



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Τεχνοοικονομική μελέτη αξιοποίησης εναλλακτικών σχεδίων
γεωθερμικής ενέργειας με τη χρήση δυαδικού κύκλου
και εκτίμηση μείωσης των εκπομπών CO₂eq.**



Φοιτητής: ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΑΜ: 51204168

Επιβλέπων Καθηγητής

Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Techno-economic study for the utilization of alternative geothermal energy plans using a binary cycle and estimation of reduction of CO₂eq emissions.



Student: STAVROPOULOS PANAGIOTIS
Registration Number: 51204168

Supervisor

Psomopoulos Constantinos
Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής	Όνοματεπώνυμο, βαθμίδα	Όνοματεπώνυμο, βαθμίδα
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Σταυρόπουλος Παναγιώτης, Ιούλιος, 2022

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ** του **ΑΝΔΡΕΑ**, με αριθμό μητρώου **51204168**, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής **ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ** του Τμήματος **ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Δεν επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου.»

Ο Δηλών,

Σταυρόπουλος Παναγιώτης



Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, διακρίνοντας αλλά και αδικώντας ενδεχομένως μερικά πρόσωπα, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον επιβλέποντα μου, καθηγητή κ.Ψωμόπουλο, του οποίου οι συμβουλές και οι επισημάνσεις συνετέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωση του εγχειρήματος αυτού.

Την οικογένεια μου και ιδιαίτερα την αδερφή μου, που με στηρίζουν σε κάθε μου νέα προσπάθεια.

Ορισμένους συμφοιτητές και εκλεκτούς φίλους, η παρουσία των οποίων έκανε τη διαδρομή αυτή να μοιάζει περισσότερο ευχάριστη και ενδιαφέρουσα.

Και κλείνοντας, ευχαριστώ τη μητέρα μου, που αν και δεν βρίσκεται πια κοντά μου, πάντα μου δείχνει το σωστό δρόμο ...

Παναγιώτης Σταυρόπουλος

Αθήνα, 2023

Περίληψη

Καθώς η σύγχρονη εποχή δίνει μεγάλη έμφαση στα θέματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του ενεργειακού μετασχηματισμού, η εργασία αυτή εστιάζεται αρχικά σε μια θεωρητική ανάλυση που αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις διάφορες μορφές τους (βιομάζα, υδροηλεκτρική ενέργεια). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μεθοδολογία *Emergence2010*, καθώς και την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, που διαθέτουν μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από το πράσινο υδρογόνο. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στην ίδια τη γεωθερμία και τη χρήση της για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα είδη της διακρίνονται στη βάση του βάθους του εδάφους: επιφανειακό, αβαθές και βαθύτερο. Στη συνέχεια, γίνεται μια διαπραγμάτευση των τεχνολογιών και των εφαρμογών που έχει η γεωθερμία. Κρίσιμο στοιχείο στη διάκριση αυτή και την κατηγοριοποίηση είναι κυρίως το ύψος της ενθαλπίας. Στη συνέχεια, αναλύονται οι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και της τηλεθέρμανσης. Επισημαίνεται ότι ο Οργανικός Κύκλος Rankine είναι κατεξοχήν μια τέτοια περίπτωση, αφού σκοπός του είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια. Στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας, δύο είναι τα κύρια στοιχεία: το πρώτο αφορά την τεχνική κατασκευής μιας διάταξης υλοποίησης του Οργανικού Κύκλου Rankine, ενός θερμοδυναμικού κύκλου, με σκοπό την ορθή αξιοποίηση (μεταξύ άλλων) της γεωθερμικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται και η επιλογή ενός εργαζόμενου ρευστού. Το δεύτερο στοιχείο έχει να κάνει με την εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου και την οικονομική ανάλυση, όπου αναλύονται δύο σενάρια επενδύσεων. Το δεύτερο σενάριο τελικά, στη βάση χρηματοοικονομικών κριτηρίων, προκύπτει επικερδές.

Λέξεις – κλειδιά

Γεωθερμία, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Οργανικός κύκλος Rankine, τεχνοοικονομική ανάλυση, εργαζόμενο ρευστό.

Abstract

As the modern era places great emphasis on the matters and issues of renewable energy sources and energy transformation, this work initially focuses on a theoretical analysis of renewable energy sources, as they in their various forms (biomass, hydroelectric energy). Particular emphasis is placed on the *Emergence2010* methodology, as well as the replacement of fossil fuels currently attempted, such as oil, which have a greater environmental footprint than green hydrogen. Subsequently, emphasis is placed on geothermal energy itself and its use for heat production. Its types are distinguished at the base of the soil depth. Next, a discussion of the technologies and applications of geothermal energy takes place. A crucial element in this distinction and categorization is mainly the enthalpy level. After this, the method of generating electricity as well as district heating are analyzed. It is pointed out that the Rankine Organic Cycle is primarily such a case, since its purpose is to generate electricity from geothermal energy. In the empirical part of the work, there are two main elements: the first has to do with the technique of constructing a device for the implementation of the Organic Rankine Cycle, a thermodynamic cycle, in order to properly utilize (among others) geothermal energy. In this context, the selection of a working fluid is made. The second element has to do with the exploitation of the geothermal field and the economic analysis, where two investment scenarios are analyzed. Ultimately, it is the second scenario, on the basis of financial criteria, which turns out to be profitable.

Keywords

Geothermy, Renewable Energy, Organic Rankine Cycle, Techno-Economic Analysis, Working fluid.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	13
Σκοπός και στόχοι	13
Μεθοδολογία.....	14
Καινοτομία.....	14
Δομή	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γεωθερμία	16
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	16
1.2 Συμβολή των ΑΠΕ στη μείωση των ρύπων.....	18
1.3 Συμβολή των ΑΠΕ στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής	19
1.4 Αξιοποίηση της γεωθερμίας για την παραγωγή θερμότητας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Τεχνολογίες και εφαρμογές γεωθερμίας	23
2.1 Γεωθερμικά πεδία	23
2.2 Γεωθερμία και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	25
2.3 Γεωθερμία και τηλεθέρμανση	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Τεχνοοικονομική ανάλυση κύκλου Rankine	31
3.1 Γεωθερμικός δυαδικός κύκλος	33
3.2 Παρατηρήσεις πάνω στην διάταξη.....	35
3.3 Μοντελοποίηση	35
3.4 Οικονομική ανάλυση	43
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	48
Παράρτημα Α	50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, πραγματοποιείται ένας μεγάλος μετασχηματισμός στο πεδίο της ενέργειας. Τα προβλήματα που συνδέονται με την μόλυνση του φυσικού περιβάλλοντος όπως και εκείνα που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή εκδηλώνονται στην καθημερινότητα των πολιτών και έχουν ωθήσει αρκετές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο σε δραστικές αλλαγές. Ήδη ένα 75% των χωρών ανά τον κόσμο έχει προχωρήσει σε συμφωνίες ή δεσμεύσεις για το μετασχηματισμό των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούν προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Παράλληλα, συντελείται και μια αλλαγή στο επίπεδο των ίδιων των ορυκτών καυσίμων. Έτσι, αντί του λιγνίτη ή του πετρελαίου, προτιμάται το φυσικό αέριο, το οποίο θεωρείται από πολλές πηγές το φιλικότερο προς το περιβάλλον ορυκτό καύσιμο.

Στο πλαίσιο αυτό, προβάλλεται η γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμία. Πρόκειται για μια από τις σημαντικότερες μορφές ενέργειας που απασχολούν τους επιστήμονες καθώς και τις αρμόδιες αρχές. Αυτό οφείλεται κατά πρώτον στο γεγονός ότι η γεωθερμική ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη μορφή ενέργειας. Δεύτερον, στο γεγονός ότι η γεωθερμική ενέργεια ανήκει στις Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας. Τρίτον, διότι είναι η καθαρότερη ίσως και επίσης από τις ηπιότερες μορφές ενέργειας, με αμελητέο περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με την υλοποίηση μιας διεργασίας αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μάλιστα της γεωθερμίας, προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Η διάταξη που υλοποιείται κάνει χρήση του λεγόμενου οργανικού κύκλου Rankine. Η αξία μίας τέτοιας διάταξης είναι πολύ μεγάλη, με δεδομένη τη σπουδαιότητα που έχει η γεωθερμική ενέργεια, ιδιαίτερα στις μέρες μας.

Χώρες όπως η Ισλανδία ("5 places running on 100% renewable energy - World Smart Cities Forum", χ. χ.) για παράδειγμα, που είναι μέρος της ευρωπαϊκής ηπείρου, έχουν κατορθώσει να κάνουν πλήρη μετασχηματισμό σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στο 100%. Ειδικότερα, στην περίπτωση της Ισλανδίας, ένα 25% προέρχεται από τη γεωθερμική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο 75% από υδροηλεκτρική ενέργεια. Η χώρα μας επιχειρεί επίσης να κάνει τη στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στη βάση και τη συμμετοχής της στους πολιτικούς θεσμούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προσπάθεια που χρειάζεται επιστημονική και ερευνητική υποστήριξη. Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανής η χρησιμότητα της παρούσας εργασίας.

Σκοπός και στόχοι

Απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η υλοποίηση μιας τεχνοοικονομικής μελέτης αξιοποίησης εναλλακτικών σχεδίων γεωθερμίας. Ο τρόπος υλοποίησης του σκοπού αυτού πραγματοποιείται με την επίτευξη των ακόλουθων επιμέρους στόχων:

- Υλοποίηση διαφορετικών εναλλακτικών διατάξεων που βασίζονται στον Οργανικό Κύκλο Rankine.

- Μελέτη και ανάλυση διαφορετικών οικονομικών σεναρίων εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου.
- Εφαρμογή χρηματοοικονομικών κριτηρίων.

Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία, εξετάζονται διαφορετικά θέματα με συνεκτικό τρόπο, ώστε να υπηρετήσουν τον κεντρικό σκοπό. Έτσι, κατά πρώτον, υπάρχει το καθαρά τεχνικό κομμάτι που αφορά τον ενεργειακό μετασχηματισμό. Αυτό το κομμάτι υλοποιείται με τον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine ή οργανικό κύκλο Rankine, με διατάξεις και με χρήση εργαζόμενου ρευστού.

Κατά δεύτερον, υπάρχει ένα οικονομικό κομμάτι, στο οποίο πραγματοποιείται μια ανάλυση εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται στο συγκεκριμένο κομμάτι είναι διπλή:

- Μέθοδος Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV).
- Μέθοδος Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR).

Καινοτομία

Η συγκεκριμένη εργασία έχει στοιχεία τα οποία είναι σχετικά πρωτότυπα. Η μελέτη και υλοποίηση των οργανικών κύκλων Rankine είναι ένα από αυτά. Ένα δεύτερο καινοτομικό στοιχείο, το οποίο εμφανίζεται σε περιορισμένο αριθμό άλλων εργασιών, αποτελεί η οικονομική ανάλυση στη βάση συγκεκριμένων χρηματοοικονομικών κριτηρίων. Ένα τρίτο στοιχείο που προσδίδει πρωτοτυπία είναι η συγκριτική αποτίμηση συγκεκριμένων «σεναρίων» εκμετάλλευσης γεωθερμικού πεδίου. Ένα τέταρτο στοιχείο είναι τα ιδιαίτερα στοιχεία που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στις διατάξεις που υλοποιούν το θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Ένα από αυτά τα στοιχεία είναι ο ανεμιστήρας αντί του πύργου, που συνήθως χρησιμοποιείται για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου. Επιπλέον, όλα αυτά τα στοιχεία στη σύνθεσή τους είναι μια ακόμη συμβολή της συγκεκριμένης εργασίας.

Δομή

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θέμα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, εισάγεται η έννοια της Γεωθερμίας, ενώ αναλύεται η συμβολή Των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων όσο και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εισάγονται οι εφαρμογές της γεωθερμίας, όπως διακρίνονται στη βάση της ενθαλπίας (χαμηλή, μέση και υψηλή). Εδώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεθέρμανσης, όπου και ανήκουν οι διατάξεις υλοποίησης του θερμοδυναμικού ή οργανικού κύκλου Rankine.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά εισάγονται οι έννοιες του γεωθερμικού δυαδικού κύκλου και του οργανικού κύκλου Rankine. Στα πλαίσια της ανάλυσης της θερμοδυναμικής ανάλυσης κύκλου, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις φάσεις (στάδια) από όπου διέρχεται το εργαζόμενο ρευστό. Στη συνέχεια, δίνονται οι εναλλακτικές διατάξεις όπου υλοποιείται ο οργανικός κύκλος Rankine.

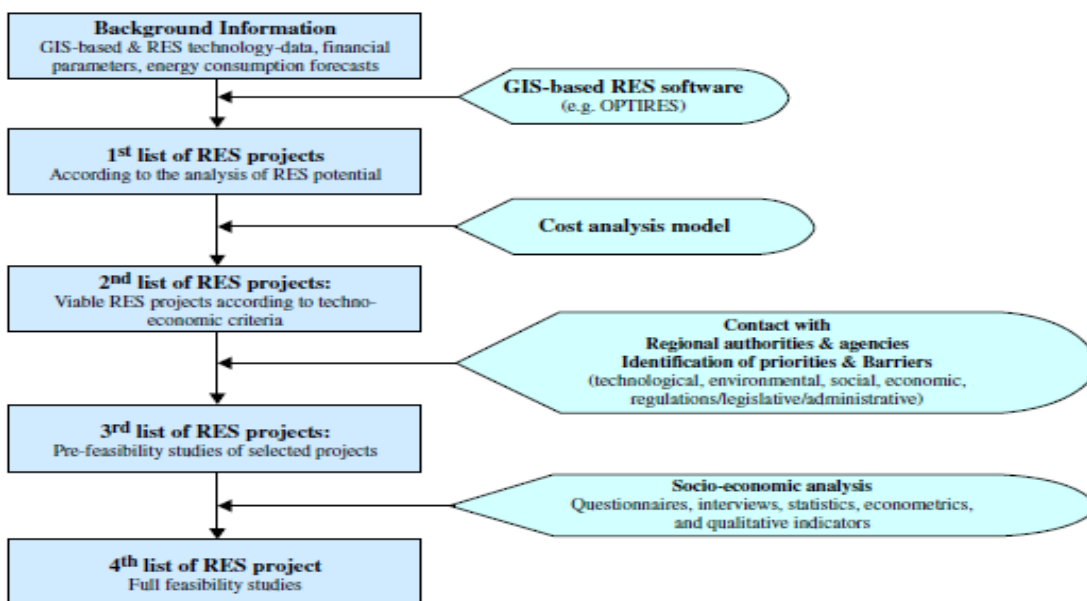
Τελικά, αναλύονται δύο διαφορετικά σενάρια διαχείρισης γεωθερμικού πεδίου όπου και γίνεται μια αποτίμηση από τα οικονομικά αποτελέσματά τους, στη βάση χρηματοοικονομικών κριτηρίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γεωθερμία

Στο πρώτο υπό-κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς στις σύγχρονες κοινωνίες η αξιοποίηση τους αποτελεί ένα κρίσιμο θέμα διαχείρισης. Πραγματοποιείται η εξέταση των εναλλακτικών μορφών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον καθώς και η επιρροή κατά την χρήση τους. Ταυτόχρονα, γίνεται μελέτη για την αξιοποίησή και την συμβολή της γεωθερμίας καθώς και ανάλυση των τεχνολογιών και εφαρμογών της στην παραγωγή θερμότητας. Στο δεύτερο σκέλος αποδίδεται διεξοδικά η συμβολή των Ανανεώσιμων Ενεργείας στην μείωση των ρύπων , με στόχο την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής η οποία έχει αντίκτυπό στην βιωσιμότητα του πλανήτη.

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο έχει αναπτυχθεί στη σημερινή εποχή, ένας σημαντικός αριθμός έργων που βασίζονται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ο άνεμος , ο ήλιος καθώς και αρκετές άλλες φυσικές διεργασίες βρίσκουν εφαρμογή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Οι διεργασίες αυτές, συντελούν μία βιώσιμη λύση που θα συμβάλλει στην αντιμετώπιση των οικολογικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων του πλανήτη Παρατηρείται μια σταθερή αύξηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας τα τελευταία χρόνια αν και το ποσοστό αυτό παραμένει χαμηλό. Στο Σχήμα 1.1, αναπαρίσταται η μεθοδολογία που δύναται να εφαρμοστεί με σκοπό την προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) (Κορδάς, 2018).



Σχήμα 1.1: Εφαρμογές μεθοδολογίας Emergence2010 για την προώθηση των ΑΠΕ.

Παράλληλα, πάνω στους τρόπους εκμετάλλευσης εξαιρετικά μεγάλων ποσών ενέργειας βασίζεται ολοκληρωτικά η πρόοδος της τεχνολογίας. Οι τρόποι ορθολογικής εκμετάλλευσης της ενέργειας συνδέονται με τα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας αλλά και με την ανακάλυψη νέων πηγών ενέργειας (συμβατικών ή ανανεώσιμων), με σκοπό την αύξηση του βαθμού απόδοσης. Η παλιρροϊκή και η κυματική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η βιομάζα (βιοκαύσιμα), η ηλιακή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια (μικρές υδατοπτώσεις), η αιολική ενέργεια, καθώς οι εναλλακτικές μορφές υδρογόνου, περιλαμβάνονται στους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.

Ο άνεμος καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία αποτελούν φυσικούς πόρους ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στις μέρες μας, παρατηρείται έντονη ανάγκη αξιοποίησής των φυσικών πόρων αυτών για παραγωγή ενέργειας(π.χ. εφαρμογή φωτοβολταϊκών), λόγω εξάντλησης των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων (π.χ. πετρέλαιο). Φυσικά, μια ανανεώσιμη πηγή είναι το νερό το οποίο αποτελεί την κινητήρια δύναμη αρκετών βιομηχανικών μονάδων ενώ το ύδωρ που προέρχεται από τις θερμές πηγές ή συναντάται με την μορφή των υδατοπτώσεων και της παλίρροιας αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και συμπεριλαμβάνεται στην κατηγορία των φυσικών πόρων αυτών. Έτσι για την αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. στόχος του 2020 , 20% αύξηση), τα κράτη μέλη της ΕΕ υπογράφουν συμφωνίες. Αντίστοιχα, η βιομάζα αποτελεί αντικείμενο της εναλλακτικής γεωργίας καθώς αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα, παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα ενεργειακά προϊόντα. Ο γεωργικός τομέας καθίσταται σημαντικός παράγοντας για την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και για τη μείωση των ρυπογόνων συμβατικών καυσίμων καθώς για την παραγωγή ενεργειακών προϊόντων τίθεται ως βάση η βιομάζα.

Επιπρόσθετα, το βιοαέριο είναι ένα αέριο που παράγεται μέσω έλλειψης οξυγόνου και οργανικών υλών. Αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα και κυρίως από μεθάνιο. Χαρακτηρίζεται ως ένα είδος βιοκαυσίμου και προέρχεται από οργανική ένωση. Το βιοαέριο παράγεται επιπλέον με αναερόβια ζύμωση από τη μετατροπή των αγροτικών καλλιεργειών σε βιομάζα. Το βιοαέριο αποτελεί κύριο είδος ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στην Ευρώπη. Αποτελείται τυπικά από 35% διοξείδιο του άνθρακα και από 65% μεθάνιο. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ως καύσιμο για μηχανές εσωτερικής καύσης, για την παραγωγή, θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας, και φυσικού αερίου.

