



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

***“Μελέτη και Βελτιστοποίηση Συστήματος
Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας με
Χρήση Ηλιακών Συλλεκτών Κενού”***

Πλιάκος Ορέστης

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Αθήνα, Ιούνιος 2019



National Technical University of Athens
Department of Mechanical Engineering

Diploma Thesis

***“Investigation and Optimisation of a co-generation
system for electricity and heat production using
evacuated tube solar collectors”***

Pliakos Orestis

Supervisor: Prof. Christos Tzivanidis

Athens, June 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κύριο Χρήστο Τζιβανίδη τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το παρόν θέμα, όσο και για την βοήθειά του κατά την διάρκεια της μελέτης μου.

Επίσης θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο ο οποίος με τις συμβουλές και την βοήθεια που μου παρείχε συνέβαλε, καταλυτικά, στην διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την πολύτιμη υποστήριξη κατά την διάρκεια ολόκληρης της ακαδημαϊκής μου πορείας.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	iv
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	vi
1. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	1
2. ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ.....	9
2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	9
2.1.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	9
2.1.2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	10
2.2. ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ.....	17
2.2.1. ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ.....	18
2.2.2. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ (PTC).....	19
2.2.3. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL (LFR).....	20
2.2.4. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΠΙΑΤΟ (DISH).....	21
2.2.5. ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	22
2.2.6. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ (ETC).....	24
3. ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE – ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ.....	29
3.1. ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE.....	29
3.2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	38
3.3. ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ.....	41
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	47
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	70
5.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (STEADY-STATE ANALYSIS).....	70
5.2. ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	80
5.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	92
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	98



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών κενού (ETC). Πιο συγκεκριμένα η προς μελέτην εγκατάσταση αποτελείται από μία σειρά ηλιακών συλλεκτών κενού οι οποίοι μέσω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας θερμαίνουν ένα εργαζόμενο ρευστό, το οποίο σε αυτήν την ανάλυση είναι θερμικό έλαιο. Εν συνεχεία το ρευστό αυτό αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή η οποία τροφοδοτεί με την σειρά της έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Ο λέβητας αυτός συνδέεται με έναν οργανικό κύκλο Rankine ο οποίος χρησιμεύει για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κομμάτι αυτό αποτελεί το πρώτο μέρος της συμπαραγωγής ενέργειας. Το δεύτερο μέρος είναι η παραγωγή θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας που και αυτός συνδέεται με την αποθηκευτική δεξαμενή. Ο εναλλάκτης αυτός χρησιμεύει για την θέρμανση νερού χρήσης. Η εγκατάσταση αφορά στην τροφοδότηση κατοικίας και τα μεγέθη που μελετώνται είναι για οικιακής κλίμακας ενεργειακή ζήτηση. Η μελέτη και η προσομοίωση της εγκατάστασης έγιναν με την βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων, και συγκεκριμένα των προγραμμάτων Engineering Equations Solver (EES) και MATLAB.

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση της ενεργειακής κατάστασης που επικρατεί αυτή την στιγμή στον πλανήτη, δεδομένου ότι η ενέργεια αποτελεί έναν βασικό πυλώνα για την ευημερία και την ανάπτυξη της κοινωνίας. Παρουσιάζεται η κατανομή της ηλεκτροπαραγωγής στις διάφορες ενεργειακές πηγές καθώς και η πορεία της στο πέρασμα του χρόνου. Επιπλέον παρουσιάζονται οι βασικότερες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η εξέλιξη τους τις τελευταίες δεκαετίες. Επίσης παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η ηλιακή ενέργεια και οι τύποι των ηλιακών συλλεκτών που υπάρχουν. Αρχικά γίνεται περιγραφή των ηλιακών ακτινοβολιών που υπάρχουν καθώς επίσης και των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για να τις προσεγγίσουν. Επίσης παρουσιάζονται και τα κλιματολογικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας και κυρίως η προσπίπτουσα ολική ακτινοβολία και η θερμοκρασιακή κατανομή κατά την διάρκεια του έτους. Το δεύτερο κομμάτι του κεφαλαίου αυτού αφορά στην αναλυτική παρουσίαση των διάφορων τύπων συλλεκτών που υπάρχουν αυτή την στιγμή σε εμπορικό επίπεδο. Παρουσιάζονται ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, ο παραβολικός συλλέκτης, ο γραμμικός συλλέκτης Fresnel, ο παραβολικός συλλέκτης τύπου πιάτο, ο πύργος ισχύος και, φυσικά, ο ηλιακός συλλέκτης κενού εκτενέστερα, καθώς αφορά την λειτουργία της παρούσας εγκατάστασης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται την λειτουργία του οργανικού κύκλου Rankine. Γίνεται μία ιστορική αναδρομή των ORC, περιγράφεται η βασική δομή της λειτουργίας τους μαζί με τις πιθανές παραλλαγές, που μπορεί να υπάρχουν καθώς επίσης και οι σημαντικότερες εφαρμογές τους. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται η λειτουργία και οι βασικότεροι τύποι εναλλακτών θερμότητας. Τέλος γίνεται μία σύγκριση όλων των πιθανών εργαζόμενων μέσων τόσο για τον οργανικό κύκλο Rankine όσο και για τον ηλιακό συλλέκτη κενού.

Εν συνεχεία, στο κεφάλαιο τέσσερα περιγράφεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε κατά την διεξαγωγή της μελέτης της εγκατάστασης. Περιγράφονται όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης ξεχωριστά, τόσο με εξισώσεις όσο και σχηματικά και επιπλέον ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται όλα τα τμήματα. Έπειτα γίνεται η περιγραφή των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης και αναφέρονται οι εξισώσεις με τις οποίες αυτά προκύπτουν. Επίσης στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών που έχουν διεξαχθεί και σχετίζονται με την συγκεκριμένη μελέτη.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Ακολουθεί το κεφάλαιο πέντε το οποίο περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την διεξαγωγή της μελέτης. Το πρώτο κομμάτι αφορά στην μελέτη της σταθερής κατάστασης λειτουργίας η οποία προσομοιώθηκε με το σύστημα Engineering Equation Solver (EES). Το δεύτερο κομμάτι προσομοιώθηκε με την βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB και αφορά στην λειτουργία σε μεταβαλλόμενο φορτίο θέρμανσης, ηλεκτρισμού καθώς και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (για την περιοχή της Αθήνας). Το τρίτο και τελευταίο κομμάτι παρουσιάζει την οικονομική αξιολόγηση μίας τέτοιας επένδυσης μέσω τεσσάρων δεικτών οι οποίοι είναι ο δείκτης καθαρής παρούσας αξίας (NPV), ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (IRR), η περίοδος αποπληρωμής (PP) και η απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής (SPP).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη παρουσιάζονται στο έκτο κεφάλαιο μαζί με προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Από την μελέτη της σταθερής κατάστασης οδηγούμαστε σε συμπεράσματα που χρησιμεύουν εν συνεχεία στην λειτουργία με μεταβαλλόμενο φορτίο. Συγκεκριμένα προκύπτει ως βέλτιστο εργαζόμενο μέσο για τον οργανικό κύκλο Rankine το κυκλοεξάνιο (cyclohexane) με την λειτουργία του κύκλου να γίνεται για 110°C και με υπερθέρμανση 3.6°C . Ακόμα η γεννήτρια ρυθμίζεται ώστε να έχει καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ όταν λειτουργεί ίση με 4.4 kW. Έπειτα εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα στην μεταβαλλόμενη κατάσταση οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως για τις ανάγκες που υπάρχουν η βέλτιστη τιμή του όγκου της αποθηκευτικής δεξαμενής είναι $V=1.5\text{m}^3$ και της συλλεκτική επιφάνειας είναι $A_{\text{col}}=100\text{m}^2$, καθώς όσο μεγαλύτερη συλλεκτική επιφάνεια έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι η ετήσια παραγόμενη ενέργεια αλλά λιγότερο αποδοτικά. Τέλος για την θερμοκρασία κορεσμού δεν προκύπτει βέλτιστη τιμή στα θερμοκρασιακά πλαίσια που μελετήθηκαν καθώς όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο αποδοτικότερα λειτουργεί η εγκατάσταση. Η θερμοκρασία κορεσμού ορίζεται σταθερή $T_{\text{sat}}=110^{\circ}\text{C}$, διότι τα εργαζόμενα μέσα υπόκεινται σε θερμοκούς περιορισμούς. Η οικονομική αξιολόγηση “επωφέλησε” τις μεγάλες μεγέθους εγκαταστάσεις με τους οικονομικούς δείκτες να αυξάνονται με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας αλλά κυρίως με την αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την εγκατάσταση της εργασίας. Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης $\eta_{\text{en}}=13.38\%$, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης $\eta_{\text{ex}}=10.50\%$, ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια $E_{\text{el}}=15.44\text{MWh}$, η καθαρή παρούσα αξία $\text{NPV}=10.962\text{€}$, ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης $\text{IRR}=5,034\%$, περίοδος αποπληρωμής $\text{PP}=16.6$ χρόνια και απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής $\text{SPP}=14.1$ χρόνια.



ABSTRACT

The objective of this study is the investigation of a system which uses evacuated tube collectors (ETC) to transform solar irradiation into thermal energy and co-generate electrical and thermal power. More specifically, the installation consists of a number of evacuated tube solar collectors which absorb the incident solar irradiation in order to heat a working fluid, which specifically in this study is thermal oil. This fluid is stored in a storage tank and it is used to supply a heat resource system (HRS). This system is connected with an installation of an organic Rankine cycle (ORC) which is used to produce electric energy. This is the one half of the co-generation system. The other half concerns the production of thermal energy via a heat exchanger which is also connected with the storage tank. The heat exchanger is responsible for the production of hot water for use. The whole installation is about the energy supply of a home so the magnitude is for home-scale energy demand. The study and the simulation of the installation were held with the help of computer programs and specifically Engineering Equation Solver (EES) and MATLAB.

More detailed in the first chapter a review of the current energy situation takes place, considering that energy constitutes one of the most important pillars for the well-being and the development of our society. The allocation of electric energy production by source is presented, as well as the procedure throughout the years. In addition, the most important renewable energy sources are examined in terms of installed capacity as well as their evolution in the last decades. Also for those renewable sources, there are advantages and disadvantages that are mentioned.

The next chapter analyzes thoroughly the solar energy and the types of solar collectors that exist. First, there is a description of solar irradiation types as well as the models that are used to approximate them. Moreover, the weather data for the city of Athens are presented mainly for solar irradiation and temperature distribution throughout the year. The second part of this chapter concerns the detailed presentation of the various types of solar collectors that exist in the market. The types of collectors that are presented are the Flat Plate Collector (FPC), Parabolic Trough Collector (PTC), Linear Fresnel Reflector (LFR), Parabolic Dish Collector, Solar Power Tower and of course the Evacuated Tube Collector (ETC) which is used in this specific installation.

The third chapter contains a description of the function of an Organic Rankine Cycle. First, there is a chronology for organic Rankine cycles, and the basic concepts of their structure and function, followed by the variations that exist in their application. In addition to that, heat exchangers are also examined in terms of different types of flow and structure. At last, a comparison between different working fluids for the ORC and the solar collector takes place.

Following, in chapter four there is a description of the methodology which was followed during the examination of the installation. All the individual systems are illustrated both with equations and with graphs and then the way that all of them are combined into the final system. Very important are also the criteria of financial evaluation which are presented along with the formulas that calculate them. Another part of this chapter is about a review of annotated literature, which has a significant relationship with this study.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Next, the fifth chapter contains all the results that emerged from the simulation. The first part contains the charts that are about the steady-state situation, which was simulated with the help of Engineering Equation Solver (EES). The second part is about the variable input conditions in terms of thermal and electrical production and weather data (for Athens), and it was simulated using the programming environment “MATLAB”. The third and last part of this chapter presents the financial evaluation via four indexes which are the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR), the Payback Period (PP) as well as the Simplified Payback Period (SPP).

The conclusions that came of the current study are depicted in the sixth chapter along with suggestions for future studies. From the examination of the steady state, the most efficient working fluid for the organic Rankine cycle was cyclohexane, functioning at a saturation temperature of 110°C and superheating of 3.6°C. Apart from that, the generator is calibrated to produce net electric power equal to 4.4 kW during all the time of operation. Exploiting those results for dynamic conditions simulation, the conclusion is for the studied installation the best volume of the storage tank is $V=1.5 \text{ m}^3$ and for the collector area $A_{col}=100 \text{ m}^2$. Furthermore, it is found that the increase in the collecting area leads to higher annual energy production but also to lower efficiency. As for the saturation temperature an optimal value is not achieved within the limits that are tested. Therefore the saturation temperature is set at $T_{sat}=110^\circ\text{C}$ because the working fluids are subject to thermal restrictions. The financial evaluation was beneficial for larger scale installations, with the indexes increasing accordingly to the increase of saturation temperature and less importantly the collector area. Indicative final results are the energetic efficiency $\eta_{en}=13.38\%$, the exergetic efficiency $\eta_{ex}=10.50\%$, the annual energy production $E_{el}=15.44 \text{ MWh}$, the net present value $NPV=10.962\text{€}$, the internal rate of return $IRR=5.03\%$, the payback period $PP= 16.6$ years and the simplified payback period $SPP=14.1$ years.



ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Αγγλικά σύμβολα

A_{col}	Συνολική επιφάνεια συλλεκτών κενού
A_{st}	Επιφάνεια αποθηκευτικού δοχείου
CF	Χρηματοροή (cash-flow)
C_o	Κόστος επένδυσης
C_p	Θερμοχωρητικότητα
$C_{O\&M}$	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας
D	Διάμετρος αποθηκευτικού δοχείου
DR	Ημερήσια μεταβολή θερμοκρασίας
E_{el}	Ετήσια παραγόμενη ενέργεια
G_T	Προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου
h	Ενθαλπία
h_{is}	Ενθαλπία ισεντροπικής μεταβολής
IRR	Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης επένδυσης
K	Συνολικός συντελεστής τροποποίησης του οπτικού βαθμού απόδοσης
K_{HEX}	Κόστος εναλλάκτη θερμότητας
K_C	Κόστος ηλιακών συλλεκτών κενού
K_{el}	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας
K_L	Συντελεστής τροποποίησης οπτικού βαθμού απόδοσης κατά την επιμήκη κατεύθυνση
K_{ORC}	Κόστος οργανικού κύκλου Rankine
K_{heat}	Τιμή πώλησης ψυκτικής μονάδας ενέργειας
K_T	Συντελεστής τροποποίησης οπτικού βαθμού απόδοσης κατά την εγκάρσια κατεύθυνση
K_V	Κόστος αποθηκευτικού δοχείου
L	Μήκος αποθηκευτικού δοχείου
m_{col}	Παροχή μάζας στον συλλέκτη
m_{hrs}	Παροχή μάζας στο heat recovery system
m_{orc}	Παροχή μάζας στο ORC
N	Έτη οικονομικής μελέτης επένδυσης
N_D	Διάρκεια ημέρας
NPV	Καθαρή παρούσα αξία
r	Επιτόκιο αναγωγής
p_{crit}	Κρίσιμη πίεση εργαζόμενου ρευστού
P_G	Ισχύς γεννήτριας
P_{net}	Ηλεκτρική ισχύς
p_{high}	Χαμηλή πίεση θερμοδυναμικού κύκλου
p_{low}	Υψηλή πίεση θερμοδυναμικού κύκλου
P_{net}	Καθαρή ηλεκτρική ισχύς
pp	Pinch Point
PP	Περίοδος αποπληρωμής
Q_{eco}	Θερμότητα οικονομητήρα



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Q_{evap}	Θερμότητα ατμοποίησης
Q_{heat}	Θερμότητα εναλλάκτη
Q_{loss}	Απώλειες θερμότητας στην αποθηκευτική δεξαμενή
Q_{ORC}	Θερμότητα ORC
Q_s	Ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας
Q_{SH}	Θερμότητα υπερθέρμανσης
Q_u	Ωφέλιμη θερμότητα συλλέκτη
R	Συντελεστής αναγωγής
s	Εντροπία
SPP	Απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής
T_{am}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
$T_{\text{col, in}}$	Θερμοκρασία εισόδου στον συλλέκτη
$T_{\text{col, out}}$	Θερμοκρασία εξόδου από τον συλλέκτη
$T_{\text{hrs, in}}$	Θερμοκρασία εισόδου στο Heat Recovery System
$T_{\text{hrs, out}}$	Θερμοκρασία εξόδου από το Heat Recovery System
T_{sat}	Θερμοκρασία κορεσμού
T_{st}	Θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου στο αποθηκευτικό δοχείο
U_t	Συντελεστής θερμικών απωλειών αποθηκευτικού δοχείου
V	Όγκος αποθηκευτικής δεξαμενής
w_p	Ισχύς αντλίας

Ελληνικά σύμβολα

δ	Ηλιακή απόκλιση
ΔT_{rc}	Θερμοκρασιακή διαφορά θερμού και ψυχρού ρεύματος στον ανακομιστή
ΔT_{SH}	Υπερθέρμανση εργαζόμενου μέσου
θ_L	Προβολή της γωνίας πρόσπτωσης στην επιμήκη κατεύθυνση του συλλέκτη
θ_T	Προβολή της γωνίας πρόσπτωσης στην εγκάρσια κατεύθυνση του συλλέκτη
θ_Z	Γωνία ζενίθ
η_{col}	Βαθμός απόδοσης συλλέκτη
η_{el}	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης
η_{en}	Ενεργειακός βαθμός απόδοσης
η_{hex}	Βαθμός απόδοσης εναλλάκτη θερμότητας
$\eta_{is,T}$	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου
η_{mg}	Ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης
η_{motor}	Βαθμός απόδοσης αντλίας
η_{orc}	Βαθμός απόδοσης οργανικού κύκλου Rankine
Π_T	Λόγος πίεσης στροβίλου
ρ	Πυκνότητα
ω	Ωριαία γωνία



1. ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η ενέργεια αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πυλώνα στην καθημερινή μας ζωή και η ύπαρξή της θεωρείται προαπαιτούμενο για την οικονομική ανάπτυξη και την ευημερία του πολιτισμού μας. Ο κόσμος γίνεται γρήγορα ένα παγκόσμιο χωριό λόγω της αυξανόμενης καθημερινής ζήτησης ενέργειας από όλο τον πληθυσμό. Η ανάγκη για ενέργεια και για την ικανοποίηση της ανθρώπινης κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης, της ευημερίας και της υγείας αυξάνεται. Η επιστροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλει στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής και αποτελεί μια εξαιρετική προσέγγιση προς την βιώσιμη ανάπτυξη η οποία θα εξασφαλίζει την ενεργειακή κάλυψη των επόμενων γενεών.

Βιώσιμη ή αειφόρος ανάπτυξη είναι η ανάπτυξη για την επίτευξη των στόχων της ανθρώπινης ανάπτυξης, διατηρώντας ταυτόχρονα την ικανότητα των φυσικών συστημάτων να παρέχουν τους φυσικούς πόρους από τους οποίους εξαρτώνται η οικονομία και η κοινωνία. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μια κοινωνική κατάσταση όπου οι συνθήκες διαβίωσης και η χρήση των πόρων συνεχίζουν να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του ανθρώπου χωρίς να υπονομεύεται η ακεραιότητα και η σταθερότητα του φυσικού συστήματος. Η αειφόρος ανάπτυξη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ανάπτυξη που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους [1.1]. Η βιώσιμη ανάπτυξη αποτελεί έναν πρωταρχικό στόχο στα περισσότερα κράτη και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν σημαντική συμβολή στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Η βασική έννοια της ανανεωσιμότητας των ΑΠΕ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της αειφόρου ανάπτυξης και την προσπάθεια της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Όλο και περισσότερο οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στις τρεις κύριες συνιστώσες της αειφόρου ανάπτυξης: στην οικονομία, το περιβάλλον και στην κοινωνική ευημερία. Θα πρέπει, βεβαίως, να τονιστεί ότι καμία μορφή ενέργειας, όσο ανανεώσιμη και «καθαρή» και αν είναι, δεν έχει μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.



Εικόνα 1-1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [1.2]

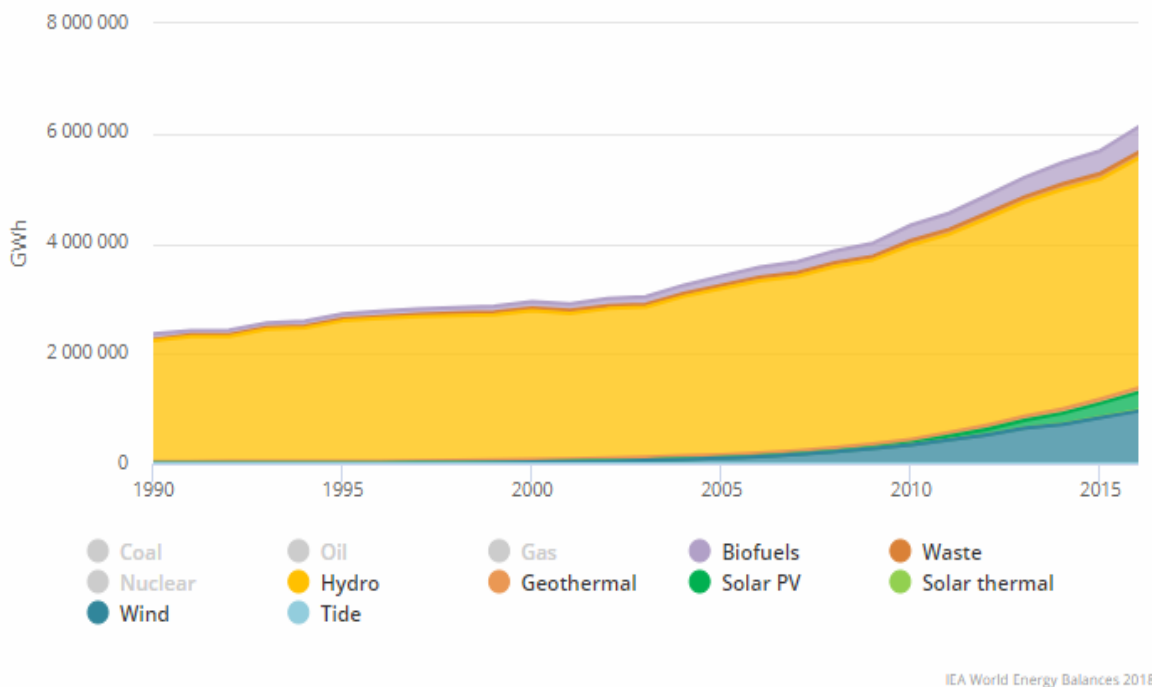


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας θεωρούνται οι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού η ηλιακή ακτινοβολία και άλλες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, βρίσκονται διάσπαρτες σε όλα τα μήκη και πλάτη της Γης και ανανεώνονται διαρκώς με τον ίδιο ή μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που καταναλώνονται, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους.

Ενδιαφέρον και σημαντική ώθηση στις ΑΠΕ σημειώθηκε αρχικά στη δεκαετία του '70, με «ωθούσα» δύναμη την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Μόλις όμως ξεπεράστηκε η κρίση, η ώθηση αυτή σταμάτησε, τουλάχιστον για ορισμένες ΑΠΕ. Μέρος αυτής της τελμάτωσης οφειλόταν και στα τεχνολογικά προβλήματα που προέκυψαν. Από το 1990 και μετά ξαναπαρουσιάστηκε ενδιαφέρον για τις ΑΠΕ, αυτή την φορά λόγω της ευαισθητοποίησης της κοινωνίας για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εκτεταμένης χρήσης ορυκτών καυσίμων [1.3].

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η πορεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 1990 μέχρι το 2016.



Εικόνα 1-2: Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή, 1990-2016 [1.4]

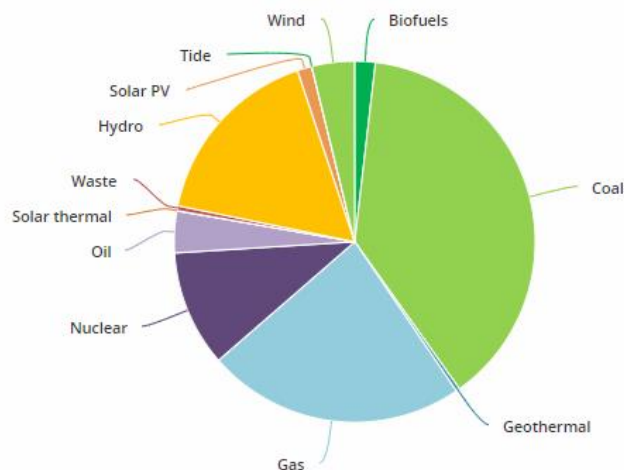
Παρατηρούμε πως το μεγαλύτερο μερίδιο καταλαμβάνουν τα υδροηλεκτρικά έργα. Ακολουθεί η αιολική ενέργεια που παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Όσον αφορά στο μερίδιο της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι ΑΠΕ έχουν ακόμα σχετικά μικρό ποσοστό όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Όμως παρά το γεγονός αυτό, αποτελούν την πιο πολλά υποσχόμενη λύση για το ενεργειακό πρόβλημα.

World 2016



IEA Electricity Information 2018

Εικόνα 1-3: Κατανομή Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας ανα Πηγή, 2016 [1.4]

Συνοπτικά μπορούν να παρουσιασθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΑΠΕ ως εξής:

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- ✓ Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- ✓ Δεν πρόκειται να εξαντληθούν πρακτικά ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- ✓ Μπορούν να βοηθήσουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών.
- ✓ Αποτελούν ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του τοπικού πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- ✓ Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
- ✓ Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- ☒ Έχουν ένα αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κεφάλαιο και μεγάλη επιφάνεια Γης.
- ☒ Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτώνται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- ☒ Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών.
- ☒ Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



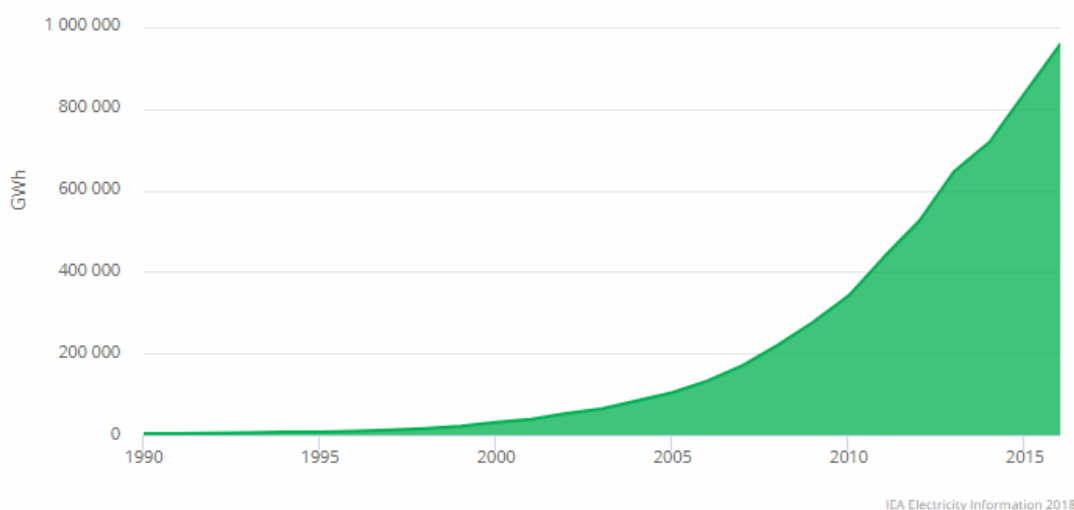
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η αιολική ενέργεια είναι άφθονη, αποκεντρωμένη και με μηδενικό κόστος. Επίσης κατά την παραγωγή ενέργειας από την ισχύ του ανέμου δεν παράγονται ρύποι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι αμελητέες σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν από την εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων.

Οι πρώτες εφαρμογές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας παρουσιάζονται κατά την αρχαιότητα μέσω των πρώτων ιστιοφόρων με τα οποία οι θαλασσοπόροι χρησιμοποιούσαν τους δυνατούς ανέμους που επικρατούσαν στις θάλασσες για να κινήσουν τα καράβια. Η πρώτη επίγεια κατασκευή που λειτουργούσε μέσω του ανέμου ήταν ο ανεμόμυλος. Μέσω αυτών οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τους ανέμους για να αλέσουν δημητριακά και να αντλήσουν νερό. Στη σύγχρονη εποχή οι παραπάνω εφαρμογές, πλην ορισμένων εξαιρέσεων, έχουν αντικατασταθεί από τις ανεμογεννήτριες.

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του 4.14% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Με την προσθήκη 53.9 GW ανεμογεννητριών μέσα στο 2018 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως έφτασε τα 600 GW. Τις χρονιές 2017 και 2018 παρουσιάστηκε μία αύξηση 10 % στην συνολική εγκατεστημένη ισχύ.

Η Κίνα με πάνω από 188 GW ($\approx 35\%$ της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος) αποτελεί την χώρα με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ αιολικών παγκοσμίως. Στην Ευρώπη το μεγαλύτερο μερίδιο έχει η Γερμανία με 56 GW ($\approx 10.5\%$). Η Ελλάδα βρίσκεται στην 24^η θέση στην παγκόσμια κατάταξη με μόλις 2651 MW ανεμογεννητριών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Δανία έχει επιτύχει την παραγωγή του 42.1% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Το ποσοστό αυτό είναι το μεγαλύτερο που έχει επιτευχθεί θέτοντας την Δανία πρωτοπόρο στην διείσδυση των αιολικών στο ενεργειακό μίγμα.



Εικόνα 1-4: Παγκόσμια Παραγωγή Ενέργειας από Ανεμογεννήτριες 1990-2016 [1.4]



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Γεωθερμία ή γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

α) Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της Γης.

β) Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο έχει η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την κάλυψη αναγκών του, καθώς είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις.

- ✚ Η υψηλής ενθαλπίας (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✚ Η μέσης ενθαλπίας (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού
- ✚ Η χαμηλής ενθαλπίας (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Υδροηλεκτρική είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική ενέργεια μέσα σε βαρυτικό πεδίο με τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη συνέχιση της ροής του ελεύθερου νερού, και αποδίδεται ως κινητική μέσω της υδατόπτωσης. Η κινητική ενέργεια, στη συνέχεια, μπορεί είτε να χρησιμοποιείται αυτούσια (π.χ. νερόμυλοι), είτε να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ώστε τελικά να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις.

Μέσω της υδροηλεκτρικής ενέργειας παράγεται το 18 % της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των Α.Π.Ε. με ποσοστό που αγγίζει το 70 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των ανανεώσιμων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα. Η Κίνα καθώς είναι η πρώτη χώρα στα υδροηλεκτρικά έργα έχει κατασκευάσει το μεγαλύτερο και άλλα δύο από τα δέκα μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα.

#	Όνομα	Χώρα	Εγκατεστημένη Ισχύς [GW]
1	Three Gorges Dam	 China	22.50
2	Itaipu Dam	 Brazil  Paraguay	14.00
3	Xiluodu	 China	13.86
4	Guri	 Venezuela	10.24
5	Tucuruí	 Brazil	8.37
6	Grand Coulee	 United States	6.81
7	Xiangjiaba	 China	6.45
8	Longtan Dam	 China	6.43
9	Sayano–Shushenskaya	 Russia	6.40
10	Krasnoyarsk	 Russia	6.00

Εικόνα 1-5: Μεγαλύτερα υδροηλεκτρικά έργα παγκοσμίως [1.5]



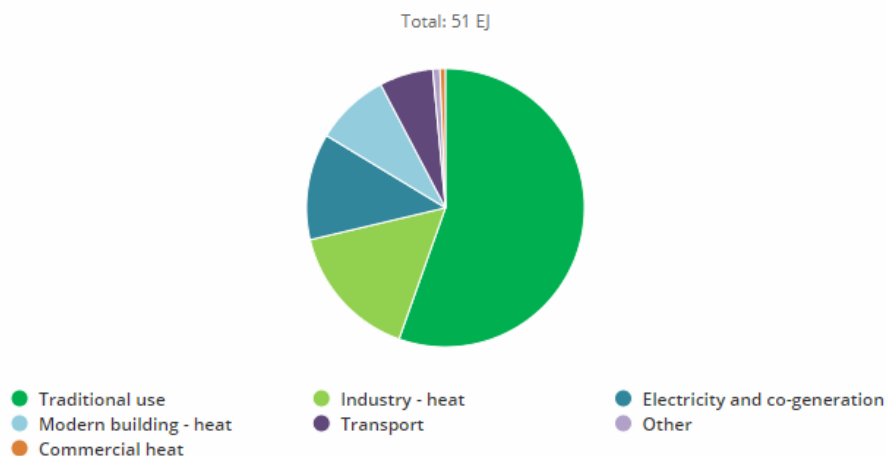
ΒΙΟΜΑΖΑ

Η ενέργεια της βιομάζας είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης. Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και τη μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.

Η βιομάζα είναι η πιο παλιά και διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ο πρωτόγονος άνθρωπος, για να ζεσταθεί και να μαγειρέψει, χρησιμοποίησε την ενέργεια (θερμότητα) που προερχόταν από την καύση των ξύλων, που είναι ένα είδος βιομάζας. Αλλά και μέχρι σήμερα, κυρίως οι αγροτικοί πληθυσμοί, τόσο της Αφρικής, της Ινδίας και της Λατινικής Αμερικής, όσο και της Ευρώπης, για να ζεσταθούν, να μαγειρέψουν και να φωτιστούν χρησιμοποιούν ξύλα, φυτικά υπολείμματα (άχυρα, πριονίδια, άχρηστους καρπούς ή κουκούτσια κ.ά.) και ζωικά απόβλητα (κοπριά, λίπος ζώων, άχρηστα αλιεύματα κ.ά.).

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η εκμετάλλευση της βιομάζας ανα τομέα. Η σημαντικότερη εκμετάλλευση της βιομάζας παραμένει η παραδοσιακή μορφή η οποία όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, μαγείρεμα καθώς και φωτισμό.

Consumption of biomass and waste resources by end use in 2015



IEA. All rights reserved.

Source: IEA (2017) *Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy*

Εικόνα 1-6: Κατανάλωση Βιομάζας ανα Κλάδο [1.4]



ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι ωκεανοί καταλαμβάνουν περισσότερα από τα δυο τρίτα της επιφάνειας του πλανήτη αντιπροσωπεύοντας μία θεωρητικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του τεράστιου θαλάσσιου δυναμικού παραμένει ακόμα σε θεωρητικό επίπεδο καθώς οι υπάρχουσες τεχνολογίες δεν είναι οικονομικά βιώσιμες. Το γεγονός όμως ότι το διαθέσιμο δυναμικό ξεπερνάει το 225 Εξαζουλες και το τεχνικά αξιοποιήσιμο τα 16 Εξαζουλες, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θαλάσσια ενέργεια διαθέτει ιδιαίτερα καλές προοπτικές.



Εικόνα 1-7: Θαλάσσια Ενέργεια [1.6]

Οι βασικότερες πηγές θαλάσσιας ενέργειας είναι:

- ✚ Ενέργεια των κυμάτων, προκύπτει από την επίδραση του πνέοντος ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας.
- ✚ Παλιρροιακή ενέργεια, οφείλεται σε βαρυτικές δυνάμεις μεταξύ Γης και σελήνης καθώς επίσης και στις δυνάμεις Coriolis που προκαλούνται λόγω της περιστροφικής κίνησης της Γης.
- ✚ Ωσμωτική Ενέργεια, είναι η έκλυση λανθάνουσας θερμότητας λόγω της διαφοράς αλμυρότητας μεταξύ του γλυκού και του θαλασσινού νερού.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1.1] www.iisd.org/topic/sustainable-development

[1.2] marketbizgroup.com/2019/03/07/global-renewable-energy-market-to-expand-2019/

[1.3] Μ. Στέργιου, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανάλυση χρηματοοικονομικών καταστάσεων, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2018

[1.4] www.iea.org

[1.5] en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_hydroelectric_power_stations

[1.6] www.engineersjournal.ie/2014/01/16/three-developments-to-improve-wave-energy-technologies/



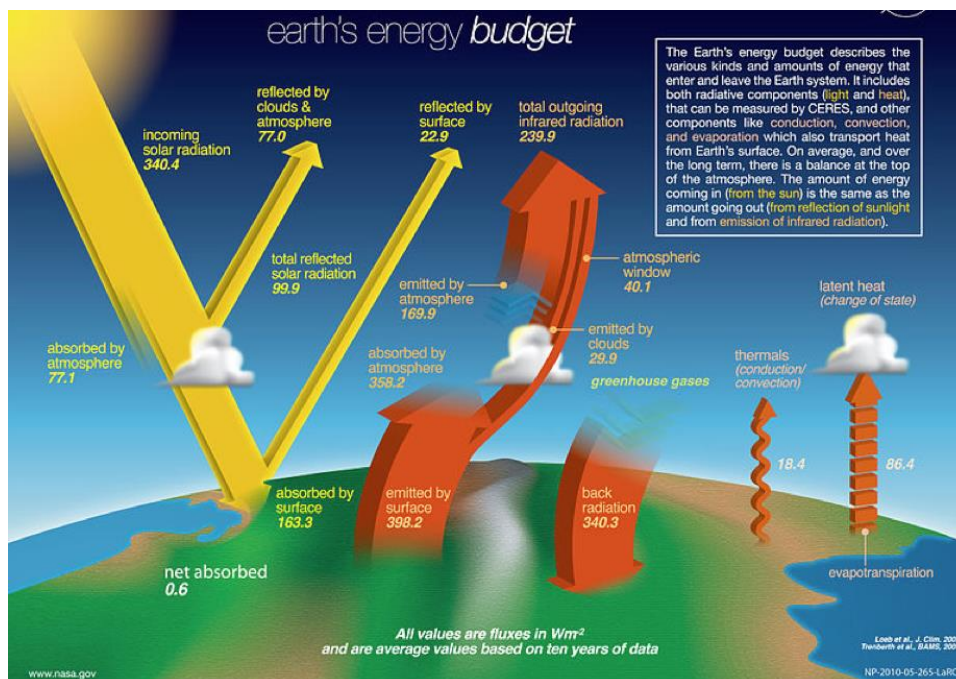
2. ΗΛΙΟΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1.1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από το φως που ακτινοβολεί ο ήλιος προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα μέρος αυτής σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην Γη είναι υπερμεγέθης. Ενδεικτικά εκτιμάται ότι η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην Γη σε μία ώρα είναι αρκετή ώστε να καλύψει τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες για έναν χρόνο. Δυστυχώς όμως η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια αποτελεί μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής διότι υπάρχουν ανασταλτικοί παράγοντες όπως τα σύννεφα, το έδαφος που απορροφάει ακτινοβολία και το γεγονός ότι μεγάλο μέρος αυτής προσπίπτει σε ωκεανούς.

Η ηλιακή ενέργεια που καταφθάνει στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας εκτιμάται ότι είναι 1367 W/m^2 . Από αυτήν σε μία καθαρή μέρα (χωρίς νέφωση) περίπου 1000 Watt/m^2 θα φτάσουν στην επιφάνεια της Γης λόγω των προστατευτικών στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται η πορεία της ενέργειας του ήλιου από την στιγμή που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα μέχρι να εξέλθει.



Εικόνα 2-1: Πορεία Της Ηλιακής Ενέργειας Μέσα Στην Ατμόσφαιρα [2.1]

Η ηλιακή ενέργεια, πέρα από τα άμεσα οφέλη της εκμετάλλευσης της, είναι υπεύθυνη και για την ύπαρξη των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια είναι η κίνηση του αέρα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας η οποία δημιουργείται επειδή ο ήλιος θερμαίνει διαφορετικές μεριές του πλανήτη. Η υδροηλεκτρική ενέργεια βασίζεται στον κύκλο του νερού ο οποίος προκαλείται λόγω της εξάτμισης του νερού που οφείλεται στην ηλιακή ενέργεια.

Μπορούμε λοιπόν να εκμεταλλευτούμε τα τεράστια αυτά ποσά ενέργειας που προσφέρονται από τον ήλιο για να παράξουμε θερμότητα, φως καθώς επίσης και ηλεκτρικό ρεύμα. Οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας περιγράφονται στην συνέχεια.



2.1.2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η ισχύς ανα μονάδα επιφάνειας (W/m^2) που παραλαμβάνει η Γη από τον Ήλιο σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παραλαμβάνονται προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός σώματος, ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του σώματος αυτού. Συχνά είναι χρήσιμη η μελέτη της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην Γη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (J/s).

Η ακτινοβολία μπορεί να μετρηθεί στο διάστημα ή στην επιφάνεια της Γης μετά από ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση. Η ακτινοβολία στο διάστημα είναι μια συνάρτηση της απόστασης από τον Ήλιο και του ηλιακού κύκλου. Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης εξαρτάται επιπλέον από την κλίση της επιφάνειας μέτρησης, το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η μελέτη και η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει αρκετές σημαντικές εφαρμογές, όπως η πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από τους ηλιακούς σταθμούς, τα φορτία θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων καθώς και η κλιματική μοντελοποίηση και η πρόγνωση του καιρού.

Μακροχρόνιες μελέτες έδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία δεν μεταβάλλεται αισθητά. Στην πραγματικότητα δεχόμαστε ότι είναι σταθερή, αφού η ηλιακή ενέργεια δημιουργείται σε μια κεντρική περιοχή του ήλιου που δέχεται μηδαμινές μεταβολές για μακρές περιόδους. Αυτή η σταθερή τιμή ονομάζεται ηλιακή σταθερά και ορίζεται ως: «το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει κάθετα στην μονάδα της επιφάνειας, που τοποθετείται στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας, ανά μονάδα χρόνου κι όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση της από τον ήλιο» (περίπου στα 1.4968×10^8 km). Η τιμή της έχει οριστεί στα $G_{sc} = 1367 W/m^2$ [2.2].

Τα τεράστια ποσά ενέργειας που παράγονται στο κέντρο του ήλιου, είναι αδύνατον να φτάσουν ακέραια στην ατμόσφαιρα της γης, πόσο μάλλον στην επιφάνεια της γης. Λόγω αστρονομικών και γεωγραφικών παραγόντων, που θα αναλύσουμε αργότερα, η ηλιακή ακτινοβολία περιορίζεται, ενώ λόγω απορρόφησης και σκέδασης της στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας υφίσταται περαιτέρω εξασθένηση.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης κατηγοριοποιείται σύμφωνα με τις μεταβολές που υφίσταται στην πορεία της μέχρι την πρόσπτωση στο προς μελέτη σώμα [2.3].

Η σημαντικότερη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας είναι η **άμεση ακτινοβολία (direct radiation)**. Άμεση ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η επόμενη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζεται **διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation)**. Διάχυτη ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην Γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά την διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ο συνδυασμός της άμεσου και της διαχύτου ακτινοβολίας ονομάζεται **ολική ακτινοβολία (global radiation)**. Σε αυτή συμπεριλαμβάνεται και η ανακλώμενη ακτινοβολία από παρακείμενες επιφάνειες.

Ορισμένες φορές είναι χρήσιμη η γνώση της **ακτινοβολίας καθέτου επιπέδου**. Ακτινοβολία καθέτου επιπέδου είναι η ακτινοβολία που δέχεται το επίπεδο που είναι κάθετο στις ηλιακές ακτίνες.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

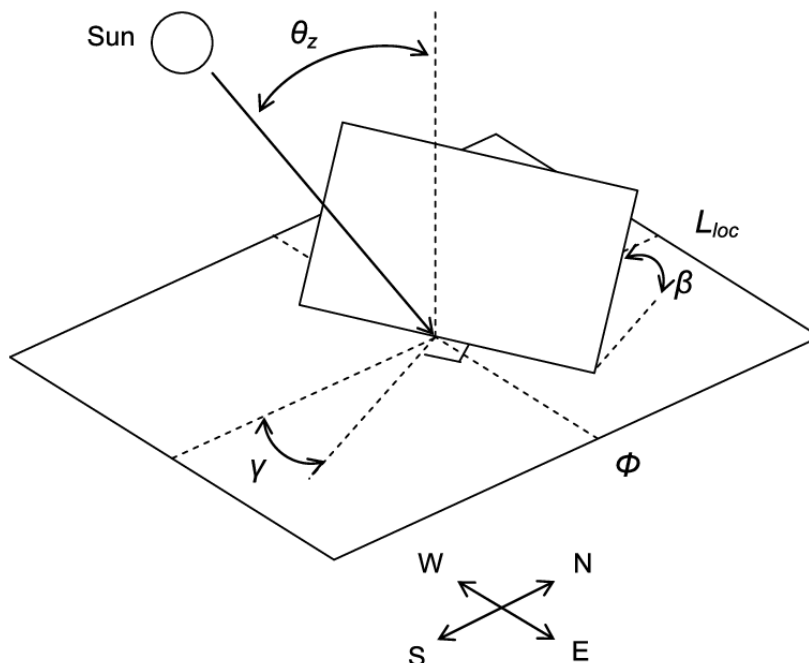
Πέρα από τα είδη των ακτινοβολιών είναι σημαντικό να ορισθούν και ορισμένες γωνίες οι οποίες είναι πολύ σημαντικές στην μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Γωνία ζενίθ (θ_z) : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφη και την ευθεία όρασης του ηλίου.

Ηλιακό ύψος ($\alpha = 90^\circ - \theta_z$) : Είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

Αζιμούθιο επιφάνειας (γ) : Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης. Η τιμή του αζιμούθιου κυμαίνεται μεταξύ $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$, με $\gamma = 0^\circ$ για τον νότο, $\gamma = 90^\circ$ για την δύση, $\gamma = -90^\circ$ για την ανατολή και $\gamma = 180^\circ$ για τον βορρά.

Κλίση επιπέδου (β) : είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδος επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Η κλίση μεταβάλλεται από $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ με $\beta = 90^\circ$ για κατακόρυφο επίπεδο.



Εικόνα 2-2: Γωνίες Θέασης Του Ηλίου [2.4]

Ηλιακή απόκλιση (δ) : Είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Η ηλιακή απόκλιση παίρνει τιμές από $-23.45 \leq \delta \leq +23.45$ σύμφωνα με την σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad [2.1]$$

Ωριαία γωνία (ω) : Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης περί τον άξονα της με ρυθμό $15^\circ/\text{hour} = 0.25^\circ/\text{min}$. Η γωνία ω υπολογίζεται από την σχέση:



$$\omega = 0.25 \left(\frac{\circ}{\text{min}} \right) \cdot (\text{min από ηλιακό μεσημέρι}) \quad [2.2]$$

Αρχικά ορίζουμε τις ακτινοβολίες οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας οι οποίες είναι η βάση για την μελέτη των ακτινοβολιών.

Για την καλύτερη κατανόηση παρατίθενται τα σύμβολα που αφορούν τις ακτινοβολίες.

- Για **στιγμαία** ακτινοβολία χρησιμοποιούμε το σύμβολο **G**.
- Για **ωριαία** ακτινοβολία χρησιμοποιούμε το σύμβολο **I**.
- Για **ημερήσια** ακτινοβολία χρησιμοποιούμε το σύμβολο **H**.
- Για **άμεση** ακτινοβολία χρησιμοποιούμε το σύμβολο **b**.
- Για **διάχυτη** ακτινοβολία χρησιμοποιούμε το σύμβολο **d**.
- Για **κάθετο επίπεδο** χρησιμοποιούμε το σύμβολο **n**.
- Για **κεκλιμένο επίπεδο** χρησιμοποιούμε το σύμβολο **T**.
- **Εκτός ατμόσφαιρας** χρησιμοποιούμε τον δείκτη **o**.

Έχοντας τα παραπάνω μπορούμε πλέον να ορίσουμε τις ακτινοβολίες οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας.

Στιγμαία ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας:

$$G_o = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) \quad [2.3]$$

Ωριαία ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας (η οποία προκύπτει με ολοκλήρωση της εξ. 2.3 από ώρες ω_1 έως ω_2):

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad [2.4]$$

Με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει και η ημερήσια ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας (ολοκληρώνοντας από την γωνία ανατολής μέχρι την γωνία δύσης):

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right) \cdot \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad [2.5]$$

Η ατμόσφαιρα μειώνει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της απορροφητικότητας των στρωμάτων της. Συγκεκριμένα κύριοι παράγοντες εξασθένησης είναι ο διασκορπισμός των ακτινών λόγω των μορίων υδρατμού και σκόνης στην ατμόσφαιρα αλλά και λόγω της απορρόφησης από τα στρώματα O_3 , H_2O , CO_2 .



