) εισέρχεται στον στρόβιλο και εκτονώνεται ισεντροπικά με αποτέλεσμα να παράγει έργο περιστρέφοντας την άτρακτο, η οποία συνήθως συνδέεται με μία ηλεκτρογεννήτρια. Κατά την διεργασία αυτή η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού μειώνονται (4) και στην συνέχεια οι υδρατμοί εισέρχονται στον συμπυκνωτή. Στην κατάσταση αυτή οι υδρατμοί είναι συνήθως μίγμα κορεσμένου υγρού ατμού.

Ο ατμός απορρίπτοντας την θερμότητά του σε ένα ψυκτικό μέσο δλδ. σε μία λίμνη, ένα ποτάμι ή την ατμόσφαιρα, συμπυκνώνεται σε σταθερή πίεση στον συμπυκνωτή ο οποίος είναι ένας μεγάλος εναλλάκτης θερμότητας. Ο υδρατμός αφήνει τον συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και εισέρχεται στην αντλία, ολοκληρώνοντας τον κύκλο. Σε περιοχές όπου το νερό είναι πολύτιμο οι εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος ψύχονται με αέρα αντί για νερό. Αυτή η μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται και στις μηχανές των αυτοκινήτων καλείται ξηρή ψύξη (dry cooling). Αρκετά εργοστάσια παραγωγής ισχύος ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν αυτόν τον τρόπο ψύξης για την προστασία και διατήρηση των υδάτινων πόρων.

2.3 Θερμοδυναμική ανάλυση Οργανικού κύκλου Rankine

Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι ολόιδιος με έναν συμβατικό κύκλο Rankine. Η μόνη διαφορά που υπάρχει, είναι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου. Όπως προαναφέραμε στα παραπάνω κεφάλαια σε ένα σύστημα ORC χρησιμοποιούμε οργανικά ρευστά και όχι νερό.



Σχήμα 1.16 – Αποτύπωση συστήματος ORC στο διάγραμμα T-s (Larjola J., 2011)

Ισχύει ότι ,

1. Εξίσωση ισορροπίας μάζας: $\Sigma_{min} = \Sigma_{out}$ [Εξίσωση 2]

2. Εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου: $E_{in} = E_{out}$ [Εξίσωση 3]

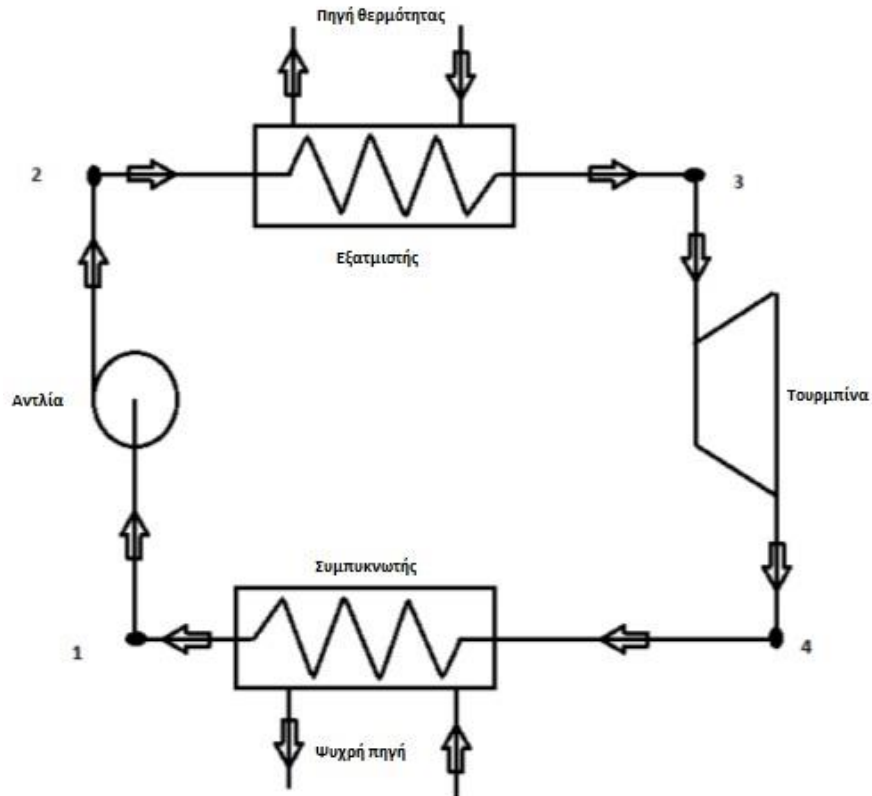
$$Q + W = \Sigma m_{out} \cdot h_{out} + \Sigma_{min} \cdot h_{in} \text{ [Εξίσωση 4]}$$

3. Εξίσωση εξεργειακού ισοζυγίου : $\Sigma Ex_{in} - \Sigma Ex_{out} - Ex_d = \Delta Ex_s$ [Εξίσωση 5]

4. Για σύστημα σταθερής κατάστασης : ΔEx_s είναι 0 . $Ex_{in} = Ex_{out}$ [Εξίσωση 6]

$$Ex_{heat} + W = Ex_{out} - Ex_{in} + I \text{ [Εξίσωση 7]}$$

Ενεργειακή Ανάλυση,



Σχήμα 1.17 - Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ORC

- Αντλία (1-2):

$$W_{1-2} = \dot{m} * (h_2 - h_1) [\text{kJ/kg}] \text{ [Εξίσωση 8]}$$

Όπου,

W_{1-2} είναι η κατανάλωση ενέργειας απο την αντλία

\dot{m} : είναι η ροή της μάζας του εργαζόμενου μέσου

h_1 : η ενθαλπία στην είσοδο της αντλίας

h_2 :η ενθαλπία στην έξοδο της αντλίας

Ο ρυθμός καταστροφής της εξέργειας δίνετε απο τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{I}_{1-2} = \dot{m} T_0 [(s_2 - s_1)] \text{ [Εξίσωση 9]}$$

Όπου,

\dot{I}_{1-2} : είναι ο ρυθμός εξεργειακής καταστροφής της αντλίας

T_0 : θερμοκρασία περιβάλλοντος σε K

S_1 : εντροπία στην είσοδο της αντλίας

S_2 : εντροπία στην έξοδο της αντλίας

Απόδοση αντλίας: $\eta_p = (h_{2s} - h_1)/(h_2 - h_1)$ [Εξίσωση 10]

- Εξατμιστής (2-3):

$$Q_{2-3} = \dot{m} (h_3 - h_2) \text{ [kJ/kg]} \text{ [Εξίσωση 11]}$$

Όπου,

Q_{2-3} : αναφέρεται στην θερμότητα που προστίθεται στο εργαζόμενο μέσο

h_3 : αναφέρεται στην ενθαλπία όπου εξέρχεται απο τον εξατμιστή και εισέρχεται στον στρόβιλο

Ο ρυθμός καταστροφής την εξέργειας στον εξατμιστή :

$$\dot{I}_{2-3} = \dot{m} T_0 [(s_3 - s_2) - (h_3 - h_2)/T_H] \text{ [Εξίσωση 12]}$$

Όπου,

\dot{I}_{2-3} : ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας στον εξατμιστή

S_3 : η εντροπία ατμού στην έξοδο του εξατμιστή

- Στρόβιλος (3-4):

$$W_{3-4} = \dot{m} * (h_3 - h_4) \text{ [Εξίσωση 13]}$$

Όπου,

W_{3-4} : η εκμεταλλεούμενη ισχύ που παράγει η τουρμπίνα

h_4 : η ενθαλπία του ατμού στην έξοδο της τουρμπίνας

$$\dot{I}_{3-4} = \dot{m}T_0[(s_4 - s_3)] \quad [\text{Εξίσωση 14}]$$

\dot{I}_{3-4} : ο ρυθμός καταστροφής εξέργειας στην τουρμπίνα

S_4 : η εντροπία του ατμού κατά την έξοδο της τουρμπίνας

- Συμπυκνωτής (4-1):

Σε αυτήν την διεργασία η θερμότητα αποβάλλεται στον συμπυκνωτή με αποτέλεσμα την συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου και την επανάληψη του κύκλου. Η διεργασία θεωρούμε ότι είναι ισοβαρής παρόλο που υπάρχει πτώση πίεσης λόγω τριβής εντός των σωληνών του συμπυκνωτή. Το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται από τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο ή υπόψυκτο υγρό. Το ποσό της θερμότητας που απελευθερώθηκε υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_{4-1} = \dot{m} * (h_4 - h_1) \quad [\text{Εξίσωση 15}]$$

Δεδομένου ότι η θερμοκρασία της ψύκτρας αυξάνεται συνεχώς από την είσοδο του συμπυκνωτή στην έξοδο του συμπυκνωτή, η μέση αριθμητική θερμοκρασία

$T_L = (T_{in} - T_{out}) / 2$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της καταστροφής της εξέργειας στον συμπυκνωτή. Η εξίσωση (8) δίνει την καταστροφή της εξέργειας στον συμπυκνωτή.

$$\dot{I}_{4-1} = \dot{m}T_0[(s_1 - s_4) - (h_1 - h_4)/T_L] \quad [\text{Εξίσωση 16}]$$

Η θερμική απόδοση (η_{th}) του ORC είναι η αναλογία της καθαρής ισχύος εξόδου προς την θερμότητα εισόδου. Μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{W_{3-4} - W_{1-2}}{Q_{2-3}} \quad [\text{Εξίσωση 17}]$$

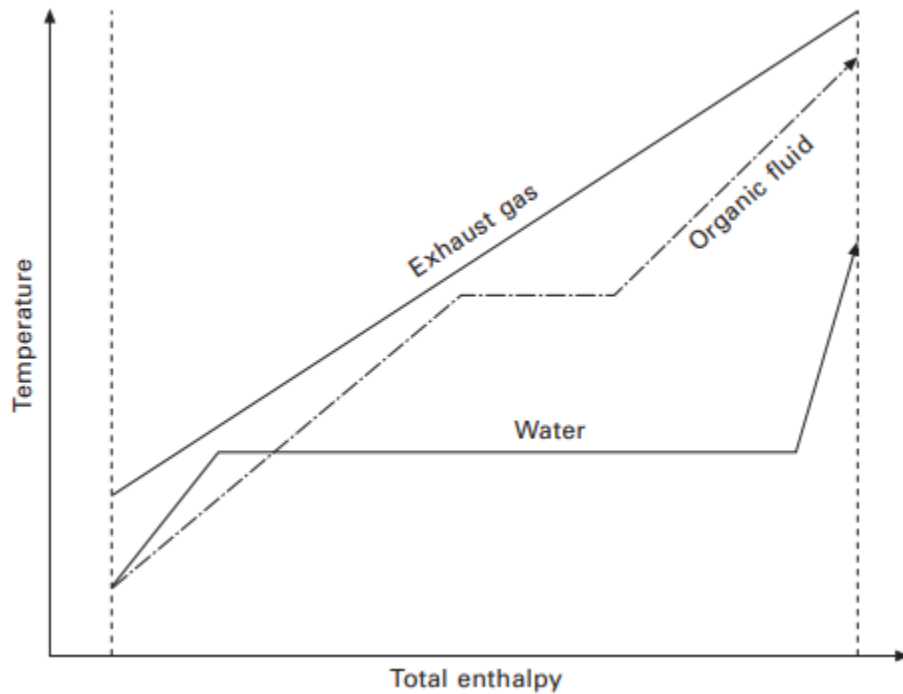
$$\dot{I}_{\text{system}} = \dot{I}_{1-2} + \dot{I}_{2-3} + \dot{I}_{3-4} + \dot{I}_{4-1} \quad [\text{Εξίσωση 18}]$$

Το οποίο δίνει,

$$\dot{I}_{\text{system}} = \dot{m}T_0[(h_3 - h_2)/T_H - (h_1 - h_4)/T_L] \quad [\text{Εξίσωση 19}]$$

2.4 Συμβατικός κύκλος Rankine και προβλήματα από χαμηλές θερμοκρασίες

Κατά τη σύγκριση των διαδικασιών ORC και υδρατμών, υπάρχει μια σαφής διαφορά στο σχετικό μέγεθος της θερμότητας εξάτμισης. Εάν η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας είναι περιορισμένη (π.χ. καυσαέριο), αυτή η υψηλή θερμότητα εξάτμισης περιορίζει την παραληφθείσα πίεση και την υπερθέρμανση στην περίπτωση της διαδικασίας υδρατμών. Όταν το οργανικό υγρό επιλέγεται σωστά (η εξάτμιση συμβαίνει κοντά στο κρίσιμο σημείο), το σχετικό μέγεθος της θερμότητας εξάτμισης είναι μικρό και εμείς μπορεί να επιτύχει σημαντικά υψηλότερη μέση θερμοκρασία και επομένως υψηλότερη αποδοτικότητα της διαδικασίας.