Παράλληλα, η εφαρμογή του υδρογόνου ως αποθηκευτικό μέσο, έχει προταθεί ως μια λύση τόσο σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και σε ορισμένες χώρες, με σκοπό την προμήθεια αερίου για διάφορες βιομηχανικές χρήσεις. Οι επιστήμονες προέβλεψαν πως το υδρογόνο θα είναι ανανεώσιμο, καθαρό και αποδοτικό, και θα θεωρηθεί το καύσιμο του μέλλοντος.

1.2 Συμβολή των ΑΠΕ στη μείωση των ρύπων

Τον τελευταίο καιρό, αρκετοί αναλυτές και ερευνητές προσπάθησαν να μετρήσουν το κοινωνικό κόστος της ρύπανσης και άλλων εξωτερικών επιπτώσεων όπου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την καύση των ορυκτών καυσίμων. Επιπρόσθετα, Έγινε προσπάθεια ενσωμάτωσης του κόστους της εξωτερικής επίδρασης στις επενδυτικές αποφάσεις από ορισμένους ρυθμιστικούς φορείς.

Στις μέρες μας, ο βασικός στόχος είναι η αποδυνάμωση της εκπομπής των ρύπων και των επιπτώσεων αυτών ως προς την φύση. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες σχετικά με τον περιορισμό αυτών, κυρίως σε τομείς που σχετίζονται με παραμέτρους υφιστάμενων ενεργειακών συστημάτων οι οποίοι μπορούν να ρυθμιστούν (κυρίως συστήματα φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας). Μία πράσινη οικονομία επενδύει σε καινοτόμες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας και αυτό επισημαίνεται πώς θα υπάρξει μείωση των εκπομπών του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Κάθε χώρα αντιλαμβάνεται την βιωσιμότητα και την αειφορική διαχείριση που μπορεί να προσφέρει μία πράσινη οικονομία.

Η κατανόηση των παραπάνω αναφερόμενων δείχνουν ότι η πράσινη οικονομία προετοιμάζει την υποδομή για το μέλλον ώστε να δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίες και ευκαιρίες, εξαλείφοντας την φτώχεια και αποφεύγοντας την υπέρογκη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων. Σε κάθε κυβέρνηση τίθεται ζήτημα διάθεσης προτεραιοτήτων στην πολιτικής τους ατζέντα ώστε να παρέχεται μία οικονομία χαμηλότερων εκπομπών ρύπων και συνάμα η δημιουργία μίας νέας αγοράς και θέσεων εργασίας. Μεγάλο μέρος των κυβερνήσεων πιστεύουν πώς μια τέτοια επένδυση είναι αρκετά δαπανηρή. Δεδομένων των συνθηκών που επικρατούν στον κόσμο και στις ανάγκες του ανθρώπου σε καθημερινή βάση μια τέτοια επένδυση θα επιφέρει πολλαπλά οφέλη καθώς παρουσιάζει αρκετές θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και το μελλοντικό κόστος είναι διαρκείς δίχως προσανξήσεις.

Είναι σημαντικό οι χώρες που έχουν οικονομική ισχύ να λαμβάνουν πολύ υπόψη την πράσινη οικονομία, όποτε στην ατζέντα τους πρέπει να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με το μέλλον του πλανήτη μας (Newton & Cantarello, 2014).

Πρώτα απ' όλα, η Πράσινη Οικονομία στοχεύει σε έναν κρίσιμο καταλύτη για την ταχεία πρόοδο στην αειφόρο ανάπτυξη. Η επίτευξη των στόχων αυτών είναι περιεκτικοί και δυναμικοί λόγω ανεπαρκούς οικονομικού, τεχνικού και ανθρώπινου κεφαλαίου στις βιομηχανοποιημένες αναπτυσσόμενες χώρες χαμηλότερου βεληνεκού, η επέκταση και ο προσανατολισμός στην πράσινη οικονομία τους καθίστανται αρκετά δύσκολη.

Για τον λόγο αυτό, οι κυβερνήσεις των χωρών αυτών έχουν υιοθετήσει διάφορα μέσα όπως η παροχή κίνητρων καθώς και κανονισμών τα οποία τροφοδοτούνται συνεχώς στις εγχώριες οικονομίες με στόχο την προώθηση της ενεργειακής οικονομίας.

Η εφαρμογή των συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας καθώς και των Τεχνολογιών Εξοικονόμησης Ενέργειας είναι απόρροια του σχεδιασμού και της ανάπτυξης των παραπάνω δράσεων.

Σε μια εποχή όπου οι φυσικοί πόροι εξαντλούνται, εφαρμόζοντας τους κανόνες καλής πρακτικής ως προς στη διαχείριση των απορριμμάτων, τα απορρίμματα μπορούν να θεωρηθούν ως μια πολύ σημαντική πηγή ενέργειας ώστε να μην αποτελούν επιβάρυνση για το περιβάλλον. Για την παραγωγή ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιούνται τα απορρίμματα, σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς έτσι δίνεται λύση στην εύρεση νέων πηγών ενέργειας.

Στα ακόλουθα δέκα σημεία μπορεί να συνοψιστεί η μελλοντική αποτύπωση του ελληνικού ενεργειακού συστήματος (Carros et. al., 2013):

- Ποσοστιαία μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκήπιου συγκριτικά με το 2005 κατά ένα ποσοστό 60 % με 70 % μέχρι το 2050. Εκμετάλλευση όλων των ώριμων τεχνολογιών εμπορικά υλοποιήσιμων μέσω ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ με ποσοστό 85% -100%.
- Σταθεροποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας εξαιτίας των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.
- Σημαντική μείωση της κατανάλωσης πετρελαιοειδών.
- Συνολική διείδυση ΑΠΕ κατά ποσοστιαία κλίμακα 60%-70%, στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας έως το 2050.
- Παρουσία αυξημένης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της μεταφοράς ηλεκτροδοτήσεων και υπέρμετρης χρήσης αντλιών θερμότητας σε σπίτια και τριτογενή τομέα. Το απόκομμά της ηλεκτρικής ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές εξουσιάζει στις μικρές αποστάσεις (45%) και σημαντική αύξηση του μεριδίου των μέσων σταθερής τροχιάς.
- Εμφάνιση μεγάλης τιμής ως προς την χρήση βιοκαυσίμων σε όλες τις μεταφορές, στο επίπεδο του 31% - 34% έως το 2050.
- Ανάπτυξη αποκεντρωμένων και ευφυών δικτύων.
- Σημαντική βελτίωση ενεργειακής απόδοσης στο σύνολο του κτιριακού αποθέματος και υπερβολική διείδυση εφαρμογών ΑΠΕ στον κτιριακό τομέα.

1.3 Συμβολή των ΑΠΕ στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής

Μετά την περίοδο του COVID-19 στην Ευρώπη αναδύεται ένα ζήτημα του τρόπου επανεκκίνησης των προβληματικών οικονομιών. Επιτακτική ανάγκη να λυθεί με προτάσεις για επενδύσεις στην τεχνολογία αυτή και η ενθάρρυνση της ενεργειακής μετάβασης. Εν παραλληλία, η κλιματική αλλαγή συνδέεται εκκωφαντικά με την ενέργεια καθώς οι εκπομπές αερίων των θερμοκηπίων σε παγκόσμια κλίμακα προέρχονται από διεργασίες που έχουν άμεσο συσχετισμό με την κατανάλωση και την παραγωγή της.

Ο ντόρος γίνεται για την αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων σε μεγάλη ποσότητα τα οποία έως τώρα έχουν την κυριότητα ως πηγή ενέργειας σε παγκόσμια βάση. Στις μέρες μας, υπάρχουν αρκετά περιβαλλοντικά ζητήματα τα οποία απασχολούν την ανθρωπότητα και το ανθρώπινο είδος χρησιμοποιεί ως εναλλακτικές λύσεις τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες προέρχονται από διάφορες φυσικές διεργασίες.

Οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα πρέπει να εξασφαλίζεται από την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ο μαζικός στόχος ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σχετικά με την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μπορεί να γίνει ευκολά αντιληπτός, λαμβάνοντας υπόψη την διατήρηση της τοπικής βιοποικιλότητας καθώς και των υπόλοιπων κριτηρίων οπου αναδεικνύουν το όριο της φέρουσας ικανότητας κάθε περιοχής. Επίσης, οι κάτοικοι της περιοχής πρέπει να αντιληφθούν την δυναμική οπου επικρατεί στην ιδέα της τοπικής επένδυσης στον τομέα της ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στις καθαρές μορφές ενέργειας. Μια τέτοια επένδυση μπορεί να επιφέρει πολλαπλά οφέλη και πρέπει να γίνει καλλιεργήσιμη από όλους. Χαρακτηριστικά ευκαιρία για ευρεία συμμετοχή και ανάπτυξη σε πολλούς τομείς, ενδυνάμωση της τοπικής οικονομίας, παραγωγή αποθεματικών για άλλες επενδύσεις σε κοινωνικές αναγκαίες δομές, εγγύηση σταθερής τιμής δίχως εξωτερικούς παράγοντες. (Carros et. al., 2013).

Ύπαρξη τάσης διεξαγωγής αρκετών μελετών με θέληση την επίτευξη του εκάστοτε σκοπού σε διεθνές εύρος, μέσω της στήριξης των κρατών από δημοσκοπήσεις σχετικά με το συγκεκριμένο είδος τεχνολογίας .

Η προθυμία κάποιων ατόμων να στρέψουν το ενδιαφέρον τους στην συμβολή χρημάτων για ανάπτυξη έργων στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαμέσου της κοινωνικής υποστήριξης για την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, αποδεικνύει την ευαισθητοποίηση αρκετής μερίδας ανθρώπων για καλύτερη ποιότητα ζωής στην υδρόγειο . Έτσι, επιτυγχάνεται μία αυξητική πορεία στην θέληση ακόμη περισσότερων να δαπανήσουν μεγαλύτερα ποσά σε ΑΠΕ και σε ενεργειακή αποδοτικότητα που αποδεικνύεται μέσω επιστημονικής έρευνας (Zarnikau 2003).

Σε γενικότερο πλαίσιο, κρίνονται λύσεις επιτακτικής ανάγκης, μέσω των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με απώτερο στόχο τη δραστική αντιμετώπιση αλλαγής του κλίματος. Μία εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, αποτελεί η ανάπτυξη και η εγκατάσταση τεχνολογιών βιοαερίου με την αξιοποίηση αγροτικών καλλιεργειών στην Ευρώπη καθώς επιλύει προβλήματα της αγροτικής οικονομίας και ταυτόχρονα προσφέρει περιβαλλοντικά φιλική ενέργεια ως Α.Π.Ε. Η συνεισφορά του βιοαερίου στην αειφόρο αγροτική, γεωργική και οικονομική ανάπτυξη, καθώς και στην περιβαλλοντική προστασία είναι πολύ σημαντική καθώς το βιοαέριο αναγνωρίζεται ως ζωτικός ενεργειακός πόρος. Στην συμφωνία του Παρισιού τέθηκαν κάποιοι στόχοι , η επίτευξη των οποίων θα οδηγήσει σε ένα πράσινο μέλλον δίχως εκπομπές ρύπων ως το 2050 , που θα συμβάλει θετικά ως προς την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Kindy, 2021).

1.4 Αξιοποίηση της γεωθερμίας για την παραγωγή θερμότητας

Το χειμώνα έχει παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία του εδάφους παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε σχέση με την ατμοσφαιρική ενώ το καλοκαίρι εμφανίζει χαμηλότερες τιμές. Ασκείται επιρροή στην θερμοκρασία του εδάφους από αρκετούς παράγοντες αναλογικά με το βάθος στο οποίο βρισκόμαστε. Το έδαφος διαφοροποιείται κυρίως σε τρία στρώματα (Poriel et al., 2001):

- Το αβαθές, όπου οι εποχιακές καιρικές αλλαγές ασκούν κυρίως επιρροή.
- Το βαθύτερο, όπου οι καιρικές συνθήκες δεν λαμβάνουν μεταβαλλόμενες τιμές με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του να μην παρουσιάζει προσauξήσεις.
- Το επιφανειακό, όπου σε καθημερινή βάση γίνεται αντιληπτή αλλαγή της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρά από επιρροή ηλιακής ακτινοβολίας, αέρα και βροχής.

Το πεδίο βάθους κάθε στρώματος σχετίζεται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αλλά κυρίως με την μορφολογία του εδάφους. Οι τοπικές θερμοκρασίες του εδάφους εξαρτώνται από τις ιδιότητες του χώματος, την κλίση, την κάλυψη εδάφους, και από το κλίμα. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μειώνεται με το βάθος και γίνεται αμελητέα κάτω από 15 μέτρα.

Ανεξάντλητη πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί η γεωθερμική ενέργεια ως μορφή ενεργείας, αυτό επιτυγχάνεται καθώς η γεωθερμική ενέργεια όπου βρίσκεται στο εσωτερικό της γης είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας σε βαθιά γεωθερμική στις υψηλότερες θερμοκρασίες και αβαθή γεωθερμική για χαμηλές θερμοκρασίες. Η αποθηκευμένη ενέργεια υπό μορφή θερμότητας η οποία εντοπίζεται κάτω από τον στερεό φλοιό της γης χαρακτηρίζεται ως αβαθής γεωθερμική ενέργεια. Η απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης σε γεωγραφικά πλάτη υπό χαμηλού βάθους παραμένει αμετάβλητη (10-18ο C), για όλο το έτος. Γι' αυτό η ενέργεια αυτή προέρχεται από την ακτινοβολία του ηλίου. Προσεγγιστικά το ποσοστό το οποίο φτάνει στην Γη ανέρχεται στο 50%. Ο εντοπισμός της γεωθερμικής ενέργειας απλώνεται σε ολόκληρο τον κόσμο και βρίσκει χρησιμότητα στην παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Υπάρχει δυναμική αξιοποίησης για ενεργειακή τροφοδότηση διαφορών μονάδων αφαλάτωσης. Οι γεωθερμικές δεξαμενές παράγουν ατμό και ζεστό νερό. Στην γεωθερμία η θερμότητα αποδίδει φθίνουσα τιμή από τις συμβατικές πηγές και η μετατροπή της σε ωφέλιμο έργο γίνεται με ευκολία με αποτέλεσμα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια (Schoff, 2011). Στο βάθος της τρίτης θέσης της κατάταξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας κάθεται η γεωθερμική παραγωγή ενέργειας. Πίσω τους βρίσκονται τα υδροηλεκτρικά η βιομάζα.

Την πρωτοπορία στην γεωθερμική ενέργεια ως κράτος την έχει η Ισλανδία καθώς στην προκειμένη περίπτωση η χώρα αυτή εξυπηρετεί το 86% της θέρμανσής χώρων και το 16% της ηλεκτροδότησης μέσω γεωθερμίας. Επιπλέον, σήμερα στην Ισλανδία χρησιμοποιούνται μόνο ανανεώσιμες μορφές ενέργειας κατατάσσοντάς την στις δεκαπέντε κορυφαίες χώρες στην παραγωγικότητα ηλεκτρικού ρεύματος από γεωθερμικούς πόρους. Αρκετό ενδιαφέρον τροφής για σκέψη βρίσκει μία επιστημονική ερευνα η οποία κάνει αναφορά στην παγκόσμια άντληση ενέργειας και δείχνει ότι χωροταξικά 100 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου ημερησίως, η θερμική ενέργεια της γης σε βάθος 10 χιλιομέτρων θα μπορούσε θεωρητικά να καλύψει το σύνολο των αναγκών της ανθρωπότητας για αρκετά εκατομμύρια χρόνια (Wright, 1998).

Στην υφήλιο η θερμική ενέργεια της γης είναι συγκεντρωμένη σε διάφορα επίπεδα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην δημιουργία μίας ενεργειακής πηγής αρκετά εκμεταλλεύσιμης, αναπτύσσοντας γεωθερμικά συστήματα. Τα θερμικά χαρακτηριστικά τους ταξινομούνται αναλόγως την τιμή των ενθαλπιών τους (υψηλής, μεσαίας, χαμηλής). Υψηλής ενθαλπίας αποσκοπούν σε παραγόμενη ενέργεια ηλεκτρισμού, τα μέσης ενθαλπίας παρέχονται σε κατοικημένες περιοχές για άμεση θέρμανση και στην βιομηχανία για διάφορες κατεργασίες, ενώ τα χαμηλής ενθαλπίας για ψύξη, θέρμανση κτηριακών δομών μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας, (θερμοκρασίες κάτω των 100° C) θεωρείται εύκολος τρόπος θέρμανσης για την θέρμανση θερμοκηπίων.

Στην γεωργία καθώς και στις οικίες παρουσιάζεται σημαντική ανάγκη εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας μέσω συστημάτων. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας.

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις των χρηστών για θέρμανση και ψύξη αντικαθιστώντας επαρκώς τους καυστήρες και το πετρέλαιο ως καύσιμο καθώς και τα κλιματιστικά. Τα οφέλη όπου μπορεί κάποιος να διακρίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα είναι οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά. Στα περιβαλλοντολογικά οφέλη αντιστοιχεί η χαμηλή εκπομπή καυσαερίων καθώς αυτό συνεπάγεται με ελάττωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συγκριτικά με όλα τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Υστερά, σε ορισμένα έθνη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συμβάλει στην εξυπηρέτηση ενός σημαντικού ποσοστού σχετικά με τις ανάγκες τους. Ακόμη, μεγάλος αριθμός κρατών (εβδομήντα δύο κράτη) εφαρμόζουν άμεσα γεωθερμικές διατάξεις για θέρμανση. Πρωτοπόρος σε όλο αυτό φαίνεται να είναι η Κίνα. Συνεπώς, η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής παγκοσμίως διαμέσου γεωθερμικών βελτιωμένων εφαρμογών – τεχνολογιών είναι αύξουσα και ακόμα περισσότερες χώρες εξέφρασαν την επιθυμία τους για χρήση αυτών σε μεγαλύτερο βαθμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Τεχνολογίες και εφαρμογές γεωθερμίας

Στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται αναφορά σε ένα κρίσιμο θέμα που απασχολεί τις σύγχρονες κοινότητες οπου αφορά τεχνολογίες και εφαρμογές γεωθερμίας στα γεωθερμικά πεδία που θα αξιοποιηθούν. Εν συνεχεία γίνονται ταξινομήσεις ανάλογα με την ενθαλπία και το εύρος των θερμοκρασιών.

Στο δεύτερο κομμάτι, θα μελετηθεί διεξοδικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωθερμικών πηγών. Κύριο πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικές διαμορφώσεις των εγκαταστάσεων.

Στο τρίτο και τελικό σκέλος, θα γίνει μελέτη αναφορικά με την παραγωγή τηλεθέρμανσης από τεχνολογίες και εφαρμογές γεωθερμίας. Αντίστοιχα, θα γίνει παρουσίαση ορισμένων παραδειγμάτων των εφαρμογών αυτών.

2.1 Γεωθερμικά πεδία

Μεγάλη αξία κατέχουν οι περιοχές της γης στις οποίες διαπιστώνεται έντονη παρουσία γεωθερμικών ρευστών, (αέρια, νερό, μίγμα νερού και αερίων) σε ικανοποιητική ποσότητα, βάθος και θερμοκρασία αποκαλούνται γεωθερμικά πεδία.

Παράλληλα, ταξινομούνται ακολούθως αναλογικά με το θερμοκρασιακό επίπεδο στο οποίο βρίσκονται (Μαρούδης, 2014).