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που τελικά φθάνει στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιούνται κάποιοι δείκτες αιθριότητας:

$$\text{Ωριαίος δείκτης αιθριότητας: } k_T = \frac{I}{I_o} \quad [2.6]$$

$$\text{Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας: } K_T = \frac{H}{H_o} \quad [2.7]$$

$$\text{Μηνιαίος (μέσος) δείκτης αιθριότητας: } \overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{\overline{H_o}} \quad [2.8]$$

Εντός ατμόσφαιρας μπορούμε να ορίσουμε τα παρακάτω:

$$\text{Άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου: } G_b = G_{bn} \cdot \cos \theta_z \quad [2.9]$$

$$\text{Άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου: } G_{bT} = G_{bn} \cdot \cos \theta \quad [2.10]$$

Από τα παραπάνω μπορούμε να προσδιορίσουμε και τον λόγο R_b ο οποίος είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεση οριζοντίου. Ο λόγος αυτός είναι:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega} \quad [2.11]$$

Εκτός από την άμεση ακτινοβολία πολλές φορές χρήσιμη είναι και η γνώση της διάχυτης ακτινοβολίας G_d και αντίστοιχα του λόγου R_d . Αυτό συμβαίνει διότι ο συνδυασμός των δύο ακτινοβολιών δίνει την ολική ακτινοβολία βάσει της οποίας γίνεται η ενεργειακή ανάλυση. Για τον προσδιορισμό της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου υπάρχουν έξι προσεγγίσεις [2.5]:

I. Μοντέλο Διαυγούς Ατμόσφαιρας

Το μοντέλο διαυγούς ατμόσφαιρας αποτελεί την απλούστερη προσέγγιση και υποθέτει πως η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία έρχονται από την ίδια κατεύθυνση προς την εξεταζόμενη επιφάνεια. Χρησιμοποιείται, όπως δηλώνει το όνομα, κυρίως σε “καθαρή” ατμόσφαιρα χωρίς νέφωση. Η σχέση που περιγράφει την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου είναι:

$$G_T = R_b \cdot G_b + R_d \cdot G_d, \text{ όπου } R_b = R_d = R \quad [2.12]$$

II. Μοντέλο Νεφελώδους Ατμόσφαιρας (Hottel & Woertz 1942)

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η εξεταζόμενη επιφάνεια δέχεται την διάχυτη ακτινοβολία από όλες τις κατευθύνσεις με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή η ακτινοβολία είναι ισότροπη. Αυτό συμβαίνει όταν ο ουρανός δεν είναι “καθαρός” και έχει αρκετή νέφωση. Η σχέση που χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση είναι η ακόλουθη:

$$G_T = R_b \cdot G_b + G_d, \text{ όπου } R_d = 1 \quad [2.13]$$



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

III. Βελτιωμένο Μοντέλο Liu & Jordan 1963

Το παραπάνω μοντέλο βελτιώθηκε από τους Liu και Jordan το 1963 θεωρώντας ότι η ολική ακτινοβολία που δέχεται μία κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- Άμεση ακτινοβολία $G_b \cdot R_b$
- Διάχυτη ακτινοβολία προερχόμενη από τον ουρανό $G_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2}$
- Διάχυτη ακτινοβολία προερχόμενη από ανάκλαση στο έδαφος $(G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$

Η τιμή του ρ μεταβάλλεται από 0.2 για συνηθισμένο έδαφος έως 0.7 για χιονισμένο. Επομένως η ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου δίνεται ως εξής:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [2.14]$$

IV. Μοντέλο Klucher 1979

Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται σε διαυγή ατμόσφαιρα έναντι του μοντέλου των Liu και Jordan. Αυτό συμβαίνει διότι το δεύτερο υποεκτιμά την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διαυγή ατμόσφαιρα. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$G_T = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \left(1 + F \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2}\right) \cdot (1 + F \cos^2(\beta) \cdot \sin^3(\theta_z)) + (G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

[2.15]

$$\text{Όπου } F = 1 - \left(\frac{G_d}{G}\right)^2$$

V. Μοντέλο Hay-Davies 1980

Αντίστοιχα με το παραπάνω αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου των Liu και Jordan. Πρακτικά χωρίζεται η διάχυτη ακτινοβολία σε ισοτροπική και περιφερειακή εισάγοντας τον συντελεστή ανισοτροπίας A. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$G_T = (G_b + A \cdot G_d) \cdot R_b + G_d \cdot (1 - A) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + (G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [2.16]$$

$$\text{Όπου } A = \frac{G_{bn}}{G_{on}}$$

VI. Μοντέλο Reindl 1990

Ο Reindl βελτίωσε το παραπάνω μοντέλο λαμβάνοντας υπόψιν την φωτεινότητα του οριζοντα χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$G_T = (G_b + A \cdot G_d) \cdot R_b + G_d \cdot (1 - A) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot B + (G_d + G_b) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [2.17]$$

$$\text{Όπου } B = 1 + \sqrt{\frac{G_b}{G}} \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2}\right)$$



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο προς μελέτη κεκλιμένο επίπεδο χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω εμπειρική σχέση [2.6] η οποία υποθέτει μία ημιτονοειδή κατανομή η οποία είναι πολύ λογική για την συγκεκριμένη μελέτη:

$$G_T = \frac{\pi \cdot H_T \cdot 10^3}{2 \cdot N_D} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_h}{N_D}\right) \quad [2.18]$$

Όπου η διάρκεια της ημέρας (N_D) δίνεται από την σχέση:

$$N_D = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad [2.19]$$

Η ηλιακή απόκλιση (δ) έχει προηγουμένως με την εξίσωση (2.1) και t_h είναι η ώρα της μέρας.

Επίσης για την μέση θερμοκρασία κάθε ημέρας χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$T_{am} = T_{am,m} + \frac{DR}{2} \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t_h - N_D/2 - 2}{24}\right) \quad [2.20]$$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος πίνακας με μετρημένα στατιστικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας και για κάθε μήνα:

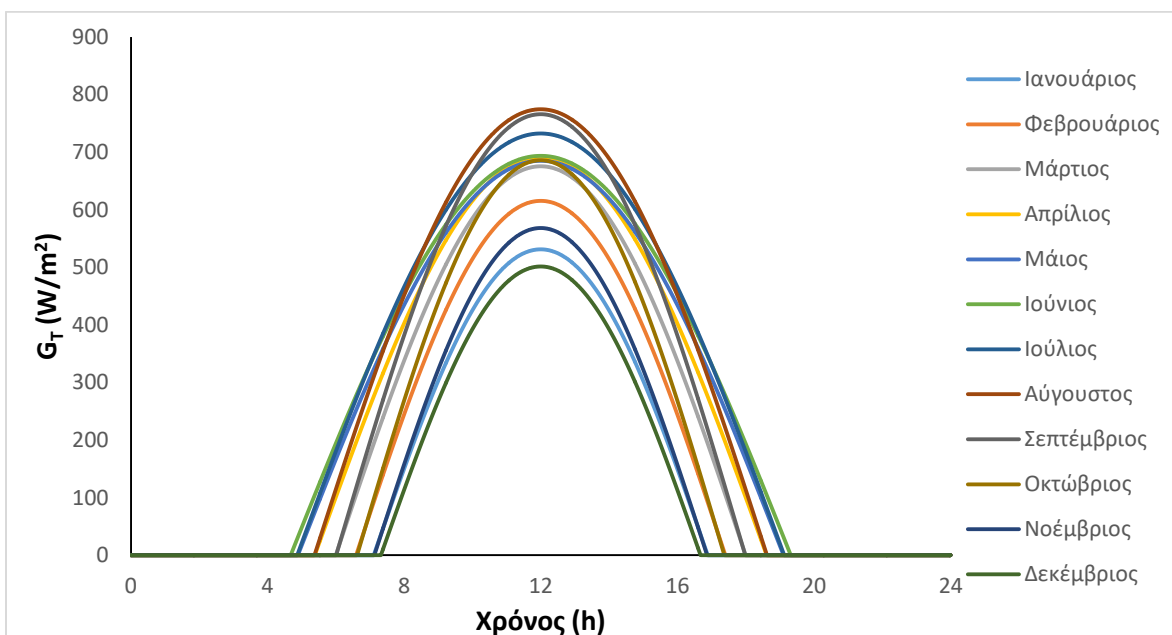
Πίνακας 2-1: Στατιστικά Δεδομένα Για Την Περιοχή Της Αθήνας [2.7]

Μήνας	H_T (kWh/m ²)	$G_{T,max}$ (W/m ²)	Ημέρα (-)	δ (°)	N_D (h)	$T_{am,m}$ (K)	DR (K)
Ιανουάριος	3308	531.3	21	-20.14	9.78	281.61	7.67
Φεβρουάριος	4236	615.6	52	-11.23	10.81	282.41	8.21
Μάρτιος	5161	675.5	81	0.00	12.00	285.25	9.17
Απρίλιος	5829	692.1	111	11.58	13.23	289.58	10.36
Μάιος	6202	685.1	141	20.14	14.22	294.18	11.45
Ιούνιος	6466	693.8	172	23.45	14.64	297.97	12.17
Ιούλιος	6649	732.4	202	20.44	14.26	299.71	12.29
Αύγουστος	6533	774.5	233	11.75	13.25	299.03	11.78
Σεπτέμβριος	5842	766.0	264	-0.20	11.98	296.02	10.77
Οκτώβριος	4697	686.3	294	-11.75	10.75	291.69	9.57
Νοέμβριος	3525	568.5	325	-20.44	9.74	286.94	8.45
Δεκέμβριος	2988	501.4	355	-23.45	9.36	283.33	7.77



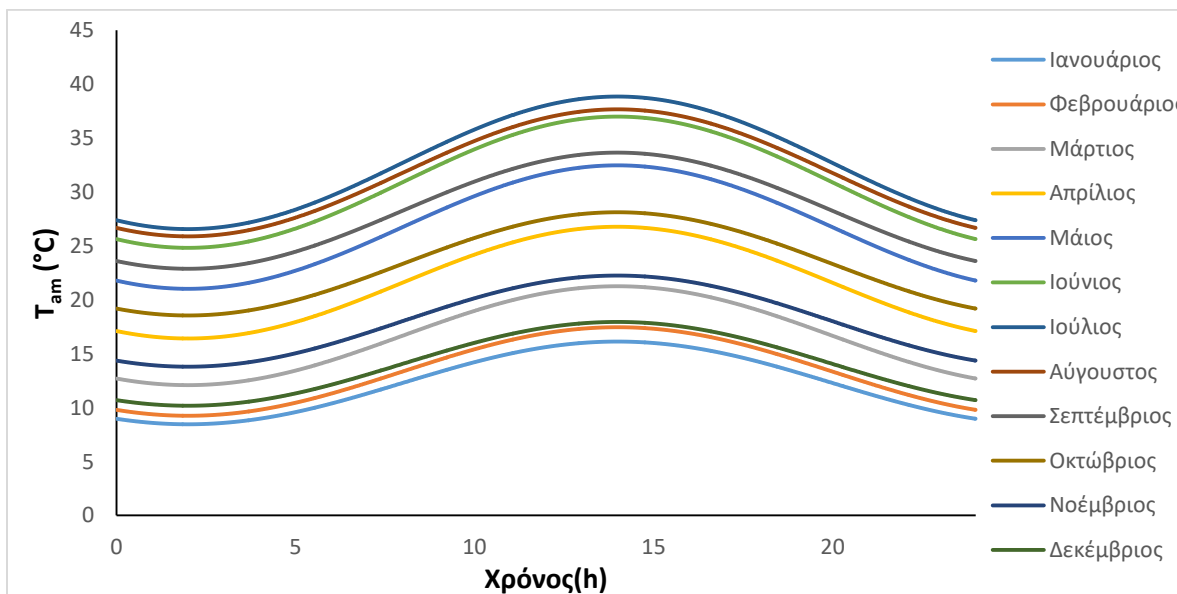
Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Βάσει του παραπάνω πίνακα προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα που απεικονίζουν την θερμοκρασία καθώς επίσης και την ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο για όλους τους μήνες του χρόνου. Τα διαγράμματα απεικονίζουν την 21^η ημέρα κάθε μήνα.



Διάγραμμα 2-1: Ακτινοβολία Κεκλιμένου Επιπέδου Για Όλους Τους Μήνες Στην Αθήνα

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η υψηλότερη τιμή παρουσιάζεται κατά τον μήνα Αύγουστο με τιμή $775 W/m^2$. Επίσης η μεγαλύτερη διάρκεια μέρας παρουσιάζεται τον Ιούνιο και η ελάχιστη τον Δεκέμβριο όπως είναι αναμενόμενο λόγω του θερινού και του χειμερινού ηλιοστάσιου αντίστοιχα. Για την θερμοκρασία βλέπουμε στην συνέχεια πως ο πιο θερμός μήνας είναι ο Ιούλιος και ο πιο ψυχρός ο Ιανουάριος.



Διάγραμμα 2-2: Μεταβολή Της Θερμοκρασίας Μέσα Στην Μέρα Για Όλους Τους Μήνες Στην Αθήνα



2.2. ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι η καρδιά κάθε ηλιακού θερμικού συστήματος με σκοπό την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ενέργειας για τη θέρμανση του νερού. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι διαφορετικοί από τους φωτοβολταϊκούς (PV) πίνακες, οι οποίοι παράγουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια. Ο ηλιακός συλλέκτης μπορεί να είναι τόσο απλός όσο ένα ευθύγραμμο ή σπειροειδές μήκος από πλαστικό ή χάλκινο σωλήνα. Η ποσότητα θερμότητας που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες ποικίλλει ανάλογα με τον σχεδιασμό του συλλέκτη, την επιφάνεια των συλλεκτικών σωλήνων καθώς και τις τοπικές συνθήκες κλίματος και τοποθεσίας.

Οι ηλιακοί συλλέκτες συλλέγουν τη θερμότητα του ήλιου για θέρμανση ζεστού νερού ή / και θέρμανση χώρου είναι συνήθως εγκατεστημένοι στις στέγες όπου εκτίθενται στη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία για μέγιστη απόδοση. Οι περισσότεροι ηλιακοί συλλέκτες ζεστού νερού είναι παθητικές συσκευές που αποτελούνται από κιβώτια, πλαίσια, δεξαμενές ή κλειστούς σωλήνες που περιέχουν τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- Ένα διαυγές διαφανές γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα ή σωλήνα για να αφήσει την ηλιακή ακτινοβολία να περάσει.
- Σκοτεινές βαμμένες επιφάνειες στο εσωτερικό των αποκαλούμενων απορροφητών, που απορροφούν τον ήλιο που μεταφέρει τη θερμότητα στο εργαζόμενο ρευστό.
- Μονωτικά υλικά που εμποδίζουν την απορροφούμενη θερμότητα να διαφύγει πίσω στην ατμόσφαιρα.
- Σωλήνες, αεραγωγοί ή αγωγοί για τη μεταφορά του θερμού υγρού ή του αέρα από το εσωτερικό του ηλιακού συλλέκτη μέχρι το σημείο όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή να αποθηκευτεί.

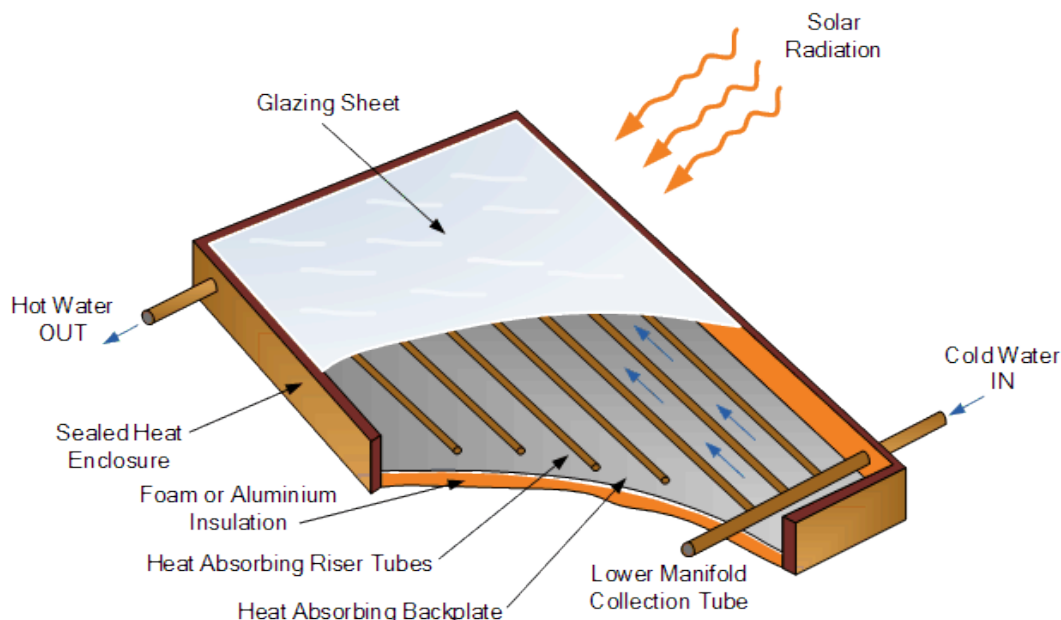
Οι ηλιακοί συλλέκτες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους επίπεδους και τους συγκεντρωτικούς. Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι είναι οι επίπεδοι κυρίως για οικονομοτεχνικούς λόγους. Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν πολύ απλούστερη κατασκευή και αντίστοιχα πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τους συγκεντρωτικούς. Από την άλλη όμως οι συγκεντρωτικοί πετυχαίνουν πολύ μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης. Για την επιλογή του είδους συλλεκτών που ταιριάζει καλύτερα σε μία εγκατάσταση απαιτείται πάντα οικονομοτεχνική μελέτη. Συνηθέστερα παρατηρούμε τους επίπεδους συλλέκτες σε οικιακές εφαρμογές για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης ή ακόμα και χώρων, ενώ οι συγκεντρωτικοί συναντώνται συχνότερα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες (πάνω από 100°C).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότεροι τύποι ηλιακών συλλεκτών.



2.2.1. ΕΠΙΠΕΔΟΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (Flat Plate Collector- FPC) αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος συλλέκτη παγκοσμίως. Αυτό συμβαίνει διότι η απλουστευμένη κατασκευή του μειώνει σημαντικά το κόστος διατηρώντας την απόδοση σε ικανοποιητικά επίπεδα. Χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κυρίως σε οικιακές εγκαταστάσεις για θέρμανση νερού χρήσης, χώρων ή ακόμα και πισίνων. Τέτοιου τύπου συλλέκτες μπορούν να φτάσουν θερμοκρασίες μέχρι 100°C και συνηθέστερα 80°C-90°C. Ένας τυπικός επίπεδος ηλιακός συλλέκτης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2-3: Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης [2.8]

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι:

- **Το κάλυμμα (glazing sheet)**, το οποίο επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται και παράλληλα βοηθάει στην μείωση των απωλειών δια συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.
- **Η πλάκα απορρόφησης (Heat absorbing black plate)**, η οποία είναι μία σκουρόχρωμη επιφάνεια η οποία φέρει τους σωλήνες και απορροφά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.
- **Μόνωση (Insulation)**, η οποία τοποθετείται στα πλαινά και στο κάτω μέρος του συλλέκτη μειώνοντας έτσι της θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά για μόνωση συλλεκτών αποτελούν ο υαλοβάμβακας και ο πετροβάμβακας.
- **Οι Σωλήνες (Manifold & Riser Tubes)**, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το νερό.
- **Το Πλαίσιο (Sealed Heat Enclosure)**, μέσα στο οποίο τοποθετούνται όλα τα παραπάνω στοιχεία.

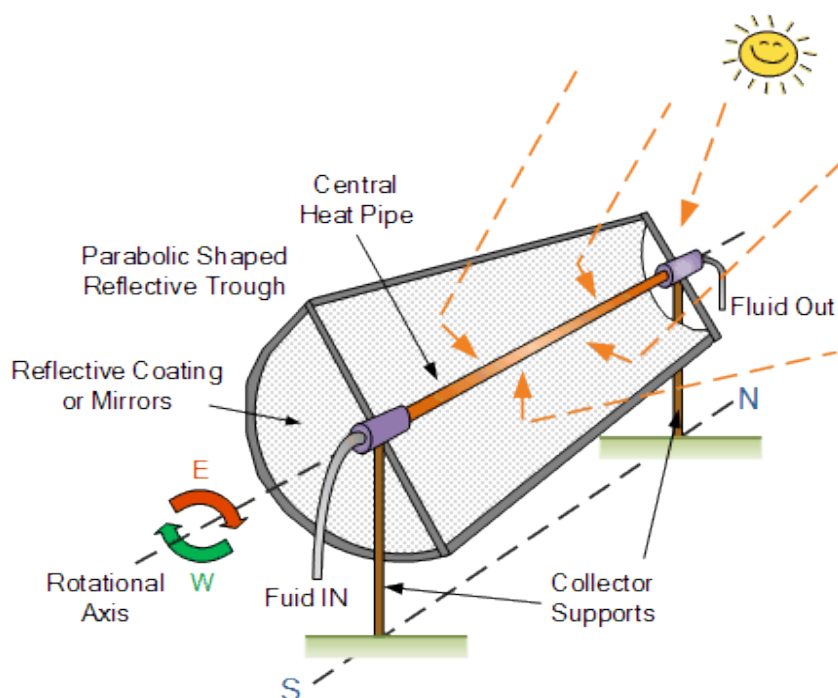
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να θερμάνουν το εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιώντας είτε άμεση ακτινοβολία (από μεγάλο εύρος γωνιών), είτε διάχυτη η οποία υπερισχύει τις ημέρες με πυκνή νέφωση. Αυτό συμβαίνει διότι σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούν το φως του ήλιου, η επίπεδοι συλλέκτες εκμεταλλεύονται την περιβάλλουσα θερμότητα. Το πόσο ζεστό θα είναι τελικά το νερό εξαρτάται από την εποχή του χρόνου, πόσο καθαρός είναι ο ουρανός καθώς επίσης και από την ταχύτητα με την οποία κυκλοφορεί το ρευστό μέσα στους σωλήνες.



2.2.2. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ (PTC)

Ο παραβολικός συλλέκτης (Parabolic Trough Collector – PTC) είναι ένας ηλιακός συλλέκτης σχεδιασμένος να αιχμαλωτίζει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και να την συγκεντρώνει σε ένα σημείο ή περιοχή εστίασης αυξάνοντας κατά πολύ την τιμή της προσπίπτουσας ενέργειας ανα τετραγωνικό μέτρο. Είναι λοιπόν εμφανές ότι αυτός ο τύπος συλλέκτη αποτελεί έναν συγκεντρωτικό συλλέκτη.

Είναι πολύ σημαντικό το σχήμα του συλλέκτη να είναι τέτοιο ώστε όλες οι προσπίπτουσες ακτίνες να συγκεντρώνονται στο ίδιο σημείο (σημείο εστίασης) ανεξαρτήτως του σημείου που θα προσπέσουν. Για τον λόγο αυτό οι παραβολικοί συλλέκτες όπως υποδηλώνει και το όνομά τους έχουν σχήμα παραβολής όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 2-4: Παραβολικός Συλλέκτης (PTC) [2.9]

Όπως φαίνεται και στην εικόνα ο παραβολικός συλλέκτης αποτελείται από:

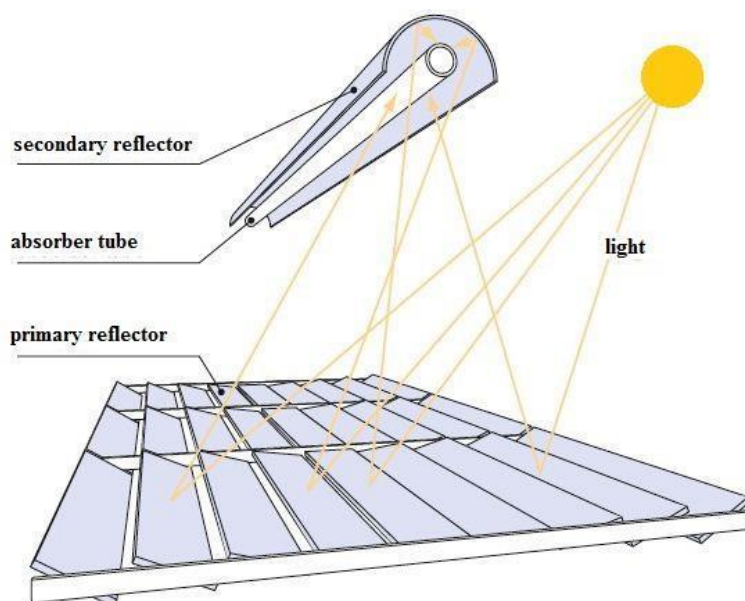
- Έναν σωλήνα (Central Heat Pipe) μέσα στον οποίο ρέει το εργαζόμενο μέσο και ο οποίος περιβάλλεται από ένα υάλινο κάλυμμα με σκοπό την μείωση των απωλειών.
- Το παραβολικό κάτοπτρο (Reflective Trough) το οποίο πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα γίνεται. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται καθρέπτες εσωτερικά του κατόπτρου.

Οι συλλέκτες αυτοί μπορούν να επιτύχουν θερμοκρασίες έως και 400°C και χρησιμοποιούνται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν να επιτύχουν λόγους συγκέντρωσης από 10 ως 45 και λειτουργούν συνήθως με εργαζόμενο μέσο κάποιο θερμικό έλαιο. Τοποθετούνται συνήθως στον άξονα Βορρά-Νότου και χρησιμοποιούν σύστημα εντοπισμού του ήλιου ώστε οι προσπίπτουσες ακτίνες να πέφτουν πάντα κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη.



2.2.3. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ FRESNEL (LFR)

Ο συλλέκτης Fresnel αποτελεί επίσης έναν τύπο συγκεντρωτικού συλλέκτη ο οποίος εστιάζει τις ακτίνες του ήλιου σε έναν κεντρικό σωλήνα. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται μία σειρά κατόπτρων τα οποία μπορούν να είναι είτε επίπεδα είτε ελαφρώς παραβολικά. Ο συλλέκτης Fresnel χρησιμοποιεί μόνο την άμεση ακτινοβολία και η απόδοση του είναι μέγιστη κατά το ηλιακό μεσημέρι. Ο λόγος συγκέντρωσης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 40 ενώ οι θερμοκρασίες μπορούν να φθάσουν έως και τους 450°C. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται ένας συνήθης συλλέκτης Fresnel:



Εικόνα 2-5: Γραμμικός Συλλέκτης Fresnel (LFR) [2.13]

Ο συλλέκτης αυτός αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

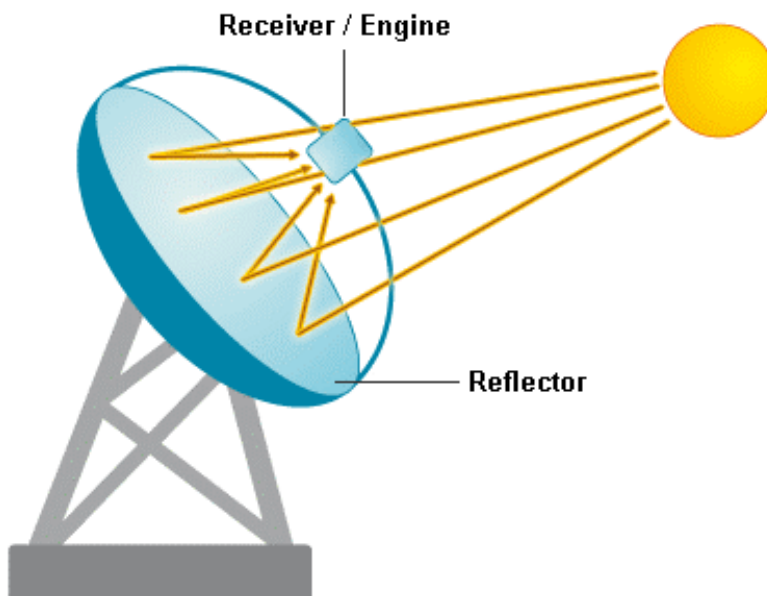
- Τα **πρωτεύοντα ανακλαστικά κάτοπτρα (primary reflectors)**, τα οποία όπως αναφέρθηκε μπορούν να είναι είτε επίπεδα είτε παραβολικά. Αυτά λειτουργούν με σύστημα εντοπισμού θέσης του ήλιου και συγκεντρώνουν όλες τις προσπίπτουσες ακτίνες στον σωλήνα απορρόφησης.
- Το **δευτερεύον ανακλαστικό κάτοπτρο (secondary reflector)**, το οποίο είναι πάντα παραβολικό και χρησιμεύει για μεγαλύτερη ακρίβεια στην συγκέντρωση της ακτινοβολίας. Ορισμένες φορές το δευτερεύον κάτοπτρο παραλείπεται για λόγους οικονομίας (συνήθως σε μικρές εγκαταστάσεις).
- Τον **σωλήνα απορρόφησης (absorber tube)**, στον οποίο συγκεντρώνεται η ακτινοβολία και θερμαίνει το ρευστό που κυκλοφορεί εσωτερικά του.

Οι συλλέκτες Fresnel είναι ελαφρύτεροι από τους αντίστοιχους παραβολικούς και είναι πιο εύκολοι στον καθαρισμό. Επίσης μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά με σύστημα παρακολούθησης του ηλίου ενός άξονα. Συνήθως τοποθετούνται στον άξονα Βορρά-Νότου και κινούνται αντίστοιχα με τον ήλιο στον άξονα Ανατολής-Δύσης. Από την άλλη, λόγω της ύπαρξης δευτερεύοντος κατόπτρου είναι μειωμένος ο βαθμός απόδοσης. Τέλος μεγάλη σημασία πρέπει να δοθεί κατά τον σχεδιασμό και την τοποθέτηση ώστε να αποφευχθούν προβλήματα σκίασης άρα και μείωση της απόδοσης.



2.2.4. ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΟΣ ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΠΙΑΤΟ (DISH)

Ο παραβολικός συλλέκτης τύπου πιάτο αποτελεί ένα ακόμα είδος συγκεντρωτικού συλλέκτη. Σχηματίζεται με βάση την γεωμετρία της παραβολής, όμως σε αντίθεση με τον PTC η παραβολή περιστρέφεται για να σχηματίσει το πιάτο αντί να κινηθεί πάνω σε μία γραμμή. Έτσι αντί να συγκεντρωθεί η ακτινοβολία σε μία γραμμή συγκεντρώνεται μόνο σε ένα σημείο πετυχαίνοντας έτσι λόγους συγκέντρωσης ως και 1500. Επακόλουθο είναι να αυξάνονται σημαντικά και οι θερμοκρασίες φτάνοντας σε σημείο να ξεπερνούν τους 1500°C. Στην συνέχεια απεικονίζεται ένας συνήθης ηλιακός συλλέκτης με μορφή πιάτου.



Εικόνα 2-6: Παραβολικός Συλλέκτης Τύπου Πιάτο (DISH) [2.10]

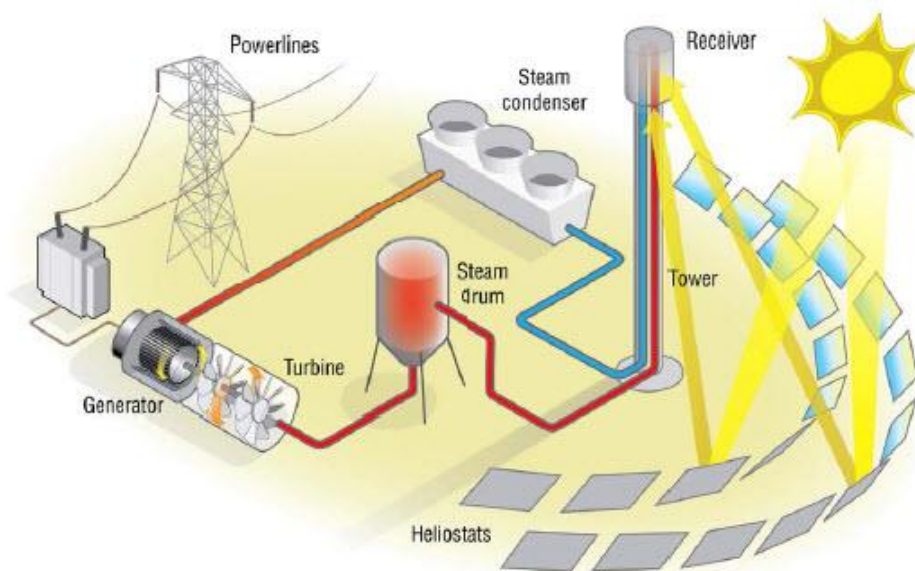
Όπως βλέπουμε και στην εικόνα τα συστατικά του στοιχεία είναι τα εξής:

- **Το παραβολοειδές κάτοπτρο (Reflector)**, το οποίο είναι καλυμμένο με καθρέπτες ώστε να ανακλάται έως και 90% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- **Τον δέκτη (Receiver)**, ο οποίος τοποθετείται στο σημείο εστίασης και συγκεντρώνει όλη την ηλιακή ακτινοβολία για να την μετατρέψει σε θερμότητα. Ο δέκτης μπορεί να είναι απλώς ένας σωλήνας κενού ή μπορεί να είναι μέχρι και μία μηχανή Stirling.
- **Την συσκευή παρακολούθησης του ήλιου (Tracking Device)**, ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν με βέλτιστο τρόπο στο πιάτο.
- **Σωλήνες & Στηρίξεις (Fluid Transfer Pipe & Supporting Structure)**.

Συνήθως λόγω του αυξημένου κόστους τους, τέτοιου τύπου συλλέκτες συνδυάζονται με μηχανές Stirling σε βιομηχανικές εφαρμογές για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοσή τους εξαρτάται από την θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 650°C και 750°C. Εναλλακτικά έχουν γίνει κάποιες εφαρμογές ηλιακών φούρνων που χρησιμοποιούν παραβολοειδές κάτοπτρο τύπου πιάτο. Χρησιμοποιώντας ένα παραβολοειδές κάτοπτρο μικρής διαμέτρου (1-2m) μπορούμε να επιτύχουμε θερμοκρασίες έως και 200°C ικανές ώστε να μπορεί να μαγειρευτεί φαγητό. Εν γένει αυτού του είδους συλλέκτες αποτελούν μία πρωτοποριακή τεχνολογία η οποία όμως βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο και για τον λόγο αυτό έχει αρκετά αυξημένο κόστος.

2.2.5. ΠΥΡΓΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο ηλιακός πύργος ισχύος βρίσκεται στην κορυφή της τεχνολογίας των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Χρησιμοποιεί εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες μικρά παραβολικά κάτοπτρα τα οποία φέρουν σύστημα εντοπισμού της θέσης του ήλιου (παρόμοια με τα προηγούμενα τύπου πιάτο). Τα κάτοπτρα αυτά ονομάζονται ηλιοστάτες και αντί να συγκεντρώνουν τις ακτίνες στην εστία της παραβολής τις συγκεντρώνουν στην κορυφή ενός πολύ υψηλού οριζόντιου πύργου. Συγκεντρώνοντας την ενέργεια από τόσους πολλούς ηλιοστάτες μπορούμε να επιτύχουμε τεράστιους λόγους συγκέντρωσης 1500-2000 και αντίστοιχα οι θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 1500°C. Βλέπουμε παρακάτω μία εγκατάσταση ηλιακού πύργου:



Εικόνα 2-7: Ηλιακός Πύργος Ισχύος (Ολόκληρη Εγκατάσταση) [2.11]

Όπως βλέπουμε μία εγκατάσταση ηλιακού πύργου ισχύος είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τους προηγούμενους συγκεντρωτικούς συλλέκτες που αναφέρθηκαν. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από τα παρακάτω:

- **Τον πύργο ο οποίος φέρει τον δέκτη (Receiver).** Ο δέκτης ο οποίος είναι συνήθως μία μαύρη ή σκουρόχρωμη απορροφητική επιφάνεια τοποθετείται σε ύψος 80 – 100 μέτρων.
- **Τους ηλιοστάτες (Heliostats),** οι οποίοι όπως προαναφέρθηκε είναι κάτοπτρα που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στον δέκτη. Τοποθετούνται γύρω από τον κεντρικό πύργο καταλαμβάνοντας μεγάλη έκταση. Είναι σημαντικό όσο πιο μακριά βρίσκονται από τον συλλέκτη τόσο μεγαλύτερη απόσταση να έχουν μεταξύ τους ώστε να αποφεύγεται η σκίαση.
- **Την εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,** η οποία λειτουργεί συνήθως με κύκλο Rankine είτε με νερό είτε με κάποιο οργανικό μέσο (ORC). Η εγκατάσταση αυτή περιέχει την Γεννήτρια (Generator), τον Στρόβιλο (Turbine) και τον Συμπυκνωτή (Steam Condenser).

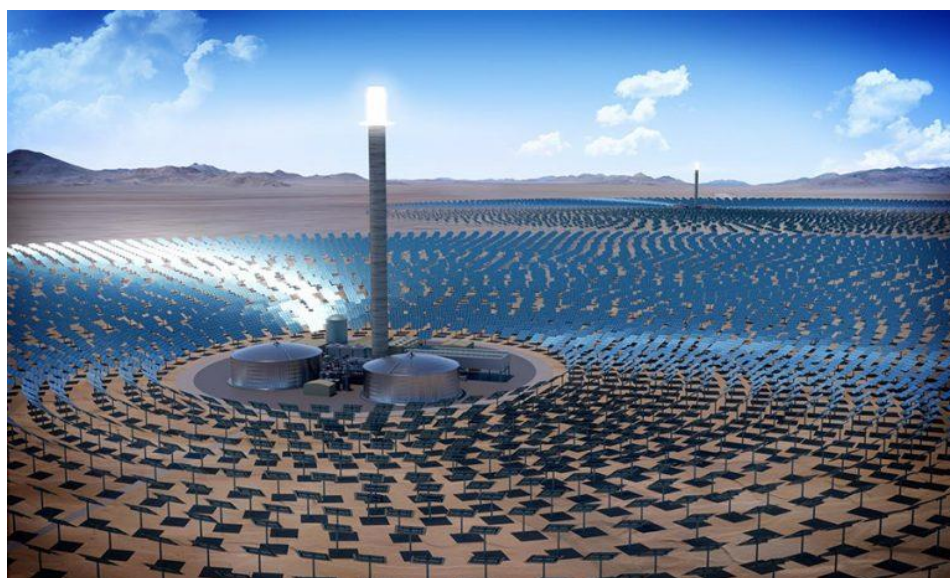
Ο ηλιακός πύργος ισχύος λειτουργεί μόνο με άμεση ακτινοβολία πράγμα που σημαίνει ότι όποτε υπάρχει συννεφιά πρέπει να σταματάει η λειτουργία του. Για τον λόγο αυτό συνδυάζεται πολλές φορές με χρήση ορυκτών καυσίμων για υβριδική λειτουργία η οποία είναι πολύ αποδοτικότερη και επιτυγχάνει λειτουργία για περισσότερες από τις μισές μέρες ενός έτους.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Οι Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων μορφών συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών για χρήση σε παραγωγή ηλεκτρισμού. Πρόκειται για μια μη ρυπογόνα, με μηδενικές εκπομπές (εκτός από το διάχυτο ηλιακό φως) ηλιακή μονάδα παραγωγής ενέργειας που είναι σε θέση να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους, εφ' όσον υπάρχει ένα μέσο αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο. Ένα τέτοιο μέσο αποθήκευσης που χρησιμοποιείται στις σύγχρονες εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων είναι το τηγμένο άλας.

Παρόλο που επί του παρόντος οι ηλιακοί πύργοι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια που κοστίζει περισσότερο από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με ορυκτά καύσιμα, κυρίως λόγω της σχετικά νέας τεχνολογίας, οι ηλιακοί πύργοι έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλότερες αποδόσεις έως 20% και μπορούν εύκολα να επεκταθούν με προσθήκη περισσότερων ηλιοστατών, μειώνοντας έτσι το κόστος και παρέχοντας αξιόπιστη ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2-8: Εγκατεστημένος Ηλιακός Πύργος Ισχύος [2.12]

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα για τους πύργους ισχύος. Οι ηλιακοί πύργοι και οι ηλιοστάτες τους καταλαμβάνουν πολύ μεγάλες εκτάσεις και βρίσκονται συνήθως σε απομακρυσμένες τοποθεσίες στην έρημο με υψηλή έκθεση στον ήλιο ή βρίσκονται σε άδειους χώρους γης που απαιτούν νέους δρόμους πρόσβασης και πυλώνες ηλεκτρικού ρεύματος για τη σύνδεση του σταθμού παραγωγής ηλιακής ενέργειας με το δίκτυο. Επίσης, το μέγεθος, το ύψος και η διάχυτη ηλιακή αντανάκλαση από τον πύργο και το περιβάλλον ηλιοστάτη ενδέχεται να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο τοπικό περιβάλλον και την άγρια φύση.

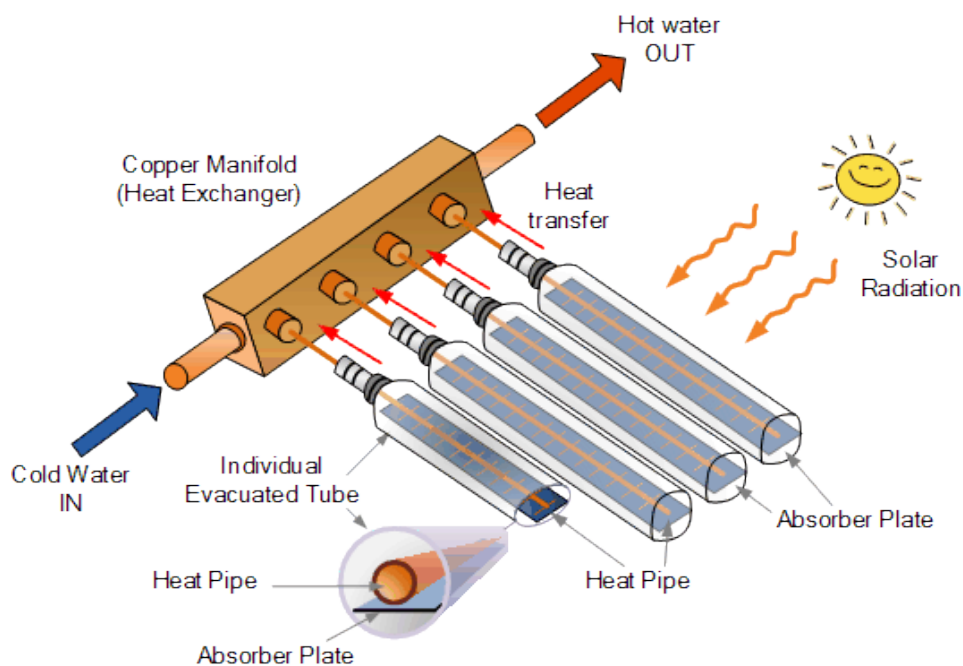
Αλλά παρά το γεγονός ότι οι ηλιακοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγάλοι και χρησιμοποιούν πολύ έδαφος, εξακολουθούν να καταλαμβάνουν πολύ λιγότερο χώρο από τα υδροηλεκτρικά φράγματα που απαιτούν μια μεγάλη λίμνη πίσω από το φράγμα ή έναν συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα που απαιτεί μεγάλες εκτάσεις γης για την αποθήκευση και την επεξεργασία του άνθρακα. Τελικά, το συνολικό μέγεθος της μονάδας παραγωγής ηλιακής ενέργειας από πύργο γενικά περιορίζεται από τη μέγιστη απόσταση από τον πύργο έως την τελευταία σειρά ηλιοστατών.



2.2.6. ΣΥΛΛΕΚΤΗΣ ΚΕΝΟΥ (ETC)

Ο ηλιακός συλλέκτης κενού (Evacuated Tube Collector-ETC) παρουσιάζεται τελευταίος και θα αναλυθεί εκτενέστερα σε σχέση με τους προηγούμενους συλλέκτες που παρουσιάστηκαν, διότι η παρούσα εργασία μελετάει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από αυτόν τον τύπο συλλεκτών.

Οι συλλέκτες κενού αποτελούν μία βελτιωμένη εκδοχή των απλών επίπεδων συλλεκτών όσον αφορά σε δύο παραμέτρους. Αρχικά οι επίπεδοι συλλέκτες μπορούν να επιτύχουν μέγιστη απόδοση μόνο όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς κάθετα στο επίπεδο, δηλαδή κατά το ηλιακό μεσημέρι. Αντίθετα, οι συλλέκτες κενού αποτελούνται από κυλινδρικούς συμμετρικούς σωλήνες οι οποίοι δέχονται πάντα κάθετα τις ακτίνες του ήλιου για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Επιπλέον ένα πρόβλημα των επίπεδων συλλεκτών είναι οι θερμικές απώλειες οι οποίες ειδικά από την πάνω επιφάνεια του συλλέκτη, που δεν έχει μόνωση, είναι ιδιαίτερος αυξημένες. Αυτό αντιμετωπίζεται από τους συλλέκτες κενού μέσω της κατασκευής τους με την ύπαρξη κενού ανάμεσα στους δύο σωλήνες, όπου ο αέρας λειτουργεί ως πολύ καλό μονωτικό. Οι παραπάνω λόγοι κάνουν τον συλλέκτη κενού πολύ πιο αποδοτικό από τον απλό επίπεδο ηλιακό συλλέκτη ενώ παράλληλα έχει και μικρότερο βάρος.



Εικόνα 2-9: Συλλέκτης Κενού ETC [2.14]

Πιο αναλυτικά μία διάταξη σωλήνων κενού αποτελείται από μία σειρά παράλληλων υάλινων σωλήνων (heat pipes) οι οποίοι συνδέονται σε έναν κεντρικό σωλήνα κεφαλής (copper manifold). Οι σωλήνες αυτοί είναι κυλινδρικοί με διαμέτρους από 25 mm έως 75 mm και 1500 mm έως 2400 mm μήκος ανάλογα με τον κατασκευαστή [2.14]. Ανάμεσα στους δύο αυτούς κυλίνδρους αφαιρείται ο αέρας δημιουργώντας έτσι συνθήκες κενού σε πιέσεις της τάξεως των mbar. Αυτό το κενό λειτουργεί ως πολύ καλός μονωτής. Συγκεκριμένα το κενό αέρος έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda=0.004-0.020 \text{ W/mK}$, σε αντίθεση με τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στον επίπεδο συλλέκτη τα οποία είναι ο υαλοβάμβακας με $\lambda=0.023-0.040 \text{ W/mK}$ και ο πετροβάμβακας με $\lambda=0.020-0.040 \text{ W/mK}$ [2.15]. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντική η διατήρηση του κενού καθ' όλη την διάρκεια ζωής του συλλέκτη, η οποία είναι περίπου 25 χρόνια.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Στο εσωτερικό των υάλινων σωλήνων υπάρχει ένα επίπεδο ή καμπύλο πτερύγιο από αλουμίνιο ή χαλκό που συνδέεται με τον εσωτερικό μεταλλικό σωλήνα θερμότητας. Το πτερύγιο καλύπτεται με μια επιλεκτική επικάλυψη που μεταφέρει θερμότητα στο ρευστό που κυκλοφορεί μέσω του σωλήνα. Αυτοί οι σωλήνες χαλκού συνδέονται όλοι μαζί στον κοινό σωλήνα κεφαλής που στη συνέχεια συνδέεται με μια δεξαμενή αποθήκευσης, θερμαίνοντας έτσι το ζεστό νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ζεστό νερό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί τη νύχτα ή την επόμενη μέρα λόγω των μονωτικών ιδιοτήτων της δεξαμενής.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ηλιακών συλλεκτών κενού και περιγράφονται στην συνέχεια.

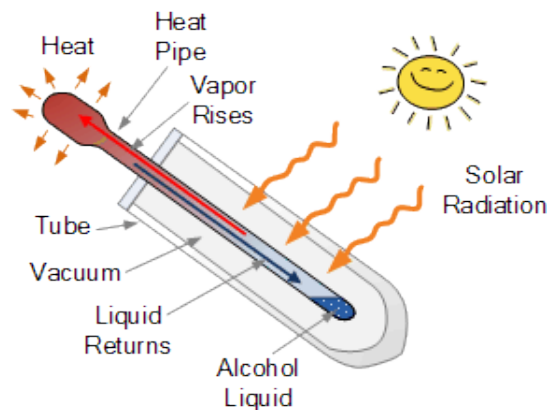
Συλλέκτες Κενού Σωλήνα Θερμότητας

Στους συλλέκτες σωλήνα θερμότητας ένας σφραγισμένος αγωγός θερμότητας, που συνήθως κατασκευάζεται από χαλκό για να αυξήσει την αποδοτικότητα των συλλεκτών σε χαμηλές θερμοκρασίες, προσαρτάται σε μια θερμοαπορροφητική πλάκα μέσα στο σφραγισμένο σωλήνα κενού. Ο κύλιος χάλκινος αγωγός θερμότητας μέσα στον σωλήνα εκκενώνεται από τον αέρα αλλά περιέχει μια μικρή ποσότητα υγρού αλκοόλης - νερού χαμηλής πίεσης και μερικά επιπλέον πρόσθετα για την πρόληψη της διάβρωσης ή της οξείδωσης.

Αυτό το κενό επιτρέπει στο υγρό να εξατμίζεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι σε ατμοσφαιρική πίεση. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια της πλάκας απορρόφησης μέσα στο σωλήνα, το υγρό στον σωλήνα μετατρέπεται γρήγορα σε αέριο λόγω της παρουσίας του κενού. Καθώς αυτό το αέριο είναι πλέον ελαφρύτερο, ανυψώνεται μέχρι το ανώτερο τμήμα του σωλήνα και το ανεβάζει σε πολύ υψηλή θερμοκρασία.