Σχήμα 1.18 - Σύγκριση των μεθόδων ORC και υδρατμών σε διάγραμμα θερμοκρασίας-ολικής ενθαλπίας (Larjola J., 2011)

Επιπλέον, κύριο χαρακτηριστικό είναι η πτώση ενθαλπίας κατά την διαδικασία πτώσης πίεσης στον στρόβιλο. Το νερό καθιστά δύσκολη την διαδικασία σχεδίασης στρόβιλου, λόγω της υψηλής σχετικής ενθαλπίας που συγκρατεί κατά την διαδικασία εκκίνησής του.

Στις περισσότερες περιπτώσεις για την επίτευξη υψηλού συντελεστή απόδοσης ενός συστήματος με νερό-ατμό, η χρήση στρόβιλου τριών επιπέδων (three turbine stages) είναι αναγκαία. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που έχουμε μικρή ισχύ, η βέλτιστη ταχύτητα στρόβιλου νερού-ατμού τείνει να ξεπεράσει κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια. Έτσι, χαμηλή πτώση ενθαλπίας σημαίνει υψηλή ροή μάζας και υψηλή ογκομετρική ροή, γεγονός που καθιστά ευκολότερο το στάδιο σχεδιασμού του στρόβιλου (μεγαλύτερο σχετικό ύψος πτερυγίου).

Τέλος, επειδή επικρατούν υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες υπάρχει η περίπτωση διάβρωσης των λεπίδων του στροβίλου. Αυτό γίνεται διότι το νερό είναι <<υγρό>> εργαζόμενο μέσο και υπάρχει έντονη πτώση της σχετικής ενθαλπίας. (Larjola, 2011)

2.5 Διαφορές μεταξύ συμβατικού κύκλου Rankine - Οργανικό κύκλο Rankine

- **Υπερθέρμανση:** Τα οργανικά ρευστά συνήθως συγκρατούν την υπερθέρμανση μέχρι το τέλος της εκτόνωσης. Ωστόσο, δεν υπάρχει ανάγκη για υπερθέρμανση στα συστήματα ORC, αντίθετα με τον συμβατικό κύκλο. Η απουσία των συμπυκνωμάτων μειώνει τις πιθανότητες διάβρωσης των λεπίδων του στροβίλου μας και προσθέτει αυτόματα 30 χρόνια λειτουργίας σε σχέση τα 15-20 χρόνια των συμβατικών ατμοστροβίλων.
- **Ανάκτηση χαμηλής θερμοκρασίας:** Λόγω του χαμηλού σημείου βρασμού των οργανικών ρευστών, έχουμε δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας από αρκετά χαμηλές πηγές θερμοκρασιών (π.χ γεωθερμία)
- **Υψηλή θερμοκρασία:** Σε έναν ORC οι πιέσεις δεν ξεπερνάνε τα 30 bar σε σχέση με τον συμβατικό κύκλο που οι πιέσεις φθάνουν τα 60 - 70 bar με αποτέλεσμα οι θερμικές καταπονήσεις να αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος του λέβητα ατμού.
- **Θερμοκρασία εισαγωγής στροβίλου:** Λόγω της υπερθέρμανσης στους κύκλους Rankine, η θερμοκρασία εισαγωγής ξεπερνάει τους 450°C για να αποφευχθεί η δημιουργία συμπυκνωμάτων. Πράγμα που οδηγεί, σε τρομερές θερμικές καταπονήσεις μέσα στον λέβητα, αλλά και πάνω στις λεπίδες και τέλος σε συνολικό υψηλό κόστος.

Κεφάλαιο 3^ο Επιλογή εργαζόμενων μέσων

3.1 Εισαγωγή

Ένα υγρό εργασίας είναι ένας σημαντικός παράγοντας του ORC. Καθορίζει την αποτελεσματικότητα και την οικονομία του συστήματος. Η πρόκληση βασίζεται στην εμπορική διαθεσιμότητα και στην επιλογή του υγρού. Τα περισσότερα εργαζόμενα ρευστά σήμερα καταργούνται σταδιακά από τα διεθνή πρωτόκολλα και θα πρέπει να αναζητηθούν νέα με φιλικές προς το περιβάλλον ιδιότητες. Λίγα κριτήρια για τα κατάλληλα ρευστά είναι κατάλληλες κρίσιμες παράμετροι, θετική ή μεγάλη κλίση, υψηλή θερμική σταθερότητα και συμβατότητα με υλικά, χαμηλή περιβαλλοντική επίπτωση, υψηλό επίπεδο ασφάλειας, καλή διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση (απόδοση ισχύος/ενέργειας-εξεργασίας), χαμηλό επίπεδο κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, χαμηλό ειδικό κόστος εγκατάστασης, κ.λπ. Ο συνδυασμός αυτών των κριτηρίων για την εύρεση ενός κατάλληλου υγρού σε ένα σύστημα είναι πάντα μια δύσκολη εργασία παρά τις διάφορες μεθόδους που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Για πιο αποτελεσματική λειτουργία των εγκαταστάσεων, ορισμένοι ερευνητές πρότειναν τον συνδυασμό ρευστών (μείγματα), αλλά δεν έχει συναχθεί συμπέρασμα από διαφορετικές προσπάθειες.

3.2 Οργανικά Ρευστά ως εργαζόμενα μέσα

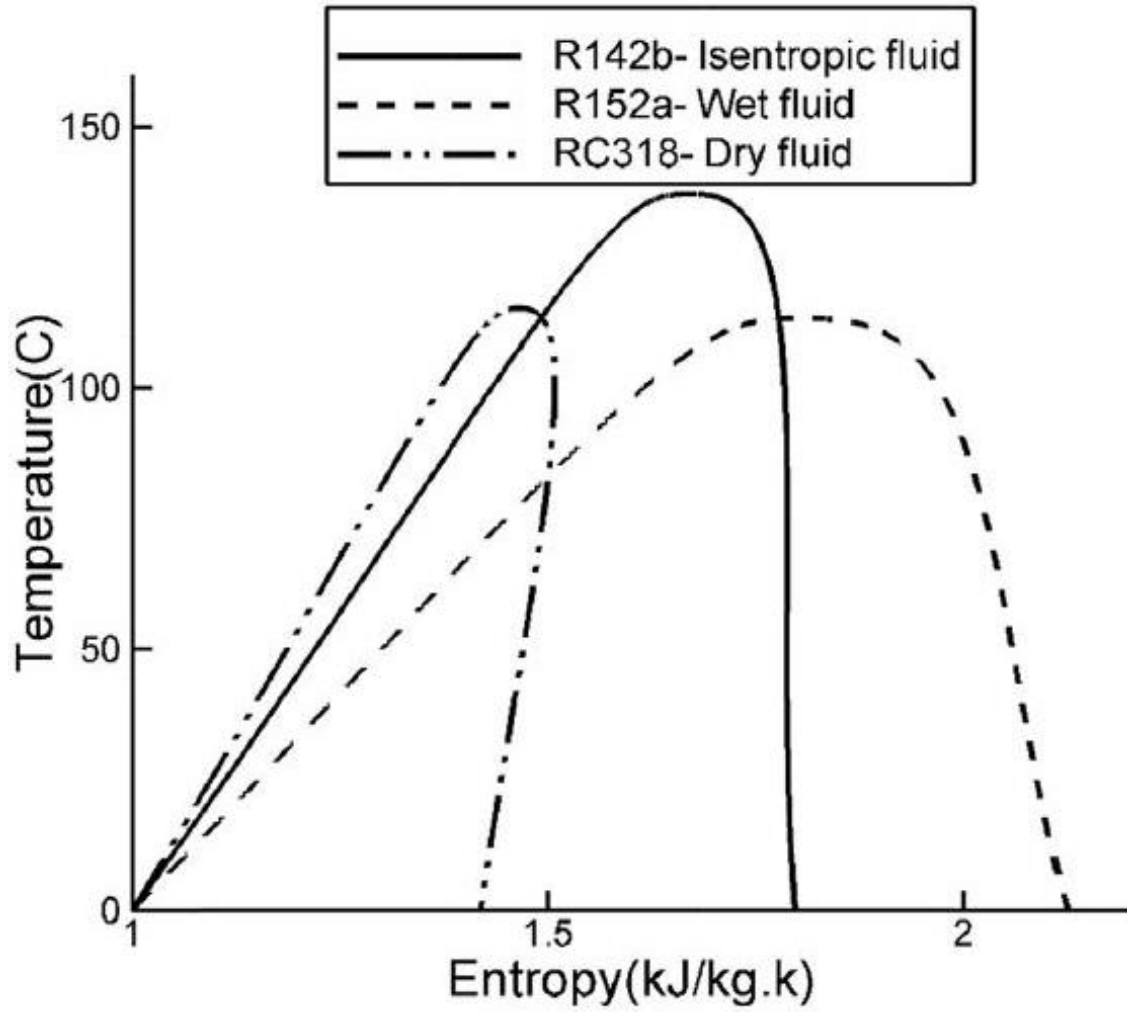
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, στα συστήματα ORC χρησιμοποιείται υπερθερμαντήρας για να υπερθερμάνει το εργαζόμενο ρευστό. Το κορεσμένο εργαζόμενο υγρό επεκτείνεται στον στρόβιλο, ο οποίος με την σειρά του κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια. Το ρευστό εξέρχεται με χαμηλή πίεση και θερμοκρασία από τον στρόβιλο και έπειτα συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή. Η πίεση του εργαζόμενου ρευστού που εξέρχεται από τον συμπυκνωτή ως κορεσμένο (ή ελαφρώς υποψυγμένο υγρό) αυξάνεται από την αντλία, ολοκληρώνοντας τον κύκλο. Ανάλογα με τον τύπο του εργαζόμενου ρευστού, ένας επανακτήτης μπορεί να τοποθετηθεί μπροστά από τον συμπυκνωτή για να ανακτήσει τη θερμότητα και να τον μεταφέρει στο υγρό εργασίας που εγκαταλείπει την αντλία τροφοδοσίας. Αυτή η διαμόρφωση αναφέρεται ως ανακτημένο ORC.