- Χαμηλής ενθαλπίας. Εύρος θερμοκρασιών από 25°C μέχρι 80°C. Αξιοποιούνται για τη θέρμανση θερμοκηπίων και διάφορων χώρων, για την παραγωγή γλυκού νερού και στις ιχθυοκαλλιέργειες.
- Μέσης ενθαλπίας. Μέγεθος θερμοκρασιών από 80°C μέχρι 150 °C. Εκμεταλλεύσιμες γίνονται για τη ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων. Βρίσκουν χρησιμότητα σε περιπτώσεις τέτοιες με σκοπό την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, (π.χ με κλειστό κύκλωμα φρέον) το οποίο έχει μικρό βαθμό σημείου ζέσεως.
- Υψηλής ενθαλπίας, για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C. Συχνά αξιοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, υπάρχει θεωρία βασισμένη πώς η ενθαλπία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας και εκφράζει την περιεχόμενη θερμική ενέργεια των ρευστών, αποδίδοντας ένα εμπειριστατωμένο πλαίσιο της ενεργειακής αξίας τους. Κυρίως ευνοϊκά στοιχεία περιβάλλουν την Ελλάδα από γεωθερμικής πλευράς διότι στις περιφέρειές της βρέθηκαν μέσης και υψηλής ενθαλπίας πεδία κάποιες από αυτές είναι στην Μακεδονία, στην Θράκη και στο Αιγαίο.

Στον ίδιο χρόνο, συμβαίνει η τεχνολογία για την εύρεση-την εξόρυξη των πετρελαϊκών κοιτασμάτων που έχουν αναπτυχθεί και βρίσκει χαρακτηρισμό παρόμοιο με αυτής, η οποία στοχεύει στην εύρεση και η εξαγωγή της υδροθερμικής γεωθερμίας.

Επιπρόσθετα, τα εργαλεία που χρειάζονται σε αυτή την τεχνολογία αποτελούν έναν συνδυασμό τόσο των εργαστηριακών και των αναλυτικών μεθόδων, όσο των πειραμάτων του πεδίου. Καθίσταται επιτακτική ανάγκη η ανάπτυξη μίας γεωθερμικής πηγής στην οποία απαιτείται ο εντοπισμός και η εξακρίβωση της ύπαρξης ενός οικονομικά αξιοποιήσιμου κοιτάσματος τέτοιου ώστε ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας, του όγκου και του βάθους του να είναι εύκολα μετρήσιμος. Στο επόμενο στάδιο εφαρμόζεται μία δοκιμαστική γεώτρηση και η παραγωγή ώστε να επιτευχθεί ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του κοιτάσματος.

Αμέσως μετά , πραγματοποιείται μοντελοποίηση μέσω ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου τέτοιου ώστε να υποδεικνύεται η γεωμετρία και οι φυσικές ιδιότητες του κοιτάσματος ως κριτήριο επιλογής βάσει ανάλυσης των περιμετρικών μεταβολών των ρευστών και των στρωμάτων του. Άρα, μπορεί να γίνει μία μακροχρόνια πρόβλεψη συμπεριφοράς του κοιτάσματος η οποία είναι ευκολά μετρήσιμη καθώς στο τέλος εμπεριέχεται η δημιουργία αλληπάλληλων γεωτρήσεων με στόχο της εισαγωγής του αλμόλοιπου καθώς και την άντληση του κοιτάσματος.



Εικόνα 2.1: Γεωθερμικά πεδία στον Ελλαδικό χώρο.

2.2 Γεωθερμία και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

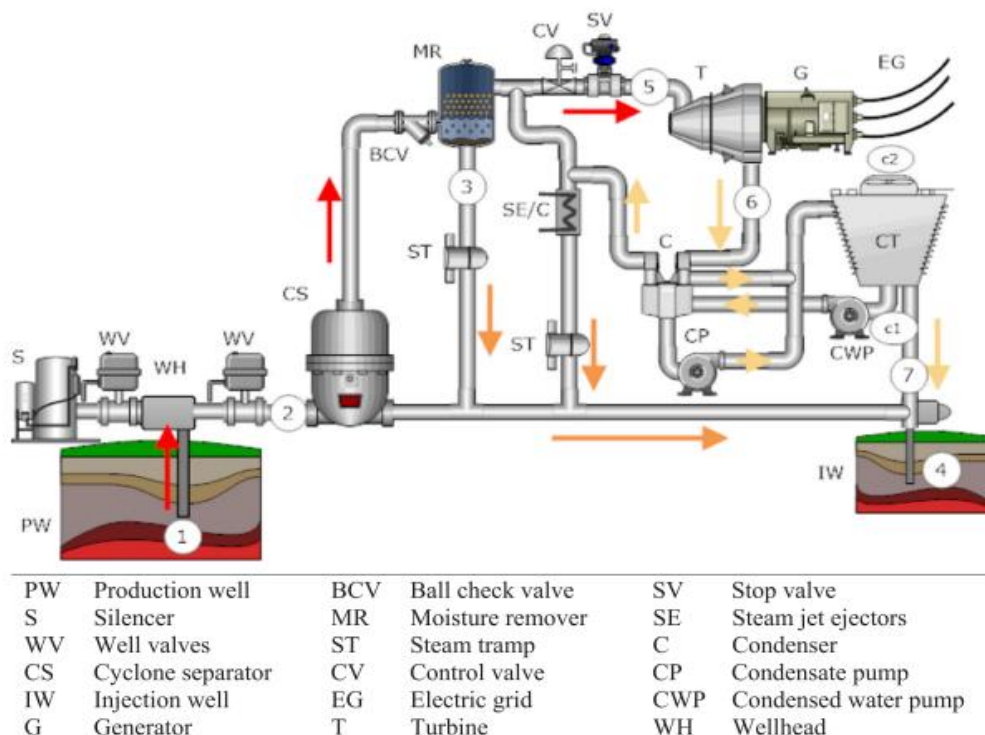
Η γεωθερμική ενέργεια έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία εφαρμόζονται σε διάφορες διαμορφώσεις εγκαταστάσεων με στόχο την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, για άμεσα αποδιδόμενη θερμότητα βρίσκουν χρησιμότητα στην βιομηχανία και στις οικιακές χρήσεις ανεξαρτήτως των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Παρόλο που υπάρχουν ιδιαίτερες προκλήσεις σχετικά με την γεωθερμική ενέργεια σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η γεωθερμία αποδεικνύει σημαντικές δυνατότητες μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς και των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων που πλήττουν όλη την υδρόγειο για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. (Moya et al., 2018).

Εν παραλληλία, οι επιστήμονες ταξινόμησαν τα γεωθερμικά ρευστά σε δύο κατηγορίες βασισμένες στον ατμό, πρακτικά στα συστήματα που διαπιστώνεται έντονη κινητικότητα των ατμών και του ζεστού νερού με προσμίξεις ορυκτών, με αναγνωρισιμότητα ως άλμη (Zarrouk & Purnanto, 2015). Η μεταφορά γεωθερμικής ενέργειας μέσω των συγκεκριμένων ρευστών καθώς και η αποθήκευσή της υπογείως (κάτω από την επιφάνεια), στοχεύει στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωτρήσεως που έχουν διανοίξει στην εντοπισμένη γεωθερμική δεξαμενή της υψηλής θερμοκρασίας (Eslami-Nejad et al., 2014). Η δεξαμενή αυτή είναι εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της, τα βάθη των πηγαδιών της παραγωγής, που κυμαίνονται από 300 μέτρα έως και περισσότερα από 3000 μέτρα.

Στους υδροθερμικούς και γεωθερμικούς ταμειυτήρες υπό πίεση εμπεριέχονται θερμορευστά σε πορώδες πέτρωμα. Διαφορετικές διακυμάνσεις στην δυναμικότητα του συστήματος (ισχύς) επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της γεωθερμικής ροής η οποία είναι άρρηκτά συνδεδεμένη και ανάλογη της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η γεωθερμική ροή υπέστη μετατροπή σε ηλεκτρικό έργο. (Moya et al., 2018).

Ο ατμοηλεκτρικός σταθμός single-flash είναι τυπικά μια μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας οπού υπέστη διαμόρφωση, μέσω των γεωθερμικών πηγαδιών αναπαραγωγής μείγματος άλμης και ατμού. Στην συνέχεια γίνεται διαχωρισμός του μείγματος σε δύο διακριτές φάσεις μέσω ενός δοχείου πίεσης κυλινδρικής φύσεως σε υγρό και ατμό λόγω της αυξημένης τιμής αποκλίσεως στην πυκνότητά τους. Η απαίτηση για την διεξαγωγή μίας μονάδας γεωθερμικής ενέργειας single -flash 30 MW βρίσκεται στην κατανομή πέντε ως έξι οδών παραγωγής και δύο έως τριών φρεατίων επανέγχυσης σε όλη την γεωθερμική δεξαμενή. Η συλλογή και η μεταφορά του μείγματος από τα φρεάτια των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων σωληνώσεων αν και η πτώση της πίεσης του ατμού έχει ως συνέπεια την τριβή του σωλήνα και αυτό το γεγονός είναι αρκετά βαρυσήμαντο για τα συστήματα συγκέντρωσης. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη απαίτησης εμπειρικών συσχετισμών για αναλυτική πρόβλεψη της απώλειας πίεσης λόγω αξιοπιστίας και πολυπλοκότητας. Θέτοντας ως κριτήριο την διάμετρο του σωλήνα, το μήκος, τις παραμέτρους του καθώς και την πυκνότητα, ταχύτητα της ροής μάζας του ατμού. Εν κατακλείδι, οι συγκεκριμένες μεταβλητές ασκούν επιρροή όχι μόνο στην αποδοτικότητα της μετατρεπόμενης ενέργειας στο σύστημα αλλά και στις δαπάνες του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Όταν ο ατμός και το υγρό διαχωριστούν, το προϊόν που προκύπτει (ατμός, γενικά σε ποσοστό 99,995% ξηρός) οδεύει προς τον στρόβιλο και έπειτα από κει και πέρα στην γεννήτρια που παράγεται ηλεκτρισμός. Μάλιστα, γίνεται η επιλογή μίας διαδικασίας "single-flash στην περίπτωση που το γεωρευστό εμφανίζει θερμοκρασία μεγαλύτερη από 260 °C, καταλήγοντας έτσι σε συντελεστή θερμοχωρητικότητας 95%-100%" (Moya et al., 2018).

Στα Σχήματα 2.1 και 2.2, απεικονίζονται ο γεωθερμικός κύκλος "single-flash", και το σχηματικό διάγραμμα της μετατροπής ενέργειας σε ηλεκτρική.



Σχήμα 2.1: Κύκλος γεωθερμικής ισχύος "single-flash" (DiPippo, 2012).

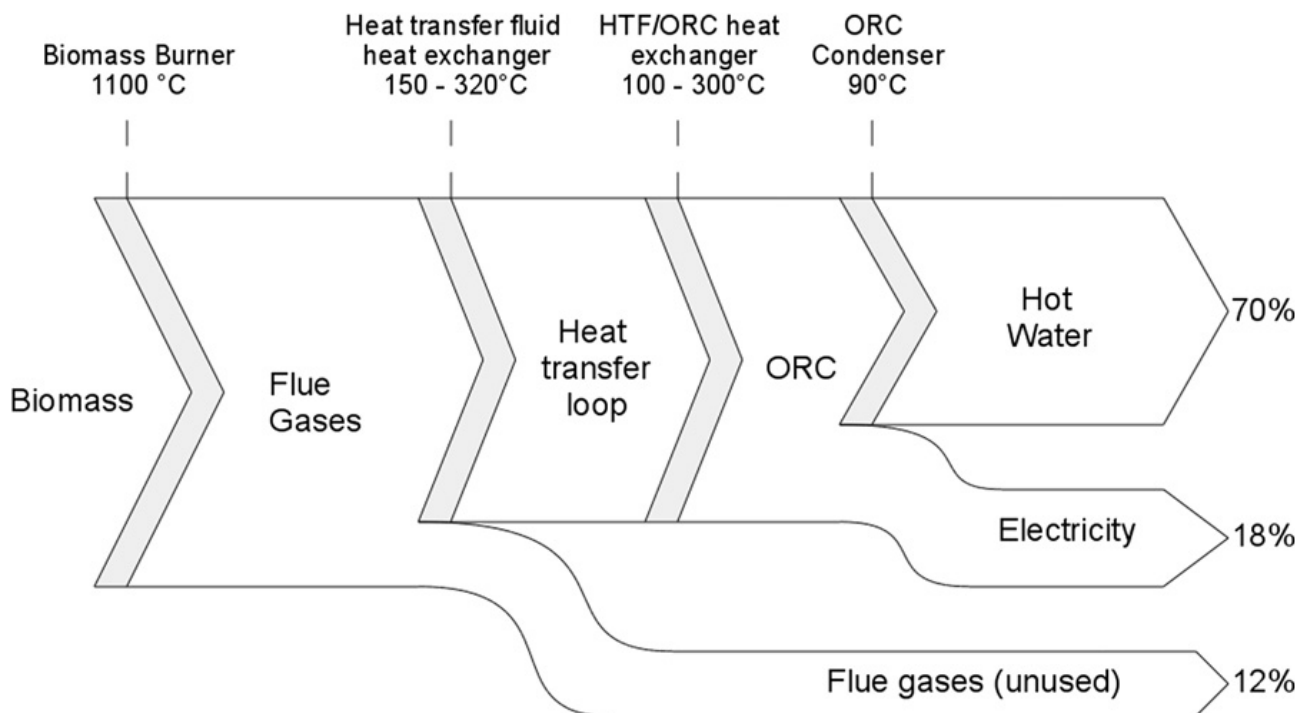


Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση των οκτώ σταδίων γεωθερμικής ανάπτυξης.

Την ίδια στιγμή, στις διάφορες γεωργικές-βιομηχανικές διεργασίες, όπως είναι η βιομηχανία ξύλου ή τα γεωργικά απόβλητα, είναι διαθέσιμη και χρησιμοποιείται η βιομάζα. Με τη καύση της βιομάζας απελευθερώνεται θερμική ενέργεια η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω του θερμοδυναμικού κύκλου. Ακόμη, ισχύει το γεγονός ότι το κόστος της βιομάζας είναι αρκετά χαμηλότερο από το κόστος των ορυκτών καυσίμων. Για το λόγο αυτό η επίτευξη καθαρής καύσης βιομάζας θεωρείται σημαντικότερο έργο από την κατασκευή και χρήση των κλασικών λεβήτων. Επειδή στις αποκεντρωμένες μονάδες το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ανταγωνιστικοί μονάδες αυτές πολλές φορές βασίζονται στο συνδυασμό παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη των κερδών τους. Με βάση τα παραπάνω, για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής απόδοσης της μετατροπής της ενέργειας, οι μονάδες ΣΗΘ βιομάζας επιδιώκουν τη ζήτηση της θερμότητας και όχι της ηλεκτρικής ενέργειας (Moro et al., 2008).

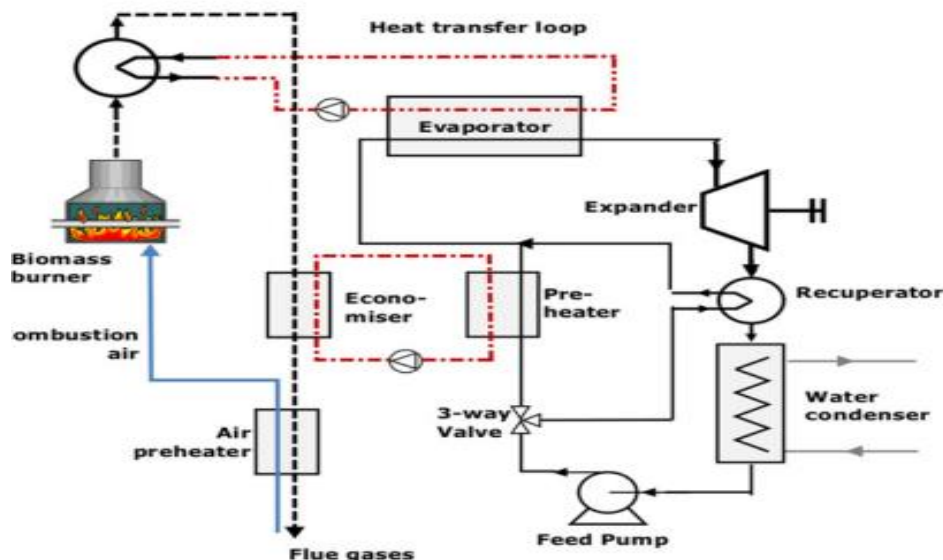
Ταυτόχρονα, οι μονάδες ΣΗΘ βιομάζας περιορίζονται τις περισσότερες φορές σε θερμική ισχύ της τάξης των 6 MW –10 MW, που αντιστοιχεί σε ηλεκτρική ισχύ μεγέθους 1 MW –2 MW. Εξαιρεση αποτελούν οι κλασικοί κύκλοι ατμού οι οποίοι αδυνατούν να αποδώσουν οικονομικά στην συγκεκριμένη κλίμακα ισχύος. Παρακάτω, γίνεται αναπαράσταση απλοποιημένων διαγραμμάτων σε τέτοια συστήματα συμπαραγωγής όπου αποσκοπούν στην μεταφορά θερμότητας από καύση καυσαερίων στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες θερμότητας. Η κύμανση των θερμοκρασιών υλοποίησης είναι μεταξύ 150 και 320°C. Σειρά έχει η κατεύθυνση του ρευστού μεταφοράς στον βρόχο του οργανικού κύκλου (ORC) ώστε να γίνει εξάτμιση του εργαζόμενου υγρού σε ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία από 300 °C.

Έπειτα, επιτυγχάνεται διαστολή του εξεταμισμένου αυτού ρευστού το οποίο εισέρχεται μέσω ενός ανακτητή στον ανεμιστήρα με στόχο την προθέρμανση του υγρού και σε τελική φάση την συμπίκνωσή του σε θερμοκρασία 90°C. Ο συμπυκνωτής βρίσκει χρήση για την παραγωγή ζεστού νερού. Επιπλέον, το σύστημα εμφανίζει τελική απόδοση κοντά στο 88% η οποία φαίνεται να παρουσιάζει πολύ υψηλότερη τιμή από την αντίστοιχη ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής όπου χάνεται το μεγαλύτερο μέρος τη υπολειπόμενης θερμότητας και συνάμα όπως απεικονίζεται στο σχήμα Σχήματος 2.3 είναι περιορισμένη η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος ΣΗΘ, σε ποσοστό της τάξης του 18% (Quoilin et al., 2013).



Σχήμα 2.3: Ροή ενέργειας ως συνάρτηση των θερμοκρασιών μετατροπής σε ένα σύστημα CHP ORC.

Τα αέρια πρέπει να ψύχονται στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία, με απώτερο σκοπό να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας στα καυσαέρια. Υπάρχουν δύο βρόχοι μεταφοράς θερμότητας προς αξιοποίηση, για την επίτευξη του παραπάνω στόχου: ο βρόχος της χαμηλής θερμοκρασίας και ο αντίστοιχος της υψηλής, ο οποίος εγκαθίσταται στα καυσαέρια με τη μείωση της θερμοκρασίας εξόδου τους, όπως αναπαρίστανται στο Σχήμα 2.4 (Quoilin et al., 2013).



Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας συστήματος ORC CHP βιομάζας.