Το άνω μέρος του θερμαντικού σωλήνα με τον σωλήνα κεφαλής. Όταν οι θερμοί ατμοί που βρίσκονται ακόμα μέσα στον σφραγισμένο σωλήνα θερμότητας εισέρχονται στην κεφαλή, η θερμική ενέργεια του ατμού μεταφέρεται στο νερό ή στο ρευστό γλυκόλης που ρέει μέσω σε αυτή. Καθώς το θερμό αέριο χάνει ενέργεια και ψύχεται, συμπυκνώνεται σε υγρό που ρέει πίσω προς τα κάτω στον σωλήνα θερμότητας που πρόκειται να αναθερμανθεί. Αυτή η διαδικασία μετατροπής υγρού σε αέριο και πίσω σε υγρό συνεχίζεται και πάλι μέσα στον σφραγισμένο αγωγό θερμότητας όσο ο ήλιος λάμπει. Ο αγωγός θερμότητας και συνεπώς οι συλλέκτες σωλήνων που εκκενώθηκαν πρέπει να τοποθετηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν μια ελάχιστη γωνία κλίσης (περίπου 30°) ώστε το εσωτερικό υγρό του θερμαντικού σωλήνα να επιστρέψει προς τα κάτω.

Το κύριο πλεονέκτημα των συλλεκτών σωλήνων κενού με σωλήνες θερμότητας είναι ότι υπάρχει μια "ξηρή" σύνδεση μεταξύ της πλάκας απορρόφησης και του σωλήνα κεφαλής που κάνει την εγκατάσταση πολύ πιο εύκολη από ότι με τους συλλέκτες άμεσης ροής. Επίσης, σε περίπτωση σπασίματος ή θραύσης σωλήνα και απώλειας κενού ο μεμονωμένος σωλήνας μπορεί να αντικατασταθεί χωρίς να αδειάσει ή να αποσυναρμολογήσει ολόκληρο το σύστημα. Αυτή η ευελιξία καθιστά τους σωλήνες κενού με σωλήνες θερμότητας ιδανικούς για ηλιακούς σχεδιασμούς κλειστού βρόχου, καθώς η αρθρωτή συναρμολόγηση επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση και δυνατότητα εύκολης επέκτασης προσθέτοντας όσους σωλήνες θέλετε.



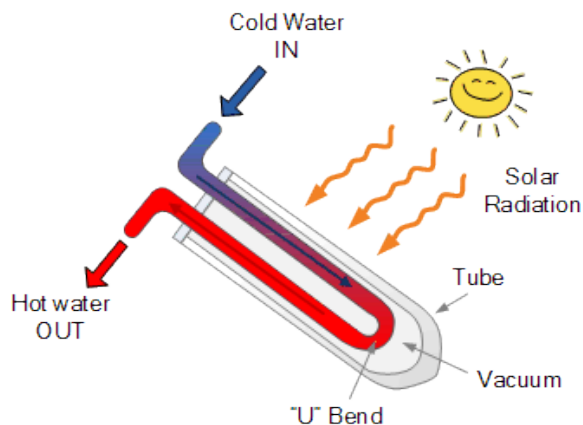
Εικόνα 2-10: Σωλήνας Κενού Με Σωλήνα Θερμότητας [2.16]

Συλλέκτες Κενού Άμεσης Ροής

Οι συλλέκτες σωληνώσεων άμεσης ροής που είναι επίσης γνωστοί ως συλλέκτες "τύπου U", διαφέρουν από τους προηγούμενους, διότι έχουν δύο σωλήνες θερμότητας που διατρέχουν το κέντρο του σωλήνα. Ένας σωλήνας λειτουργεί ως σωλήνας ροής ενώ ο άλλος λειτουργεί ως σωλήνας επιστροφής. Και οι δύο σωλήνες συνδέονται μεταξύ τους στο κάτω μέρος του σωλήνα με έναν σχηματισμό "U", εξ ου και το όνομα.

Καθώς το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εισέρχεται και εξέρχεται από κάθε σωλήνα, οι συλλέκτες άμεσης ροής δεν είναι τόσο ευέλικτοι όσο οι συλλέκτες σωληνών θερμότητας. Εάν ένας σωλήνας παρουσιάσει ρωγμές ή σπάσει, δεν μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα. Το σύστημα θα απαιτήσει αποστράγγιση καθώς υπάρχει μια "υγρή" σύνδεση μεταξύ του σωλήνα άμεσης ροής και του σωλήνα κεφαλής.

Πολλοί ειδικοί πιστεύουν ότι οι σωλήνες άμεσης ροής είναι πιο ενεργειακά αποδοτικοί από των αγωγών θερμότητας, διότι με την άμεση ροή δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας μεταξύ υγρών. Οι σωλήνες άμεσης ροής μπορούν να συλλέγουν τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία και δεν απαιτούν σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου. Ωστόσο, διάφορες μορφές ανακλαστήρα τοποθετημένες πίσω από τους σωλήνες χρησιμοποιούνται για να συλλέξουν σημαντικό μέρος της ηλιακής ενέργειας, η οποία διαφορετικά μπορεί να χαθεί.



Εικόνα 2-11: Συλλέκτης Κενού Άμεσης Ροής [2.16]



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Λόγω του κενού οι συλλέκτες μπορούν να φθάσουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, υπερβαίνοντας το σημείο βρασμού του νερού κατά τους καυτούς καλοκαιρινούς μήνες. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα σε ένα υπάρχον οικιακό σύστημα ηλιακού ζεστού νερού όπως η υπερθέρμανση και η ρωγμή των γυάλινων σωλήνων που εκκενώθηκαν. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο σε θερμά κλίματα, υπάρχουν βαλβίδες παράκαμψης και μεγάλοι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την «αποβολή» της υπερβολικής θερμότητας καθώς και την ανάμιξη κανονικού (δροσερού) νερού με το ζεστό νερό για να εξασφαλίσουν ότι τα επίπεδα θερμοκρασίας και πίεσης ποτέ δεν θα υπερβούν τα προκαθορισμένα όρια.

Επίσης, οι συλλέκτες σωλήνων θερμότητας δεν πρέπει ποτέ να εκτίθενται σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία χωρίς να ρέει ρευστό μεταφοράς θερμότητας μέσα σε αυτούς. Αμα αυτό γίνει, ο σωλήνας κενού θα υπερθερμανθεί και με την ροή δροσερού νερού μπορεί να σπάσει από την απότομη αλλαγή.

Στους ψυχρότερους χειμερινούς μήνες, αυτοί οι τύποι συλλεκτών δεν μπορούν να λειώσουν τη μεγάλη ποσότητα χιονιού που πέφτει επάνω τους ανά πάσα στιγμή, πράγμα που σημαίνει ότι ο καθαρισμός του χιονιού και του πάγου πάνω στους σωλήνες αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα διότι κινδυνεύουν από θραύση κατά τον καθαρισμό.

Η τεχνολογία των σωλήνων κενού αναπτύχθηκε αρχικά από το πανεπιστήμιο Qing Hua στην Κίνα στις αρχές της δεκαετίας του 1980, με πιλοτική κατασκευή το 1985. Μέχρι το 1988 ο ετήσιος όγκος παραγωγής από τον Qing Hua έφτασε τις 30.000 σωλήνες. Μέχρι το 1996 με τη βοήθεια σημαντικής οικονομικής στήριξης από την κινεζική κυβέρνηση, το Qing Hua έφθασε σε ετήσια παραγωγική δυναμικότητα 2 εκατομμυρίων σωλήνων. Η πλειοψηφία των σωλήνων χρησιμοποιήθηκε για την προμήθεια της τοπικής αγοράς, με ένα μικρό ποσοστό (100.000 το 1995) να παρέχεται στην Ιαπωνία, την Ευρώπη, τη Νότια Αμερική και τη Νοτιοανατολική Ασία. Το κύριο εμπόδιο στις μεγάλες εξαγωγικές πωλήσεις ήταν η τεχνολογία της δεξαμενής και του σωλήνα κεφαλής. Αν και οι σωλήνες είχαν καλή απόδοση, η ποιότητα των δεξαμενών αποθήκευσης ήταν μέτρια και δεν πληρούσε τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής αγοράς. Το 1998, η Qing Hua κατείχε το 70% της κινεζικής αγοράς ηλιακής θέρμανσης νερού. Με τον διαχωρισμό ορισμένων βασικών μελών του διοικητικού συμβουλίου της Qing Hua Solar, η προστασία της ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία σωλήνων κενού δεν ήταν πλέον σε ισχύ, και έτσι άλλες κινεζικές εταιρείες άρχισαν να παράγουν τέτοιους σωλήνες. Ο εξοπλισμός και τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή όλων των σωλήνων στην Κίνα είναι επομένως τα ίδια με αυτά που αναπτύχθηκαν από το Qing Hua. Για το λόγο αυτό, εάν ακολουθούνται τεχνικά πρότυπα, και καλής ποιότητας πρώτες ύλες, όλοι οι σωλήνες που κατασκευάζονται στην Κίνα θα πρέπει να είναι το ίδιο αποδοτικοί. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές εταιρείες που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες κακής ποιότητας και κάνουν περικοπές στις τεχνικές απαιτήσεις. Η επιλογή ενός κατασκευαστή επαγγελματικών σωλήνων είναι συνεπώς πολύ σημαντική [2.17].

Οι συλλέκτες κενού είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος θέρμανσης ενός μεγάλου μέρους του ζεστού νερού χρήσης χρησιμοποιώντας μόνο τη δύναμη του ήλιου. Μπορούν να επιτύχουν υψηλές θερμοκρασίες, αλλά είναι πιο εύθραυστοι από άλλους τύπους ηλιακών συλλεκτών και είναι πολύ ακριβότεροι στην εγκατάσταση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε σύστημα ανοιχτού βρόχου (χωρίς εναλλάκτη θερμότητας) είτε σε σύστημα ηλιακού ζεστού νερού κλειστού βρόχου (με εναλλάκτη θερμότητας), αλλά απαιτείται αντλία για την κυκλοφορία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από τον συλλέκτη στην αποθήκη, προκειμένου να σταματήσει από υπερθέρμανση.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [2.1] www.nasa.gov
- [2.2] Π. Ιωνά, Μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένης επιφάνειας με σκοπό την ποσοτικοποίηση της κατανομής του πεδίου ακτινοβολίας για ενεργειακές εφαρμογές, Αθήνα 2014
- [2.3] Κ. Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα, Αθήνα 2015
- [2.4] www.researchgate.net/figure/Zenith-angle-surface-tilt-surface-azimuth-angle-latitude-and-local-meridian-for-a_fig7_271135303
- [2.5] Ε. Μπέλλος, Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016
- [2.6] V. Belessiotis, E. Mathioulakis, E. Papanicolaou, Theoretical formulation and experimental validation of the input-output modeling approach for large solar thermal systems, Sol. Energy 84 (2010) 245e255
- [2.7] E. Bellos, C. Tzivanidis, Yearly performance of a hybrid PV operating with nanofluid, Renewable Energy 113 (2017)
- [2.8] www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html
- [2.9] www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/parabolic-trough-reflector.html
- [2.10] shaikmohasin.wordpress.com/2012/08/25/parabolic-dish-system/
- [2.11] cleanleap.com/2-power-tower/how-power-tower-works
- [2.12] cosmosmagazine.com/technology/how-solar-power-towers-generate-electricity-at-night
- [2.13] www.researchgate.net/figure/Diagram-of-a-linear-Fresnel-collector_fig6_318360867
- [2.14] www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html
- [2.15] www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-losses/insulation-materials/
- [2.16] www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/evacuated-tube-collector.html
- [2.17] www.heatweb.com/solar/navitron.pdf



3. ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE – ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ – ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ

3.1. ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος και όπως κάθε θερμοδυναμικός κύκλος χρησιμοποιεί θερμότητα για να παράξει έργο. Αποτελεί ένα σύστημα κλειστού βρόχου, στο οποίο το εργαζόμενο μέσο ανακυκλώνεται πλήρως μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του κυκλώματος. Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι μία παραλλαγή του απλού κύκλου Rankine όσον αφορά στο εργαζόμενο μέσο. Στον απλό κύκλο Rankine το σύστημα λειτουργεί συνήθως με νερό-ατμό ενώ στον ORC χρησιμοποιείται κάποιο οργανικό ρευστό για την λειτουργία του. Οι ιδιότητες μπορούν να μεταβάλλονται σημαντικά από το ένα εργαζόμενο μέσο στο άλλο, επομένως η επιλογή του θέλει αρκετή μελέτη για τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Περισσότερα σχετικά με τα εργαζόμενα μέσα θα αναπτυχθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Ο οργανικός κύκλος Rankine είναι μια πολύ γνωστή και ευρέως διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής ενέργειας, κυρίως σε εφαρμογές βιομάζας και γεωθερμικής ενέργειας, αλλά αναμένεται επίσης μεγάλη αύξηση των εφαρμογών ηλιακής ενέργειας και ανάκτησης θερμότητας από βιομηχανικές διεργασίες. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες για την αλλαγή του κλίματος και τις κυμαινόμενες τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου είναι ισχυροί λόγοι για τη στήριξη της ανάπτυξης αυτού του αποτελεσματικού, καθαρού και αξιόπιστου τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κύκλος Rankine είναι ο πλέον διαδεδομένος οργανικός κύκλος όντας υπεύθυνος για την παραγωγή του 85% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικό του πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες από 80°C έως 350°C.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο κύκλος Rankine πήρε το όνομά του από τον William John Macquorn Rankine (5 Ιουλίου 1820 - 24 Δεκεμβρίου 1872), ο οποίος ήταν σκωτσέζος μηχανικός και φυσικός. Ήταν εμβληματική φιγούρα της επιστήμης της θερμοδυναμικής. Ο Rankine ανέπτυξε μια ολοκληρωμένη θεωρία για την ατμομηχανή και εν συνεχεία για όλους τους κινητήρες θερμότητας. Τα εγχειρίδια που δημιούργησε χρησιμοποιήθηκαν για πολλές δεκαετίες μετά τη δημοσίευσή τους (1850-1960).

Ο κύκλος Rankine βασίζεται συνήθως στο νερό ως υγρό εργασίας. Οι εφαρμογές του κύκλου με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα άρχισαν να εμφανίζονται άμεσα, όπως για παράδειγμα στα σκάφη νάφθας. Το 1883 ο Frank Ofeldt ανέπτυξε ένα μοναδικό σύστημα ισχύος το οποίο ήλπιζε ότι θα αντικαταστήσει τον ατμό. Οι μηχανές νάφθας που κατασκεύασε ήταν ατμομηχανές που λειτουργούσαν με νάφθα (μια μορφή βενζίνης). Την εποχή εκείνη, η κυβέρνηση απαιτούσε άδεια για βρασμό νερού σε ατμομηχανές, αλλά δεν απαιτούσε για καύση βενζίνης. Ως εκ τούτου, για πρώτη φορά ένας ιδιοκτήτης σκάφους θα μπορούσε να χειριστεί το δικό του σκάφος χωρίς τη βοήθεια μηχανικού. Κάποιος θα έπρεπε να άνηκε στην άρχουσα τάξη ώστε να κατέχει ένα από αυτά τα σκάφη. Στη δεκαετία του 1880, ένα σκάφος μήκους 6.5 μέτρων με κινητήρα Naphttha κόστιζε 750 δολάρια (μιάμιση φορά τον ετήσιο μισθό των τεχνιτών που τις κατασκεύαζαν).

Η τεχνολογία του οργανικού κύκλου Rankine αναπτύχθηκε σοβαρά κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα. Στην Ιταλία διεξήχθη ένα πείραμα κατά τη δεκαετία του '30 στο νησί Ischia. Σημαντικές μελέτες διεξήχθησαν μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο στη Ρωσία, τις ΗΠΑ και το Ισραήλ. Πίσω στην Ιταλία, κατά τη δεκαετία του '70, η ιταλική σχολή ORC γεννήθηκε στο Politecnico di Milano, το σημαντικότερο



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

μηχανολογικό πανεπιστήμιο της Ιταλίας. Ο ιδρυτής του ήταν ο καθηγητής Gianfranco Angelino, με τους συναδέλφους του, καθηγητή E. Macchi και τον καθηγητή M. Gaia, τον ιδρυτή του Turboden. [3.1]

ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

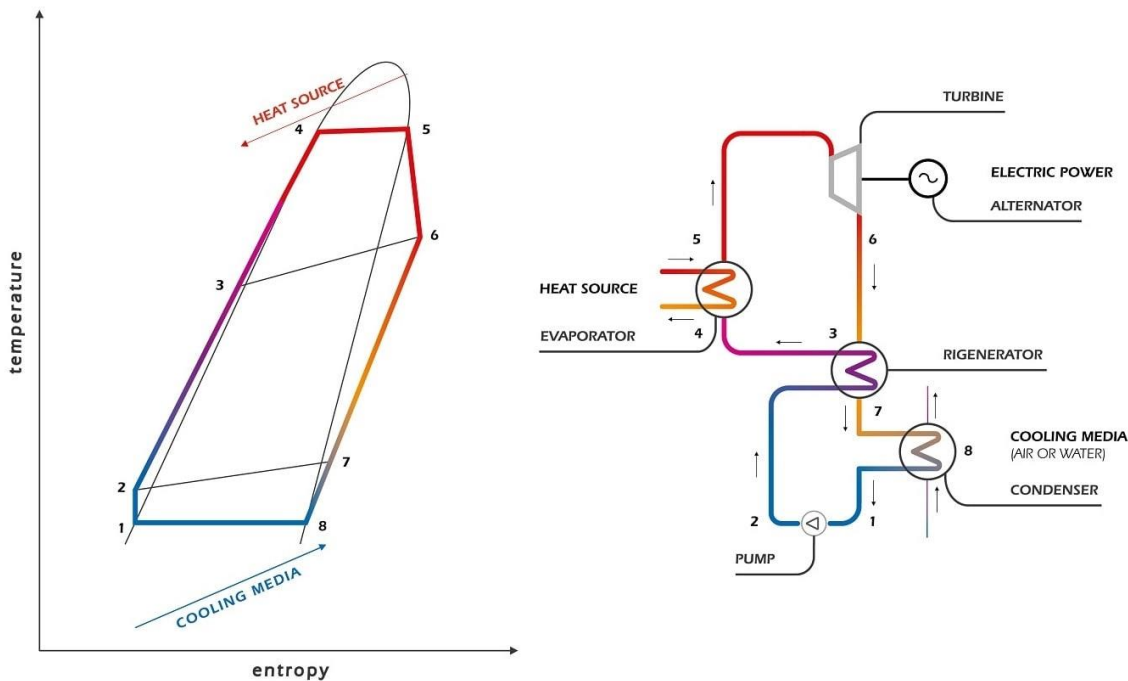
Η αρχή του οργανικού κύκλου Rankine βασίζεται στην λειτουργία ενός ατμοστροβίλου για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτρικής γεννήτριας. Αντί να παράγει ατμό από το νερό, το σύστημα ORC εξατμίζει ένα οργανικό υγρό, που χαρακτηρίζεται από μοριακή μάζα υψηλότερη από εκείνη του νερού, η οποία οδηγεί σε βραδύτερη περιστροφή του στροβίλου, χαμηλότερες πιέσεις και καμία διάβρωση των μεταλλικών μερών και λεπίδων.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία διάταξη ORC είναι τα εξής [3.2]:

- **Ο Στρόβιλος (Turbine)**, ο οποίος είναι το βασικό στοιχείο ολόκληρης της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC, η οποία καθορίζει την απόδοση του συστήματος. Πραγματοποιεί την εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου κατά την έξοδό του από τον λέβητα, με αποτέλεσμα η ενθαλπική πτώση να μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Ο στρόβιλος κινεί το φορτίο (έλικα πλοίου, γεννήτρια, κλπ.).
- **Ο εναλλάκτης θερμότητας – λέβητας**, ο οποίος προσδίδει θερμότητα από την πηγή ενέργειας στο εργαζόμενο μέσο με τη βοήθεια κλειστού κυκλώματος θερμικού ελαίου. Ο λέβητας συνήθως αποτελείται από τους εξής εναλλάκτες θερμότητας:
 - Προθερμαντήρας: Αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού.
 - Εξατμιστής: Το υγρό βρίσκεται σε θερμοκρασία κορεσμού και αρχίζει η ατμοποίησή του.
 - Υπερθερμαντήρας: Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού.
- **Ο Συμπυκνωτής (Condenser)**, ο οποίος είναι εναλλάκτης επιφάνειας, στον οποίο συλλέγεται και συμπυκνώνεται ο ατμός κατά την έξοδο του από τον στρόβιλο και πριν εισέλθει στην αντλία, απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον. Ο συμπυκνωτής μπορεί να ψύχει με χρήση αέρα ή μπορεί να είναι και υδρόψυκτος.
- **Η Τροφοδοτική Αντλία (Feed Pump)**, η οποία φέρνει το εργαζόμενο μέσο από την πίεση συμπύκνωσης στη μέγιστη πίεση του οργανικού κύκλου Rankine. Η αντλία συνήθως οδηγείται από έναν ηλεκτροκινητήρα με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Στην συνέχεια τροφοδοτεί τον λέβητα με το υψηλής πίεσης εργαζόμενο μέσο.

Η παραπάνω διάταξη αποτελεί την απλούστερη μορφή ORC. Όπως είναι αναμενόμενο υπάρχουν διάφορες παραλλαγές οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του κύκλου. Ορισμένες από αυτές θα παρουσιασθούν στην συνέχεια.

Στην συνέχεια παρατίθεται μία εικόνα που αναπαριστά τις μεταβολές στον θερμοδυναμικό κύκλο Rankine σε διάγραμμα θερμοκρασίας (T) – εντροπίας (s) και δίπλα η αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση μίας εγκατάστασης ORC. Στην συγκεκριμένη εικόνα χρησιμοποιείται και αναγεννητής (Regenerator), ο οποίος αποτελεί μία συνήθη παραλλαγή που θα αναφερθεί στην συνέχεια.



Εικόνα 3-1: Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC), Διάγραμμα T-S Και Σχηματική Απεικόνιση του [3.3]

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα η διεργασία που λαμβάνει χώρα μπορεί να περιγραφεί από τις εξής μεταβολές [3.4]:

- **Μεταβολή 1 → 2 (Συμπύεση)** : Το εργαζόμενο μέσο αντλείται από τον συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού και τροφοδοτεί τον λέβητα αφού πρώτα αυξηθεί η πίεσή του. Καθώς το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση η συμπύεση απαιτεί μικρή πρόσδοση ενέργειας.
- **Μεταβολή 2 → 3 (Ισόθλιπτη Θέρμανση)** : Το εργαζόμενο μέσο περνάει από τον αναγεννητή όπου προθερμαίνεται από το θερμό ρεύμα που εξέρχεται από τον στρόβιλο. Η μεταβολή αυτή δεν μεταβάλλει την πίεση μόνο αυξάνει την θερμοκρασία.
- **Μεταβολή 3 → 4 → 5 (Ισόθλιπτη Θέρμανση)** : Το εργαζόμενο μέσο υψηλής πίεσης εισέρχεται στον λέβητα, όπου θερμαίνεται σε σταθερή πίεση από μια εξωτερική πηγή θερμότητας έως ότου φτάσει σε κατάσταση ξηρού κορεσμένου ατμού.
- **Μεταβολή 5 → 6 (Εκτόνωση)** : Ο ξηρός κορεσμένος ατμός εισέρχεται στον στρόβιλο όπου εκτονώνεται κινώντας τον άξονα του στρόβιλου που συνδέεται με την γεννήτρια, επομένως παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.
- **Μεταβολή 6 → 7 (Ισόθλιπτη Ψύξη)** : Το εργαζόμενο μέσο περνάει από τον αναγεννητή απορρίπτοντας θερμότητα αυτή την φορά ώστε να θερμάνει το ψυχρό ρεύμα.
- **Μεταβολή 7 → 8 → 1 (Ισόθλιπτη Ψύξη)** : Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου, διατηρώντας σταθερή πίεση, το ψύχει (με αέρα ή νερό) έως ότου φτάσει στην αρχική κατάσταση κορεσμένου υγρού.

Εάν δεν υπήρχε ο αναγεννητής η μόνη διαφορά θα ήταν ότι δεν θα υπήρχαν οι μεταβολές 2→3 και 6→7. Σε περίπτωση που μελετούσαμε τον ιδανικό κύκλο Rankine οι μεταβολές 1→2 της αντλίας και 5→6 του στρόβιλου θα ήταν ισεντροπικές μεγιστοποιώντας το παραγόμενο έργο του κύκλου.



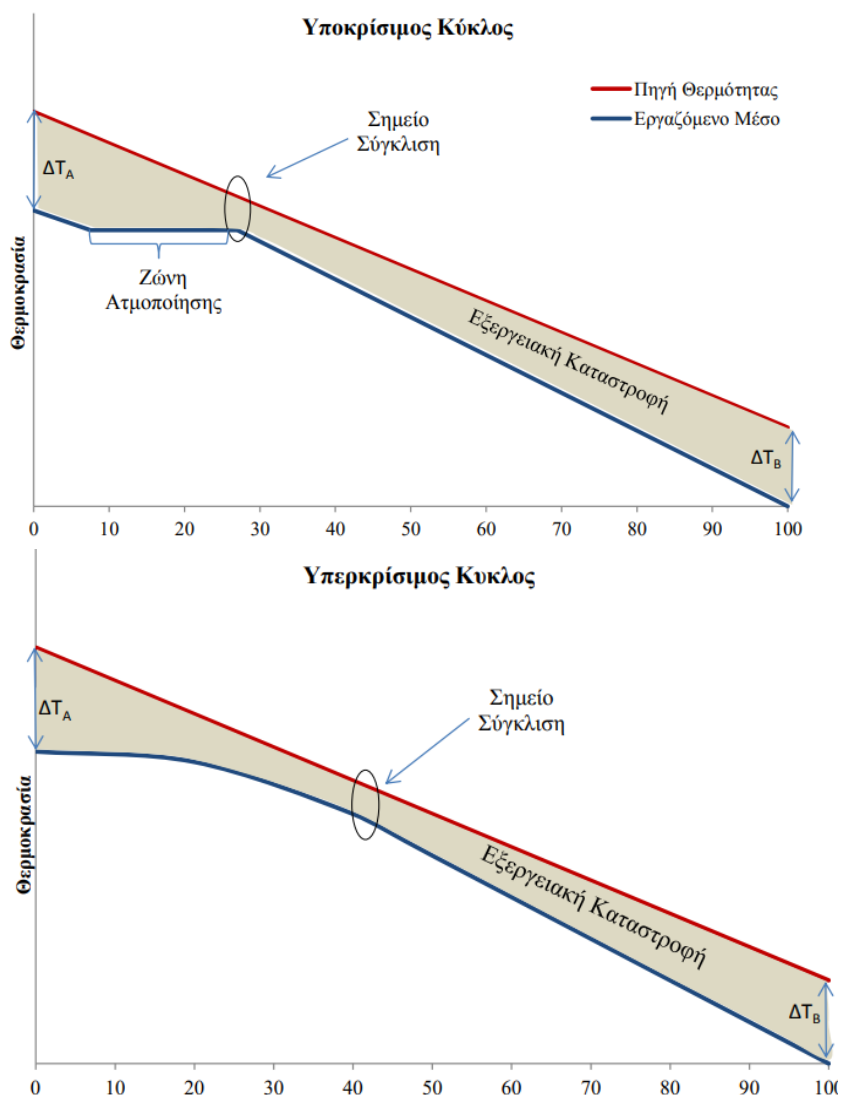
ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

ΥΠΕΡΚΡΙΣΙΜΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Μία τροποποίηση που μπορεί να γίνει στον ORC είναι η εφαρμογή του υπερκρίσιμου κύκλου η οποία επιφέρει μικρότερη εξεργειακή καταστροφή, και κατά συνέπεια αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της πηγής ανάκτησης θερμότητας – άρα και αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος – ιδιαίτερα σε εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών.

Δεδομένου ότι το κρίσιμο σημείο των περισσότερων οργανικών ρευστών παρουσιάζεται σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, ένα σύστημα ORC μπορεί εύκολα να λειτουργήσει σε υπερκρίσιμες συνθήκες. Ένα σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στην υλοποίηση τέτοιων συστημάτων είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός των εναλλακτών θερμότητας, ο οποίος περιλαμβάνει λεπτομερή μελέτη των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας σε υπερκρίσιμες συνθήκες

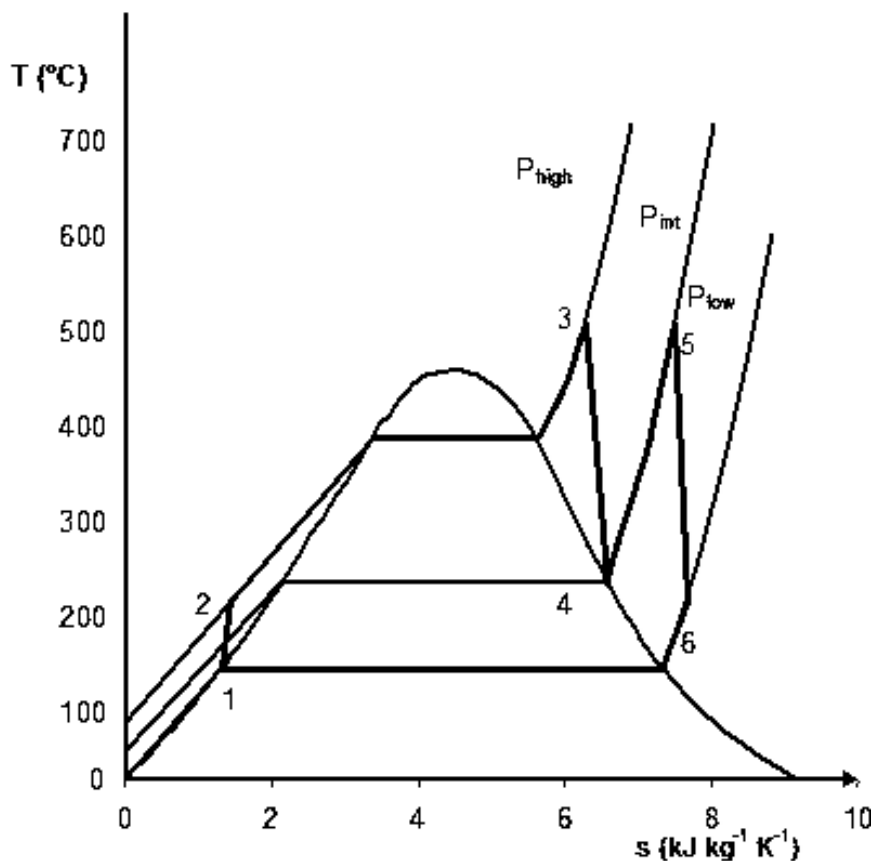
Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η διαφορά εξεργειακής καταστροφής ανάμεσα σε έναν κανονικό (υποκρίσιμο) πάνω και σε έναν υπερκρίσιμο ORC κάτω [3.2]:





ORC ΜΕ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ

Ο σκοπός ενός κύκλου αναθέρμανσης είναι η απομάκρυνση της υγρασίας που φέρει ο ατμός στα τελικά στάδια της εκτόνωσης. Σε αυτή την παραλλαγή, δουλεύουν σε σειρά δύο στρόβιλοι. Ο πρώτος δέχεται ατμό από το λέβητα σε υψηλή πίεση. Αφού ο ατμός διέλθει από τον πρώτο στρόβιλο, εισέρχεται ξανά στον λέβητα και αναθερμαίνεται πριν περάσει από έναν δεύτερο, χαμηλής πίεσης, στρόβιλο. Η βέλτιστη πίεση αναθέρμανσης είναι το ένα τέταρτο της αρχικής πίεσης του λέβητα. Μεταξύ άλλων πλεονεκτημάτων, αυτό παρεμποδίζει τον ατμό κατά τη διάρκεια της εκτόνωσής του να διαβρώσει τα πτερύγια του στρόβιλου και βελτιώνει την απόδοση του κύκλου, επειδή μεγαλύτερο μέρος του κύκλου λαμβάνει χώρα σε υψηλότερη θερμοκρασία. Η ιδέα πίσω από τη διπλή αναθέρμανση είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας. Παρατηρήθηκε ότι δεν χρειάζονται περισσότερα από δύο στάδια επαναθέρμανσης, καθώς το επόμενο στάδιο αυξάνει την αποτελεσματικότητα του κύκλου μόνο κατά το ήμισυ της προηγούμενης φάσης. Σήμερα, η διπλή αναθέρμανση χρησιμοποιείται συνήθως σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που λειτουργούν υπό υπερκρίσιμη πίεση.



Εικόνα 3-2: Διάγραμμα T-S Για ORC Με Αναθέρμανση [3.5]

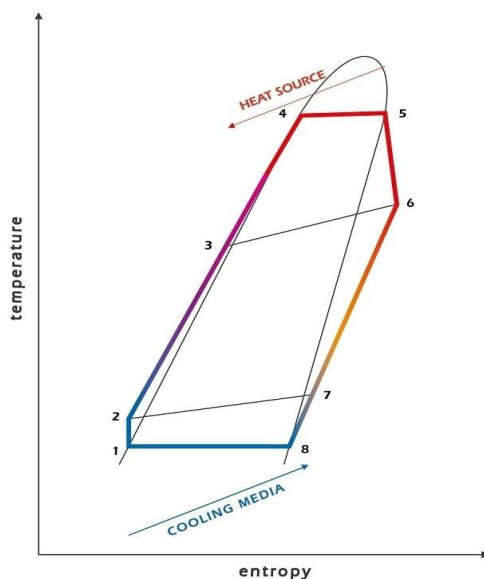


ORC ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ

Ο αναγεννητικός κύκλος Rankine ονομάζεται έτσι επειδή μετά την έξοδο από τον συμπυκνωτή (ενδεχομένως ως υπόψυκτο υγρό) το εργαζόμενο μέσο θερμαίνεται με ατμό που τροφοδοτείται από το θερμό τμήμα του κύκλου. Ο κύκλος με αναγέννηση (με δευτερεύουσες παραλλαγές) χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα σε πραγματικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής για τον λόγο αυτό παρουσιάστηκε και στο αρχικό παράδειγμα.

Η αναγέννηση αυξάνει τη θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου του κύκλου, εξαλείφοντας την ανάγκη για προσθήκη θερμότητας από τον λέβητα στις σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες τροφοδοσίας που θα υπήρχε χωρίς την αναγεννητική θέρμανση. Αυτό βελτιώνει την απόδοση του κύκλου, καθώς μεγαλύτερο μέρος από τη ροή θερμότητας στον κύκλο γίνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα T-s του κύκλου Rankine με αναγεννητική προθέρμανση. Ουσιαστικά η λειτουργία του είναι από την μεταβολή 2 → 5 να λαμβάνει μέρος της θερμότητας του τμήματος 2→3 διευκολύνοντας έτσι το έργο του λέβητα. Για να θερμάνει το τμήμα 2→3 ψύχει το αντίστοιχο τμήμα 6→7.



Εικόνα 3-3: Διάγραμμα T-s ORC Με Αναγεννητική Προθέρμανση [3.3]

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΣΥΝΔΕΟΜΕΝΩΝ ORC

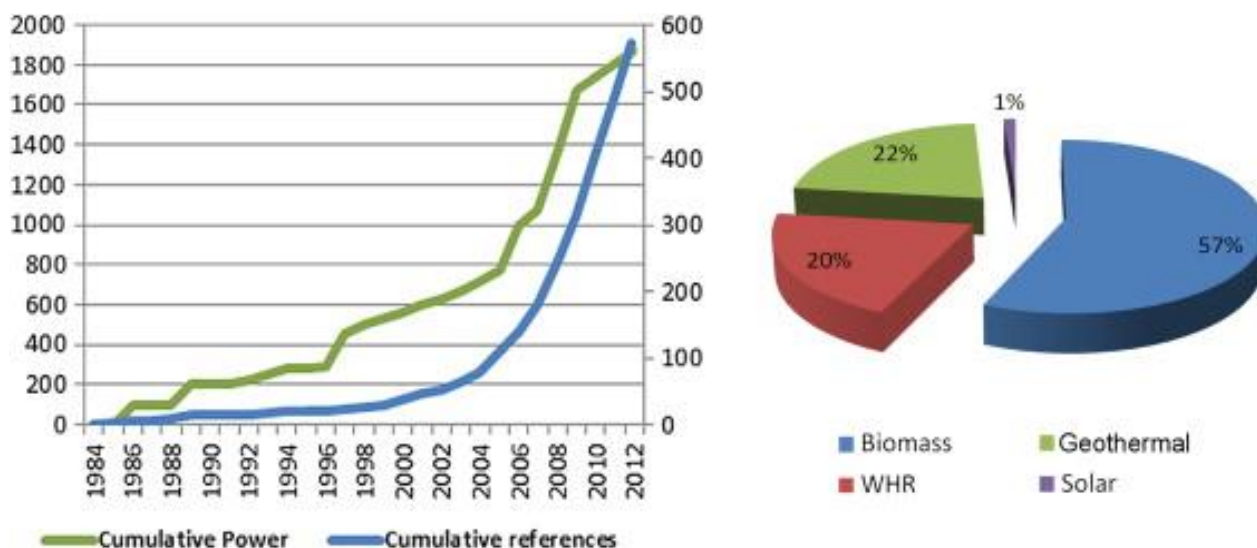
Τέλος, μία παραλλαγή που εφαρμόζεται σπάνια είναι το σύστημα συνδεόμενων κύκλων Rankine. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα λειτουργεί με δύο κύκλους διαφορετικής θερμοκρασίας, οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τον εξής τρόπο. Το εργαζόμενο μέσο του κύκλου υψηλής θερμοκρασίας κατά την έξοδό του από τον στρόβιλο εισέρχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας, λειτουργώντας με αυτόν τον τρόπο ως ατμοποιητής. Σημειώνεται πως κάθε κύκλος μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικό εργαζόμενο μέσο προς μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Ο μοναδικός περιορισμός είναι πως η ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου υψηλής θερμοκρασίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου χαμηλής θερμοκρασίας.



ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE

Παρόλο που ερευνήθηκαν από τη δεκαετία του 1960 δεν έχουν βρει μέχρι σήμερα πλατιά εφαρμογή. Μονάχα την τελευταία εικοσαετία, με την αυξανόμενη ανησυχία για τη μελλοντική εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και την παγκόσμια περιβαλλοντική καταστροφή έχει στραφεί το ενδιαφέρον των ερευνητών σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας χαμηλών θερμοκρασιών. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του, ένας ORC μπορεί να ανακτήσει θερμότητα από διάφορες πηγές, όπως έχει ήδη αποδειχθεί από την επιτυχή λειτουργία διαφόρων εγκαταστάσεων στις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ιταλία, την Αυστρία, τη Γερμανία, την Ολλανδία, τη Σουηδία και αλλού [Turboden, Tri-o-gen].

Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε την πορεία των ORC τα τελευταία 30 έτη περίπου καθώς και το μερίδιο το οποίο αντιστοιχεί σε κάθε εφαρμογή από τον συνολικό αριθμό εγκατεστημένων ORC.



Εικόνα 3-4: Εξέλιξη της Αγοράς ORC 1984-2012 (Αριστερά), Καταμερισμός Εγκατεστημένης Ισχύος το 2012 (Δεξιά) [3.5]

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Με 376 MW εγκατεστημένης Ισχύος παγκοσμίως και αλλά 40 MW υπο κατασκευή, η αγορά στον τομέα ανάκτησης θερμότητας είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Η βασική εφαρμογή είναι στην ανάκτηση θερμότητας από κινητήρες Diesel και ατμοστρόβιλους, τα οποία καταλαμβάνουν το 65% της εγκατεστημένης ισχύος. Η εταιρεία ORMAT δραστηριοποιείται σε αυτές τις εφαρμογές έχοντας εγκαταστήσει συνολικά 24 εγκαταστάσεις ισχύος 8 MW. Ακολουθεί η Turboden με 9 εγκαταστάσεις περίπου 1 MW. Η ανάκτηση θερμότητας από μηχανές καύσης είναι ευκολότερη σε σχέση με τις βιομηχανικές διεργασίες. Αλλά με την πάροδο του χρόνου οι μηχανές γίνονται ολοένα και πιο αποδοτικές φτάνοντας σε σημείο να μην θεωρείται η ανάκτηση θερμότητας από ORC ως ανανεώσιμη. Διάφορες μελέτες υποστηρίζουν ότι η ανάκτηση θερμότητας έχει μεγάλο δυναμικό ιδιαίτερα στην Ευρώπη, τις Η.Π.Α. και την Κίνα. Παρόλα αυτά υπάρχουν εμπόδια στην ανάπτυξη αυτή που αφορούν νομοθετικούς, περιβαλλοντικούς και κυρίως οικονομικούς λόγους.



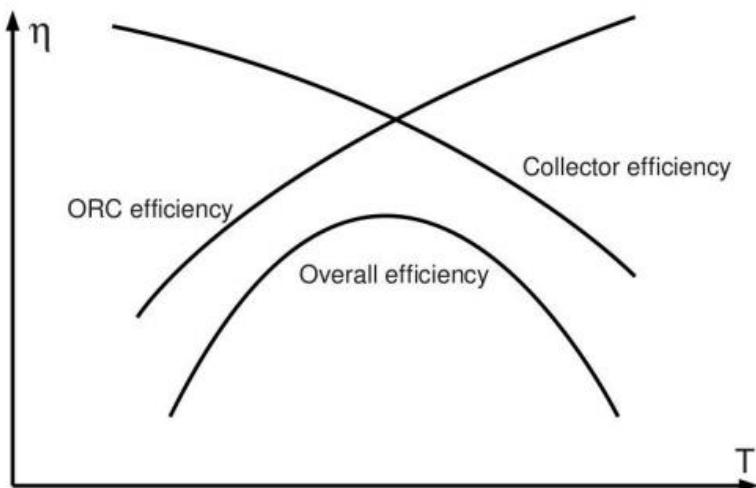
ΗΛΙΑΚΑ

Οι οργανικοί κύκλοι Rankine φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για να μειωθεί το μέγεθος των εγκαταστάσεων και των επενδυτικών δαπανών. Μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να μειωθεί μέχρι την κλίμακα kW. Τεχνολογίες όπως οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για ηλιακά συστήματα με ORC, καθώς απαιτούν χαμηλότερο επενδυτικό κόστος, αλλά λειτουργούν και σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Το πλεονέκτημα των συστημάτων ORC έναντι των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι το γεγονός πως δεν είναι αναγκαίο να αποθηκευτεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθότι υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας και η αξιοποίησή της για την παραγωγή ηλεκτρισμού, όταν αυτό είναι αναγκαίο. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι αρκετά αποδοτικότερη και πιο οικονομική σε σχέση με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες είναι ακριβές, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και μικρή αποδοτικότητα. Έτσι, ενώ οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων μοιάζουν να είναι η ιδανική επιλογή για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε απομονωμένα συστήματα λόγω απλότητας κατασκευής, η ανάγκη για αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά τα συστήματα ORC μια ανταγωνιστική τεχνολογία.

Άλλα πλεονεκτήματα της χρήσης συστημάτων ORC σε ηλιακές εφαρμογές είναι ότι επιτρέπουν χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία εισροής θερμότητας, καλύτερο βαθμό απόδοσης ανταλλαγής θερμότητας – λόγω μειωμένων περιβαλλοντικών απωλειών – άρα και μείωση του μεγέθους των ηλιακών πάρκων.

Στην παρακάτω εικόνα αξίζει να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι η θερμοκρασία στην οποία θα λειτουργεί ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών με ORC απαιτεί οικονομοτεχνική μελέτη καθώς η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ του κύκλου ORC αυξάνεται.



Εικόνα 3-5: Απόδοση ORC, Ηλιακών Συλλεκτών και Συστήματος σε σχέση με την θερμοκρασία [3.6]



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

ΒΙΟΜΑΖΑ

Ο ORC παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον παραδοσιακό κύκλο ατμού. Αρχικά ο λέβητας λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και σε χαμηλότερη πίεση, καθώς θερμαίνει μόνο λάδι σε θερμοκρασία περίπου 300°C και σε χαμηλή πίεση. Οι ατμολέβητες πρέπει, αντιθέτως να υπερθερμάνουν τον ατμό σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 450°C για να αποφεύγετε η δημιουργία σταγονιδίων κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης. Η πίεση είναι από περίπου 60 έως 70 bar και οι θερμικές τάσεις αυξάνουν δραματικά την πολυπλοκότητα και το κόστος του λέβητα ατμού σε σύγκριση με έναν λέβητα θερμικού πετρελαίου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του ORC είναι ότι έχει χαμηλότερη πίεση λειτουργίας από τον κύκλο του ατμού. Αυτό μειώνει την εγκατάσταση και το κόστος για τη διαχείριση της εγκατάστασης σε σχέση με τα πρότυπα ασφαλείας.

Από την άλλη μεριά, η αποδοτικότητα της παραγωγής ενέργειας με την ORC είναι χαμηλότερη από την απόδοση των παραδοσιακών κύκλων ατμού και γενικά μειώνεται με το μέγεθος της εγκατάστασης. Ως εκ τούτου, η ύπαρξη θερμότητας αποτελεί προϋπόθεση για την αύξηση της συνολικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Αυτή η ανάγκη θερμότητας μπορεί να ικανοποιηθεί από βιομηχανικές διεργασίες (όπως ξήρανση ξύλου). Η δεύτερη λύση περιλαμβάνει τη σπατάλη της πρόσθετης θερμότητας αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι αυξάνει τις ετήσιες ώρες λειτουργίας πλήρους φορτίου.

ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Επί του παρόντος, υπάρχουν 504 γεωθερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε λειτουργία σε 27 χώρες με τη συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να ανέρχεται σε 10 GW. Οι κύριοι τύποι γεωθερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι [3.2] :

- Ξηρού ατμού ($T=240-320^{\circ}\text{C}$, $\eta=35-45\%$)
- Ακαριαίας εξάτμισης, απλής βαθμίδας ($T=180-300^{\circ}\text{C}$, $\eta=50-65\%$)
- Ακαριαίας εξάτμισης, διπλής βαθμίδας ($T=200-260^{\circ}\text{C}$, $\eta=30-35\%$)
- Δυαδικού συστήματος ($T=125-165^{\circ}\text{C}$, $\eta=25-45\%$)

Από τις ανωτέρω κατηγορίες, οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες εγκαταστάσεις είναι του δυαδικού κύκλου, καθότι αποτελούν τη μοναδική λύση ανάκτησης θερμότητας από πηγές θερμοκρασίας χαμηλότερης των 150°C. Η πρώτη εξ αυτών τέθηκε σε λειτουργία στην Paratunka της Ρωσίας το 1967, με παραγόμενη ισχύ 680 kW, η οποία και απέδειξε την εφικτότητα των εγκαταστάσεων δυαδικού κύκλου. Σήμερα λειτουργούν 108 μονάδες παγκοσμίως, συνολικής ισχύος 73 MW. Αποτελούν το 31% του συνόλου των γεωθερμικών εγκαταστάσεων αλλά παράγουν μονάχα το 4% της συνολικής ισχύος.

Δεν είναι τυχαίο πως στις εγκαταστάσεις δυαδικού κύκλου εφαρμόζεται η τεχνολογία OKR. Στις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις η θερμική ενέργεια της πηγής (υγρής μορφής) μεταφέρεται μέσω εναλλακτών θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο του OKR, μέσω του οποίου παράγεται μηχανική ενέργεια.



3.2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ένας εναλλάκτης θερμότητας είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ή περισσότερων ρευστών. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται τόσο στις διαδικασίες ψύξης όσο και στη θέρμανση. Τα υγρά μπορούν να διαχωριστούν από ένα στερεό τοίχωμα για να αποφευχθεί η ανάμειξη ή μπορεί να βρίσκονται και σε άμεση επαφή. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού, σταθμούς παραγωγής ενέργειας, χημικά εργοστάσια, πετροχημικά εργοστάσια, διυλιστήρια πετρελαίου, επεξεργασία φυσικού αερίου και επεξεργασία λυμάτων.

Στους πιο απλούς εναλλάκτες το θερμό και το ψυχρό ρευστό αναμειγνύονται απευθείας. Πιο συνηθισμένοι ωστόσο είναι οι εναλλάκτες στους οποίους τα δυο ρευστά δεν έρχονται σε επαφή εξαιτίας της ύπαρξης κάποιου παρεμβαλλόμενου τοιχώματος. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη μπορεί να φέρει είτε ένα απλό επίπεδο τοίχωμα, ώστε να επιτυγχάνεται η απομόνωση των δυο ρευστών, είτε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες με πολλαπλές διαδρομές, όπως πτερύγια (fins) και ανακλαστήρες (baffles). Σε αυτήν την περίπτωση για την περιγραφή της μεταφοράς ενέργειας χρησιμοποιούνται οι αρχές μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και σπανιότερα με ακτινοβολία.