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου έχει καίρια σημασία για τη θερμική απόδοση του συστήματος ORC. Γενικά, τα εργαζόμενα μέσα μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

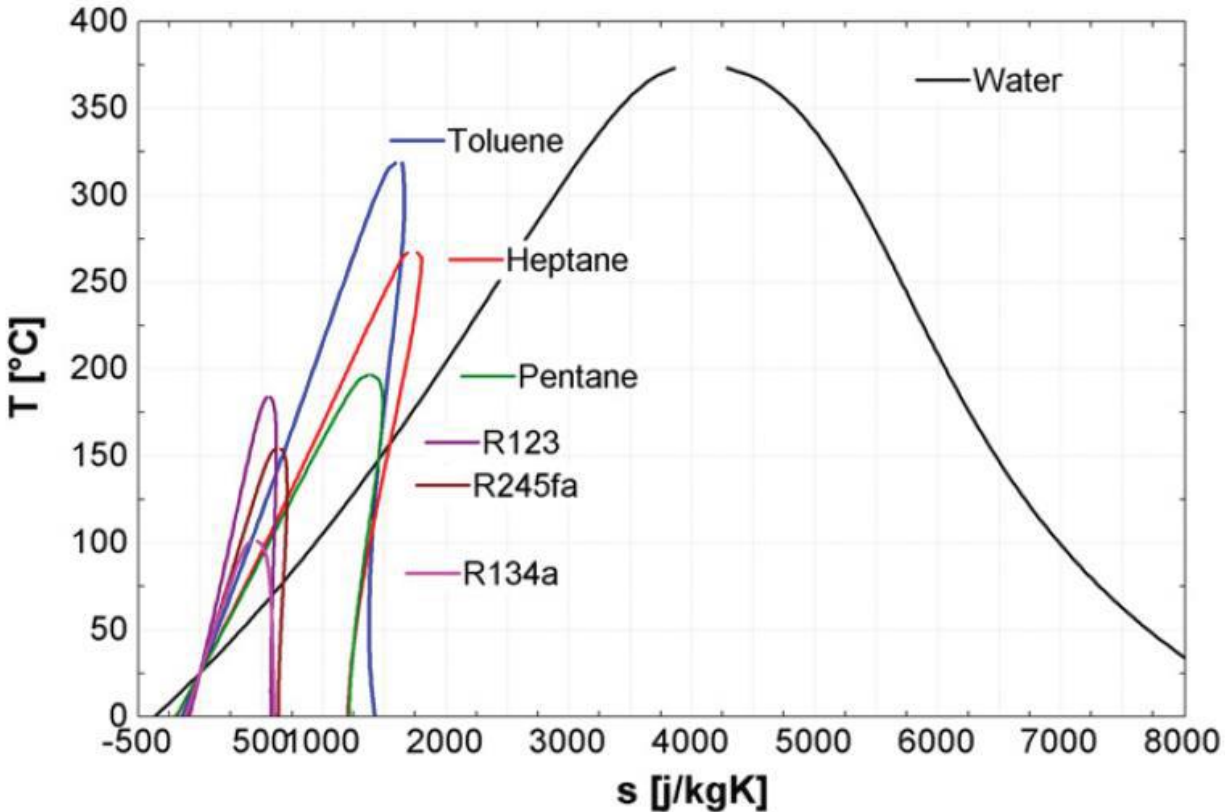
- Υγρά μέσα,
- Ξηρά μέσα και
- Ισεντροπικά.

Παρακάτω, με την βοήθεια των καμπύλων κορεσμού T-s του σχήματος (1.19) φαίνεται η διαφορά των τριών εργαζόμενων μέσων.

Τα υγρά μέσα είναι κανονικά ακατάλληλα για το σύστημα ORC αλλιώς, πρέπει να υπερθερμανθεί για να αποφευχθεί η επαφή των σταγονιδίων υγρού στα πτερύγια του στροβίλου κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης.



Σχήμα 1.19 - Σύγκριση ισεντροπικού,υγρού και ξηρού εργαζόμενου μέσου (Alireza, 2017)



Σχήμα 1.2 - Διάγραμμα T-s διαφόρων μέσων και νερού (Sylvain Quoilin, 2011)

Διάφορες ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαζόμενα μέσα σε έναν κύκλο Rankine. Για την κατηγοριοποίηση των υγρών σήμερα, εφαρμόζουμε τους τρόπους κατά ASHRAE και κατά IUPAC.

- **Υπερφοθράνθρακες (πλήρως φθορισμένοι υδρογονάνθρακες)(PFCs):** Είναι εξαιρετικά αδρανή και σταθερά, έχουν μεγάλη μοριακή πολυπλοκότητα και είναι θερμοδυναμικά ανεπιθύμητα π.χ PP50
- **Υδρογονάνθρακες (HCs) :** Προπάνιο (R-290), Βουτάνιο (R-600). Έχουν επιθυμητές θερμοδυναμικές ιδιότητες και πρόβλημα αναφλεξιμότητας
- **Υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs):** μερικώς αλογονωμένους υδρογονάνθρακες R22
- **Χλωροφθοράνθρακες (CFCs):** R12,R13
- **Υδροφθοράνθρακες (HFCs):** R134A
- **Ethers and Hydrofluoroethes (HFEs):** Έχουν προβλήματα τοξικότητας, αναφλεξιμότητας και θερμοδυναμικά είναι μη αποδεκτά.
- **Ανόργανα:** αμμωνία και νερό.
- Είναι φτηνά και άφθονα, έχουν μικρή επίδραση στο περιβάλλον και μερικά προβλήματα στη λειτουργία
- **Ζεοτροπικά μίγματα (R404, R407):** Είναι μίγματα δύο ή περισσότερων ουσιών των οποίων η θερμοκρασία μεταβάλεται κατά την αλλαγή φάσης τους.

3.3 Κριτήρια επιλογής εργαζόμενου ρευστού

- **Θερμοδυναμική απόδοση:** η απόδοση και/ή ισχύ εξόδου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη για την πηγή θερμότητας και ψύξης που δίνονται. Αυτή η απόδοση εξαρτάται από έναν αριθμό αλληλοεξαρτόμενων ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου: κρίσιμα σημεία, πυκνότητα κ.λπ. Δεν είναι εύκολο να καθοριστεί το καταλληλότερο για κάθε θερμοδυναμική ιδιότητα ανεξάρτητα.
- **Θετική ή ισεντροπική καμπύλη κορεσμένου ατμού:** όπως προαναφέραμε στην περίπτωση του νερού ('υγρό' ρευστό) οδηγεί σε συμπυκνώματα με αποτέλεσμα την διάβρωση του στροβίλου. Επομένως, ο ατμός θα πρέπει να υπερθερμανθεί. Στην περίπτωση θετικά κορεσμένου ατμού ('ξηρό' ρευστό), μπορεί απλά να εφαρμοστεί ένας ανακτητής και να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος.
- **Υψηλή πυκνότητα ατμού:** Η χαμηλή πυκνότητα οδηγεί σε υψηλότερη ροή όγκου: τα μεγέθη των εναλλακτών θερμότητας θα πρέπει να αυξηθούν ώστε να εξισορροπήσουν τις πτώσεις πιέσεις, κάτι που δεν επηρεάζει το κόστος σχεδίασης.
- **Χαμηλό ιξώδες:** Το χαμηλό ιξώδες σε υγρή και αέρια φάση έχει αποτέλεσμα υψηλούς συντελεστές εναλλαγής θερμότητας και ελάχιστες τριβές στους εναλλάκτες.
- Η **υψηλή αγωγιμότητα** σχετίζεται με ένα υψηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας.
- **Αποδεκτή πίεση ατμοποίησης:** Κυρίως αυξάνουν το κόστος σχεδίασης.
- **Θετική πίεση συμπύκνωσης:** Η πίεση συμπύκνωσης θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την ατμοσφαιρική για να αποφύγουμε την εισροή αέρα στο συστημά μας.
- **Σταθερότητα υψηλής θερμοκρασίας**
- Το **σημείο τήξης** πρέπει να είναι χαμηλότερο από τη χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του έτους για να αποφευχθεί το πάγωμα του εργαζόμενου μέσου.
- **Υψηλά μέτρα ασφαλείας**
- **Χαμηλό δείκτη καταστροφής Όζοντος (ODP)**
- **Χαμηλό δείκτη φαινόμενου θερμοκηπίου (GWP)**
- **Επαρκή διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος**

(Sylvain Quoilin, 2013)

Εφαρμογή	Θερμοκρασία πηγής θερμότητας	Θερμοκρασία ατμοποίησης	Θερμοκρασία συμπύκνωσης	Προτεινόμενο εργαζόμενο μέσο
WHR	-	67–287 °C ^a	20 °C	Benzene
WHR	327 °C	-	20–60 °C	<i>p</i> -Xylene
WHR	-	80–110 °C	35–60 °C	R123, R124
WHR	-	100–210 °C ^b	25 °C	R113
WHR	145 °C	80–140 °C ^c	20 °C	R236ea
WHR	140 °C	-	27 °C	R123
WHR	470 °C	96–221 °C	35 °C	Benzene
WHR	100–250 °C	80–230 °C	30 °C	Benzene
WHR	250–500 °C	Te ^d	85 °C	<i>n</i> -hexane, <i>n</i> -pentane for 250 °C toluene, <i>n</i> -octane, and water for 350 °C toluene and <i>n</i> -dodecane for 500 °C
WHR	85 °C	55–80 °C	25 °C	Butane, R245fa and R141b,
WHR	85 °C	60 °C	25 °C	R123
WHR	160 °C	144–156 °C	20 °C	R11
WHR	150 °C	-	20 °C	R114, R245fa, R601a, R601, R141b and R113
WHR	140 °C	-	20 °C	R123 for 100–180 °C R141b for higher than 180 °C
WHR	292 °C	277 °C	27 °C	R123
WHR	327 °C	Te	27–87 °C	R245fa, R245ca
Geothermal	80–115 °C	65–100 °C	25 °C	Propene
Geothermal	70–90 °C	-	-	Ammonia
Geothermal	120 °C	100 °C	30 °C	RE134, RE245, R600, R245fa, R245ca, R601
Geothermal	91.1 °C	Te ^e	28 °C	R601a, R601
Biomass	-	250–350 °C	90 °C	Butylbenzene
Biomass	-	170 °C	50 °C	Ethanol
Solar	-	60–100 °C	35 °C	R134a
Solar	-	70–(T _c -10) °C	30 °C	R245fa
Solar	-	120–150 °C	15 °C	Solkatherm
-	-	80–200 °C	20 °C	R227ea for 80–160 °C R245fa for 160–200 °C
-	60–160 °C	55–155 °C	30 °C	Hexane

Πίνακας 1.3 – Εφαρμογές ORC, χαρακτηριστικά λειτουργίας και προτεινόμενο εργαζόμενο μέσο (Junjiang Bao, 2013)

- a:** θερμοκρασία εισόδου στην εκτόνωση αντίστοιχη των 2,5MPa πίεση
b: θερμοκρασία εισόδου στην εκτόνωση αντίστοιχη των 2,0 MPa πίεσης
c: θερμοκρασία εισόδου στην εκτόνωση
d: θερμοκρασία αεριοποίησης αντίστοιχη σε πίεση αεριοποίησης 0,5-2MPa
e: ο λόγος της συνολικής επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας προς το καθαρό έργο **f:** το συνολικό ποσό της θερμότητας συναλλαγής
g: παράμετρος μεγέθους του εκτονωτή
h: θερμοκρασία αεριοποίησης αντιστοιχεί της πίεσης αεριοποίησης 0,2-2 MPa
i: θερμοκρασία αεριοποίησης αντιστοιχεί της πίεσης αεριοποίησης 0.1-0.6 MPa

Κεφάλαιο 4ο Σχετικές Μελέτες

4.1 Εισαγωγή

Όσον αφορά την παραγωγή θερμικής ενέργειας, προτείνεται ένα σύστημα διαδοχικής σύνδεσης, ενός οργανικού κύκλου Rankine (organic Rankine cycle - ORC), το οποίο χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια και υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas - LNG). Αρχικά, στον επάνω κύκλο, η ενέργεια από τους ηλιακούς συλλέκτες προκαλεί την εξάτμιση του ρευστού εργασίας. Στη συνέχεια, ο κύκλος παράγει θερμότητα, η οποία βοηθά στην εξάτμιση του ρευστού εργασίας (στον κάτω κύκλο). Η ψυχρή πηγή του δεύτερου κύκλου είναι επί της ουσίας το LNG. Επιπρόσθετα, το σύστημα βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας μια νέα μέτρηση που ονομάζεται ισοδύναμη απόδοση. Αυτή, μετρά την αναλογία της επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγεται με την προσθήκη συλλεκτών στην ήδη ληφθείσα, ηλιακή ακτινοβολία. Σε σύγκριση με τους υπάρχοντες δείκτες όπως η θερμική απόδοση, η απόδοση ψυχρής ενέργειας και η ενεργειακή απόδοση, επισημαίνονται τα οφέλη της εν λόγω μέτρησης και εξετάζεται η επίδραση των ρευστών εργασίας στην απόδοση του συστήματος. Ορισμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν επίπεδους συλλέκτες (flat plate collectors - FPC) και εκκενωμένους συλλέκτες σωλήνων (evacuated tube collectors - ETC). Η ισοδύναμη απόδοση αποδεικνύεται ως το καταλληλότερο μέτρο για την έκφραση της αποτελεσματικότητας, η οποία περιλαμβάνει έναν συνδυασμό από ηλιακό συλλέκτη και LNG. Ειδικότερα, χρησιμοποιώντας ισοπεντάνιο/R125 και ETCs, μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη ισοδύναμη απόδοση της τάξεως του 5,99 %. Επιπλέον, ο λόγος όγκου για κάθε διαστολέα του συγκεκριμένου συστήματος, είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με έναν ORC (ενός επιπέδου), καθιστώντας τους διαστολείς ευκολότερους τόσο στη σχεδίαση όσο και στην κατασκευή.