Παράλληλα, η αεριοποίηση βιομάζας αποτελεί την κύρια ανταγωνιστική τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω στερεών βιοκαυσίμων. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία, η βιομάζα μετατρέπεται σε συνθετικό αέριο που αποτελείται κυρίως από H_2 , CO , CO_2 και CH_4 . Για να εξαλειφθούν τα στερεά σωματίδια το συνθετικό αέριο φιλτράρεται και τελικά καίγεται σε τουρμπίνα αερίου ή σε κινητήρα εσωτερικής καύσης. στις ΣΗΘ βιομάζας διαπιστώνεται υψηλότερη λειτουργική ζημία και κόστους συντήρησης (περίπου στο 200%) καθώς και υψηλότερη επενδυτική δαπάνη (περίπου 75%) συγκριτικά με την τεχνολογία και κόστους των ORC αεριοποίησής. Η απόδοσή των ORC αεριοποίησής αρκετά υψηλή αναλογία ισχύος προς θερμότητα, η οποία έχει κερδοφορία (Rentizelas et al., 2009)

2.3 Γεωθερμία και τηλεθέρμανση

Αξίζει να σημειωθεί πως στο μεγαλύτερο μέρος της γης, με κανονική θερμοβαθμίδα, σε βάθος 2.000 μέτρων, η θερμοκρασία της γης ανέρχεται στους $80^{\circ}C$. Συνεπώς οι υδροφόροι που εντοπίζονται στο συγκεκριμένο βάθος είναι γεωθερμικές πηγές χαμηλής ενθαλπίας. Συνήθως απαιτείται η εφαρμογή των γεωτρήσεων μεγάλου βάθους, ανάλογα με το σκοπό τη χρήση τους, συνεπώς το κόστος της κατασκευής και της λειτουργίας τους χαρακτηρίζεται ως σχετικά μεγάλο. Παρ' όλα αυτά, οι συγκεκριμένοι τύπου γεωθερμικές πηγές, σε κάποια κράτη αξιοποιούνται σε αρκετά μεγάλο βαθμό (Lund et al., 2005).

Μάλιστα, οι ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές των ρευστών χαμηλής ενθαλπίας αποτελούν:

- ✓ Αγροτικές εφαρμογές.
- ✓ Άμεση θέρμανση χώρων.
- ✓ Αφαλάτωση θαλασσινού νερού.
- ✓ Υδατοκαλλιέργειες.
- ✓ Ιατρικές εφαρμογές και πισίνες.
- ✓ Βιομηχανικές εφαρμογές.

Ειδικότερα, η πιο διαδεδομένη μορφή χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας στα κράτη της Ευρώπης και η πιο αρχαιότερη χαρακτηρίζεται η άμεση θέρμανση χώρων. Αντιστοίχως, στις οικιακές χρήσεις εμπεριέχεται η παραγωγή ζεστού νερού ενώ η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής κρίνεται απλή. Η μεταβίβαση θερμότητας του γεωρευστού από μία ή περισσότερες γεωτρήσεις στο σύστημα θέρμανσης του ενεργειακού χρήστη γίνεται είτε άμεσα, είτε διαμέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας. Ακόμα, η χρήση αυτή πετυχαίνει όταν τα γεωθερμικά ρευστά αποκτούν μία θερμοκρασία της τάξεως άνω των 45°C. (Rafferty, 2001).

Οι ιατρικές χρήσεις αλλά και η θέρμανση πισινών αποτελούν μία ευρέως διαδομένη χρήση γεωθερμικής ενέργειας. Μάλιστα, υφίστανται αρκετές πόλεις λουτρών, όπου οι κάτοικοι και οι επισκέπτες αυτών εκμεταλλεύονται το γεωθερμικό ύδωρ για θεραπευτικούς σκοπούς συνδυαστικά με τις δράσεις του γεωθερμικού ύδωρ προς τον ανθρώπινο οργανισμό, εξαρτώμεθα από τα μεταλλικά στοιχεία του και την θερμοκρασία καθώς και του τρόπου εκμετάλλευσής τους. Ακόμη, οι ORC βιομάζες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη θερμότητα ως υποπροϊόν, τονίζοντας έτσι τη σημασία της τοπικής θερμότητας σε βιομηχανικές διαδικασίες (όπως η ξήρανση ξύλου) η θέρμανση χώρων (π.χ τηλεθέρμανση) (Chinesen et al., 2004).

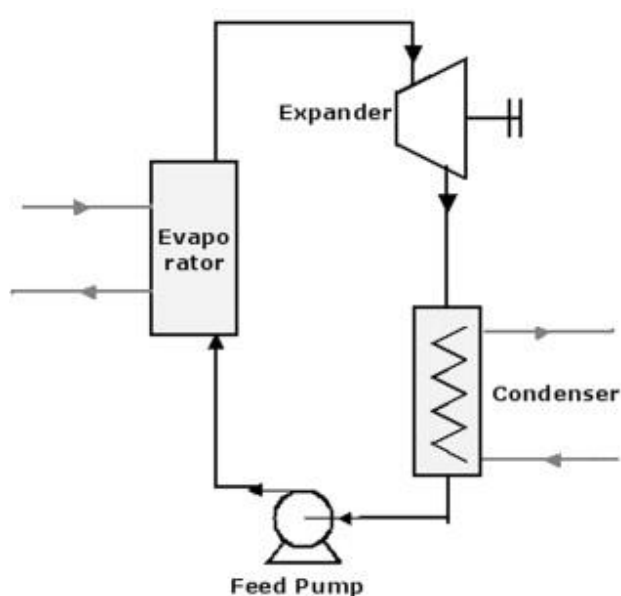
Ακολούθως, στην καθημερινότητα μας εντοπίζονται αρκετά παραδείγματα εφαρμογών της γεωθερμίας με σκοπό την τηλεθέρμανση. Πρώτα απ' όλα, στα Λουτρά της Τραϊανούπολης υπάρχουν ξενώνες οι οποίοι διαθέτουν σύστημα που θερμαίνει τέσσερα κτήρια από γεωθερμική γεώτρηση παραγωγής, ποσού κατά προσέγγιση 60 m³/h ζεστού νερού, σε θερμοκρασιακή τάξη 52 °C, διαμέσου εναλλάκτη θερμότητας. Συγκεκριμένα, σε ένα κλειστό κύκλωμα τηλεθέρμανσης των σπιτιών σε πρώτο μέρος μεταδίδεται θερμότητα μέσω του γεωθερμικού ύδατος. Εν συνέχεια, πραγματοποιείται διοχέτευση στους υδροφόρους ορίζοντες όπου προήλθε από θερμοκρασιακή τιμή των 37°C μέσω της γεώτρησης επανά-εισαγωγής. Μέσω των υπόγειων σωλήνων πολυπροπυλενίου επιτυγχάνεται η μεταπήδηση θερμικής ενέργειας από κτήριο σε κτήριο. Επίσης, οι ξενώνες παρέχουν αυτόνομο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης του οποίου η λειτουργικότητα του υφίστανται για εύρους θερμοκρασιών από 30°C έως 40 °C. Αντίστοιχα, πραγματοποιείται η προθέρμανση του ζεστού νερού χρήσης, ενώ η ολική θερμική ισχύς του συστήματος αναλογεί σε 1050 kW (Mendrinis et al, 2002).

Τα Λουτρά του Λαγκαδά αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα τηλεθέρμανσης, με γεωθερμική χρήση, καθώς εντοπίζονται σημαντικές ποσότητες υπόγειου νερού, σε βάθος από 100 μέχρι 200 μέτρα, με θερμοκρασιακό εύρος από 22°C μέχρι 40 °C. Οι υδρογεωτρήσεις οι οποίες ευρίσκονται στην περιοχή των Λουτρών του Λαγκαδά αξιοποιούν νερό της τάξης 45-90 m³/h, η κάθε μία με άντληση από παραγωγική σωλήνωση μεγέθους οκτώ ιντσών. Επομένως, χρησιμοποιώντας υδρόψυκτες αντλίες θερμότητας το γεωθερμικό πεδίο των Λουτρών αξιοποιείται για τη τηλεθέρμανση των πλησιέστερων δημοτικών κτιρίων στο Λαγκαδά και του ξενοδοχείου των Λουτρών. Μάλιστα παρατηρείται υψηλότερος βαθμός ενεργειακής απόδοσης λειτουργίας των αντλιών θερμότητας λόγω μικρών παροχών και σχετικά υψηλής θερμοκρασίας του νερού των Λουτρών σε σύγκριση με την αντίστοιχη άλλων υπόγειων υδάτων. (Mendrinou et al, 2002).

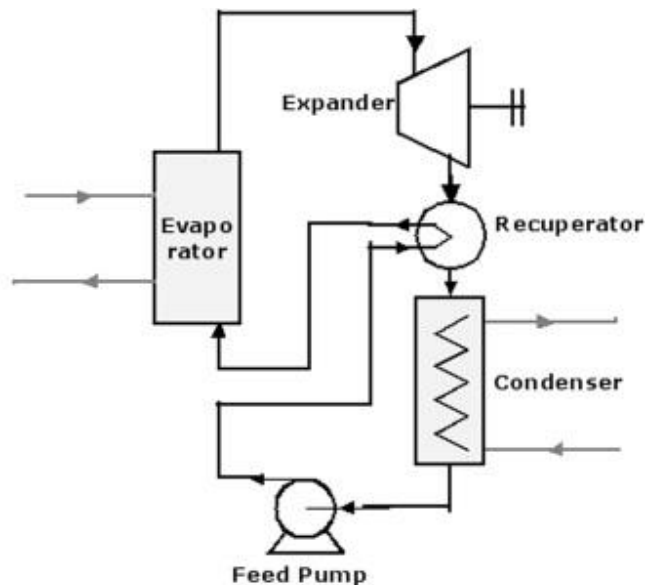
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Τεχνοοικονομική ανάλυση κύκλου Rankine

Ο κύκλος Rankine ατμού, σε ό,τι αφορά τη λειτουργία του στηρίζεται στην εξάτμιση ενός συγκεκριμένου υγρού. Το υγρό εξατμίζεται σε αέριο που βρίσκεται σε κατάσταση υψηλής πίεσης, το οποίο με τη σειρά του μεταβαίνει και σε άλλη φάση χαμηλότερης πίεσης. Συνολικά έτσι, το αέριο θα απελευθερώσει και θερμότητα, αλλά κυρίως και (μηχανικό) έργο, που είναι πολύ χρήσιμο για διάφορες εφαρμογές. Η τελευταία φάση του κύκλου περιέχει ουσιαστικά συμπύκνωση στους ατμούς και τελικά, το προϊόν της διαδικασίας αυτής αντλείται στην υψηλή πίεση.

Ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) έχει το ίδιο όνομα με τον κύκλο Rankine ατμού (Rankine Vapor Cycle). Όμως, πέρα απ' αυτό, είναι στη βάση του ο ίδιος κύκλος, με μικρότερη διακύμανση και λιγότερο ευέλικτες συνθήκες σε ό,τι αφορά τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται. Η διάταξη του κύκλου ORC είναι απλούστερη σε σχέση με αυτή του κύκλου Rankine ατμού, καθώς δεν υπάρχει τύμπανο υδρατμών το οποίο να είναι συνδεδεμένο σε έναν λέβητα και ένας εναλλάκτης θερμότητας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκτέλεση τριών φάσεων εξάτμισης (προθέρμανση, εξάτμιση, αναθέρμανση). Οι παραλλαγές στην διάταξη του κύκλου ORC, σε σχέση με του κύκλου ατμού, είναι ότι στον κύκλο ατμού έχουμε αναθέρμανση και καταπόνηση του στροβίλου ενώ στον σχεδιασμό ενός ORC χρησιμοποιούμε έναν ανακομιστή ως προθερμαντήρα υγρού (αντί για αναθέρμανση) ανάμεσα στην θέση της αντλίας και του εκτονωτή. Αυτό μας επιτρέπει την μείωση του ποσού θερμότητας που χρειάζεται ώστε να εξατμιστεί το υγρό στον εξατμιστή. Στα Σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζεται η απλούστερη μορφή ενός ORC (Moya et al., 2018).



Σχήμα 3.1: Διάταξη οργανικού κύκλου Rankine χωρίς χρήση ανακτητή.

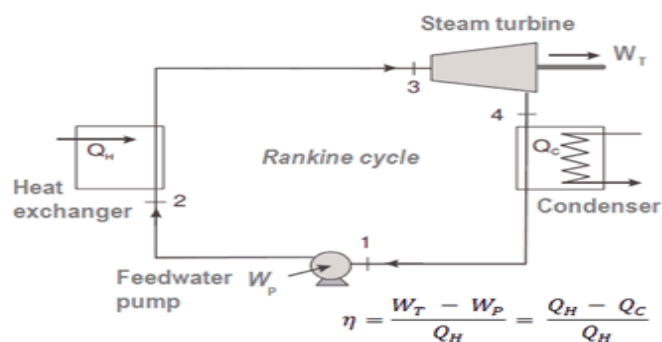
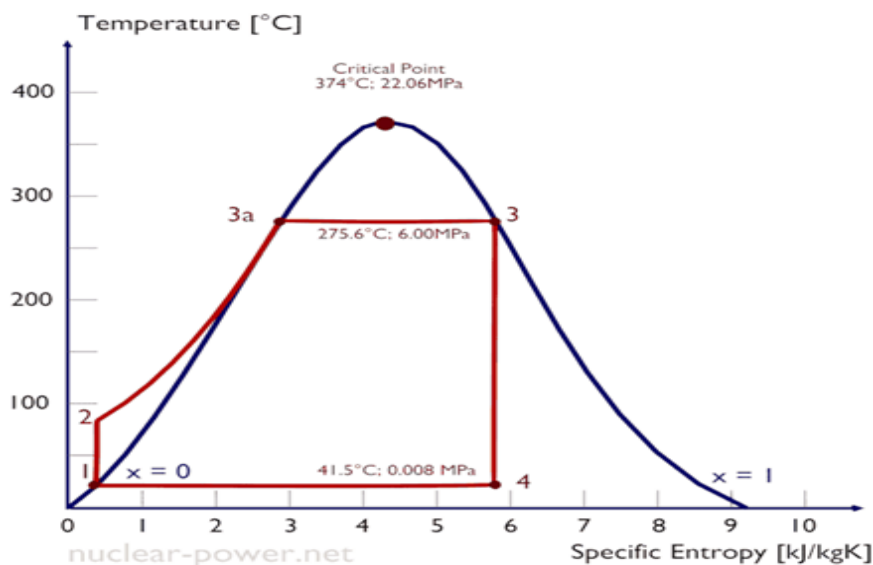


Σχήμα 3.2: Διάταξη οργανικού κύκλου Rankine με χρήση ανακτητή.

Τα ORC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα τον σκοπό και την διάταξή τους με ηλιακή ενέργεια, βιομάζα καθώς και με γεωθερμική ενέργεια με την οποία θα ασχοληθεί η παρούσα διπλωματική εργασία και πιο συγκεκριμένα με έναν μόνο τύπο ORC με την χρήση δυαδικού κύκλου.

Θα πραγματοποιηθεί μία σύντομη αναφορά στην διάταξη του Rankine Vapor Cycle καθώς και στην λειτουργία του. Στο διάγραμμα (T-S) του Σχήματος 3.3 παρατηρείται η καμπύλη του Rankine Vapor Cycle κατά την οποία σε κάθε στάδιο πραγματοποιούνται οι εξής μεταβολές:

- **Στάδιο 1:** Ισόθερμη εκτόνωση. Το νερό μεταβάλλεται ισόθερμα σε κορεσμένο ατμό διατηρώντας την θερμοκρασία και την πίεσή του σταθερή.
- **Στάδιο 2:** Αδιαβατική εκτόνωση. Στο στάδιο αυτό η εντροπία παραμένει σταθερή και ο κορεσμένος ατμός εκτονώνεται αδιαβατικά. Στην συγκεκριμένη μεταβολή δεν παράγεται θερμότητα και αυτό που συμβαίνει είναι η μετάβαση σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης.
- **Στάδιο 3:** Ισόθερμη Συμπύκνωση. Ο κορεσμένος ατμός συμπυκνώνεται ισοθερμικά διατηρώντας την θερμοκρασία και την πίεσή του και από την συμπύκνωση αυτή ο ατμός μεταβαίνει σε κατάσταση κορεσμένου νερού.
- **Στάδιο 4:** Ισόθερμη Εκτόνωση. Στο τελικό στάδιο ο υπέρθερμος ατμός στον στρόβιλο παράγει μηχανικό έργο και στην συνέχεια μία γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια Έπειτα ο ατμός αυτός αποδίδεται στον συμπιεστή μεταβαίνοντας σε κατάσταση κορεσμένου νερού κατά την είσοδό του στην τροφοδοτική αντλία.



Σχήμα 3.3: Διάταξη κύκλου ατμού. Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας.

Αναφορικά με την διάταξη του κύκλου Rankine ατμού παρακάτω θα παρουσιαστεί η χρήση κάθε οργάνου που λαμβάνει χώρα στον κύκλο:

- Τροφοδοτική αντλία: Εκεί το ρευστό συμπιέζεται και ταυτόχρονα μεταβαίνει σε υψηλή πίεση.
- Εναλλάκτης θερμότητας: Ο εναλλάκτης αλλάζει κατάσταση του κορεσμένου υγρού σε ατμό καθώς το συμπιεσμένο ρευστό θερμαίνεται και λαμβάνει μια τελική θερμοκρασία.
- Στρόβιλος: Ο ατμός αυτός εκτονώνεται στον στρόβιλο καθώς γίνεται υπέρθερμος ατμός και κατά την παραγωγή μηχανικού έργου δίνει κίνηση στην γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια.
- Συμπυκνωτής: Ο ατμός συμπυκνώνεται ώστε να βρίσκεται στην κατάλληλη κατάσταση για τοποθέτηση στην τροφοδοτική αντλία (κατάσταση κορεσμένου υγρού).

3.1 Γεωθερμικός δυαδικός κύκλος

Ο δυαδικός γεωθερμικός κύκλος χρησιμοποιεί ένα δεύτερο διαχωριστικό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία ένα ρευστό προθερμαίνεται και εξατμίζεται μέσω μεταφοράς θερμότητας, όπου επιτυγχάνεται μέσω της γεωθερμικής ροής θερμότητας. Οι δυαδικές διαμορφώσεις είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για γεωθερμικούς πόρους χαμηλής θερμοκρασίας (120-150°C). Έτσι επιτυγχάνεται η αποτροπή κλιμάκωσης και διάβρωσης του εργαζόμενου ρευστού λόγω αυτού του εύρους θερμοκρασιών (120-150° C). Η χρήση του δυαδικού κύκλου αναφορικά με τις θερμοκρασίες λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ των θερμοκρασιών 85°C – 170°C (Dickson et al., 2013).

Οι ανώτερες περιορισμένες θερμοκρασίες (120-150°C) εξαρτώνται από την θερμική σταθερότητα του εργαζόμενου ρευστού και οι χαμηλότερες εξ αυτών από τεχνικές, γεωοικονομικές και οικονομικές πτυχές.

Ο γεωθερμικός δυαδικός κύκλος αποτελείται από δύο κύκλους, τον κύριο και τον δευτερεύοντα κύκλο. Στον κύριο κύκλο παρατηρείται ένας κλειστός βρόχος ενός θερμοδυναμικού κύκλου Rankine όπου τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία είναι η αντλία, της οποίας η χρήση είναι η εκχύλιση της γεωθερμικής ροής θερμότητας στον σωλήνα παραγωγής (PW) περνώντας διαφορετικά συστατικά του κύριου κύκλου. Το γεωρευστό υφίσταται συνήθως αφαίρεση άμμου ώστε να αποτραπεί η διάβρωση στους σωλήνες. Στην συνέχεια το ρευστό ρέει στον αποστακτήρα, στην συνέχεια στον προθερμαντήρα και τέλος στην αντλία έκχυσης επανατοποθετώντας την γεωθερμική ροή θερμότητας μέσω του σωλήνα εγχύσεως (IW).