Επειδή οι εναλλάκτες θερμότητας βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα διεργασιών, υπάρχουν διάφοροι τύποι εναλλακτών. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι εναλλακτών κατηγοριοποιημένοι πρώτα ανάλογα με την ροή των ρευστών και εν συνεχεία σύμφωνα με την αρχική τους κατασκευή.

Η ροή των ρευστών σε έναν εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

- **Εναλλάκτες ομοροής (parallel-flow)**
- **Εναλλάκτες αντιροής (counter-flow)**
- **Εναλλάκτες σταυρωτής ροής (cross-flow)**
- **Εναλλάκτες συνδυασμένης ροής (π.χ. cross/counter-flow)**

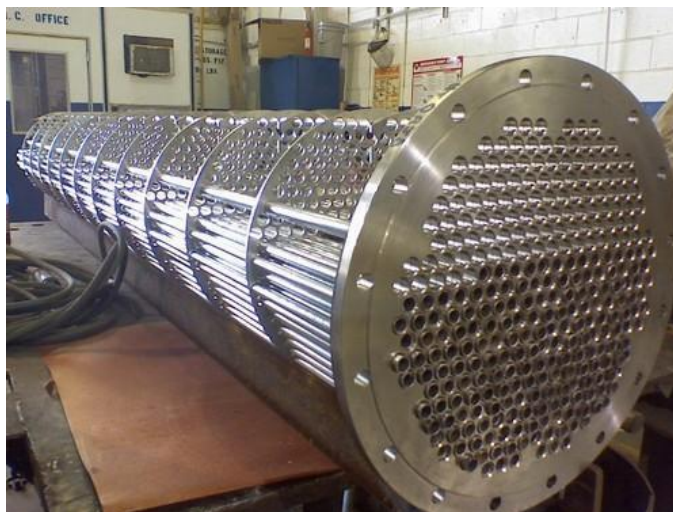
Η δεύτερη κατηγοριοποίηση των εναλλακτών θερμότητας είναι σύμφωνα με την αρχική τους κατασκευή. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι καθώς επίσης η πίεση και η θερμοκρασία λειτουργίας όπως και η επιφάνεια συναλλαγής:

Πίνακας 3-1: Κατηγοριοποίηση Εναλλακτών Ανάλογα Με Τύπο Κατασκευής [3.7]

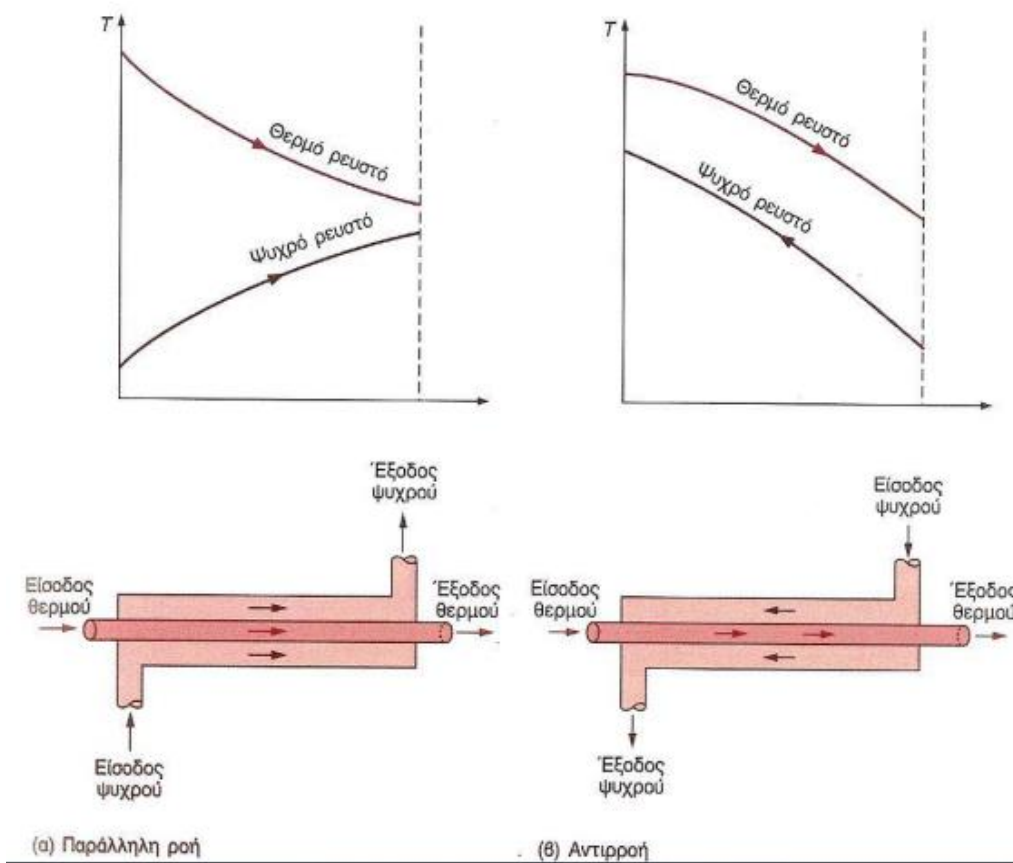
Τύπος Εναλλάκτη	Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας (MPa)	Θερμοκρασιακή Περιοχή Λειτουργίας (°C)	Επιφάνεια Συναλλαγής (m ²)
Κελύφους-Σωλήνων	30	-200 εως 600	10-1000
Διπλού Σωλήνα	>140	-100 εως 600	0.25-200
Επίπεδων Πλακών	1.6	-25 εως 175	1-1200
Ελικοειδών Ελασμάτων	2	25 εως 400	<200
Συγκολλημένων Πλακών	3	<400	>1000
Αερόψυκτος Εναλλάκτης	2	<1000	5-200



Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένας τυπικός εναλλάκτης θερμότητας κελύφους-σωλήνων.



Η θερμοκρασιακή κατανομή αλλάζει από εναλλάκτη σε εναλλάκτη. Η βασικότερη διαφοροποίηση είναι βάσει της ροής των ρευστών. Στην συνέχεια φαίνονται οι κατανομές θερμοκρασίας για ομοροή (παράλληλη) και αντιροή σε εναλλάκτη διπλού σωλήνα. Αντίστοιχες είναι οι κατανομές και για τα υπόλοιπα είδη εναλλακτών.



Εικόνα 3-6: Θερμοκρασιακή Κατανομή Εναλλάκτη Ομοροής Και Αντιροής [3.8]



ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Το συναλασόμενο ποσό θερμότητας σε έναν εναλλάκτη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q = m_h \cdot c_{p,h} \cdot (T_{hi} - T_{ho}) = m_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{co} - T_{ci}) \quad [3.1]$$

Επίσης σύμφωνα με την μέθοδο της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς (LMTD) ισχύει η σχέση:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad [3.2]$$

Όπου

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}} \quad [3.3]$$

$m_h, m_c \rightarrow$ παροχές μάζας θερμού και ψυχρού ρεύματος

$c_{p,c}, c_{p,h} \rightarrow$ ειδικές θερμοχωρητικότητες θερμού και ψυχρού ρεύματος

$U \rightarrow$ ειδική θερμική διαπερατότητα

$A \rightarrow$ συνολική επιφάνεια συναλλαγής

$\Delta T_{in} \rightarrow$ θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών στην είσοδο του εναλλάκτη

$\Delta T_{out} \rightarrow$ θερμοκρασιακή διαφορά των ρευστών στην έξοδο του εναλλάκτη

Η μέθοδος LMTD χρησιμοποιείται για μελέτη εναλλάκτη με δεδομένες τις θερμοκρασίες όπου ζητείται η επιφάνεια συναλλαγής. Ως παραμέτρους χρησιμοποιούμε τον τύπο εναλλάκτη, τις ειδικές θερμοχωρητικότητες και τις παροχές των ρευστών. Εναλλακτικά υπάρχει η μέθοδος NTU η οποία χρησιμεύει στην μελέτη της συμπεριφοράς υπάρχοντος εναλλάκτη με δεδομένη την επιφάνεια συναλλαγής. Οι παράμετροι και σε αυτή την μέθοδο είναι οι ίδιες.



3.3. ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΑ

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη χρήση ενός οργανικού κύκλου Rankine είναι η επιλογή του εργαζόμενου μέσου. Το εργαζόμενο μέσο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθότι επηρεάζει σημαντικά τον θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου, το ποσοστό αξιοποίησης της διαθέσιμης – από την πηγή – θερμότητας, άρα και το συνολικό κόστος του συστήματος. Γενικώς, υπάρχει μεγάλη ποικιλία οργανικών ρευστών κατάλληλων για χρήση σε συστήματα ORC. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψιν κατά την επιλογή του εργαζόμενου μέσου [3.6]:

- **Θερμοδυναμική απόδοση:** η απόδοση και η ισχύς εξόδου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερες για τις θερμοκρασίες της πηγής θερμότητας. Αυτό γενικά συνεπάγεται χαμηλή κατανάλωση από την αντλία και υψηλό κρίσιμο σημείο.
- **Ξηρή, ισεντροπική ή υγρή καμπύλη κορεσμού.** Μια αρνητική καμπύλη ατμών κορεσμού (υγρό μέσο) οδηγεί σε σταγονίδια στο τέλος της εκτόνωσης. Συνεπώς, ο ατμός πρέπει να υπερθερμανθεί κατά τη διάρκεια του κύκλου για να αποφευχθεί η βλάβη του στροβίλου, πράγμα που μειώνει την απόδοση του κύκλου. Στην περίπτωση θετικής καμπύλης κορεσμού ("ξηρό" ρευστό), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανακομιστής για την αύξηση της αποτελεσματικότητας του κύκλου.
- **Υψηλή πυκνότητα ατμών:** αυτή η παράμετρος έχει καίρια σημασία, ειδικά για υγρά που παρουσιάζουν πολύ χαμηλή πίεση συμπύκνωσης (π.χ. έλαια πυριτίου). Η χαμηλή πυκνότητα οδηγεί σε πολύ ογκώδη (άρα και ακριβό) εξοπλισμό στον στρόβιλο και στον συμπυκνωτή.
- **Αποδεκτές πιέσεις:** οι υψηλές πιέσεις συνήθως οδηγούν σε υψηλότερο κόστος επένδυσης και αυξημένη πολυπλοκότητα.
- **Υψηλή θερμοκρασιακή σταθερότητα:** σε αντίθεση με το νερό, τα οργανικά υγρά συνήθως υποφέρουν από χημικές αλλοιώσεις και αποσύνθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι περιορισμένη από τη χημική σταθερότητα του εργαζόμενου μέσου.
- **Χαμηλός περιβαλλοντικός αντίκτυπος και υψηλό επίπεδο ασφάλειας:** οι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι εξής:
 - Ozone depletion potential (ODP): η οποία εκφράζει την εν δυνάμει καταστροφή του στρώματος του όζοντος της ατμόσφαιρας
 - Global Warming Potential (GWP): η οποία εκφράζει την εν δυνάμει συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη
 - Τοξικότητα
 - Αναφλεξιμότητα
- **Διαθεσιμότητα και κόστος**

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες εργαζόμενων μέσων για τους κύκλους Rankine. Η πιο απλή μορφή εργαζόμενου μέσου είναι το νερό. Επίσης ως εργαζόμενα μέσα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένα οργανικά ρευστά (λειτουργώντας έτσι έναν οργανικό κύκλο Rankine). Τέλος για περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και ζεοτροπικά μίγματα οργανικών ρευστών. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις αυτές κατηγορίες με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

ΝΕΡΟ ΩΣ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΜΕΣΟ

Με νερό ως εργαζόμενο μέσο λειτουργεί ο συμβατικός κύκλος Rankine. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του νερού συνοψίζονται παρακάτω:

- ✓ Υψηλή θερμοκρασιακή σταθερότητα
- ✓ Χαμηλό Ιξώδες
- ✓ Φιλικό προς το περιβάλλον (οι δείκτες ODP και GWP είναι μηδενικοί)
- ✓ Δεν είναι τοξικό ούτε εύφλεκτο
- ✓ Είναι φθινό και υπάρχει σε αφθονία

Από την άλλη υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα στην χρήση νερού. Αυτά είναι:

- Ανάγκη για υπερθέρμανση προς αποφυγή δημιουργίας σταγονιδίων κατά την εκτόνωση
- Κίνδυνος διάβρωσης των πτερυγίων του στροβίλου
- Υψηλή πίεση εξάτμισης
- Ανάγκη για χρήση πολύπλοκων στροβίλων, άρα και πιο ακριβών

Το νερό είναι κατάλληλο για εφαρμογές οι οποίες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε συστήματα μεγάλου μεγέθους. Σε μικρές ή μεσαίες εγκαταστάσεις προκειμένου να αντισταθμιστούν τα μειονεκτήματα του νερού συνήθως χρησιμοποιούνται οργανικά εργαζόμενα μέσα.

ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ ΩΣ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την μελέτη των οργανικών ρευστών ως εργαζόμενα μέσα σε ORC. Η πολυπλοκότητα της επιλογής κατάλληλων οργανικών μέσων έγκειται σε δύο βασικούς παράγοντες: Ο πρώτος είναι το γεγονός ότι οι κύκλοι Rankine μπορούν να λειτουργούν από τους 80°C σε εγκαταστάσεις γεωθερμίας, έως τους 500°C για καύση βιομάζας δημιουργώντας έτσι ένα τεράστιο εύρος συνθηκών λειτουργίας. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι η επιλογή οργανικού μέσου γίνεται μέσα από μία πληθώρα διαφορετικών μέσων με αποτέλεσμα η επιλογή του πλέον κατάλληλου να είναι πολύ περίπλοκη.

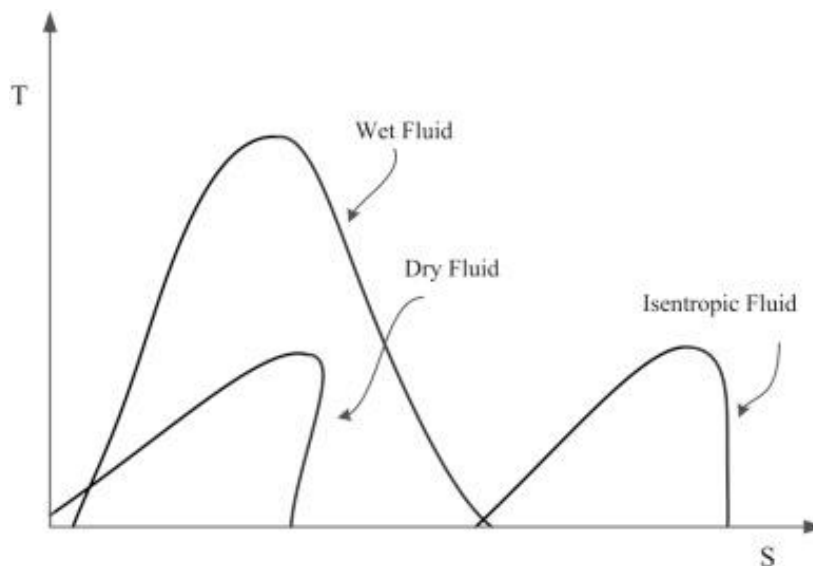
Τα οργανικά ρευστά συνήθως ταξινομούνται με βάση την κλίση της καμπύλης κορεσμού του διαγράμματος θερμοκρασίας-εντροπίας σε:

- Ξηρά οργανικά ρευστά (θετική κλίση)
- Ισεντροπικά οργανικά ρευστά (μηδενική κλίση)
- Υγρά οργανικά ρευστά (αρνητική κλίση)

Τα ισεντροπικά και τα ξηρά οργανικά ρευστά θεωρούνται πλέον κατάλληλα ως εργαζόμενα μέσα, καθότι δεν εμφανίζουν τον κίνδυνο δημιουργίας σταγονιδίων κατά την εκτόνωση, διότι δεν υπάρχει περίπτωση εισαγωγής στη διφασική περιοχή κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διεργασίας. Εάν όμως το ρευστό είναι “υπερβολικά στεγνό”, μετά το πέρας της διεργασίας εκτόνωσης, αυτό θα βρίσκεται στην υπέρθερμη περιοχή του διαγράμματος, προσθέτοντας σημαντικό ψυκτικό φορτίο στον συμπυκνωτή. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας το ρευστό, στην κατάσταση που αυτό εξέρχεται από τον στρόβιλο, για την προθέρμανσή του πριν τη θέρμανσή του από το θερμό ρευστό (αναγεννητικός κύκλος Rankine).



Στην συνέχεια φαίνεται η καμπύλη κορεσμού για Ξηρά, Ισεντροπικά και Υγρά οργανικά μέσα:



Εικόνα 3-7: Καμπύλη Κορεσμού Ξηρού, Ισεντροπικού Και Υγρού Οργανικού Μέσου [3.9]

Τα οργανικά ρευστά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επίσης με βάση την μοριακή τους δομή ως εξής:

- Χλωροφθοροάνθρακες (CFCs): Απαγορεύθηκαν από το πρωτόκολλο του Μοντρεάλ λόγω της καταστροφής του στρώματος του όζοντος και έχουν απαγορευτεί πλήρως από το 2010.
- Υδροχλωροφθοροάνθρακες (HCFCs): Απαγορεύτηκαν για τον ίδιο λόγο και η φάση της απόσυρσής τους έχει ξεκινήσει από το 1996 και θα ολοκληρωθεί μέχρι το 2030.
- Υδροφθοροάνθρακες (HFCs): Αποτελούν τους αντικαταστάτες των HCFCs έχοντας καλές θερμοδυναμικές ιδιότητες και χαμηλό ODP.
- Υδρογονάνθρακες (HCs): Επιθυμητές θερμοδυναμικές ιδιότητες αλλά και υψηλή αναφλεξιμότητα.
- Υπερφθοροάνθρακες (PFCs): Εξαιρετικά σταθερά και αδρανή ρευστά με περίπλοκη μοριακή δομή. Μη επιθυμητές ιδιότητες (διαβρωτικά, εύφλεκτα, ή τοξικά αέρια).

Στην συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας με ορισμένα οργανικά μέσα που μελετήθηκαν και τις ιδιότητές τους:

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ					
Εργαζόμενο Μέσο	P_{crit} (bar)	T_{crit} (K)	GWP	ODP	AHRAE 34 Safety Group
Cyclohexane	40.824	553.60	-	0	A3
Toluene	41.09	591.79	3	0	B3
Cyclopentane	45.712	511.72	<0.1	0	-
Isopentane	33.78	460.35	4±2	0	600 A3
MDM	14.1	564.09	-	0	A2
R134a	40.59	374.21	1430	0	1000 A1
R744/CO ₂	73.773	304.128	1	0	5000 A1
R12	41.361	385.12	10900	1	1000 A1
R245fa	36.51	427.01	1030	0	300 B1



ΖΕΟΤΡΟΠΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΩΣ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ

Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα αμιγή ρευστά ως εργαζόμενα μέσα σε θερμοδυναμικούς κύκλους είναι ο σχετικά μειωμένος θερμικός βαθμός απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι η απαγωγή και λήψη θερμότητας στη διφασική περιοχή πραγματοποιείται υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία, οδηγώντας σε μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των συνεργαζόμενων ρευστών, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της αναντιστρεπτότητας κατά τις διεργασίες αυτές.

Το κύριο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα ζεοτροπικά μείγματα έναντι των αμιγών ρευστών σε κύκλους μετατροπής ενέργειας είναι πως η λήψη και απαγωγή της θερμότητας γίνεται μεν ισοβαρώς, αλλά όχι και ισοθερμοκρασιακά. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας στη διφασική περιοχή εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των συνεργαζόμενων ρευστών κατά τις διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας, μειώνοντας έτσι την εξεργειακή καταστροφή.

Παρ' όλο που δεν υπάρχει γενικός κανόνας όσον αφορά την αναλογία δυο οργανικών ρευστών σε ένα μείγμα, εμπειρικά έχει βρεθεί ότι μείγματα με δύο ή περισσότερα συστατικά σε ίδιες αναλογίες παρουσιάζουν σχεδόν σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση κατά τις διεργασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα μειωμένες θερμοκρασιακές διαφορές με τη πηγή θερμότητας αλλά και το ρευστό του συμπυκνωτή. Αντιθέτως, μείγματα δυο οργανικών ρευστών με διαφορετικές περιεκτικότητες οδηγούν σε δυσμενή θερμοκρασιακά προφίλ, λόγω της μεταβλητής ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση κατά τις ίδιες διεργασίες.

ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΑ ΜΕΣΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Η κύρια λειτουργία των θερμικών μέσων είναι η μετακίνηση της θερμότητας από τον συλλέκτη στο σημείο ζήτησης (συνήθως δοχείο διαστολής). Τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας έρχονται σε πολλούς διαφορετικούς τύπους και πυκνότητες. Οι ιδιότητες του κάθε υγρού καθιστούν μερικά υγρά καλύτερα για ορισμένες εφαρμογές από άλλα. Μερικές φορές αποτελεί πρόκληση η επιλογή ενός ρευστού έναντι άλλου με φαινομενικά ισότιμους συνδυασμούς μεταξύ των διαφόρων επιλογών. Στο τέλος, η αξιοπιστία και τα υπάρχοντα στοιχεία που μειώνουν τον κίνδυνο που συνδέεται με οποιαδήποτε επιλογή ρευστού είναι συνήθως αυτά που καθοδηγούν τις αποφάσεις. Παράλληλα ερευνούνται και αναπτύσσονται νέα υγρά, το οποία προωθούν τα συστήματα που χρησιμοποιούνται ήδη.

Τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας κατηγοριοποιούνται σε έξι κύριες κατηγορίες [3.10]:

- **Αέρας/Αέρια:** Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα από τη χρήση του αέρα είναι ο λόγος κόστος/απόδοσης. Επίσης παρουσιάζει αρκετά καλές ιδιότητες ροής. Ωστόσο, τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά του είναι η αδυναμία του να μεταφέρει θερμότητα, με αποτέλεσμα μεγάλες θερμικές απώλειες και οξείδωση.
- **Νερό/Ατμός:** Το νερό παρουσιάζει πολύ υψηλή ειδική και θερμική αγωγιμότητα, που σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητά του και το χαμηλό κόστος το καθιστούν κατάλληλο υγρό για τη μεταφορά και τη χρήση θερμότητας. Ωστόσο, το νερό εμφανίζει ορισμένες χημικές ενώσεις, όπως διάφορες προσμίξεις του ασβεστίου και του μαγνησίου, των οποίων η διαλυτότητα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και μπορούν επομένως να οδηγήσουν σε εμφάνιση διάβρωσης, που αποτελεί αρκετά μεγάλο πρόβλημα.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

- **Ψυκτικά:** Αυτά χρησιμοποιούνται γενικότερα ως το μέσο μεταφοράς θερμότητας σε ψυγεία, κλιματιστικά και αντλίες θερμότητας. Συνήθως, παρουσιάζουν χαμηλό σημείο βρασμού και μεγάλο δείκτη μεταφοράς θερμότητας. Τα ψυκτικά ανταποκρίνονται γρήγορα στην ηλιακή θερμότητα, κάτι που τους καθιστά ποιο αποτελεσματικούς κατά τη διάρκεια ημερών που έχει σχετική συννεφιά. Η απορρόφηση της θερμότητας πραγματοποιείται όταν το ρευστό βράζει (αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο) στον ηλιακό συλλέκτη. Η απελευθέρωση της θερμότητας αυτής λαμβάνει χώρα όταν το αέριο πλέον ψυκτικό συμπυκνώνεται σε υγρό στον εναλλάκτη θερμότητας ή στον συμπυκνωτή.
- **Θερμικά έλαια:** Τα έλαια αυτά έχουν πολύ υψηλή τιμή ιξώδους και μικρότερη ειδική θερμοχωρητικότητα από το νερό. Επομένως είναι λογικό ότι χρειάζονται μεγαλύτερα ποσά για την κυκλοφορία τους. Αυτά τα έλαια είναι σχετικά φθηνά και έχουν χαμηλό σημείο πήξης. Οι βασικές κατηγορίες τους είναι συνθετικοί υδρογονάνθρακες, υδρογονάνθρακες από παραφίνη και αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Από αυτούς οι συνθετικοί είναι σχετικά μη-τοξικοί και χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση. Οι υδρογονάνθρακες από παραφίνη έχουν ευρύτερο θερμοκρασιακό πεδίο μεταξύ πήξης και βρασμού, συγκριτικά πάντα με το νερό. Ωστόσο είναι τοξικοί και απαιτούν ειδικά διπλά τοιχώματα στον εναλλάκτη θερμότητας. Τέλος, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι εκείνοι με το χαμηλότερο ιξώδες από τους τρεις.
- **Τηγμένα Άλατα:** Με την χρήση τηγμένων αλάτων μπορεί να αναπτύξει φθηνή και επεκτάσιμη θερμική αποθήκευση, επιτρέποντας έτσι οικονομικά αποδοτική 24ωρη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μόνο ηλιακή ενέργεια. Αυτό συμβαίνει διότι τα τηγμένα άλατα μπορούν να λειτουργήσουν και ως ρευστά μεταφοράς της θερμότητας αλλά και ως αποθηκευτικά μέσα.
- **Σιλικόνες:** Οι σιλικόνες έχουν πολύ χαμηλό σημείο πήξης και πολύ υψηλό σημείο βρασμού. Δεν παρουσιάζουν διάβρωση και έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, Επειδή οι σιλικόνες έχουν υψηλή τιμή ιξώδους και χαμηλές θερμικές ιδιότητες, απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργεια για την άντληση και την κυκλοφορία τους. Επίσης, ακόμα ένα μειονέκτημα είναι ότι εμφανίζουν εύκολα φαινόμενα διαρροής, ακόμα και μέσα από μικροσκοπικές τρύπες.

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



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [3.1] www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology
- [3.2] Μ. Καλικατζαράκης, εκμεταλλευση απορριπτομενης θερμότητας χαμηλων θερμοκρασιων ναυτικων κινητηρων diesel με χρηση οργανικου κυκλου Rankine, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2013
- [3.3] www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology
- [3.4] en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle
- [3.5] S. Quoilin, M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, Vincent Lemort, Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2013;22:168-186
- [3.6] S. Quoilin, V. Lemort, Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems, University de Liege, Belgium 2009
- [3.7] Κροκίδα Μ., Μαρίνος - Κουρής Δ., Μαρούλης Ζ.Β., Σχεδιασμός Θερμικών Διεργασιών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003
- [3.8] Ν. Παπασιώπη, Φαινόμενα μεταφοράς ΙΙ: Εναλλάκτες Θερμότητας, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
- [3.9] H. Yu, X. Feng, Y. Wang, A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste heat, State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China
- [3.10] Σ. Καραγκεοργκιεβ, Ρευστά μεταφοράς θερμότητας σε ηλιακά θερμικά συστήματα, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη 2018

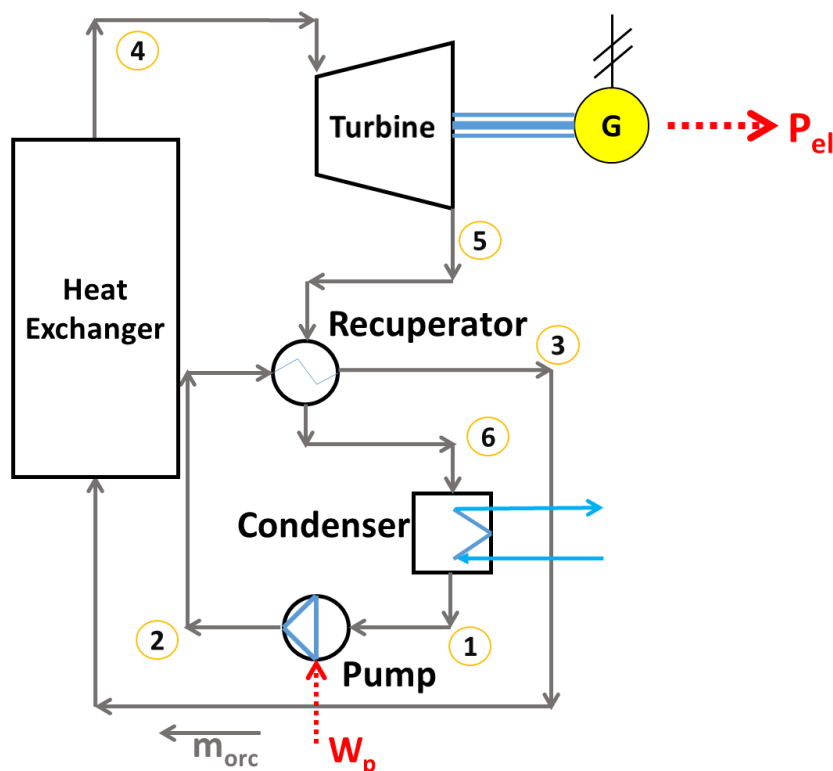


4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα αναλυθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση του προς μελέτη συστήματος. Η μεθοδολογία αφορά τόσο στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν όσο και στις εξισώσεις οι οποίες εφαρμόστηκαν.

ΜΕΡΟΣ 1^ο : ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ORC

Αρχικά με την βοήθεια του προγράμματος Engineering Equation Solver (EES) προσομοιώθηκε και μελετήθηκε το σύστημα ORC που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μελέτη. Το σύστημα ORC έχει την ακόλουθη μορφή:



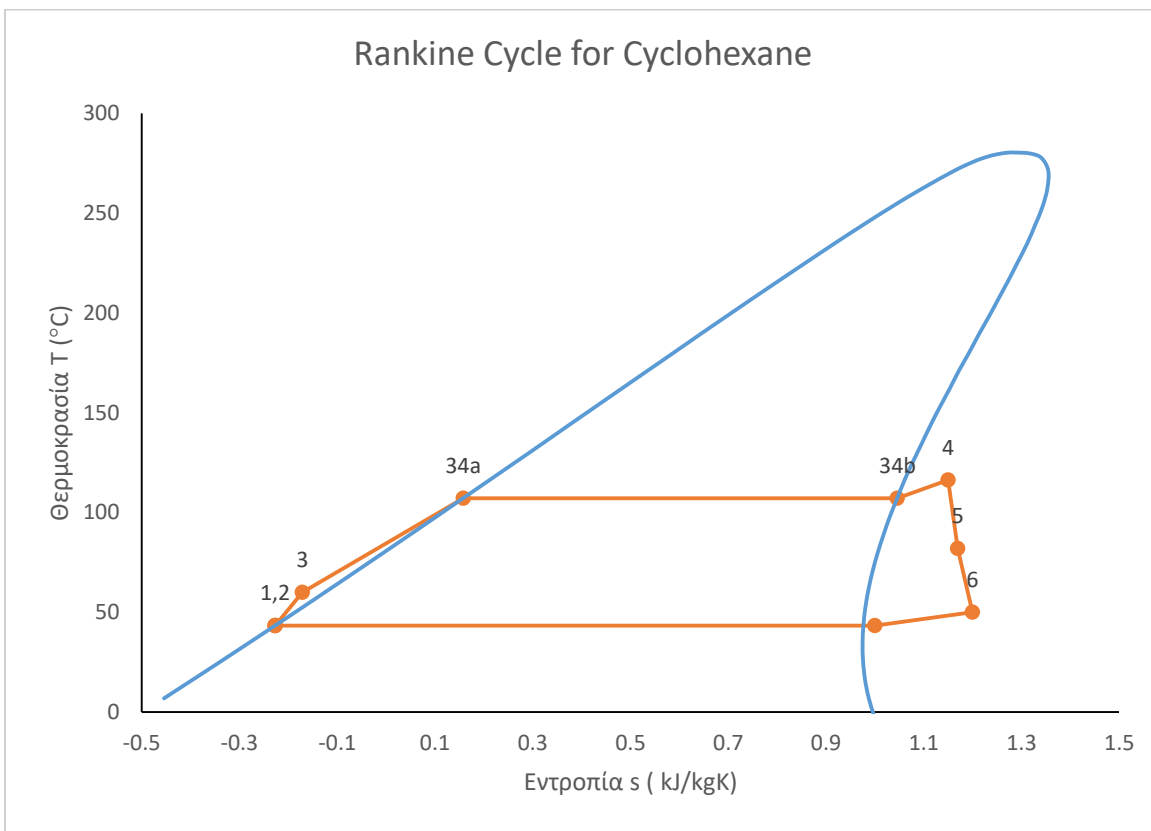
Διάγραμμα 4-1: Διαγραμματική Απεικόνιση του Συστήματος ORC

Το σύστημα αποτελείται από:

- Τον **εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger)** εντός του οποίου μεταδίδεται η θερμότητα από το θερμικό έλαιο στο εργαζόμενο μέσο του κύκλου.
- Τον **στρόβιλο (turbine)**, ο οποίος κινεί την γεννήτρια ώστε να παράξει ηλεκτρική ενέργεια.
- Τον **συμπυκνωτή (condenser)**, ο οποίος επαναφέρει το εργαζόμενο μέσο στην αρχική του κατάσταση.
- Τον **αναγεννητή (recuperator)**, ο οποίος λειτουργεί ως ενδιάμεση βαθμίδα ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ θερμού και ψυχρού ρεύματος.
- Την **αντλία (pump)**, η οποία ανυψώνει την πίεση του εργαζόμενου μέσου.



Για την μελέτη του συστήματος χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες εξισώσεις:



Διάγραμμα 4-2: Προς μελέτην Οργανικός Κύκλος Rankine

$$p_{high} = p(T = T_{saturation}) \quad [4.1]$$

$$h_1 = h(p = p_{low}, x = 0) \quad [4.2]$$

$$h_2 = h_1 + w_p, \text{ όπου } w_p \text{ το έργο της αντλίας} \quad [4.3]$$

$$h_{34a} = h(p = p_{high}, x = 0) \quad [4.4]$$

$$h_{34b} = h(p = p_{high}, x = 1) \quad [4.5]$$

$$h_4 = h(p = p_{high}, T = T_4) \quad [4.6]$$

$$h_{5,is} = h(p = p_{low}, s = s_4) \quad [4.7]$$

$$n_{is,T} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5,is}} \quad [4.8]$$



$$s_4 = s(p = p_{high}, T = T_4) \quad [4.9]$$

$$T_6 = T_2 + \Delta T_{recuperator} \quad [4.10]$$

$$h_3 = h_2 + (h_5 - h_6) \quad [4.11]$$

$$h_6 = h(p = p_{low}, T = T_6) \quad [4.12]$$

$$\rho_1 = \rho(p = p_{low}, x = 0) \quad [4.13]$$

$$P_g = \eta_{mg} \cdot m_{orc} \cdot (h_4 - h_5) \quad [4.14]$$

$$w_p = \frac{m_{orc}}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{motor}} \quad [4.15]$$

$$P_{net} = P_g - w_p \quad [4.16]$$

$$Q_{orc} = m_{orc} \cdot (h_4 - h_3) \quad [4.17]$$

$$\eta_{orc} = \frac{P_{net}}{Q_{orc}} \quad [4.18]$$

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος γίνονται και οι εξής εμπειρικές παραδοχές:

$$\eta_{mg} = 96\%$$

$$\eta_{is,T} = 85\%$$

$$\eta_{motor} = 75\%$$

$$T_{condenser} = 30 - 50^\circ C$$

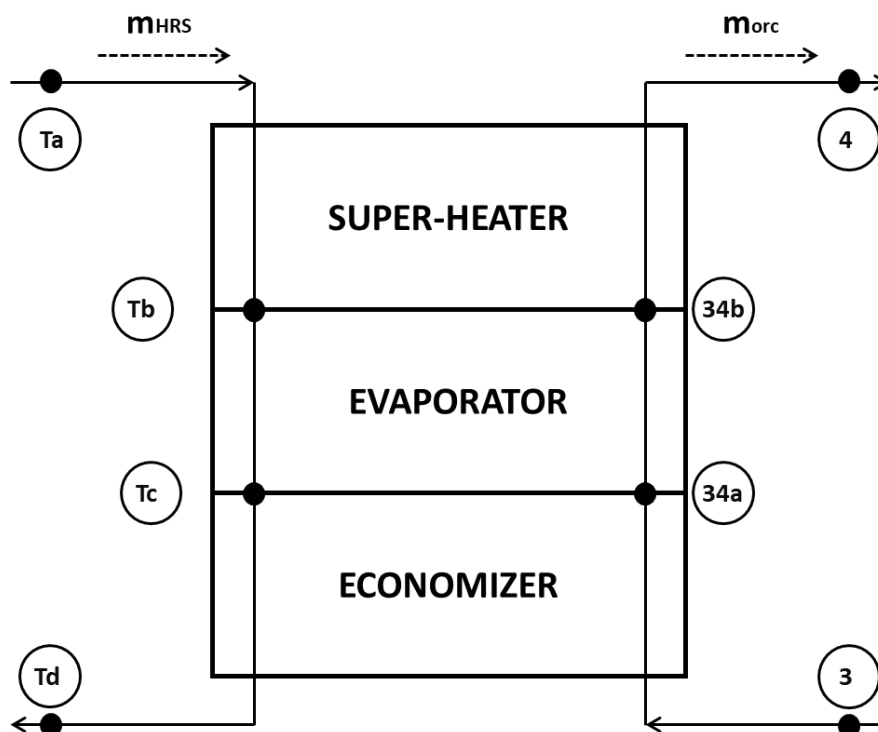
$$p_{high} \leq p_{critical}$$

$$\Delta T_{recuperator} = 10K$$



ΜΕΡΟΣ 2^ο: ΛΕΒΗΤΑΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εν συνεχεία μοντελοποιήθηκε ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας ο οποίος έχει την μορφή:

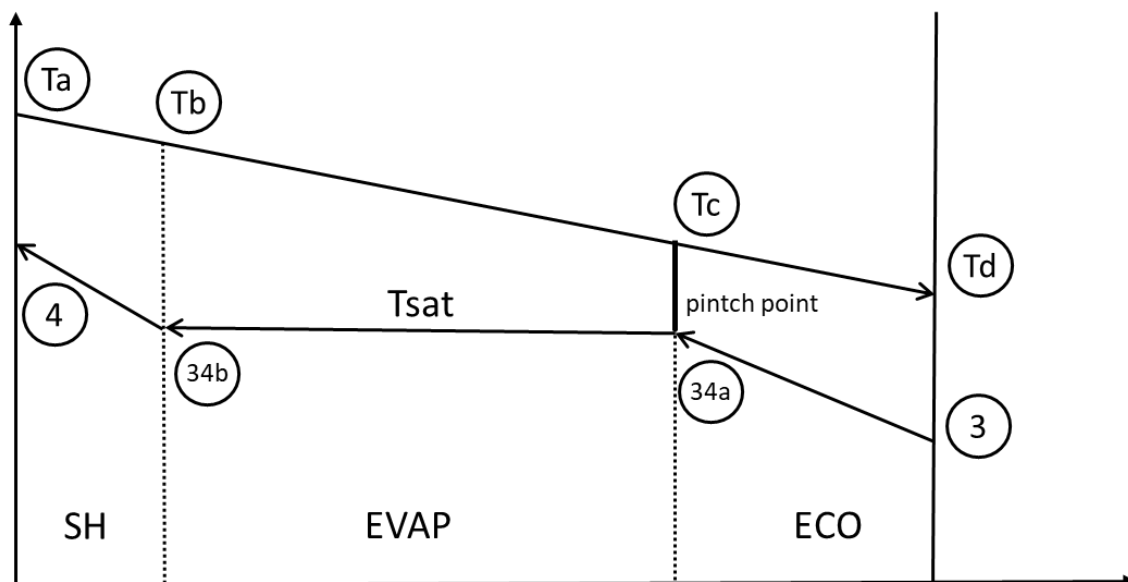


Διάγραμμα 4-3: Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας (Heat Recovery System)

Ο λέβητας αυτός όπως βλέπουμε χωρίζεται σε τρία τμήματα τα οποία είναι ο οικονομητήρας (economizer), ο εξατμιστής (evaporator) και ο υπερθερμαντήρας (super-heater). Στο κάθε τμήμα χωρίζεται το θερμικό έλαιο και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Το θερμικό έλαιο δέχεται μία γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας καθώς διέρχεται μέσα από τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Από την άλλη η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου του κύκλου Rankine δεν μεταβάλλεται γραμμικά καθώς στον εξατμιστή παραμένει σταθερή. Στο σημείο πριν την είσοδο στον εξατμιστή οι θερμοκρασίες των δύο ρευστών τείνουν να πλησιάσουν. Αυτό το σημείο ονομάζεται pinch point. Για ιδανικές συνθήκες λειτουργίας οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ T_c και T_{34a} και T_a και T_4 πρέπει να είναι ίδιες. Σε καμία περίπτωση η δεύτερη δεν γίνεται μικρότερη της πρώτης.



Η λειτουργία του περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4-4: Συναλλαγή Θερμότητας Μεταξύ Θερμικού Ελαίου Και Εργαζόμενου Μέσου ORC

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα τρία στάδια ανάκτησης θερμότητας είναι:

$$Q_{SH} = m_{col} \cdot C_{p_{col}} \cdot (T_a - T_b) = m_{orc} \cdot (h_4 - h_{34b}) \quad [4.19]$$

$$Q_{EVAP} = m_{col} \cdot C_{p_{col}} \cdot (T_b - T_c) = m_{orc} \cdot (h_{34b} - h_{34a}) \quad [4.20]$$

$$Q_{ECO} = m_{col} \cdot C_{p_{col}} \cdot (T_a - T_b) = m_{orc} \cdot (h_{34a} - h_3) \quad [4.21]$$

$$T_c = T_{sat} + pp \quad [4.22]$$

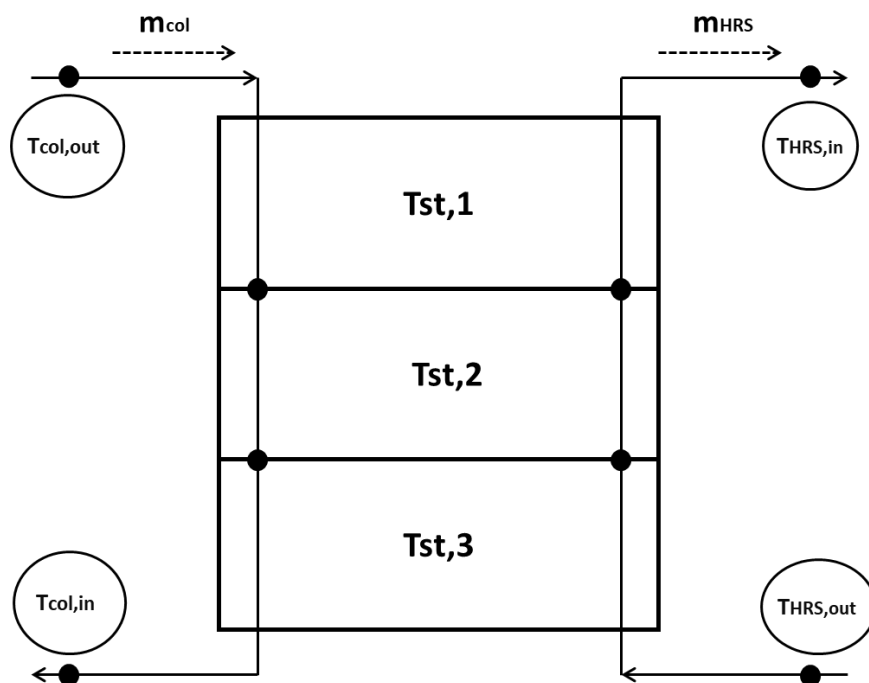
$$T_a \leq T_4 + pp \quad [4.23]$$

$$T_d \geq T_3 + pp \quad [4.24]$$



ΜΕΡΟΣ 3^ο : ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η δεξαμενή αποθήκευσης χρησιμεύει στο να αποθηκεύει το θερμό θερμικό έλαιο που έρχεται από τους συλλέκτες παρέχοντας έτσι την δυνατότητα να παραμείνει θερμό και μετά το πέρας της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να το επιτύχει αυτό η δεξαμενή αποθήκευσης είναι χωρισμένη σε τμήματα. Ένα αρκετά ικανοποιητικό μοντέλο μελέτης αποτελείται από 3 διαφορετικά τμήματα. Προφανώς η προσθήκη επιπλέον τμημάτων θα περιγραφόταν με τις εξισώσεις του μεσαίου τμήματος περισσότερες φορές.



Διάγραμμα 4-5: Δεξαμενή Αποθήκευσης (Storage Tank)

Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες εμπειρικές παραδοχές καθώς επίσης και οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία της αποθηκευτικής δεξαμενής.

Στην περίπτωση της δεξαμενής αποθήκευσης οι παραδοχές που κάνουμε αφορούν στα:

$$U_t = 0.001 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$D = L$$

$$V = \frac{A_{col}}{80}$$

$$M_1 = M_2 = M_3 = \frac{\rho \cdot V}{3}$$



Οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία της αποθηκευτικής δεξαμενής είναι οι ακόλουθες:

1^ο Τμήμα (Είσοδος θερμικού ελαίου):

$$m_{col} \cdot C_p \cdot T_{col,out} + m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{st,2} - m_{col} \cdot C_p \cdot T_{st,1} - m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{st,1} - Q_{loss,1} = M_1 \cdot Cp \cdot \frac{dT_{st,1}}{dt} \quad [4.25]$$

$$A_{st,1} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D \cdot L}{3} \quad [4.26]$$

$$Q_{loss,1} = Ut \cdot A_{st,1} \cdot (T_{st,1} - T_{am}) \quad [4.27]$$

2^ο Τμήμα (και κάθε ενδιάμεσο):

$$m_{col} \cdot C_p \cdot T_{st,1} + m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{st,3} - m_{col} \cdot C_p \cdot T_{st,2} - m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{st,2} - Q_{loss,2} = M_2 \cdot Cp \cdot \frac{dT_{st,2}}{dt} \quad [4.28]$$

$$A_{st,2} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{3} \quad [4.29]$$

$$Q_{loss,2} = Ut \cdot A_{st,2} \cdot (T_{st,2} - T_{am}) \quad [4.30]$$

3^ο Τμήμα (Εξοδος θερμικού ελαίου):

$$m_{col} \cdot C_p \cdot T_{st,2} + m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{HRS,out} - m_{col} \cdot C_p \cdot T_{st,3} - m_{HRS} \cdot C_p \cdot T_{st,3} - Q_{loss,3} = M_3 \cdot Cp \cdot \frac{dT_{st,3}}{dt} \quad [4.31]$$

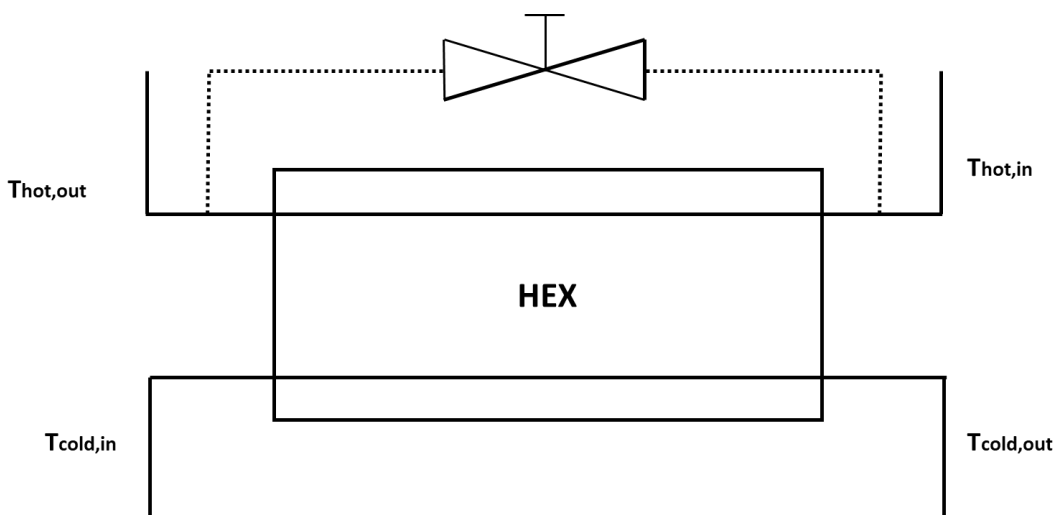
$$A_{st,3} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \frac{\pi \cdot D \cdot L}{3} \quad [4.32]$$

$$Q_{loss,3} = Ut \cdot A_{st,3} \cdot (T_{st,3} - T_{am}) \quad [4.33]$$



ΜΕΡΟΣ 4° : ΕΝΑΛΛΑΚΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο εναλλάκτης θερμότητας τοποθετείται ανάμεσα στην ψυχρή έξοδο της δεξαμενής αποθήκευσης και την είσοδο των συλλεκτών. Αυτός χρησιμοποιείται για να εκμεταλλεύεται την θερμότητα που περισσεύει όταν ο κύκλος Rankine δεν μπορεί να την αξιοποιήσει. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει περίσσεια θερμότητας στον εναλλάκτη τοποθετείται μία βάννα ώστε το θερμό ρεύμα να μπορεί να παρακάμψει τον εναλλάκτη. Η συνολική εγκατάσταση του εναλλάκτη είναι 5 kW. Στην συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη:



Διάγραμμα 4-6: Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger)

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα χρησιμοποιούμε στην εγκατάσταση έναν εναλλάκτη αντιρροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία του εναλλάκτη είναι οι ακόλουθες:

$$Q_{HEAT} = m_{hot} \cdot C_p \cdot (T_{hot,in} - T_{hot,out}) = 5 \text{ kW} \quad [4.34]$$

Όπου m_{hot} είναι η ίδια παροχή μάζας που διέρχεται και από τους συλλέκτες (m_{col})

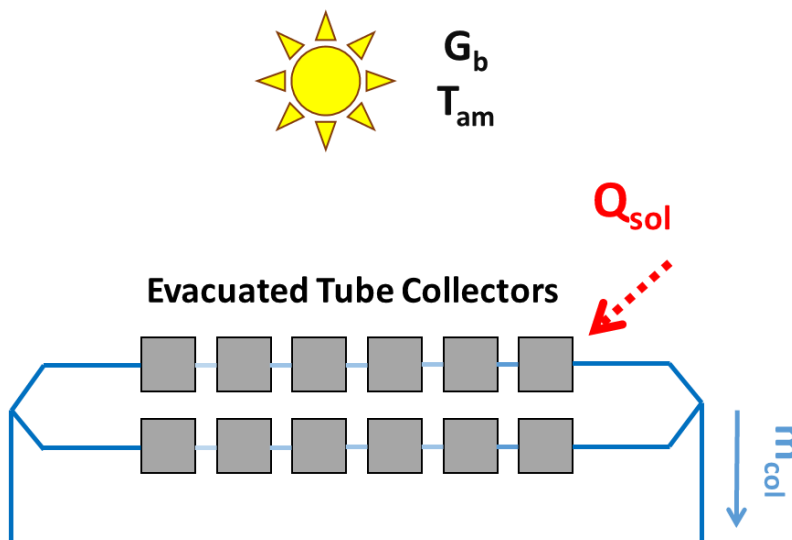
$$\eta_{HEX} = \frac{T_{hot,in} - T_{hot,out}}{T_{hot,in} - T_{heat}} \quad [4.35]$$

Όπου T_{heat} είναι η θερμοκρασία στην οποία επιζητούμε να θερμάνουμε τον χώρο μας. Μία τυπική τιμή για θέρμανση χώρων είναι οι 50 °C.