Σε σύγκριση με τον κύκλο ατμού Rankine (Rankine steam cycle), ένας μεγάλος αριθμός μελετών έχει επικεντρωθεί στον οργανικό κύκλο Rankine, διότι μπορεί να υλοποιηθεί ευκολότερα, στροβιλομηχανές χαμηλής ισχύος, αλλά και να αντιδράσει καλύτερα σε σημαντικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (στο περιβάλλον). Τα χαμηλά σημεία βρασμού (των οργανικών ρευστών) επιτρέπουν την αποτελεσματική μετατροπή της θερμότητας (χαμηλής ποιότητας), όπως η βιομηχανική απόβλητη θερμότητα, η γεωθερμική θερμότητα, η βιομάζα και η ηλιακή ενέργεια, σε ενέργεια. Η σκοπιμότητα και η υπεροχή του ORC στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σκιαγραφούνται τόσο μέσω πειραματικών μελετών π.χ. (Li et al., 2012) όσο και μέσω εργασιών προσομοίωσης (Wang et al., 2013). Εν τω μεταξύ, η κρυογονική ενέργεια του υγροποιημένου φυσικού αερίου, προσδίδει νέες δυνατότητες για τον ORC. Πιο συγκεκριμένα, το LNG έχει προσελκύσει ευρεία προσοχή λόγω της καθαρότητας, της μη τοξικότητας και του χαμηλού κόστους του. Η ετήσια κατανάλωσή του αυξάνεται κατά 10% παγκοσμίως, ενώ σύμφωνα με την πρόβλεψη της αμερικανικής εταιρίας ExxonMobil, το 2008, η ποσότητα ζήτησης θα φτάσει τους 500 εκατομμύρια τόνους έως το 2030. Γενικά και σύμφωνα με τη μελέτη των (Rao et al., 2013), το LNG αποθηκεύεται σε δεξαμενές αποθήκευσης στους 111,51 K και 0,1 MPa. Η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι συνήθως μεγαλύτερη από 10.000 m³, ενώ ο όγκος του φυσικού αερίου μπορεί να μειωθεί μέσω υγροποίησης κατά 625 φορές, ούτως ώστε να διευκολυνθεί η θαλάσσια μεταφορά ή η μεταφορά στον αυτοκινητόδρομο. Επίσης, είναι ασφαλέστερο και πιο οικονομικό συγκριτικά με τη μετάδοση μέσω κάποιου αγωγού.

Σύμφωνα με μία παλαιότερη έρευνα (Gu, 2004), όταν το LNG εξατμίζεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να απελευθερωθεί κρυογονική εξέργεια (exergy) άνω των 800 kJ/kg. Έχουν επίσης προταθεί διάφοροι συνδυασμοί επαναεριοποίησης LNG αλλά και αποτέφρωσης σκουπιδιών. Μερικοί ακόμη συνδυασμοί είναι ο κύκλος Brayton, η ανάκτηση απορριμμάτων θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία και ο υπερκρίσιμος κύκλος τύπου Rankine του CO₂ (Song et al., 2012). Ειδικότερα, στην Κίνα, έχουν κατασκευαστεί περισσότεροι από 200 δορυφορικοί σταθμοί αεριοποίησης LNG. Κάθε χρόνο και βάση της έρευνας των συγγραφέων (Xu et al., 2009), εκτιμάται ότι μπορεί να παράγεται ισχύς έως και 7.8×10^8 kWh. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομούνται 30×10^4 τόνοι συνηθισμένου άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, ο κρυογονικός ORC, ο οποίος χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό ως πηγή θερμότητας, αποτελεί την πιο συχνή προσέγγιση για χρήση του LNG ως προς την παραγωγή ενέργειας. Στην Ιαπωνία για παράδειγμα, έχουν κατασκευαστεί 15 σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αυτού του τύπου, όπου ο καθένας από αυτούς έχει χωρητικότητα χιλιάδων κιλοβάτ.

Τέλος, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί έναν άφθονο και ανανεώσιμο πόρο, του οποίου ο συνδυασμός με το LNG, θεωρείται ως μια επιθυμητή προοπτική εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, οι (Rao et al., 2013) παρουσίασαν έναν υβριδισμό μεταξύ ηλιακών ORC και LNG, ενώ μία περαιτέρω ανάλυση έδειξε ότι το υβριδικό σύστημα έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ηλιακών συστημάτων επαναεριοποίησης. Δύο εξ αυτών, είναι η μείωση της επιφάνειας του ανοίγματος και το χαμηλότερο κόστος του εναλλάκτη θερμότητας.

4.2 Συνεισφορά του ORC στην παραγωγή ηλεκτρισμού

Μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών που εντοπίζονται στη γεωθερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η εφαρμογή του ORC είναι η πιο σημαντική και ευρέως χρησιμοποιούμενη. Επομένως, η τεχνολογία του οργανικού κύκλου Rankine παίζει καθοριστικό ρόλο διότι γενικά, έχει πολλά κοινά στοιχεία με τον κύκλο ατμού Rankine (Rankine steam cycle - RSC) (Kazemi & Ehyaei, 2018). Η μόνη σημαντική διαφορά είναι ότι στην πρώτη τεχνολογία, αντί για νερό, χρησιμοποιείται ένα οργανικό ρευστό ως το λειτουργικό ρευστό της διεργασίας.

Γενικά, τα συστήματα ισχύος ORC αποτελούνται από τέσσερα κύρια εξαρτήματα, δηλαδή λέβητα, διαστολέα, συμπυκνωτή και αντλία. Σε ένα λέβητα, η θερμοκρασία ενός οργανικού ρευστού εργασίας αυξάνεται ούτως ώστε να παράγει ατμό, ο οποίος καθοδηγεί τον διαστολέα προς την μηχανική παραγωγή εργασίας. Έπειτα, το μηχανικό έργο που παράγεται στον διαστολέα, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας η οποία είναι συνδεδεμένη με αυτόν. Στη συνέχεια, ο ατμός χαμηλής πίεσης που εξέρχεται από τον διαστολέα, εισέρχεται στον συμπυκνωτή προκειμένου να μειωθεί η θερμότητά του. Όταν φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο θερμοκρασίας, συμπυκνώνεται σε κορεσμένο υγρό. Στο τελικό στάδιο, το υγρό (λειτουργικό ρευστό) απομακρύνεται από τον συμπυκνωτή και κατευθύνεται από την αντλία στον λέβητα, ούτως ώστε να ολοκληρωθεί ο κύκλος.

Επιπρόσθετα, αν και ο ORC έχει πολλά πλεονεκτήματα, η χρήση των πηγών ενέργειας (χαμηλής θερμοκρασίας) καθιστά αυτούς τους κύκλους εξαιρετικούς για τη χρήση πηγών, γεωθερμικής ενέργειας. Αυτό το πλεονέκτημα οφείλεται στο γεγονός ότι ο ORC χρησιμοποιεί, ως ρευστό εργασίας, οργανικές ενώσεις που έχουν χαμηλό σημείο βρασμού σε σύγκριση με το νερό. Ως εκ

τούτου, ο ORC αποτελεί μία από τις καλύτερες επιλογές για τη χρήση πόρων χαμηλής έως μέσης θερμοκρασίας. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί, ότι για τα περισσότερα οργανικά ρευστά, το εύρος θερμοκρασίας 350 – 400 °C θεωρείται ως το όριο της θερμικής σταθερότητας. Σύμφωνα με τους συγγραφείς (Wang et al., 2013), η έκθεση σε θερμοκρασίες πάνω από αυτήν την τιμή, μπορεί να προκαλέσει την αποσύνθεση των εν λόγω ρευστών.

Συνήθως, η διάρκεια ζωής των προαναφερθέντων συστημάτων ισχύος, μπορεί να φτάσει έως και τα 30 χρόνια. Επομένως και σε σύγκριση με τον RSC, η αυτονομία των συστημάτων ORC είναι πολύ υψηλότερη. Ωστόσο, για να αποφευχθεί η συμπύκνωση σε έναν στρόβιλο, ειθισται να προκαλείται υπερθέρμανση. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια της διαστολής και εφόσον προκληθεί συμπύκνωση, η συμπύκνωση μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των πτερυγίων του στρόβιλου. Επιπλέον, η χαμηλή πτώση της ενθαλπίας των οργανικών ρευστών, μπορεί να μειώσει την τάση στον στρόβιλο και να απλοποιήσει τον σχεδιασμό (Quoilin et al., 2013).

Ένα από τα μειονεκτήματα του ORC και ιδιαίτερα για συστήματα ORC χαμηλής θερμοκρασίας, είναι ότι η κατανάλωση της αντλίας είναι σχετικά υψηλή. Αυτό οφείλεται στη μικρή ενθαλπία εξάτμισης, η οποία κατά συνέπεια, απαιτεί έναν μεγαλύτερο ρυθμό ροής προκειμένου να αντισταθμιστεί. Επιπλέον, όσον αφορά πηγές χαμηλής θερμοκρασίας, εξαρτήματα όπως π.χ. μια αντλία, μπορεί να καταναλώνουν έως και το 50% της παραγόμενης ισχύος. Αυτή η σχετικά υψηλή κατανάλωση, οφείλεται στον υψηλό ρυθμό ροής της άλμης (που αντλείται στον λέβητα) και αποσκοπεί στην αντιστάθμιση της χαμηλής θερμοκρασίας (Quoilin et al., 2013). Ωστόσο, σύμφωνα με τους (Deng et al., 2019), η κύρια πρόκληση για τα συστήματα ισχύος ORC είναι η βέλτιστη επιλογή ενός ρευστού εργασίας.