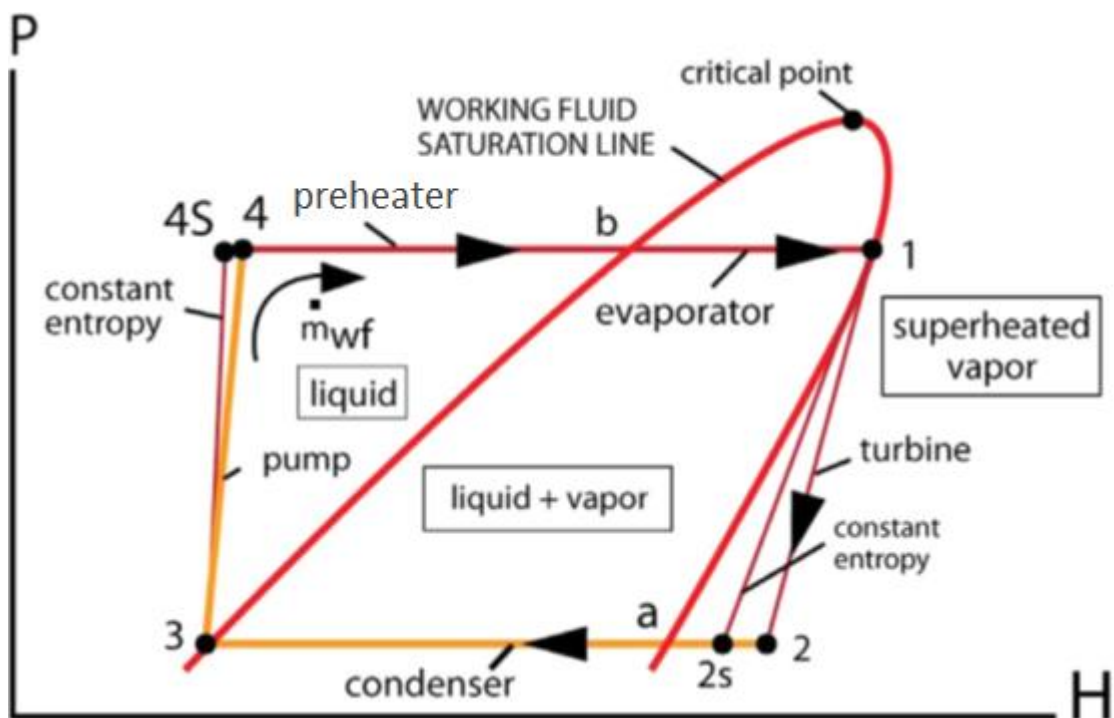
Στον δευτερεύοντα κύκλο, το εργαζόμενο ρευστό περιλαμβάνει δύο στάδια θέρμανσης-βρασμού: Αρχικά, το εργαζόμενο ρευστό φτάνει στο σημείο βρασμού του στον προθερμαντήρα και στην συνέχεια εμφανίζεται ως κορεσμένος ατμός στον στρόβιλο.

Μετάπειτα, ο κορεσμένος ατμός αυτός επεκτείνεται προς τον στρόβιλο, συμπυκνώνεται και επιστρέφει στον αποστακτήρα κλείνοντας έτσι τον βρόχο του συστήματος, ξεκινώντας την διαδικασία ξανά. Το εργαζόμενο ρευστό αυτού του κύκλου εμφανίζει χαμηλές θερμοκρασίες (75 - 180)°C και χαμηλό σημείου βρασμού για υψηλή πίεση ατμού (Moya et al., 2018).

Η θερμοδυναμική διαδικασία ξεκινά στο στάδιο 1 με το εργαζόμενο ρευστό ως κορεσμένο ατμό, στην συνέχεια εισέρχεται στον στρόβιλο, παράγοντας έργο. Στην συνέχεια η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας αυτό το παραγόμενο έργο.

Η πίεση και η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού, μειώνεται στο στάδιο 2 κατά την έξοδο του από τον στρόβιλο. Έπειτα εφόσον σταθεροποιηθεί η πίεση του, ο ατμός συμπυκνώνεται, μειώνοντας κι άλλο την θερμοκρασία του στο στάδιο 3. Η διαδικασία της ψύξης λαμβάνει χώρα στο στάδιο 3 και 4 χρησιμοποιώντας νερό χρήσης από αερόψυκτο πύργο ψύξης. Κατά το στάδιο της ψύξεως το εργαζόμενο ρευστό από ατμός αλλάζει κατάσταση σε κορεσμένο υγρό. Τέλος, το εργαζόμενο κορεσμένο υγρό αυτό εισέρχεται πίσω στον προθερμαντήρα (στάδιο 5) και στην συνέχεια στον αποστακτήρα (στάδιο 6) και έτσι το εργαζόμενο κορεσμένο υγρό αλλάζει κατάσταση σε κορεσμένο ατμό καθιστώντας το έτοιμο για επανατοποθέτηση. (στάδιο 1).

Στο Διάγραμμα 3.1 απεικονίζονται οι καταστάσεις του εργαζόμενου ρευστού σε διάφορα στάδια κατά την θερμοδυναμική διαδικασία.



Διάγραμμα 3.1: Καταστάσεις εργαζόμενου ρευστού κατά τη θερμοδυναμική διαδικασία.

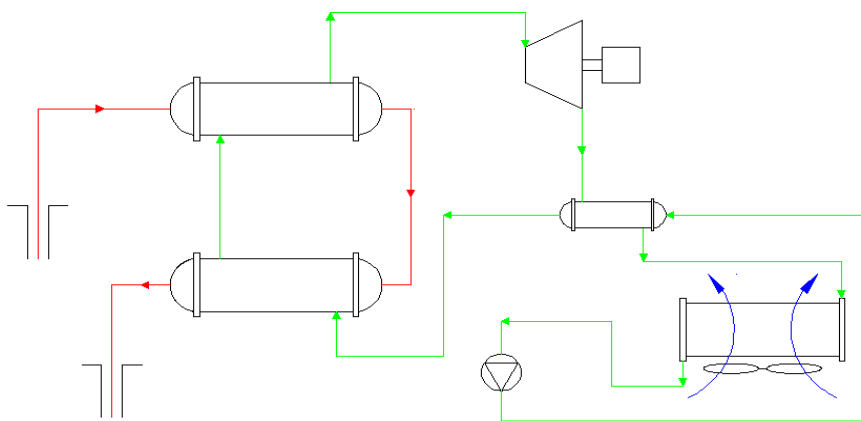
3.2 Παρατηρήσεις πάνω στην διάταξη

Συνήθως, στις κανονικές διατάξεις του Οργανικού Κύκλου Rankine υπάρχει ένας πύργος, που κάνει την ψύξη του ρευστού (working fluid). Ο πύργος αυτός συνήθως ονομάζεται πύργος ψύξης (cooling tower). Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιούμε εδώ υπάρχει αντί του πύργου ένας ανεμιστήρας, με τη βοήθεια του οποίου ψύχεται το εργαζόμενο ρευστό του κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, ο ανεμιστήρας μας βοηθάει να φέρουμε σε πέρας τα παρακάτω:

- Πρώτον, είναι μια λύση περισσότερο αποτελεσματική ως προς το κόστος. Αυτό ισχύει σε συστήματα μειωμένης θερμοκικής και ενεργειακής δυναμικότητας καθώς και μικρής κλίμακας.
- Δεύτερον, επιλύεται το ζήτημα ανεύρεσης νερού (λίμνη, ποτάμι, θάλασσα) στην περίπτωση χρήσης πύργου ψύξης.

Οι δύο αυτές παράμετροι ήταν πολύ σημαντικές σχετικά με την αντικατάσταση του συμβατικού πύργου από ανεμιστήρα, που επιτελεί την ίδια λειτουργία, δηλαδή ψύχει το εργαζόμενο ρευστό. (Moya et al., 2018).

3.3 Μοντελοποίηση



Σχήμα 3.4: Πειραματική διάταξη δυαδικού κύκλου.

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήσαμε ως διάταξη, το οποίο αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Σωλήνας παραγωγής ή σωλήνας εκχύλισης (extraction tube)
- Σωλήνας επιστροφής ή σωλήνας έκχυσης
- Αποστακτήρας: βασικό στοιχείο της διάταξής μας επίσης, αφού, όπως θα δούμε παρακάτω, πραγματοποιεί την μετατροπή του επιλεγμένου υγρού σε ατμό.
- Προθερμαντήρας: επιτελεί απλώς τη θέρμανση του υγρού
- Στρόβιλος: σε γενικές γραμμές, ο στρόβιλος επιτελεί την εκτόνωση του μέσου, δηλαδή του εργαζόμενου υγρού
- Αντλία: επιτελεί την τροφοδότηση του υγρού στον ανακομιστή.
- Ανακομιστής

- Ανεμιστήρας
- Γεννήτρια
- Εναλλάκτης θερμότητας

Στη συνέχεια, θα παραθέσουμε περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα στοιχεία της διάταξης, στη σειρά που δόθηκαν παραπάνω.

A) Ο σωλήνας παραγωγής - εκχύλισης: ο σωλήνας αυτός είναι αναγκαίος προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα με σωστό τρόπο. Μέσω αυτού πραγματοποιείται η αυξημένη άντληση του εργαζόμενου γεωρευστού. Αυτό γίνεται, επειδή με ένα τέτοιο σωλήνα υπάρχει μεγαλύτερος ρυθμός άντλησης του εργαζόμενου μέσου και αυτός είναι συμβατός με μια πιο υψηλή ταχύτητα ελάττωσης της στάθμης του εργαζόμενου μέσου. Τελικά, ο σωλήνας εκχύλισης θα οδηγήσει το γεωρευστό στον αποστακτήρα, όπου θα πραγματοποιηθεί το πρώτο ουσιαστικό βήμα του κύκλου μέσω της διάταξης που σχεδιάσαμε.

B) Αντίστοιχα, ο δεύτερος σωλήνας, δηλαδή ο σωλήνας επιστροφής ή σωλήνας έκχυσης. Πρόκειται για το σωλήνα που υλοποιεί μια λειτουργία επίσης βασική, δηλαδή την τοποθέτηση στον πρώτο σωλήνα παραγωγής, με σκοπό την επανέναρξη της διαδικασίας του κύκλου Rankine. Προηγείται της λειτουργίας του κύκλου Rankine η δίοδος του εργαζόμενου μέσου από εναλλάκτη θερμότητας ώστε να διασφαλιστεί η κατάλληλη κατάσταση του εργαζόμενου μέσου για επανατοποθέτηση.

Γ) Ο αποστακτήρας αφαιρεί τη θερμότητα του εργαζόμενου μέσου και μετατρέπει την κατάστασή του, με σκοπό την εισαγωγή του στο τμήμα της διάταξης όπου θα παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια, με τη βοήθεια τόσο του στροβίλου όσο και της γεννήτριας.

Δ) Ο ανακομιστής παραλαμβάνει το εργαζόμενο ρευστό από το στρόβιλο προκειμένου να του προσδώσει θερμότητα και με τη νέα αλλαγή της κατάστασής του σε κορεσμένο ατμό να τεθεί ξανά σε χρήση.

Ε) Ο προθερμαντήρας είναι ένα στοιχείο που παρεμβάλλεται μεταξύ του ανακομιστή και του αποστακτήρα. Σκοπός του προθερμαντήρα δεν είναι άλλος από την πρόσδοση επιπλέον θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο.

Ζ) Ο στρόβιλος στην διάταξη λειτουργεί ως καταλύτης στην όλη διαδικασία καθώς λόγω του υπέρθερμου ατμού παράγει μηχανικό έργο το οποίο αποδίδεται στην γεννήτρια (η γεννήτρια αποκτά κίνηση) η οποία με την σειρά της παράγει ηλεκτρική ενεργεία. Στο στάδιο αυτό εντός του στροβίλου, η περαιτέρω θέρμανση του κορεσμένου ατμού τον καθιστά υπέρθερμο ατμό και στη συνέχεια θα εισαχθεί στον ανακομιστή.

Η) Η γεννήτρια της διάταξης αυτής έχει ως αποκλειστικό σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή παράγεται από θερμική ενέργεια με τη βοήθεια του στροβίλου και του ατμού.

Θ) Ο ανεμιστήρας, όπως αναφέραμε, χρησιμοποιείται για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου. Ο σκοπός είναι η αλλαγή κατάστασης του μέσου, πριν αυτό εισαχθεί στον ανακομιστή εκ νέου.

Ι) Η αντλία επιτελεί τη λειτουργία της μεταφοράς του εργαζόμενου υγρού στον ανακτητή θερμότητας, κάτι που έπεται χρονικά της μετατροπής της κατάστασής του από τον ανεμιστήρα.

Κ) Με τη βοήθεια του εναλλάκτη θερμότητας έχουμε την αλλαγή της θερμοκρασίας του εργαζόμενου ρευστού, με στόχο να βρίσκεται στην σωστή κατάσταση για την επανεκκίνηση της διαδικασίας.

Η διάταξη που περιεγράφηκε παραπάνω εισήχθη στο πρόγραμμα EES32 μέσω προγραμματιστικού κώδικα. Το EES32 είναι ένα γενικό πρόγραμμα επίλυσης εξισώσεων που μπορεί να λύσει αριθμητικά χιλιάδες συζευγμένες μη γραμμικές αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις. Παράλληλα περιέχει την δυνατότητα σχεδιασμού διατάξεων καθώς και απεικόνισης διαγραμμάτων βάση αυτών. Επίσης παρέχεται η λειτουργία γραφής κώδικα για την εξαγωγή αυτών των αποτελεσμάτων. Τέλος υπάρχουν βιβλιοθήκες τις οποίες μπορεί κανείς εύκολα να χρησιμοποιήσει για να φτιάξει διάταξη όπως εκείνος επιθυμεί καθώς το πρόγραμμα παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει την δική του διάταξη. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της παραπάνω διάταξης.

Για την εισαγωγή της παραπάνω διάταξης λήφθηκαν υπόψη όλες οι επιμέρους συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν την ορθότητα της επιλογής του γεωρευστού. Στη βιβλιογραφία το θέμα αυτό είναι από αυτά στα οποία επικέντρωσαν την προσοχή τους οι ερευνητές. Συχνά τα ερευνητικά άρθρα απασχολούνται με ζεύγη γεωρευστών, τα οποία συγκρίνονται στη βάση του πόσο έργο απελευθερώνουν από την απορροφημένη θερμότητά τους, δηλαδή τη θερμοδυναμική τους απόδοση. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη το είδος του (θερμοδυναμικού ή οργανικού κ.λπ.) κύκλου που θα χρησιμοποιήσουν οι διατάξεις.

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε μια προεργασία με στόχο την επίτευξη όσο τον δυνατόν μεγαλύτερης θερμοδυναμικής απόδοσης που αφορά τα διάφορα εργαζόμενα ρευστά, ώστε να επιλεγεί το πιο κατάλληλο. Τα μέσα αυτά δίνονται αμέσως παρακάτω:

- Προπάνιο
- R134a
- Ισοβουτάνιο
- R245fa
- N -βουτάνιο

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε κάποια από τα σπουδαιότερα κριτήρια που υπαγορεύουν τη σωστή επιλογή του εργαζόμενου μέσου:

- Βαθμός απόδοσης διάταξης: ο βαθμός απόδοσης, όπως ορίζεται στη βάση του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, ή, πιο απλά, η θερμοδυναμική απόδοση είναι κορυφαίο κριτήριο, διότι το ζητούμενο είναι η απόκτηση όσο το δυνατόν υψηλότερης παραγωγής ενέργειας και μάλιστα, ισχύς στην έξοδο του συστήματος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Με τη σειρά του, ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από άλλους παράγοντες: την κρίσιμη κατάσταση ή κρίσιμο σημείο, δηλαδή το σημείο θερμοκρασίας και πίεσης όπου το ρευστό και οι ατμοί του συνυπάρχουν, το μέγεθος της πυκνότητας του ρευστού, καθώς επίσης και τη θερμοχωρητικότητά του.

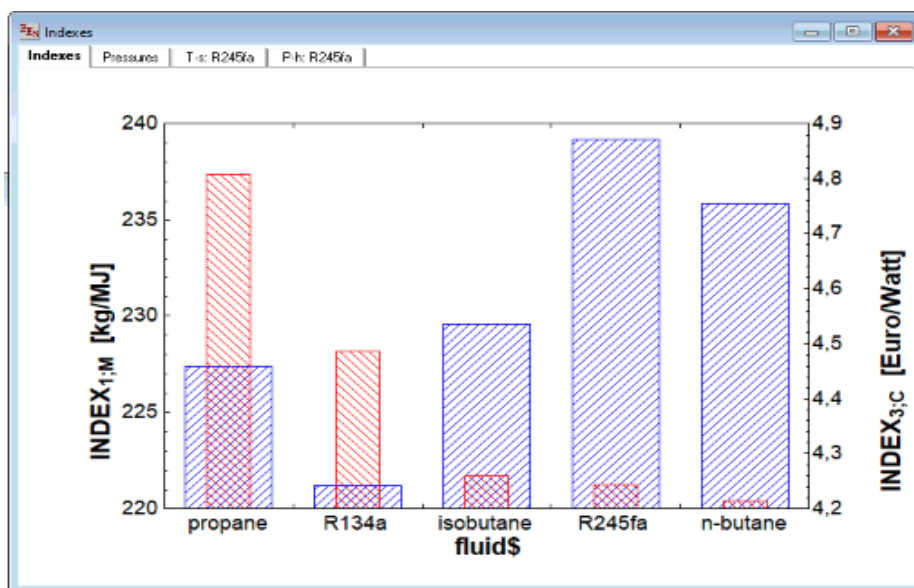
- Θερμική αγωγιμότητα: εδώ επιθυμητή είναι προφανώς η υψηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, εφόσον έτσι υπάρχει υψηλός βαθμός μετάδοσης θερμότητας, ειδικά μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας.
- Πυκνότητα του ατμού: το μέγεθος της σχετικής πυκνότητας του ατμού που παράγεται ως προς αυτήν του αέρα είναι ένα σημαντικό μέγεθος, εφόσον μπορεί να συμβάλλει μαζί με άλλες παραμέτρους (όπως τη μειωμένη πίεση στο συμπυκνωτή) σε μη-επιθυμητό ρυθμό σε ό,τι αφορά τη ροή του υγρού.
- Καμπύλη κορεσμένου ατμού: το σχήμα της καμπύλης αποτελεί ένα ακόμη κριτήριο. Ειδικότερα, μια θετική καμπύλη είναι επιθυμητή, εφόσον η παρουσία ενός ανακτητή θερμότητας συντελεί σε αυξημένη θερμοδυναμική απόδοση του οργανικού κύκλου Rankine.
- Πίεση στον αποστακτήρα: μεγάλη πίεση του ατμού μέσα στη συσκευή αυξάνει τα κόστη που απαιτούνται για την κατασκευή της διάταξης καθώς επίσης και ενδέχεται να δημιουργήσει περιπλοκές.
- Ψύξεις: τόσο η τιμή ψύξεως του εργαζόμενου ρευστού όσο και αυτή του υγρού πρέπει να είναι περιορισμένη: με αυτόν τον τρόπο η μετάδοση θερμότητας ενισχύεται και επίσης η τριβή ελαττώνεται και συνακόλουθα οι θερμικές απώλειες.
- Σημείο μετάβασης κατάστασης ρευστού: το κριτήριο είναι ότι επιθυμητό είναι το χαμηλότερο δυνατό σημείο ψύξης, εφόσον αυτό είναι ένα ενδεχόμενο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της διάταξης.
- Άνω άκρο θερμοκρασίας: το κριτήριο είναι η μεγαλύτερη δυνατή στασιμότητά του.
- Βαθμός ασφάλειας του εργαζόμενου μέσου: το επίπεδο ή βαθμός ασφάλειας του ρευστού συνήθως έγκειται σε δύο παράγοντες: το πόσο εύφλεκτο και τοξικό μπορεί να γίνει.
- Μειωμένο δυναμικό καταστροφής του όζοντος (Ozone Depletion Potential): χαμηλότερη πιθανότητα καταστροφής του στρώματος του όζοντος.
- Χαμηλός βαθμός συμβολής στην αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου: Τα υλικά αφενός πρέπει να είναι διαθέσιμα προς αγορά και αφετέρου να είναι προσιτά στην τιμή τους

Επόμενο βήμα στην πειραματική διαδικασία είναι ο συγκερασμός των κριτηρίων που είδαμε παραπάνω και η εξαγωγή της τελικής απόφασής μας για το εργαζόμενο μέσο μέσα από τα τέσσερα διαθέσιμα. Επίσης, έγινε χρήση των καμπυλών-γραφημάτων. Οι καμπύλες αυτές συγκεκριμένα αναφέρονται στην παραγωγή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους ή όγκου του μέσου (θερμογόνος δύναμη), καθώς επίσης και το κόστος ανά μονάδα ισχύος. Επιπλέον, έχουν να κάνουν με την πίεση του υλικού μέσα στη συσκευή του συμπυκνωτή, σε συνάρτηση με αυτή στον αποστακτήρα (Moya et al., 2018). Τελική επιλογή, στη βάση των παραπάνω κριτηρίων, για εργαζόμενο ρευστό ήταν το R245fa. Τα χαρακτηριστικά του ρευστού αυτού δίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά του ρευστού R245fa.