ΜΕΡΟΣ 5° : ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ ΚΕΝΟΥ

Οι ηλιακοί συλλέκτες κενού αποτελούν την πηγή ενέργειας όλου του συστήματος. Τοποθετούνται με βέλτιστο τρόπο για παραγωγή ενέργειας καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Επομένως για την Αθήνα που μελετάμε οι συλλέκτες τοποθετούνται με κλίση 38° όσο δηλαδή και το γεωγραφικό πλάτος. Η τοποθέτηση τους γίνεται όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

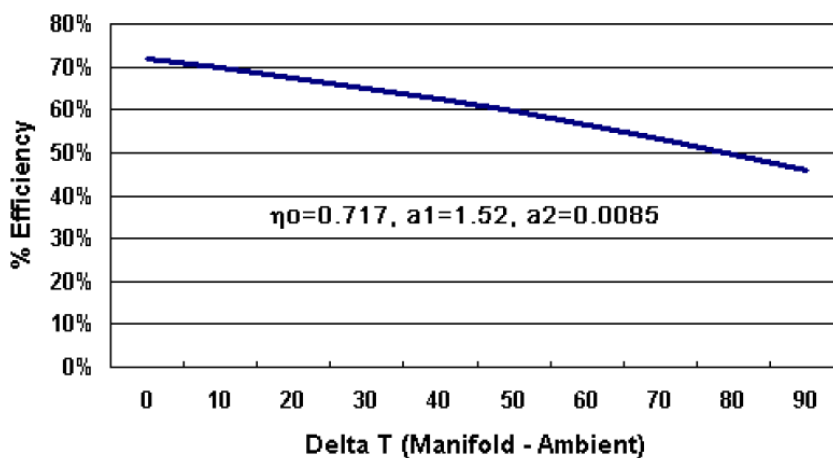


Διάγραμμα 4-7: Διάταξη Ηλιακών Συλλεκτών Κενού (Evacuated Tube Collectors)

Για την περιγραφή της λειτουργίας των συλλεκτών κενού χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες εξισώσεις.

$$\eta_{col} = F'(\tau\alpha)_n \cdot K(\theta) - \alpha_1 \cdot \frac{T_{col,in} - T_{am}}{G_T} - \alpha_2 \cdot \frac{(T_{col,in} - T_{am})^2}{G_T} \quad [4.36]$$

Η απόδοση του συλλέκτη σύμφωνα με τον κατασκευαστή έχει την εξής μορφή:



Διάγραμμα 4-8: Απόδοση Ηλιακού Συλλέκτη Κενού (ETC)



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Για τον υπολογισμό των μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά του συλλέκτη AP-30 της εταιρείας APRICUS [4.1]. Για τον συγκεκριμένο συλλέκτη τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν έχουν ως εξής:

$$\text{Ο οπτικός βαθμός απόδοσης } (\eta_{\text{opt}}) \rightarrow F'(\tau\alpha)_n = 0.717$$

$$\text{Η σταθερά } \alpha_1 = 1.52 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Η σταθερά } \alpha_2 = 0.0085 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Για τον υπολογισμό της μεταβλητής $K(\theta)$ χρησιμοποιούμε δύο επιπλέον μεταβλητές τις $K_L(\theta)$ και $K_T(\theta)$. Αυτές ορίζονται με τον παρακάτω τρόπο:

$$K_L(\theta) = 1 + b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right), b_0 = -0.126 \quad [4.37]$$

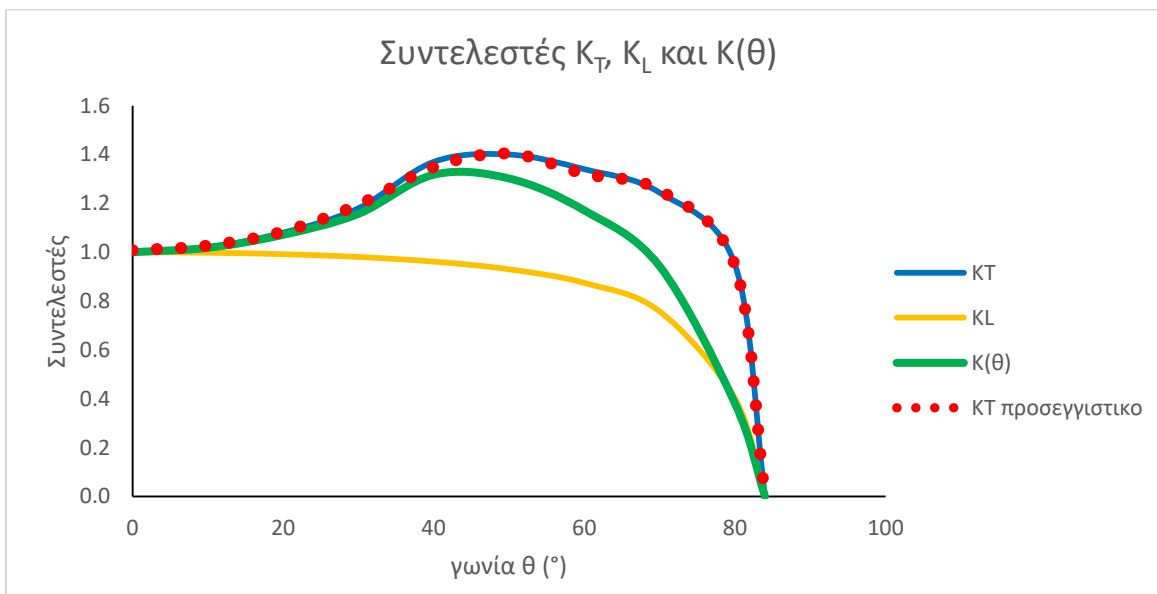
Το b_0 προκύπτει από την τιμή του K_L που δίνει ο κατασκευαστής για τις 50° .

Το $K_T(\theta)$ προσεγγίζεται από διάφορες τιμές τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής. Αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Γωνία θ ($^\circ$)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	84
K_T	1	1.02	1.08	1.18	1.37	1.4	1.34	1.244	0.95	0

Για να χρησιμοποιηθεί το K_T προγραμματιστικά προσεγγίζεται με την βοήθεια του προγράμματος Excel ώστε να δημιουργηθεί μία συνάρτηση $K_T(\theta)$.

Οι τελικές τιμές που χρησιμοποιούμε απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 4-9: Συντελεστές $K(\theta)$, K_T , K_L



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

ΜΕΡΟΣ 6^ο : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας που έχει προαναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται και πάλι εδώ.

Πίνακας 4-1: Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας Για Την Αθήνα

Μήνας	H_T (kWh/m ²)	$G_{T,max}$ (W/m ²)	Ημέρα (-)	δ (°)	N_D (h)	$T_{am,m}$ (K)	DR (K)
Ιανουάριος	3308	531.3	21	-20.14	9.78	281.61	7.67
Φεβρουάριος	4236	615.6	52	-11.23	10.81	282.41	8.21
Μάρτιος	5161	675.5	81	0.00	12.00	285.25	9.17
Απρίλιος	5829	692.1	111	11.58	13.23	289.58	10.36
Μάιος	6202	685.1	141	20.14	14.22	294.18	11.45
Ιούνιος	6466	693.8	172	23.45	14.64	297.97	12.17
Ιούλιος	6649	732.4	202	20.44	14.26	299.71	12.29
Αύγουστος	6533	774.5	233	11.75	13.25	299.03	11.78
Σεπτέμβριος	5842	766.0	264	-0.20	11.98	296.02	10.77
Οκτώβριος	4697	686.3	294	-11.75	10.75	291.69	9.57
Νοέμβριος	3525	568.5	325	-20.44	9.74	286.94	8.45
Δεκέμβριος	2988	501.4	355	-23.45	9.36	283.33	7.77

Θεωρούμε τις γωνίες ϕ και β γνωστές και ίσες με το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας, δηλαδή $\phi = \beta = 38^\circ$. Επίσης από τον παραπάνω πίνακα παίρνουμε το δ ως έχει. Χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες σχέσεις για να προσδιορίσουμε τα παρακάτω:

Οι γωνίες ω , θ και θ_z δίνονται από τις σχέσεις (A.1.4), (A.2.4) και (A.2.3) αντίστοιχα του βιβλίου “Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα” [4.2].

$$\omega = 0.25 \left(\frac{\circ}{\text{min}} \right) \cdot (\text{min από ηλιακό μεσημέρι})$$

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)$$



Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων παραμέτρων:

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\sin(\theta_z)} \quad [4.38]$$

$$\tan(\theta_L) = \cos(\gamma_s) \cdot \tan(\theta) \quad [4.39]$$

$$\tan(\theta_T) = \sin(\gamma_s) \cdot \tan(\theta) \quad [4.40]$$

Αφού υπολογίσουμε τις γωνίες που χρειαζόμαστε εν συνεχεία υπολογίζουμε την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου με τις εξισώσεις [2.18],[2.19]:

$$G_T = \frac{\pi \cdot H_T \cdot 10^3}{2 \cdot N_D} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_h}{N_D}\right)$$

και

$$N_D = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$$

Έχοντας την ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για κάθε μήνα του έτους για όλη την διάρκεια της ημέρας μπορούμε πλέον να καταλήξουμε στην διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου του συλλέκτη:

Η θερμότητα που προσπίπτει στους συλλέκτες δίνεται από την σχέση:

$$Q_s = A_{col} \cdot G_T \quad [4.41]$$

Η θερμότητα την οποία τελικά εκμεταλλεύονται οι συλλέκτες δίνεται από την σχέση:

$$Q_u = \eta_{ETC} \cdot Q_s \quad [4.42]$$

Η άνοδος της θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου του θερμικού ελαίου στην συστοιχία των συλλεκτών και της εξόδου από αυτήν δίνεται από την σχέση:

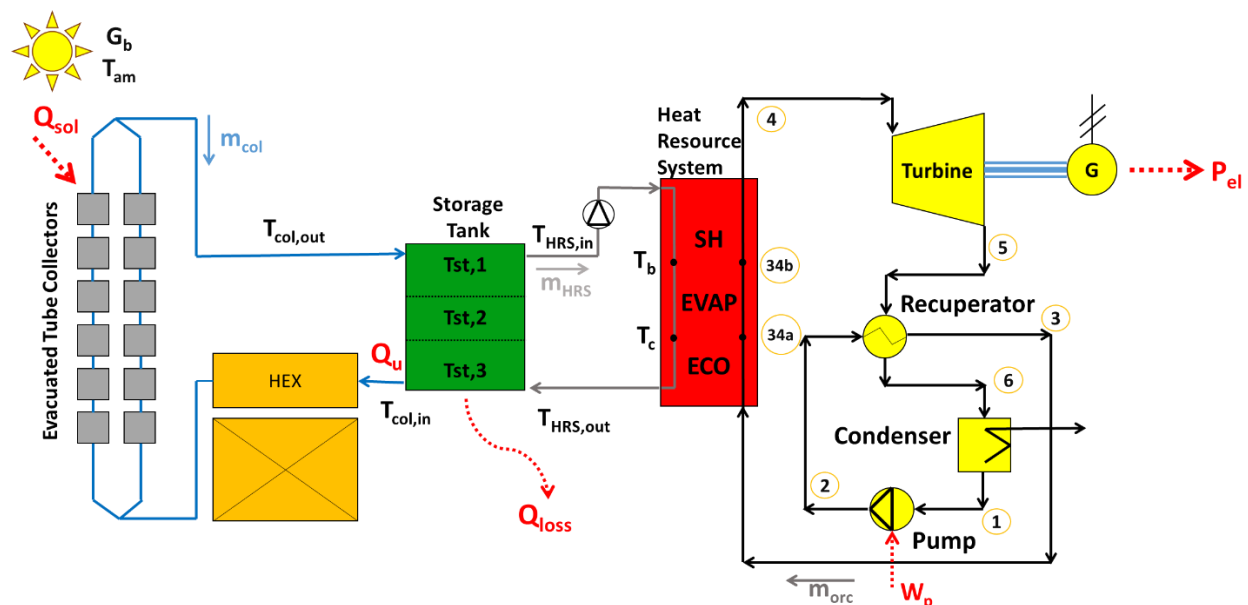
$$T_{col,out} = T_{col,in} + \frac{Q_u}{m_{col} \cdot C_p} \quad [4.43]$$

Επομένως με βάση όλα τα παραπάνω μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την προβλεπόμενη κατανομή θερμοκρασίας που θα ακολουθήσει το θερμικό έλαιο για κάθε ημέρα, κάθε μήνα του έτους.



ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στις προηγούμενες σελίδες έγινε περιγραφή των μεμονωμένων στοιχείων από τα οποία συντίθεται η παρούσα εργασία. Το πείραμα προφανώς για να λάβει χώρα απαιτεί τον συνδυασμό όλων των παραπάνω στοιχείων. Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο συνδυασμός αυτός συνθέτοντας την τελική εγκατάσταση.



Διάγραμμα 4-10: Συνολική Εγκατάσταση

Όπως βλέπουμε περιέχει όλα τα στοιχεία τα οποία είναι:

- Οι Ηλιακοί Συλλέκτες Κενού (Evacuated Tube Collectors) ●
- Η Δεξαμενή Αποθήκευσης (Storage Tank) ●
- Ο Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας (Heat Resource System) ●
- Ο Οργανικός Κύκλος Rankine ●
- Ο Εναλλάκτης Θερμότητας (Heat Exchanger) ●

Τα στοιχεία επικοινωνούν μέσω των εργαζόμενων ρευστών τα οποία είναι δύο. Το πρώτο είναι το εργαζόμενο μέσο του οργανικού κύκλου Rankine ενώ το δεύτερο είναι αυτό που διέρχεται από τους συλλέκτες και μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης μεταφέρει θερμότητα στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Απεικονίζονται με τρία διαφορετικά χρώματα διότι το δεύτερο ρευστό λειτουργεί σε δύο κύκλους. Ο πρώτος διέρχεται από τους συλλέκτες τον εναλλάκτη θερμότητας και την δεξαμενή αποθήκευσης ενώ ο δεύτερος συνδέει την δεξαμενή αποθήκευσης με τον λέβητα. Στους δύο αυτούς κύκλους διακινείται διαφορετική παροχή ρευστού.



ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Για τον υπολογισμό των οικονομικών μεγεθών πρέπει πρώτα να ορισθούν κάποια οικονομικά μεγέθη.

Το βασικότερο μέγεθος είναι το αρχικό κόστος επένδυσης C_0 το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$C_0 = K_c \cdot A_{col} + K_v \cdot V + K_{ORC} + K_{HEX} \quad [4.44]$$

Όπου $K_c = 250 \text{ €/m}^2$ το κόστος της συλλεκτικής επιφάνειας

$A_{col} \rightarrow$ η συλλεκτική επιφάνεια

$K_v = 500 \text{ €/m}^3$ το κόστος της αποθηκευτικής δεξαμενής

$V \rightarrow$ Ο όγκος της αποθηκευτικής δεξαμενής

$K_{ORC} = 20.000 \text{ €}$ το κόστος του ORC

$K_{HEX} = 1000 \text{ €}$ το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας

Επίσης ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος είναι οι χρηματοροές (cash flow) το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$CF = K_{el} \cdot E_{el} + K_{heat} \cdot E_{heat} - C_{O\&M} \quad [4.45]$$

Όπου $K_{el} = 0.20 \text{ €/kWh}$ το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας

$E_{el} \rightarrow$ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

$K_{heat} = 0.10 \text{ €/kWh}$ το κόστος της παραγόμενης θερμότητας

$E_{heat} \rightarrow$ η παραγόμενη θερμότητα

$C_{O\&M} = 1\% \cdot C_0$ το κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Επίσης λαμβάνουμε υπόψιν την διάρκεια ζωής της επένδυσης και το επιτόκιο προεξόφλησης:

$$N = 25 \text{ έτη}$$

$$r = 3\%$$

Και βάσει αυτών των δύο υπολογίζεται ο συντελεστής αναγωγής R :

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} < N \quad [4.46]$$



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Για την οικονομική μοντελοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι δείκτες:

Καθαρή Παρούσα Αξία – Net Present Value (NPV): Το κριτήριο αυτό αποτελεί ένα ευρύτατα εφαρμοζόμενο μέτρο οικονομικής αποδοτικότητας για την αξιολόγηση των σχεδίων επένδυσης. Ο δείκτης NPV εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες η οποία προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των καθαρών χρηματοροών κάθε έτους (διαφορά των μελλοντικών ταμειακών εισροών-εσόδων και εκροών-εξόδων), για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης.

Ο δείκτης NPV υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPV = -C_0 + CF \cdot R \quad [4.47]$$

Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης - Internal Rate of Return (IRR): Είναι το υπολογιζόμενο επιτόκιο με το οποίο η παρούσα αξία των ταμειακών εισροών είναι ίση με την παρούσα αξία των ταμειακών εκροών. Είναι δηλαδή η τιμή του επιτοκίου προεξόφλησης για την οποία ο δείκτης NPV μηδενίζεται άρα και η οριακή τιμή πέρα από την οποία η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα. Αποτελεί έναν πολύ χρήσιμο δείκτη καθώς υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης δύο ή περισσότερων επενδύσεων διαφορετικών μεγεθών.

Ο δείκτης IRR μπορεί να υπολογιστεί λύνοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$IRR = \frac{CF}{C_0} \cdot \left[1 - \frac{1}{(1 + IRR)^N} \right] \quad [4.48]$$

Ο υπολογισμός του IRR γίνεται συνήθως με δοκιμές και επαναληπτική διαδικασία.

Απλοποιημένη Περίοδος Αποπληρωμής – Simple Payback Period (SPP): Εκφράζει το χρονικό διάστημα στο οποίο τα έσοδα από την επένδυση θα καλύψουν το αρχικό κόστος επένδυσης. Ο δείκτης αυτός δεν λαμβάνει υπόψη την αναγωγή των εσόδων σε παρούσα αξία και αποτελεί ένα απλοποιημένο εργαλείο για τον γρήγορο υπολογισμό του χρόνου αποπληρωμής.

Ο δείκτης SPP υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SPP = \frac{C_0}{CF} \quad [4.49]$$

Περίοδος Αποπληρωμής – Payback Period (PP): Η περίοδος αποπληρωμής λαμβάνει υπόψη την αναγωγή των εσόδων σε παρούσα αξία και αποτελεί μία πιο ουσιαστική προσέγγιση για τον υπολογισμό του χρόνου απόσβεσης της επένδυσης. Η PP έχει πάντοτε μεγαλύτερη διάρκεια από την SPP καθώς τα μελλοντικά έσοδα στο παρόν έχουν μικρότερη αξία.

Ο δείκτης PP ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PP = \frac{\ln\left(\frac{CF}{CF - C_0 \cdot r}\right)}{\ln(1 + r)} \quad [4.50]$$



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Για την μελέτη της συνολικής εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκαν ως κατευθυντήριοι άξονες υπάρχουσες μελέτες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές:

Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nano-fluid based solar parabolic trough collectors.

Οι Ε. Μπέλλος και Χ. Τζιβανίδης μελέτησαν την παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση του οργανικού κύκλου Rankine με χρήση νανο-ρευστών, ο οποίος λειτουργεί με την βοήθεια ηλιακών παραβολικών συλλεκτών. Βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με την παρούσα μελέτη παρά τον διαφορετικό τύπο συλλεκτών και εργαζόμενων μέσων. Τα αποτελέσματα της έρευνας αφορούσαν σε διάφορους βαθμούς απόδοσης (συνολικό σύστημα, θερμικό, ORC), στην ηλεκτρική ισχύ, τον λόγο πίεσης και την θερμοκρασία κορεσμού. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα για τέσσερα διαφορετικά εργαζόμενα μέσα στον κύκλο ORC και αντίστοιχα πέντε νανορευστά στους συλλέκτες:

Πίνακας 4-2: Συγκριτικά Αποτελέσματα Για Λειτουργία Με Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα [4.3]

Working fluids		P_{el}	η_{sys}	η_{th}	η_{orc}	ϕ	PR	T_{sat}
		(kW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(°C)
Toluene	Al ₂ O ₃	165.72	19.95	66.17	30.42	4.16	75.25	295.6
	CuO	167.05	20.11	66.68	30.42	3.98	75.51	295.9
	TiO ₂	165.60	19.93	66.10	30.42	2.57	75.48	295.8
	Cu	166.18	20.02	66.41	30.42	2.51	75.22	295.5
	Thermal oil	164.18	19.76	65.54	30.43	0.00	75.79	296.1
MDM	Al ₂ O ₃	163.66	19.70	67.05	29.63	4.35	90.00	283.9
	CuO	164.86	19.84	67.53	29.63	4.20	90.00	283.9
	TiO ₂	163.55	19.68	67.00	29.63	2.70	90.00	283.9
	Cu	164.19	19.76	67.26	29.63	2.66	90.00	283.9
	Thermal oil	162.21	19.52	66.47	29.62	0.00	90.00	283.9
Cyclohexane	Al ₂ O ₃	158.90	19.12	67.82	28.42	6.00	86.68	269.1
	CuO	160.01	19.26	68.28	28.43	4.75	86.83	269.2
	TiO ₂	158.77	19.11	67.76	28.43	4.16	86.78	269.2
	Cu	159.41	19.19	68.03	28.43	3.04	86.71	269.1
	Thermal oil	157.41	18.94	67.18	28.43	0.00	87.13	269.5
n-pentane	Al ₂ O ₃	116.45	14.01	71.17	19.80	6.00	86.78	186.7
	CuO	117.02	14.08	71.51	19.80	6.00	86.80	186.8
	TiO ₂	116.41	14.01	71.15	19.80	6.00	86.75	186.7
	Cu	116.82	14.06	71.39	19.80	5.88	86.64	186.6
	Thermal oil	115.35	13.88	70.51	19.79	0.00	86.87	186.8

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη περίπτωση είναι όταν ο ORC λειτουργεί με τολουένιο και το εργαζόμενο μέσο των συλλεκτών είναι Οξειδίο του Χαλκού (CuO). Τότε επιτυγχάνεται ηλεκτρική ισχύς $P_{el}=167.05$ kW, βαθμός απόδοσης του συστήματος $\eta_{sys}=20.11\%$, και βαθμός απόδοσης του οργανικού κύκλου Rankine $\eta_{orc}=30.42\%$. Επίσης το σύστημα λειτουργεί βέλτιστα σε θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=295.9^{\circ}\text{C}$.

Απο την μελέτη αυτή μπορούμε να προσδιορίσουμε την τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων που πρόκειται να υπολογισθούν στην συνέχεια. Αναμενόμενο είναι τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να υποδεικνύουν ένα λιγότερο αποδοτικό σύστημα καθώς οι συλλέκτες κενού λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από τος 300°C .



Working fluid selection and electrical performance optimisation of a domestic solar-ORC combined heat and power system for year-round operation in the UK

Οι J. Freeman, K. Hellgardt και C. Makrides μελέτησαν την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε οικιακής κλίμακας εγκατάσταση με την χρήση συστήματος οργανικού κύκλου Rankine και μη συγκεντρωτικών ηλιακών θερμικών συλλεκτών. Το σύστημα προσομοιώνεται με διάφορα οργανικά εργαζόμενα μέσα και η απόδοση του βελτιστοποιείται για λειτουργία σε κλιματικές συνθήκες Αγγλίας. Τα αποτελέσματα του πειράματος μπορούν να εφαρμοστούν και σε αντίστοιχες γεωγραφικές τοποθεσίες όπου υπάρχει συχνή νέφωση και περιορισμένες δυνατότητες τοποθέτησης ηλιακών. Η σταθερή λειτουργία υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας παρέχεται μέσω ενός ρυθμιστικού δοχείου εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του evaporator, το οποίο διατηρείται στη θερμοκρασία εξάτμισης και την πίεση του ORC. Παρέχεται επίσης και μια απόδοση και απλή σύγκριση κόστους με αυτόνομα συστήματα PV και ηλιακής θέρμανσης.

Πίνακας 4-3: Τελικά αποτελέσματα για βέλτιστη κατάσταση [4.4]

Parameter	Unit	Single-stage collector configuration	Two-stage collector
Optimal ORC working fluid	–	R245ca	R245ca
Optimal ORC evaporation temperature	°C	117	126
Optimal ORC evaporation pressure	bar	13.5	16.3
Collector array area (Stage 1/Stage 2)	m ²	15	6.3/8.7
Net annual work output	kW h yr ⁻¹	955	1070
Annually averaged net power output	W	109	122
Instantaneous/nominal net power output	W	403	481
Hours operational	h yr ⁻¹	2370	2230
ORC pressure ratio	–	11.1	13.4
Pump 1 mass flow-rate	kg min ⁻¹	0.8	0.9
Pump 2 mass flow-rate	kg min ⁻¹	1.6	1.8
Pump 3 mass flow-rate (Stage 1)	kg min ⁻¹	11.9	0.8
Pump 4 mass flow-rate (Stage 2)	kg min ⁻¹	–	12.2
Mean solar collector array efficiency	–	44.0%	46.5%
ORC electrical efficiency	–	12.8%	13.6%
Annual overall efficiency	–	5.6%	6.3%
Annual exergy efficiency	–	52.2%	58.5%

Με την ενσωμάτωση διαμόρφωσης ηλιακού συλλέκτη-εξατμιστή δύο σταδίων, η μέγιστη καθαρή ετήσια ηλεκτρική ενέργεια είναι 1070 kWh (συνεχής μέση ισχύς 122 W) και απόδοση ηλεκτρικής προς ηλιακή ενέργεια έως 6,3% επιτυγχάνεται με HFC-245ca (pentafluoropropane) ως εργαζόμενο μέσο σε μία βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού εξάτμισης 126°C (που αντιστοιχεί σε πίεση εξάτμισης 16,2 bar). Αυτό αντιστοιχεί στο 32% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός τυπικού νοικοκυριού στο Ηνωμένο Βασίλειο και αντιπροσωπεύει βελτίωση άνω του 50% σε σχέση με μια πρόσφατη προσπάθεια των ίδιων συγγραφέων με βάση μια προηγούμενη διαμόρφωση του συστήματος συμπαραγωγής και HFC-245fa ως εργαζόμενο μέσο επισημαίνοντας έτσι τα δυνατά κέρδη όταν χρησιμοποιούνται βέλτιστες διαμορφώσεις συστημάτων και εργαζόμενων ρευστών και υποδηλώνοντας ότι είναι δυνατόν να γίνουν σημαντικές περαιτέρω βελτιώσεις.



Design of a small scale stand-alone solar thermal co-generation plant for an isolated region in Egypt

Οι S. Abdelhady, D. Borello, E.Tortora μελέτησαν την απόδοση και έκαναν την οικονομική αξιολόγηση μιας αυτόνομης μονάδας συμπαραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας μικρής κλίμακας που χρησιμοποιεί διαθερμικό έλαιο. Αυτή η διαμόρφωση θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη και βιώσιμη λύση για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε απομονωμένη περιοχή που ικανοποιεί τα τοπικά φορτία. Το παραβολικό κάτοπτρο που εγκαταστάθηκε έχει διαμορφωθεί σε περιβάλλον προσομοίωσης TRNSYS. Τόσο η απόδοση του ηλιακού όσο και του κύκλου ισχύος έχει διαμορφωθεί με βάση τα δεδομένα ηλιακής ενέργειας της τοποθεσίας της εγκατάστασης. Τα κάτοπτρα και οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, ο παραβολικός συλλέκτης ηλιακής ενέργειας μπορεί να παράγει 6 MW ηλεκτρικής ισχύος και 21,5 MW θερμότητας με συνολικό βαθμό απόδοσης περίπου 85%. Η ανάλυση έδειξε ότι ο χρόνος λειτουργίας του σταθμού CSP στην επιλεγμένη τοποθεσία μπορεί να επεκταθεί για να τρέξει όλη την ημέρα χωρίς να χρειαστεί την υποστήριξη των ορυκτών καυσίμων. Καθορίζεται το επίπεδο κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) του προτεινόμενου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής να ισούται με 1,25 USD/kWh. Οι αποφευχθείσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου είναι ίσες με περίπου 7300 toe/έτος.

Πίνακας 4-4: Περιγραφή των στοιχείων που αποτελούν την εγκατάσταση [4.5]

Main components description and nominal size.

<i>Component</i>	
Solar field mirrors area	200,000 m ²
TES	10 h (329 MW h)
Steam turbines	3 × 2 MW _{el}
Condenser	21.5 MW _{th}
<i>Diathermic oil circuit</i>	
CSP max/min temperature	427/196.5 °C
Max/min flow rate to RC	261,555/50,675 kg/h
<i>Water/steam circuit</i>	
Max/min pressure	60/1.34 bar
Max/min temperature	320/110 °C
Design water/steam mass flow rate	10.08 kg/s
Electric power	6 MW
Thermal power	21.5 MW

Βλέπουμε ότι πρόκειται για ογκώδη εγκατάσταση που θα τροφοδοτήσει μεγάλο αριθμό κατοικιών.

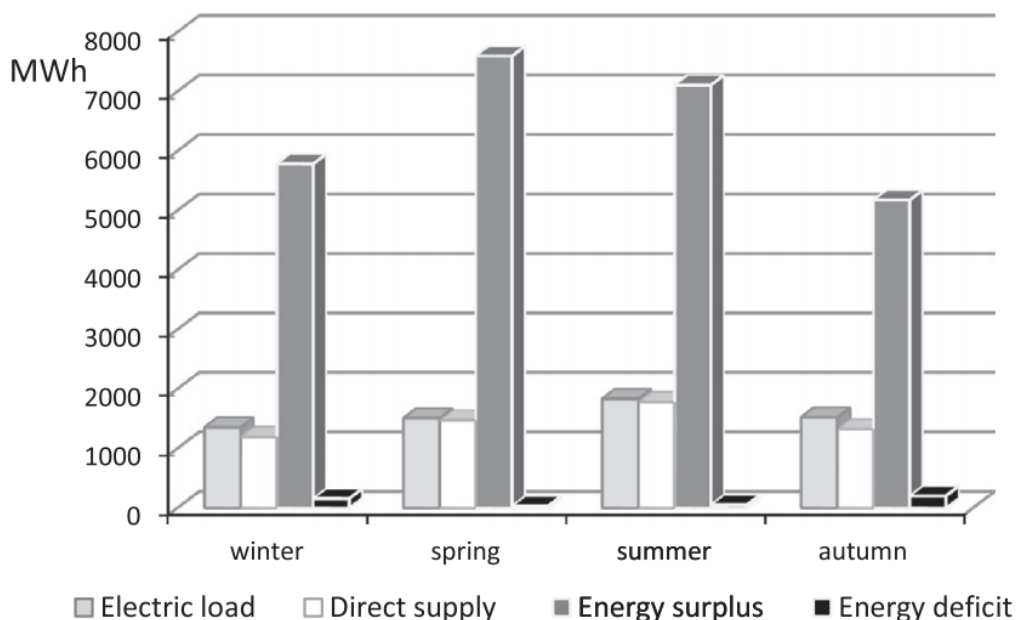
Πίνακας 4-5: Εποχιακή Κάλυψη Αναγκών (Άμεση ενέργεια, Περίσσεια ενέργειας και Έλλειμα)

%	winter	spring	summer	autumn
Direct supply	88.34	97.93	97.15	86.73
Energy surplus	427.89	503.67	388.01	339.51
Energy deficit	11.66	2.07	2.85	13.27
Deficit hours	292	59	96	364



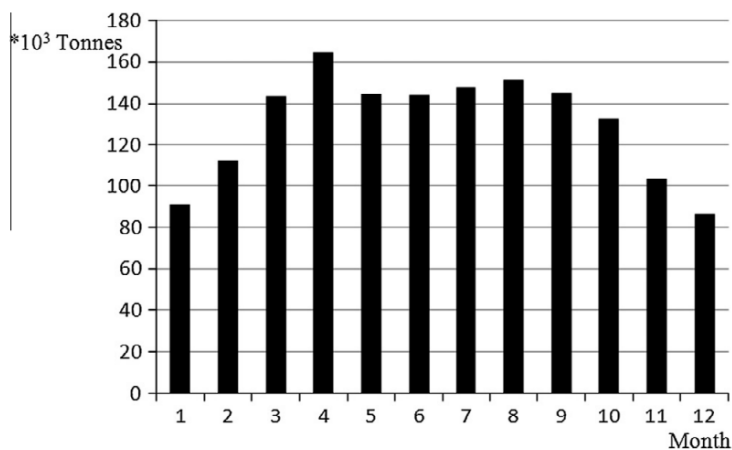
Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Ο παραπάνω πίνακας παρέχει τα εξής στοιχεία για κάθε εποχή του έτους: Ενέργεια που χρησιμοποιείται άμεσα, ενέργεια που περισσεύει, έλλειμα ενέργειας καθώς και τις ώρες ελλείματος. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές αφορούν στην περίσσεια ενέργειας το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα παράγει ενέργεια σε ώρες που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα φαίνονται και σε ραβδόγραμμα στην συνέχεια.



Διάγραμμα 4-11: Εποχιακή κάλυψη αναγκών σε ραβδόγραμμα

Τέλος παρακάτω φαίνεται η μηνιαία παραγωγή ζεστού νερού χρήσης από την εγκατάσταση. Η μέγιστη τιμή σημειώνεται κατά τον μήνα Απρίλιο με τιμή που ξεπερνάει τους 160 χιλιάδες τόνους.



Διάγραμμα 4-12: Μηνιαία παραγωγή θερμού νερού από την εγκατάσταση



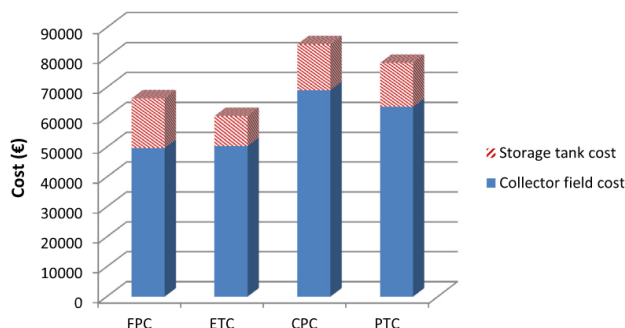
Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types

Οι Ε. Μπέλλος, Χ. Τζιβανίδης και Κ. Αντωνόπουλος έκαναν την ενεργειακή, εξεργειακή και οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος ψύξης τροφοδοτούμενο από ηλιακή ενέργεια, για διάφορους τύπους συλλεκτών. Ένας absorption chiller που λειτουργεί με LiBr-H₂O είναι η μηχανή ψύξης που συνδυάζεται με έναν τύπο συλλέκτη. Η ζήτηση ψύξης είναι 100 kW στους 10 ° C για την Αθήνα (Ελλάδα) το καλοκαίρι. Τέσσερις διαφορετικοί τύποι συλλεκτών δοκιμάζονται για να επιτευχθεί η καταλληλότερη λύση για αυτή τη μελέτη. Συγκεκριμένα μελετώνται οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας, οι συλλέκτες σωλήνων κενού, οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες και οι συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων. Εξετάζονται υπό τις ίδιες συνθήκες. Μια εξωγενής βελτιστοποίηση κάθε συστήματος δίνει τη βέλτιστη λύση σε κάθε περίπτωση, η οποία οδηγεί στην ελάχιστη συλλεκτική επιφάνεια. Μια οικονομική σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων βελτιστοποιημένων συστημάτων αποδεικνύει ότι οι συλλέκτες σωλήνων κενού είναι η πιο ευεργετική τεχνολογία. Από την άλλη πλευρά, οι παραβολικοί συλλέκτες έχουν την μέγιστη απόδοση, αλλά το υψηλό κεφάλαιο που απαιτούν, τους καθιστά μια ασύμφορη λύση. Η ανάλυση γίνεται σε συνθήκες σταθερής κατάστασης με τον Engineer Equator Solver (EES), ένα πολύ χρήσιμο ενεργειακό εργαλείο. Τα αποτελέσματα της μελέτης φαίνονται στην συνέχεια. Αρχικά παρουσιάζεται ο πίνακας της εξεργειακής απόδοσης των συστημάτων:

Πίνακας 4-6: Σύγκριση βαθμών απόδοσης για τους τέσσερις τύπους συλλεκτών [4.6]

Case	$\eta_{ex,col}$ (%)	$\eta_{ex,chill}$ (%)	$\eta_{ex,solar}$ (%)
FPC	8.74	35.07	3.021
ETC	14.98	34.05	4.974
CPC	9.84	34.93	3.374
PTC	18.24	31.47	5.504

Βλέπουμε όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πως οι παραβολικοί συλλέκτες πετυχαίνουν την μεγαλύτερη εξεργειακή απόδοση αλλά δεν δύναται να συνδυαστούν αποδοτικά με τον absorption chiller σημειώνοντας την χαμηλότερη εξεργειακή απόδοση στην ψύξη. Οι συλλέκτες κενού αποτελούν μία πολύ καλή λύση σε όλους τους εξεργειακούς βαθμούς απόδοσης το οποία αποτυπώνεται και στην τελική οικονομική αξιολόγηση πετυχαίνοντας το χαμηλότερο συνολικό κόστος όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



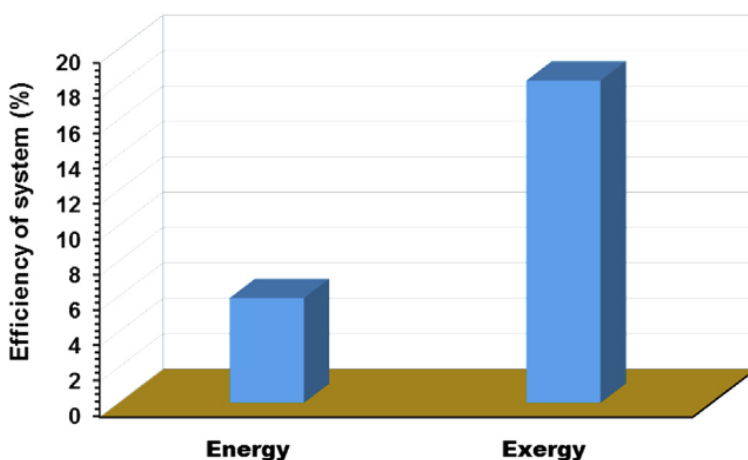
Διάγραμμα 4-13: Σύγκριση κόστους των τεσσάρων τύπων συλλεκτών [4.6]



Assessment of electricity and hydrogen production performance of evacuated tube solar collectors

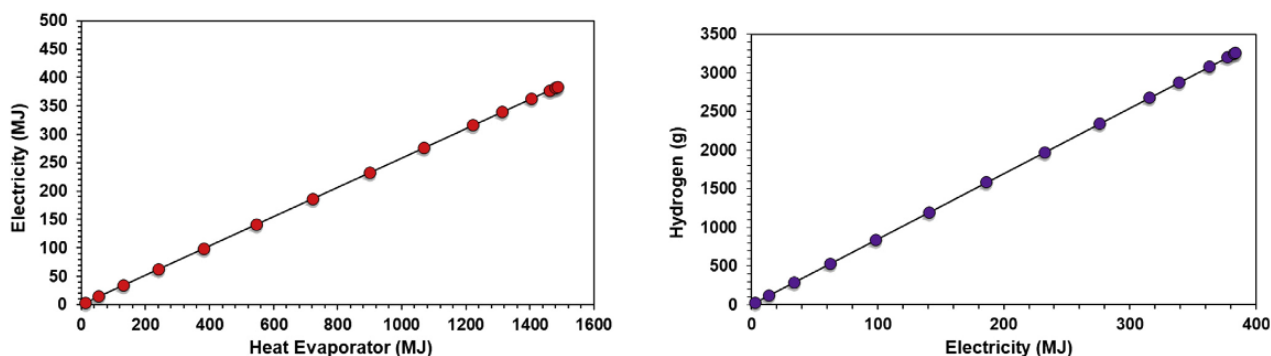
Οι A. Atiza, H. Karakilcikb, M. Erdenc, M. Karakilcik μελέτησαν ένα ενοποιημένο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την αξιολόγηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες κενού συνολικής επιφάνειας 300 m², ηλιακή λίμνη επιφάνειας 217 m², οργανικό κύκλο Rankine (ORC) και σύστημα ηλεκτρόλυσης. Η θερμότητα που αποθηκεύεται στη ζώνη αποθήκευσης θερμότητας (HSZ) μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό των συλλεκτών κενού από τον εναλλάκτη και έτσι οι συλλέκτες αυξάνουν όσο το δυνατόν περισσότερο τη θερμοκρασία του θερμού νερού, πράγμα που επηρεάζει κυρίως την απόδοση του ORC. Οι εξισώσεις εξισορρόπησης του σχεδιαζόμενου συστήματος γράφονταν και αναλύονταν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Engineering Equations Solver (EES). Τελικά, η ενεργειακή και η εξεργειακή απόδοση του παραπάνω συστήματος υπολογίστηκαν σε 5,92% και 18,21% αντίστοιχα. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η παραγωγή υδρογόνου του συστήματος θα μπορούσε να φθάσει τα 3204 g / ημέρα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται εποπτικά οι τιμές αυτές:



Διάγραμμα 4-14: Ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση του συστήματος [4.7]

Η ενέργεια όπως είναι αναμενόμενο παίρνει μικρότερες τιμές από την εξεργεια.



Διάγραμμα 4-15: Παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρισμό που παράχθηκε από θερμότητα [4.7]

Βλέπουμε ότι υπάρχει δυνατότητα παραγωγής σημαντικών ποσοτήτων υδρογόνου μέσω του συστήματος ηλιακών συλλεκτών κενού και του ORC.



Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump

Οι Ε. Μπέλλος και Χ. Τζιβανίδης σε αυτή τη μελέτη, προσομοίωσαν ένα σύστημα τριπαραγωγής με ηλιακή ενέργεια και το βελτιστοποίησαν τόσο σε ενεργειακό όσο και εξεργειακό επίπεδο. Παραβολικοί συλλέκτες (PTC) χρησιμοποιούνται για την παροχή της απαιτούμενης ποσότητας θερμότητας στην παρούσα εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει δεξαμενή αποθήκευσης, μονάδα οργανικού κύκλου Rankine (ORC) και αντλία θερμότητας απορρόφησης που λειτουργεί με ζεύγος LiBr-H₂O. Η πηγή θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες θέτει σε λειτουργία το ORC που απορρίπτει τη θερμότητα στη γεννήτρια της αντλίας θερμότητας. Αυτή η αντλία θερμότητας παράγει ταυτόχρονα θέρμανσης και ψύξη, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το ORC. Το εξεταζόμενο σύστημα αναλύεται παραμετρικά σε συνθήκες σταθερής κατάστασης με το εργαλείο Engineering Equation Solver (EES), διατηρώντας την περιοχή συλλογής ίση με 1000 m² σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Οκτώ διαφορετικά εργαζόμενα ρευστά ελέγχονται στο ORC, ενώ μελετώνται έξι πρόσθετες παράμετροι σχεδιασμού. Η θερμοκρασία εισόδου στο σύστημα ανάκτησης θερμότητας, η υπερθέρμανση, η μέγιστη πίεση στο ORC, η θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας του ORC, η θερμοκρασία εξατμίσεως της αντλίας θερμότητας, καθώς και η ακτινοβολία της ηλιακής δέσμης είναι οι εξεταζόμενες παράμετροι. Σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, το τολουένιο είναι το εργαζόμενο ρευστό το οποίο οδηγεί σε μέγιστη εξεργειακή απόδοση με n-οκτάνιο και MDM να ακολουθούν με 29,42%, 28,50% και 28,35% αντίστοιχα. Στη βέλτιστη περίπτωση, η παραγωγή ηλεκτρισμού του συστήματος είναι 177,6 kW_{el}, ενώ η απόδοση ψύξης και θέρμανσης είναι 398,8 kW και 972 kW αντίστοιχα.