Η θερμοκρασία της πηγής (της γεωθερμικής ενέργειας) είναι διαθέσιμη μέσα από ένα ευρύ φάσμα 60 °C – 350 °C. Για θερμοκρασίες κάτω των 80 °C, οι γεωθερμικοί σταθμοί δεν είναι οικονομικοί λόγω της χαμηλής συνολικής απόδοσης του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, για πηγές γεωθερμικής ενέργειας που έχουν θερμοκρασία άνω των 200 °C, η άμεση χρήση ατμού σε μια τουρμπίνα (σε ανοιχτό κύκλο), είναι ο προτιμότερος τύπος λειτουργίας (Velez et al., 2012). Ωστόσο, σε μία άλλη μελέτη, αποδείχθηκε ότι με την ενσωμάτωση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ORC (σε μια μονάδα γεωθερμικού ατμού), η συνολική απόδοση αυξήθηκε έως και 9% (Rosyid et al., 2010). Τέλος, για την πηγή γεωθερμικής ενέργειας (υψηλής θερμοκρασίας), αντί για κάποιον συμπυκνωτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας εναλλάκτης θερμότητας. Η χρήση αυτού του εναλλάκτη μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις της θερμότητας για την τηλεθέρμανση. Επίσης και παρά την χαμηλότερη απόδοση ως προς την παραγωγή ενέργειας, μπορεί να αυξηθεί η συνολική απόδοση. Τεχνικά, για την ταξινόμηση των συστημάτων ισχύος ORC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία πηγής, ο τύπος διαμόρφωσης και η ικανότητα παραγωγής (Heberle et al., 2017).

4.3 Εφαρμογές του ORC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας μία γεωθερμική πηγή ενέργειας

Η εφαρμογή του ORC είναι εξαιρετικά χρήσιμη ούτως ώστε να αξιοποιηθούν οι ενεργειακές πηγές χαμηλής θερμοκρασίας, όπως η γεωθερμική θερμότητα, η σπατάλη θερμότητας και οι πόροι των ηλιακών λιμνών. Σύμφωνα με τον (Ismail, 2013), η εφαρμογή ενός οργανικού κύκλου

Rankine που τροφοδοτείται από γεωθερμική θερμότητα, ως πηγή θερμότητας, αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες.

Σε μία διαφορετική προσέγγιση, ο (Baral, 2019) πραγματοποίησε μια μελέτη σκοπιμότητας ως προς την εφαρμογή υβριδικών ηλιακών-γεωθερμικών κύκλων αλλά και του ORC, οι οποίοι αποσκοπούσαν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στο Νεπάλ. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι 1 kg/s ενός R134a (ως ρευστό εργασίας ORC) θα μπορούσε να παράγει 17,5 kW. Όμως, όταν το λειτουργικό ρευστό ήταν το R245fa, η ισχύς εξόδου ήταν 22,5 kW. Και στις δύο περιπτώσεις, η θερμοκρασία της γεωθερμικής πηγής ήταν περίπου 70 °C. Επιπλέον, η οικονομική πτυχή αυτής της έρευνας έδειξε ότι το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν 0,17 \$/kWh και 0,14 \$/kWh για τα R134a και R245fa, αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, οι (Fontalvo et al., 2017) εξέτασαν την απόδοση ενός ORC χρησιμοποιώντας διαφορετικά οργανικά υγρά, είτε με απλή είτε με διπλή πίεση. Αυτό αποσκοπούσε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (45 Kw), με θερμοκρασία πηγής θερμότητας, η οποία κυμαινόταν μεταξύ 100 και 200 °C. Τα ρευστά εργασίας του ORC ήταν τα R1234yf, R1234ze(E) και R1234ze(Z), ενώ το ισοπεδωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost of Electricity - LCOE) και το ειδικό κόστος επένδυσης (Specific Investment Cost - SIC), λήφθηκαν για δύο συνθήκες λειτουργίας: με μέγιστη ισχύ εξόδου και μέγιστη θερμική απόδοση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το LCOE και η περίοδος απόσβεσης για τον απλό ORC, ήταν αντίστοιχα 0,3 USD/kWh και 8 έτη. Επιπλέον, η χρήση του R1234ze(Z) ως ρευστό εργασίας (για έναν απλό ORC), αποδείχτηκε ως η πιο ενδεδειγμένη λύση συγκριτικά με το ρευστό εργασίας R245fa.

Επιπρόσθετα και βάση της θερμοοικονομικής έρευνας του (Yilmaz, 2018) η οποία πραγματοποιήθηκε στην Τουρκία, δόθηκαν ορισμένα στοιχεία σχετικά με την εφαρμογή του δυαδικού σταθμού γεωθερμίας. Σύμφωνα με τα θερμοδυναμικά αποτελέσματα αυτής της έρευνας, τόσο η ενεργειακή όσο και η απόδοση εξέργειας αυτού του κύκλου, λήφθηκαν σε ποσοστά 13,5% και 47,3%, αντίστοιχα. Ακόμα, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε από αυτόν τον κύκλο, προσδιορίστηκε ως 0,0436 \$/kWh. Ομοίως, οι συγγραφείς (Heberle & Brüggemann, 2014) πραγματοποίησαν στη Γερμανία, μια θερμοοικονομική έρευνα ενός κύκλου ORC, ο οποίος τροφοδοτούνταν από μία γεωθερμική πηγή. Αυτή, αποσκοπούσε στην παραγωγή θερμότητας και ενέργειας αλλά με διαφορετικά ρευστά εργασίας. Τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας, έδειξαν ότι για σκοπούς παραγωγής ενέργειας, τα λειτουργικά ρευστά όπως το R227ea και το ισοβουτένιο, ήταν τα καλύτερα ρευστά εργασίας. Επιπλέον και σε σύγκριση μόνο με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο η ισχύς όσο και η θερμότητα, μείωσαν το μέσο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από 25 ct/kWh σε 16 ct/kWh.

Οι γεωθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ORC αποτελούν μία από τις πιο ενδιαφέρουσες διαμορφώσεις, εξαιτίας της ικανότητάς τους να μετατρέπουν τη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια. Όμως, όπως προκύπτει από τη μελέτη των (Chen et al., 2010), η απόδοση του ORC είναι πολύ ευαίσθητη σε ορισμένες εφαρμογές όπως για παράδειγμα, στη θερμοκρασία του γεωρευστού, στους τύπους του δευτερογενούς υγρού (οργανικό ρευστό), στον διαστολέα, αλλά και στην αντλία. Επιπροσθέτως, η απόδοση μιας μικρής, γεωθερμικής μονάδας

ηλεκτροπαραγωγής ORC, η οποία χρησιμοποιούσε το R134a ως ρευστό εργασίας, λήφθηκε από την ανάλυση των (Bianchi et al., 2018) και αποτυπώθηκε σε καθαρή ενεργειακή απόδοση ORC (ως 4,4%). Η πηγή θερμότητας (για το συγκεκριμένο εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής ORC) ήταν νερό το οποίο προερχόταν από μία πηγή γεωθερμικής ενέργειας και είχε θερμοκρασία μικρότερη των 60 °C, καθώς και καθαρή ισχύ εξόδου ίση με 2,8 kW.

Η απόδοση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ORC διερευνήθηκε από τους (Thurairaja et al., 2019) με βάση τη δευτερεύουσα επιλογή ρευστού εργασίας, ούτως ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη απόδοση του ORC που τροφοδοτείται από γεωθερμική, ηλιακή και απόβλητη ενέργεια. Όσον αφορά το εύρος θερμοκρασίας (100-150 °C), τα βέλτιστα λειτουργικά ρευστά που εντοπίστηκαν, είναι το βουτάνιο, το νεοπεντάνιο και το R245A. Επίσης, μέσω μίας άλλης έρευνας (Bao & Zhao, 2013) διαπιστώθηκε ότι η χρήση των R245a, R11, R113, R114, R114b, R601 και R601a ως λειτουργικών ρευστών, είχε την καλύτερη απόδοση στον ORC (στο ίδιο εύρος θερμοκρασίας). Σε μία διαφορετική προσέγγιση, οι συγγραφείς (Cao et al., 2016) διεξήγαγαν μια θερμοδυναμική αξιολόγηση προκειμένου να συγκρίνουν τους γεωθερμικούς σταθμούς διπλής λάμψης (flash ORC και flash Kalina), σύμφωνα με την απόδοσης ισχύος, της ενεργειακής απόδοσης καθώς και της απόδοσης της εξέργειας. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος (ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης) έτσι ώστε να προσδιοριστεί η καλύτερη δυνατή απόδοση, σύμφωνα με τους τρεις προαναφερθέντες τύπους απόδοσης. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (46%) ήταν για μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τύπου flash ORC. Επιπλέον, η ίδια μελέτη έδειξε ότι η καθαρή ισχύς του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής flash ORC, ήταν 101 MW.

Εκτός όμως από μελέτες που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της γεωθερμικής ενέργειας και των περιβαλλοντικών συνθηκών, έχει προσφερθεί μια εκτενής οικονομική ανάλυση για τη διερεύνηση των επιπτώσεων που έχουν διάφοροι οικονομικοί παράγοντες, όπως το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ο χρόνος ζωής, το κόστος γεώτρησης φρέατος και το προεξοφλητικό ποσοστό γεωθερμικής ενέργειας (Van Erdeweghe et al., 2018). Σύμφωνα με τα ευρήματα, όταν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος, πρέπει να κατασκευάζεται ένας ακριβός ORC, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, προτιμάται ένας οικονομικότερος ORC. Παρουσιάστηκε επίσης μια θερμοδυναμική ανάλυση (σε συνδυασμό με μια οικονομική ανάλυση) για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός γεωθερμικού ORC, ο οποίος ήταν ενσωματωμένος με μια μονάδα επέκτασης φυσικού αερίου (Yao et al., 2018). Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιήθηκε μια θερμοδυναμική ανάλυση, η οποία έδειξε ότι για το προτεινόμενο σύστημα, η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ήταν 89,8%, ενώ η υψηλότερη απόδοση εξέργειας ήταν 84,1%. Η οικονομική ανάλυση αποκάλυψε ότι το καθαρό κέρδος στη διάρκεια ζωής και η περίοδος απόσβεσης του προτεινόμενου συστήματος, ήταν 3,97 M\$ και 2 έτη, αντίστοιχα. Επιπλέον, η τεχνική βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη, έδειξε ότι το R600 ήταν το καλύτερο ρευστό εργασίας. Από την άλλη πλευρά, οι (Mosaffa et al., 2017) παρουσίασαν μια θερμοοικονομική ανάλυση ενός γεωθερμικού ORC, ο οποίος ήταν ενσωματωμένος με ψυχρή ενέργεια, υγροποιημένου φυσικού αερίου (liquefied natural gas – LNG). Η απόδοση του συστήματος λήφθηκε με βάση τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων λειτουργίας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το ποσοστό κόστους του προϊόντος και να

βελτιστοποιηθεί η θερμική απόδοση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πιο σημαντική ισχύς εξόδου επιτεύχθηκε κατά τη χρήση δυαδικών ρευστών εργασίας σε ORC.

Έχει επίσης προταθεί ένα θερμοδυναμικό μοντέλο γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ORC, το οποίο χρησιμοποιεί CO₂ ως πηγή θερμότητας (Wang et al., 2019). Το σύστημα βασίστηκε στην ιδέα της δέσμωσης CO₂ από το εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής, μέσω καύσης των ορυκτών, καθώς και με την αποθήκευσή τους σε μια γεωθερμική δεξαμενή. Στη συνέχεια, αυτό το αποθηκευμένο CO₂ χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ORC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα R600a, R600, R245fa και R236ea ήταν τα καταλληλότερα ρευστά εργασίας για έναν υποκρίσιμο ORC. Επιπροσθέτως, τα R600a, R142b, R600, R152a και R236ea ήταν οι καλύτερες εναλλακτικές για έναν υπερθερμασμένο ORC, ενώ τα R600a, R32 και R32 αποτέλεσαν τις καλύτερες επιλογές για έναν υπερκρίσιμο ORC. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι η απόδοση εξέργειας του υποκρίσιμου (subcritical), υπέρθερμου και υπερκρίσιμου (supercritical) ORC ήταν 70,4%, 69,5% και 74,8%, αντίστοιχα. Τέλος, η επίδραση της χρήσης διαφορετικών ρευστών εργασίας (σε συνθήκες εκτός σχεδίου) διερευνήθηκε από τους (Liu & Gao, 2019), όπου εφαρμόστηκε μια βέλτιστη μέθοδος ελέγχου για την επίτευξη της υψηλότερης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος.