Μοριακό Βάρος	134
Σημείο βρασμού (101.3 kPa)	58.8
Χημική ονομασία	πενταφθοροπροπάνιο
Χημική ένωση	CF ₃ CH ₂ CHF ₂
Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	154.01
Κρίσιμη πίεση (bar)	36.51
Πυκνότητα υγρού (kg/m ³) στους 0 (°C)	1338.54
ANSIASHRAE Πρότυπο 36-1992 Ταξινόμηση ομάδας ασφαλείας	B1
Σχετική μοριακή μάζα	134.05
Πυκνότητα ατμών (kg/m ³) στους 25 (°C)	8.55
GWP	1030
ODP	Μη εξάντληση του όζοντος
Διαθεσιμότητα	Έγκριση
ATEL/ODL (kg/m ³)	0.19
Πρακτικό όριο	0.19
AIT (°C)	ND

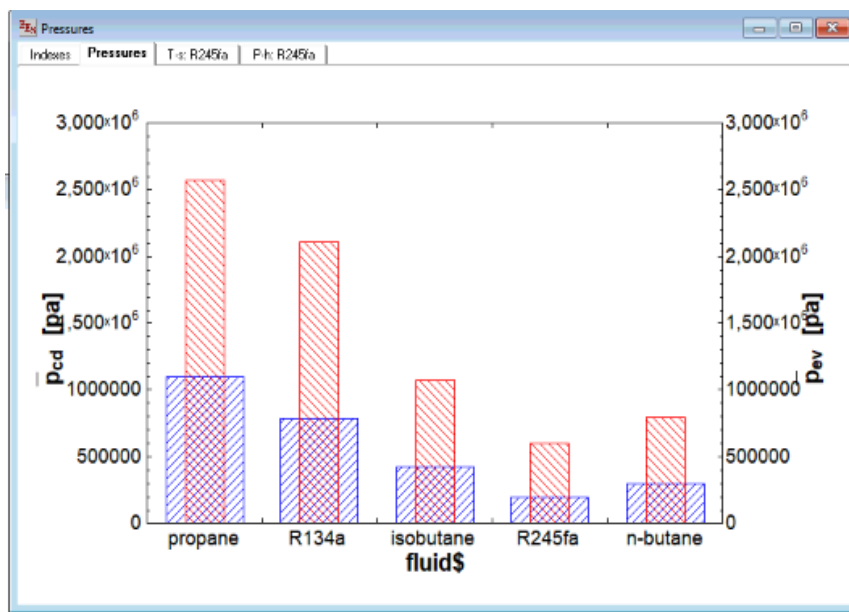
Παρακάτω, επίσης, θα παραθέσουμε δύο γραφήματα που είχαν αποφασιστική σημασία για τη επιλογή του ρευστού R245fa. Συγκεκριμένα, το πρώτο από τα δύο διαγράμματα είναι το ακόλουθο:



Διάγραμμα 3.2: Σύγκριση διάφορων εργαζόμενων ρευστών με την παραγωγή ενέργειας και με το κόστος παραγωγής ανά watt.

Στο Διάγραμμα 3.2 απεικονίζονται τα δύο μεγέθη στα οποία αναφερθήκαμε παραπάνω. Το πρώτο μέγεθος είναι η παραγωγή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους ή όγκου του μέσου (θερμογόνος δύναμη). Το δεύτερο μέγεθος είναι η οικονομική απόδοση σε ευρώ ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος από τη διάταξη.

Παρατηρείται έτσι εύκολα ότι τα μεγέθη αυτά παρουσιάζουν διακύμανση σε κάθε ρευστό. Τα μπλε διαγράμματα ειδικότερα μας δίνουν τις τιμές της οικονομικής απόδοσης. Στη βάση της δομής των μπλε διαγραμμάτων, είναι αντιληπτό ότι τη μεγαλύτερη τιμή την λαμβάνουμε από το ρευστό R245fa. Αν και το R245fa δεν είναι αυτό που διαθέτει την μικρότερη τιμή σε επίπεδο παραγωγής θερμικής ενέργειας ωστόσο η τιμή στη θερμογόνο του δύναμη είναι ικανοποιητική, αφού δεν απέχει πολύ από το ν-βουτάνιο, οπότε, σταθμίζοντας ως πρώτο το κριτήριο της οικονομικής απόδοσης, επιλέγεται, με βάση όλα τα παραπάνω, το R245fa.



Διάγραμμα 3.3: Σύγκριση διάφορων εργαζόμενων ρευστών με την πίεση συμπίκνωσης και με την πίεση απόσταξης.

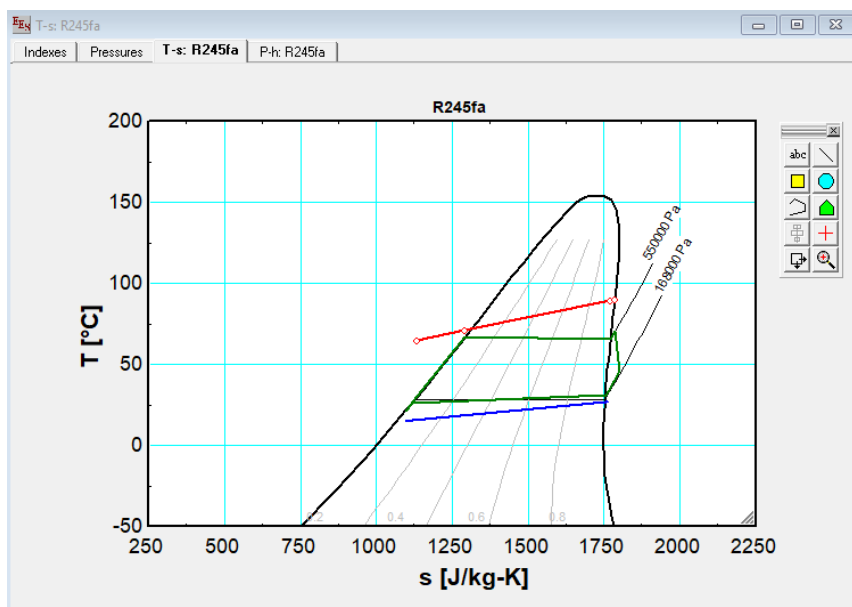
Όσον αφορά τις διεργασίες που σχετίζονται με τον οργανικό κύκλο Rankine, μας απασχολούν τα παρακάτω:

- Ο συμπυκνωτής να παρουσιάζει τη μικρότερη εφικτή θερμοκρασία, έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα κατά την υλοποίηση του κύκλου.
- Η πίεση που αναπτύσσει το υλικό (ατμός) στον αποστακτήρα να μην ξεπερνά ένα σημείο που έχει οριστεί από πριν, έτσι ώστε ο ατμός να παραμείνει κορεσμένος ατμός και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια του κύκλου.

Στο Διάγραμμα 3.3 δίνονται τα εξής:

- 1) Η πίεση του ατμού στον ανεμιστήρα και αυτή στη συσκευή του αποστακτήρα—για το κάθε ένα από τα υποψήφια ρευστά.
- 2) Πιο συγκεκριμένα, στο μπλε γράφημα δίνονται οι τιμές της πίεσης που λαμβάνονται μέσα στον ανεμιστήρα. Στο κόκκινο γράφημα, δίνονται οι τιμές που λαμβάνει η πίεση μέσα στη συσκευή του αποστακτήρα.

Παρακάτω στο Διάγραμμα 3.4 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές της εντροπίας σε σχέση με την θερμοκρασία του R245fa καθώς και στο Διάγραμμα 3.5 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές της πίεσης σε σχέση με την ενθαλπία του R245fa. Οι παρακάτω χαρακτηριστικές είναι ανεξάρτητες της τιμής της Ροής μάζας του γεωρευστού με την οποία θα ασχοληθούμε παρακάτω σχετικά με επενδυτικά σχέδια.

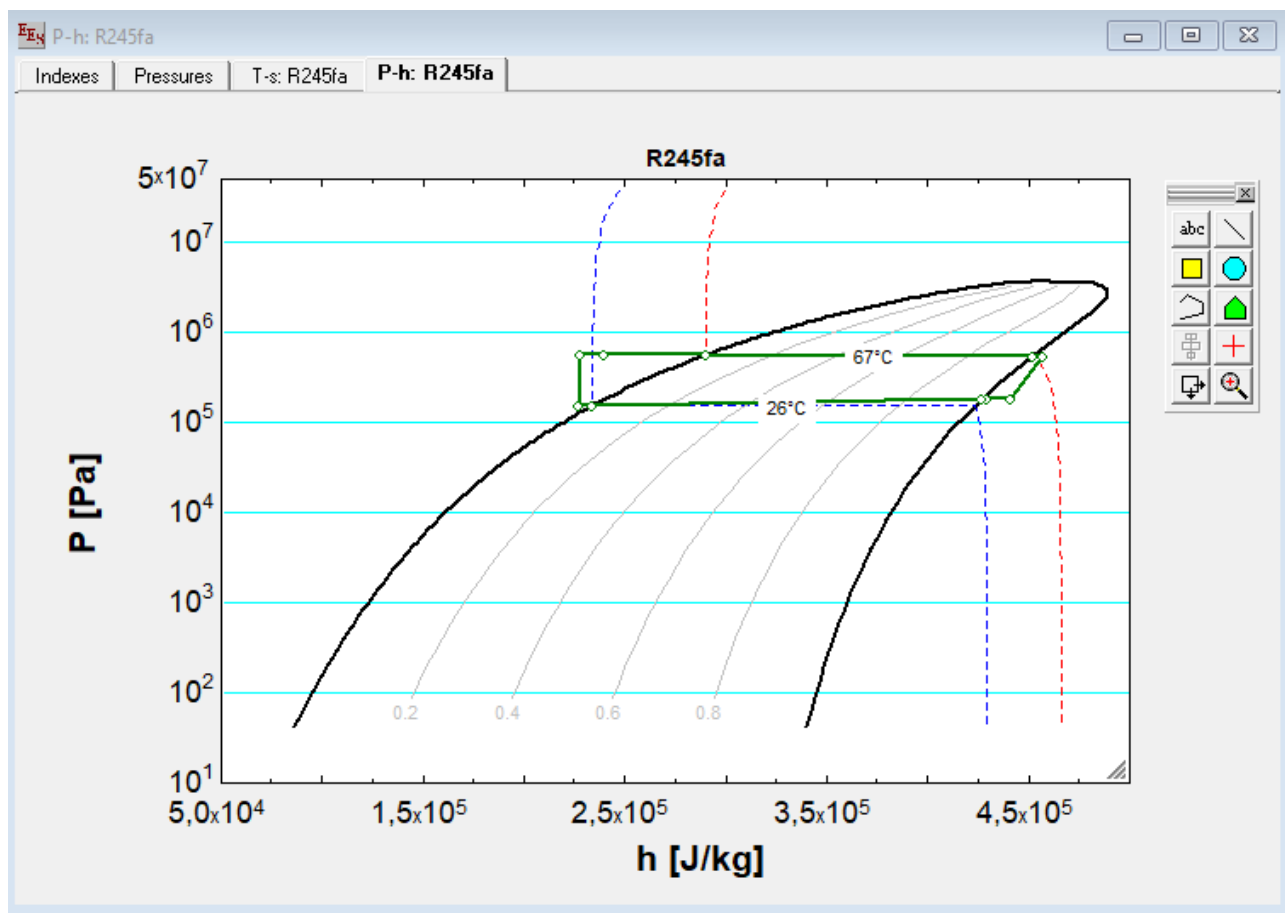


Διάγραμμα 3.4: Χαρακτηριστική θερμοκρασίας – εντροπίας του R245fa.

Το παραπάνω διάγραμμα ταυτίζεται ακριβώς με το θεωρητικό που παρουσιάστηκε παραπάνω και δείχνει σε κάθε στάδιο του κύκλου την θερμοκρασία που λαμβάνει το εργαζόμενο ρευστό για κάθε τιμή εντροπίας. Οι δύο τιμές της πίεσης οι οποίες έχουν σημειωθεί πάνω στο διάγραμμα είναι:

- Πίεση αποστακτήρα : 550000 Pa
- Πίεση ανεμιστήρα : 168000 Pa.

Η γραμμή με κόκκινο χρώμα αναφέρεται στο ανώτερο όριο που μπορεί να λάβει η θερμοκρασία και συνάμα η πίεση του αποστακτήρα καθώς εκεί βρίσκεται η μεγαλύτερη τιμή πίεσεως. Η γραμμή με μπλε χρώμα αναφέρεται στο κατώτατο όριο όπου μπορεί να λάβει η θερμοκρασία η οποία είναι ανάλογη με την πίεση και συνάμα η πίεση του συμπυκνωτή καθώς εκεί βρίσκεται η χαμηλότερη τιμή πίεσεως.



Διάγραμμα 3.5: Χαρακτηριστική πίεσης - ενθαλπίας του R245fa.

Το Διάγραμμα 3.5 δείχνει σε κάθε στάδιο του κύκλου την πίεση που λαμβάνει το εργαζόμενο ρευστό για κάθε τιμή ενθαλπίας. Παρατηρείται ότι η θερμοκρασία 67°C (για την ακρίβεια $67,3$ αλλά το διάγραμμα δεν δέχεται δεκαδικά ψηφία οπότε πραγματοποιήθηκε στρογγυλοποίηση) αντιστοιχεί στον αποστακτήρα καθώς είναι και το σημείο όπου έχουμε την υψηλή ενθαλπία. Η θερμοκρασία 27°C (για την ακρίβεια $26,8$ αλλά το διάγραμμα δεν δέχεται δεκαδικά ψηφία οπότε πραγματοποιήθηκε στρογγυλοποίηση) αντιστοιχεί στον ανεμιστήρα καθώς είναι το σημείο όπου έχουμε την χαμηλή ενθαλπία.

3.4 Οικονομική ανάλυση

Στη συνέχεια του πειραματικού μέρους, πραγματοποιούμε μια σύγκριση μεταξύ δύο εναλλακτικών μονάδων. Επισημαίνουμε ότι και οι δύο μονάδες διαθέτουν την ίδια διάταξη του οργανικού κύκλου Rankine. Εντούτοις, με τη βοήθεια της παραμετροποίησης που έχουμε κάνει στο πρόγραμμα, έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής των τιμών των παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο, μεταβάλλουμε δύο στοιχεία:

- A) τον αριθμό των γεωτρήσεων
- B) τη ροή του εργαζόμενου ρευστού, M

Επισημαίνεται βέβαια ότι η τοποθέτηση διαδοχικών μονάδων δεν είναι κάτι που μπορεί να γίνει ταυτόχρονα ή παράλληλα. Αντιθέτως, απαιτούνται αρκετά χρόνια, προκειμένου να τοποθετηθεί.

Ευρύτερα, αναζητούμε την οικονομικά προσφορότερη λύση, ένα πρόβλημα που εμπίπτει γενικά σε αυτό που λέγεται στη βιβλιογραφία διαχείριση ή εκμετάλλευση γεωθερμικού πεδίου. Αυτό το πρόβλημα θα διερευνηθεί στη συνέχεια. Αρχικά, παραθέτουμε τις παραμέτρους κάθε υλοποίησης, όπως αυτές υλοποιούνται με το πρόγραμμα EES32.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι υλοποίησης.

	M=100kg/s	M=20kg/s
COST(exp)	657835	214345
P(total)	516,8 KW	103,4 KW
COST(gen)	72254	24578
P(turbine)	662,1 KW	132,4 KW
A(cond)	3345 m ²	669,1 m ²
A(rec)	83 m ²	17 m ²
Massfactor,scen,i	47,97	9,595
P(pump)	23 KW	5KW
COST(rec)	129529	92507
COST (cond)	803459	331702
Index3,C	6,39 Euro/Watt	13 Euro/Watt
Total(cost)	3,3 x 10 ⁶	1,344 x 10 ⁶
A(evap)	842 m ²	168 m ²
COST (evap)	791297	332490
LCOE	0,08814 Euro / Kwhe	0,1795 Euro/Kwhe
Prod	4,075 x 10 ⁶ KW	814958 KW
P(fans)	123 KW	25 KW

Ονομάζουμε για εύκολη αναφορά την υλοποίηση με τη μία διάταξη και τη μεγαλύτερη ροή A και την υλοποίηση με τις πέντε διατάξεις υλοποίηση B. Η παράθεση των αποτελεσμάτων που παίρνουμε κατηγοριοποιείται σε τρεις ενότητες:

- Κόστος υλοποίησης
- Επιφάνεια πεδίου
- Παραγόμενη ισχύς (Saghafifar, 2016)

Σε πολύ γενικές γραμμές, σχετικά με το κόστος υλοποίησης της διάταξης, μπορούμε να πούμε ότι η μεγαλύτερη ροή της υλοποίησης Α η οποία απαιτείται συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος για την αγορά των συσκευών της διάταξης, όπως τα έχουμε αναφέρει προηγουμένως.

Επιπλέον, η επιφάνεια του πεδίου που απαιτείται για την τοποθέτηση της διάταξης με τη μεγαλύτερη ροή θα είναι και αυτή ανάλογα αυξημένη. Επιπλέον, και η ισχύς αναμένεται να είναι αυξημένη.

Ειδικότερα, μέσα από το πρόγραμμα EES32, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

α) Για την υλοποίηση Α, η συνολική ισχύς του υπό εξέταση συστήματος θα ισούται με 516,8KW. Θα είναι επομένως πενταπλάσια σχεδόν από την ολική ισχύ του συστήματος της υλοποίησης Β, εφόσον εκεί η ισχύς είναι 103,4 KW, κάτι που είναι ανάλογο με την παράμετρο της ροής Μ της υλοποίησης Β, η οποία είναι υποπενταπλάσια αυτής της υλοποίησης Α.

β) Σε ό,τι αφορά τη συσκευή της αντλίας, που είναι η πιο ενεργοβόρος συσκευή της διάταξης, έχουμε ότι για την υλοποίηση Α θα ισούται με 23 KW, οπότε θα είναι περίπου πενταπλάσια από αυτή της υλοποίησης Β, που θα ισούται με 5KW, κάτι που πάλι μπορεί να αποδοθεί στις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ της τιμής της ροής. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τις άλλες συσκευές της διάταξης, όπως είναι τόσο ο στρόβιλος όσο και ο ανεμιστήρας.

γ) Το συνολικό κόστος για την υλοποίηση Α είναι $3.3 \cdot 10^6$ €. Το συνολικό κόστος για την υλοποίηση Β είναι $1.344 \cdot 10^6$ €. Το σταθμισμένο κόστος ως προς την παραγόμενη ενέργεια της διάταξης (ισοπεδωμένο κόστος ή ισοπεδωμένο ενεργειακό κόστος) για την υλοποίηση Α είναι ίσο με 0.08814 Euro/Watt, ενώ για την υλοποίηση Β παρατηρείται αύξηση κατά το ήμισυ περίπου (49%)

δ) Τέλος, σε ό,τι αφορά τις ισχύς, η συνολική ισχύς για την υλοποίηση Α βρίσκεται να είναι πενταπλάσια της ισχύος για την υλοποίηση Β.

Έχοντας αναλύσει τα παραπάνω, υπενθυμίζουμε πως το σπουδαιότερο σε βαρύτητα κριτήριο είναι το οικονομικό κριτήριο που αφορά τη διαχείριση ή εκμετάλλευση του γεωθερμικού πεδίου (Index 3,C). Το κριτήριο αυτό έχει μονάδα μέτρησης Euro/Watt και ισούται με 6.39 για την υλοποίηση Α, ενώ για την υλοποίηση Β, ισούται με 13. Εφόσον η μελέτη μας αυτή, στο πλαίσιο της μεθοδολογίας της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού πεδίου, έχει κυρίως οικονομικά κριτήρια, ενδιαφερόμαστε τόσο για την κερδοφορία (έσοδα) όσο όμως και για το σταθμισμένο (ισοπεδωμένο) ενεργειακό κόστος. Αυτά τα κριτήρια θα κυριαρχήσουν στην τελική ανάλυση που ακολουθεί.

Στο σημείο αυτό, εξετάζουμε ειδικότερες μορφές επένδυσης που μπορούν να γίνουν στο πλαίσιο της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού πεδίου στη βάση των υλοποιήσεων που αναλύσαμε προηγούμενα.

Έτσι, η επένδυση 1 περιλαμβάνει την υλοποίηση Α, με τοποθέτηση μίας μονάδας, με ροή $M=100$ kg/s. Η τοποθέτηση αυτή ολοκληρώνεται στο έτος 7 από την έναρξη της επένδυσης.

Η επένδυση 2 αφορά την υλοποίηση Β και πραγματοποιείται μέσω της τοποθέτησης συνολικά πέντε στον αριθμό διατάξεων, καθεμία από τις οποίες διαθέτει ροή του εργαζόμενου μέσου Μ ίση με 20 kg/s. Χρονολογικά, οι νέες τοποθετήσεις θα γίνονται μία ανά έτος. Συγκεκριμένα η αρχική διάταξη θα τοποθετηθεί με την έναρξη του τρίτου χρόνου, εφόσον ο χρόνος πριν από αυτή την τοποθέτηση αξιοποιείται για σκοπούς μελέτης και κατασκευαστικούς.

Το υπολογιζόμενο κεφάλαιο προκειμένου να υλοποιηθούν οι επενδύσεις αυτές ισούται με €4Μ. Στη συνέχεια, δίνονται οι λεπτομέρειες της εκτίμησης αυτής:

A) Πρώτο στοιχείο είναι ο χώρος όπου πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση. Προστίθενται οι απαιτούμενες επιφάνειες του πεδίου για όλα τα στοιχεία της διάταξης. Το σύνολο της απαιτούμενης επιφάνειας για τις τοποθετήσεις των στοιχείων της διάταξης είναι 4785 τετραγωνικά μέτρα.

B) Το Οικόπεδο 1 βρίσκεται στον Ακροπόταμο Καβάλας, η επιφάνεια ανέρχεται σε 5000 τ.μ. βρίσκεται σε απόσταση 4.8 χιλιομέτρων μακριά της θάλασσας και διαθέτει ελαιόδεντρα. Η συνολικά του αξία ανέρχεται στα 50 χιλιάδες ευρώ.

Γ) Το Οικόπεδο 2 βρίσκεται στον Ακροπόταμο, η επιφάνεια ανέρχεται επίσης σε 5000 τ.μ., βρίσκεται σε απόσταση 600 μέτρων μακριά της θάλασσας. Η συνολική αξία του συγκεκριμένου οικοπέδου ανέρχεται στα 35 χιλιάδες ευρώ.

Καταλήγουμε εντέλει στη δεύτερη επιλογή, δηλαδή στο οικόπεδο 2. Οι αιτίες που επιλέχθηκε απαριθμούνται ως εξής:

- Είναι σχετικά – για την ίδια επιφάνεια - φθηνότερο του πρώτου οικοπέδου.
- Τα ελαιόδεντρα χρειάζονται δαπάνες προκειμένου να αφαιρεθούν από το οικόπεδο 1.
- Εφόσον αφαιρούνταν τα ελαιόδεντρα από το οικόπεδο 1 για την εγκατάσταση μας θα υπήρχαν απώλειες κερδών από την μη εκμετάλλευση των ελαιόδεντρων.

Τελικό συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι το ποσό των €4Μ ευρώ, που αναφέραμε στα προηγούμενα. Τα χρηματοοικονομικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται εδώ για την αποτίμηση της επένδυσης είναι κλασικά στον τομέα αυτόν: Πρώτον, το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ- NPV) και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return- IRR), με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επανεπένδυση και επανατοποθέτηση των χρημάτων στα πλαίσια του επενδυτικού σχήματος. Στον Πίνακα 3.3, υπολογίζουμε τις προϋποθέσεις της κερδοφορίας στο πλαίσιο της επένδυσης αυτής.

Πίνακας 3.3: Προϋποθέσεις κερδοφορίας. Τοποθέτηση μίας μονάδας των 100kg/s στο 7ο έτος.

έτος N	Επένδυση - I σε million	εισροές	Συντελεστής προεξόφλησης	PV εισροών	Συσσωρευμένη παρούσα αξία
0	4M	-		-	
1		-	0.909	-	
2		-	0.826	-	
3		-	0.751	-	
4		-	0.683	-	
5		-	0.621	-	
6		-	0.564	-	
7		-	0.513		-2.305.893.424

Εδώ ισχύει ότι: $NPV > 0$ και $IRR > r$, όπου r είναι, σύμφωνα με την καθιερωμένη μεθοδολογία, το προεξοφλητικό επιτόκιο της επένδυσης, το οποίο λαμβάνει την τιμή του 10%.

Οι υπολογισμοί του πίνακα αυτού μας δείχνουν ότι δεν πληρείται το κριτήριο για το NPV, εφόσον αυτό υπολογίζεται ως αρνητικό, και έτσι δεν εγκρίνεται η συγκεκριμένη επένδυση (Saghafifar, 2016).

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τον Πίνακα (3.4) διαδοχικής τοποθέτησης των πέντε διατάξεων των 20kg/s, οι οποίες ξεκινούν από τον τρίτο χρόνο και φτάνουν ως τον έβδομο:

Πίνακας 3.4: Προϋποθέσεις κερδοφορίας. Διαδοχική τοποθέτηση πέντε διατάξεων των 20kg/s, 3^{ος}-7^{ος} χρόνος.

έτος N	Επένδυση - I σε million	εισορές (M)	Συνταλαστής προξόφλησης	PV εισροών	Συσσωρευμένη παρούσα αξία
0	4M	-		-	
1		-	0.909	-	
2		-	0.826	-	
3		1,3442	0.751	1009494.2	-29905058
4		1,3442	0.683	918088.6	-20724172
5		1,3442	0.621	834748.2	-1237669
6		1,3442	0.564	758128.8	-479540
7		1,3442	0.513	689574.6	210.034
					IRR = 12.981%
					Ποσό 7ου έτους = 8.204165M

Από τον πίνακα παραπάνω, προκύπτει ότι πληρούνται και οι δύο προϋποθέσεις που τέθηκαν: $NPV > 0$ και $IRR > r$.

Λόγω της δεκαδικής τιμής των ορισμάτων, η τιμή για το IRR εκτιμήθηκε με την μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

Το κέρδος κατά την υλοποίηση αυτού του επενδυτικού σχεδίου ανέρχεται σε: $NPV = 210.034€$. Εφόσον ολοκληρωθεί και ο έβδομος χρόνος από την έναρξη της επένδυσης, προκύπτει το ακόλουθο συνολικό κεφάλαιο: $4 \cdot 10^6 \cdot 1,1^7 + 210034 \cdot 1,1^7 = €8,204165M$.

Συμπερασματικά, η τελική επιλογή μας είναι η επένδυση 2 (υλοποίηση Β), καθώς προκύπτει ότι πληρεί τα κριτήρια, εκτιμάται ότι θα υπάρχουν ταμειακές ροές που επιτρέπουν ορισμένη κερδοφορία και επίσης, στη βάση της τιμής του IRR, προκύπτει και μια επανεπένδυση. Αυτό το στοιχείο είναι πολύ σημαντικό, αν λάβουμε υπόψη και το στοιχείο του πληθωρισμού, και της σταδιακής μείωσης της αξίας του χρήματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιείται μελέτη ανάδειξης της αξίας που έχει η γεωθερμία ή η γεωθερμική ενέργεια στα πλαίσια των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η γεωθερμία θεωρητικά αναδεικνύεται ως μια κορυφαία μορφή ΑΠΕ, αλλά επίσης και πρακτικά σε ορισμένες περιπτώσεις: υπάρχουν ευρωπαϊκές πόλεις (όπως στην Ιταλία) αλλά και ευρωπαϊκές χώρες (όπως η Ισλανδία) που βασίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την παραγωγή ενέργειάς τους στη γεωθερμία.

Μέσα από τη μελέτη που γίνεται στη συνέχεια, καταλήγουμε σε ορισμένα συμπεράσματα. Καταρχάς, εξετάζονται εναλλακτικές δυνατότητες ως προς κάποια από τα στοιχεία των διατάξεων που υλοποιούν τον οργανικό κύκλο Rankine. Συνήθως οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούν ένα πύργο, ο οποίος επιτελεί την ψύξη του εργαζόμενου υγρού, ενώ στην περίπτωση που εξετάζουμε στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας ανεμιστήρας. Φαίνεται ότι η συγκεκριμένη επιλογή δικαιώνεται, τουλάχιστον σε επίπεδο αποτελεσματικότητας κόστους-οφέλους.

Το δεύτερο στοιχείο έχει να κάνει με το εργαζόμενο ρευστό : επιλέχθηκε το R245fa, στη βάση αρκετών διαφορετικών κριτηρίων. Ορισμένα από τα κριτήρια έχουν να κάνουν με τις θερμικές ιδιότητες του υγρού και ειδικά με τις ιδιότητές του που σχετίζονται με την απόδοσή του μέσα στη διάταξη ORC. Άλλα κριτήρια έχουν να κάνουν με την ασφάλειά του και το μειωμένο «αποτύπωμά» του, ιδιαίτερα ως προς το στρώμα του όζοντος. Πράγματι, και σε αυτό το σημείο φαίνεται πως η επιλογή δικαιώνεται.

Το τρίτο στοιχείο που συμπεραίνουμε είναι ότι υπάρχουν επενδύσεις που μπορούν να γίνουν στη βάση διαφορετικού αριθμού και διαρρύθμισης των διατάξεων που είναι σε καθαρά οικονομικό επίπεδο βιώσιμες και αποτελεσματικές. Έτσι, οι διατάξεις οργανικού κύκλου Rankine που προτείνονται σε αυτήν την εργασία αποδεικνύεται ότι μπορούν να οδηγήσουν και σε μία κερδοφόρα διαχείριση ή εκμετάλλευση γεωθερμικού πεδίου. Ειδικότερα, βλέπουμε ότι υπάρχουν τα εξής δύο αποτελέσματα:

- Η καθαρή παρούσα αξία στο τέλος της επένδυσης είναι θετική και μάλιστα έχει και σημαντική τιμή (210034€).
- Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης υπερβαίνει την τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου r , με συνέπεια η επένδυση να καθίσταται επικερδής σε κάποιο βαθμό για τον επενδυτή που θα την αναλάβει.

Τελικά, φαίνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης επένδυσης με διατάξεις οργανικού κύκλου Rankine οι οποίες είναι αποδοτικές, επιτρέπουν μια κερδοφορία που καθιστά την επένδυση βιώσιμη αλλά επίσης επιτρέπουν και την επανεπένδυση, κάτι που είναι από τους αρχικούς στόχους.

Η μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτόν είναι βέβαιο πως πρέπει να είναι εκτεταμένη. Θα άξιζε από μελλοντικούς ερευνητές η ενασχόληση με:

- Διαφορετικά εργαζόμενα ρευστά.
- Διαφορετικές διατάξεις θερμοδυναμικών κύκλων
- Διαφορετικά στοιχεία σε μια δοσμένη διάταξη

Με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαν να βρεθούν περισσότεροι αποδοτικοί τρόποι αξιοποίησης της γεωθερμίας, με απώτερο σκοπό την αντικατάσταση των περιβαλλοντικά ζημιωγόνων μεθόδων παραγωγής ενέργειας από καθαρούς και αποδοτικούς τρόπους, στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- Ανδρίτσος Ν., Αρβανίτης Α., Δαλαμπάκης Π., Κολιός Ν., Κουτσινός Σ. & Φυτίκας Μ., (2005). «Απόψεις για την ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων της χώρας», Πρακτικά 3ου Εθνικού Συνεδρίου «Η εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Προοπτικές και Προτεραιότητες προς το Στόχο του 2010» (23-25 Φεβρουαρίου 2005), Μονάδα Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων Ε.Μ.Π. & Κ.Α.Π.Ε, Αθήνα, σελ. 311-317.
- Lee, S. (2020, November 4). 5 places running on 100% renewable energy - World Smart Cities Forum. World Smart Cities Forum. <https://worldsmartcities.org/5-places-running-on-100-renewable-energy/>
- Dagdas, A., Akkoyunlu, M. T., & Başaran, T. (2014). Performance analysis of supercritical binary geothermal power plants. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(1), 326839. <https://doi.org/10.1155/2014/326839>
- DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Butterworth-Heinemann.
- Eslami-Nejad, P., Ouzzane, M., & Aidoun, Z. (2014). Modeling of a two-phase CO₂-filled vertical borehole for geothermal heat pump applications. *Applied Energy*, 114, 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.028>
- Hohmeyer, O. (2008). The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. Research Collection. <http://hdl.handle.net/20.500.11850/13474>
- Gehring, M. (2012). *Geothermal handbook: Planning and Financing Power Generation*.
- Gupta, A. (2021, September 17). Liebreich: 'Blue hydrogen will be needed because green H₂ alone will not be able to meet demand' – EQ Mag Pro. The Leading Solar Magazine in India. <https://www.eqmagpro.com/liebreich-blue-hydrogen-will-be-needed-because-green-h2-alone-will-not-be-able-to-meet-demand-eq-mag-pro>
- Kindy, D. (2021, August 17). 'Blue' Hydrogen May Not Be a Very 'Green' Energy Source After All. *Smithsonian Magazine*. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/blue-hydrogen-20-worse-burning-coal-study-states-180978451>
- Lund, J. W., Freeston, D., & Boyd, T. L. (2005). Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review. *Geothermics*, 34(6), 691–727. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.09.003>
- Mendrinou, D., & Karytsas, C. (2003). Use of geothermal energy and seawater for heating and cooling of the new terminal building in the airport. . . ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/237445297_Use_of_geothermal_energy_and_seawater_for_heating_and_cooling_of_the_new_terminal_building_in_the_airport_of_Thessaloniki
- Moro, R., Pinamonti, P., & Reini, M. (2008). ORC technology for waste-wood to energy conversion in the furniture manufacturing industry. *Thermal Science*, 12(4), 61–73. <https://doi.org/10.2298/tsci0804061m>
- Moya, D., Aldas, C., & Kaparaju, P. (2018). Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 94, 889–901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>

- Newton, A. C., & Cantarello, E. (2014). An introduction to the green economy. In Routledge eBooks. <https://doi.org/10.4324/9781315884486>
- Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., & Biernacka, B. (2001). Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25(5), 301–309. [https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(01\)00078-4](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(01)00078-4)
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., & Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 22, 168–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.028>
- Kevin Rafferty, “Building Space Heating,” *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, Vol. 22, No. 3, September 2001, pp. 13-17
- Van Renssen, S. (2020). The hydrogen solution? *Nature Climate Change*, 10(9), 799–801. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0891-0>
- Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., & Tatsiopoulos, I. P. (2009). Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.10.008>
- Saghafifar, M. (2016). Thermo-economic optimization of hybrid combined power cycles using heliostat field collector. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4132.8720>
- Consumer demand for ‘green power’ and energy efficiency. (2003). *ScienceDirect*. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00232-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00232-X)
- Zarrouk, S. J., & Purnanto, M. H. (2015). Geothermal steam-water separators: Design overview. *Geothermics*, 53, 236–254. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.009>

Παράρτημα Α

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της διάταξης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, μέσω του προγράμματος EES32:

```

1  "! Inputs and parameters : "
2  M_Geo_Scen_I=100
3  fluid$='R245fa'
4  M_dot = 1[Kg/s]
5  T_0=20[C]
6
7  "TEMPERATURES OF THE CYCLE"
8  T_ev = 67,3[C]
9  T_cd = 26[C]
10
11 "Pinch temperature differences"
12 pinch_ev = 4[C]
13 pinch_cd = 4[C]
14
15 "heat source : "
16 hf$='water'
17 T_hf_su_ev = 90[C]:"TEMPERATURE OF GEOTHERMAL FLUID"
18 T_geo=T_hf_su_ev
19 p_hf_ev = 20E5[Pa]
20
21 "heat sink : "
22 cf$='air_ha'
23 T_cf_su_cd = 15[C]:"MEAN AIR TEMPERATURE"
24 p_cf_cd = 1,1E5[Pa]
25
26 "Pressure drops in the heat exchangers : "
27 DELTAp_ev = 30E3[Pa]
28 DELTAp_cd = 30E3[Pa]
29 DELTAp_hf_pp=50E3[Pa]
30 DELTAp_cf_pp=50E3[Pa]
31
32 "Overheating and subcooling : "
33 DELTAT_ex_ev = 5[C]
34 DELTAT_ex_cd = 5[C]
35
36 "Effectivenesses : "
37 epsilon_exp = 0,8
38 epsilon_pp = 0,8
39 epsilon_rec = 0,5
40
41 heta_exp=0,98
42 heta_gen=0,95
43 heta_motor=0,90
44 heta_hcf_pumps=0,75
45
46 r_p = p_su_exp/p_ex_exp
47 r_v = rho_su_exp/rho_ex_exp
48
49 "!First processing : "
50
51 "Saturation pressures : "
52 T_ev = T_sat(fluid$;p=p_su_ev)
53 T_cd = T_sat(fluid$;p=p_ex_cd)
54
55 DELTAp_ev = p_su_ev - p_su_exp
56 DELTAp_cd = p_ex_exp - p_ex_cd
57 p_bar_ev = (p_su_ev + p_su_exp)/2
58
59 p_bar_cd = (p_ex_exp + p_ex_cd)/2
60 DELTAT_ex_ev = T_su_exp - t_sat(fluid$;p=p_su_exp)
61 DELTAT_ex_cd = T_sat(fluid$;p=p_ex_cd) - T_ex_cd
62
63 "!Expansion : "
64 h_su_exp = enthalpy(fluid$;t=t_su_exp;p=p_su_exp)
65 s_su_exp = entropy(fluid$;t=t_su_exp;p=p_su_exp)
66 epsilon_exp = (h_su_exp - h_ex_exp)/(h_su_exp - h_ex_exp_s)
67 h_ex_exp_s = enthalpy(fluid$;p=p_ex_exp;s=s_su_exp)
68 t_ex_exp = temperature(fluid$;p=p_ex_exp;h=h_ex_exp)
69