Στον ακόλουθο πίνακα απεικονίζονται τα τελικά αποτελέσματα για τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τα ποσά θέρμανσης και ψύξης για τα διάφορα εργαζόμενα μέσα:

Πίνακας 4-7: Σύγκριση εξεργειακού βαθμού απόδοσης, παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης για τα διάφορα εργαζόμενα μέσα [4.8]

Working fluids	η_{ex} (%)	P_{net} (kW)	Q_h (kW)	Q_e (kW)
Toluene	29.42	177.6	398.8	947.2
n-octane	28.50	167.2	408.5	969.9
MDM	28.35	162.8	419.1	995.4
Cyclohexane	27.62	156.6	418.0	992.6
n-heptane	26.80	147.2	425.7	1011.0
MM	25.88	133.4	445.8	1059.0
n-hexane	24.92	124.7	445.4	1058.0
n-pentane	21.92	89.32	476.3	1131.0

Το τολουένιο πετυχαίνει τον μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης και την μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή ενώ παρατηρούμε ότι όσο μειώνονται οι τιμές αυτές για το εκάστοτε εργαζόμενο μέσο, τόσο αυξάνεται η παραγωγή θερμότητας και ψύξης. Αυτό είναι απόλυτα λογικό καθώς η μετατροπή της θερμικής ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας σε θέρμανση η ψύξη είναι πολύ πιο αποδοτική από την μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [4.1] <https://www.energymatters.com.au/images/apricus/Brochure.pdf>
- [4.2] Κ. Α. Αντωνόπουλος, Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα, Αθήνα 2015
- [4.3] E. Bellos, C.Tzivanidis, Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors, National Technical University of Athens, Athens 2017
- [4.4] J. Freeman, K. Hellgardt, C. Makrides, Working fluid selection and electrical performance optimisation of a domestic solar-ORC combined heat and power system for year-round operation in the UK, Imperial College London, London 2017
- [4.5] S. Abdelhady, D. Borello, E. Tortora, Design of a small scale stand-alone solar thermal co-generation plant for an isolated region in Egypt, Fayoum University, Egypt 2014
- [4.6] E. Bellos, C.Tzivanidis, K. Antonopoulos, Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types, National Technical University of Athens, Athens 2016
- [4.7] A. Atiza, H. Karakilcik, M. Erdenc, M. Karakilcik, Assessment of electricity and hydrogen production performance of evacuated tube solar collectors, University of Cukurova, Turkey 2018
- [4.8] E. Bellos, C.Tzivanidis, Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump, National Technical University of Athens, Athens 2017

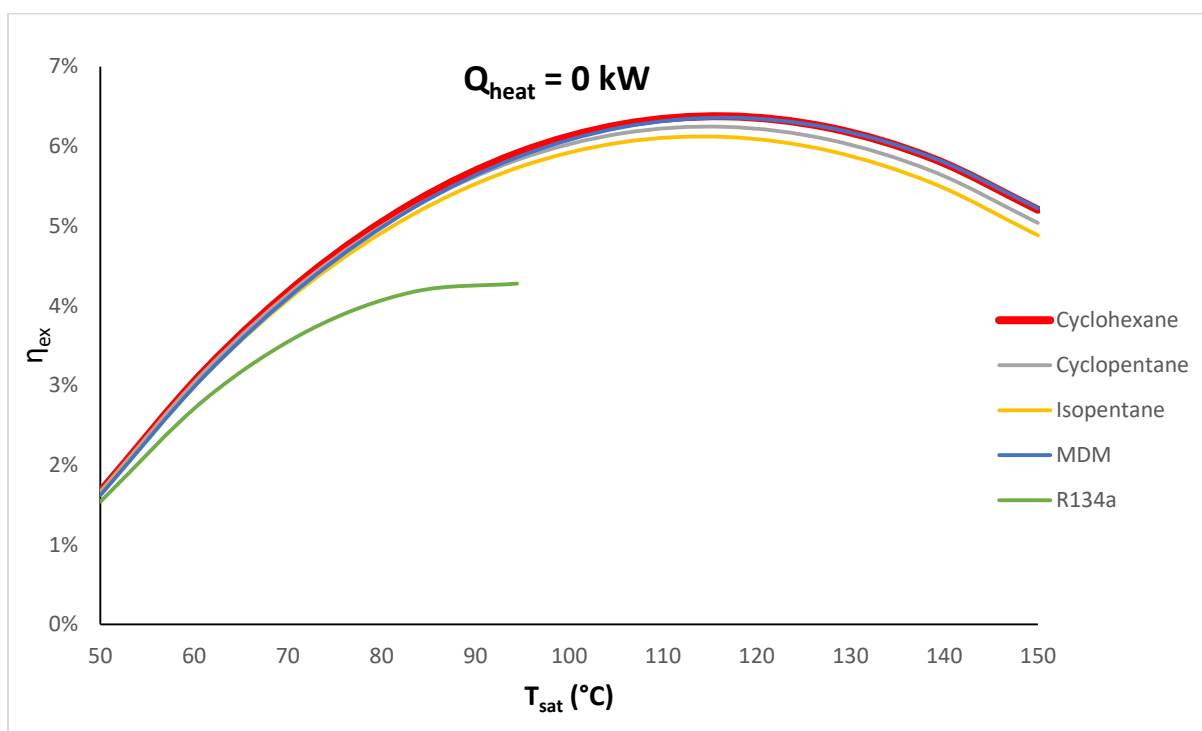


5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

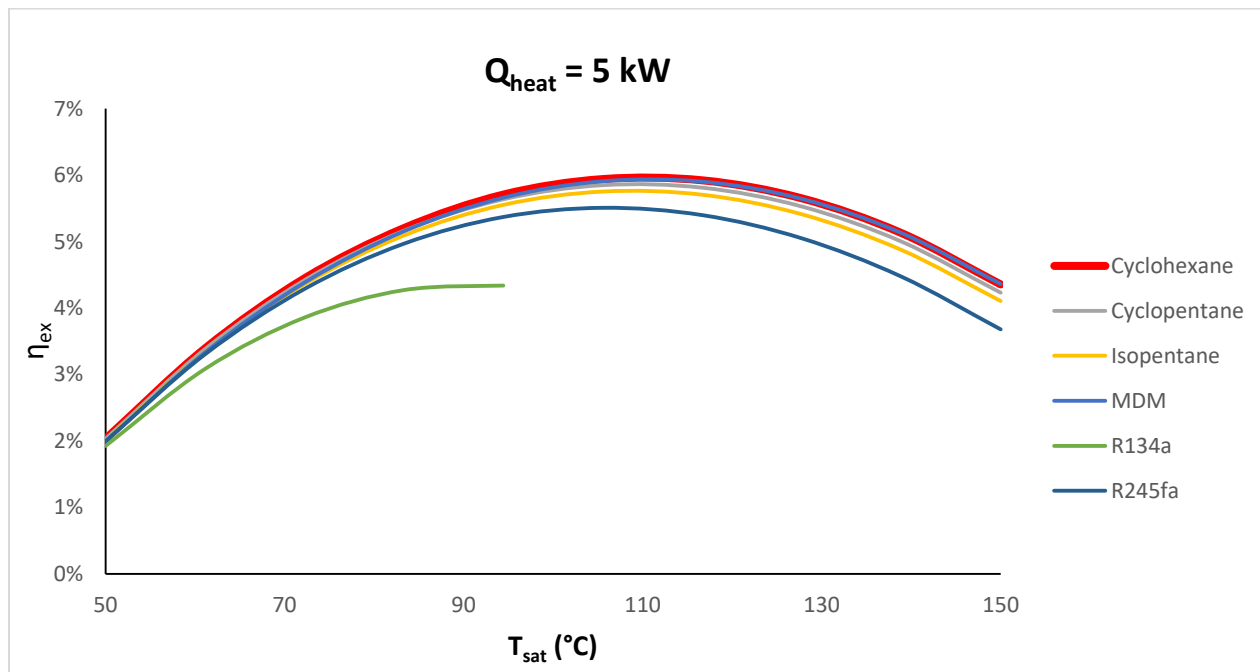
5.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (STEADY-STATE ANALYSIS)

Το πρώτο στάδιο προσέγγισης του προβλήματος έγινε με την βοήθεια του προγράμματος Engineering Equation Solver (EES). Σε αυτό το στάδιο έγινε επίλυση του προβλήματος στην σταθερή κατάσταση – steady state. Με την έννοια σταθερή κατάσταση εννοείται η επίλυση του προβλήματος με σταθερή ζήτηση σε φορτίο για την θέρμανση στον εναλλάκτη θερμότητας, σταθερή ολική ηλιακή ακτινοβολία και γενικά μη μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στόχος αυτού του σταδίου ήταν η εύρεση των αρχικών συνθηκών που θα ορισθούν για το μεταβαλλόμενο φορτίο. Επίσης έγινε η επιλογή των βέλτιστων εργαζόμενων μέσω καθώς και των καταλληλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας για την εν λόγω εγκατάσταση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά στην συνέχεια.

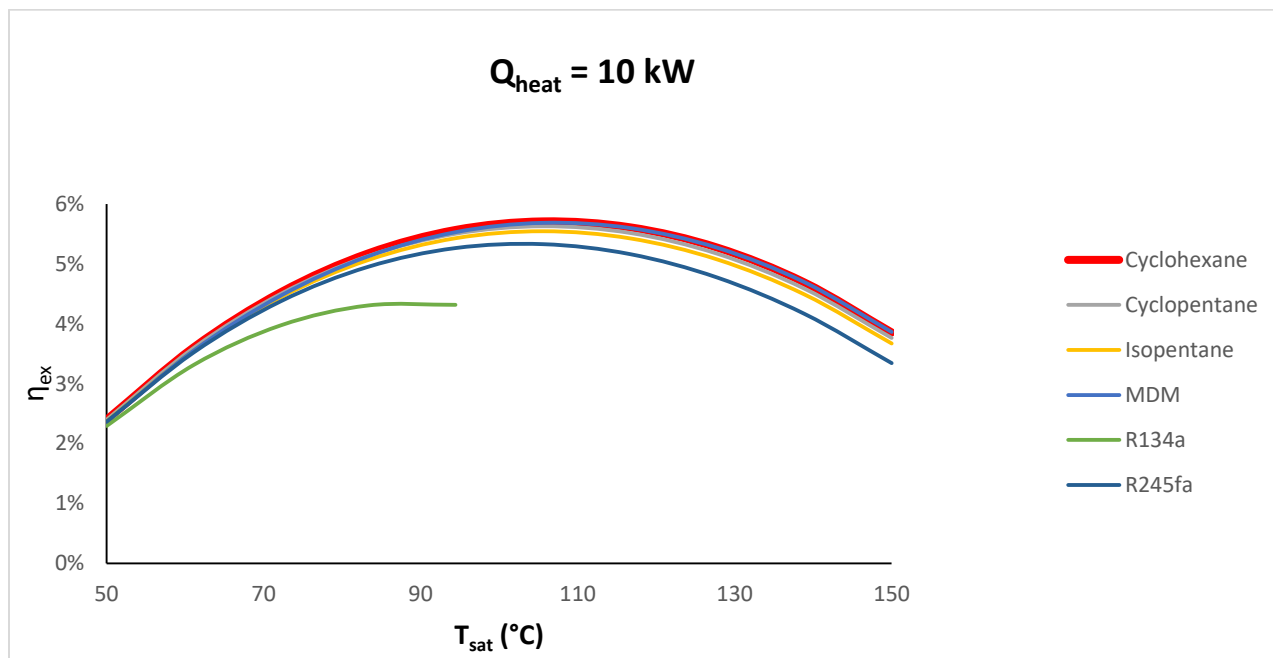
Αρχικά μελετήθηκε η μεταβολή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού για διάφορα εργαζόμενα μέσα. Μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις φορτίου ψύξης για 0, 5 και 10 kW. Παρουσιάζονται τα τρία διαγράμματα παρακάτω:



Διάγραμμα 5-1: Διάγραμμα Μεταβολής Εξεργειακού Βαθμού Απόδοσης Συναρτήσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα (0 Kw)



Διάγραμμα 5-2: Διάγραμμα Μεταβολής Εξεργειακού Βαθμού Απόδοσης Συναρτήσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα (5 Kw)



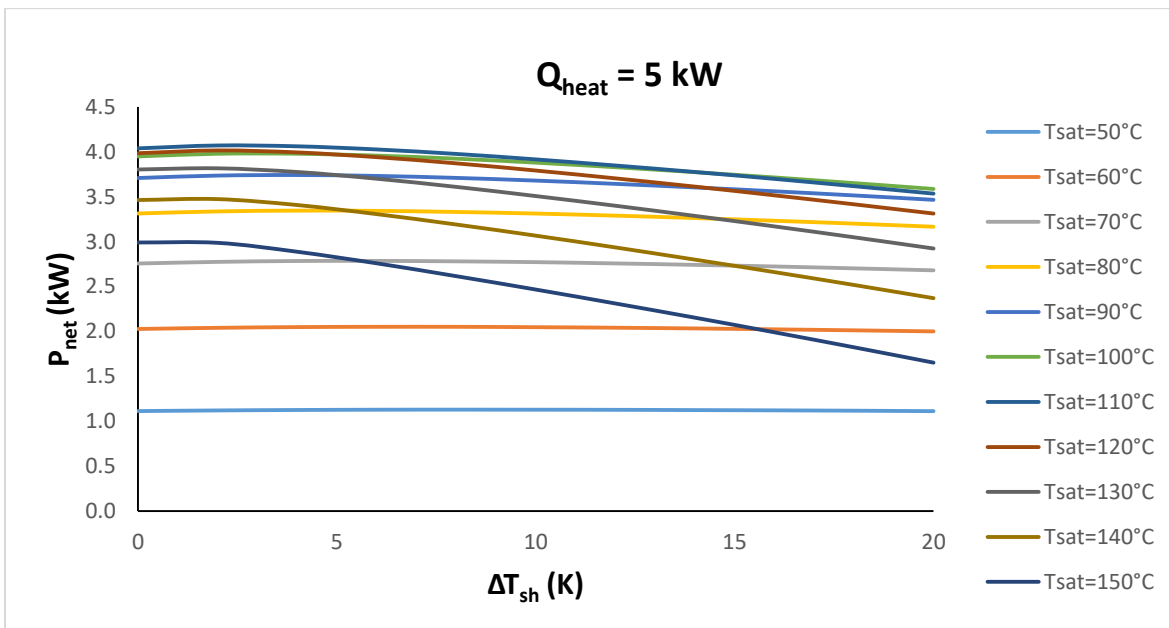
Διάγραμμα 5-3: Διάγραμμα Μεταβολής Εξεργειακού Βαθμού Απόδοσης Συναρτήσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα (10 kW)

Παρατηρούμε πως τον βέλτιστο εξεργειακό βαθμό απόδοσης τον πετυχαίνουμε με το κυκλοεξάνιο (cyclohexane) και για τις τρεις περιπτώσεις. Επίσης οι καμπύλες παρουσιάζουν ένα μέγιστο περίπου στους 110°C- 120°C και για τα τρία φορτία θέρμανσης το οποίο μας προϊδεάζει πως η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού θα κυμαίνεται σε αυτά τα επίπεδα.

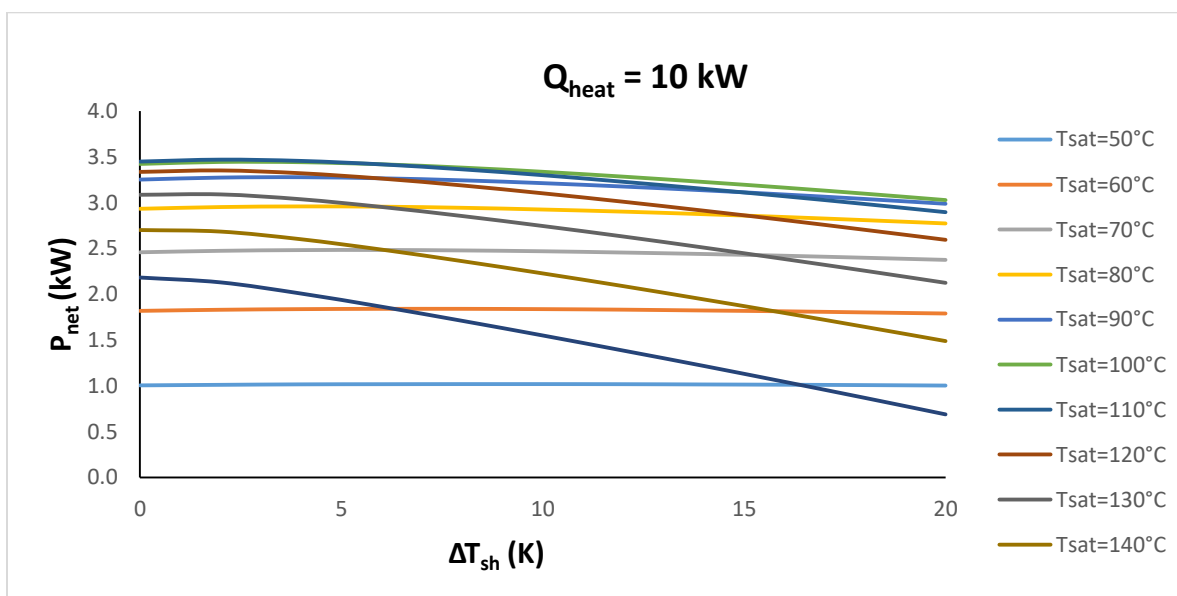


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Το επόμενο διαγράμματα απεικονίζουν την μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς υπερθέρμανσης για διάφορες θερμοκρασίες κορεσμού.



Διάγραμμα 5-4: Μεταβολή Ηλεκτρικής Ισχύος Συναρτήσει Της Θερμοκρασιακής Διαφοράς Υπερθέρμανσης Για Διάφορες Θερμοκρασίες Κορεσμού (5 kW)



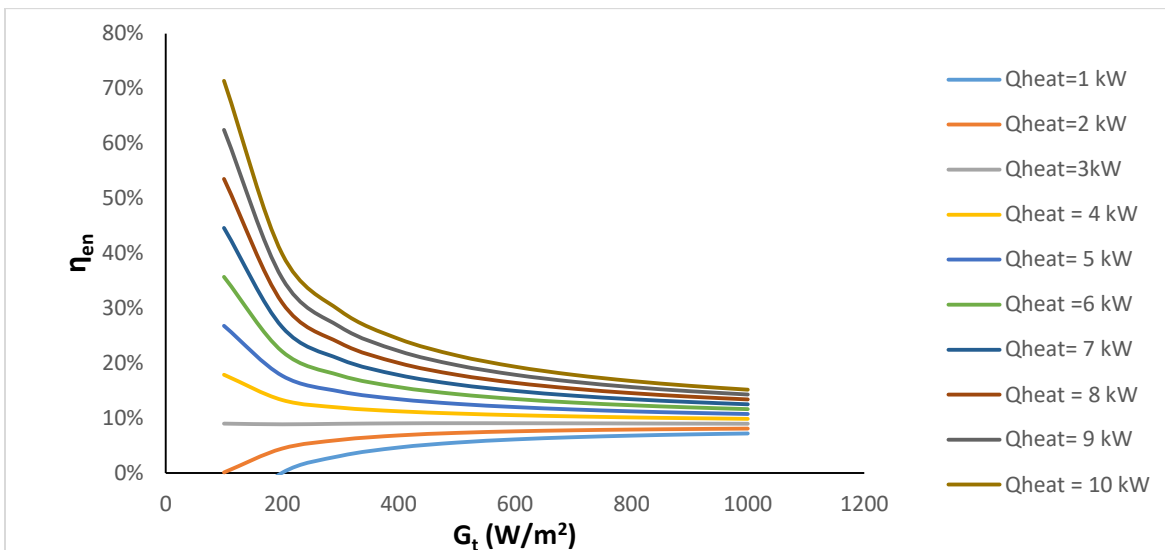
Διάγραμμα 5-5: Μεταβολή Ηλεκτρικής Ισχύος Συναρτήσει Της Θερμοκρασιακής Διαφοράς Υπερθέρμανσης Για Διάφορες Θερμοκρασίες Κορεσμού (10 kW)

Τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνουν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού είναι 100-110°C. Επίσης παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος επιτυγχάνεται με υπερθέρμανση 3-4°C. Εμείς για λόγους ευκολίας θα επιλέξουμε την τιμή των 5°C για την υπερθέρμανση.

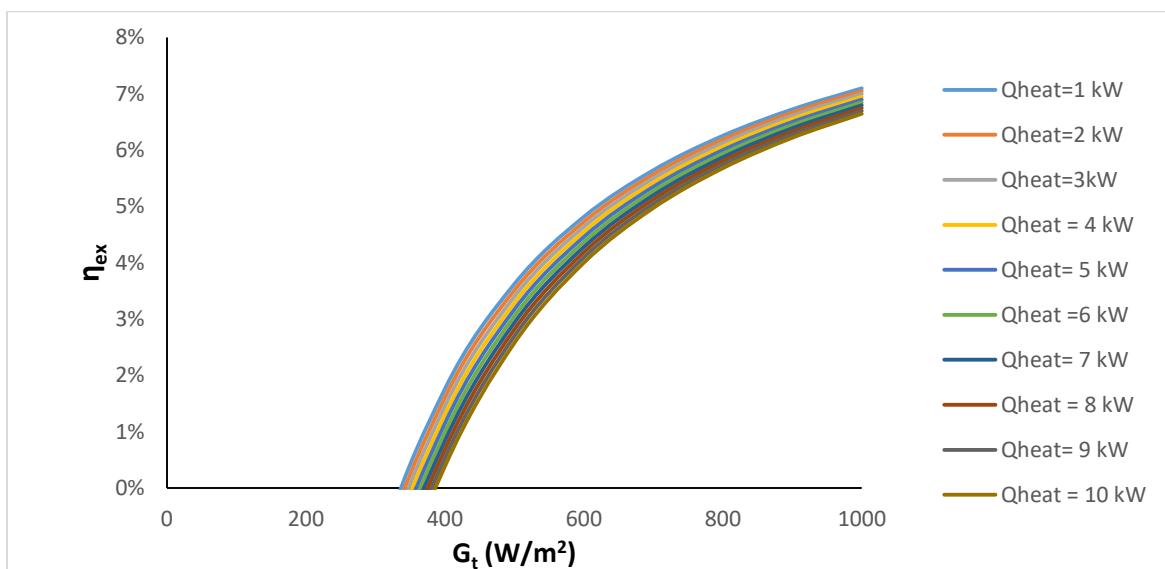


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Τα επόμενα διαγράμματα έγιναν για τον ενεργειακό και τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης συναρτήσει της προσπίπτουσας ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου για διάφορα φορτία θέρμανσης.



Διάγραμμα 5-6: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας Κεκλιμένου Επιπέδου Για Διάφορα Φορτία Θέρμανσης

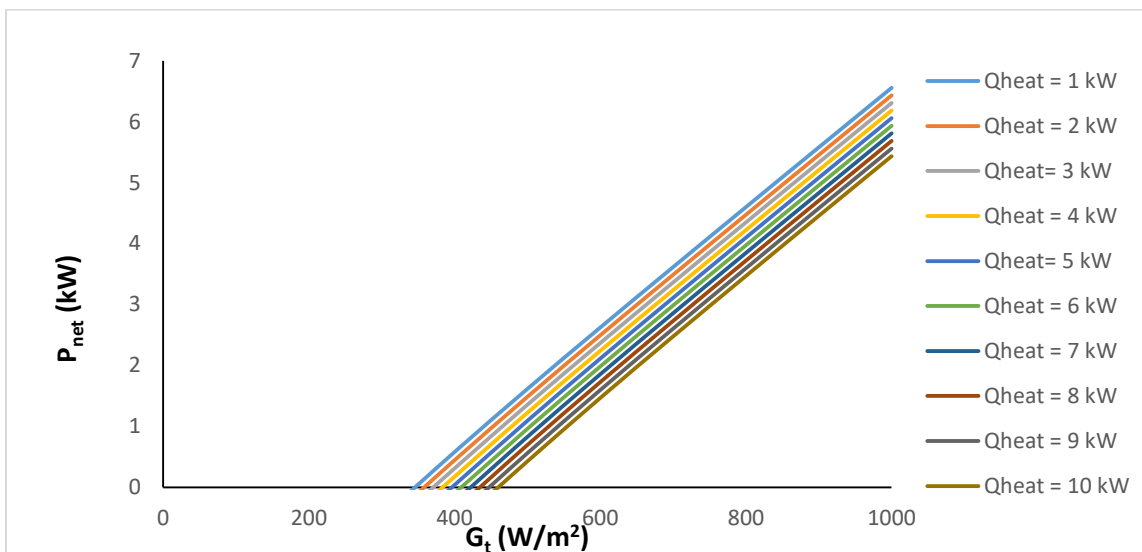


Διάγραμμα 5-7: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας Κεκλιμένου Επιπέδου Για Διάφορα Φορτία Θέρμανσης

Βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερο το φορτίο θέρμανσης τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης. Αυτό είναι λογικό καθώς ο εναλλάκτης παράγει θερμότητα πολύ πιο αποδοτικά από ότι η γεννήτρια παράγει ρεύμα. Επομένως όσο μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας της αποθηκευτικής δεξαμενής αφιερωθεί στον εναλλάκτη τόσο αποδοτικότερη θα είναι η εγκατάσταση. Επίσης βλέπουμε πως ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ενώ ο ενεργειακός παρουσιάζει απόκλιση για μικρές ακτινοβολίες. Πρακτικά η εγκατάσταση δεν θα λειτουργεί με προσπίπτουσα ακτινοβολία μικρότερη από 400 W/m^2 επομένως οι παραπάνω τιμές δεν αποτελούν πρόβλημα.

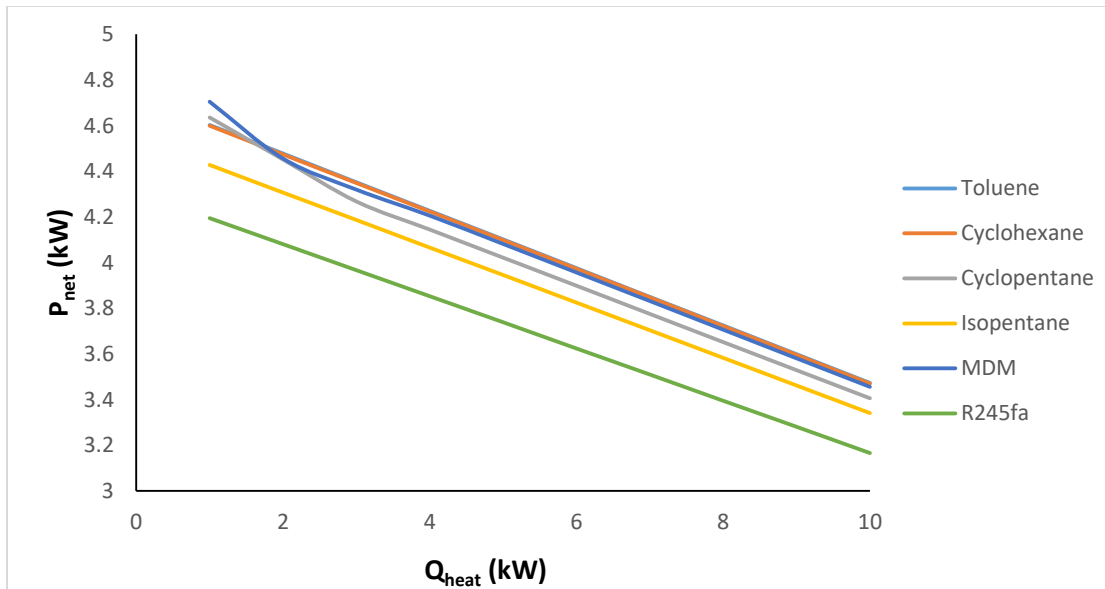


Ακόμη παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος για διάφορες περιπτώσεις:



Διάγραμμα 5-8: Μεταβολή Ηλεκτρικής Ισχύος Συνάρτησει Της Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας Κεκλιμένου Επιπέδου Για Διάφορα Φορτία Θέρμανσης

Όσο το θερμικό φορτίο αυξάνεται τόσο η ηλεκτρική ισχύς μειώνεται κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς η θερμική ισχύς απορροφά μέρος της εκμεταλλεύσιμης θερμότητας που θα μπορούσε να γίνει ηλεκτρική.

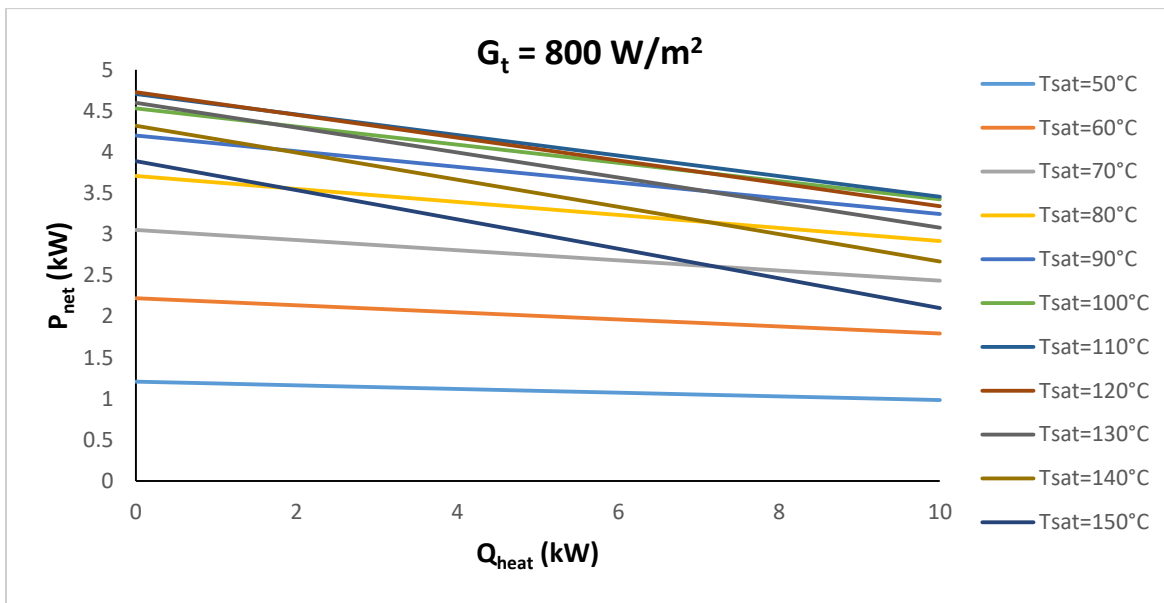


Διάγραμμα 5-9: Μεταβολή Της Ηλεκτρικής Ισχύος Συνάρτησει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

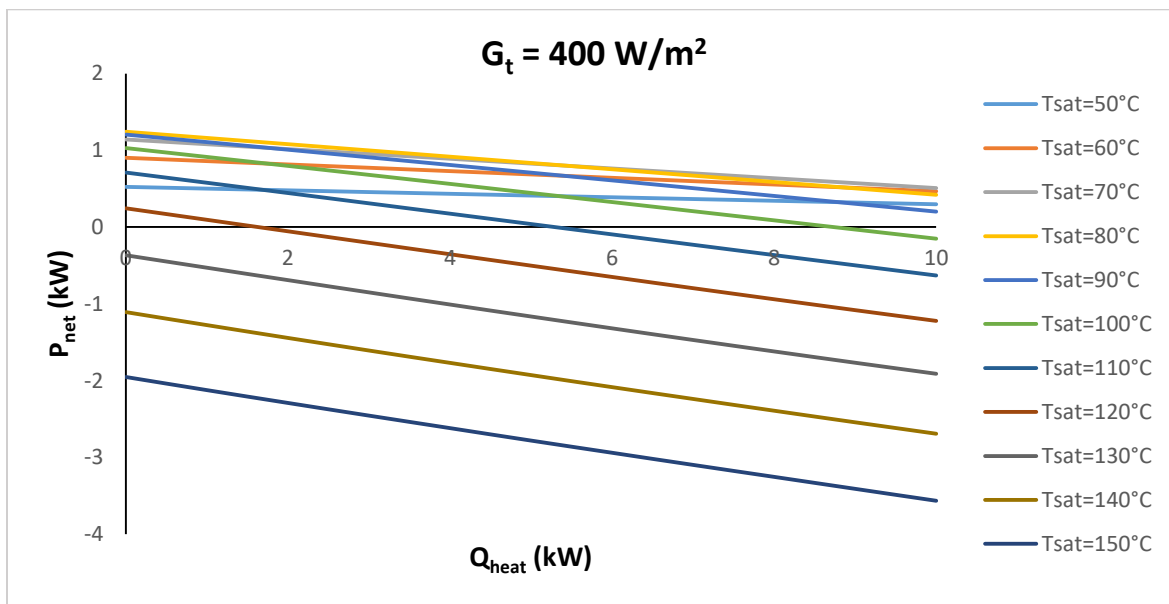
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πώς το κυκλοεξάνιο αποδίδει την μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ, πλην μίας περιοχής πολύ χαμηλού θερμικού φορτίου όπου το MDM είναι πιο αποδοτικό. Η περιοχή αυτή δεν θα μας απασχολήσει καθώς είναι πολύ μικρό το θερμικό φορτίο (μικρότερο από 5kW που μας ενδιαφέρει).



Έπειτα βλέπουμε την μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος για δύο τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ($800-400 \text{ W/m}^2$) συναρτήσει του φορτίου θέρμανσης για διάφορες θερμοκρασίες κορεσμού.



Διάγραμμα 5-10: Μεταβολή Ηλεκτρικής Ισχύος Συναρτήσει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορες Θερμοκρασίες Κορεσμού (Για 800 W/m^2)



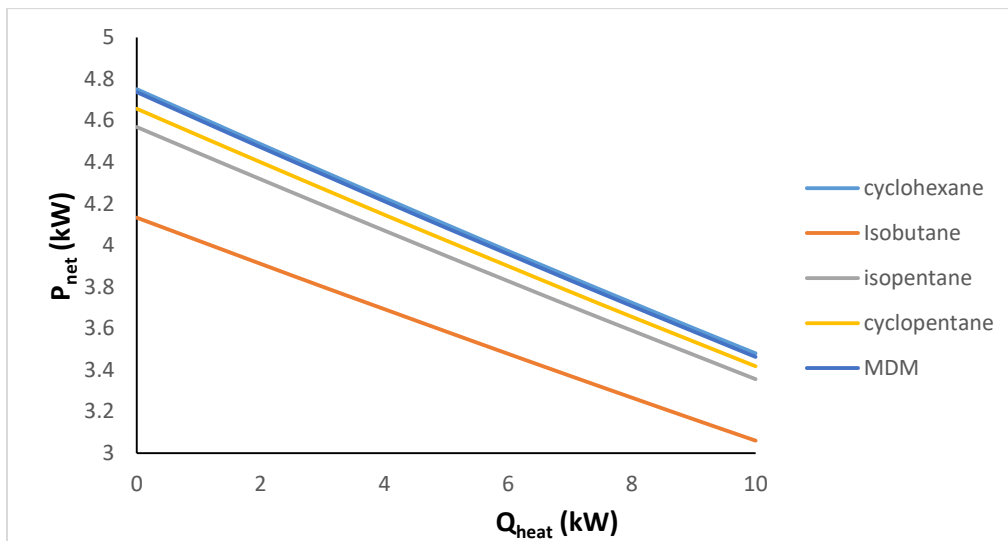
Διάγραμμα 5-11: Μεταβολή Ηλεκτρικής Ισχύος Συναρτήσει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορες Θερμοκρασίες Κορεσμού (Για 400 W/m^2)

Τα συμπεράσματα από τα παραπάνω διαγράμματα είναι τα εξής. Αρχικά επιβεβαιώνεται ότι η ηλεκτρική ισχύς μειώνεται με την αύξηση του φορτίου θέρμανσης. Επίσης η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού είναι μεταξύ $110-120^\circ\text{C}$. Ακόμα βλέπουμε ότι για 400 W/m^2 στις περισσότερες περιπτώσεις χρειάζεται να καταναλώσουμε ενέργεια αντί να παράξουμε επομένως για τόσο μικρή προσπίπτουσα ακτινοβολία η λειτουργία της εγκατάστασης δεν συμφέρει.



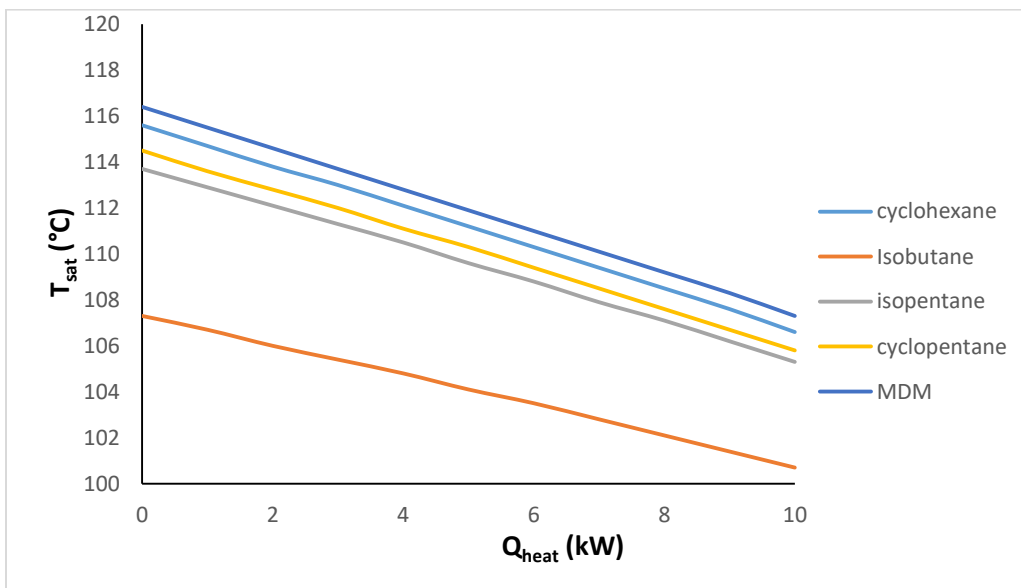
Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή διάφορων μεγεθών συναρτήσει του φορτίου θέρμανσης για τα εργαζόμενα μέσα που μελετήθηκαν.



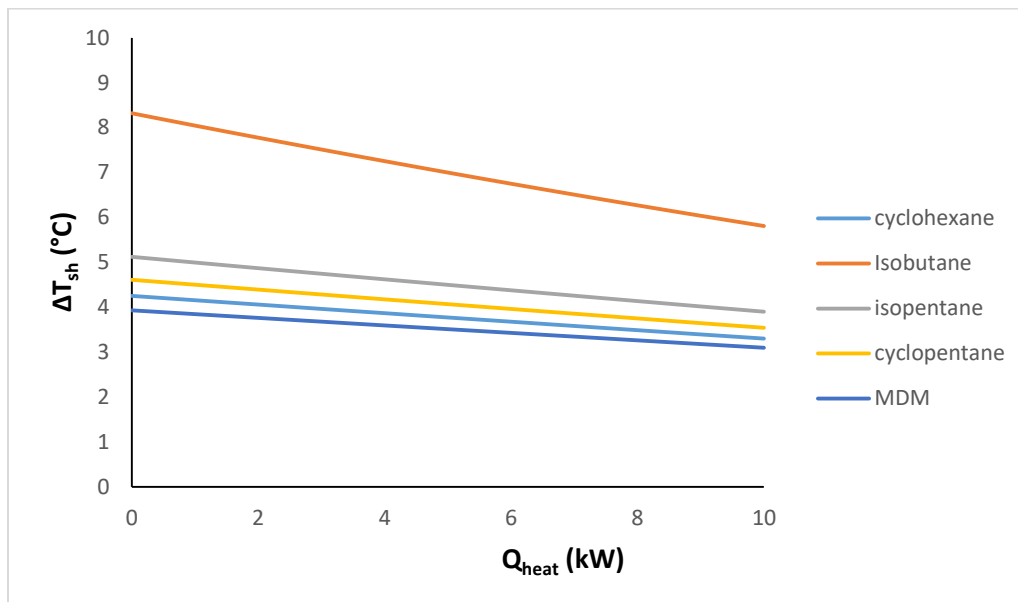
Διάγραμμα 5-12: Μεταβολή Της Ηλεκτρικής Ισχύος Συναρτήσει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Η ηλεκτρική ισχύς όπως είδαμε και προηγουμένως μειώνεται με την αύξηση του φορτίου της θέρμανσης. Επίσης το εργαζόμενο μέσο που πετυχαίνει τις μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής ισχύος είναι το κυκλοεξάνιο με μικρή διαφορά από το MDM.



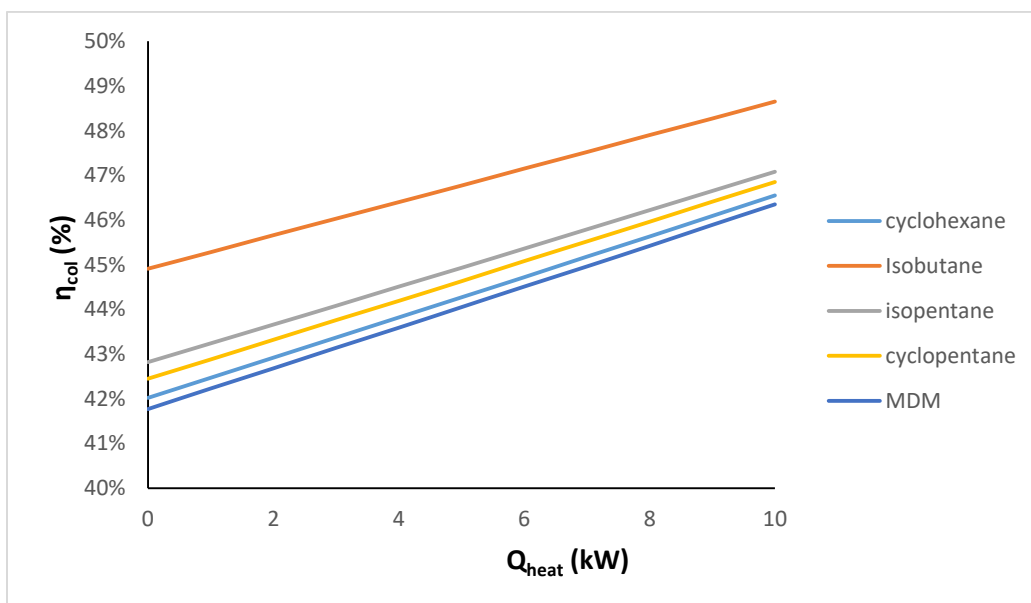
Διάγραμμα 5-13: Μεταβολή Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Συναρτήσει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Αντίστοιχη πτωτική πορεία έχει και η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού η οποία για κυκλοεξάνιο και φορτίο θέρμανσης 5 kW παίρνει τιμή 112°C. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα δεν προκύπτει βέλτιστο μέσο καθώς δεν υπάρχει επιθυμητή ή ιδανική θερμοκρασία κορεσμού.



Διάγραμμα 5-14: Μεταβολή Της Θερμοκρασιακής Διαφοράς Υπερθέρμανσης Συναρτήσεως Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Η βέλτιστη τιμή της υπερθέρμανσης για τα περισσότερα μέσα κυμαίνεται μεταξύ 3.5°C - 5°C. Το ισοπεντάνιο είναι το μόνο που ξεφεύγει από αυτές τις τιμές. Για κυκλοεξάνιο και φορτίο θέρμανσης 5 kW η βέλτιστη υπερθέρμανση είναι 3.6°C.

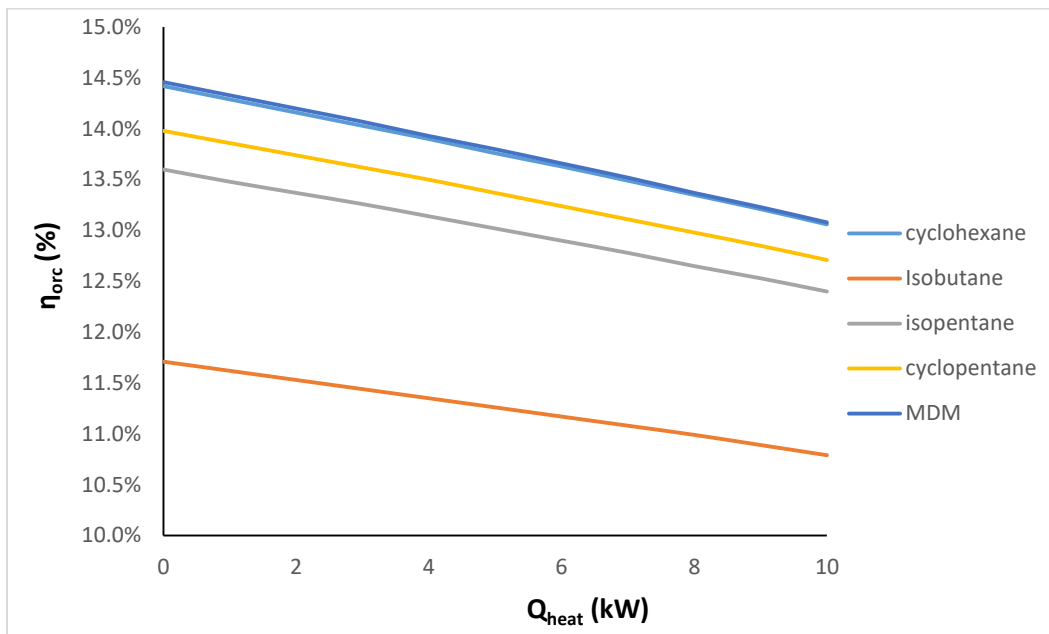


Διάγραμμα 5-15: Μεταβολή Του Βαθμού Απόδοσης Του Συλλέκτη Κενού Συναρτήσεως Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη κυμαίνεται μεταξύ 42% - 46% και παρουσιάζει άνοδο με την αύξηση του θερμικού φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με μικρότερο θερμικό φορτίο αποβάλλεται περισσότερη θερμότητα στον ORC με αποτέλεσμα το εργαζόμενο ρευστό του συλλέκτη να βρίσκεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

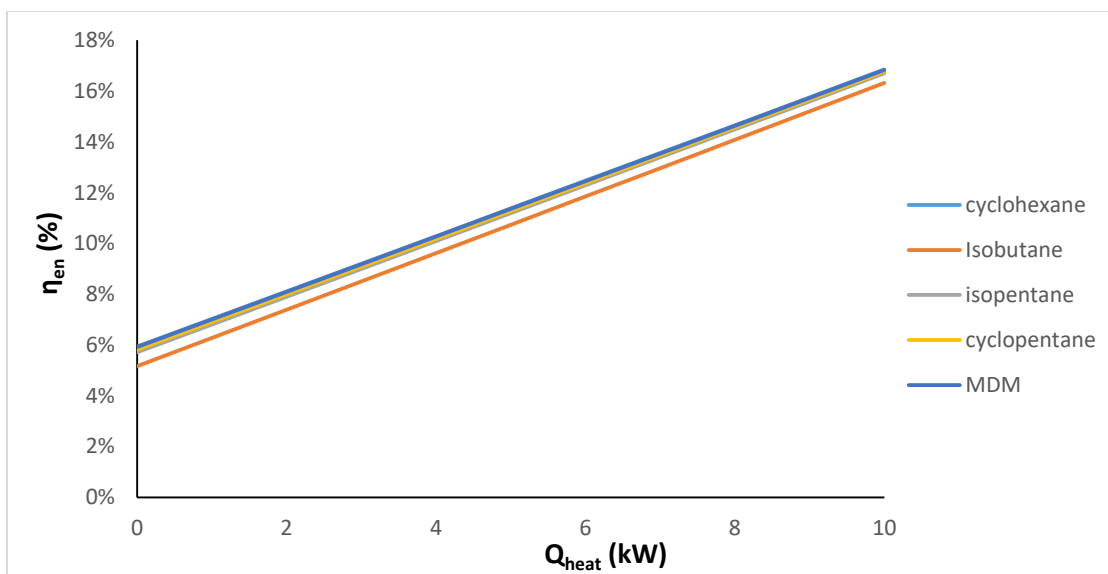


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης



Διάγραμμα 5-16: Μεταβολή Του Βαθμού Απόδοσης Του Οργανικού Κύκλου Rankine Συναρτήσεως Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Αντίθετη πορεία ακολουθεί ο βαθμός απόδοσης του οργανικού κύκλου Rankine ο οποίος μειώνεται με την αύξηση του θερμικού φορτίου. Η τιμή που παίρνει για κυκλοεξάνιο και φορτίο 5 kW είναι 14%.

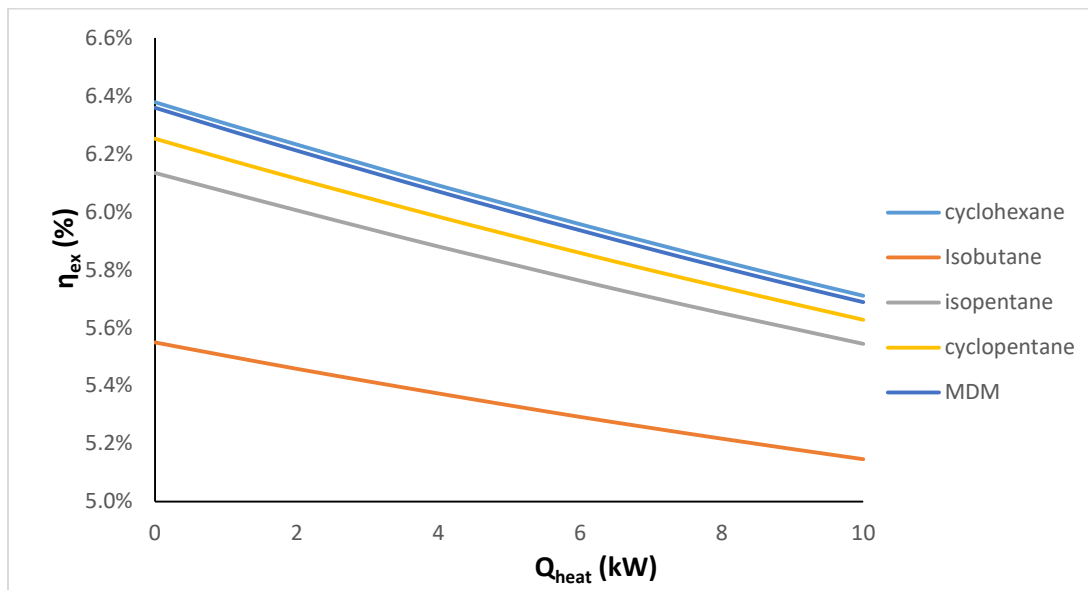


Διάγραμμα 5-17: Μεταβολή Του Ενεργειακού Βαθμού Απόδοσης Συναρτήσεως Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης είναι ανάλογος του φορτίου θέρμανσης με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 5% και 17%. Παρατηρούμε ότι ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση ανάλογα με το θερμικό φορτίο. Αυτό συμβαίνει διότι έχει ορισθεί με τρόπο τέτοιο ώστε η συμβολή της ισχύος από την γεννήτρια και από τον εναλλάκτη να θεωρούνται ισάξιες, με τον τελευταίο να λειτουργεί πολύ πιο αποδοτικά.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης



Διάγραμμα 5-18: Μεταβολή Του Εξεργειακού Βαθμού Απόδοσης Συναρτήσει Του Φορτίου Θέρμανσης Για Διάφορα Εργαζόμενα Μέσα

Το πρόβλημα του ενεργειακού βαθμού απόδοσης επιλύεται με την χρήση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ο οποίος υπολογίζεται με μία πιο σύνθετη εξίσωση που λαμβάνει υπόψιν διαφορετικά την συνεισφορά της κάθε ισχύος.

Παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα τις καλύτερες επιδόσεις τις πετυχαίνουμε χρησιμοποιώντας κυκλοεξάνιο (cyclohexane), με μικρή διαφορά από το MDM. Επίσης μπορούν από όλα τα διαγράμματα της σταθερής κατάστασης να ορισθούν ορισμένες παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια. Αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5-1: Τιμές Που Προέκυψαν Από Την Μελέτη Της Σταθερής Κατάστασης

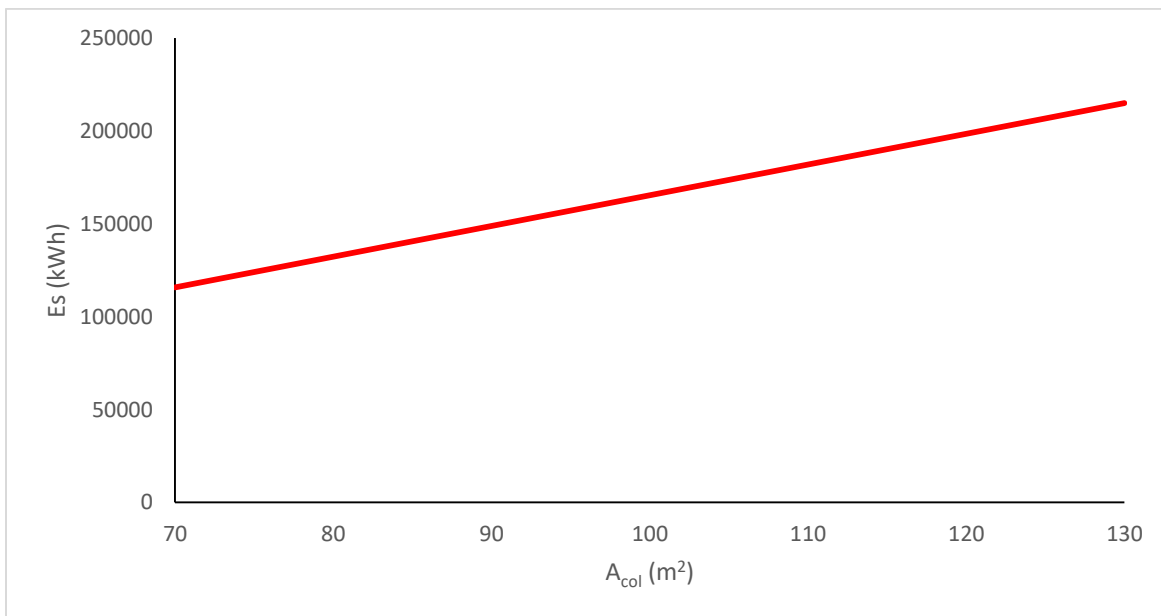
VALUE	ΑΡΧΙΚΗ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ
T_{SAT} (°C)	100	$p_{sat} < 90\% p_{crit}$	110
ΔT_{SH} (°C)	5	-	3.6
T_{COND} (°C)	50	$T_{cond} > T_a$	$T \ll$
PP1	10	$pp1 \geq pp$	10
FLUID	cyclohexane	-	cyclohexane
P_{net} (kW)	5	$\max \eta_{en}$	4.4



5.2. ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ

Έχοντας ολοκληρώσει την μελέτη του σταθερού φορτίου το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την προσομοίωση της εγκατάστασης σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου. Αυτό επιτεύχθηκε με την βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Στο στάδιο αυτό η ηλιακή ακτινοβολία δεν θεωρείται σταθερή αλλά λαμβάνει μεταβλητές τιμές σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις που έχουν παρουσιασθεί σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας. Επομένως υπολογίσθηκαν οι τιμές της ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου κατά την διάρκεια της μέσης ημέρας κάθε μήνα. Εν συνεχεία προσομοιώθηκε όλη η υπόλοιπη εγκατάσταση. Επίσης μεταβαλλόμενο φορτίο θεωρήθηκε ότι είναι και το θερμικό και το ηλεκτρικό. Πιο συγκεκριμένα το ηλεκτρικό φορτίο δεν λειτουργεί συνεχώς αλλά μόνο όταν η θερμοκρασία της αποθηκευτικής δεξαμενής ξεπερνά τα επιθυμητά όρια και τότε λαμβάνει την ονομαστική τιμή. Από την άλλη το θερμικό φορτίο λαμβάνει μία κατανομή μέσα στην μέρα σύμφωνα με εμπειρικές τιμές και καταναλώνει θερμότητα με βάση αυτή την ζήτηση.

Η παραμετρική ανάλυση έγινε με διάφορες παραμέτρους όπως η συλλεκτική επιφάνεια, ο όγκος της αποθηκευτικής δεξαμενής καθώς επίσης και η θερμοκρασία κορεσμού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα.



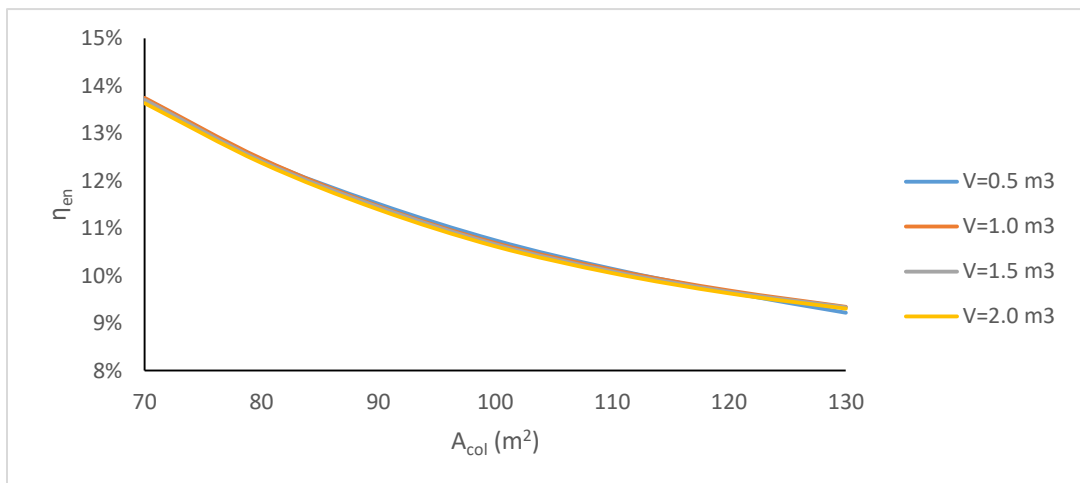
Διάγραμμα 5-19: Ετήσια Προσπίπτουσα Ηλιακή Ενέργεια Συναρτήσεως Της Συλλεκτικής Επιφάνειας

Όπως είναι αναμενόμενο η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια εξαρτάται άμεσα από την συλλεκτική επιφάνεια επομένως με αύξηση της επιφάνειας παρουσιάζεται γραμμική αύξηση και της ενέργειας.

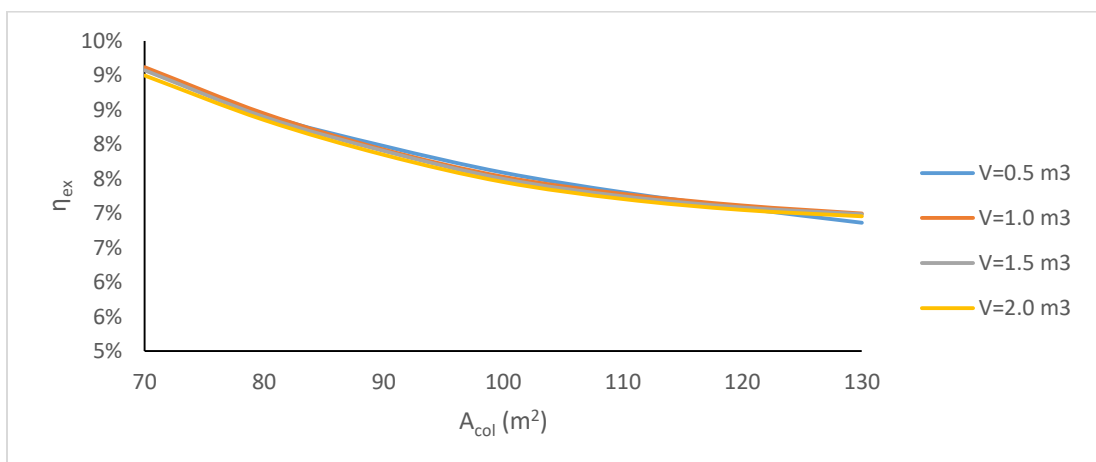
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ενεργειακού και εξεργειακού βαθμού απόδοσης καθώς επίσης και της συνολικής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για θερμοκρασίες κορεσμού από 80°C έως 140°C.



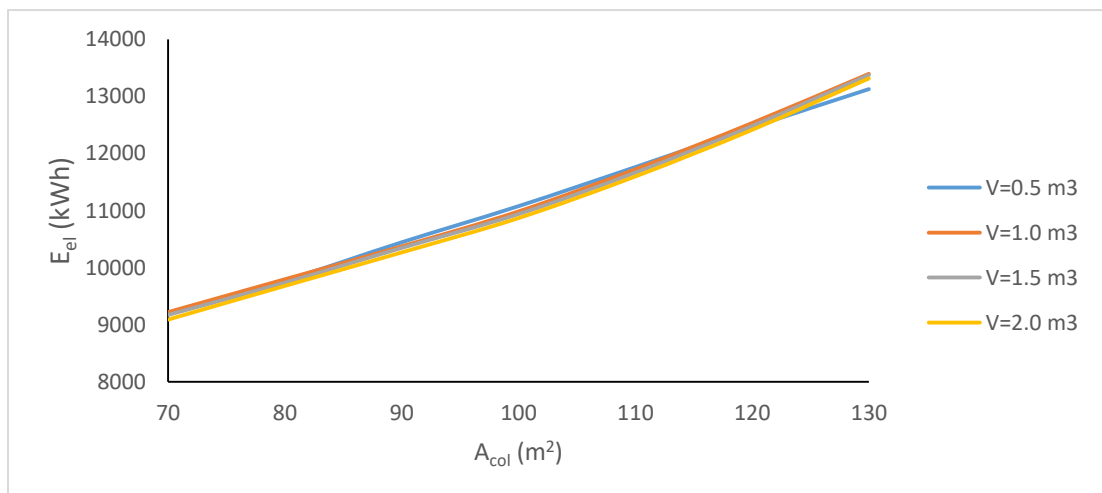
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-20: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



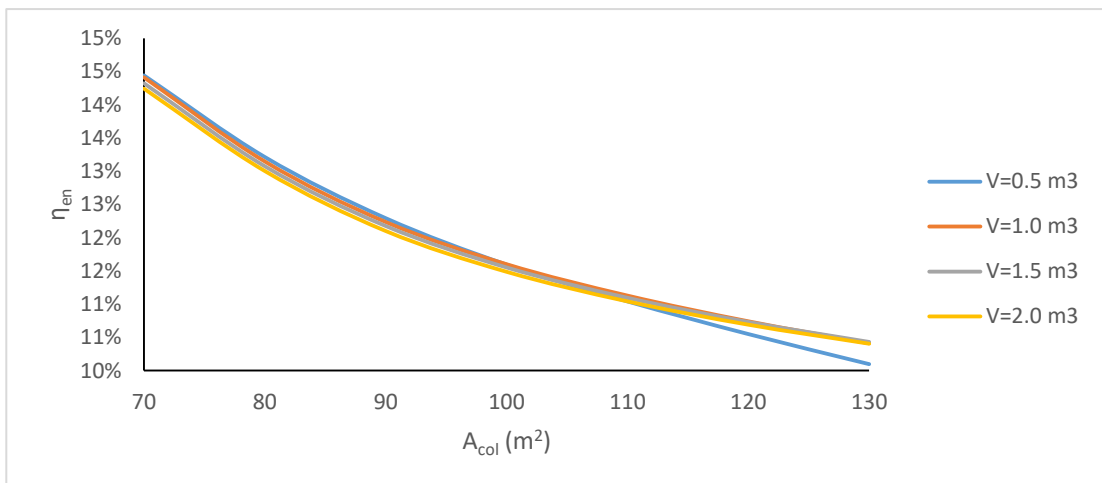
Διάγραμμα 5-21: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



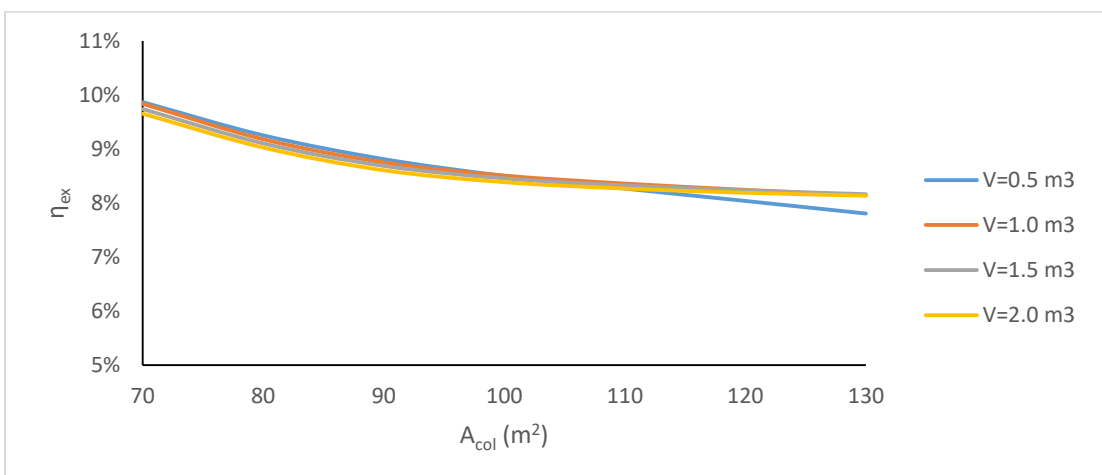
Διάγραμμα 5-22: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



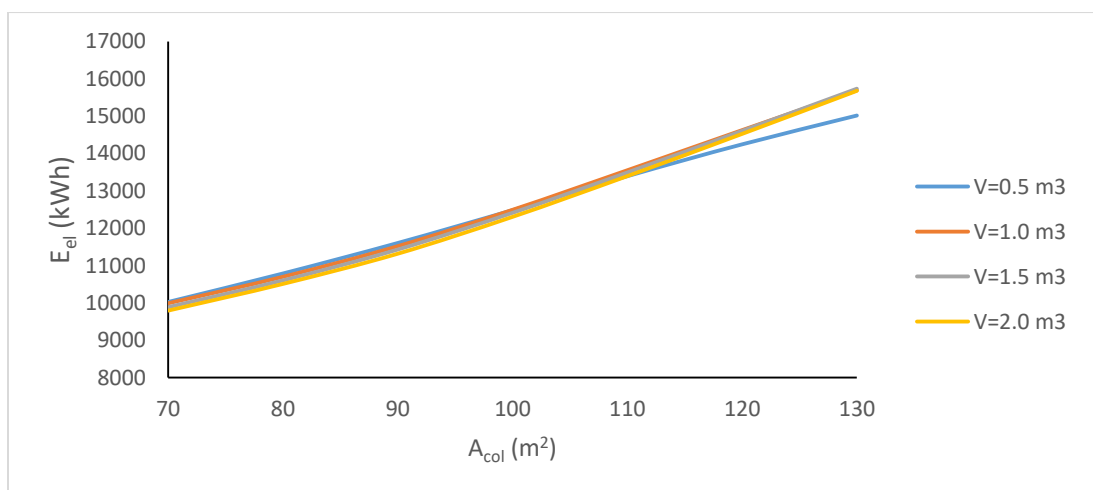
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=90\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-23: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



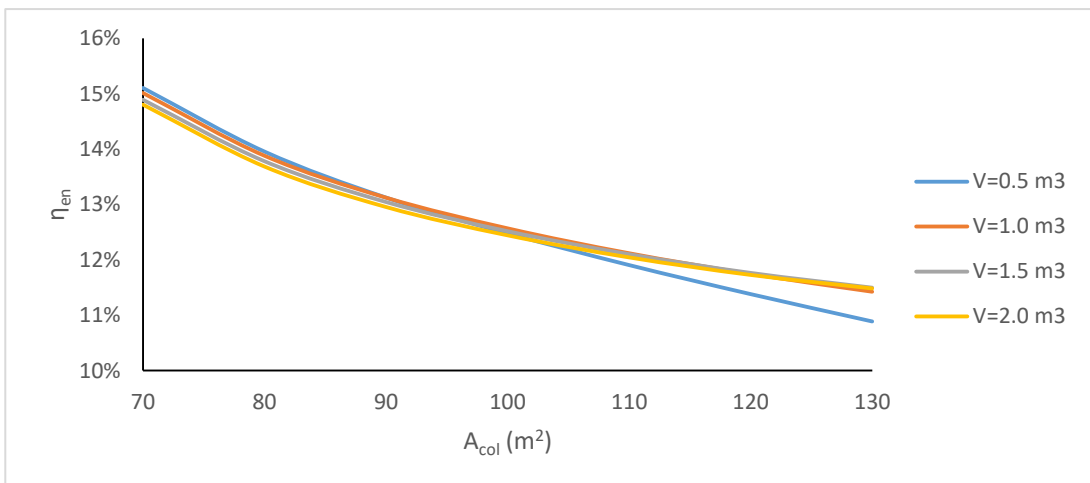
Διάγραμμα 5-24: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



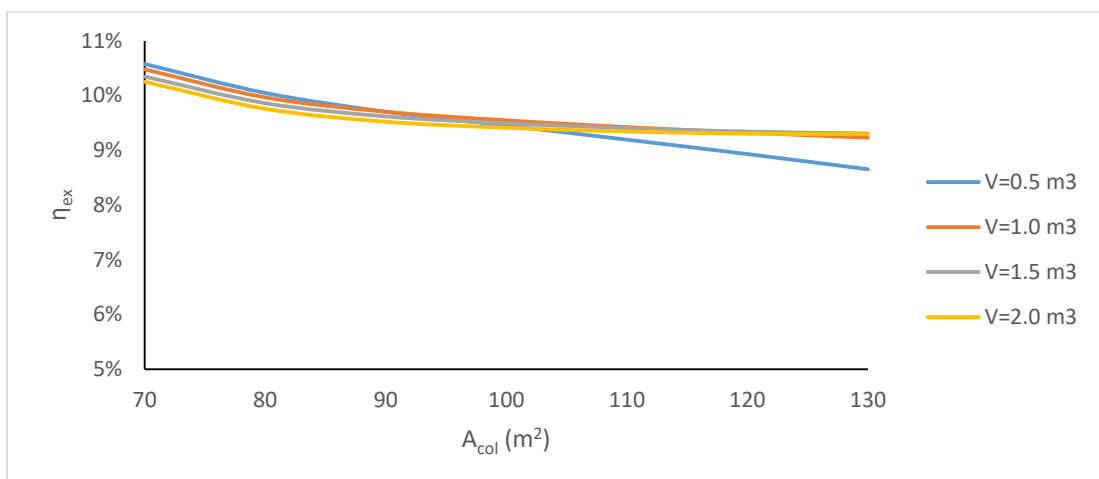
Διάγραμμα 5-25: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



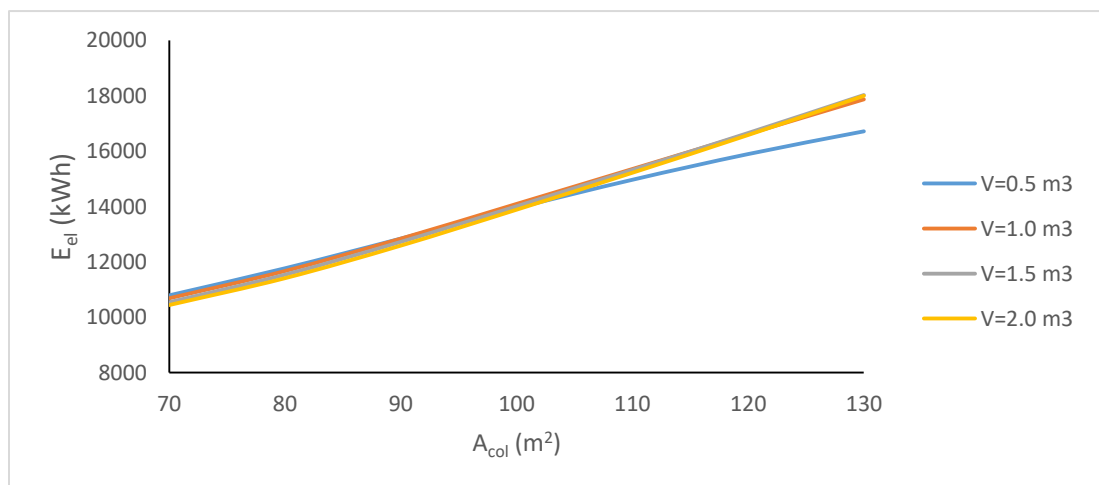
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-26: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



Διάγραμμα 5-27: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας

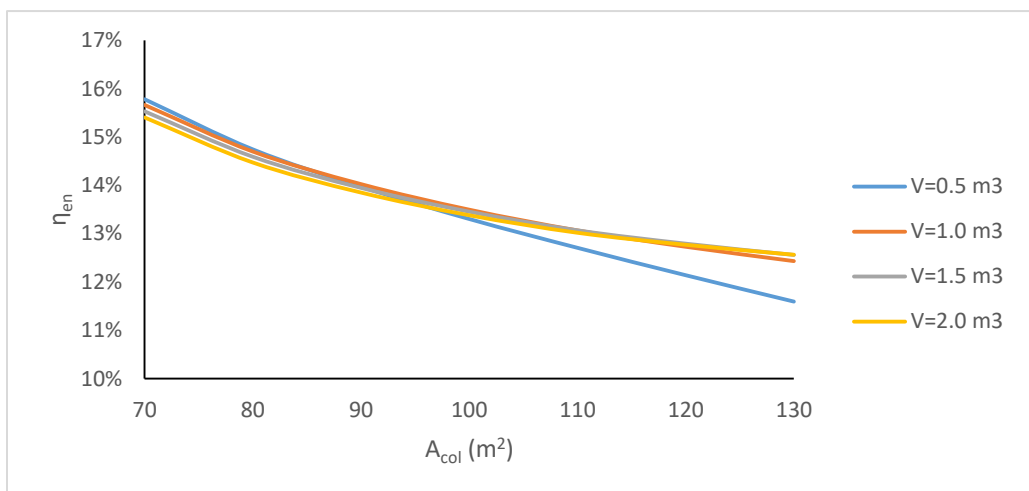


Διάγραμμα 5-28: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας

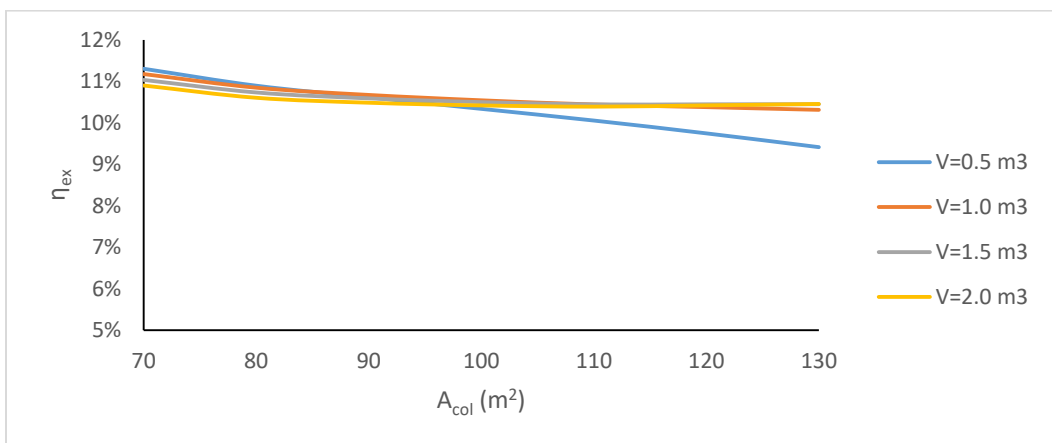


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

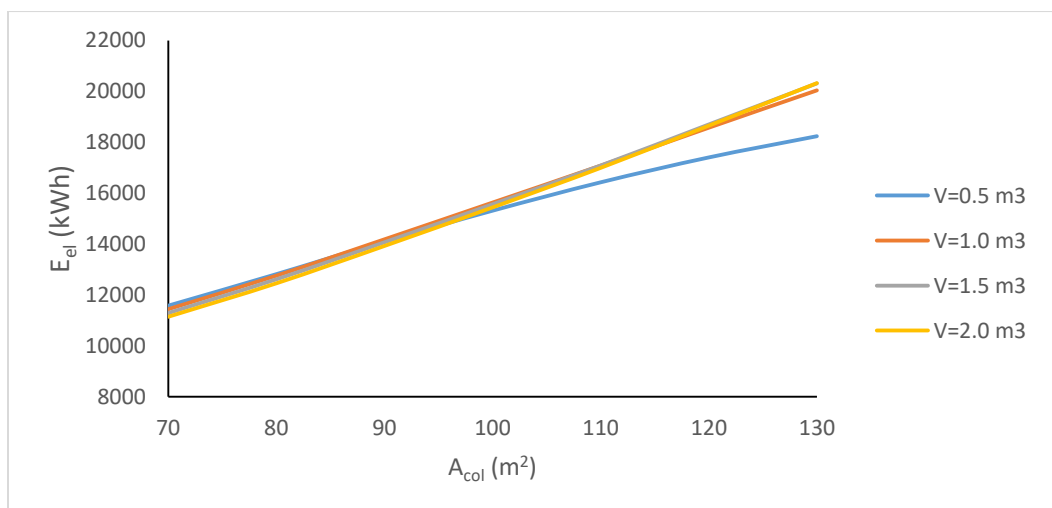
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=110\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-29: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συνάρτησι Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



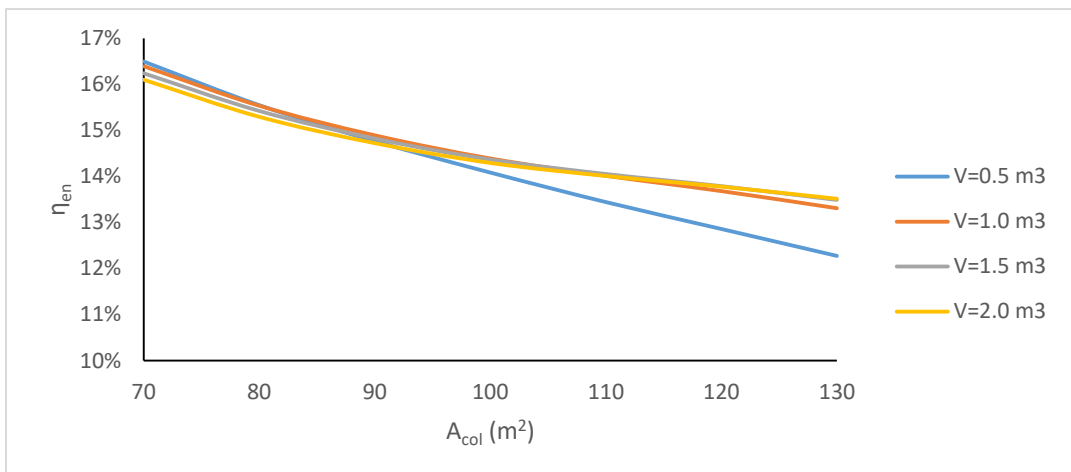
Διάγραμμα 5-30: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συνάρτησι Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



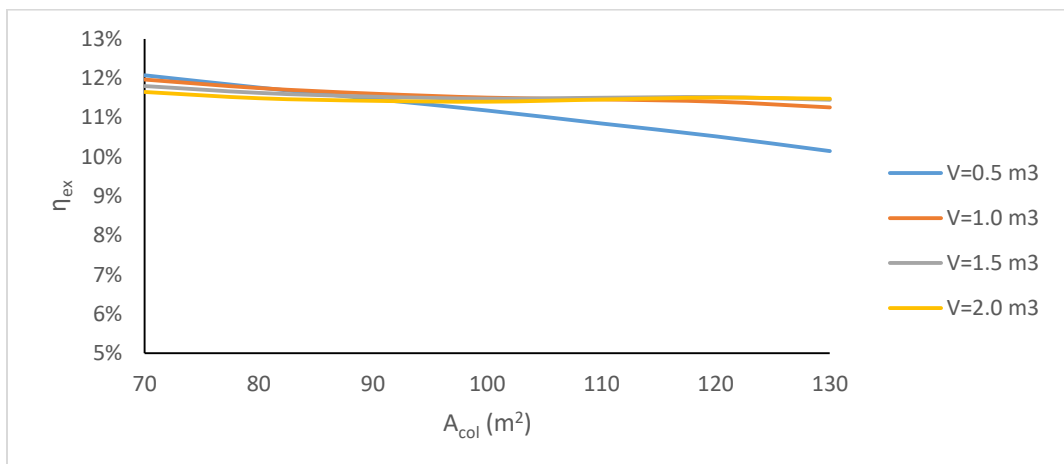
Διάγραμμα 5-31: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συνάρτησι Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



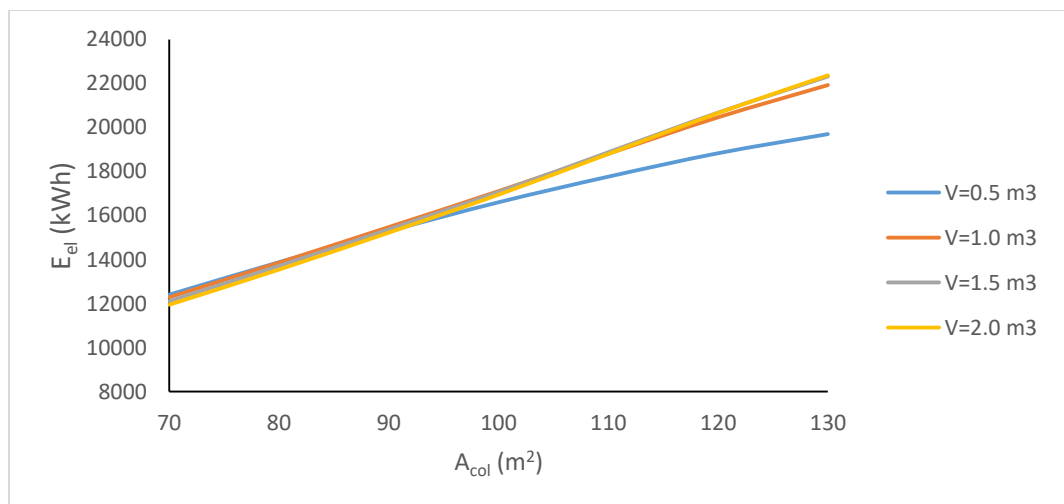
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=120\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-32: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης ΣυναρτήσεΙ Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



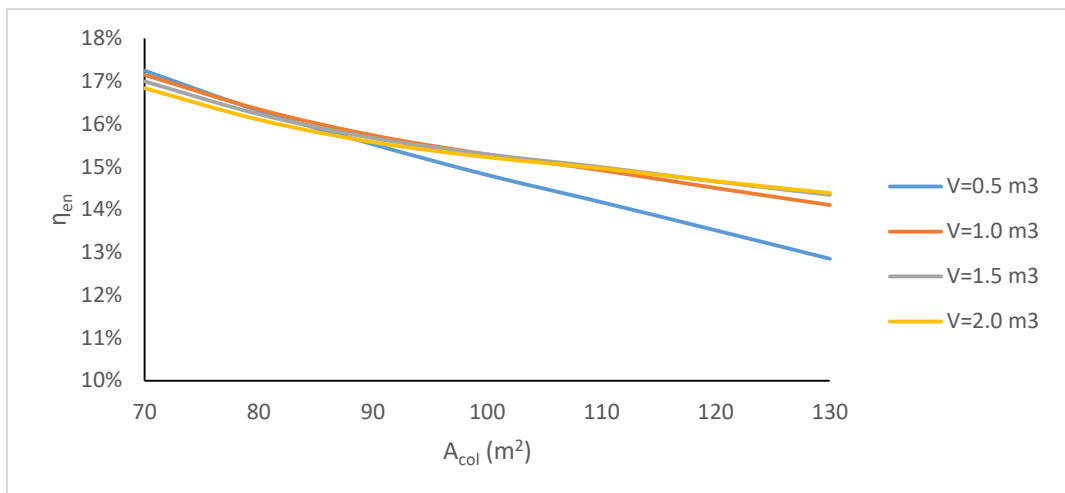
Διάγραμμα 5-33: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης ΣυναρτήσεΙ Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



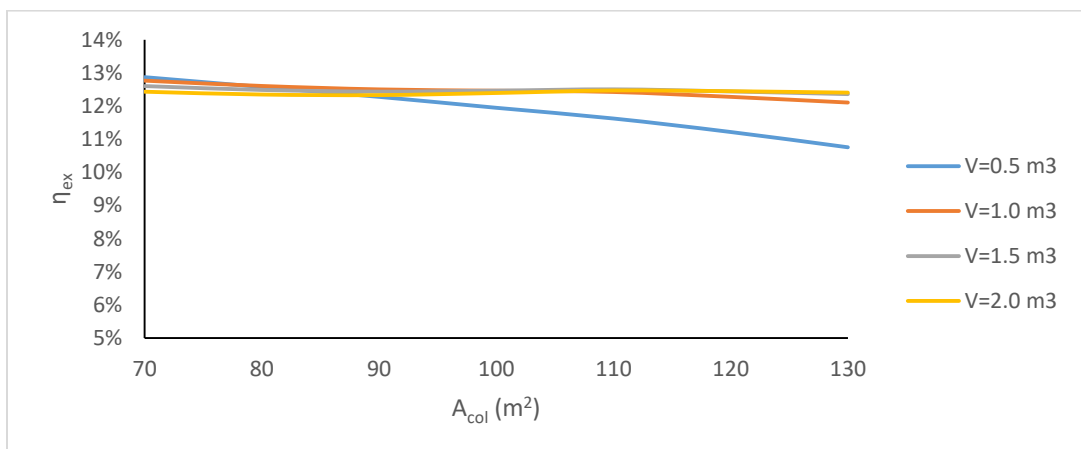
Διάγραμμα 5-34: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια ΣυναρτήσεΙ Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



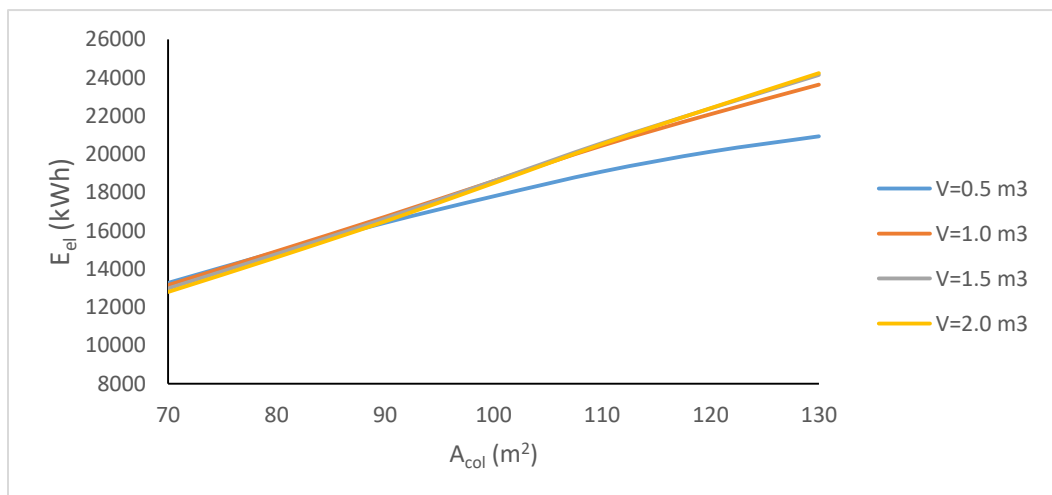
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-35: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσεως Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



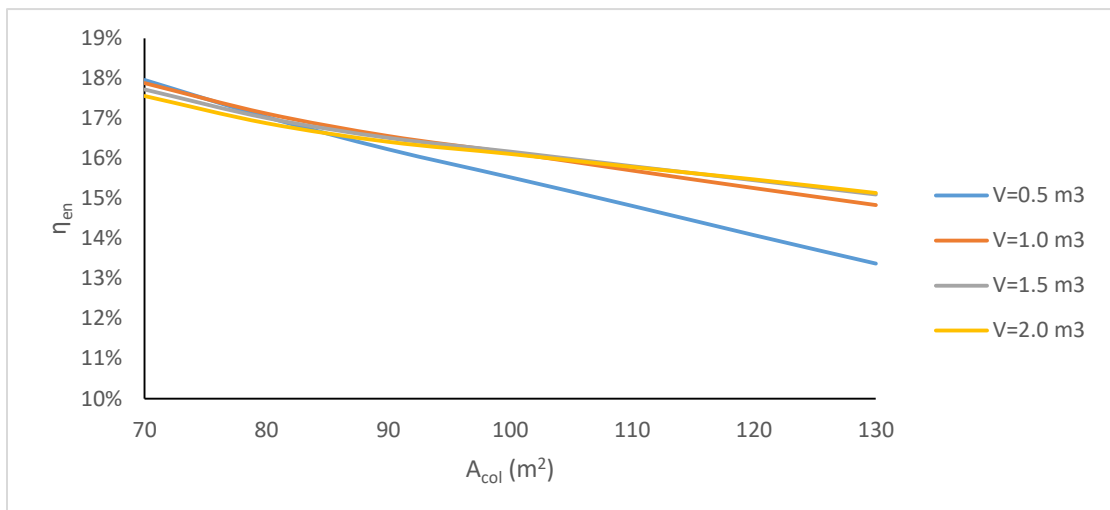
Διάγραμμα 5-36: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσεως Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



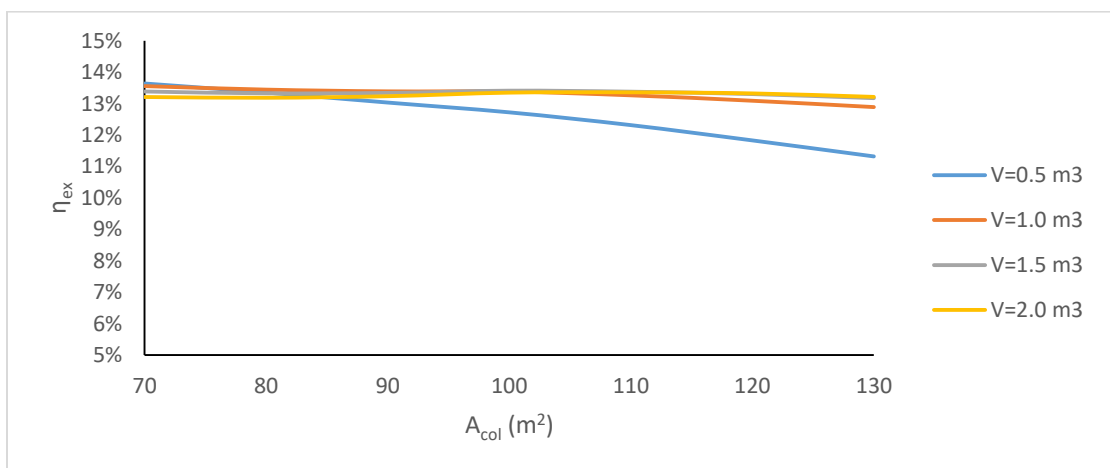
Διάγραμμα 5-37: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσεως Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



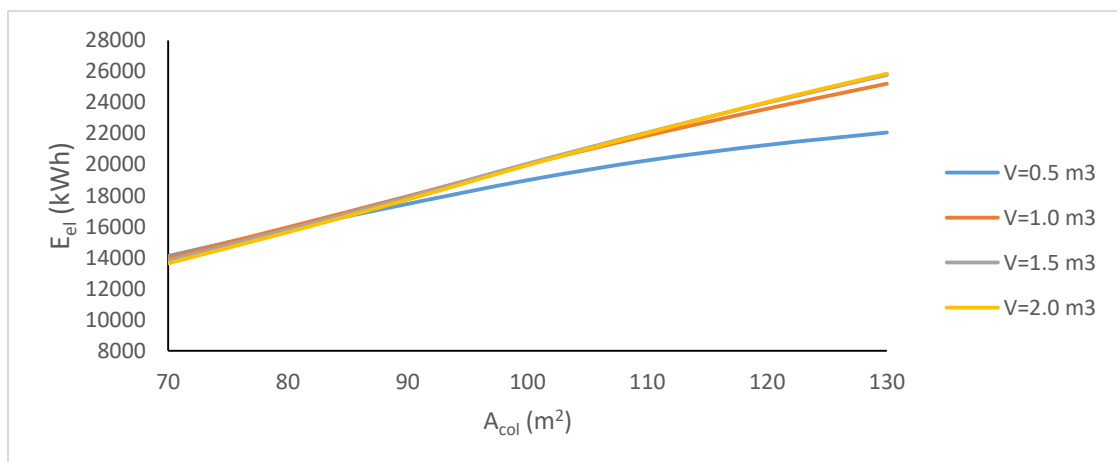
Θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 5-38: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



Διάγραμμα 5-39: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας



Διάγραμμα 5-40: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσει Της Συλλεκτικής Επιφάνειας

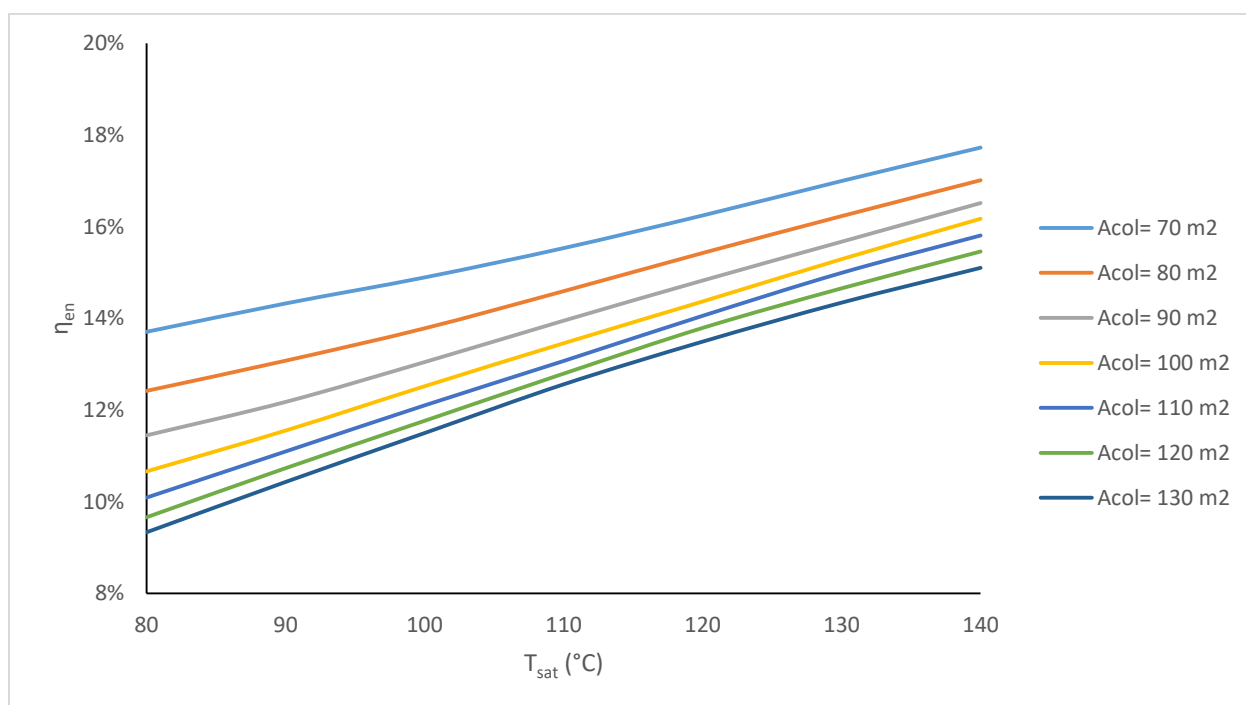


Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλώνει η συλλεκτική επιφάνεια τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσα στο έτος. Οι ετήσιες ανάγκες για θέρμανση καλύπτονται σε κάθε περίπτωση (6690 kWh) για τον λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται σε συγκριτικά διαγράμματα. Ενώ η ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης μειώνεται το οποίο σημαίνει ότι με μεγάλη συλλεκτική επιφάνεια παράγεται ενέργεια λιγότερο αποδοτικά. Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης παραμένει περίπου σταθερός ανεξαρτήτως της συλλεκτικής επιφάνειας.

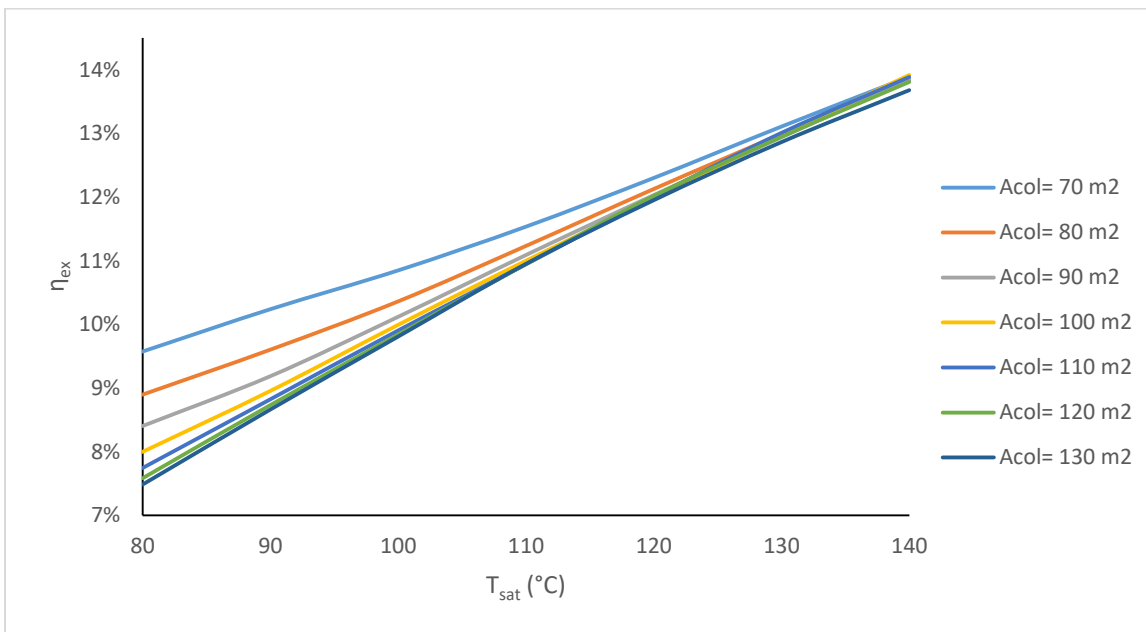
Όσον αφορά τον όγκο της αποθηκευτικής δεξαμενής βλέπουμε πως η τιμή 0.5 m^3 είναι αρκετά μικρή και παρουσιάζει απώλειες όσο μεγαλώνει η συλλεκτική επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό ως βέλτιστη τιμή δεχόμαστε την μέση τιμή από τις άλλες τρεις οι οποίες παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση. Άρα ο βέλτιστος όγκος της αποθηκευτικής δεξαμενής είναι $V=1.5 \text{ m}^3$.

Για τον όγκο αυτό παρουσιάζονται οι μεταβολές τους ενεργειακού και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης καθώς επίσης και της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού.



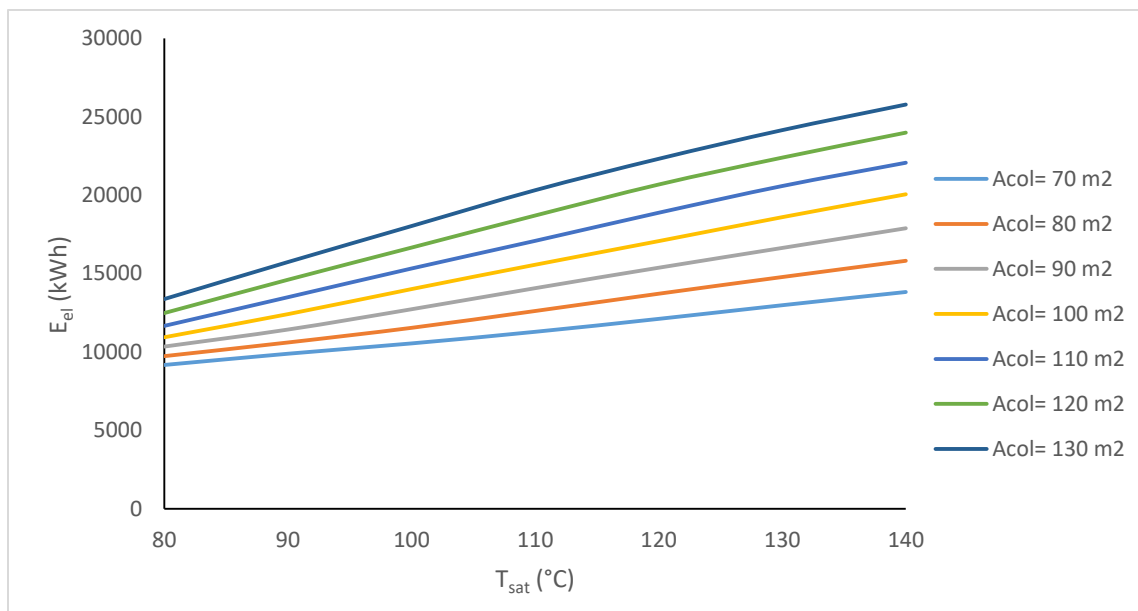
Διάγραμμα 5-41: Ενεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορες Συλλεκτικές Επιφάνειες

Εύκολα συμπεραίνουμε πως με την αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού ακολουθεί αύξηση του ενεργειακού βαθμού απόδοσης. Αντίθετα με αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας μειώνεται ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης. Επομένως στο μεταβαλλόμενο φορτίο επιθυμούμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη θερμοκρασία κορεσμού και μικρότερη συλλεκτική επιφάνεια. Στο εύρος τιμών που μελετήθηκαν δεν παρουσιάζεται αιχμή ώστε να προκύψει η βέλτιστη τιμή.