4.4. Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας ORC από βιομάζα

Η έρευνα των συγγραφέων (Borsukiewicz-Gozdur et al., 2014) παρουσίασε τα αποτελέσματα του υπολογισμού, για τρεις παραλλαγές της μονάδας Συνδυασμένης Θερμότητας και Ισχύος (Combined Heat and Power - CHP). Το συγκεκριμένο είδος μονάδας τροφοδοτείται από μία βιομάζα πριονιστηρίου και παράγει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, για τον θάλαμο ξήρανσης. Ειδικότερα, στην εν λόγω έρευνα διεξήχθη μία ανάλυση ως προς την απόδοση του συστήματος, για τέσσερα διαφορετικά λειτουργικά ρευστά: οκταμεθυλτρισιλοξάνιο, μεθυλκυκλοεξάνιο, μεθανόλη και νερό. Η υψηλότερη ηλεκτρική ισχύς λήφθηκε για το σύστημα εσωτερικής αναγέννησης και το μεθυλοκυκλοεξάνιο εφαρμόστηκε ως «ξηρό», ρευστό εργασίας. Από την άλλη πλευρά, η υψηλότερη θερμοκρασία (για την τροφοδοσία του θαλάμου ξήρανσης) επιτεύχθηκε για το σύστημα με εξωτερική αναγέννηση, όπου εφαρμόστηκε η οκταμεθυλοτρισιλοξάνη ως ρευστό εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, διαπιστώθηκε ότι εφόσον γίνει σωστή επιλογή τόσο ως προς το ρευστό εργασίας όσο και ως προς την παραλλαγή της αναγέννησης (εσωτερικής ή εξωτερικής), είναι δυνατή η προσαρμογή του συστήματος, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προσδοκίες του επενδυτή (χρήστη).

Για πολλά χρόνια, το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Δυτικής Πομερανίας, στο Szczecin της Πολωνίας, διεξήγαγε έναν μεγάλο αριθμό ερευνών, οι οποίες είχαν ως στόχο την ανάπτυξη τεχνολογιών, για την καταναεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν την τεχνολογία του Οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC), δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας και στη θερμοκρασία που προκύπτει κατά τη σπατάλη θερμότητας. Έχοντας ως βάση τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών, οι (Borsukiewicz-Gozdur et al., 2014) παρουσίασαν διάφορες προτάσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ORC. Οι προτάσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν επίσης για τη χρήση απορριμμάτων σε πριονιστήρια, καθώς και για άλλους τύπους απορριμμάτων (ξύλου).

Επί του παρόντος, στην Πολωνία, οι εγκαταστάσεις αυτού του είδους χρησιμοποιούν απόβλητα πριονιστηρίων μόνο για θέρμανση και ζήρανση. Από την άλλη πλευρά και όπως φαίνεται στην έρευνα των (Anderson & Westerlund, 2014), τόσο η παραγωγή όσο και η χρήση της αντίστοιχης πηγής θερμότητας, μπορούν να βελτιστοποιηθούν περαιτέρω. Στη συγκεκριμένη έρευνα αναλύεται η αποτελεσματικότητα της απόδοσης, όσον αφορά την ζήρανση ξυλείας, για διάφορες τεχνολογίες ζήρανσης (π.χ. με εναλλάκτες θερμότητας αέρα ή με τυπικές αντλίες θερμότητας ή απορρόφησης).

Τα απόβλητα των πριονιστηρίων, καθώς και άλλα είδη βιομάζας (άχυρο, μίσχοι καλαμποκιού), μπορούν να μετατραπούν σε κάποιο ενδιάμεσο καύσιμο, π.χ. σε μορφή πέλλετ (pellet). Ωστόσο, αυτό είναι εφικτό μόνο εάν το εργοστάσιο διαθέτει κατάλληλη γραμμή παραγωγής και ικανότητα εμπορίας. Ορισμένα παραδείγματα, αντίστοιχων συστημάτων μετατροπής ενέργειας, παρουσιάζονται στη μελέτη του (Renström, 2006). Βέβαια, η παραγωγή της «επί τόπου» ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή χωρίς την ανάγκη μεταφοράς απορριμμάτων βιομάζας), αποτελεί την τρέχουσα τάση στις ενεργειακές εξελίξεις. Αυτό είναι κάτι που ταιριάζει απόλυτα με την ιδέα της κατανεμημένης παραγωγής, χωρίς να παραλείπεται και η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Χάρη σε αυτόν τον συνδυασμό, αυξάνεται η απόδοση των διαδικασιών που σχετίζονται με τη μετατροπή της ενέργειας.

Τη σημερινή εποχή και σε σχέση με τη χρήση της βιομάζας, οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες όσον αφορά την κατανεμημένη και συνδυασμένη παραγωγή μεταξύ θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, είναι οι ακόλουθες:

- Εμβολοφόρος κινητήρας εσωτερικής καύσης (internal combustion engine - ICE), ο οποίος τροφοδοτείται με ένα αέριο σύνθεσης που παράγεται σε ένα σύστημα αεριοποίησης (μιας βιομάζας).
- Μονάδα CHP, βασισμένη σε τουρμπίνα ατμοστρόβιλου, η οποία λειτουργεί με οργανικά ρευστά (εγκατάσταση ORC). Σε αυτή τη μονάδα, η εισροή ενέργειας πραγματοποιείται από κατάλληλους λέβητες βιομάζας. Τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν επίσης να τεθούν σε λειτουργία μέσω της παραγόμενης θερμότητας, από τους λέβητες βιοαερίου.

Άλλες τεχνολογίες CHP, όπως για παράδειγμα αυτές που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου, αεριοστρόβιλους, κινητήρες Stirling κλπ., βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και αναμένεται να διατεθούν στο εμπόριο τα επόμενα χρόνια.

Επιπρόσθετα, στην έρευνα των (Rentizelas et al., 2009) αναφέρεται η τεχνοοικονομική ανάλυση του συστήματος ORC. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω εισροών από το σύστημα αεριοποίησης και στοχεύει στις εφαρμογές βιοενέργειας. Από τη συγκεκριμένη ανάλυση προέκυψε, ότι όσον αφορά την αναλογία μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι της θερμότητας, το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας (περιλαμβάνει αεριοποίηση βιομάζας και έναν εμβολοφόρο κινητήρα με βιοαέριο) έχει περισσότερα πλεονεκτήματα. Από την άλλη πλευρά, η καύση βιομάζας και η προκύπτουσα μετατροπή θερμότητας (μέσω του συστήματος ORC), είναι (τεχνολογικά) πιο ώριμες, επιβαρύνονται με λιγότερους κινδύνους και εφαρμόζονται συχνότερα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική ανάλυση των σχετικών συστημάτων (δηλαδή αυτών που βασίζονται σε ORC και ICE) από τους (Tańczuk & Ulbrich, 2013). Σε αυτήν την

περίπτωση, η οικονομική αποτελεσματικότητα (για συστήματα με διαφορετική απόδοση ισχύος) διερευνάται με βάση τα πολωνικά και γερμανικά προγράμματα υποστήριξης. Τα εν λόγω προγράμματα σχετίζονται με τη μετατροπή της ενέργειας, από ανανεώσιμες πηγές.

Οι (Anderson & Toffolo, 2013) διερεύνησαν μια ενοποίηση πριονιστηρίου, με μια μονάδα pellet και μια μονάδα CHP (καύση απορριμμάτων βιομάζας σε αποκλειστική μονάδα ατμού). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούν να εξοικονομηθούν έως και 18% των υποπροϊόντων βιομάζας του πριονιστηρίου, σε περίπτωση μιας ολοκληρωμένης, παραγωγικής διαδικασίας. Επιπροσθέτως, στην έρευνα των (Danon et al., 2012), παρουσιάστηκε μία ενεργειακή-οικονομική ανάλυση για μονάδες CHP, οι οποίες λειτουργούν με βιομάζα και σύμφωνα με διάφορες τεχνολογίες: μηχανή Stirling, ORC, ατμομηχανή, ατμοστρόβιλος και κινητήρας αερίου. Από την ανάλυση των συγγραφέων, διαπιστώθηκε ότι όσον αφορά τις σεβικές συνθήκες, η εγκατάσταση μονάδων CHP σε πριονιστήρια μικρής δυναμικότητας (περίπου 10.000 m³/έτος), δεν δικαιολογείται οικονομικά.

Τέλος, η δασική βιομάζα και άλλα απόβλητα βιομάζας, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε καταναμημένα υβριδικά συστήματα, τα οποία σχετίζονται με την μετατροπή ενέργειας. Μια πρόταση ενός υβριδικού σταθμού βιομάζας-ηλιακής ενέργειας, παρουσιάστηκε στην έρευνα των (Peterseim et al., 2014). Οι συγγραφείς αξιοποίησαν διάφορους τύπους βιομάζας (ροκανίδια, αστικά απόβλητα ξύλου) και παραβολικούς συλλέκτες. Ομοίως, στην έρευνα των (Angrisan et al., 2013) συζητήθηκε μια υβριδική μονάδα CHP, η οποία είχε άμεση ηλιακή παροχή και ενέργεια μέσω βιομάζας. Στη προκειμένη περίπτωση, η βιομάζα καίγεται σε έναν λέβητα ρευστοποιημένης κλίνης και η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται μέσω ενός συγκεντρωμένου δέκτη. Έπειτα, η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, χρησιμοποιώντας έναν κινητήρα Stirling. Η θερμοοικονομική ανάλυση μιας μικροτουρμπίνας αερίου, η οποία τροφοδοτείται με φυσικό αέριο και βιομάζα εξωτερικής καύσης, παρουσιάστηκε στην έρευνα των (Pantaleo et al., 2013).

Συνοψίζοντας, στην έρευνα των (Borsukiewicz-Gozdur et al., 2014), αναφέρθηκαν τρεις παραλλαγές των συστημάτων CHP, οι οποίες χρησιμοποιούν τεχνολογία ατμού και παρουσιάζονται σε εφαρμογές, για μονάδες επεξεργασίας ξύλου. Η απόδοση κάθε παραλλαγής εξαρτάται κυρίως, από τον τύπο του ρευστού που λειτουργεί στον κύκλο του ατμού (νερό, μεθανόλη, MDM και μεθυλοκυκλοεξάνιο). Επιπλέον, η θερμότητα που προέρχεται από το σύστημα CHP προορίζεται για διαδικασίες ξήρανσης (ξύλου). Ακόμα, η απόδοση των μονάδων CHP, αναλύεται με βάση τρεις παραμέτρους. Αυτές χαρακτηρίζουν κυρίως τη μονάδα CHP, δηλαδή την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, την παραγωγή θερμικής ισχύος και τη θερμοκρασία του αέρα που χρησιμοποιείται για σκοπούς ξήρανσης. Η ανάλυση των δεδομένων υποδηλώνει τα εξής:

- Τα συστήματα που λειτουργούν με κάποιο υγρό, ρευστό εργασίας (νερό ή μεθανόλη), ενδείκνυνται για τις μονάδες επεξεργασίας ξύλου. Σε αυτές, είναι επιθυμητή η σχετικά υψηλή ροή θερμότητας, μαζί με μία χαμηλή τιμή θερμοκρασίας στον αέρα ξήρανσης.
- Η χρήση ξηρών, οργανικών υγρών με εσωτερική αναγέννηση, επιτρέπει την απόκτηση πολύ υψηλότερων τιμών ηλεκτρικής ισχύος. Οι τιμές αυτές είναι αρκετά υψηλότερες, συγκριτικά με εκείνες των προαναφερθέντων, ρευστών εργασίας.