```

```

1 rho_ex_exp = density(fluid$,p=p_ex_exp;t=t_ex_exp)
2 rho_su_exp = density(fluid$,p=p_su_exp;t=t_su_exp)
3
4 "Condenser :"
5 "hypothesis : the pressure drop is distributed in the heat exchanger proportionally to the enthalpy change : "
6 h_su_cd = h_ex_vap_rec
7 T_su_cd = T_ex_vap_rec
8 h_ex_cd = enthalpy(fluid$,p=p_ex_cd;t=t_ex_cd)
9 h_cd_v = enthalpy(fluid$,p=p_cd_v;x=1)
10 h_cd_l = enthalpy(fluid$,p=p_cd_l;x=0)
11 p_cd_v = p_ex_exp - DELTAp_cd * (h_ex_exp - h_cd_v)/(h_ex_exp - h_ex_cd)
12 p_cd_l = p_ex_exp - DELTAp_cd * (h_ex_exp - h_cd_l)/(h_ex_exp - h_ex_cd)
13 T_cd_v = temperature(fluid$,p=p_cd_v;x=1)
14 T_cd_l = temperature(fluid$,p=p_cd_l;x=0)
15
16 h_cf_su_cd = enthalpy(cf$,t=t_cf_su_cd;p=p_cf_cd)
17 M_dot_cf * (h_cf_ex_cd - h_cf_su_cd) = M_dot * (h_su_cd - h_ex_cd)
18 M_dot_cf * (h_cf_su_tp - h_cf_su_cd) = M_dot * (h_cd_l - h_ex_cd)
19 M_dot_cf * (h_cf_ex_tp - h_cf_su_cd) = M_dot * (min(h_cd_v;h_su_cd) - h_ex_cd)
20
21 T_cf_ex_cd = temperature(cf$,h=h_cf_ex_cd;p=p_cf_cd)
22 T_cf_su_tp = temperature(cf$,h=h_cf_su_tp;p=p_cf_cd)
23 T_cf_ex_tp = temperature(cf$,h=h_cf_ex_tp;p=p_cf_cd)
24
25 DELTAT_cf_cd = T_cf_ex_cd - T_cf_su_cd
26 pinch_cd = min(T_ex_cd - T_cf_su_cd;T_cd_v - T_cf_ex_tp;T_su_cd - T_cf_ex_cd)
27
28 " Pump : "
29 h_su_pp = h_ex_cd
30 v_su_pp = volume(fluid$,p=p_ex_cd;h=h_ex_cd)
31
32 s_su_pp = entropy(fluid$,p=p_ex_cd;h=h_ex_cd)
33 h_ex_pp = h_su_pp + v_su_pp*(p_su_ev-p_ex_cd)/epsilon_pp
34 "Second method:"
35 h_ex_pp_s = enthalpy(fluid$,s=s_su_pp;p=p_su_ev)
36 epsilon_pp = (h_ex_pp_s- h_su_pp)/(h_ex_pp_bis - h_su_pp)
37
38 t_ex_pp = temperature(fluid$,h=h_ex_pp;p=p_su_ev)
39
40 "Recuperator : "
41 "Pressure drop : "
42 DELTAp_vap_rec = DELTAp_cd * (h_ex_exp - h_ex_vap_rec)/(h_ex_exp - h_ex_cd)
43
44 p_ex_vap_rec = p_su_vap_rec - DELTAp_vap_rec
45
46 p_su_vap_rec = p_ex_exp
47
48 h_su_liq_rec = h_ex_pp
49 T_su_liq_rec = T_ex_pp
50 p_liq_rec = p_su_ev
51
52 H_su_vap_rec = h_ex_exp
53 T_su_vap_rec = T_ex_exp
54 p_vap_rec = (p_su_vap_rec + p_ex_vap_rec)/2
55
56 cp_liq_rec = cp(fluid$,t=t_su_liq_rec;p=p_liq_rec)
57 cp_vap_rec = cp(fluid$,t=t_su_vap_rec;p=p_vap_rec)
58
59 C_dot_liq_rec = M_dot * cp_liq_rec
60 C_dot_vap_rec = M_dot * cp_vap_rec
61
62 C_dot_min_rec = min(C_dot_liq_rec;C_dot_vap_rec)
63 C_dot_max_rec=max(C_dot_liq_rec;C_dot_vap_rec)
64 Q_dot_rec = epsilon_rec * C_dot_min_rec * (T_su_vap_rec - T_su_liq_rec)
65
66 Q_dot_rec = M_dot * (h_su_vap_rec - h_ex_vap_rec)
67 Q_dot_rec = m_dot * (h_ex_liq_rec - h_su_liq_rec)
68
69 T_ex_vap_rec = temperature(fluid$,h=h_ex_vap_rec;p=p_vap_rec)
70 T_ex_liq_rec = temperature(fluid$,h=h_ex_liq_rec;p=p_liq_rec)
71
72 "Evaporator : "
73 h_su_ev = h_ex_liq_rec
74 T_su_ev = T_ex_liq_rec
75 h_ex_ev = h_su_exp
76 h_ev_l = enthalpy(fluid$,p=p_ev_l;x=0)
77 h_ev_v = enthalpy(fluid$,p=p_ev_v;x=1)
78 p_ev_l = p_su_exp + DELTAp_ev * (h_ex_ev - h_ev_l)/(h_ex_ev - h_su_ev)
79 p_ev_v = p_su_exp + DELTAp_ev * (h_ex_ev - h_ev_v)/(h_ex_ev - h_su_ev)
80 T_ev_l = temperature(fluid$,x=0;p=p_ev_l)
81 T_ev_v = temperature(fluid$,x=1;p=p_ev_v)
82
83 "secondary fluid : "
84 h_hf_su_ev = enthalpy(hf$,t=t_hf_su_ev;p=p_hf_ev)
85 M_dot_hf * (h_hf_su_ev - h_hf_ex_ev) = M_dot * (h_ex_ev - h_su_ev)
86 M_dot_hf * (h_hf_su_ev - h_hf_ex_tp) = M_dot * (h_ex_ev - h_ev_l)
87

```

```

1 M_dot_hf * (h_hf_su_ev - h_hf_su_tp) = M_dot * (h_ex_ev - h_ev_v)
2
3 T_hf_ex_ev = temperature(hf$,h=h_hf_ex_ev;p=p_hf_ev)
4 T_rej=T_hf_ex_ev
5 T_hf_ex_tp = temperature(hf$,h=h_hf_ex_tp;p=p_hf_ev)
6 T_hf_su_tp = temperature(hf$,h=h_hf_su_tp;p=p_hf_ev)
7 DELTAT_hf_ev = T_hf_su_ev - T_hf_ex_ev
8
9 pinch_ev = min(T_hf_ex_ev - T_su_ev;T_hf_ex_tp - T_ev_l;T_hf_su_tp - T_su_exp)
10
11 "!T-s diagram :"
12 s[1] = entropy(fluid$;t=t_ex_pp;p=p_su_ev)
13 t[1] = t_ex_pp
14 p[1] = p_su_ev
15 h[1] = h_ex_pp
16
17 s[2] = entropy(fluid$;t=t_ex_liq_rec;p=p_su_ev)
18 t[2] = t_ex_liq_rec
19 p[2] = p_su_ev
20 h[2] = h_ex_liq_rec
21
22 s[3] = entropy(fluid$;p=p_ev_l;x=0)
23 t[3] = t_ev_l
24 p[3] = p_ev_l
25 h[3] = h_ev_l
26
27 s[4] = entropy(fluid$;p=p_ev_v;x=1)
28 t[4] = t_ev_v
29 h[4] = h_ev_v
30 p[4] = p_ev_v
31
32 s[5] = s_su_exp
33 t[5] = t_su_exp
34 h[5] = h_su_exp
35 p[5] = p_su_exp
36 mu[5] = viscosity(fluid$;t=t_su_exp;p=p_su_exp)
37 k[5] = conductivity(fluid$;t=t_su_exp;p=p_su_exp)
38
39
1 s[6] = entropy(fluid$;h=h_ex_exp;p=p_ex_exp)
2 t[6] = T_ex_exp
3 h[6] = h_ex_exp
4 p[6]= p_ex_exp
5 mu[6] = viscosity(fluid$;t=t_ex_exp;p=p_ex_exp)
6
7 k[6] = conductivity(fluid$;t=t_ex_exp;p=p_ex_exp)
8 rho[6] = density(fluid$;t=t_ex_exp;p=p_ex_exp)
9
10 s[7] = entropy(fluid$;h=h_ex_vap_rec;p=p_ex_vap_rec)
11 t[7] = T_ex_vap_rec
12 h[7] = h_ex_vap_rec
13 p[7]= p_ex_vap_rec
14
15 s[8] = min(s[5];entropy(fluid$;p=p_cd_v;x=1))
16 t[8] = t_cd_v
17 h[8] = min(h_ex_exp;h_cd_v)
18 p[8] = min(p_ex_exp;p_cd_v)
19
20 s[9] = entropy(fluid$;p=p_cd_l;x=0)
21 t[9] = t_cd_l
22 h[9] = h_cd_l
23 p[9] = p_cd_l
24 MM = molarmass(toluene)
25 s[10] = entropy(fluid$;h=h_ex_cd;p=p_ex_cd)
26 t[10] = t_ex_cd
27 h[10] = h_ex_cd
28 p[10] = p_ex_cd
29
30 s[11] = s[1]
31 t[11] = t[1]
32 h[11] = h[1]
33 p[11] = p[1]
34
35 "T profile in heat exchangers :"
36 T_hf[2] = T_hf_ex_ev
37 T_hf[3] = T_hf_ex_tp
38 T_hf[4] = T_hf_su_tp
39 T_hf[5] = T_hf_su_ev

```

```

1 T_cf[7] = T_cf_ex_cd
2 T_cf[8] = T_cf_ex_tp
3 T_cf[9] = T_cf_su_tp
4 T_cf[10] = T_cf_su_cd
5
6 " ! Efficiency : "
7 w_exp = (h_su_exp - h_ex_exp)*heta_exp*heta_gen
8 w_pp = (h_ex_pp - h_su_pp)/heta_motor
9 w_net = w_exp - w_pp
10
11 q_ev = h_ex_ev - h_su_ev
12 eta_cycle = (w_exp - w_pp)/q_ev
13 Spec_cons_cf=150[W-s/kg]
14 " we do not consider geothermal loop w_hf_pp=(1/density(hf$,T=T_hf_su_ev,P=P_hf_ev))*DELTA_p_hf_pp/heta_
15 hcf_pumps"
16 "for water-cooled w_cf_pp=(1/density(cf$,T=T_cf_su_cd,P=P_cf_cd))*DELTA_p_cf_pp/heta_hcf_pumps"
17 W_dot_exp=w_exp*M_dot*heta_exp*heta_gen
18 W_dot_pp=w_pp*M_dot/heta_motor
19 W_dot_fan=M_dot_cf*Spec_cons_cf
20 W_dot_net = W_dot_exp-W_dot_pp-W_dot_fan
21
22 " ! Second law efficiency:"
23 E_dot_hf = M_dot_hf * ((h_hf_su_ev - h_hf_0) - (T_0 + 273,15) * (s_hf_su_ev - s_hf_0))
24 s_hf_su_ev = entropy(hf$;h=h_hf_su_ev;p=p_hf_ev)
25 h_hf_0 = enthalpy(hf$;T=T_0;p=p_hf_ev)
26 s_hf_0 = entropy(hf$;t=t_0;p=p_hf_ev)
27
28 eta_II = W_dot_net/E_dot_hf
29
30 " ! Fluid quality at the end of the expansion : "
31 x = quality(fluid$;h=h_ex_exp;p=p_ex_exp)
32
33 "Calculation of LMTDs in the heat exchangers"
34 "OVER-ALL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS"
35 "SUPERHEATER"
36 LMTD_SH=((T_hf_su_ev-T_su_exp)-(T_hf_su_tp-T_ev_v))/Ln((T_hf_su_ev-T_su_exp)/(T_hf_su_tp-T_ev_v))
37 U_SH=600[W/m2-K]
38 Q_dot_SH=M_dot*(h_ex_ev-h_ev_v)
39 A_SH=Q_dot_SH/(U_SH*LMTD_SH)
40 "EVAPORATOR"
41 LMTD_EV=((T_hf_su_tp-T_ev_v)-(T_hf_ex_tp-T_ev_l))/Ln((T_hf_su_tp-T_ev_v)/(T_hf_ex_tp-T_ev_l))
42 U_EV=1100[W/m2-K]
43 Q_dot_EV=M_dot*(h_ev_v-h_ev_l)
44 A_EV=Q_dot_ev/(U_ev*LMTD_ev)
45 "PREHEATER"
46 LMTD_PH=((T_hf_ex_tp-T_ev_l)-(T_hf_ex_ev-T_su_ev))/Ln((T_hf_ex_tp-T_ev_l)/(T_hf_ex_ev-T_su_ev))
47 U_PH=900[W/m2-K]
48 Q_dot_PH=M_dot*(h_ev_l-h_su_ev)
49 A_PH=Q_dot_PH/(U_PH*LMTD_PH)
50
51
52 "RECUPERATOR"
53 LMTD_RE=((T_ex_vap_rec-T_su_liq_rec)-(T_su_vap_rec-T_ex_liq_rec))/Ln((T_ex_vap_rec-T_su_liq_rec)/(T_su_vap_rec-
54
55 U_RE=500[W/m2-K]
56 Q_dot_RE=M_dot*(h_ex_liq_rec-h_su_liq_rec)
57 A_RE=Q_dot_RE/(U_RE*LMTD_RE+0,0001)
58 "DESUPERHEATER"
59 LMTD_DS=((T_su_cd-T_cf_ex_cd)-(T_cd_v-T_cf_ex_tp))/Ln((T_su_cd-T_cf_ex_cd)/(T_cd_v-T_cf_ex_tp))
60 U_DS=325[W/m2-K]:" for water-cooled 600[W/m2-K]"
61 Q_dot_DS=M_dot*(h_su_cd-h_cd_v)
62 A_DS=Q_dot_DS/(U_DS*LMTD_DS)
63 "CONDENSER"
64 LMTD_CD=((T_cd_v-T_cf_ex_tp)-(T_cd_l-T_cf_su_tp))/Ln((T_cd_v-T_cf_ex_tp)/(T_cd_l-T_cf_su_tp))
65 U_CD=425[W/m2-K]:" for water-cooled 1300[W/m2-K]"
66 Q_dot_CD=M_dot*(h_cd_v-h_cd_l)
67 A_CD=Q_dot_CD/(U_CD*LMTD_CD)
68
69 "SUBCOOLER"
70 LMTD_SC=((T_cd_l-T_cf_su_tp)-(T_ex_cd-T_cf_su_cd))/Ln((T_cd_l-T_cf_su_tp)/(T_ex_cd-T_cf_su_cd))
71 U_SC=475[W/m2-K]:" for water-cooled 900[W/m2-K]"
72 Q_dot_SC=M_dot*(h_cd_l-h_ex_cd)
73 A_SC=Q_dot_SC/(U_SC*LMTD_SC)
74 "Criterion-OBJECTIVE FUNCTION"
75 A_TOTAL=A_SH+A_EV+A_PH+A_RE+A_DS+A_CD+A_SC
76

```

```

1 "COST OF EQUIPMENT"
2 CE_index_2001=397;" end 2001 "
3 CE_index_2015=556,8:" end 2015 "
4 CE_index=CE_index_2015/CE_index_2001*0,882212:"rate 1$US=0.882212Euro"
5 Mass_Factor_Scen_I=M_Geo_Scen_I/M_dot_hf
6
7 "TURBINE COST"
8 P_turb=w_exp*M_dot*heta_exp*heta_gen*Mass_factor_Scen_I/1000
9 "COST_exp=(10^(2.7051+1.4398*Log10(P_turb)-0.1776*(Log10(P_turb))^2))*(3.5)*(CE_index);Axial"
10 COST_exp=(10^(2,2476+1,4965*Log10(P_turb)-0,1618*(Log10(P_turb))^2))*(3,5)*(CE_index):"Radial"
11 COST_gen=1,4*200E03*(P_turb/5000)^0,67
12
13 "PUMP COST"
14 P_pump=w_pp*M_dot/(heta_motor)*Mass_factor_Scen_I/1000
15 Fp_pump=Max(1;10^(-0,3935+0,3957*Log10(P_su_exp/1E05)-0,00226*(Log10(P_su_exp/1E05))^2))
16
17 COST_pump=(10^(3,3892+0,0536*Log10(P_pump)+0,1538*(Log10(P_pump))^2))*(1,89+1,35*Fp_pump*1,5)*(CE_index)
18 P_fans=0,15*M_dot_cf*Mass_factor_Scen_I
19 P_total_net=P_turb-P_pump-P_fans
20
21 "EVAPORATOR COST"
22 A_evap=(A_SH+A_EV+A_PH)*Mass_factor_Scen_I
23 Fp_evap=Max(1;10^(0,03881-0,11272*Log10(P_su_exp/1E05)+0,08183*(Log10(P_su_exp/1E05))^2))
24 COST_evap=(10^(4,3247-0,303*Log10(A_evap)+0,1634*(Log10(A_evap))^2))*(1,63+1,66*Fp_evap*4,63)*(CE_index)
25 "COST_evap_PHX=(10^(4.6656-0.1557*Log10(A_evap/3)+0.1547*(Log10(A_evap/3))^2))*(0.96+1.21*1.0*4.63)*(CE_index)"
26
27 "AIR-COOLERS COST"
28 "Material CS=1.00, Al=1.42"
29 A_cond=(A_DS+A_CD+A_SC)*Mass_factor_Scen_I
30 Fp_cond=Max(1;10^(-0,125+0,15361*Log10(P_ex_exp/1E05)-0,02861*(Log10(P_ex_exp/1E05))^2))
31 COST_cond=(10^(4,0336+0,2341*Log10(A_cond)+0,0497*(Log10(A_cond))^2))*(0,96+1,21*Fp_cond*1,00)*(CE_index)
32
33 "RECUPERATOR"
34 A_rec=A_RE*Mass_factor_Scen_I
35 Fp_rec=Max(1;10^(0,03881-0,11272*Log10(P_ex_exp/1E05)+0,08183*(Log10(P_ex_exp/1E05))^2))
36 COST_rec=(10^(4,3247-0,303*Log10(A_rec)+0,1634*(Log10(A_rec))^2))*(1,63+1,66*Fp_rec*1,81)*(CE_index)
37
38 "We assume grassroots cost 20% instead of 50%, because there will be no buidlings, no waste treatment faciliti
39 We assume Total module 1.13 instead of 1.18 (=15+3%) assuming contingencies 10% instead of 15% as there are
40 only a few items of equipment"
41 TOT_Cost=(0,20+1,13)*(COST_exp+COST_gen+COST_pump+COST_evap+COST_cond+COST_rec)
42
43 "INDEXES"
44 INDEX_1_M=M_dot_hf/W_dot_net*1e06
45 "INDEX_2_A=A_TOTAL/W_dot_net*1e03"
46
47 INDEX_3_C=TOT_Cost/(W_dot_net*Mass_factor_Scen_I)
48
49 R_disc=0,08
50 L_life=30
51 PWF=((1+R_disc)^L_life-1)/((1+R_disc)^L_life*R_disc)
52 Op_Maint=0,02
53 Avail=0,90
54 Prod=P_total_net*Avail*8760
55 LCOE=(TOT_Cost/PWF+Op_Maint*TOT_Cost)/Prod
56

```