Διάγραμμα 5-42: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης Συναρτήσσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορες Συλλεκτικές Επιφάνειες

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει αντίστοιχη πορεία με τον ενεργειακό με την διαφορά ότι οι τιμές για μεγάλες θερμοκρασίες κορεσμού συγκλίνουν οδηγώντας σε παρόμοια αποτελέσματα για όλες τις συλλεκτικές επιφάνειες.



Διάγραμμα 5-43: Ετήσια Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια Συναρτήσσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορες Συλλεκτικές Επιφάνειες

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσα στο έτος αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού καθώς επίσης και με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας, σε αντίθεση με την μείωση που παρουσίαζαν οι βαθμοί απόδοσης.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

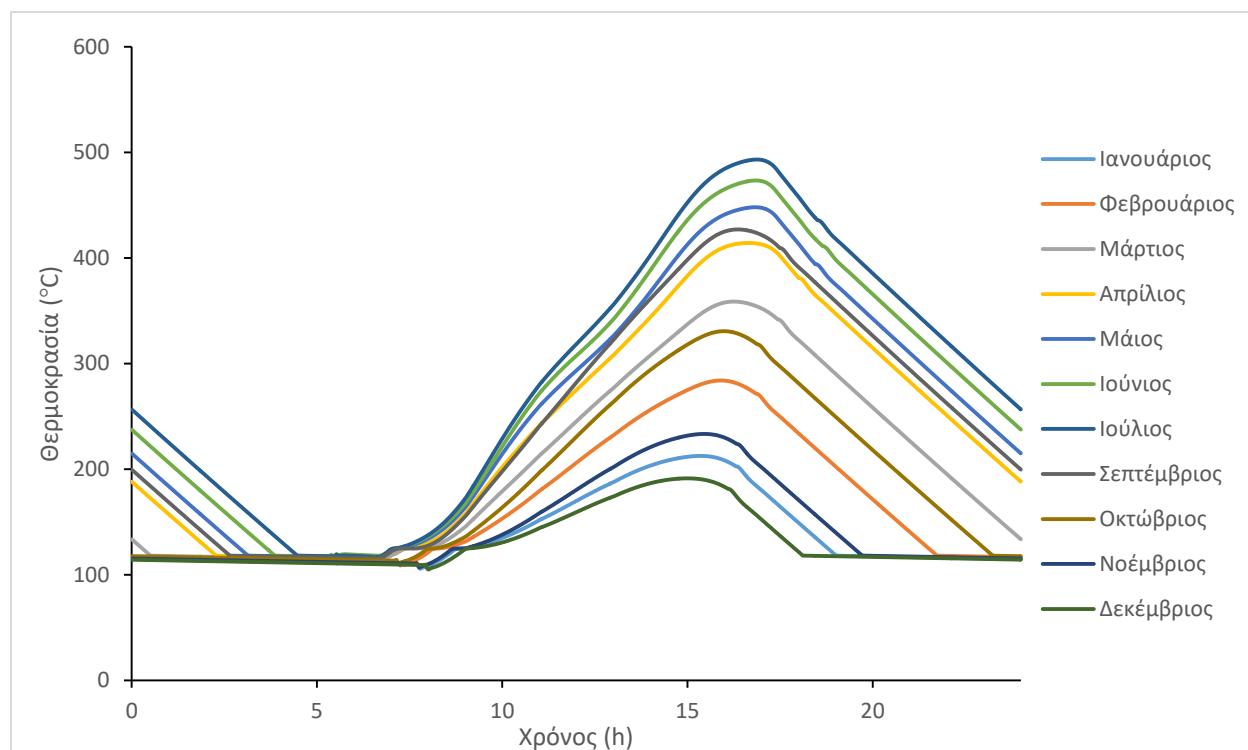
Αξιολογώντας τα παραπάνω αποτελέσματα από το πρόγραμμα, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που μελετάμε είναι:

$$V = 1.5 \text{ m}^3$$

$A_{\text{col}} = 100 \text{ m}^2$, καθώς είναι η βέλτιστη τιμή ώστε να λειτουργεί η εγκατάσταση και αποδοτικά αλλά και να παράγει ικανοποιητικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας

$T_{\text{sat}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία κορεσμού επιθυμούμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γίνεται. Πρακτικά δεν ισχύει αυτό καθώς υπάρχουν λειτουργικοί περιορισμοί όπως η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να λάβει το εργαζόμενο μέσο, ή η μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν να λειτουργήσουν οι συλλέκτες. Επίσης Επομένως επιλέγεται η θερμοκρασία των 110°C ως μια ικανοποιητική και λειτουργική λύση.

Για τις τιμές αυτές λοιπόν παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας της αποθηκευτικής δεξαμενής για κάθε μήνα.



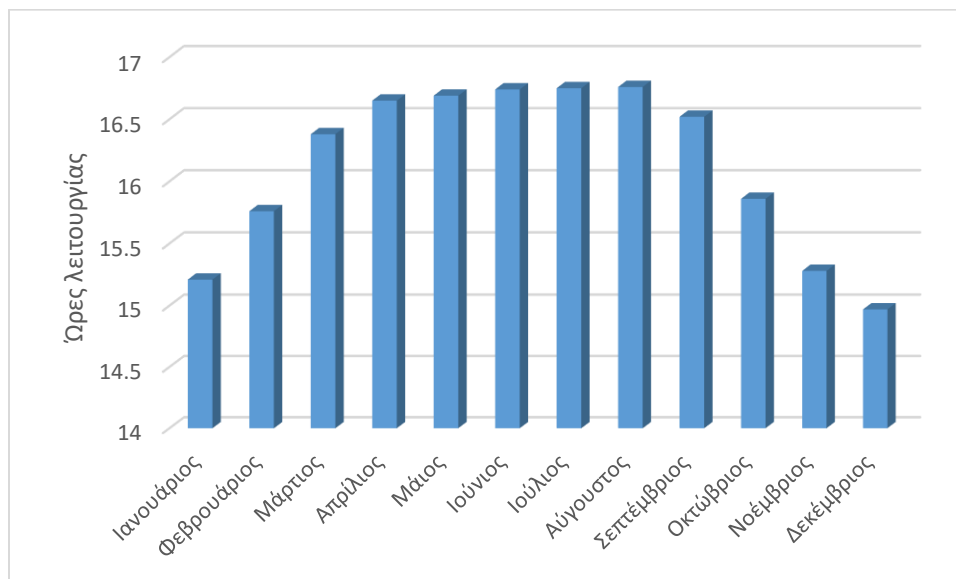
Διάγραμμα 5-44: Μεταβολή Μέσης Θερμοκρασίας Αποθηκευτικής Δεξαμενής Κατά Την Διάρκεια Της Ημέρας Για Κάθε Μήνα

Βλέπουμε πως η μέγιστη καμπύλη είναι για τον μήνα Ιούλιο με την μέγιστη θερμοκρασία να αγγίζει τους 500°C . Από την άλλη ο πιο ψυχρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος ο οποίος δεν ξεπερνάει τους 200°C . Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε πως στους 125°C υπάρχει μία μικρή ανομοιομορφία στην άνοδο των θερμοκρασιών. Αυτό συμβαίνει διότι έχει ορισθεί όταν το ρευστό φτάσει στην θερμοκρασία αυτή να ξεκινάει η λειτουργία του οργανικού κύκλου Rankine. Επομένως ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μόνο τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες οι καμπύλες του παραπάνω διαγράμματος βρίσκονται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τους 125°C .



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

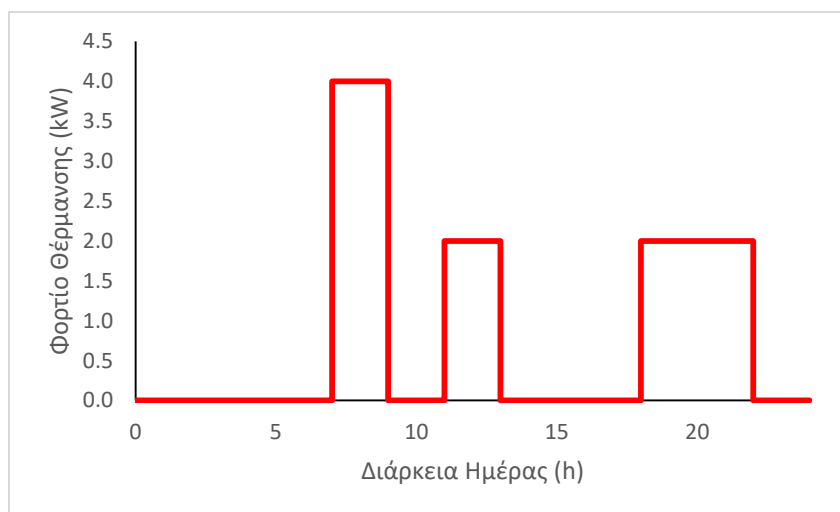
Στο πρόγραμμα ο κύκλος Rankine ρυθμίστηκε να παράγει σταθερά 4 kW ηλεκτρικής ισχύος κατά την λειτουργία του, μεταβάλλοντας τις ώρες λειτουργίας ανάλογα με την δυνατότητα της δεξαμενής αποθήκευσης να παρέχει αρκετά θερμό εργαζόμενο μέσο. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ώρες λειτουργίας του ORC κατά την μέση ημέρα κάθε μήνα για συνθήκες λειτουργίας $V = 1.5 \text{ m}^3$, $A_{col} = 100 \text{ m}^2$ και $T_{sat} = 110^\circ\text{C}$.



Διάγραμμα 5-45: Ώρες λειτουργίας του ORC κατά την μέση ημέρα κάθε μήνα

Βλέπουμε ότι οι μέγιστες ώρες λειτουργίας επιτυγχάνονται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο με 16 ώρες και 45 λεπτά λειτουργίας του κύκλου. Οι ώρες λειτουργίας μπορεί να μεταβληθούν τόσο με την αλλαγή της συλλεκτικής επιφάνειας όσο και με την μεταβολή της θερμοκρασίας κορεσμού.

Το επόμενο διάγραμμα απεικονίζει την ενέργεια που απαιτεί ο εναλλάκτης θερμότητας για την ζήτηση του ζεστού νερού χρήσης. Η ζήτηση αυτή λαμβάνεται σταθερή για κάθε μέρα κάθε μήνα.



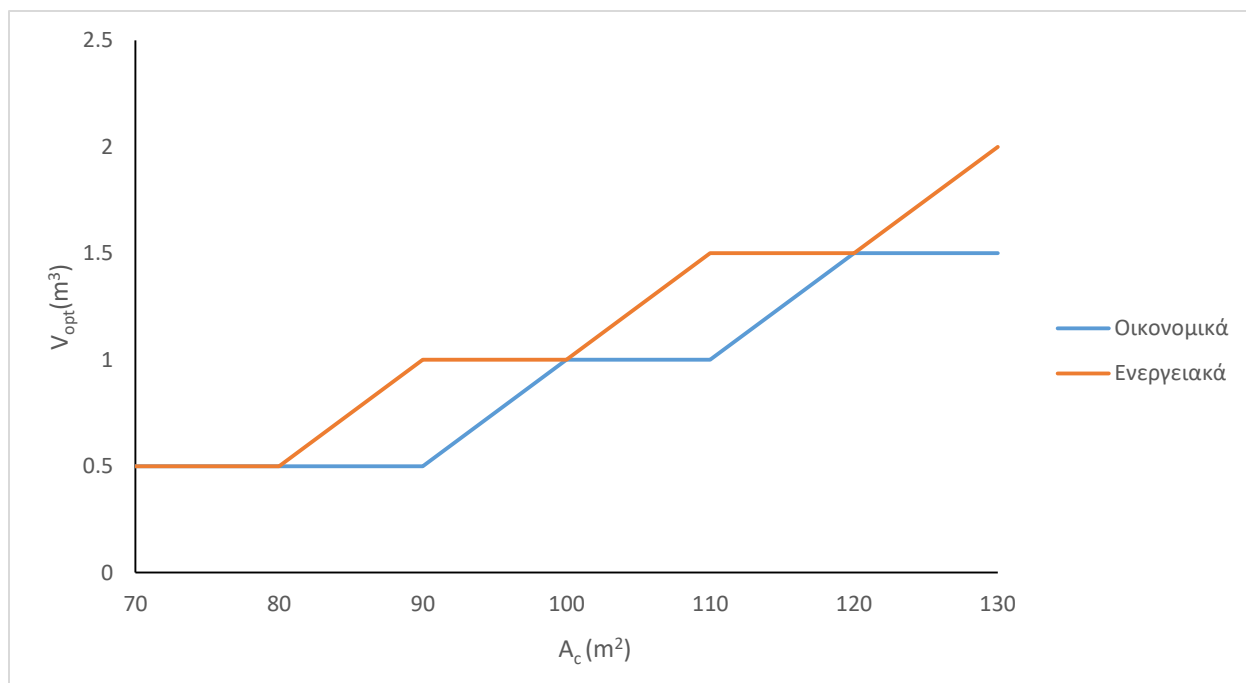
Διάγραμμα 5-46: Θερμικό φορτίο εναλλάκτη κατά την διάρκεια της ημέρας



5.3. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της υπολογιστικής διαδικασίας αφορά στην οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης με βάση διάφορους δείκτες όπως για παράδειγμα ο δείκτης καθαρής παρούσης αξίας (Net Present Value), ο δείκτης Internal Rate of Return (IRR) καθώς και η περίοδος αποπληρωμής (SPP –PP). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της ενεργειακής αξιολόγησης με την οικονομική καθώς τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων δεν ταυτίζονται, κάτι που καθιστά την συνολική αξιολόγηση της εγκατάστασης μία περίπλοκη πολυπαραμετρική διαδικασία.

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τις βέλτιστες τιμές του όγκου της αποθηκευτικής δεξαμενής, για διάφορες τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας, τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά.



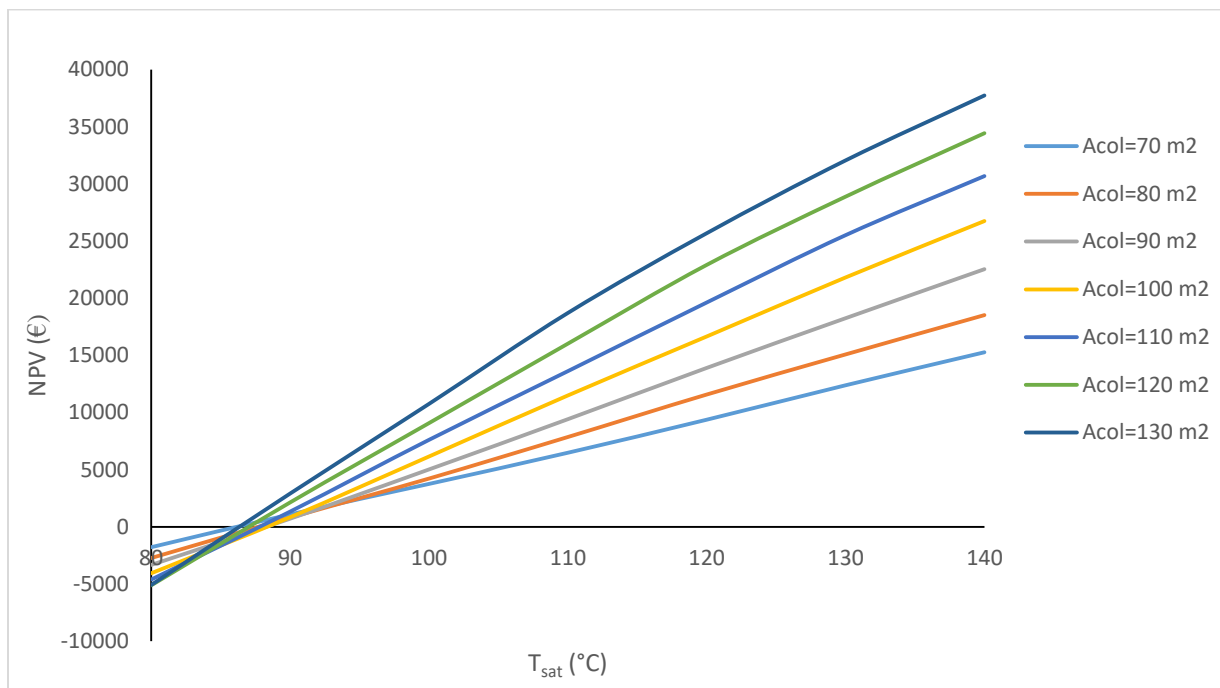
Διάγραμμα 5-47: Βέλτιστος Όγκος Ενεργειακά Και Οικονομικά Για Διάφορες Τιμές Συλλεκτικής Επιφάνειας

Παρατηρούμε πως ο βέλτιστος όγκος ενεργειακά είναι συνεχώς λίγο πάνω από τον βέλτιστο οικονομικά. Το συγκεκριμένο διάγραμμα έγινε μελετώντας 4 διαφορετικές τιμές του όγκου και οι αποκλίσεις είναι ενδεικτικές. Όμως είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς ότι για μελέτη περισσότερων διαφορετικών όγκων οι δύο καμπύλες θα είχαν σταθερή απόκλιση με την ενεργειακή να βρίσκεται λίγο πάνω από την οικονομική.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

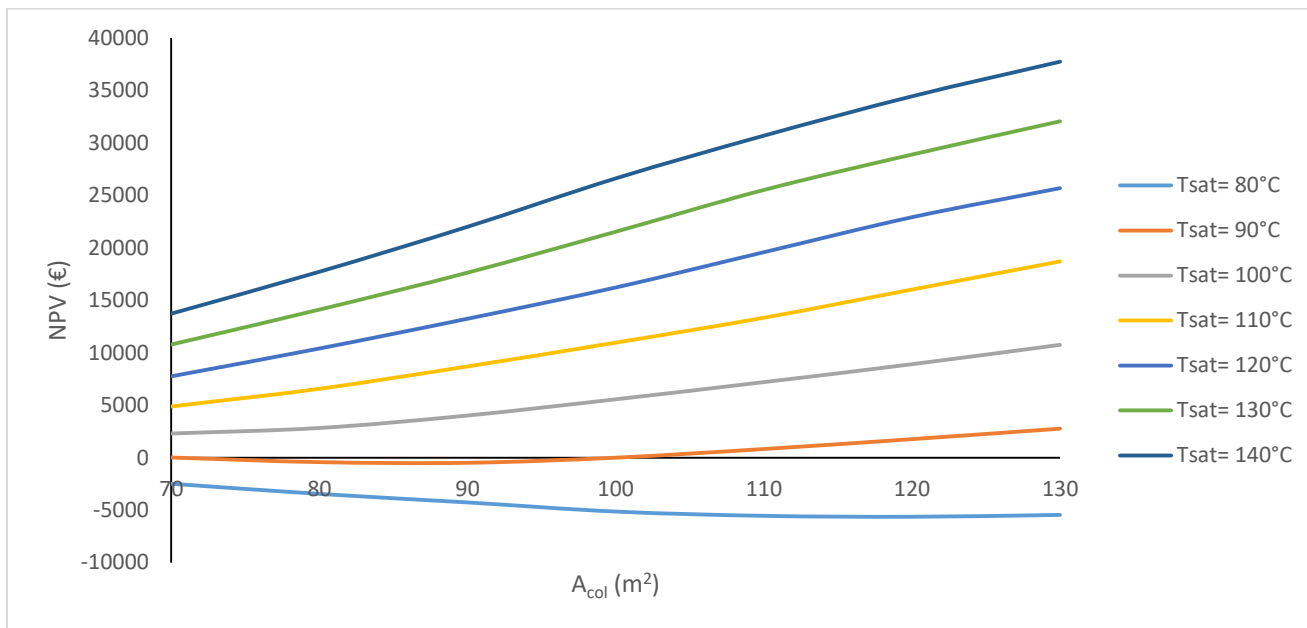
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο δείκτης καθαρής παρούσης αξίας συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες. Το διάγραμμα αυτό έγινε λαμβάνοντας υπόψιν ποιός είναι ο βέλτιστος όγκος οικονομικά για κάθε διαφορετική τιμή της συλλεκτικής επιφάνειας. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται στην συνέχεια.



Διάγραμμα 5-48: Μεταβολή Καθαρής Παρούσης Αξίας Συναρτήσει Της Θερμοκρασίας Κορεσμού Για Διάφορες Τιμές Της Συλλεκτικής Επιφάνειας

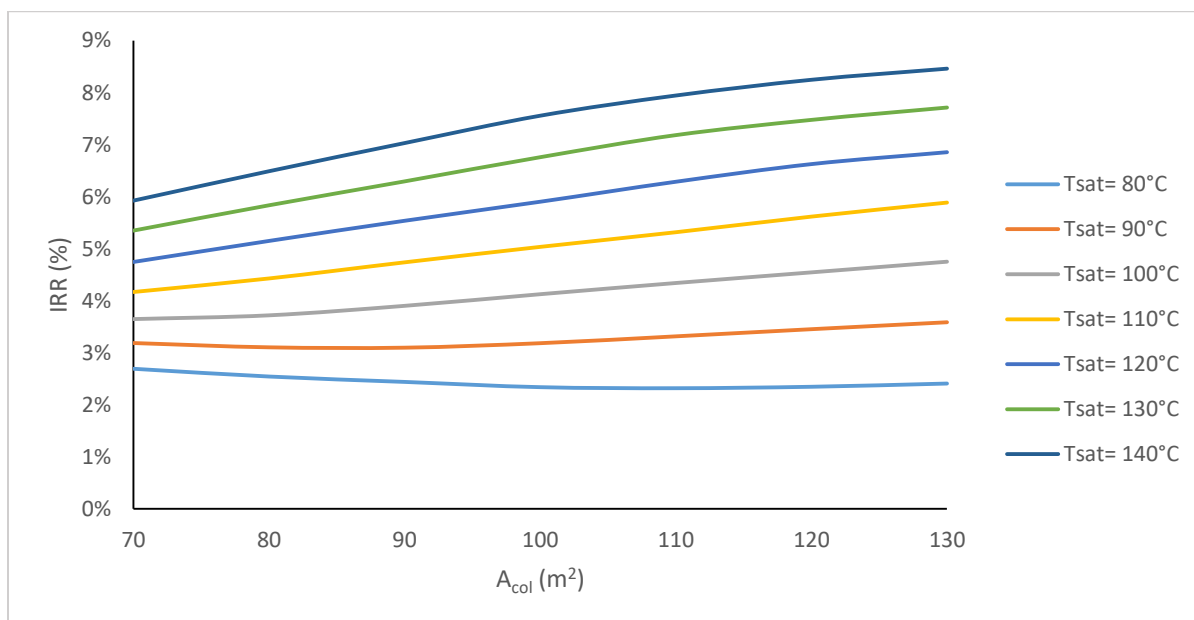
Βλέπουμε πως όσο αυξάνονται οι τιμές τόσο της συλλεκτικής επιφάνειας όσο και της θερμοκρασίας κορεσμού, τόσο αυξάνεται η καθαρή παρούσα αξία της εγκατάστασης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως οικονομικά πιο ωφέλιμες είναι “μεγάλες” εγκαταστάσεις. Ακόμα για εγκαταστάσεις που λειτουργούν σε θερμοκρασίες κορεσμού κάτω των 90°C η εγκατάσταση έχει αρνητική καθαρή παρούσα αξία.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν την μεταβολή όλων των δεικτών που αναφέραμε συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες θερμοκρασίες κορεσμού και για όγκο $V = 1.5 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 5-49: Μεταβολή Καθαρής Παρούσης Αξίας Συναρτήσεσι Της Συλλεκτικής Επιφάνειας Για Διάφορες Τιμές Της Θερμοκρασίας Κορεσμού

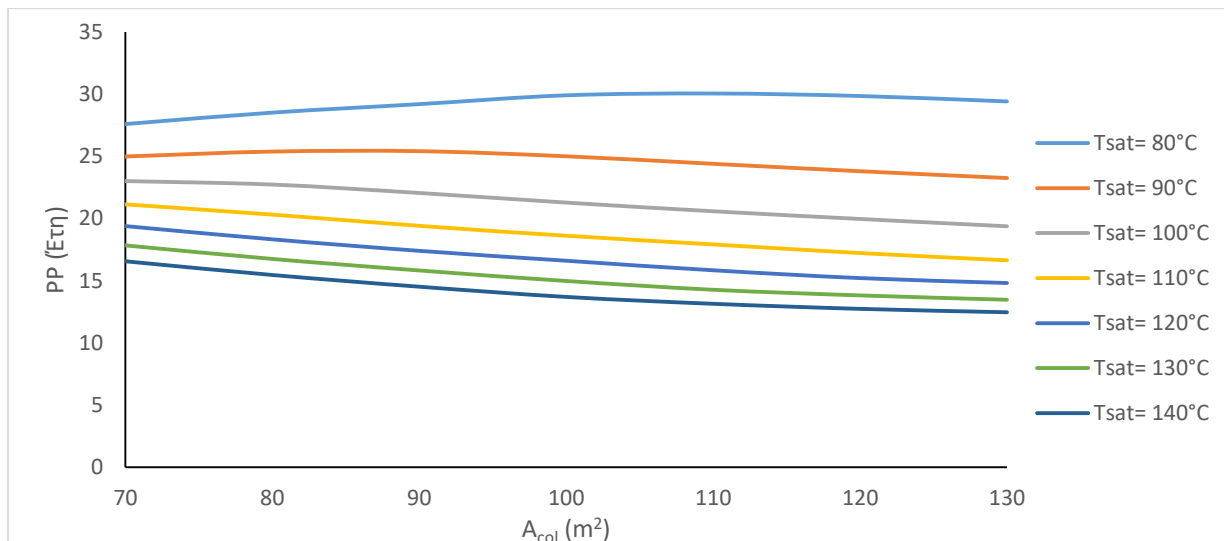
Το διάγραμμα NPV επαληθεύει τις τιμές του προηγούμενου αντίστοιχου διαγράμματος. Στην συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα IRR (Internal Rate of Return). Βλέπουμε και σε αυτό το διάγραμμα ότι η επιθυμητή θερμοκρασία κορεσμού πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Η συλλεκτική επιφάνεια παρουσιάζει ένα οριακό σημείο καμπής στα 100 m². Οι τιμές του εσωτερικού συντελεστή αξιολόγησης κυμαίνονται μεταξύ 25 και 8%.



Διάγραμμα 5-50: Μεταβολή IRR Συναρτήσεσι Της Συλλεκτικής Επιφάνειας Για Διάφορες Τιμές Της Θερμοκρασίας Κορεσμού

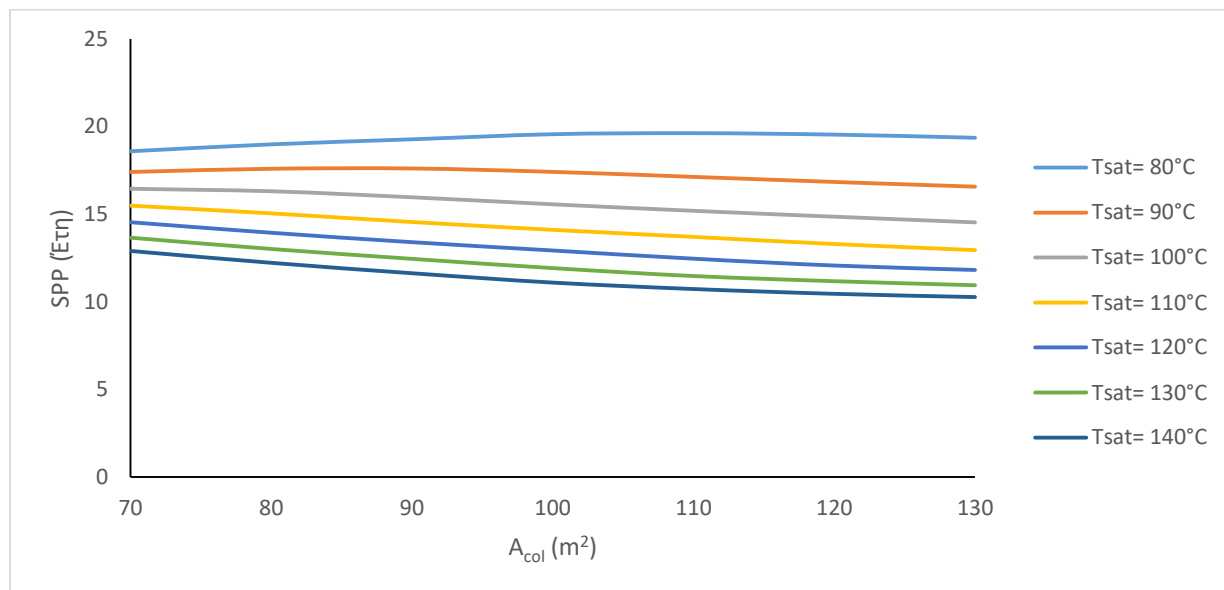


Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεταβολή της περιόδου αποπληρωμής και της απλοποιημένης περιόδου αποπληρωμής.



Διάγραμμα 5-51: Μεταβολή της Περιόδου Αποπληρωμής συναρτήσει της Συλλεκτικής Επιφάνειας

Η περίοδος αποπληρωμής παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της θερμοκρασίας κορεσμού ενώ συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας παραμένει περίπου σταθερή σχηματίζοντας ένα μικρό γόνατο για επιφάνεια 100 m². Η περίοδος αποπληρωμής κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30 ετών ανάλογα με τις τιμές που επιλέγουμε.



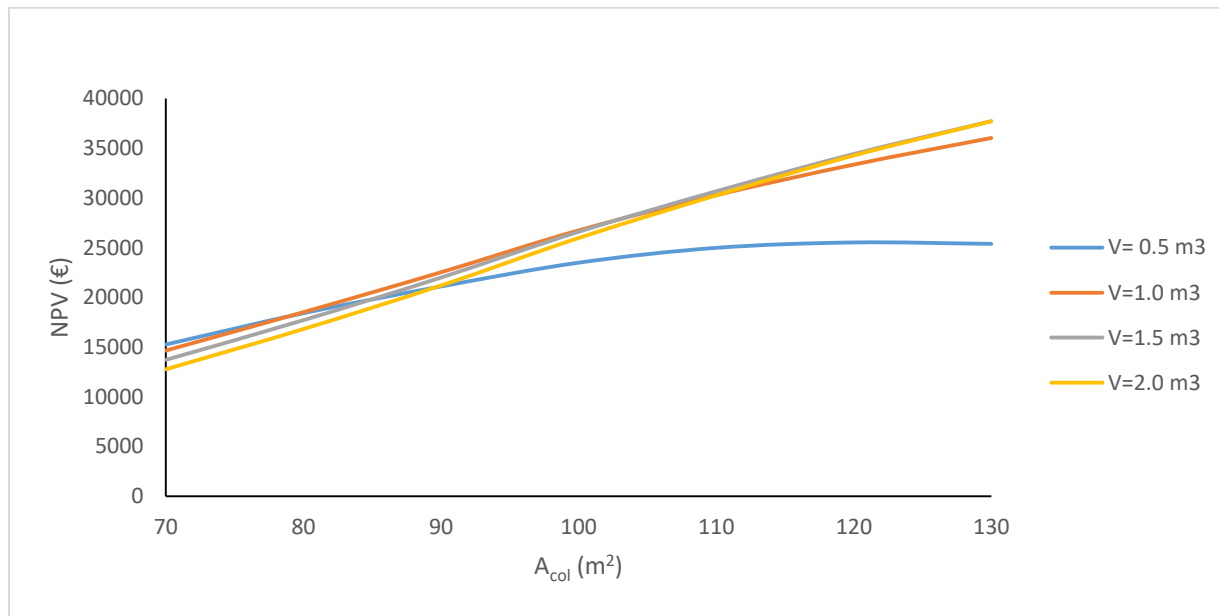
Διάγραμμα 5-52: Μεταβολή της Απλοποιημένης Περιόδου Αποπληρωμής συναρτήσει της Συλλεκτικής Επιφάνειας

Το ίδιο ισχύει και για την απλοποιημένη περίοδο αποπληρωμής η οποία μη λαμβάνοντας υπόψιν την αναγωγή των εσόδων στην παρούσα αξία κυμαίνεται σε μικρότερες τιμές από την περίοδο αποπληρωμής. Η απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 ετών.



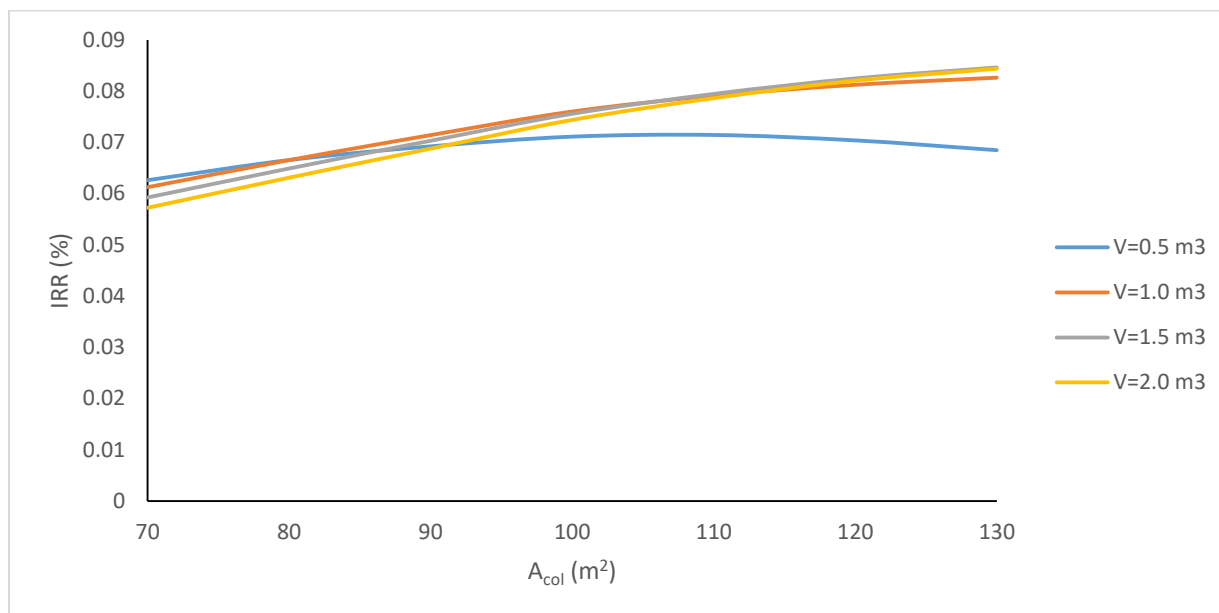
Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι ίδιοι δείκτες για την μέγιστη θερμοκρασία κορεσμού που μελετήθηκε (140°C).



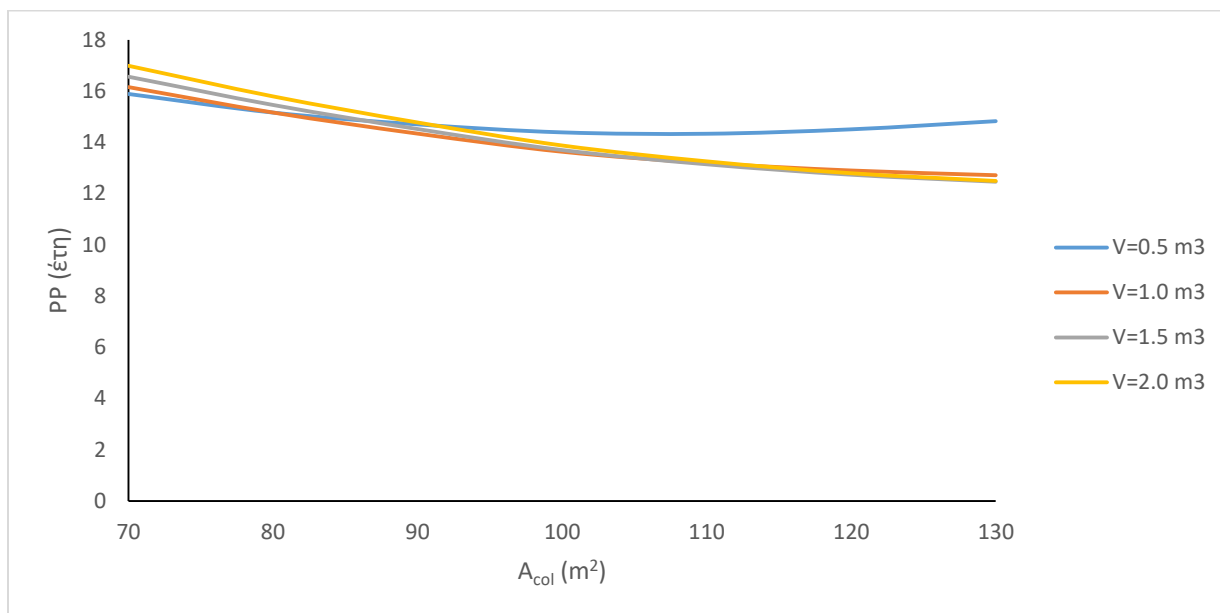
Διάγραμμα 5-53: Μεταβολή NPV συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες τιμές του όγκου

Ο δείκτης καθαρής παρούσης αξίας δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση για όγκο αποθηκευτικής δεξαμενής μεγαλύτερο από 1 m³. Η τιμή όγκου 0.5 m³ προκύπτει για ακόμα μία φορά πολύ μικρή μειώνοντας την οικονομική αποδοτικότητα της εγκατάστασης.



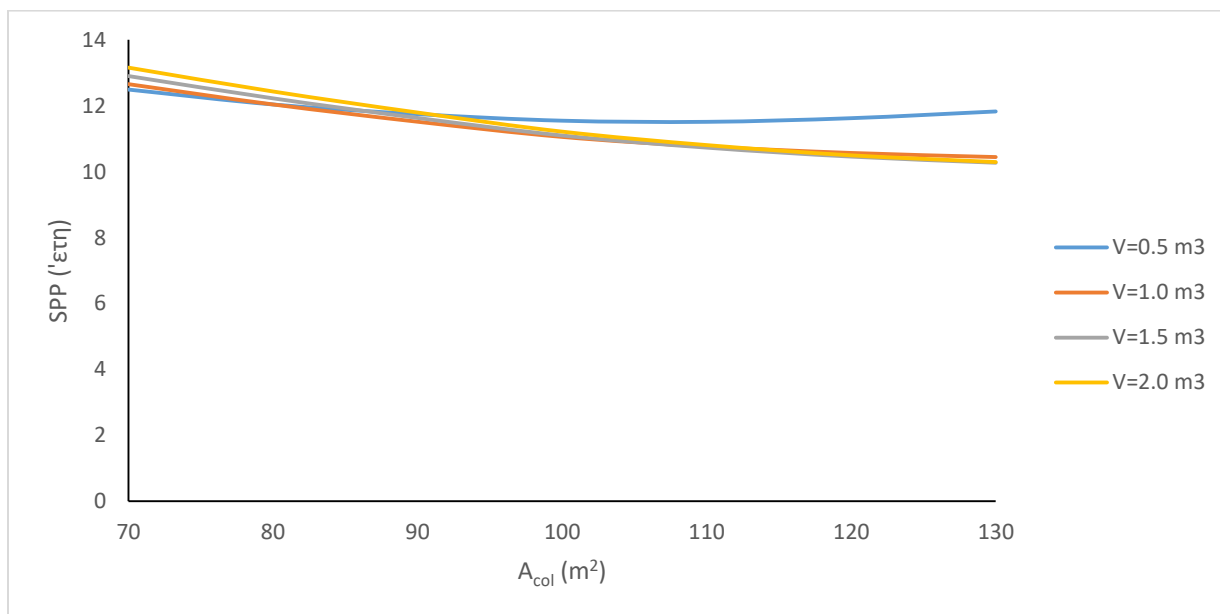
Διάγραμμα 5-54: Μεταβολή IRR συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες τιμές του όγκου

Κάτι αντίστοιχο ισχύει και για τον εσωτερικό συντελεστή αξιολόγησης ο οποίος κυμαίνεται από 5.5% έως και 8% ανάλογα με την συλλεκτική επιφάνεια.



Διάγραμμα 5-55: Μεταβολή περιόδου αποπληρωμής συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες τιμές του όγκου

Η περίοδος αποπληρωμής μειώνεται με μικρό ρυθμό συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας και παρουσιάζει ελάχιστο για πολύ μικρό όγκο αποθηκευτικής δεξαμενής. Και η απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής έχει την ίδια κατανομή, όμως όπως αναφέρθηκε και πριν με μικρότερη διάρκεια αποπληρωμής.



Διάγραμμα 5-56: Μεταβολή απλοποιημένης περιόδου αποπληρωμής συναρτήσει της συλλεκτικής επιφάνειας για διάφορες τιμές του όγκου



6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη καθώς επίσης και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε ίδια ή παραπλήσιες εφαρμογές. Όπως έχει γίνει ήδη κατανοητό, η εργασία αυτή περιλαμβάνει μια αναλυτική προσομοίωση ενός συστήματος συμπαραγωγής, το οποίο κάνοντας χρήση συλλεκτών κενού παράγει ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Το σύστημα αυτό αφορά στην προμήθεια ενέργειας σε μία κατοικία επομένως τα μεγέθη που μελετώνται αφορούν σε απαιτήσεις οικιακής κλίμακας.

Αρχικά εύκολα συμπεραίνουμε ότι η παραγωγή ενέργειας είναι ένα πρόβλημα που απασχολεί ολοένα και περισσότερους ανθρώπους, που αναζητούν βιώσιμες λύσεις για την ικανοποίηση των αναγκών τους. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε ραγδαία άνοδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες με πρωτοπόρους τα αιολικά και τα ηλιακά συστήματα. Η Ελλάδα έχει ιδιαίτερες εκμεταλλεύσιμες κλιματολογικές συνθήκες, διαθέτοντας έτσι κατάλληλες βάσεις για ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Επίσης από τους διάφορους τύπους συλλεκτών που υπάρχουν οι συλλέκτες κενού θεωρούνται από τους πιο αποδοτικούς καθώς εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ακτινοβολία και “βλέπουν” πάντα κάθετα τις ακτίνες του ήλιου. Ειδικά για τις συνθήκες της Αθήνας όπου υπάρχει νέφωση κατά την διάρκεια του έτους οι συλλέκτες κενού αποκτούν μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλους τύπους ηλιακών συλλεκτών που εκμεταλλεύονται μόνο την άμεση ακτινοβολία (π.χ. LFR, ηλιακός πύργος ισχύος). Επιπλέον όσον αφορά στον οργανικό κύκλο Rankine είναι, δικαίως, ο επικρατέστερος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με ποσοστό χρήσης πάνω από 85% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής, λόγω της δυνατότητας λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες (80-350°C). Ειδικά για ηλιακές εφαρμογές όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης πολύ μεγάλων θερμοκρασιών ένας τέτοιος κύκλος είναι ιδανικός. Μεγάλη ποικιλία υπάρχει και στα εργαζόμενα μέσα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το κάθε ένα. Είναι πολύ σημαντικό κατά την επιλογή του εκάστοτε εργαζόμενου μέσου να δίνεται βάση σε περιορισμούς στις θερμοκρασίες λειτουργίας όπως επίσης και στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τον οποίο έχουν.

Εν συνεχεία μέσω της προσομοίωσης προέκυψαν ορισμένα αριθμητικά συμπεράσματα για την εγκατάσταση:

- ❖ Το βέλτιστο μέσο για τη λειτουργία του οργανικού κύκλου Rankine είναι το κυκλοεξάνιο (cyclohexane) διότι οδηγεί σε μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης τόσο ενεργειακά όσο και εξεργειακά και έχουμε την μεγαλύτερη ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά την διάρκεια του έτους.
- ❖ Επίσης παρατηρούμε ότι ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση του θερμικού φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι οι συλλέκτες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική και εν συνεχεία είναι πολύ πιο αποδοτική η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ζεστό νερό χρήσης (ουσιαστικά πάλι θερμική) από ότι σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας. Ο τελικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης που προέκυψε για την εγκατάσταση είναι $\eta_{en}=13.38\%$.
- ❖ Το αντίθετο συμβαίνει με τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης ο οποίος ελαττώνεται με την αύξηση του θερμικού φορτίου. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι ο υπολογισμός του εξεργειακού βαθμού απόδοσης γίνεται μέσω μίας πιο σύνθετης εξίσωσης η οποία δεν θεωρεί ισότιμη την συνεισφορά της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας στο σύστημα. Ο τελικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε $\eta_{ex}=10.50\%$.



Ε.Μ.Π Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Διπλωματική Εργασία – Πλιάκος Ορέστης

- ❖ Επιπλέον μεγάλη σημασία έχει η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια του έτους. Είναι άμεσα συνδεδεμένη με την συλλεκτική επιφάνεια όπως είναι αναμενόμενο αλλά απαιτεί αναλυτική μελέτη καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η συλλεκτική επιφάνεια τόσο λιγότερο αποδοτικά παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Τελικώς το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η εγκατάσταση κατά την διάρκεια του έτους είναι **$E_{el}=15.44 \text{ MWh}$** .
- ❖ Όλα τα παραπάνω μεγέθη προέκυψαν για όγκο αποθηκευτικής δεξαμενής **$V= 1.5\text{m}^3$** ο οποίος προέκυψε ως ο οικονομοτεχνικά βέλτιστος. Ακόμα η συλλεκτική επιφάνεια επιλέχθηκε να είναι **$A_{col}= 100 \text{ m}^2$** μέσω της ίδιας οικονομοτεχνικής μελέτης. Τέλος η θερμοκρασία κορεσμού αποτέλεσε ένα ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς στα θερμοκρασιακά πλαίσια που μελετήθηκαν (80°C - 140°C) δεν παρουσιάσθηκε βέλτιστη τιμή. Η επιλογή της έγινε με βάση περιοριστικούς παράγοντες των θερμικών ελαίων και των εργαζόμενων ρευστών και λήφθηκε ίση με **$T_{sat}=110^\circ\text{C}$** .
- ❖ Μία τέτοια μελέτη η οποία προσεγγίζει με ρεαλιστικά και όχι θεωρητικά δεδομένα το πρόβλημα της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών μίας κατοικίας, απαιτεί αναμφισβήτητα και την οικονομική αξιολόγηση μίας τέτοιας εγκατάστασης. Αρχικά η καθαρή παρούσα αξία της εγκατάστασης είναι **$NPV= 10.962\text{€}$** .
- ❖ Επίσης υπολογίσθηκε ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης της επένδυσης και βρέθηκε ίσος με **$IRR=5.03\%$** , για τιμή του επιτοκίου αναγωγής $i=3\%$ και διάρκεια ζωής $N=25$ έτη.
- ❖ Σημαντική είναι επίσης και η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης. Η απλοποιημένη περίοδος αποπληρωμής είναι **$SPP=14.1$ έτη**, ενώ με τον αναλυτικότερο υπολογισμό της κανονικής περιόδου αποπληρωμής αυτή προκύπτει **$PP=16.6$ έτη**. Η περίοδος αποπληρωμής είναι ένας πολύ σημαντικός δείκτης για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις καθώς πιθανός επενδυτής μπορεί να είναι ο ιδιοκτήτης της κατοικίας και όχι κάποια μεγάλη εταιρεία, και να επιζητάει την γρηγορότερη δυνατή αποπληρωμή. Όπως βλέπουμε λοιπόν μία τέτοια επένδυση έχει σχετικά μεγάλη περίοδο αποπληρωμής και η καθαρή παρούσα αξία είναι χαμηλή σε σχέση με το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο που απαιτείται

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- ❖ Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της λειτουργίας εγκαταστάσεων με πιο σύνθετα εργαζόμενα μέσα όπως για παράδειγμα νανουλικά ή ζεοτροπικά μίγματα.
- ❖ Επίσης μπορεί να μελετηθεί αντίστοιχη εγκατάσταση για μεγαλύτερης κλίμακας κτίριο (π.χ. πολυώροφη πολυκατοικία) της οποίας οι ενεργειακές ανάγκες είναι μεγαλύτερες και μπορούν να βελτιστοποιηθούν τα μεγέθη με βάση τις οικονομίες κλίμακας. Επίσης για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις μπορούν να μελετηθούν και εναλλακτικοί τύποι συλλεκτών οι οποίοι είναι μεν ακριβότεροι αλλά μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες για καλύτερη απόδοση.
- ❖ Επιπρόσθετα η τρι-παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης καθιστά ακόμα πιο αποδοτική μία τέτοια εγκατάσταση και θα είχε νόημα να ερευνηθεί αναλυτικότερα.