- Η εφαρμογή ενός ξηρού ρευστού εργασίας, σε ένα σύστημα που δεν έχει εσωτερική αναγέννηση, επιτρέπει την επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας στον αέρα ξήρανσης.

Συνοπτικά, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η σωστή επιλογή του ρευστού εργασίας (ενός μελλοντικού συστήματος CHP), επιτρέπει στο σύστημα να συμβαδίζει με τις επιθυμητές παραμέτρους λειτουργίας (του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ORC).

4.5 Αποδόσεις ενέργειας και εξέργειας του ORC

Τόσο η απόδοση της ενέργειας όσο και αυτή της εξέργειας, αποτελούν βασικά στοιχεία για την σωστή αξιολόγηση της απόδοσης, των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ORC. Ειδικότερα, βάση της έρευνας των (Boydak et al., 2018), η ενεργειακή απόδοση του κύκλου ORC μπορεί να παρουσιαστεί ως εξής:

$$\text{Ενεργειακή απόδοση} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_P}{\dot{Q}_{in}} \quad [\text{Εξίσωση 20}]$$

όπου W είναι η ισχύς και \dot{Q}_{in} είναι ο ρυθμός εισόδου θερμότητας. Οι δείκτες T και P υποδηλώνουν την τουρμπίνα και την αντλία, αντίστοιχα. Η ενεργειακή απόδοση του ORC εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και από τον ρυθμό που έχει η ροή της μάζας (του νερού ψύξης). Για παράδειγμα, η ενεργειακή απόδοση του ORC, χρησιμοποιώντας τα R-123 και R-245fa ως ρευστά εργασίας, είναι περίπου 6%-11%, ενώ το εύρος θερμοκρασίας κυμαίνεται από 600 °C – 2000 °C. Ωστόσο, αυτή η τιμή μπορεί να κυμαίνεται από 10% έως 14% για το R-113 και για τον ίδιο εύκρατο πόρο (Boydak et al., 2018;).

Από την άλλη πλευρά και σύμφωνα με την ίδια έρευνα, ο ρυθμός υποβάθμισης της εξέργειας του ORC, εκφράζεται ως:

$$\dot{E}x_{\text{heat}} + \dot{W}_{\text{net}} = \sum \dot{E}x_{\text{out}} - \sum \dot{E}x_{\text{in}} + \dot{I} \quad [\text{Εξίσωση 21}]$$

όπου οι δείκτες εισόδου και εξόδου αντιπροσωπεύουν τις καταστάσεις εισόδου και εξόδου, ενώ το $\dot{E}x$ είναι ο ρυθμός εξέργειας και το \dot{I} , ο ρυθμός μη αναστρέψιμης λειτουργίας. Η συνολική απόδοση της εξέργειας, του κύκλου ORC, μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\text{Απόδοση εξέργειας} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\sum \dot{E}x_{\text{in}}} \quad [\text{Εξίσωση 22}]$$

Η επιλογή του ρευστού εργασίας είναι η βασική παράμετρος στην απόδοση του ORC και επηρεάζει βαθιά και τις δύο μορφές απόδοσης του. Οι κοινές προδιαγραφές του ρευστού εργασίας, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, είναι η μη τοξικότητα, η μη αναφλεξιμότητα, η σταθερότητα και η κρίσιμη θερμοκρασία. Επιπλέον, μια άλλη ιδιότητα που χρησιμοποιείται σε έναν δυαδικό κύκλο ισχύος (όταν λειτουργεί με γεωθερμικό νερό χαμηλής θερμοκρασίας) είναι το χαμηλό σημείο βρασμού που έχει το ρευστό εργασίας. Η ενεργειακή απόδοση, των διαφορετικών ρευστών λειτουργίας του ORC, μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού. Πιο αναλυτικά, το τεταρτοταγές μίγμα των R125, R123, R124 και R 134a διαμορφώνεται κατάλληλα, ούτως ώστε να μπορεί να ανακτά τη

θερμότητα από μία πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (65 °C), σε μια πηγή υψηλής θερμοκρασίας (482 °C). Επίσης, η εφαρμογή του R245fa/R152a (ως ζεοτροπικού ρευστού εργασίας) σε έναν κύκλο ORC, των 50 kW και με έναν εσωτερικό εναλλάκτη θερμότητας, αποκάλυψε ότι η ενεργειακή απόδοση του κύκλου θα μπορούσε να ποικίλλει σε σχέση με το κλάσμα της μάζας δύο ρευστών και με τη μέση θερμοκρασία του εξατμιστήρα (Deethayat et al., 2015).

Ένα μείγμα ζεοτροπικών, λειτουργικών ρευστών διερευνήθηκε από τους (Collings et al., 2016) κατά τη χρήση ενός αερόψυκτου συμπυκνωτή, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με κύκλο ORC. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν επίσης μια δυναμική σύνθεση ενός ρευστού εργασίας ORC, προκειμένου να τροποποιήσουν τη θερμοκρασία του αέρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενεργειακή απόδοση ενός δυναμικού και αερόψυκτου συμπυκνωτή ORC, είναι κατά 23% υψηλότερη σε σχέση με αυτή ενός απλού συμπυκνωτή ORC. Σε μία άλλη έρευνα (Zhang et al., 2016), διερευνήθηκε η προσομοίωση τριών κύκλων ισχύος, συμπεριλαμβανομένων των SRC, ORC και του συνδυαστικού κύκλου ατμού-οργανικού Rankine (S-ORC). Κατά την προσομοίωση, οι θερμοκρασίες της πηγής κυμαίνονταν από 150 έως 350 °C, ενώ τα αποτελέσματα αυτών των κύκλων επιτεύχθηκαν για διάφορα λειτουργικά ρευστά.

Επιπρόσθετα, οι συγγραφείς (Hung et al., 2010) πραγματοποίησαν μία έρευνα σχετικά με τις πηγές χαμηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά ρευστά εργασίας σε έναν κύκλο ORC (ξηρά, υγρά και ισεντροπικά υγρά. Κατά τη διάρκεια της αξιολόγησής τους, αποκτήθηκαν οι παράμετροι της θερμοκρασίας και της πίεσης εισόδου του στροβίλου, η θερμοκρασία εξόδου του συμπυκνωτή, η ποιότητα του ρεύματος εξόδου του στροβίλου, η συνολική μη αναστρεψιμότητα, καθώς και η ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Σε μία διαφορετική προσέγγιση, οι (Abam et al., 2018) προχώρησαν στην εφαρμογή ενός κύκλου ORC μικροκλίμακας (micro ORC), προκειμένου να μετατρέψουν τη γεωθερμική θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενεργειακή απόδοση αυτού του micro ORC, χρησιμοποιώντας το ρευστό εργασίας R134a, ήταν περίπου 4,1%. Τέλος, διεξήχθη επίσης μια ολοκληρωμένη έρευνα σχετικά με τον προχωρημένο κύκλο ORC (advanced ORC cycle), συμπεριλαμβανομένων των TC (Trans Critical cycles), TLC (Trilateral cycles), OFC (Organic Flash cycles) και RG (Regenerative cycle with Turbine bleeding). Τα λειτουργικά ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω έρευνα ήταν διάφορα, ζεοτροπικά μείγματα (zeotropic mixtures - ZM) (Lecompte et al., 2015).

4.5 Οικονομική πτυχή του ORC

Γενικά, η ηλεκτρική ενέργεια για οποιοδήποτε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_E = \frac{C_i(1+i)^L}{(1+i)^L - 1} + C_{OM} \quad [Εξίσωση 23]$$

$$8760\dot{W}_{net}$$

όπου C είναι το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού, i είναι το επιτόκιο και L είναι η διάρκεια ζωής του συστήματος (ανά έτη). Οι δείκτες E (electricity) και OM (operation and maintenance) δηλώνουν αντίστοιχα, την ηλεκτρική ενέργεια και τη λειτουργία και συντήρηση. Η Ταμειακή Ροή (Cash Flow - CF) του ετήσιου εισοδήματος, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$CF = \sum Y_{\text{product}} k_{\text{product}} \quad [Εξίσωση 24]$$

όπου k είναι το ειδικό κόστος κάθε προϊόντος και Y είναι η ετήσια ενεργειακή παράμετρος. Επιπροσθέτως, η απλή περίοδος απόσβεσης (simple payback period - SPP) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$SPP = \frac{C_0}{CF} \quad [Εξίσωση 25]$$

και η περίοδος απόσβεσης (payback period - PP) ως:

$$PP = \frac{\ln \left(\frac{CF}{CF - i \cdot C_0} \right)}{\ln (1 + i)} \quad [Εξίσωση 26]$$

Κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, η καθαρή παρούσα αξία (net present value – NPV) εκφράζεται ως:

$$NPV = -C_0 + CF \frac{(1 + i)^L - 1}{i(1 + i)^L} \quad [Εξίσωση 27]$$

ενώ ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return - IRR) λαμβάνεται ως:

$$IRR = \frac{CF}{C_0} \left[1 - \frac{1}{(1 + IRR)^L} \right] \quad [Εξίσωση 28]$$

Γενικότερα, το ισοπεδωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost of Electricity - LCOE) εκλαμβάνεται ως η κοινή παράμετρος, στην αγορά παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Θεωρείται απαραίτητο, προκειμένου να μπορέσει να επιτευχθεί η σύγκριση μεταξύ των τιμών της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για διαφορετικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Το LCOE μπορεί να οριστεί ως η παρούσα αξία της τιμής, της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως εκφρασμένη σε μονάδες σεντ ανά κιλοβατώρα), λαμβάνοντας υπόψη τον οικονομικό κύκλο ζωής της μονάδας και όλα τα έξοδα που προκύπτουν κατά την κατασκευή, λειτουργία και

συντήρηση της (μαζί με το κόστος καυσίμων). Όσον αφορά την εμπορευματοποίηση των ORCs, το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας σε ORC, δεν πρέπει να υπερβαίνει το κόστος άλλων, συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εισπραχθέντα οικονομικά έσοδα ορισμένων εκτελούμενων ORCs, αποκάλυψαν ότι τα έσοδα αυτών των κύκλων (ανά εγκατεστημένη ισχύ) κυμαίνονταν από 1410 \$/kW έως 1580 \$/kW. Επομένως, με βάση αυτές τις οικονομικές πληροφορίες, η συνολική αξία της αγοράς ORC κυμαινόταν το 2016, από 359 \$ έως 402 εκατομμύρια \$ ετησίως (Tartiere and Astol fi, 2017).

Εκτός από τις προαναφερθέντες έρευνες, έχουν επίσης πραγματοποιηθεί και ορισμένες θερμοοικονομικές αναλύσεις για τον ORC όπως αυτές των (Pehnt, 2006) και (Van Erdeweghe et al., 2019). Στην πρώτη, εξετάστηκε μια θερμοοικονομική ανάλυση του αναγεννητικού ORC, το οποίο τροφοδοτείται από ένα γεωθερμικό ρευστό ως πηγή θερμότητας. Σε αυτόν τον κύκλο, το ρευστό εργασίας θεωρήθηκε ως n-πεντάνιο (R601) με θερμοκρασία και ταχύτητα ροής μάζας 165 °C και 100 kg/s, αντίστοιχα. Τα οικονομικά αποτελέσματα έδειξαν ότι στη βέλτιστη ισχύ εξόδου, το ελάχιστο ποσοστό του κόστους παραγωγής ήταν 25,1 \$/GJ. Στη δεύτερη, πραγματοποιήθηκε μια θερμοοικονομική ανάλυση της απόδοσης του ORC ως προς την αξιολόγηση της NPV (-12,62 MEUR). Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, έδειξαν ότι το γεωθερμικό ORC δεν ήταν τόσο ελκυστικό (οικονομικά) έτσι ώστε να λειτουργήσει στους 130 °C.

Μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των οικονομικών παραμέτρων αλλά και των παραμέτρων μάρκετινγκ, αποτελείται από τιμολόγια τροφοδοσίας (Feed-in Tariffs - FIT), πληρωμές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πριμοδότηση τροφοδοσίας (Feed-in premium - FIP), δημοπρασίες/διαγωνισμούς, επενδυτικά κίνητρα, πιστοποιητικά/ποσόστωση πράσινων υποχρεώσεων και από την καθαρή αξία μέτρησης για τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC που παρουσιάζεται για τις ευρωπαϊκές χώρες). Για παράδειγμα, τα τιμολόγια τροφοδοσίας, τα οποία αντιπροσωπεύουν πληρωμές για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποτελούν ένα κυβερνητικό μέσο που αποσκοπεί στην ενθάρρυνση των επενδύσεων, σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με την οικονομική αξιολόγηση των συγγραφέων (Fontalvo et al., 2017), τόσο για την μονή όσο και για την διπλή πίεση των κύκλων ORC, προέκυψαν δύο οικονομικές παράμετροι: του LCOE και του SIC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πιο οικονομικό σύστημα ORC (μεταξύ όλων των διαμορφώσεων ORC) ήταν ένα συμβατικό σύστημα ισχύος ORC. Για ένα τέτοιο σύστημα, η περίοδος απόσβεσης ήταν περίπου 8 χρόνια και είχε ποσοστό ενεργειακού κόστους 0,3 USD/kWh. Επιπλέον, συγκρίνοντας δύο ρευστά εργασίας (R245fa και R1234ze) για ένα συμβατικό σύστημα ισχύος ORC, το αποτέλεσμα της αξιολόγησης αποκάλυψε ότι το R1234ze είχε την υψηλότερη απόδοση μεταξύ των δύο ρευστών. Κλείνοντας, σε μια μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας του ORC, η συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους του κύκλου, αξιολογήθηκε ως προς την παραγωγή ισχύος του. Επομένως, όταν ο ORC είχε μεγαλύτερη χωρητικότητα, είχε παράλληλα και χαμηλότερο ειδικό, επενδυτικό κόστος. Από την άλλη πλευρά και καθώς μειωνόταν η χωρητικότητα του ORC, το συγκεκριμένο επενδυτικό κόστος αυξανόταν με ραγδαίους ρυθμούς (Rettig et al., 2011).

Βιβλιογραφία

- Abam, F. I., Ekwe, E. B., Briggs, T. A., Effiom, S. O., Ohunakin, O. S., & Allen, M. (2018). Thermodynamic performance and environmental sustainability of adapted organic Rankine cycles at varying evaporator pressure. *International Journal of Ambient Energy*, 39(4), 332-342.
- Anderson, J. O., & Toffolo, A. (2013). Improving energy efficiency of sawmill industrial sites by integration with pellet and CHP plants. *Applied energy*, 111, 791-800.
- Anderson, J. O., & Westerlund, L. (2014). Improved energy efficiency in sawmill drying system. *Applied Energy*, 113, 891-901.
- Angrisani, G., Bizon, K., Chirone, R., Continillo, G., Fusco, G., Lombardi, S., ... & Urciuolo, M. (2013). Development of a new concept solar-biomass cogeneration system. *Energy Conversion and Management*, 75, 552-560.
- Bertrand F. Tchanche, Gr. Lambrinos, A. Frangoudakis, G. Papadakis. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3963-3979.
- Bertrand F. Tchanche (2010). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles. Phd thesis. Athens, Agricultural University of Athens.
- Bertrand F.Tchanche, M. G. (2014). Heat resources and organic Rankine cycle machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1185-1199.
- Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 325-342.
- Baral, S. (2019). Experimental and techno-economic analysis of solar-geothermal organic Rankine cycle technology for power generation in Nepal. *International Journal of Photoenergy*, 2019.
- Borsukiewicz-Gozdur, A., Wiśniewski, S., Mocarski, S., & Bańkowski, M. (2014). ORC power plant for electricity production from forest and agriculture biomass. *Energy Conversion and Management*, 87, 1180-1185.
- Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Peretto, A., ... & Zampieri, G. (2018). Performance and operation of micro-ORC energy system using geothermal heat source. *Energy Procedia*, 148, 384-391.
- Boydak, O., Ekmekci, I., Yilmaz, M., & Koten, H. (2018). Thermodynamic investigation of organic Rankine cycle energy recovery system and recent studies. *Thermal Science*, 22(6 Part A), 2679-2690.
- Cao, L., Wang, J., Zhao, P., & Dai, Y. (2016). Thermodynamic Comparison among Double-Flash, Flash-Kalina and Flash-ORC Geothermal Power Plants. *International Journal of Thermodynamics*, 19(1).

- Chen, H., Goswami, D. Y., & Stefanakos, E. K. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 3059-3067.
- Collings, P., Yu, Z., & Wang, E. (2016). A dynamic organic Rankine cycle using a zeotropic mixture as the working fluid with composition tuning to match changing ambient conditions. *Applied Energy*, 171, 581-591.
- Deng, W., Xu, J., & Zhao, H. (2019). An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem. *IEEE access*, 7, 20281-20292.
- Fontalvo, A., Solano, J., Pedraza, C., Bula, A., Gonzalez Quiroga, A., & Vasquez Padilla, R. (2017). Energy, exergy and economic evaluation comparison of small-scale single and dual pressure organic Rankine cycles integrated with low-grade heat sources. *Entropy*, 19(10), 476.
- Gu, A.Z., 2004. Liquefied Natural Gas Technology. p. 266 (Chapter 7, in Chinese).
- Heberle, F., & Brüggemann, D. (2014). Thermoeconomic analysis of hybrid power plant concepts for geothermal combined heat and power generation. *Energies*, 7(7), 4482-4497.
- Heberle, F., Hofer, M., & Brüggemann, D. (2017). A retrofit for geothermal organic rankine cycles based on concentrated solar thermal systems. *Energy Procedia*, 129, 692-699.
- Hung, T. C., Wang, S. K., Kuo, C. H., Pei, B. S., & Tsai, K. F. (2010). A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources. *Energy*, 35(3), 1403-1411.
- Ismail, B. I. (2013). ORC-Based Geothermal Power Generation and CO₂-Based EGS for Combined Green Power Generation and CO₂ Sequestration. *New Developments in Renewable Energy*, 303-328.
- Kazemi, H., & Ehyaei, M. A. (2018). Energy, exergy, and economic analysis of a geothermal power plant. *Advances In Geo-Energy Research*, 2(2), 190-209.
- Larjola J. (2011). Organic Rankine cycle (ORC) based waste heat/waste fuel recovery systems for small combined heat and power (CHP) applications. *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, 206 – 232.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 448-461.
- Li, J., Pei, G., Li, Y., Wang, D., & Ji, J. (2012). Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperatures. *Energy*, 38(1), 85-95.
- Liu, C., & Gao, T. (2019). Off-design performance analysis of basic ORC, ORC using zeotropic mixtures and composition-adjustable ORC under optimal control strategy. *Energy*, 171, 95-108.
- Mosaffa, A. H., Mokarram, N. H., & Farshi, L. G. (2017). Thermo-economic analysis of combined different ORCs geothermal power plants and LNG cold energy. *Geothermics*, 65, 113-125.

- Pantaleo, A. M., Camporeale, S. M., & Shah, N. (2013). Thermo-economic assessment of externally fired micro-gas turbine fired by natural gas and biomass: Applications in Italy. *Energy Conversion and management*, 75, 202-213.
- Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable energy*, 31(1), 55-71.
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 22, 168-186.
- Quoilin, M.O. (2011) Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine Cycle for remote power generation. *Solar Energy*, 955-966.
- Rao, W. J., Zhao, L. J., Liu, C., & Zhang, M. G. (2013). A combined cycle utilizing LNG and low-temperature solar energy. *Applied thermal engineering*, 60(1-2), 51-60.
- Renström, R. (2006). The potential of improvements in the energy systems of sawmills when coupled dryers are used for drying of wood fuels and wood products. *Biomass and Bioenergy*, 30(5), 452-460.
- Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Tatsiopoulou, I. (2009). Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 674-681
- Rettig, A., Lagler, M., Lamare, T., Li, S., Mahadea, V., McCallion, S., & Chernushevich, J. (2011, September). Application of organic Rankine cycles (ORC). In *World Engineer's Convention, Geneva, Switzerland* (pp. p4-8).
- Rosyid, H., Koestoer, R., Putra, N., & Mohamad, A. A. (2010). Sensitivity analysis of steam power plant-binary cycle. *Energy*, 35(9), 3578-3586.
- Salajuddin Qazi. (2016). Solar Thermal Electricity and Solar Insolation. Standalone *Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*, 203 – 237.
- Song, Y., Wang, J., Dai, Y., & Zhou, E. (2012). Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy with liquified natural gas as its heat sink. *Applied energy*, 92, 194-203.
- Tartière, T., & Astolfi, M. (2017). A world overview of the organic Rankine cycle market. *Energy Procedia*, 129, 2-9.
- Thurairaja, K., Wijewardane, A., Jayasekara, S., & Ranasinghe, C. (2019). Working fluid selection and performance evaluation of ORC. *Energy Procedia*, 156, 244-248.
- Van Erdeweghe, S., Van Bael, J., Laenen, B., & D'haeseleer, W. (2019). Design and off-design optimization procedure for low-temperature geothermal organic Rankine cycles. *Applied Energy*, 242, 716-731.

- Van Erdeweghe, S., Van Bael, J., Laenen, B., & D'haeseleer, W. (2018). Feasibility study of a low-temperature geothermal power plant for multiple economic scenarios. *Energy*, *155*, 1004-1012.
- Vélez, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F., & Quijano, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 4175-4189.
- Wang, J., Yan, Z., Wang, M., Ma, S., & Dai, Y. (2013). Thermodynamic analysis and optimization of an (organic Rankine cycle) ORC using low grade heat source. *Energy*, *49*, 356-365.
- Wang, M., Wang, J., Zhao, Y., Zhao, P., & Dai, Y. (2013). Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, *50*(1), 816-825.
- Wang, X., Levy, E. K., Pan, C., Romero, C. E., Banerjee, A., Rubio-Maya, C., & Pan, L. (2019). Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO₂ from a geothermal reservoir. *Applied Thermal Engineering*, *149*, 1287-1304.
- Xu, W., Bian, H., & Fan, S. (2009). The cold energy utilization technology of LNG station satellite. *Nat Gas Ind*, *29*(5), 112-114.
- Yasmine Ammar., Sharon J., Norman R., Yaodong Wang, Anthony P. Roskilly. (2012). Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Applied Energy*, *89*, 3-20.
- Yao, S., Zhang, Y., & Yu, X. (2018). Thermo-economic analysis of a novel power generation system integrating a natural gas expansion plant with a geothermal ORC in Tianjin, China. *Energy*, *164*, 602-614.
- Yilmaz, C. (2018). Thermo-economic cost analysis and comparison of methodologies for Dora II binary geothermal power plant. *Geothermics*, *75*, 48-57.
- Zhang, X., Wu, L., Wang, X., & Ju, G. (2016). Comparative study of waste heat steam SRC, ORC and S-ORC power generation systems in medium-low temperature. *Applied Thermal Engineering*, *106*, 1427-1439.
- Αλαμπρίτης, Δ. (2016). Ανάλυση Οργανικού κύκλου Rankine και μελέτη εργαζόμενων μέσων για μικρής κλίμακας σύστημα ηλιακών συλλεκτών. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ευστασιάδης, Θ. (2012). Σχεδιασμός στροβίλου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κλειστό οργανικό κύκλο Rankine (ORC). Διπλωματική εργασία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο.