



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική εργασία

**«Μελέτη καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης
θερμότητας για ηλιακά οδηγούμενο οργανικό κύκλο
Rankine»**

Σαρακατσάνης Ιωάννης-Αθανάσιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Thermal Engineering Sector

Diploma Thesis

**«Investigation of novel thermal storage systems for a
solar driven organic Rankine cycle»**

Sarakatsanis Ioannis- Athanasios

Supervisor: Prof. Christos Tzivanidis

Athens, February 2021

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το πολύ ενδιαφέρον παρόν θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου γύρω από αυτόν τον τομέα.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Ευάγγελο Μπέλλο ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να παρέχει συμβουλές καταλυτικές για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς την οικογένεια μου για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου παρέχουν όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για το δημιουργικό, ευχάριστο περιβάλλον που συνδιαμορφώσαμε και πορευτήκαμε μαζί.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	3
Επεξήγηση συμβόλων	5
1 Γενικά ενεργειακά	9
1.1 Ιστορική αναδρομή	9
1.2 Σημερινή ενεργειακή κατάσταση.....	9
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
2 Ήλιος και συλλέκτης.....	17
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία	17
2.2 Γενικά περί ηλιακών συλλεκτών	21
2.2.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης	22
2.2.2 Συλλέκτης με σωλήνα κενού	22
2.2.3 Επιμήκης παραβολικός συλλέκτης.....	23
2.2.4 Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης.....	27
2.2.5 Επιμήκης συλλέκτης Fresnel	28
2.2.6 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο.....	29
2.2.7 Ηλιακός πύργος	31
3 Θερμική αποθήκευση	35
3.1 Εισαγωγή αποθήκευσης ενέργειας.....	35
3.2 Ορισμός θερμικής αποθήκευσης.....	35
3.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας.....	36
3.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας.....	37
3.2.3 Θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας.....	37
3.3 Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης.....	38
3.3.1 Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης	39
3.3.2 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης.....	41
3.4 Διφασικά υλικά	42
3.4.1 Ιδιότητες διφασικών υλικών	42
3.4.2 Κατηγοριοποίηση διφασικών υλικών	43
3.4.3 Δυσκολίες χρήσης διφασικών υλικών και τρόποι αντιμετώπισης	44
4 Λειτουργία οργανικού κύκλου Rankine	47
4.1 Ορισμός οργανικού κύκλου Rankine.....	47
4.2 Ιστορικά στοιχεία οργανικού κύκλου Rankine.....	47
4.3 Αρχή λειτουργίας οργανικού κύκλου Rankine.....	47
4.4 Εργαζόμενα μέσα στον ORC.....	49

4.4.1	Θερμοδυναμικές παράμετροι εργαζόμενου μέσου	49
4.4.2	Περιβαλλοντικές παράμετροι εργαζόμενου μέσου.....	49
4.4.3	Οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα.....	50
4.5	Εφαρμογές του οργανικού κύκλου Rankine	50
4.5.1	Γεωθερμική πηγή ενέργειας	52
4.5.2	Βιομάζα.....	53
4.5.3	Ανάκτηση θερμότητας.....	54
4.5.4	Ηλιακά	55
5	Μεθοδολογία	57
5.1	Εισαγωγή.....	57
5.2	Μοντελοποίηση συστήματος ORC.....	57
5.3	Μοντελοποίηση συλλέκτη	60
5.4	Μοντελοποίηση λέβητα ανάκτησης θερμότητας.....	64
5.5	Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης.....	65
5.5.1	Με αισθητό τρόπο αποθήκευσης και μόνο θερμικό έλαιο	65
5.5.2	Με αισθητό τρόπο αποθήκευσης με προσθήκη στερεών υλικών.....	67
5.5.3	Με χρήση διφασικών υλικών.....	68
5.6	Σύνδεση όλων των στοιχείων εγκατάστασης	69
5.7	Οικονομική αξιολόγηση	71
6	Αποτελέσματα.....	75
6.1	Διερεύνηση Εργαζόμενου Μέσου στον ORC	75
6.1.1	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων ΔT_{SH} , ΔT_{REC} , T_{con} στον η_{ORC}	78
6.1.2	Εγκυρότητα μοντέλου στο EES.....	81
6.2	Διερεύνηση T_{sat} στο δυναμικό μοντέλο	82
6.3	Δυναμικό μοντέλο με αισθητό τρόπο αποθήκευσης.....	84
6.3.1	Ενεργειακά Αποτελέσματα	84
6.3.2	Οικονομικά Αποτελέσματα	87
6.4	Δυναμικό μοντέλο με χρήση στερεών υλικών στο εσωτερικό	92
6.4.1	Επιλογή στερεού υλικού	92
6.4.2	Σύγκριση αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με χρήση Ceramics.....	94
6.5	Σύγκριση αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με χρήση PCM.....	98
6.6	Σύγκριση των τριών τρόπων αποθήκευσης για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια	101
6.7	Ολικά βέλτιστα μεταξύ των διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης	103
7	Συμπεράσματα	105
7.1	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	105
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	106

Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και σύγκριση τριών διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας για ηλιακά οδηγούμενο οργανικό κύκλο Rankine εγκατεστημένης ισχύος 10 kW. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται παραβολικός συλλέκτης (PTC) ο οποίος δεσμεύει την ηλιακή ενέργεια για την περιοχή της Αθήνας και την μεταφέρει στο θερμικό έλαιο. Στην συνέχεια αυτή η θερμική ενέργεια του ρευστού μεταφέρεται στο σύστημα αποθήκευσης. Τα συστήματα αποθήκευσης που έχουν επιλεχθεί προς αξιολόγηση είναι με αισθητή αποθήκευση θερμότητας χρησιμοποιώντας ένα δοχείο το οποίο γεμίζει με το θερμικό έλαιο (Single Media Thermocline: SMT), με αισθητή αποθήκευση με ένα δοχείο το οποίο όμως περιλαμβάνει εκτός από το θερμικό έλαιο και στερεό υλικό (Dual Media Thermocline: DMT) και με χρήση διφασικών υλικών (Phase Change Material: PCM). Η θερμική ενέργεια στην έξοδο του συστήματος αποθήκευσης μεταφέρεται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας από τον οποίο τροφοδοτείται με ενέργεια ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη της συνολικής εγκατάστασης έγινε για όλο τον χρόνο και αξιολογήθηκε με ενεργειακούς και οικονομικούς δείκτες. Ακολουθούν αναλυτικότερες πληροφορίες για κάθε κεφάλαιο.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσέγγιση της ανθρωπότητας απέναντι στις ενεργειακές ανάγκες της στην πάροδο των χρόνων, μέχρι την ενεργειακή κατάσταση που επικρατεί στον σύγχρονο κόσμο. Δίνεται έμφαση στους λόγους επιτακτικής ανάγκης απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και αξιοποίησης περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά για όλες τις μορφές των ΑΠΕ το ποσοστό συμμετοχής τους στο ενεργειακό κράμα, η αρχή λειτουργίας τους, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται η ηλιακή ακτινοβολία και οι ηλιακοί συλλέκτες. Πιο συγκεκριμένα, για την ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μεγέθη και διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού της. Για τους ηλιακούς συλλέκτες παρουσιάζονται η αρχή λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά και εφαρμογές για τον επίπεδο συλλέκτη, τον συλλέκτη κενού, τον επιμήκη παραβολικό, τον σύνθετο παραβολικό, τον συλλέκτη Fresnel, τον συλλέκτη με παραβολοειδές κάτοπτρο και τον ηλιακό πύργο. Πιο εκτενής αναφορά πραγματοποιείται για τον επιμήκη παραβολικό που είναι αυτός που επιλέγεται για την παρούσα εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι και τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Παρουσιάζονται η αποθήκευση αισθητής θερμότητας, λανθάνουσας θερμότητας και ο θερμοχημικός τρόπος αποθήκευσης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους πρώτους δύο τρόπους με την παρουσίαση συστημάτων και πραγματικών εφαρμογών που τους εκμεταλλεύονται. Επιπλέον, τονίζονται ιδιότητες, δυσκολίες και τρόποι αντιμετώπισης των διφασικών υλικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η περιγραφή του ORC. Με αφητηρία ορισμένα ιστορικά στοιχεία, αναλύονται ο τρόπος λειτουργίας των συσκευών που τον αποτελούν και τα χαρακτηριστικά των πιθανών εργαζόμενων μέσων. Στο τέλος δίνεται συνοπτική περιγραφή εφαρμογών με ΑΠΕ στις οποίες χρησιμοποιείται περισσότερο ο ORC.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μοντελοποιήσεις για κάθε επιμέρους διάταξη της συνολικής εγκατάστασης, που θα χρησιμοποιηθούν για τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται οι μοντελοποιήσεις για το σύστημα του ORC, για τον συλλέκτη, για τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας και για κάθε ένα από τα τρία δοχεία αποθήκευσης. Επίσης,

περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου για την ανάλυση του ORC σε μόνιμες συνθήκες στο EES (Equation Engineering Solver) και του μοντέλου όλης της εγκατάστασης για την ανάλυση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες στην Matlab. Τέλος, δίνονται οι δείκτες για την ενεργειακή -συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος, ετήσια παραγόμενη ενέργεια- και οικονομική -καθαρή παρούσα αξία (NPV), σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE), χρόνος αποπληρωμής (PP)- αξιολόγηση της εγκατάστασης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Αρχικά, πραγματοποιείται διερεύνηση του εργαζόμενου μέσου στον ORC, εξετάζοντας διαφορετικά εργαζόμενα μέσα με κριτήριο τον βαθμό απόδοσης του ORC και την ευαισθησία σε ορισμένες παραμέτρους, στο EES. Αφού επιλεγεί το μέσο επιλέγεται η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο και κριτήριο τον συνολικό βαθμό απόδοσης. Έπειτα, παρουσιάζεται η επίδραση συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου δοχείου στους ενεργειακούς και οικονομικούς δείκτες για τρόπο αποθήκευσης με SMT. Στην συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση του SMT με το DMT για μικρότερο εύρος συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου, αφού πρώτα επιλεγεί το βέλτιστο στερεό υλικό με κριτήριο τον βαθμό απόδοσης και το NPV. Αντίστοιχη σύγκριση πραγματοποιείται και μεταξύ SMT με PCM. Κατόπιν, πραγματοποιείται σύγκριση και των τριών τρόπων αποθήκευσης για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια. Τέλος, δίνονται τα ολικά βέλτιστα μεταξύ των τριών τρόπων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Μεταξύ άλλων αποδείχτηκε ότι με την χρήση του DMT με Therminol και κεραμικά, αυξάνεται κατά 1,65% ο βαθμός απόδοσης, αυξάνεται κατά 6,90% η καθαρή παρούσα αξία, μειώνεται κατά 6,90% το σταθμισμένο κόστος ενέργειας και μειώνεται κατά 8,14% η περίοδος αποπληρωμής από την χρήση του SMT μόνο με Therminol. Επίσης, τα διφασικά υλικά εμφανίζονται στην μέση των δύο παραπάνω τρόπων αποθήκευσης όσον αφορά την βελτίωση, με αύξηση κατά 0,69% του βαθμού απόδοσης, αύξηση κατά 6,47% της μέγιστης καθαρής παρούσας αξίας, μείωση κατά 4,39% του σταθμισμένου κόστους ενέργειας και μείωση κατά 5,10% της περιόδου αποπληρωμής από την χρήση του SMT μόνο με Therminol. Τελικά, για την εφαρμογή παραγωγής ενέργειας 10 KW στην Αθήνα επιλέγεται ως βέλτιστος τρόπος αποθήκευσης αυτός με χρήση κεραμικών και Therminol για $A_c = 160 \text{ m}^2$, $V = 8 \text{ m}^3$. Ο βαθμός απόδοσης και οι οικονομικοί δείκτες που προκύπτουν είναι $n_{syst} = 14,79 \%$, $NPV = 119,16 \text{ k€}$, $LCOE = 0,0891 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ και $PP = 7,56$ χρόνια.

Abstract

The objective of this work is to study and compare three different heat storage systems for a solar-powered Rankine organic cycle with a nominal power production of 10 kW. In particular, the installation consists of a parabolic collector, which absorbs the incident solar irradiation from the location of Athens in order to heat the thermal oil. Thermal energy of the fluid is then transferred into the storage system. The storage systems selected for evaluation are single media thermocline (SMT), dual media thermocline (DMT) - in addition to oil there are also solid materials into the storage- and storage system including phase change materials. Thermal energy at the outlet of the storage system is transferred to a heat recovery system from which the organic Rankine cycle is powered to generate electricity. The analysis is conducted for operation during the whole year and is evaluated with various financial criteria, as well as with energy criteria. More detailed information for each chapter follows.

In the first chapter a review of the approach of humanity to its energy needs over the years, up to the energy situation that prevails in the modern world takes place. Emphasis is placed on the urgent need to utilize more renewable energy sources. Finally, for all forms of renewable energy sources, the percentage of their participation in the energy alloy, their operation principles, advantages and disadvantages are briefly presented.

The second chapter analyzes solar radiation and types of solar collectors. Firstly, there is a description of the solar radiation types and the models that are used to approximate them. Then, the operating principle, characteristics and applications of the flat plate collector, the evacuated tube collector, the parabolic through collector, the compound parabolic collector, the dish collector and the heliostat tower are being presented. Emphasis is placed on the parabolic through collector which is the one selected for the present work.

The third chapter describes the different types of thermal storage. In particular, storage of sensible heat, latent heat and the thermochemical storage are presented. Special emphasis is given to systems and applications that apply the first two ways of storage. In addition, properties, and enhancing methods of phase change materials are discussed.

In the fourth chapter, the organic Rankine cycle is being presented. First, some historical data are pointed out. Then, operation principles and characteristics of the equipment and the working fluid of the cycle are reviewed. Finally, a brief review of the renewable energy sources that apply the organic Rankine cycle is given.

The fifth chapter describes the modeling for each individual layout of the overall unit. More specifically, the modeling of the ORC system, the collector, the heat recovery system of each of the three storage systems is given. Details about the analysis of the thermodynamic model in steady-state conditions in EES (Equation Engineering Solver) and the dynamic model in Matlab are being discussed. Finally, the energy criteria as system energy efficient (η_{syst}), yearly electricity production and financial indicators as net present value (NPV), levelized cost of energy (LCOE), payback period (PP) and simple payback period (SPP) are introduced.

The sixth chapter presents all the results that emerged from the simulation. Firstly, different working fluids of the ORC are examined based on the ORC system efficiency and a sensitivity analysis conducted in EES. Then the optimal saturation temperature is being selected using the dynamic model at Matlab. Moreover, the effect of the collector area and storage tank volume on energy and economic criteria for SMT storage is presented. The optimal solid material based on the system energy efficient and NPV is selected and then the SMT is

compared with the DMT for a smaller range of collecting area and storage tank volume. A similar comparison is made between SMT and PCM. Then, a comparison is made of all three storage methods for a stable collecting area. Finally, the global optimum designs of the three storage scenarios are given.

The conclusions that came of the current study are depicted in the seventh chapter along with suggestions for future studies. The optimum thermal storage is DMT with Therminol and ceramics. The comparison with SMT gives, as a result, the system energy efficiency increase by 1,65%, the net present value increase by 6,90%, the levelized cost of energy decrease by 6,90% and the payback period decrease by 8,14%. As about phase change materials, they appear in the middle of the above two storage types in terms of improvement, with the system energy efficiency increase by 0,69%, the net present value increase by 6,47%, the levelized cost of energy decrease by 4,39% and the payback period decrease by 5,10% compared to SMT. Finally, the overall optimum case, for an application of nominal power production of 10 KW power generation in Athens, that is chosen is DMT storage with Therminol and Ceramics with the optimum collector area of 160 m^2 , optimal storage tank volume of 8 m^3 . The system energy efficiency and the economic indicators for this case are $n_{syst} = 14.79\%$, $NPV = 119.16 \text{ k€}$, $LCOE = 0.0891 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ and $PP = 7.56 \text{ years}$.

Επεξήγηση συμβόλων

Μεγέθη

A_c	Συλλεκτική επιφάνεια
A_T	Επιφάνεια δοχείου
CF	Χρηματοροή
Co	Αρχικό κόστος επένδυσης
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα
DD	Αριθμός ημερών
G_b	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία
h	Ενθαλπία
K_{tank}	Κόστος δοχείου
L	Ενθαλπία τήξης
m	Παροχή μάζας
N_D	Διάρκεια της ημέρας
p	Πίεση
Pe_l	Ηλεκτρική ισχύς
PP_t	Pinch Point
Q	Ισχύς
s	Εντροπία
SD	Ηλιόλουστες μέρες
T_{amb}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
$T_{c,in}$	Θερμοκρασία εισόδου στον συλλέκτη
$T_{c,out}$	Θερμοκρασία εξόδου από τον συλλέκτη
$T_{s,in}$	Θερμοκρασία εισόδου στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας
$T_{s,out}$	Θερμοκρασία εξόδου από τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας
T_{sat}	Θερμοκρασία κορεσμού
V	Όγκος δοχείου
W_{pump}	ισχύς αντλίας
U_T	Συντελεστής απωλειών

Ελληνικά σύμβολα

α	λόγος μέγιστης πίεσης προς κρίσιμη πίεση
β	κλίση επιπέδου

γ	αζιμούθιο επιφάνειας
δ	ηλιακή απόκλιση
ε	ποσοστό λαδιού
ε_{rad}	συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας
η	βαθμός απόδοσης
θ_z	γωνία ζενίθ
ρ	πυκνότητα
σ	σταθερά Stefan-Boltzmann
φ	γεωγραφικό πλάτος
ω_s	ωριαία γωνία

Δείκτες

b	άμεση ηλιακή ακτινοβολία
col	συλλέκτης
CON	συμπυκνωτής
$crit$	κρίσιμη
d	διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία
ECO	οικονομητήρας
$EVAP$	εξατμιστής
i_s	ισεντροπικός βαθμός
$loss$	απώλειες
n	ηλιακή ακτινοβολία στο κάθετο επίπεδο
o	ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας
oil	θερμικό λάδι
REC	ανακομιστής
s	heat recovery system
sat	κορεσμός
sc	ηλιακή σταθερά
SH	υπερθερμαντής
sol	ήλιος
$solid$	στερεό υλικό
$stor$	δοχείο αποθήκευσης

<i>syst</i>	συνολική εγκατάσταση
<i>T</i>	ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο
<i>u</i>	ωφέλιμη

Ακρωνύμια

CFC	Χλωροφθοράνθρακες (Chloro-Fluoro-Carbons)
CPC	Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης (Compound Parabolic Collector)
DMT	Αποθήκευση με δύο μέσα (Dual Medium Thermocline)
ETC	Συλλέκτης κενού (Evacuated Tube Collector)
FPC	Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (Flat Plate Collector)
GWP	Δείκτης υπερθέρμανσης πλανήτη (Global Warming Potential)
HCFCs	Υδροχλωροφθοράνθρακες (Hydro-Chloro-Fluoro-Carbons)
HEX	Εναλλάκτης θερμότητας (Heat Exchanger)
HFCs	Υδροφθοράνθρακες (Hydro-Fluoro-Carbons)
HRS	Λέβητας ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery System)
HTF	Μέσο μεταφοράς θερμότητας (Heat Thermal Fluid)
ICS	Συλλέκτης με ενσωματωμένο δοχείο αποθήκευσης (Integrated Collector Storage)
LCOE	Σταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy)
LHS	Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Storage)
NPV	Καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value)
ODP	Δείκτης εξάντλησης του όζοντος (Ozone Depletion Potential)
ORC	Οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle)
PCM	Διφασικό υλικό (Phase Change Material)
PP	Περίοδος αποπληρωμής (Payback Period)
PTC	Παραβολικός κατοπτρικός συλλέκτης (Parabolic Through Collector)
RES	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ΑΠΕ (Renewable Energy Sources)
RTR	Αναστρέψιμη θερμοχημική αντίδραση (Reversible Thermochemical Reaction)
SHS	Αποθήκευση αισθητής θερμότητας (Sensible Heat Storage)
SMT	Αποθήκευση με ένα μέσο (Single Medium Thermocline)
SPP	Απλή περίοδος αποπληρωμής
TES	Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage)

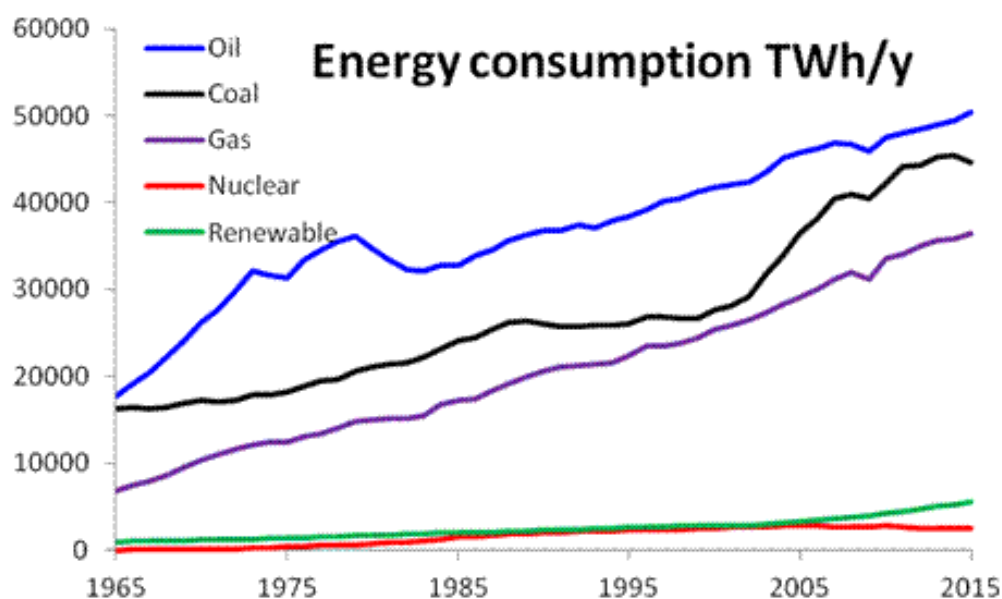
1 Γενικά ενεργειακά

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ενέργεια αποτελεί θεμέλιο λίθο γύρω από τον οποίο έχουν χτιστεί οι σύγχρονες κοινωνίες. Η οικονομική ανάπτυξη και ευημερία του ανθρώπινου πολιτισμού στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εκμετάλλευση της ενέργειας που υπάρχει διαθέσιμη στον πλανήτη. Σε αντίθεση με την σημερινή εποχή που την πρώτη θέση στο ενεργειακό κράμα έχει η καύση ορυκτών καυσίμων, οι πρώτες μορφές ενέργειας που εκμεταλλεύτηκε το ανθρώπινο γένος ήταν κατεχοχήν οι ανανεώσιμες (Renewable Source Energy: RES). Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη μορφή ενέργειας, ήδη αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια πριν, ήταν η καύση βιομάζας, κυρίως ξύλου [1.1]. Ακολούθησε η προσπάθεια του ανθρώπου να τιθασει την αιολική ενέργεια για την κίνηση πλοίων με πανιά, αλλά και για την κίνηση των πρώτων ανεμόμυλων για άντληση του νερού [1.2]. Επίσης, υπάρχουν αναφορές εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας ήδη από τα παλαιολιθικά χρόνια για θέρμανση του νερού και πατωμάτων [1.3]. Μόλις στα μέσα του 19^{ου} αιώνα επινοήθηκαν οι κατάλληλες τεχνολογίες για την εκμετάλλευση των ορυκτών, οι οποίες κυριάρχησαν στο ενεργειακό κράμα μέχρι και έναν αιώνα αργότερα όπου άρχισαν να γίνονται πιο έντονες οι ενστάσεις όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκτεταμένη χρήση τους [1.4]. Η εναλλακτική ήταν η στροφή και πάλι σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), αλλά αυτή τη φορά με πολύ καλύτερες τεχνολογίες για την αξιοποίησή τους.

1.2 Σημερινή ενεργειακή κατάσταση

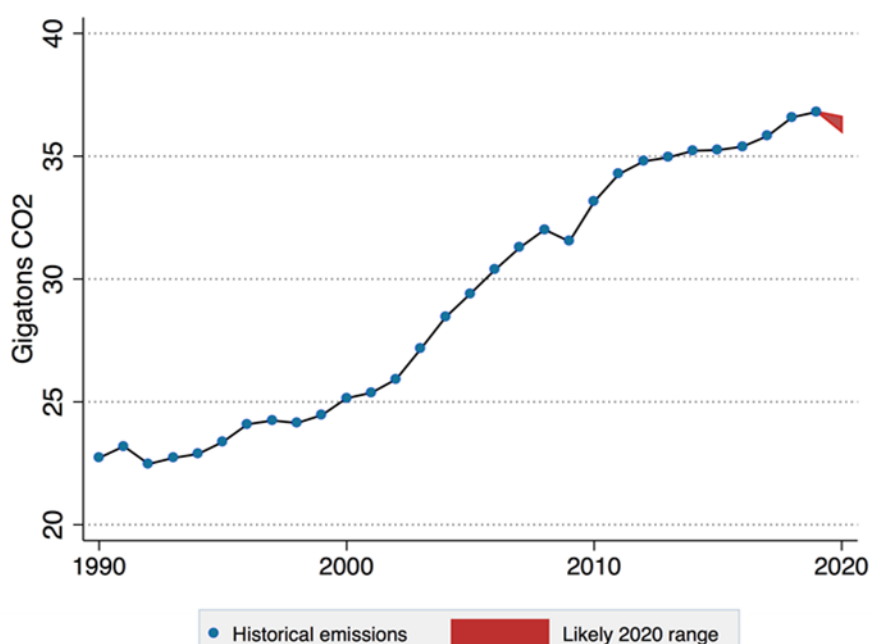
Πλέον, στην σημερινή εποχή είναι φανερό η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, παράλληλα με την ανάγκη απεξάρτησης από αυτά και αξιοποίησης περισσότερων ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, η εξάρτηση γίνεται φανερό από την αξιοποίησή τους στην πάροδο των χρόνων, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.1*, το πετρέλαιο, ο λιγνίτης και το φυσικό αέριο που ανήκουν στα ορυκτά καύσιμα παρουσιάζουν αυξανόμενη τάση, εκτός από περιόδους κρίσεων όπως για παράδειγμα η πετρελαϊκή κρίση το 1973, ενώ οι ΑΠΕ έχουν σχεδόν σταθερή πορεία αντίστοιχη με τα πυρηνικά.



Σχήμα 1.1: Ενεργειακή κατανάλωση ανά χρόνο διαφόρων πηγών ενέργειας, 1965-2015 [1.5]

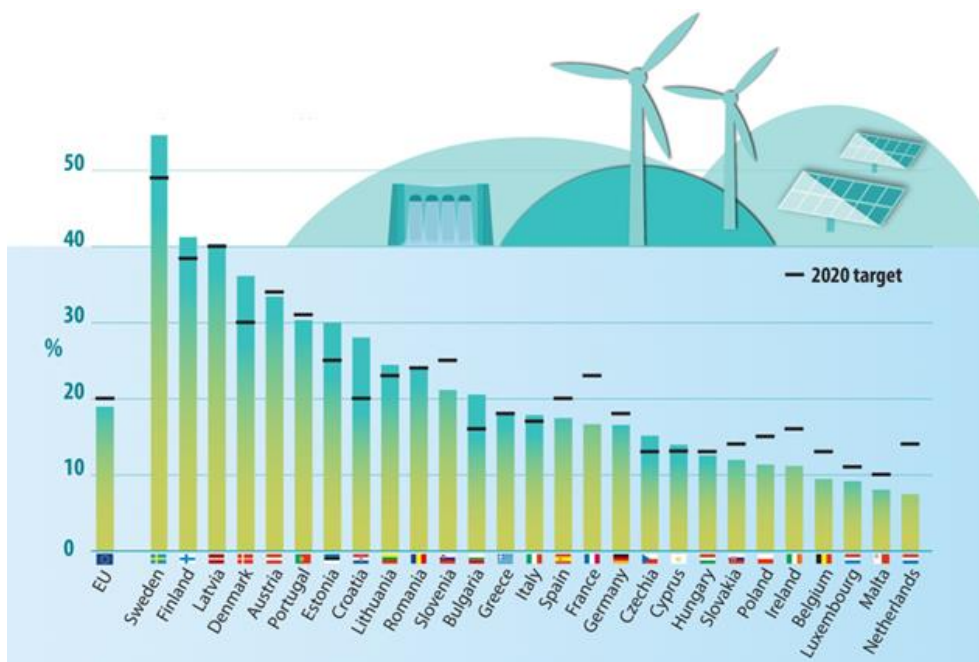
Ο λόγος για τον οποίο δεν είναι εύκολη η μετάβαση στις ΑΠΕ είναι κυρίως γιατί τα ορυκτά καύσιμα μπορούν να πετύχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος και καλύτερους βαθμούς απόδοσης. Επίσης, χρησιμοποιείται καλά εδραιωμένη τεχνολογία η οποία είναι φθηνή και αξιόπιστη.

Η ανάγκη απεξάρτησης από αυτά έχει να κάνει με ποικίλους λόγους. Αρχικά, γιατί πρόκειται για τεχνικά, δηλαδή σε κλίμακα χιλιάδων χρόνων, μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ειδικότερα, επειδή σχηματίζονται από διεργασίες αποσύνθεσης αναερόβιας ύλης που χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια θεωρείται ότι είναι συγκεκριμένη η ποσότητα τους και πρόκειται να εξαντληθεί. Επίσης, πρόκειται για πηγές ενέργειας που έχουν σοβαρό αντίκτυπο στο περιβάλλον, με την εκπομπή ρύπων όπως CO_2 , SO_2 , CO , NO_x , προκαλώντας φαινόμενα όπως η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη. Στο Σχήμα 1.2 είναι φανερή αυτή η αύξηση των εκπομπών CO_2 χρόνο με το χρόνο την οποία η παγκόσμια κοινότητα προσπαθεί να αντιμετωπίσει.



Σχήμα 1.2: Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα, 1990-2020 [1.6]

Μία σημαντική προσπάθεια ήταν η σύμβαση που υπεγράφη από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2009 (Directive 2009/28/EC) [1.7]. Σύμφωνα με αυτή τοποθετούνταν τρεις στόχοι-άξονες για κάθε ευρωπαϊκό κράτος. Πρώτον, να ρίξει κατά 20% τις εκπομπές των υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αερίων από το 1990. Δεύτερον, να πετύχει την εισαγωγή κατά 20% των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα και τέλος να πετύχουν 20% αύξηση στην ενεργειακή απόδοση. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται τα ποσοστά εισαγωγής των ΑΠΕ σε κάθε ευρωπαϊκό κράτος το 2018. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα κράτη, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, έχουν πέτυχει τον στόχο του 20% ήδη από το 2018.



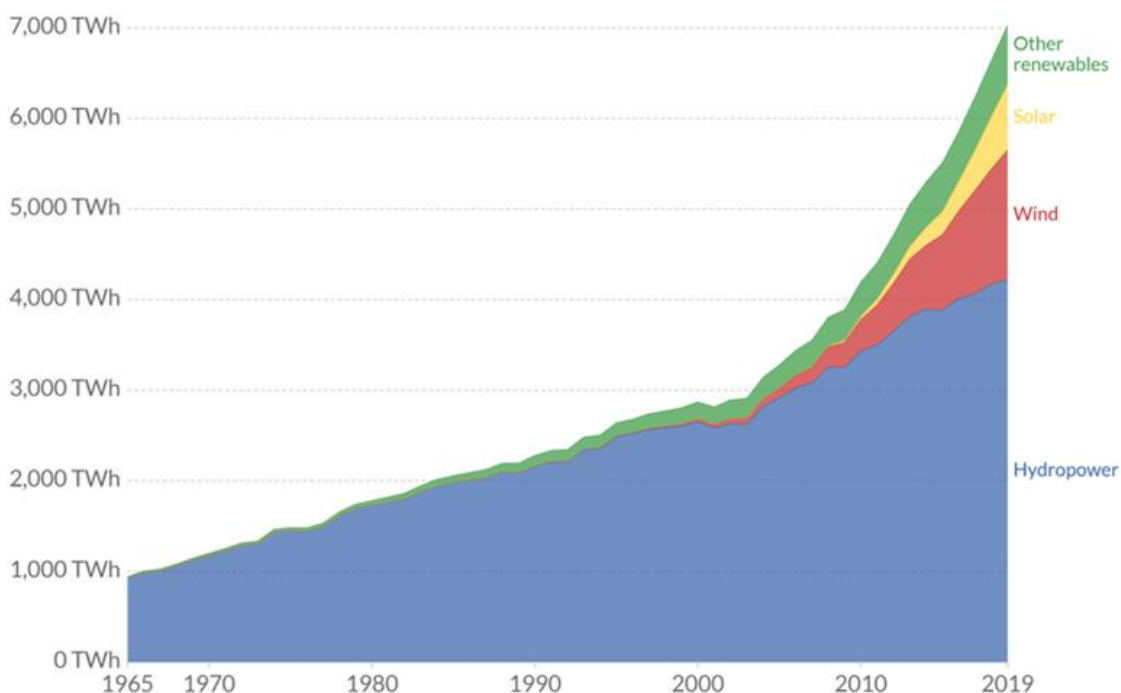
Σχήμα 1.3: Ποσοστό εισαγωγής ΑΠΕ για κάθε ευρωπαϊκή χώρα το 2018 [1.8]

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ΑΠΕ, όπως έχει αναφερθεί, αποτελούν την πιο υποσχόμενη λύση στην επερχόμενη εξάντληση των ορυκτών πόρων, αλλά και στην αρχικά επιβράδυνση και ίσως και αναστροφή της κλιματικής αλλαγής και υπερθέρμανσης του πλανήτη. Εκτός αυτών σημειώνεται ότι οι ΑΠΕ, επειδή είναι κατανομημένες σε όλο τον πλανήτη, σε αντίθεση με τα ορυκτά μπορούν να προσφέρουν ενεργειακή αυτάρκεια σε μικρότερες ή και αναπτυσσόμενες χώρες. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι χρειάζεται να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις γης (ηλιακά, αιολικά πάρκα) ή και έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο τοπικό περιβάλλον (υδροηλεκτρικά εργοστάσια). Σε κάθε περίπτωση με την πρόοδο της τεχνολογίας βελτιώνονται οι βαθμοί απόδοσης και η παρουσία τους θα γίνεται όλο και πιο έντονη [1.9].

Τις ΑΠΕ αποτελούν κατά φθίνουσα σειρά παραγόμενης ενέργειας η υδροηλεκτρική, η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η καύση βιομάζας και η ωκεάνια ενέργεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Σημειώνεται ότι στις λοιπές ανανεώσιμες (other renewables) του σχήματος περιλαμβάνονται η γεωθερμία, η καύση βιομάζας και η ωκεάνια ενέργεια.

Renewable energy generation, World

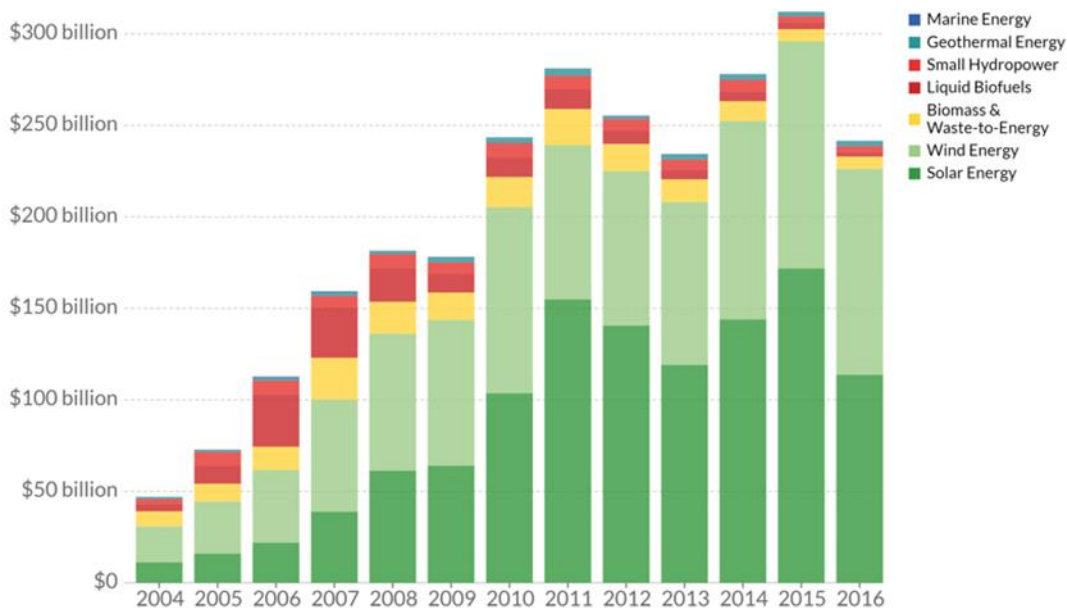


Σχήμα 1.4: Παγκόσμια παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ, 1965-2019 [1.10]

Τονίζεται ότι οι εγκαταστάσεις με υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι συνήθως αρκετών MW, οπότε καλύπτουν και το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας. Ένας επιπλέον καλός δείκτης για να φανεί σε ποια τεχνολογία υπάρχει μεγαλύτερο επενδυτικό άρα και ερευνητικό ενδιαφέρον είναι ο αριθμός χρημάτων που δαπανούνται. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται αυτός ο δείκτης για κάθε τεχνολογία. Παρατηρείται ότι η ηλιακή και αιολική ενέργεια καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του ενδιαφέροντος με αρκετή διαφορά.

Investment in renewable energy, by technology

Global investment in renewable energy technologies, measured in USD per year. Note investment figures exclude large-scale hydropower schemes.

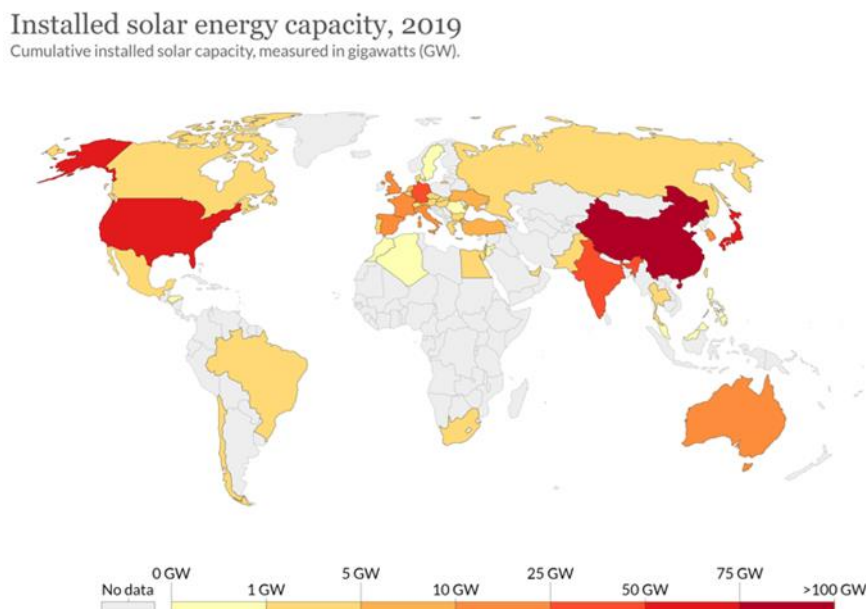


Σχήμα 1.5: Επένδυση στις ΑΠΕ ανά τεχνολογία, 2004-2016 [1.11]

Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση των διαφορετικών τεχνολογιών ΑΠΕ.

Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από την ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος και αποτελεί την αιτία όλων των υπόλοιπων ΑΠΕ εκτός από την γεωθερμία. Στο Σχήμα 1.6 δίνονται οι χώρες με την εγκατεστημένη ηλιακή ισχύ για το 2019. Ξεχωρίζουν η Κίνα με 205,49 GW και ακολουθούν η Αμερική με 62,30 GW και η Ινδία με 35,06 GW.



Σχήμα 1.6: Χάρτης εγκατεστημένης ηλιακής ισχύος για το 2019 [1.10]

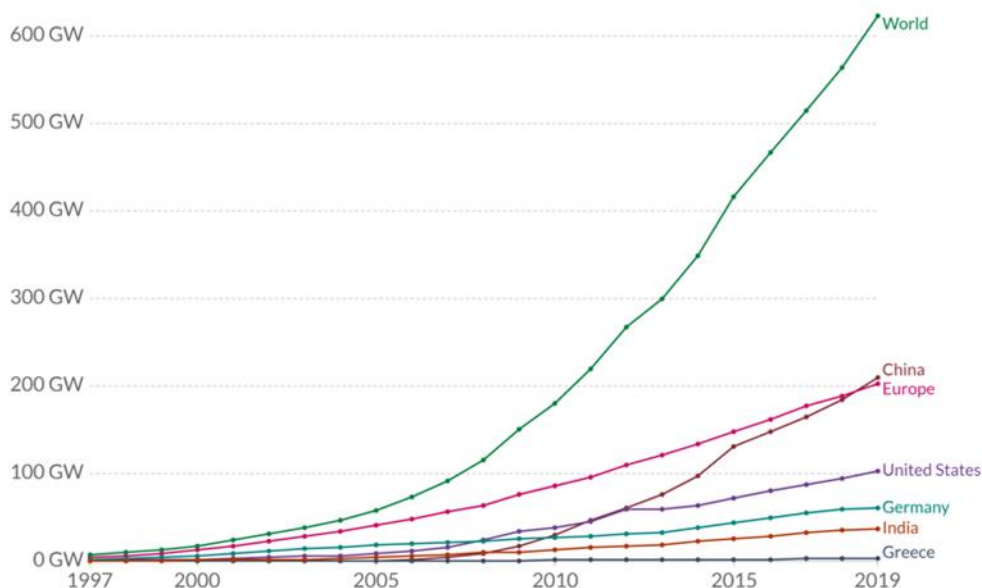
Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την παραγωγή θερμικής είτε ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ηλεκτροπαραγωγή χρησιμοποιούνται συνήθως φωτοβολταϊκά και ακολουθούν οι εγκαταστάσεις με συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Αυτές οι εγκαταστάσεις αποτελούν μια υποσχόμενη, ταχύτατα αναπτυσσόμενη τεχνολογία ιδιαίτερα σε χώρες με υψηλές ποσότητες ηλιακής ενέργειας. Μια από αυτές τις εγκαταστάσεις έχει επιλεγεί προς ανάλυση και διερεύνηση στην παρούσα εργασία.

Αιολική ενέργεια

Ο κύριος μηχανισμός δημιουργίας των ανέμων είναι η διαρκής κίνηση μεταξύ των θερμών και ψυχρών αέριων μαζών λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων. Η υψηλότερη θερμοκρασία των αέριων μαζών επιτυγχάνεται λόγω της επαφής με την ηλιακή ακτινοβολία. Η αιολική ενέργεια έχει εξελιχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες φτάνοντας το 2019 τα 623 GW παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ [1.12], με την Κίνα με 210,48 GW να ξεπερνάει την Ευρώπη με 203,48 GW και την Αμερική να ακολουθεί με περίπου την μισή εγκατεστημένη ισχύ στα 103,58 GW για το 2019. Άξια αναφοράς είναι και η Γερμανία που καταλαμβάνει το 30% από όλη την Ευρώπη με 60,82 GW, ενώ η Ελλάδα έχει 3,55 GW για το 2019, Σχήμα 1.7.

Installed wind energy capacity

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).



Σχήμα 1.7: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς για διαφορετικές χώρες για το 2019 [1.10]

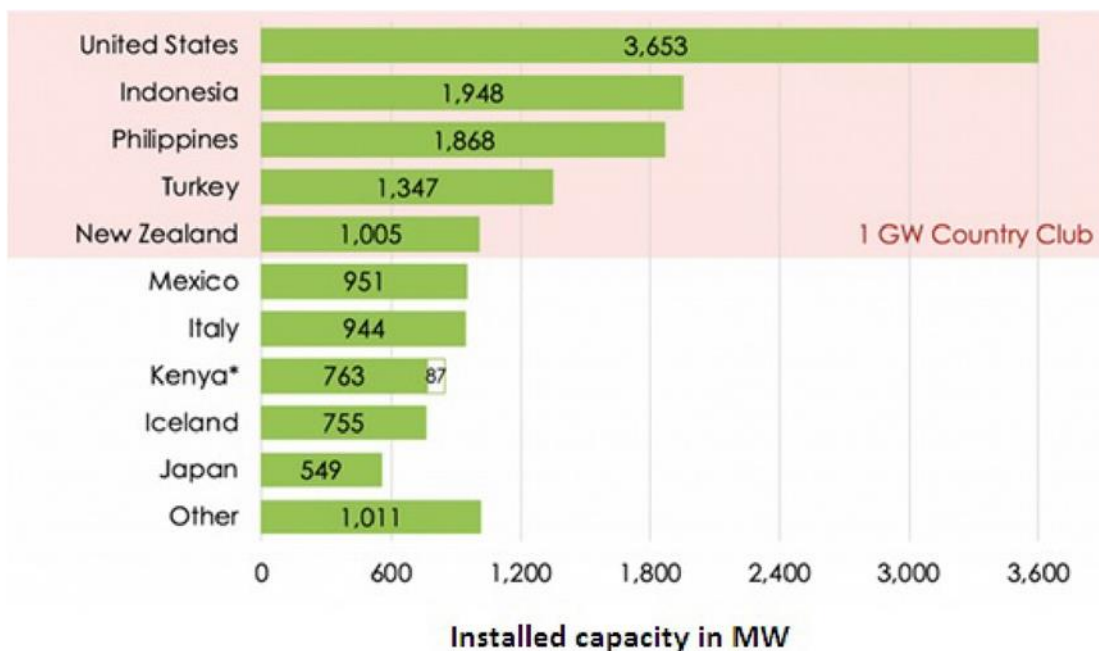
Στα μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας είναι ότι αν και περνά από προβλέψιμες διακυμάνσεις, είναι διακοπτόμενη σε καθημερινή βάση. Επίσης, μπορεί να εμφανίσει μέγιστα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης όπως για παράδειγμα υψηλό αιολικό δυναμικό το βράδυ. Τέλος, τα αιολικά πάρκα καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις με αποτέλεσμα συχνά να κατηγορούνται για αρνητική αισθητική παρέμβαση αλλά και επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Υδροηλεκτρική ενέργεια

Πρόκειται για την ανανεώσιμη πηγή ενέργεια με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ, που φτάνει τα 1190 *GW* και η οποία καλύπτει το 7% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας [1.10]. Πρόκειται για την ενέργεια που ξεκινάει ως δυναμική λόγω του ύψους του νερού πάνω από την στάθμη του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρισμού. Στην συνέχεια αυτό το νερό το οποίο βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες και υπό πίεση στον αγωγό πίεσης ελευθερώνεται και παράγει κινητική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται από τον υδροστρόβιλο και την γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής. Πρόκειται για ανταγωνιστική τεχνολογία όσον αφορά το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αρκετά αξιόπιστη σε σχέση με τις υπόλοιπες ΑΠΕ και συνδυάζεται καλά με άλλες πηγές. Στα αρνητικά συμπεριλαμβάνονται η ανάγκη κατασκευής του φράγματος που εκτός από υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης συνδέεται και με υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, λόγω της χρήσης μεγάλων ποσοτήτων τσιμέντου. Επίσης, το φράξιμο του ποταμού ενδεχομένως να αλλοιώσει τους τοπικούς βιότοπους [1.13].

Γεωθερμία

Η συνολική χωρητικότητα εγκατεστημένης ισχύος από γεωθερμία είναι 12,73 *GW* με τάση αύξησης στα 21,44 *GW* το 2020 με την κατανομή στις διαφορετικές χώρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Χάρτης χωρών εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος [1.14]

Πρόκειται για την ενέργεια που προκύπτει από την εκμετάλλευση της εσωτερικής θερμικής ενέργειας του πλανήτη. Το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι δεν βασίζεται στις καιρικές συνθήκες και μπορεί να παρέχει ενέργεια σε σταθερή βάση. Επίσης, δεν απαιτεί μεγάλες εκτάσεις. Στα αρνητικά συμπεριλαμβάνονται το υψηλό κόστος και ότι πρόκειται για πηγή ενέργειας που βρίσκεται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες.

Καύση βιομάζας

Στην βιομάζα συμπεριλαμβάνονται κάθε μη απολιθωμένο, βιοδιασπώμενο οργανικό υλικό που προέρχεται από φυτά, ζώα και μικροοργανισμούς. Ο χαρακτηρισμός της βιομάζας ως «ελεύθερη από CO₂», προκύπτει από το γεγονός ότι κατά την διάρκεια της καύσης απελευθερώνεται επακριβώς η ποσότητα του CO₂ που είχε προηγουμένως αφομοιωθεί από την ατμόσφαιρα για την ανάπτυξη των φυτών. Ένα από τα πλεονεκτήματα έναντι των υπόλοιπων ΑΠΕ είναι ότι το ενεργειακό της περιεχόμενο μπορεί να εισαχθεί ανάλογα με την ζήτηση. Στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται οι χαμηλοί βαθμοί απόδοσης λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία. Επίσης, παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και εποχιακή διακύμανση αυξάνοντας το κόστος [1.15].

Ωκεάνια Ενέργεια

Η ωκεάνια ενέργεια περιλαμβάνει την κυματική ενέργεια, την παλιρροιακή ενέργεια η οποία οφείλεται κυρίως στην βαρυτική έλξη Γης και Σελήνης και την ωσμωτική ενέργεια που είναι η έκλυση λανθάνουσας θερμότητας λόγω διαφορετικής σύστασης γλυκού και θαλασσινού νερού. Το δυναμικό των ωκεανών υπολογίζεται στα 32 *PWh* ανά χρόνο, αλλά μόνο ένα μικρό κλάσμα αυτού αξιοποιείται με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ να είναι 508 *MW* για το 2016, όπου τα 506 *MW* αποτελεί η παλιρροιακή και μόλις 2 *MW* η κυματική ενέργεια [1.16]. Η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί για την εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας δεν είναι ακόμη ανταγωνιστική κυρίως λόγω του εξαιρετικά σκληρού θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

- [1.1] J. A. J. Gowlett and R. W. Wrangham, "Earliest fire in Africa: towards the convergence of archaeological evidence and the cooking hypothesis," *Azania Archaeol. Res. Africa*, vol. 48, no. 1, pp. 5–30, Mar. 2013, doi: 10.1080/0067270X.2012.756754.
- [1.2] "History of wind energy."
https://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_energy.html
- [1.3] "Geothermal Energy."
http://faculty.fairfield.edu/mediacenter/nm_webdesign/s_zandan/sz_alt_energy/geothermal_energy.html.
- [1.4] "Oil industry crisis | Climate change | The Guardian."
<https://www.theguardian.com/environment/climate-consensus-97-percent/2018/jan/01/on-its-hundredth-birthday-in-1959-edward-teller-warned-the-oil-industry-about-global-warming>.
- [1.5] J. L. Sawin *et al.*, "Renewables 2012 Global Status Report. REN21 Secretariat, Paris," *Ren21*, pp. 1–172, 2012.
- [1.6] "Climate | The Breakthrough Institute."
<https://thebreakthrough.org/issues/energy/covid-emissions>.
- [1.7] "2020 climate & energy package | Climate Action."
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en.
- [1.8] "Renewable energy statistics - Statistics Explained."
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics.
- [1.9] V. L. Kalyani, "GREEN ENERGY : The NEED of the World," *J. Manag. Eng. Inf. Technol.*, vol. 2, no. October, pp. 18–26, 2015.
- [1.10] H. Ritchie and M. Roser, "Renewable Energy," *Our World Data*, Dec. 2017.
- [1.11] "Investment in renewable energy, by technology."
<https://ourworldindata.org/grapher/investment-in-renewable-energy-by-technology>.
- [1.12] IRENA, *Renewable Capacity Statistics 2020*. 2020.
- [1.13] Δ. Παπαντώνης, *Υδροδυναμικές Μηχανές αντλίες υδροστρόβιλοι-Υδροδυναμικές μεταδόσεις*. Αθήνα 2016.
- [1.14] D. Moya, C. Aldás, and P. Kaparaju, "Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94. Elsevier Ltd, pp. 889–901, Oct. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.047.
- [1.15] Ε. Κακαράς and Σ. Καρέλλας, *Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα*. Αθήνα 2015.
- [1.16] M. M. Islam and M. Hasanuzzaman, "Introduction to energy and sustainable development," in *Energy for Sustainable Development*, Elsevier, 2020, pp. 1–18.

2 Ήλιος και συλλέκτης

2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ακτινοβολία είναι ένας από τους τρεις τρόπους μετάδοσης θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων. Η μετάδοση θερμότητας είναι ανάλογη της επιφάνειας του σώματος που εκπέμπει και την διαφορά της τέταρτης δύναμης των θερμοκρασιών θερμού και ψυχρού σώματος όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-1.

$$q = A \cdot \varepsilon_{rad} \cdot \sigma (T_h^4 - T_c^4) \quad 2-1$$

όπου A: η επιφάνεια του σώματος που εκπέμπει, ε_{rad} : ο συντελεστής εκπομπής, σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), T_h : η θερμοκρασία του θερμού σώματος και T_c : η θερμοκρασία του ψυχρού σώματος [2.1].

Επομένως, η ηλιακή ακτινοβολία είναι η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ($\frac{W}{m^2}$) σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπου το θερμό σώμα είναι ο ήλιος και το ψυχρό η γη. Σημαντικό είναι να καθοριστεί που υπολογίζεται αυτή η ηλιακή ακτινοβολία καθώς είναι διαφορετική στον ήλιο, διαφορετική στο διάστημα, διαφορετική έξω από την ατμόσφαιρα της γης και διαφορετική στην επιφάνεια της.

Αρχικά, καθορίζεται η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας η οποία ονομάζεται ηλιακή σταθερά $G_{sc} = 1353 \frac{W}{m^2}$. Αυτή η τιμή προκύπτει για την μέση απόσταση γης και ήλιου καθώς δεν είναι σταθερή, παρουσιάζει απόκλιση από την μέση τιμή $\pm 1,7\%$. Σημειώνεται ότι αποτελεί υπέρθεση της υπεριώδους, της ορατής και της υπέρυθρης ακτινοβολίας με αντίστοιχη ενέργεια σε κάθε περιοχή $95 \frac{W}{m^2}$, $640 \frac{W}{m^2}$, $618 \frac{W}{m^2}$ [2.2].

Για να προχωρήσει ο υπολογισμός στην ακτινοβολία μετά την ατμόσφαιρα της γης και να φτάσει στην επιφάνεια της χρειάζεται να οριστούν τα παρακάτω μεγέθη [2.2]:

- ✓ Γωνία ζενίθ θ_z : είναι η γωνία που προκύπτει μεταξύ κατακόρυφου και την ευθεία όρασης του ήλιου *Σχήμα 2.1*
- ✓ Ηλιακό ύψος $90^\circ - \theta_z$: είναι η γωνία που προκύπτει μεταξύ της ευθείας όρασης του ήλιου και της προβολής της στο οριζόντιο επίπεδο
- ✓ Αζιμούθιο επιφάνειας γ : είναι η γωνία που προκύπτει από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση *Σχήμα 2.1*. Παίρνει τιμές στο εύρος -180° έως 180° με $\gamma=0^\circ$ στο νότο, $\gamma=90^\circ$ στην δύση, $\gamma=180^\circ$ στο βορρά, $\gamma=-90^\circ$ στην ανατολή
- ✓ Κλίση επιπέδου β : είναι η γωνία που προκύπτει μεταξύ μιας επίπεδης επιφάνειας με το οριζόντιο επίπεδο *Σχήμα 2.1*. Παίρνει τιμές στο εύρος 0° έως 180° με $\beta=0^\circ$ στο οριζόντιο, $\beta=90^\circ$ στο κατακόρυφο, $\beta>90^\circ$ για επίπεδο στραμμένο προς τα κάτω.
- ✓ Γεωγραφικό πλάτος φ : παίρνει τιμές στο εύρος -90° έως 90° ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται. Για την Αθήνα λαμβάνεται τιμή $\varphi = 37,97^\circ$
- ✓ Ωριαία γωνία ω_s : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονα της με ρυθμό $0,25^\circ/\text{min}$. Προκύπτει από την εξίσωση 2-2, λαμβάνοντας θετικές τιμές για μετά το ηλιακό μεσημέρι και αρνητικές πριν από αυτό:

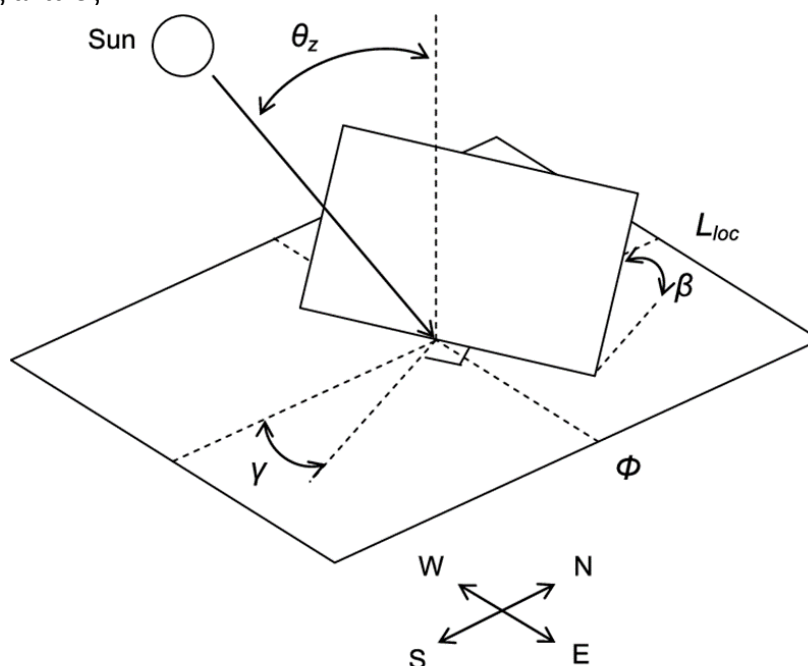
$$\omega_s = 0,25 \times (\text{min από ηλιακό μεσημέρι}) \quad 2-2$$

- ✓ Ηλιακή απόκλιση δ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{364}\right) \quad 2-3$$

όπου $-23,45 \leq \delta \leq 23,45$ σε μοίρες, $1 \leq n \leq 365$ η ημέρα του έτους

- ✓ Άμεσος ακτινοβολία: είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη χωρίς την επιρροή του διασκορπισμού της ατμόσφαιρας
- ✓ Διάχυτη ακτινοβολία: είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή κατεύθυνσης κατά τον διασκορπισμό μέσα στην ατμόσφαιρα
- ✓ Ολική ακτινοβολία: είναι το άθροισμα των δύο προηγούμενων ηλιακών ακτινοβολιών, άμεσης και διάχυτης. Σε αυτήν συμπεριλαμβάνεται και η ανακλώμενη ακτινοβολία από παρακείμενες επιφάνειες
- ✓ Κάθετη ακτινοβολία: είναι η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το κάθετο επίπεδο στις ηλιακές ακτίνες



Σχήμα 2.1: Γωνία ζενίθ, αζιμούθιο και κλίση επιπέδου [2.3]

Σημαντικό είναι να καθοριστούν και τα σύμβολα και δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω οι οποίοι είναι:

- ✓ G : με αυτό συμβολίζεται η στιγμιαία ακτινοβολία
- ✓ I : με αυτό συμβολίζεται η ωριαία ακτινοβολία
- ✓ H : με αυτό συμβολίζεται η ημερήσια ακτινοβολία
- ✓ o : αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται στην εκτός ατμόσφαιρας ακτινοβολία
- ✓ b : αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται στην άμεσο ακτινοβολία
- ✓ d : αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται στην διάχυτη ακτινοβολία
- ✓ για την ολική ακτινοβολία δεν χρησιμοποιείται δείκτης
- ✓ n : αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται για κάθετο επίπεδο
- ✓ T : αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται για κεκλιμένο επίπεδο

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν η γωνία πρόσπτωσης θ της άμεσης ακτινοβολίας που είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της κάθετης στην επιφάνεια σύμφωνα με την εξίσωση 2-4:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad 2-4$$

Αυτή η εξίσωση απλοποιείται για κατακόρυφες επιφάνειες ($\beta = 90^\circ$) όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-5 και για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta = 0^\circ$) όπου η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με την γωνία ζενίθ όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-6:

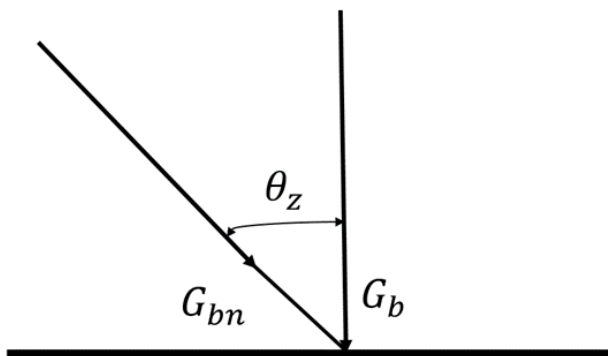
$$\cos\theta = -\sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\omega \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad 2-5$$

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad 2-6$$

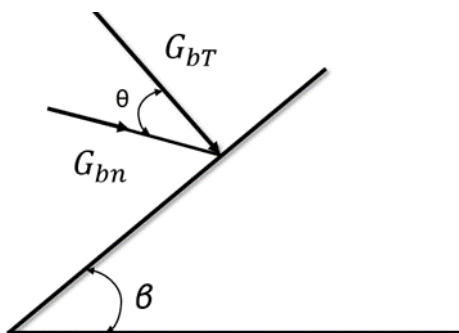
Συναρτήσκει των γωνιών και της άμεσης ακτινοβολίας κάθετου επιπέδου G_{bn} χρησιμοποιώντας το Σχήμα 2.2 και το Σχήμα 2.3 μπορούν να υπολογιστούν η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο G_{bn} και το κάθετο επίπεδο G_{bT} σύμφωνα με τις εξισώσεις 2-7, 2-8 αντίστοιχα:

$$G_b = G_{bn} \cos\theta_z \quad 2-7$$

$$G_{bT} = G_{bn} \cos\theta \quad 2-8$$



Σχήμα 2.2: Άμεση ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας



Σχήμα 2.3: Άμεση ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας

Διαιρώντας κατά μέλη αυτές τις εξισώσεις προκύπτει ο λόγος R_b , ο οποίος είναι σημαντικός για τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένης επιφάνειας όταν είναι γνωστή η άμεση ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-9:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad 2-9$$

Η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας δίνεται στην εξίσωση 2-10:

$$G_o = G_{on}\cos\theta_z \quad 2-10$$

όπου G_{on} η κάθετη ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας δίνεται στην εξίσωση 2-11:

$$G_{on} = G_{sc}(1 + 0,033 \cos(\frac{360n}{365})) \quad 2-11$$

Μοντέλα ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου

Όπως έχει αναφερθεί η ηλιακή ακτινοβολία καθώς εισέρχεται στην ατμόσφαιρα εξασθενεί λόγω διασκορπισμού εξαιτίας μορίων του αέρα, του υδρατμού και της σκόνης και λόγω απορρόφησης εξαιτίας του O_3 , H_2O , CO_2 . Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια μέσα στην ατμόσφαιρα. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από αυτά όπως έχουν αναλυθεί στην [2.4]:

1. Μοντέλο διαυγούς ατμόσφαιρας

Πρόκειται για το πιο απλό μοντέλο που εφαρμόζεται για μέρες με αρκετά διαυγή ουρανό, στο οποίο λαμβάνεται η παραδοχή ότι άμεση και διάχυτη ακτινοβολία έρχονται από την ίδια κατεύθυνση προς την εξεταζόμενη επιφάνεια. Η ολική ακτινοβολία προκύπτει από την εξίσωση 2-12:

$$G_T = R_b G_b + R_d G_d = R_b G \quad 2-12$$

2. Μοντέλο νεφελώδους ατμόσφαιρας (Hottel και Woertz 1942)

Όπως φαίνεται και από την ονομασία το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για μέρες με αρκετή νέφωση. Θεωρείται ότι η ακτινοβολία είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις και ότι η ανακλώμενη ακτινοβολία εδάφους είναι ισοδύναμη με αυτήν που έρχεται από τον ουρανό, οπότε η διάχυτη ακτινοβολία κεκλιμένου ταυτίζεται με την διάχυτη οριζόντιας επιφάνειας. Η ολική ακτινοβολία προκύπτει από την εξίσωση 2-13 :

$$G_T = R_b G_b + G_d, \quad R_d = 1 \quad 2-13$$

3. Βελτιωμένο μοντέλο Liu και Jordan 1960

Πρόκειται για την βελτίωση του προηγούμενου μοντέλου από τους Liu και Jordan οι οποίοι κατέληξαν σε τρεις συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας. Την άμεση ακτινοβολία, την διάχυτη προερχόμενη από τον ουρανό και την διάχυτη προερχόμενη από ανάκλαση στο έδαφος, πρώτος, δεύτερος και τρίτος όρος αντίστοιχα της εξίσωσης :

$$G_T = R_b G_b + \frac{1 + \cos\beta}{2} G_d + \rho_g \frac{1 - \cos\beta}{2} (G_d + G_b) \quad 2-14$$

όπου ρ_g η ανακλαστικότητα του εδάφους παίρνει τιμές από 0,2 για συνηθισμένο έδαφος έως 0,7 για χιονισμένο.

4. Μοντέλο Klucher 1979

Πρόκειται για εναλλακτική στο προηγούμενο μοντέλο καθώς αυτό δεν υποεκτιμά τις μέρες με διαυγή ατμόσφαιρα. Σε αυτό προστίθενται και άλλοι όροι καθώς

λαμβάνονται υπόψη η φωτεινότητα του οριζοντα και η περιφερειακή ηλιακή ακτινοβολία όπως φαίνεται στην εξίσωση 2-15:

$$G_T = R_b G_b + G_d \frac{1 + \cos\beta}{2} \left(1 + F \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) (1 + F \cdot \cos^2(\beta) \cdot \sin^3(\theta_z)) + \quad 2-15$$

$$+ \rho_g \frac{1 - \cos\beta}{2} (G_d + G_b)$$

όπου $F = 1 - \left(\frac{G_d}{G} \right)^2$ ο δείκτης αιθριότητας, ο οποίος για πλήρη νεφελώδη ατμόσφαιρα τείνει στο μηδέν και ταυτίζεται το μοντέλο Klucher με αυτό των Liu και Jordan.

5. Μοντέλο Hay-Davies 1980

Σε αυτό λαμβάνεται υπόψη η περιφερειακή ηλιακή ακτινοβολία αλλά αγνοείται η φωτεινότητα του οριζοντα. Η ακτινοβολία δίνεται από την εξίσωση 2-16 όπου A_τ ο συντελεστής ανισοτροπίας που δίνεται από την εξίσωση 2-17:

$$G_T = R_b(G_b + A_\tau G_d) + G_d \frac{1 + \cos\beta}{2} (1 - A_\tau) + \rho_g \frac{1 - \cos\beta}{2} (G_d + G_b) \quad 2-16$$

$$A_\tau = \frac{G_{bn}}{G_{on}} \quad 2-17$$

6. Μοντέλο Reindl 1990

Πρόκειται για βελτίωση του προηγούμενου καθώς λαμβάνεται υπόψη και η φωτεινότητα του οριζοντα. Η ακτινοβολία δίνεται από την εξίσωση 2-18 όπου B_τ δίνεται από την εξίσωση 2-19:

$$G_T = R_b(G_b + A_\tau G_d) + G_d \frac{1 + \cos\beta}{2} (1 - A_\tau) B_\tau + \rho_g \frac{1 - \cos\beta}{2} (G_d + G_b) \quad 2-18$$

$$\text{όπου } B_\tau = 1 + \sqrt{\frac{G_b}{G_b + G_d}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \quad 2-19$$

2.2 Γενικά περί ηλιακών συλλεκτών

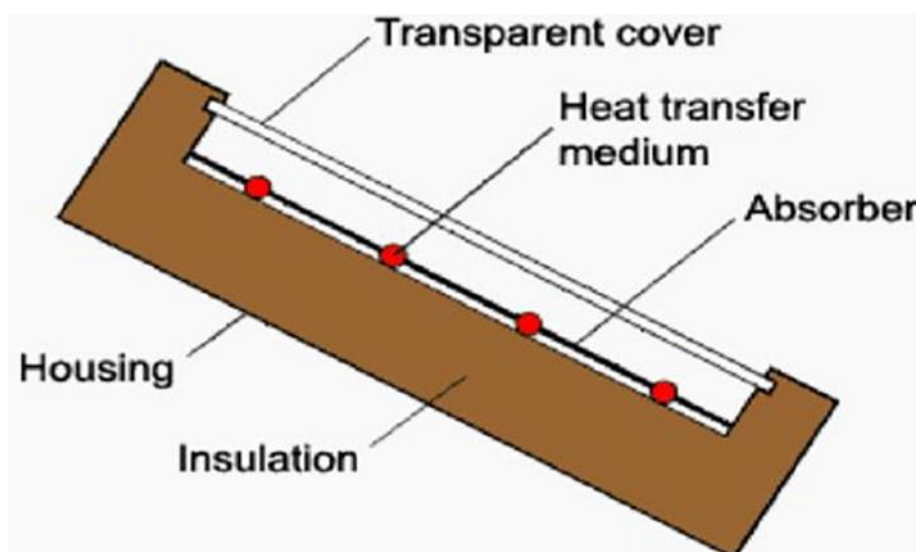
Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ουσιαστικά πρόκειται για εναλλάκτες θερμότητας που απορροφούν μέρος της ηλιακής ενέργεια για να αυξήσουν την θερμοκρασία ενός εργαζόμενου μέσου. Σημειώνεται ότι δεν θα πρέπει να συγχέονται με τους φωτοβολταϊκούς πίνακες οι οποίοι παράγουν απευθείας την ηλεκτρική ενέργεια. Από τους ηλιακούς συλλέκτες αποδίδεται θερμική ενέργεια η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί έπειτα για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

Μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, στους επίπεδους και στους συγκεντρωτικούς. Γενικά, τα κύρια κοινά μέρη και των δύο αυτών τύπων είναι μια διαφανής επιφάνεια (κάλυμμα) η οποία επιτρέπει την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, σκοτεινές επιφάνειες που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία (απορροφητής), σωληνώσεις για την μεταφορά του εργαζόμενου μέσου και μονωτικά υλικά για την ελαχιστοποίηση απωλειών θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά στο σχεδιασμό τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, κυρίως επειδή οι επίπεδοι αξιοποιούν τόσο την άμεση όσο και την διάχυτη ακτινοβολία, ενώ οι συγκεντρωτικοί κατά κύριο λόγο την άμεση. Όσον αφορά τις εφαρμογές οι επίπεδοι αξιοποιούνται σε εφαρμογές μέχρι 100°C, ενώ οι συγκεντρωτικοί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Ενώ ο βαθμός απόδοσης είναι χαμηλότερος στους επίπεδους πρόκειται για πολύ πιο απλές κατασκευές οπότε με πολύ

χαμηλότερο κόστος, οπότε όταν τίθεται δίλημμα επιλογής τύπου, είναι απαραίτητη οικονομοτεχνική μελέτη. Σημειώνεται ότι και για τους δύο τύπους η διάρκεια ζωής είναι μεγάλη, τάξη μεγέθους 25 έτη καθιστώντας τους ανταγωνιστική τεχνολογική επιλογή [2.4].

2.2.1 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (Flat plate collector: FPC) αποτελείται από το κάλυμμα (cover), μπορεί να είναι ένα ή περισσότερα και ο ρόλος του είναι να επιτρέπει την είσοδο της ακτινοβολίας και στην συνέχεια να την αιχμαλωτίζει, αποτρέποντας απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Ακόμη αποτελείται από τον απορροφητή (absorber) ο οποίος είναι μια σκουρόχρωμη επιφάνεια που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, υπάρχουν οι σωλήνες στους οποίους ρέει το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Σημαντικό κομμάτι είναι η μόνωση (insulation) για την μείωση θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον και τέλος το πλαίσιο (housing) μέσα στο οποίο τοποθετούνται όλα τα υπόλοιπα μέρη, *Σχήμα 2.4*.



Σχήμα 2.4: Μέρη επίπεδου ηλιακού συλλέκτη [2.5]

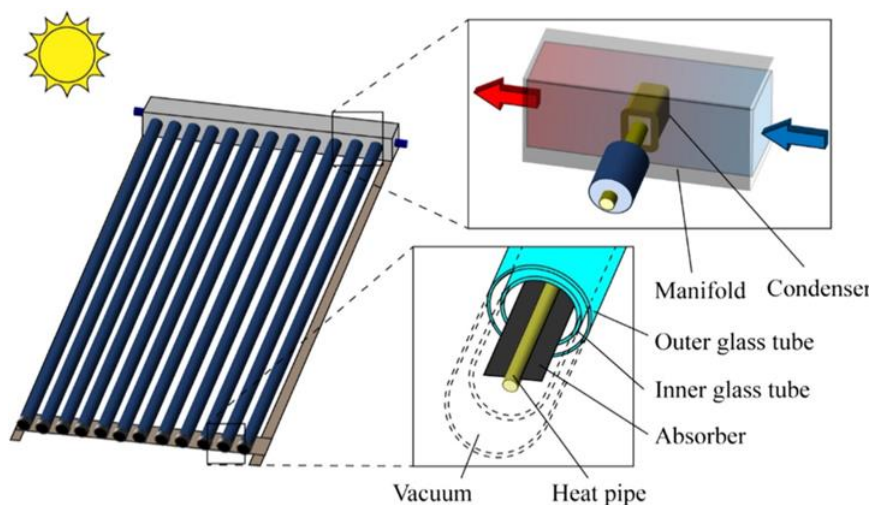
Επομένως, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του είναι η απλότητα στην κατασκευή που χαμηλώνει αρκετά το συνολικό κόστος. Επιπλέον, μεγάλο πλεονέκτημα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι ότι μπορεί να εκμεταλλευτεί και την διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, οπότε μπορεί να λειτουργήσει και σε συνθήκες με νέφωση [2.6].

Όσον αφορά τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται ο επίπεδος συλλέκτης το μεγαλύτερο ποσοστό είναι για παραγωγή ζεστού νερού σε κτιριακές εφαρμογές. Άλλωστε, όπως έχει ήδη αναφερθεί οι θερμοκρασίες που λειτουργεί είναι μέχρι 100°C και κυρίως στο εύρος 40-90°C. Συχνά αυτό το ζεστό νερό μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση χώρων για παράδειγμα με ενδοδαπέδια θέρμανση [2.7]. Επίσης, μια άλλη εφαρμογή που αξιοποιείται είναι σε μεγάλα κτίρια για παραγωγή ψύξης μέσω ψυκτών απορρόφησης και προσρόφησης [2.8]. Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι αποτελεί το πιο διαδεδομένο είδος συλλέκτη παγκοσμίως.

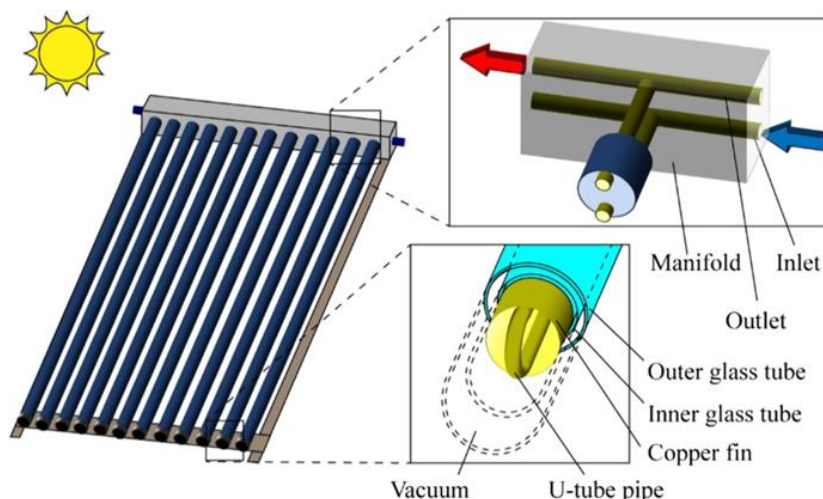
2.2.2 Συλλέκτης με σωλήνα κενού

Στον συλλέκτη κενού (Evacuated tube collector: ETC) ο απορροφητήρας και ο σωλήνας (heat pipe) βρίσκονται μέσα στο γυάλινο κάλυμμα σε συνθήκες κενού (vacuum). Ο απορροφητήρας μπορεί να είναι επίπεδος, *Σχήμα 2.5* ή μπορεί να είναι κυλινδρικός είτε με

απλή σωλήνα, είτε με σωλήνα τύπου U όπου ο ένας φέρει το κρύο και ο άλλος το ζεστό νερό, Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.5: Συστοιχία συλλεκτών κενού με επίπεδο απορροφητήρα [2.9]



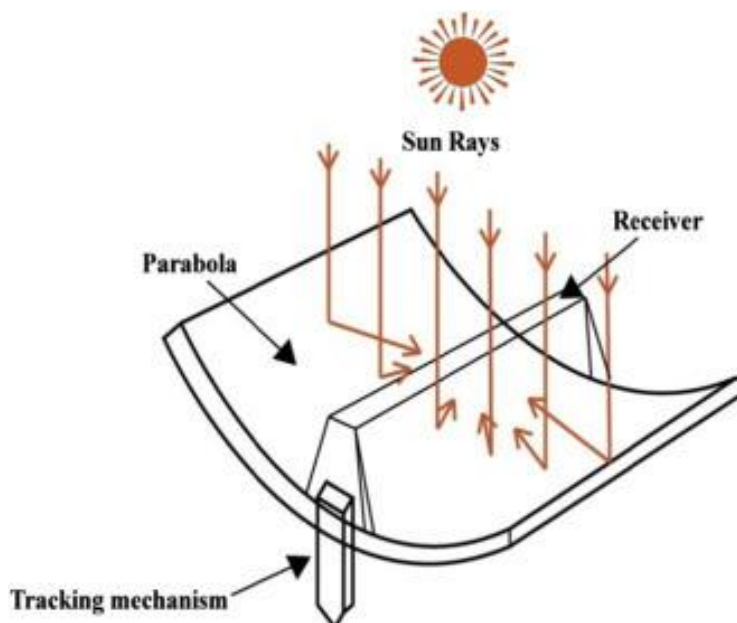
Σχήμα 2.6: Συστοιχία συλλεκτών κενού με αγωγό τύπου U [2.9]

Το πλεονέκτημα αυτού του συλλέκτη είναι ότι οι απώλειες συναγωγής απορροφητήρα προς το κάλυμμα είναι αμελητέες, οπότε αυξάνεται η απόδοση τους. Σημειώνεται ότι πρέπει να δίνεται έμφαση στην διατήρηση του κενού με την καλή μόνωση και την αποφυγή διείσδυσης υγρασίας που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση. Όσον αφορά τις εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 100°C μέχρι και 200°C με εργαζόμενο μέσο νερό υπό πίεση ή κάποιο θερμικό έλαιο αλλά κυρίως επιλέγεται σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες όπου υπερिσχύει σε απόδοση από τον επίπεδο συλλέκτη, ισοσταθμίζοντας το υψηλότερο του κόστος [2.10].

2.2.3 Επιμήκης παραβολικός συλλέκτης

Ο παραβολικός κατοπτρικός συλλέκτης (Parabolic Through Collector: PTC) ανήκει στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συλλεκτών και το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια εστίασης, αυξάνοντας κατά πολύ την ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο. Στην πορεία της εργασίας επιλέγεται συλλέκτης από αυτό το είδος συλλεκτών οπότε ακολουθεί εκτενέστερη, σε σχέση

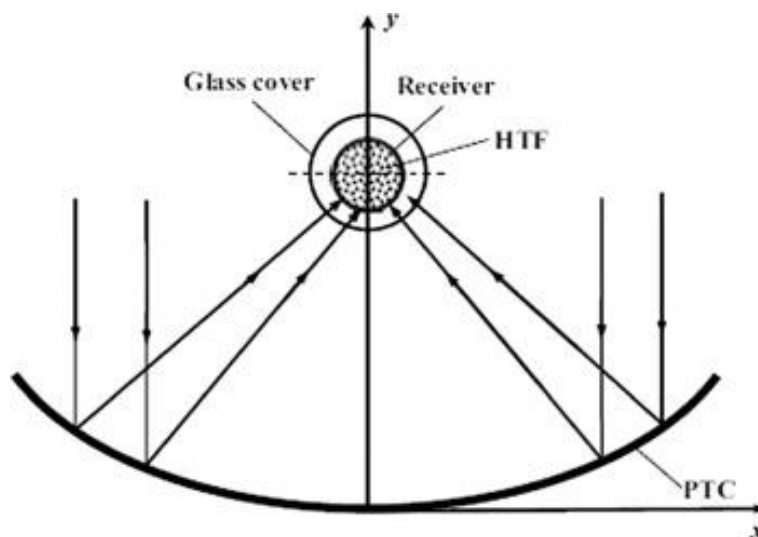
με τους υπόλοιπους συλλέκτες, ανάλυση των μερών, εργαζόμενου μέσου και εφαρμογών του. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα μέρη θα αναλυθούν ο ανακλαστήρας ή κάτοπτρο, ο σωλήνας κενού με τον απορροφητήρα και το κάλυμμα και ο μηχανισμός στήριξης- παρακολούθησης (tracking mechanism) *Σχήμα 2.7.*



Σχήμα 2.7: Σχηματική απεικόνιση παραβολικού συλλέκτη [2.11]

Ανακλαστήρας

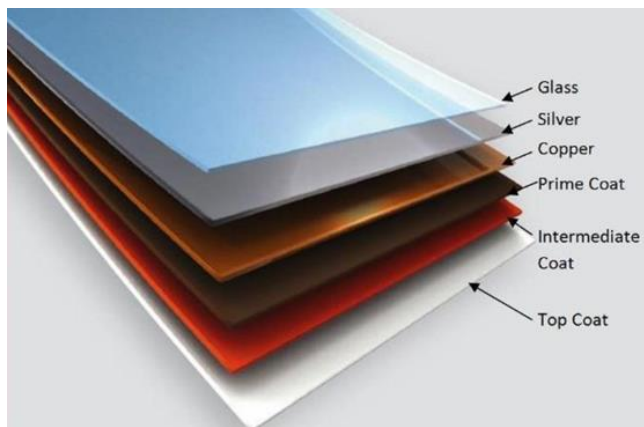
Ονομάζεται διαφορετικά και κάτοπτρο και έχει γεωμετρία παραβολής, έτσι ώστε όταν οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν πάνω του να ανακλώνται στην εστιακή γραμμή *Σχήμα 2.8.*



Σχήμα 2.8: Κατεύθυνση ακτίνων όταν ανακλώνται στο κάτοπτρο [2.12]

Η ανακλαστικότητα εξαρτάται από το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό του ανακλαστήρα. Τα συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις στρώσεις του είναι γυαλί, ασήμι και χαλκός τα οποία διαμορφώνονται με κατάλληλη κάμψη, *Σχήμα 2.9.* Τυπική τιμή του πάχους του ανακλαστήρα

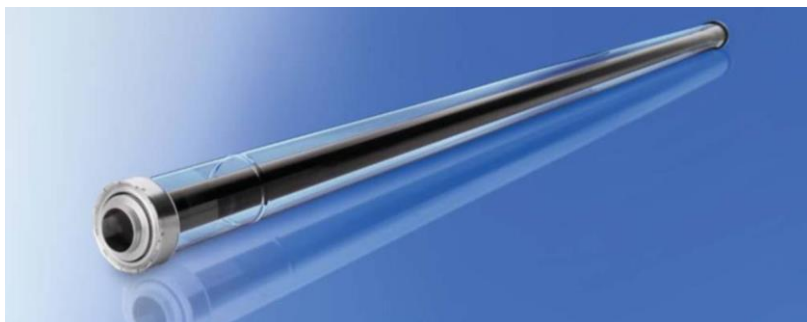
είναι 4 με 5mm και η μέση ανακλαστικότητα 93,5% [2.4]. Στόχος είναι να μειωθεί το πάχος το οποίο όμως δημιουργεί προβλήματα αντοχής σε πλύσιμο και απομάκρυνση της σκόνης.



Σχήμα 2.9: Στρώσεις ανακλαστήρα [2.4]

Σωλήνας κενού

Ο σωλήνας κενού αποτελεί την πιο συχνή επιλογή σε αυτού του είδους συλλέκτες καθώς επιτυγχάνει πολύ μικρές απώλειες θερμότητας και σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα δύο βασικά μέρη είναι το κάλυμμα και ο απορροφητήρας μεταξύ των οποίων επικρατούν συνθήκες κενού Σχήμα 2.10.



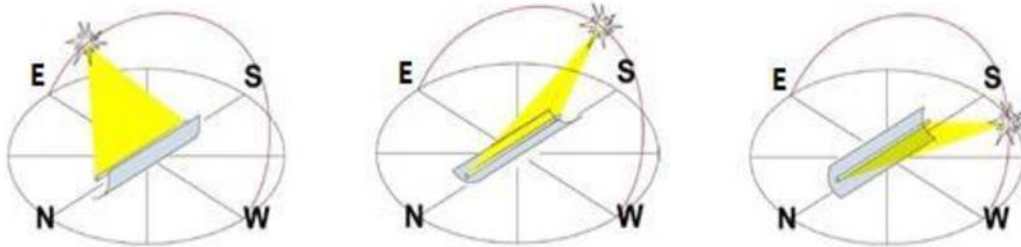
Σχήμα 2.10: Σωλήνας κενού [2.13]

Βασικά χαρακτηριστικά του απορροφητήρα είναι ο συντελεστής εκπομπής που καθορίζει τις απώλειες ακτινοβολίας και ο συντελεστής απορρόφησης που καθορίζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφά. Οι σύγχρονοι επιλεκτικοί απορροφητές απορροφούν με συντελεστή απορρόφησης μεγαλύτερο από 90% και ακτινοβολούν με συντελεστή εκπομπής της τάξης του 10%. Όσον αφορά το κάλυμμα βασικό του χαρακτηριστικό είναι ο συντελεστής απορρόφησης με τιμές μεγαλύτερες από 90% για την μείωση των οπτικών απωλειών.

Μηχανισμός στήριξης-παρακολούθησης

Ο μηχανισμός αυτός του παραβολικού συλλέκτη κυρίως είναι υπεύθυνος για την διατήρηση σταθερότητας σε ισχυρά φορτία ανέμου. Εκτός από την στήριξη όμως παρέχει και δυνατότητα παρακολούθησης του ήλιου, έτσι ώστε να είναι δυνατή κάθε στιγμή η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας με τον βέλτιστο τρόπο. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη στους παραβολικούς συλλέκτες και στην πράξη υλοποιείται με δύο τρόπους, με τοποθέτηση του άξονα του συλλέκτη στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (E-W orientation) με

παρακολούθηση στον άξονα Βορρά-Νότου (N-S tracking) ή με τοποθέτηση του άξονα του συλλέκτη στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (N-S orientation) με παρακολούθηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης (A-W tracking). Ο τρόπος που έχει επικρατήσει είναι με τον άξονα στον Βορρά-Νότο καθώς με αυτόν το σύστημα αποδίδει καλύτερα το καλοκαίρι, όπου το ηλιακό δυναμικό είναι μεγαλύτερο, οπότε αποδίδεται περισσότερη ενέργεια και σε ετήσια βάση. Στο παρακάτω Σχήμα 2.11 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο κινείται ο συλλέκτης με άξονα στη διεύθυνση Βορρά-Νότου κατά την διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 2.11: Περιστροφή συλλέκτη με σύστημα παρακολούθησης ήλιου [2.4]

Εργαζόμενο μέσο

Για εφαρμογές με θερμοκρασίες χαμηλότερες από 100°C το νερό αποτελεί την ενδεδειγμένη επιλογή για εργαζόμενο μέσο, ωστόσο αυτός ο συλλέκτης χρησιμοποιείται για εφαρμογές με μεγαλύτερες θερμοκρασίες όπου η χρήση νερού υπό πίεση θα ανέβαζε πολύ το κόστος λόγω του κόστους της εγκατάστασης. Επομένως, τα εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται είναι συνθετικά έλαια ή ορυκτέλαια. Αυτά μπορούν να φτάσουν έως 400 και 300°C αντίστοιχα. Σημαντικά κριτήρια επιλογής είναι η υψηλή τιμή της ειδικής θερμοχωρητικότητας ώστε να παραλαμβάνει μεγάλα ποσά θερμότητας, η υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να θερμαίνεται ομοιόμορφα σε μικρό χρόνο και η χαμηλή συνεκτικότητα, ώστε να μειώνεται το έργο που δαπανάται για την κυκλοφορία τους στις σωληνώσεις. Επίσης, σημαντικός δείκτης για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι αν θα χρησιμοποιηθεί σύστημα αποθήκευσης το οποίο παρουσιάζει λιγότερες απώλειες σε χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε συνήθως επιλέγεται κάποιο ορυκτέλαιο. Σημειώνεται ότι αυτά τα θερμικά έλαια δεν είναι τόσο φιλικά προς το περιβάλλον και μπορεί να προκαλέσουν οξειδωση όταν έρχονται σε επαφή με αέρα [2.14].

Εφαρμογές παραβολικών συλλεκτών

Η βασικότερη εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι παραβολικοί συλλέκτες είναι σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Αυτοί οι σταθμοί έχουν μέγεθος εγκατεστημένης ισχύος στο εύρος 30 έως 80MW με βαθμό απόδοσης στο εύρος 12 έως 16% και καταλαμβάνουν εκτάσεις επιφάνειας της τάξης $2 \cdot 10^6 m^2$ με την συλλεκτική επιφάνεια να αποτελεί το 25% αυτής [2.4]. Στο Σχήμα 2.12 δίνεται εικόνα πραγματικής εγκατάστασης εγκατεστημένης ισχύος 100 MW στην Αφρική με παραβολικούς συλλέκτες με τον άξονα του συλλέκτη στη διεύθυνση Βορρά-Νότου και παρακολούθηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης.

Μια άλλη εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται είναι για την παραγωγή ζεστού νερού αλλά για χώρους με μεγάλη ζήτηση, όπως κολυμβητήρια, εκπαιδευτικά ιδρύματα, σφραγιστικά ιδρύματα και αθλητικά κέντρα. Σε χώρους με μικρότερη ζήτηση οι επίπεδοι συλλέκτες αποτελούν καλύτερη επιλογή.

Επίσης, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας και σε συστήματα παραγωγής ψύξης, όπως μηχανές προσρόφησης και απορρόφησης. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν πιο αποδοτικά όταν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλή.

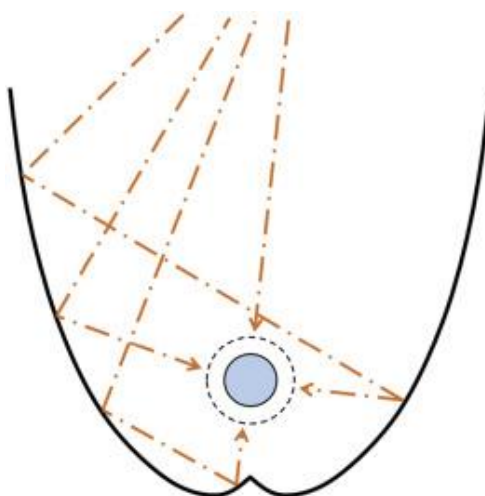
Τέλος, οι παραβολικοί συλλέκτες μπορούν να συνδεθούν με συστήματα αφαλάτωσης και αντλητικής άρδευσης σε απομονωμένες περιοχές με αυξημένη ξηρασία και υψηλή ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.12: Εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής 100MW με παραβολικούς συλλέκτες (Χίνα, Kaxu solar one) [2.15]

2.2.4 Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης

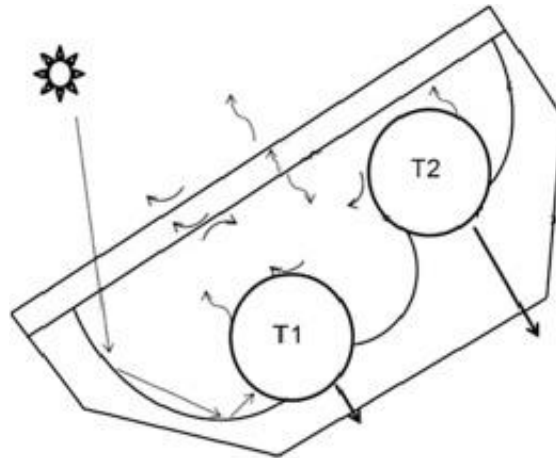
Ο σύνθετος παραβολικός συλλέκτης (Compound Parabolic Collector: CPC) ανήκει στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες χωρίς είδωλο. Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτή του απλού παραβολικού συλλέκτη, υπάρχει πάλι ένας ανακλαστήρας στον οποίο ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία και ένας δέκτης στον οποίο απορροφάται η ακτινοβολία. Η διαφορά έγκειται στον σχεδιασμό του ανακλαστήρα. Η γεωμετρία του κατόπτρου αποτελείται από δύο παραβολικά τμήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, το οποίο βοηθάει στην αποδοτικότερη λειτουργία χωρίς να χρειάζεται να γίνει παρακολούθηση του ήλιου.



Σχήμα 2.13: Γεωμετρία ανακλαστήρα σύνθετου παραβολικού συλλέκτη [2.16]

Όσον αφορά τις εφαρμογές καλύπτει μεγάλο εύρος, από οικιακές εφαρμογές για παραγωγή θερμού νερού μέχρι και βιομηχανικές με την προσθήκη σωλήνα κενού για θερμοκρασίες έως 250°C. Η ικανότητα του να εκμεταλλεύεται και μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας τον καθιστά ανταγωνιστική τεχνολογία για θερμοκρασίες κάτω από 100°C σε σχέση με τον επίπεδο συλλέκτη.

Άξια αναφοράς είναι η παραλλαγή του σύνθετου παραβολικού συλλέκτη στην οποία περιλαμβάνει στο εσωτερικό του ενσωματωμένο και δοχείο αποθήκευσης (Integrated collector storage: ICS) για να μπορεί να αποθηκεύει ζεστό νερό τις ώρες με πολύ ήλιο και χαμηλή ζήτηση για χρήση όταν υπάρχει απαίτηση. Στο Σχήμα 2.14 δίνεται η σχηματική του απεικόνιση, όπου T_1 , T_2 είναι τα δοχεία αποθήκευσης [2.17].



Σχήμα 2.14: Απεικόνιση σύνθετου παραβολικού συλλέκτη με ενσωματωμένο δοχείο αποθήκευσης [2.17]

2.2.5 Επιμηκής συλλέκτης Fresnel

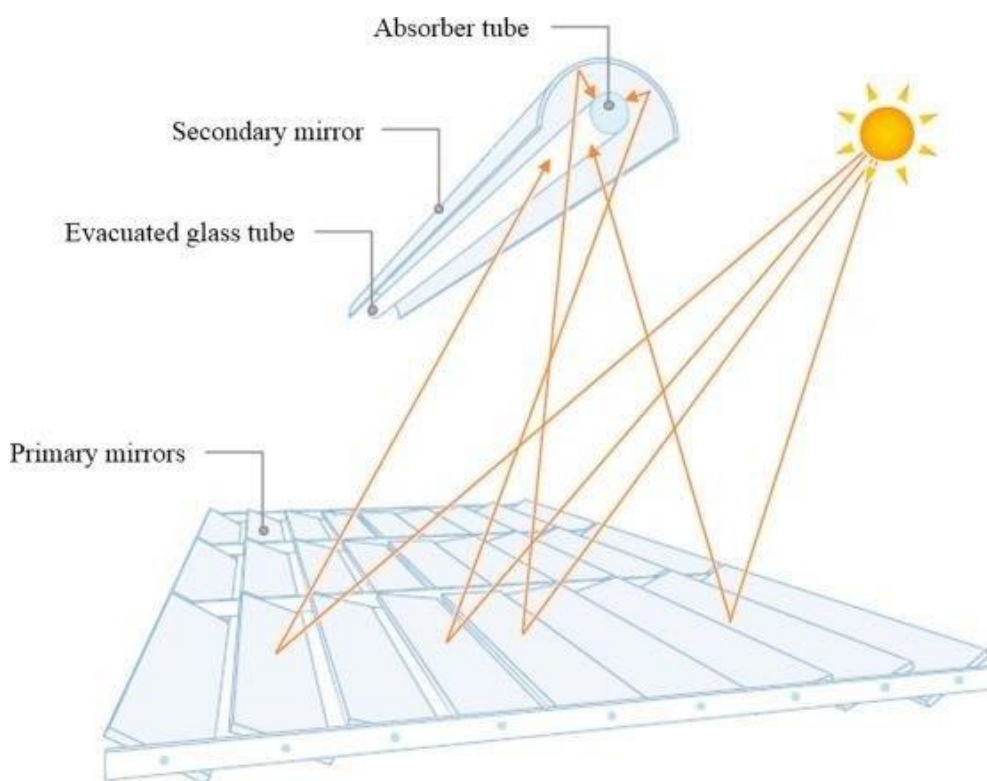
Ο συλλέκτης Fresnel ανήκει επίσης στους συγκεντρωτικούς συλλέκτες και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες μέχρι και 450°C. Όπως και οι παραβολικοί συλλέκτες χρησιμοποιεί και αυτός ανακλαστικό κάτοπτρο και σωλήνα απορρόφησης αλλά έχει και επιπλέον κάτοπτρα κυρίως επίπεδα και υπό συνθήκες ελαφρώς παραβολικά. Τυπικός συλλέκτης τύπου Fresnel δίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Τυπικός συλλέκτης τύπου Fresnel [2.18]

Πιο συγκεκριμένα, τα μέρη από τα οποία αποτελείται είναι τα πρωτεύοντα κάτοπτρα τα οποία λειτουργούν με σύστημα παρακολούθησης του ηλίου, κυρίως με άξονα στη διεύθυνση Βορρά-Νότου και παρακολούθηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης. Αυτά είναι υπεύθυνα για την ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον σωλήνα απορρόφησης. Επίσης, όταν δεν παραλείπεται για λόγους οικονομίας, υπάρχει το δευτερεύον ανακλαστικό κάτοπτρο το οποίο είναι συνήθως τύπου σύνθετου παραβολικού ανακλαστήρα. Αυτό είναι υπεύθυνο να συγκεντρώνει όλες τις ακτίνες που ξεφεύγουν, λόγω σκόνης ή της κίνησης του ήλιου και να τις στέλνει στον σωλήνα απορρόφησης Σχήμα 2.16. Αυτός είναι και ο λόγος που μπορούν να επιτευχθούν μεγάλοι λόγοι συγκέντρωσης έως και 40 [2.18].

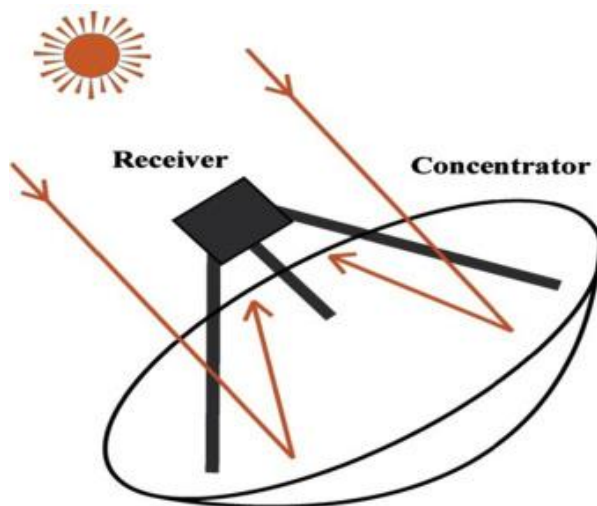
Σε σχέση με τον παραβολικό συλλέκτη, ο Fresnel λόγω των επίπεδων κατόπτρων έχει πιο απλό σύστημα εντοπισμού του ήλιου, έχει πιο μικρό βάρος και είναι πιο εύκολος στον καθαρισμό. Στα μειονεκτήματά του συμπεριλαμβάνονται ότι έχει χαμηλό οπτικό βαθμό απόδοσης λόγω του δευτερεύοντος κατόπτρου και ότι εμφανίζει προβλήματα σκίασης [2.19].



Σχήμα 2.16: Σχηματική απεικόνιση μερών συλλέκτη Fresnel [2.19]

2.2.6 Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (πίατο)

Ο συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο αποτελεί συγκεντρωτικό συλλέκτη, ο οποίος επιτυγχάνει μεγαλύτερους, από τον απλό παραβολικό και τον Fresnel, λόγους συγκέντρωσης, που οδηγούν σε θερμοκρασίες μέχρι και 1500°C. Αυτό οφείλεται στην γεωμετρία του ανακλαστήρα, ο οποίος έχει σχήμα σαν πιάτο (dish) που προκύπτει από γεωμετρία εκ περιστροφής παραβολής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17.



Σχήμα 2.17: Σχηματική απεικόνιση συλλέκτη τύπου πιάτου [2.11]

Αυτό το παραβολοειδές πιάτο (concentrator) περιλαμβάνει καθρέπτες που ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία στον δέκτη (receiver). Ο δέκτης είναι μια απορροφητική επιφάνεια, τοποθετημένη στην εστία της τρισδιάστατης παραβολής. Επίσης, τοποθετείται σε σύστημα στήριξης ή και παρακολούθησης ώστε να μην χάνεται ηλιακή ακτινοβολία και να επιτυγχάνεται βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης. Στα πλεονεκτήματα αυτών των συλλεκτών είναι ότι συχνά στην θέση του δέκτη τοποθετείται απευθείας μηχανή Stirling σε βιομηχανικές εφαρμογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας κατά πολύ τις απώλειες θερμότητας και αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης Σχήμα 2.18.

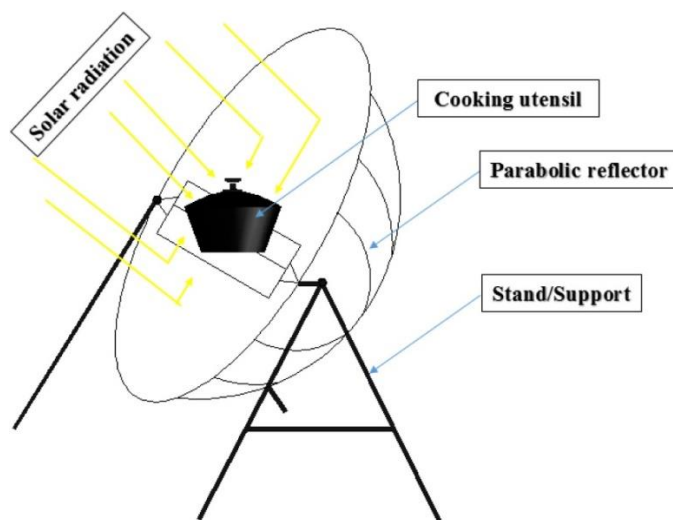


Σχήμα 2.18: Εγκατάσταση Eurodish με συλλέκτη τύπου Dish με μηχανή Stirling [2.20]

Στα μειονεκτήματα είναι ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, οπότε των αυξημένων απωλειών θερμότητας δεν είναι εύκολη η σύνδεση αυτού του τύπου συλλέκτη με κάποιο σύστημα αποθήκευσης [2.21].

Όσον αφορά τις εφαρμογές εκτός από την σύνδεση με μηχανή Stirling, μια πρωτοποριακή εφαρμογή είναι η χρήση αυτού του συλλέκτη για την παραγωγή ισχύος για μαγείρεμα (solar cooking). Σε αυτή τοποθετείται το δοχείο στην θέση του δέκτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Στην [2.22] εξετάστηκε η χρήση διφασικών υλικών στο δοχείο με την οποία μειώθηκε ο

χρόνος που χρειάστηκε για να φτάσει το νερό σε βρασμό από 120 λεπτά σε 90 λεπτά. Υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία και στο μέλλον με την αύξηση του βαθμού απόδοσης και την μείωση του κόστους μπορεί να αποτελέσει βασική εναλλακτική μαγειρέματος σε απομακρυσμένες περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό.



Σχήμα 2.19: Παραβολικό πιάτο για ηλιακό μαγείρεμα [2.23]

2.2.7 Ηλιακός πύργος

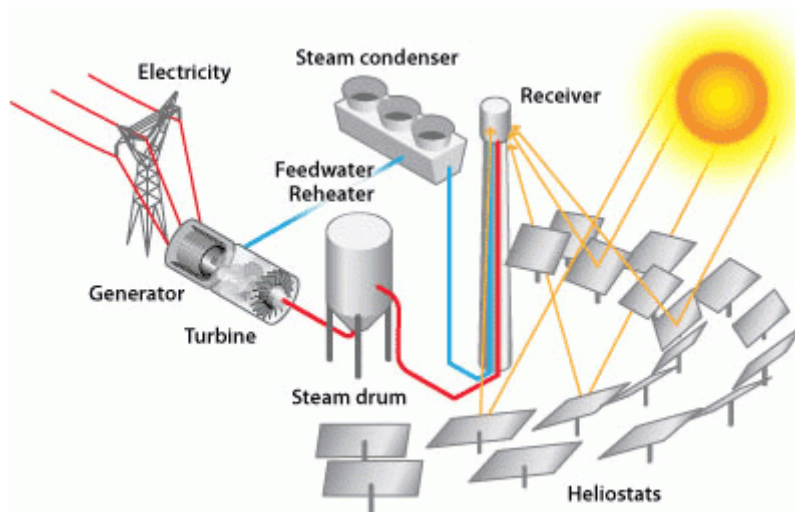
Ο ηλιακός πύργος (heliostat tower – solar tower) αποτελεί από τους συγκεντρωτικούς συλλέκτες αυτόν που μπορεί να επιτύχει τους μεγαλύτερους βαθμούς συγκέντρωσης και τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες μέχρι και 1800°C. Εικόνα από πραγματική εγκατάσταση δίνεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.20: Τυπική εγκατάσταση με ηλιακό πύργο με ισχύ 100MW [2.24]

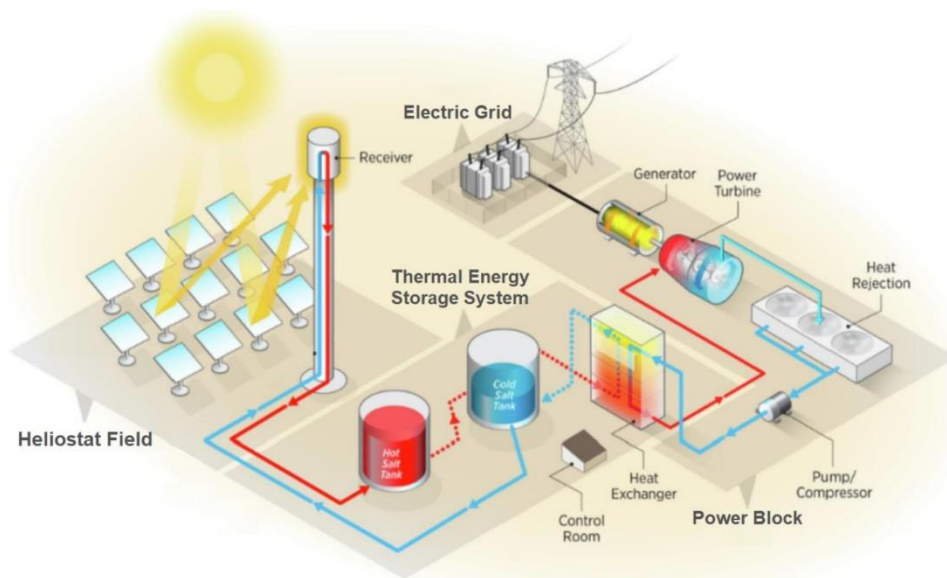
Τα μέρη που αποτελούν έναν ηλιακό πύργο είναι ελαφρώς διαφορετικά από τα προηγούμενα είδη συγκεντρωτικών συλλεκτών που παρουσιάστηκαν, αλλά η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια. Αποτελείται από τους ηλιοστάτες (heliostats), οι οποίοι είναι τα κάτοπτρα που συγκεντρώνουν την ακτινοβολία στον δέκτη. Η χωροταξία τους είναι σημαντική, ώστε να μην σκιάζονται μεταξύ τους. Ο δέκτης αυτή τη φορά βρίσκεται στην

κορυφή ενός πύργου. Σε αυτόν θερμαίνεται το μέσο μεταφοράς θερμότητας, σε πολλές εφαρμογές ατμός, ο οποίος μεταφέρεται στον στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21: Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κύκλο Rankine με ηλιακό πύργο [2.25]

Μια σημαντική εφαρμογή των ηλιακών πύργων είναι όταν συνδυάζονται με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που τους επιτρέπουν να αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ένα θερμό και ένα ψυχρό δοχείο με μέσο τηγμένο άλας (molten salt) για την αποθήκευση και ένας λέβητας ανάκτησης θερμότητας για την μεταφορά θερμότητας στον κύκλο Rankine όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22.



Σχήμα 2.22: Ηλιοστατικό πεδίο με αποθήκευση και κύκλο Rankine [2.26]

Τα πλεονεκτήματα χρήσης των ηλιακών πύργων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έναντι των άλλων συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση, κυρίως λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Ωστόσο, στα μειονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται η μεγάλη έκταση που καλύπτουν σε συνδυασμό με το ύψος του πύργου τα οποία έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

- [2.1] S. Robert, *Thermal Radiation Heat Transfer, Fourth Edition - Robert Siegel -*
- [2.2] Κ. Αντωνόπουλος, *Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα*. 2015.
- [2.3] J. Widén, “System Studies and Simulations of Distributed Photovoltaics in Sweden,” no. September 2017, 2010.
- [2.4] Ε. Μπέλλος, “Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια.” , Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ, 2016.
- [2.5] R. S. Subramanian, G. Kumaresan, R. Ajith, U. Sabarivasan, K. K. Gowthamaan, and S. Anudeep, “Performance analysis of modified solar still integrated with flat plate collector,” *Mater. Today Proc.*, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.409.
- [2.6] K. M. Pandey and R. Chaurasiya, “A review on analysis and development of solar flat plate collector,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 641–650, Jan. 01, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.078.
- [2.7] A. Jamar, Z. A. A. Majid, W. H. Azmi, M. Norhafana, and A. A. Razak, “A review of water heating system for solar energy applications,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76. Elsevier Ltd, pp. 178–187, Aug. 01, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028.
- [2.8] M. U. Siddiqui and S. A. M. Said, “A review of solar powered absorption systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42. Elsevier Ltd, pp. 93–115, Feb. 01, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.014.
- [2.9] M. J. Muhammad, I. A. Muhammad, N. A. Che Sidik, and M. N. A. W. Muhammad Yazid, “Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76. Elsevier Ltd, pp. 6–15, Aug. 01, 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.009.
- [2.10] H. Olfian, S. S. M. Ajarostaghi, and M. Ebrahimnataj, “Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids,” *Sol. Energy*, vol. 211, pp. 265–282, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.09.056.
- [2.11] M. U. H. Joardder, P. K. Halder, M. A. Rahim, and M. H. Masud, “Solar pyrolysis: Converting waste into asset using solar energy,” in *Clean Energy for Sustainable Development: Comparisons and Contrasts of New Approaches*, Elsevier Inc., 2017, pp. 213–235.
- [2.12] G. K. Manikandan, S. Iniyar, and R. Goic, “Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review,” *Applied Energy*, vol. 235. Elsevier Ltd, pp. 1524–1540, Feb. 01, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.048.
- [2.13] “SCHOTT PTR®70 | SCHOTT North America.”
<https://www.us.schott.com/csp/english/schott-solar-ptr-70-receivers.html>.
- [2.14] M. J. Montes, A. Abánades, J. M. Martínez-Val, and M. Valdés, “Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 12, pp. 2165–2176, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.08.010.

- [2.15] “Power from the sun: An overview of CSP in South Africa - EE Publishers.”
<https://www.ee.co.za/article/power-from-the-sun-an-overview-of-csp-in-south-africa.html>.
- [2.16] M. Orosz and R. Dickes, “Solar thermal powered Organic Rankine Cycles,” in *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*, Elsevier Inc., 2017, pp. 569–612.
- [2.17] V. Pranesh, R. Velraj, S. Christopher, and V. Kumaresan, “A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications,” *Solar Energy*, vol. 187. Elsevier Ltd, pp. 293–340, Jul. 15, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.04.056.
- [2.18] R. Bernhard *et al.*, *Linear Fresnel Collector Demonstration on the PSA, Part I – Design, Construction and Quality Control*. 2008.
- [2.19] H. Al Smadi, *Comparison of Linear Fresnel Collector and Parabolic Trough Collector Fields*. 2018.
- [2.20] “EuroDish system - PROMES.”
<https://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=eurodish-system#prettyPhoto>.
- [2.21] E. Deniz, “Solar-Powered Desalination,” in *Desalination Updates*, InTech, 2015.
- [2.22] R. Senthil, “Enhancement of productivity of parabolic dish solar cooker using integrated phase change material,” *Mater. Today Proc.*, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.197.
- [2.23] A. Herez, M. Ramadan, and M. Khaled, “Review on solar cooker systems: Economic and environmental study for different Lebanese scenarios,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 421–432, Jan. 01, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.021.
- [2.24] “Shouhang bags 100 MW Concentrated Solar Power Tower project in China – HELIOSCSP.” <http://helioscsp.com/shouhang-bags-100-mw-concentrated-solar-power-tower-project-in-china/>.
- [2.25] “Power Tower System Concentrating Solar Power Basics | Department of Energy.”
<https://www.energy.gov/eere/solar/articles/power-tower-system-concentrating-solar-power-basics>.
- [2.26] A. B. Awan, K. V. V. Chandra Mouli, and M. Zubair, “Performance enhancement of solar tower power plant: A multi-objective optimization approach,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 225, p. 113378, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113378.

3 Θερμική αποθήκευση

3.1 Εισαγωγή αποθήκευσης ενέργειας

Γενικά, ως αποθήκευση ενέργειας ορίζεται η αποθήκευση οποιασδήποτε μορφής ενέργειας με οποιοδήποτε τρόπο, η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί σε επόμενη χρονική στιγμή για να εκτελεστεί μια χρήσιμη διεργασία. Όλες οι μορφές ενέργειας μπορεί να είναι είτε δυναμική ενέργεια (χημική και βαρυτική) είτε κινητική, ηλεκτρική και θερμική. Κάθε μια μορφή αποθηκεύεται με την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας και την εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας [3.1]. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται ορισμένοι τρόποι αποθήκευσης της ενέργειας, άλλοι με ευρεία εφαρμογή και άλλοι υπό διερεύνηση [3.2].



Σχήμα 3.1: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας [3.2]

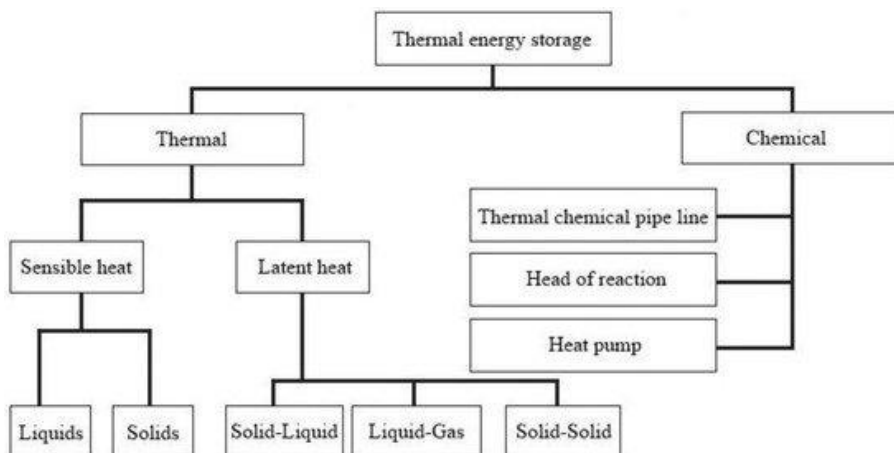
Στην παρούσα εργασία θα γίνει διερεύνηση της θερμικής αποθήκευσης ενέργειας καθώς αυτή αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη μέθοδο αποθήκευσης σε ηλιακά συστήματα.

3.2 Ορισμός θερμικής αποθήκευσης

Ως αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage: TES) ορίζεται η προσωρινή συγκράτηση της θερμικής ενέργειας με τη μορφή θερμών ή ψυχρών ουσιών για μεταγενέστερη χρήση. Με την συνέργεια συστημάτων TES με συστήματα που περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι ενεργειακές απαιτήσεις οι οποίες ποικίλλουν καθημερινά, μπορούν να ομαλοποιηθούν. Με την συνεισφορά τους στην ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης έχουν την δυνατότητα να βελτιώσουν τον συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης ενώ παράλληλα μειώνονται και τα τρέχοντα κόστη, το κόστος επένδυσης και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων [3.2].

Η θερμική αποθήκευση χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες (Σχήμα 3.2):

- αποθήκευση αισθητής θερμότητας (Sensible Heat Storage: SHS)
- αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (Latent Heat Storage: LHS)
- θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας (Thermochemical Heat Storage)



Σχήμα 3.2: Κατηγοριοποίηση θερμικής αποθήκευσης ενέργειας [3.3]

Οι δύο πρώτες είναι οι πιο διαδεδομένες μορφές αποθήκευσης, με την θερμοχημική να βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο εφαρμογής.

3.2.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας

Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας πραγματοποιείται με την αύξηση της θερμοκρασίας ενός μέσου που χρησιμοποιείται για την διαδικασία. Το μέσο αυτό μπορεί να είναι υγρό ή στερεό ανάλογα με την εφαρμογή και ουσιαστικά υφίστανται μεταβολή στην εσωτερική του ενέργεια. Η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 3-1:

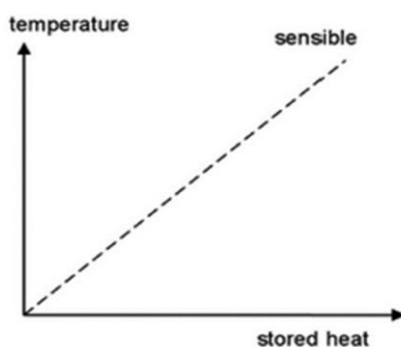
$$Q_{SHS} = \int_{T_l}^{T_h} m C_p dT = m \bar{C}_p (T_h - T_l) \quad 3-1$$

όπου m η παροχή μάζας του μέσου, C_p η θερμοχωρητικότητα του, \bar{C}_p η μέση θερμοχωρητικότητα βασισμένη στην υψηλή T_h και χαμηλή θερμοκρασία T_l . Σε υγρό μέσο η μάζα μπορεί να εκφραστεί σε όγκο μέσω της πυκνότητας όπως φαίνεται στην εξίσωση 3-2:

$$Q_{SHS} = \rho (V_{strg} - V_{eqt}) \bar{C}_p (T_h - T_l) \approx \rho V_{strg} \bar{C}_p (T_h - T_l) \quad 3-2$$

όπου ρ η πυκνότητα του μέσου, V_{strg} ο συνολικός όγκος αποθήκευσης του δοχείου, V_{eqt} ο όγκος που καταλαμβάνεται από τον υπόλοιπο εξοπλισμό στο εσωτερικό του δοχείου [3.4].

Επομένως, με αυτό τον τρόπο αποθήκευσης η μεταβολή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται γραμμικά σε σχέση με την θερμότητα, με την κλίση της ευθείας να εξαρτάται από την θερμοχωρητικότητα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



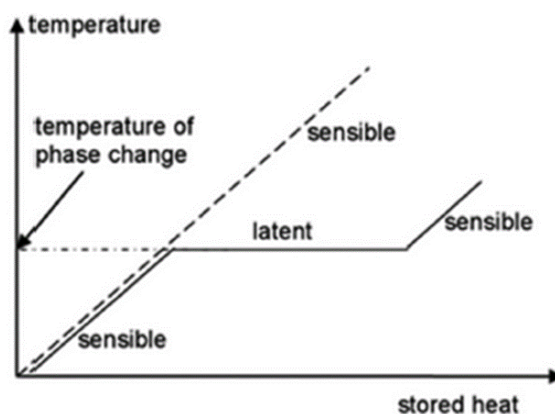
Σχήμα 3.3: Μεταβολή θερμοκρασίας κατά την αισθητή αποθήκευση θερμότητας [3.2]

3.2.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας

Η λανθάνουσα θερμότητα είναι η θερμότητα που απελευθερώνεται ή απορροφάται από ένα σώμα ή ένα θερμοδυναμικό σύστημα όταν η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι η αλλαγή της κατάστασης της ύλης, δηλαδή, η διαδικασία μετάβασης φάσης κατά την οποία η θερμοκρασία του συστήματος παραμένει σταθερή ακόμη και αν η θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται από το σύστημα. Η λανθάνουσα θερμότητα που σχετίζεται με την τήξη ενός στερεού ή την κατάψυξη ενός υγρού ονομάζεται θερμότητα τήξης (heat of fusion). Η λανθάνουσα θερμότητα που σχετίζεται με την εξάτμιση ενός υγρού ή ενός στερεού ή συμπυκνωμένου ατμού ονομάζεται θερμότητα εξάτμισης (heat of vaporization). Αριθμητικά, η λανθάνουσα θερμότητα ενός υλικού μπορεί να εκφραστεί όπως φαίνεται στην εξίσωση 3-3, [3.5]:

$$Q_{LHS} = mC_p dT(s) + mL + mC_p dT \quad 3-3$$

όπου m είναι η μάζα του διφασικού υλικού (Phase change material: PCM), C_p η θερμοχωρητικότητα, L η ενθαλπία τήξης και dT η θερμοκρασιακή διαφορά. Ο πρώτος και ο τρίτος όρος στην εξίσωση εκφράζουν την αισθητή θερμότητα στην στερεά και υγρή φάση αντίστοιχα, ενώ ο δεύτερος εκφράζει την λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Αυτές οι διαφορετικές φάσεις εμφανίζονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας για την περίπτωση αλλαγής φάσης από στερεό σε υγρό [3.2]

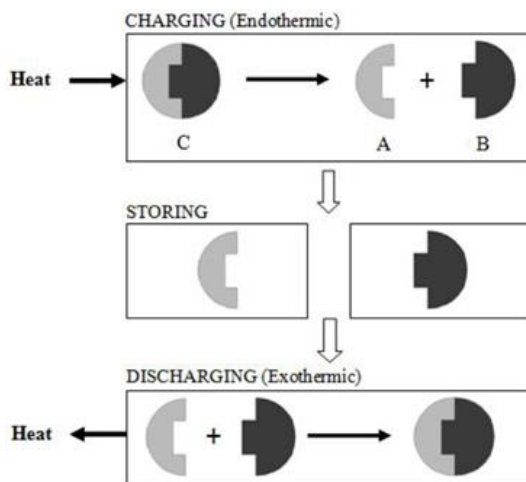
3.2.3 Θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας

Σε αυτή την μορφή αποθήκευσης περιλαμβάνονται χημικές αντιδράσεις οι οποίες είναι απαραίτητο να είναι αναστρέψιμες. Πιο συγκεκριμένα, η βασική αρχή δίνεται στην παρακάτω χημική εξίσωση 3-4:



Το θερμοχημικό υλικό C με την παρουσία θερμότητας διασπάται στα συστατικά A, B τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν ξεχωριστά. Η αντίθετη αντίδραση λαμβάνει χώρα όταν τα A, B συνδυάζονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το C . Σε αυτή την αντίδραση απελευθερώνεται ενέργεια η οποία αποτελεί την ανακτώμενη ενέργεια αποθήκευσης. Ουσιαστικά ένας κύκλος θερμοχημικής αποθήκευσης περιλαμβάνει τρεις φάσεις, την φόρτιση, την αποθήκευση και την αποφόρτιση όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.5.

Η διαδικασία της φόρτισης είναι ενδόθερμη, δηλαδή ενέργεια απορροφάται προκειμένου να διασπαστεί το υλικό C . Στην διαδικασία της αποθήκευσης οι θερμικές απώλειες είναι ελάχιστες και σημειώνονται μόνο εξαιτίας της αποσύνθεσης των υλικών [3.6].

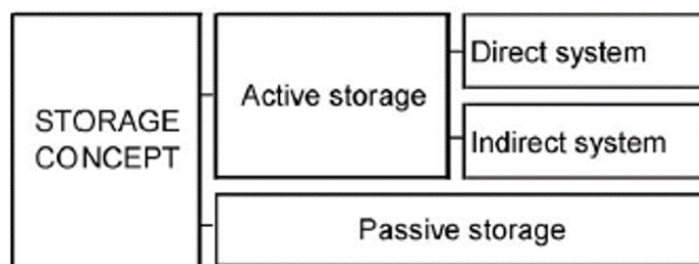


Σχήμα 3.5: Φάσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την θερμοχημική αποθήκευση [3.6]

Τα πλεονεκτήματα αυτού του μηχανισμού αποθήκευσης είναι η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα αποθήκευσης και η απεριόριστη διάρκεια διατήρησης της αποθήκευσης χωρίς απώλειες για θερμοκρασίες κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, για εφαρμογές εποχιακής αποθήκευσης. Ωστόσο, το επίπεδο ανάπτυξης του μηχανισμού αναστρεψιμότητας της θερμοχημικής αντίδρασης (reversible thermochemical reaction:RTR) δεν είναι αρκετά υψηλό. Η έρευνα σε αυτό το πεδίο είναι σε αρχικά στάδια και οι εφαρμογές είναι σε πειραματικό στάδιο και πιλοτικό επίπεδο, σημειώνεται όμως ότι υπάρχει προοπτική η οποία θα φαίνεται ακόμα πιο έντονα όσο οι οικονομίες κινούνται περισσότερο προς μια οικονομία πραγματικά βασισμένη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [3.1]. Στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται περαιτέρω αυτός ο τρόπος αποθήκευσης.

3.3 Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης

Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας σε ηλιακές εγκαταστάσεις με υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να ταξινομηθούν σε ενεργητικά και παθητικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Ταξινόμηση συστημάτων αποθήκευσης ανάλογα με το δοχείο [3.1]

Τα ενεργητικά συστήματα χαρακτηρίζονται από την εξαναγκασμένη μετάδοση θερμότητας στο μέσο αποθήκευσης. Σε αυτά τα συστήματα μπορεί να χρησιμοποιούνται ένα ή δύο δοχεία και είτε το ρευστό που διακινεί την θερμότητα (heat thermal fluid: HTF) να είναι αυτό που χρησιμοποιείται και για την αποθήκευση (direct system), είτε να χρησιμοποιείται δεύτερο ρευστό για την θερμική αποθήκευση (indirect system). Στα παθητικά συστήματα το HTF διέρχεται από το δοχείο μόνο για να φορτίσει ή να αποφορτίσει το μέσο που χρησιμοποιείται στην αποθήκευση. Συνήθως χρησιμοποιούνται σαν μέσα αποθήκευσης στερεά ή διφασικά υλικά (Phase Change Material: PCM) [3.1].

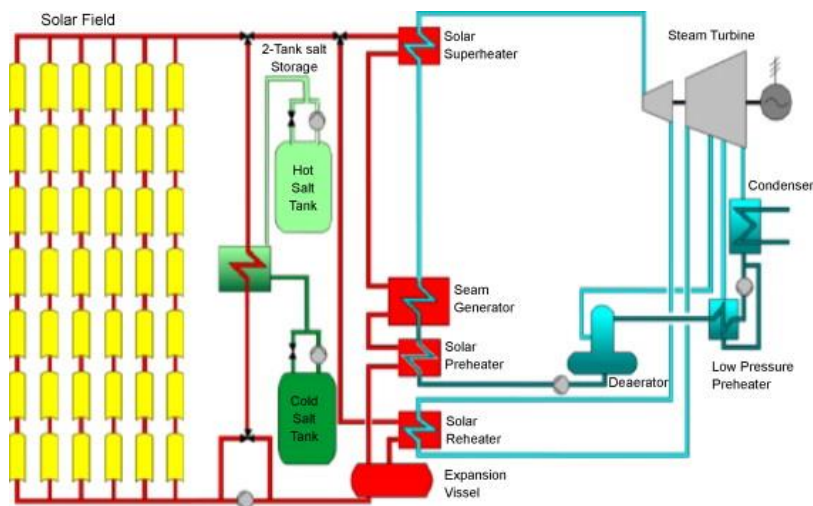
3.3.1 Ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης

Στα ενεργητικά άμεσα συστήματα αποθήκευσης επειδή χρησιμοποιείται το ίδιο μέσο για την μεταφορά της θερμότητας και την αποθήκευση είναι φανερό ότι πρέπει να πληροί κάποιες προδιαγραφές προκειμένου να μπορεί να ανταπεξέλθει σε όλες τις διεργασίες. Όσον αφορά τα υγρά μέσα έχουν εξεταστεί αρκετά, με την έρευνα να συγκλίνει για υψηλές θερμοκρασίες σε θερμικά λάδια (thermal oils) και τηγμένα άλατα (molten salts). Πιο συγκεκριμένα, τα τηγμένα άλατα αποτελούν την πιο συχνή επιλογή σε ηλιακές εγκαταστάσεις επειδή είναι υγρά σε ατμοσφαιρική πίεση, είναι αποτελεσματικά και έχουν χαμηλό κόστος σαν μέσα αποθήκευσης, οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι συμβατές με τη σημερινή υψηλή πίεση και θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού και είναι μη εύφλεκτα και μη τοξικά. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η ήδη υπάρχουσα εμπειρία από την χρήση τους στη βιομηχανία χημικών και μετάλλων ως υγρό μεταφοράς θερμότητας [3.7]. Το μειονέκτημα τους είναι ότι παγώνουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας (120-220 °C) οπότε δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αντιψυκτική προστασία των σωληνώσεων κατά την διάρκεια της νύχτα και κατά την εκκίνηση της εγκατάστασης αυξάνοντας τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας. Ένα παράδειγμα πραγματικής εγκατάστασης που χρησιμοποίησε ενεργητικό σύστημα αποθήκευσης με δύο δοχεία και τηγμένα άλατα είναι η εγκατάσταση Solar Two η οποία προέκυψε από τροποποίηση της εγκατάστασης Solar One το 1995, *Σχήμα 3.7*.



Σχήμα 3.7: Πραγματική εικόνα της εγκατάστασης Solar Two, αριστερά είναι το δοχείο χαμηλής και δεξιά το υψηλής θερμοκρασίας [3.8]

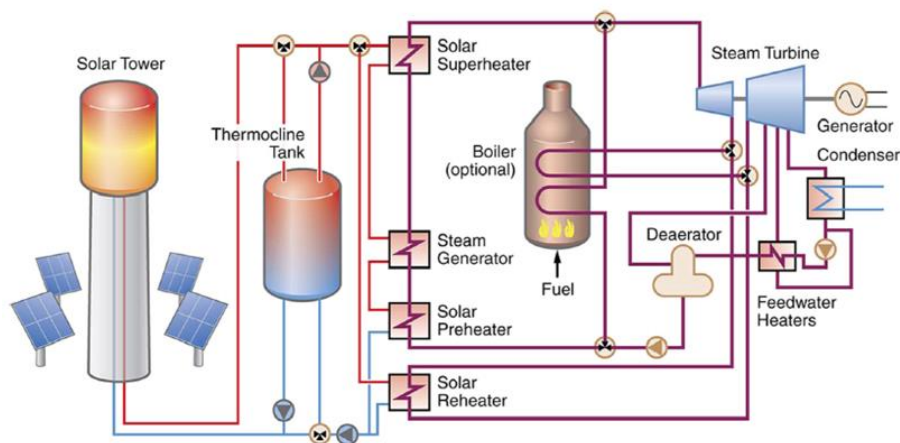
Η σχηματική απεικόνιση της παραπάνω εγκατάστασης δίνεται στο *Σχήμα 3.8*. Ο εναλλάκτης λειτουργεί σαν εναλλάκτης αντιρροής. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης θερμικής αποθήκευσης, ένα μέρος του λαδιού από τον συλλέκτη κατευθύνεται στον εναλλάκτη θερμότητας όπου ψύχεται από την ονομαστική θερμοκρασία εισόδου 391°C έως την θερμοκρασία εξόδου περίπου 298°C. Το νιτρικό άλας από το δοχείο χαμηλής θερμοκρασίας, θερμαίνεται από θερμοκρασία εισόδου 291°C σε θερμοκρασία εξόδου 384°C και στη συνέχεια αποθηκεύεται στο δοχείο υψηλής θερμοκρασίας. Κατά την διάρκεια του κύκλου αποφόρτισης το λάδι και το άλας ακολουθούν την αντίστροφη πορεία οπότε πλέον η θερμότητα μεταφέρεται στο λάδι και αυτό παρέχει τη θερμική ενέργεια που είναι απαραίτητη για τη γεννήτρια ατμού [3.1].



Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης Solar Two [3.1]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης δύο δοχείων αποθήκευσης είναι ότι δίνεται η δυνατότητα να αυξηθεί η θερμοκρασία της εγκατάστασης έως και 500°C αυξάνοντας και τον βαθμό απόδοσης του κύκλου που έχει επιλεχθεί. Στις χαμηλότερες θερμοκρασίες θεωρείται μια χαμηλού ρίσκου προσέγγιση όσον αφορά την θερμική καταπόνηση του εξοπλισμού καθώς είναι διακριτά τα μέρη όπου υπάρχουν υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος του υλικού αποθήκευσης και μεταφοράς καθώς απαιτείται μεγάλη ποσότητα, η αύξηση του όγκου της εγκατάστασης λόγω των δύο δοχείων, καθώς και η αύξηση των απωλειών στις υψηλές θερμοκρασίες [3.9].

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα μια εναλλακτική αποτελεί η χρήση υγρού εργαζόμενου μέσου σε ένα δοχείο αποθήκευσης. Σε αυτό αξιοποιείται η φυσική θερμική διαστρωμάτωση, λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού. Όταν χρησιμοποιείται μόνο ένα εργαζόμενο μέσο τότε η μέθοδος αποθήκευσης ονομάζεται Single Medium Thermocline: SMT, Σχήμα 3.9.



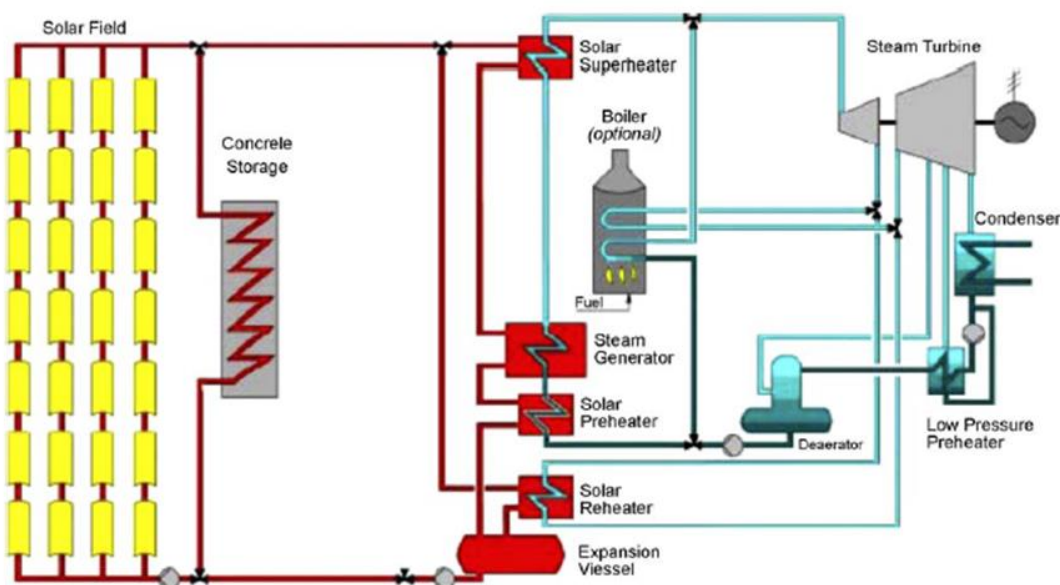
Σχήμα 3.9: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης με θερμοκλίνη [3.9]

Το ρευστό υψηλής θερμοκρασίας εισέρχεται στο δοχείο από την επάνω μεριά, ενώ το ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας εξέρχεται από την κάτω μεριά. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται διαστρωμάτωση των θερμοκρασιών ή διαφορετικά, θερμικές ζώνες οι οποίες σταθεροποιούνται και διατηρούνται [3.10]. Σε αυτή την τεχνολογία είναι σημαντικό για να

μην υπάρχει μεγάλη μείωση της απόδοσης να υπολογιστούν και να ελεγχθούν σωστά, φαινόμενα διάχυσης, τύρβης και ανάμειξης που προκαλούν ανομοιομορφίες στα προφίλ των θερμοκρασιών [3.11]. Βελτίωση σε πολλές περιπτώσεις του SMT αποτελεί η επιπλέον προσθήκη στερεών υλικών (Dual Media Thermocline: DMT). Για υψηλές θερμοκρασίες τα στερεά υλικά που εξετάζονται είναι συνήθως τσιμέντο και κεραμικά, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή μηχανική αντίσταση στις κυκλικές θερμικές καταπονήσεις. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι αντικαθιστούν μέρος της ποσότητας του μέσου μεταφοράς θερμότητας, μειώνοντας το κόστος καθώς πρόκειται για φθηνότερα υλικά [3.12].

3.3.2 Παθητικά συστήματα αποθήκευσης

Στα παθητικά συστήματα το μέσο μεταφοράς θερμότητας διέρχεται μέσα από το δοχείο μόνο για να φορτίσει και να αποφορτίσει το σύστημα. Μέσα στο δοχείο χρησιμοποιούνται σαν μέσα αποθήκευσης θερμότητας κυρίως στερεά υλικά όπως τσιμέντο και κεραμικά ή διφασικά υλικά. Όσον αφορά τη χρήση στερεών υλικών η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται από τον συλλέκτη με το μέσο μεταφοράς θερμότητας στο δοχείο αποθήκευσης που περιλαμβάνει το στερεό υλικό. Μέσα σε αυτό το υλικό υπάρχουν σωλήνες που συνολικά λειτουργούν σαν εναλλάκτης θερμότητας στον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα από το μέσο μεταφοράς θερμότητας στο στερεό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Σχηματική απεικόνιση παθητικού συστήματος αποθήκευσης με τσιμέντο [3.1]

Σημειώνεται ότι ο αριθμός των σωληνώσεων και η διάμετρος τους αποτελούν σημαντικές σχεδιαστικές μεταβλητές τόσο για την ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας όσο και για το κόστος. Πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το χαμηλό κόστος των εργαζόμενων μέσων, ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας μέσα και έξω από το στερεό μέσο εξαιτίας της καλής επαφής μεταξύ στερεού μέσου και σωληνώσεων, ενώ μειονεκτήματα αποτελούν το κόστος του εναλλάκτη και η μακροπρόθεσμη αστάθεια [3.1].

Όσον αφορά τα διφασικά υλικά, η γενική ιδέα είναι παρόμοια με αυτή των στερεών υλικών, με την διαφορά ότι το μέσο αποθήκευσης έχει θερμοκρασία τήξης μέσα στο εύρος των θερμοκρασιών φόρτισης, αποφόρτισης του μέσου μεταφοράς θερμότητας [3.1]. Εκτενής ανάλυση της αποθήκευσης με διφασικά υλικά δίνεται παρακάτω.

3.4 Υλικά αλλαγής φάσης ή Διφασικά υλικά

Τα υλικά αλλαγής φάσης ή διφασικά υλικά (Phase Change Materials - PCM) είναι ουσίες με υψηλή θερμοκρασία τήξης που λιώνουν και σταθεροποιούνται σε μια ορισμένη θερμοκρασία και είναι σε θέση να αποθηκεύσουν και να ελευθερώσουν μεγάλα ποσά λανθάνουσας ενέργειας. Βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τα υλικά αλλαγής φάσης σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης με αισθητή θερμότητα είναι η υψηλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας θερμότητα και το μικρό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος, αφού η διεργασία αλλαγής φάσης γίνεται σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Παράλληλα, δεν υπάρχει βαθμιαία μείωση στην θερμοκρασία καθώς το υλικό αποφορτίζεται [3.13].

3.4.1 Ιδιότητες διφασικών υλικών

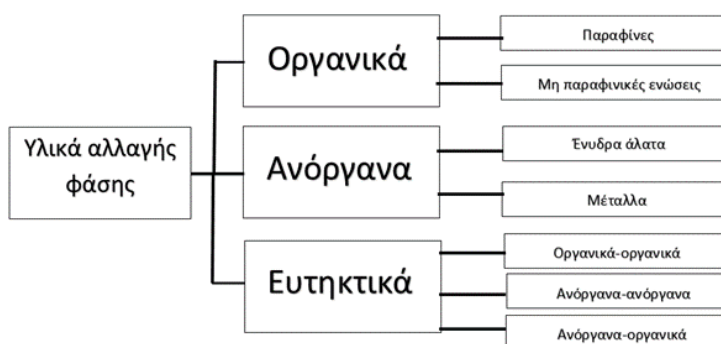
Αρχικά, σημειώνεται όσον αφορά την κατάσταση του διφασικού υλικού ότι αν και είναι δυνατές και οι τρεις παρακάτω μετατροπές, από στερεό σε αέριο, από υγρό σε αέριο και από στερεό σε υγρό, μόνο η τρίτη είναι αυτή που πρακτικά χρησιμοποιείται καθώς δεν μεταβάλλεται σημαντικά ο όγκος λόγω της παραγωγής αερίου το οποίο περιπλέκει την εγκατάσταση. Όσον αφορά τις υπόλοιπες ιδιότητες στην βιβλιογραφία υπάρχουν εκτενείς αναφορές για τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των PCM όπως αναφέρονται παρακάτω [3.14], [3.15], [3.16], [3.17]:

- ❖ Φυσικές ιδιότητες:
 - κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής
 - μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας
 - υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε επιτυγχάνονται γρήγορα οι διαδικασίες φόρτισης, αποφόρτισης
 - σταθερότητα σε μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης
 - μικρό πόσο υπόψυξης (subcooling), ώστε να παραμένουν ίδιες θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης
- ❖ Χημικές ιδιότητες:
 - να μην είναι τοξικά, να μην είναι εύφλεκτα, να μην είναι διαβρωτικά και να μην εκρηγνυται, ώστε να επιτυγχάνεται ασφάλεια και αποφυγή ζημιών στον περιβάλλοντα χώρο
 - πλήρης αναστρεψιμότητα του κύκλου τήξης, στερεοποίησης
- ❖ Κινητικές ιδιότητες:
 - υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης κρυστάλλων (crystallization rate)
 - υψηλή εμπύρινη αναλογία (nucleation rate) ώστε να αποφεύγεται η υπόψυξη της υγρής φάσης
- ❖ Τεχνικές ιδιότητες
 - μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης
 - μικρή πίεση ατμών
 - συμβατότητα με τον υπόλοιπο εξοπλισμό
- ❖ Οικονομικές ιδιότητες
 - επαρκή και εύκολη διαθεσιμότητα, χαμηλό κόστος
 - ανακυκλώσιμα για να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον

Σημειώνεται ότι στην πράξη δεν υπάρχουν διαθέσιμα διφασικά υλικά που να πληρούν όλα τα παραπάνω. Κάθε κατηγορία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία λαμβάνονται υπόψη για κάθε εφαρμογή.

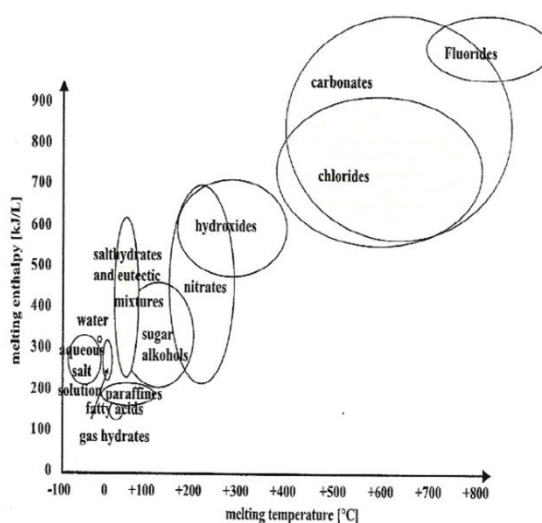
3.4.2 Κατηγοριοποίηση διφασικών υλικών

Ο αριθμός των διφασικών υλικών που είναι διαθέσιμος είναι μεγάλος καθιστώντας αναγκαία την διερεύνηση ανάλογα με την εφαρμογή. Γενικά τα διφασικά υλικά ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, οργανικά, ανόργανα και τα ευτηκτικά μίγματα. Τα οργανικά ταξινομούνται επιμέρους σε παραφινικές και μη παραφινικές ενώσεις, δεν εμφανίζουν ασύμπτωτη τήξη, δηλαδή τήκονται και πήζουν άμεσα χωρίς διαχωρισμό φάσης και είναι μη διαβρωτικά. Τα ανόργανα ταξινομούνται σε ένυδρα άλατα και μέταλλα, εμφανίζουν μεγαλύτερη ενθαλπία αλλαγής φάσης αλλά και προβλήματα διάβρωσης, υπόψυξης και διαχωρισμού φάσεων. Τα ευτηκτικά είναι μίγματα που έχουν τέτοιες αναλογίες υλικών ώστε να τήκονται και να πήζουν ταυτόχρονα, χωρίς να υπάρχει διαχωρισμός. Αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οργανικά-οργανικά, οργανικά-ανόργανα, ανόργανα-ανόργανα. Απεικόνιση αυτής της ταξινόμησης δίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Κατηγοριοποίηση των διφασικών υλικών

Για θερμοκρασίες αποθήκευσης της τάξης των 300°C που αξιολογούνται στην παρούσα εργασία τα διφασικά υλικά που είναι πιο κατάλληλα είναι τα ένυδρα άλατα, μέταλλα, ευτηκτικά άλατα και ευτηκτικά μέταλλα όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.12 [3.13].



Σχήμα 3.12: Κατηγοριοποίηση διφασικών υλικών σε συνάρτηση με θερμοκρασία και ενθαλπία τήξης [3.18]

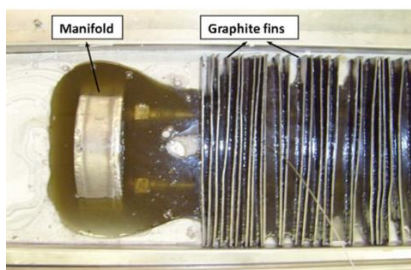
Σημειώνεται ότι υπάρχουν ορισμένες αδυναμίες σε αυτά τα διφασικά υλικά οι οποίες μπορούν να καλυφθούν με ειδικό σχεδιασμό όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

3.4.3 Δυσκολίες χρήσης διφασικών υλικών και τρόποι αντιμετώπισης

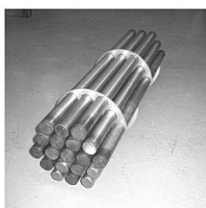
Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζεται ιδιαίτερα στα ένυδρα άλατα είναι το φαινόμενο της υπόψυξης (subcooling) ή υπέρψυξης (supercooling). Ιδανικά ένα υλικό αλλαγής φάσης τήκεται και στερεοποιείται στην ίδια θερμοκρασία. Στην πράξη όμως κάποια υλικά δεν στερεοποιούνται αμέσως οπότε η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από την θερμοκρασία τήξης. Πρόκειται για μια μετασταθή κατάσταση που αντιμετωπίζεται με την προσθήκη μικρής ποσότητας παραγόντων πυρήνωσης [3.18]. Ακόμη ένα σημαντικό πρόβλημα στα ένυδρα άλατα και ιδιαίτερα στα μίγματα που αποτελούνται από παραπάνω από δύο συστατικά είναι ο διαχωρισμός των φάσεων, φαινόμενο γνωστό ως phase separation ή semi congruent melting. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει λόγω της τήξης των κατώτερων συστατικών του μίγματος, το οποίο δημιουργεί μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συνεχή μείωση της ικανότητας θερμικής αποθήκευσης των αλάτων όσο αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης του υλικού. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο συχνά χρησιμοποιούνται κολλοειδή προσθετικά (gelling additives) τα οποία δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους δημιουργώντας μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού [3.18].

Επιπλέον, τα περισσότερα διφασικά υλικά εκτός από τα μεταλλικά παρουσιάζουν χαμηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας το οποίο οδηγεί σε χαμηλή απόδοση στην μεταφορά θερμότητας μεταξύ του θερμικού μέσου και του μέσου αποθήκευσης. Για να βελτιωθεί η θερμική αγωγιμότητα ορισμένοι τρόποι είναι οι ακόλουθοι [3.13]:

- προσθήκη υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στα διφασικά υλικά
- επέκταση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας με την προσθήκη πτερυγίων από γραφίτη, αλουμίνιο, σίδηρο και χαλκό, *Σχήμα 3.13*, ή με την χρήση κάψουλων στις οποίες τοποθετείται το διφασικό υλικό (encapsulation method), *Σχήμα 3.14*.
- προσθήκη επιπλέον σωληνώσεων μέσα στο δοχείο
- εφαρμογή περισσότερων από ένα διφασικών υλικών με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης



Σχήμα 3.13: Μονάδα αποθήκευσης με πτερύγια από γραφίτη [3.13]



Σχήμα 3.14: Κυλινδρικές κάψουλες που χρησιμοποιούνται για εργαστηριακές δοκιμές [3.13]

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

- [3.1] A. Gil *et al.*, “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1. pp. 31–55, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.035.
- [3.2] H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordehghah, D. Ahmad, and T. Lipinski, “Latent thermal energy storage technologies and applications: A review,” *Int. J. Thermofluids*, vol. 5–6, p. 100039, 2020, doi: 10.1016/j.ijft.2020.100039.
- [3.3] I. Sarbu and C. Sebarchievici, “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage,” *Sustainability*, vol. 10, no. 2, p. 191, 2018, doi: 10.3390/su10010191.
- [3.4] M. Ebrahimi and A. Keshavarz, “CCHP Thermal Energy Storage,” in *Combined Cooling, Heating and Power*, Elsevier, 2015, pp. 183–188.
- [3.5] P. K. Singh Rathore, S. K. Shukla, and N. K. Gupta, “Potential of microencapsulated PCM for energy savings in buildings: A critical review,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 53. Elsevier Ltd, p. 101884, Feb. 01, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101884.
- [3.6] A. H. Abedin, “A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems,” *Open Renew. Energy J.*, vol. 4, no. 1, pp. 42–46, 2011, doi: 10.2174/1876387101004010042.
- [3.7] D. Kearney *et al.*, “Engineering aspects of a molten salt heat transfer fluid in a trough solar field,” *Energy*, vol. 29, no. 5–6, pp. 861–870, Apr. 2004, doi: 10.1016/S0360-5442(03)00191-9.
- [3.8] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L. F. Cabeza, “State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1. pp. 56–72, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.036.
- [3.9] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, and J. F. Fourmigué, “A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems,” *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 628–654, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.032.
- [3.10] F. G. F. Qin *et al.*, “Thermocline stability criterions in single-tanks of molten salt thermal energy storage,” *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 816–821, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.048.
- [3.11] C. Mira-Hernández, S. M. Flueckiger, and S. V. Garimella, “Numerical simulation of single- and dual-media thermocline tanks for energy storage in concentrating solar power plants,” in *Energy Procedia*, Jan. 2014, vol. 49, pp. 916–926, doi: 10.1016/j.egypro.2014.03.099.
- [3.12] Y. Filali Baba, A. Al Mers, and H. Ajdad, “Dimensionless model based on dual phase approach for predicting thermal performance of thermocline energy storage system: Towards a new approach for thermocline thermal optimization,” *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 440–455, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.102.
- [3.13] M. Liu, W. Saman, and F. Bruno, “Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2118–2132, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.020.

- [3.14] A. Reyes, L. Henríquez-Vargas, J. Vásquez, N. Pailahueque, and G. Aguilar, “Analysis of a laboratory scale thermal energy accumulator using two-phases heterogeneous paraffin wax-water mixtures,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 41–51, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.007.
- [3.15] C. N. Elias and V. N. Stathopoulos, “A comprehensive review of recent advances in materials aspects of phase change materials in thermal energy storage,” in *Energy Procedia*, Mar. 2019, vol. 161, pp. 385–394, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.101.
- [3.16] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*. 2008.
- [3.17] R. Singh, S. Sadeghi, and B. Shabani, “Thermal conductivity enhancement of phase change materials for low-temperature thermal energy storage applications,” *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/en12010075.
- [3.18] H. Paksoy, *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design (Nato Science Series II:)*.

4 Λειτουργία οργανικού κύκλου Rankine

4.1 Ορισμός οργανικού κύκλου Rankine

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Rankine αποτελεί ένα σύνολο διεργασιών πάνω σε ένα εργαζόμενο μέσο, συνήθως νερό, σε ένα κλειστό κύκλο μέσω των οποίων θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και ύστερα κατά πάσα πιθανότητα σε ηλεκτρική. Ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) αποτελεί ουσιαστικά μια παραλλαγή του κύκλου Rankine με την διαφοροποίηση να εμφανίζεται στο εργαζόμενο μέσο. Στον ORC επιλέγεται κάποιο οργανικό ρευστό – δηλαδή τα μόρια του ρευστού περιλαμβάνουν ένα μόριο άνθρακα- για χρήση σε συνθήκες χαμηλότερης πίεσης και θερμοκρασίας σε σχέση με τον Rankine [4.1].

4.2 Ιστορικά στοιχεία οργανικού κύκλου Rankine

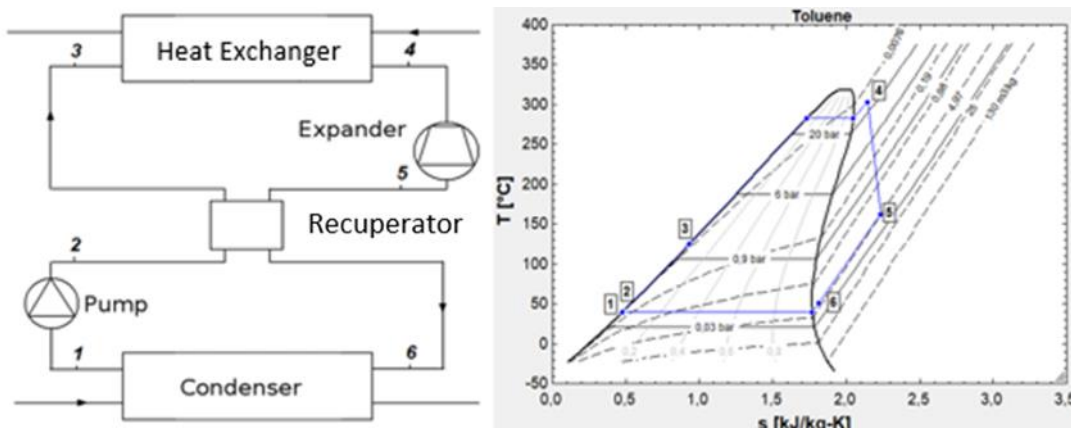
Ο κύκλος Rankine αναπτύχθηκε από τον σκωτσέζο μηχανικό και φυσικό William John Macquorn Rankine (5 Ιουλίου 1820 - 24 Δεκεμβρίου 1872). Εκείνος έθεσε τα θεμέλια μέσα από τα εγχειρίδια του γύρω από την λειτουργία της ατμομηχανής και των κινητήρων θερμότητας.

Ενώ οι εφαρμογές με τον κύκλο Rankine στον οποίο χρησιμοποιούνταν κυρίως νερό άνθιζαν, δεν άργησαν να εμφανιστούν και οι παραλλαγές με την χρήση διαφορετικών εργαζόμενων μέσων. Την εποχή εκείνη για να μπορέσει κάποιος να οδηγήσει ένα, για παράδειγμα, σκάφος απαιτούνταν η παρουσία μηχανικού καθώς η κυβέρνηση απαιτούσε άδεια για βρασμό νερού σε ατμομηχανές. Δεν απαιτούσε όμως και για καύση βενζίνης, οπότε ο Frank Ofeldt το 1883 κατασκεύασε μηχανές που χρησιμοποιούσαν μια μορφή βενζίνης την νάφθα. Μάλιστα το ίδιο το εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιούνταν και ως λιπαντικό για τα κινούμενα μέρη. Δεν κατάφερε βέβαια να μειώσει και το κόστος για τα δεδομένα της εποχής καθώς για να αγοράσει κάποιος το 1880 ένα σκάφος με μήκος 6,5 μέτρα έπρεπε να καταβάλει ποσό μιάμιση φορά κοντά στον ετήσιο μισθό αυτών που το κατασκεύαζαν. Χάρη βέβαια στην νομοθεσία αποτέλεσε εμπορική επιτυχία μεταξύ της άρχουσας τάξης.

Πιο συστηματική ανάπτυξη γύρω από τον οργανικό κύκλο Rankine εμφανίστηκε κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα. Οι Willsie και Boyle χρησιμοποίησαν αιθέρα, διοξείδιο του θείου και αμμωνία σε μελέτη στο πεδίο της παραγωγής ενέργειας μέσω ηλιακής ήδη από την περίοδο 1902-1908. Την περίοδο 1970-1980 πραγματοποιήθηκαν πολλές μονάδες παραγωγής ενέργειας με συνδυασμό ηλιακών και ORC κύκλου σε Αμερική, Γαλλία και Ιταλία με ισχύ από μερικά kW έως και 150 kW (Coolidge Αριζόνα 1979). Καθοριστικό ρόλο είχε η Ιταλική σχολή που ιδρύθηκε στη δεκαετία του '70 στο Politecnico di Milano από τον καθηγητή Gianfranco Angelino και τους συναδέλφους του, καθηγητή E. Macchi και καθηγητή M. Gaia. Την περίοδο 1976-1984 σχεδίασαν και βοήθησαν στην ανάπτυξη δεκαεσσάρων μονάδων με εύρος έως και 500 kW εκμεταλλεύομενοι ποικίλες πηγές ενέργειας όπως ηλιακή, γεωθερμία και βιομηχανική απορριπτόμενη θερμότητα [4.2], [4.3], [4.4].

4.3 Αρχή λειτουργίας οργανικού κύκλου Rankine

Η αρχή λειτουργίας του οργανικού κύκλου δεν διαφέρει από αυτήν του κύκλου Rankine. Το ρευστό στην γενική περίπτωση αντλείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, εξατμίζεται ή και υπερθερμαίνεται, διέρχεται από ένα στρόβιλο, έπειτα από τον συμπυκνωτή όπου επανέρχεται στην αρχική κατάσταση [4.5]. Στο *Σχήμα 4.1* δίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα στο οποίο υπάρχει και ανακομιστής, μία συνήθης παραλλαγή, σε συνδυασμό με το διάγραμμα T-S για ένα οργανικό ρευστό το Toluene.



Σχήμα 4.1: Μονογραμμικό σχήμα και διάγραμμα για ORC με ανακομιστή

Παρακάτω επεξηγούνται τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένας κύκλος ORC:

- Τροφοδοτική αντλία (Pump): είναι υπεύθυνη για την αύξηση της πίεσης του εργαζόμενου μέσου. Από αυτήν επιτυγχάνεται η μέγιστη πίεση του κύκλου. Συνήθως τροφοδοτείται με ενέργεια από ηλεκτροκινητήρα η ενέργεια του οποίου παράγεται από τον ίδιο τον κύκλο και αφαιρείται σαν ιδιοκαταναλώσεις.
- Εναλλάκτης θερμότητας (Heat Exchanger: HEX): πρόκειται για τον χώρο όπου το εργαζόμενο μέσο προσλαμβάνει όλη την θερμική ενέργεια μέσω συναλλαγής θερμότητας με ένα κλειστό κύκλωμα θερμικού ελαίου. Το εργαζόμενο μέσο αρχικά προθερμαίνεται στον οικονομητήρα (Economizer: ECO), έπειτα ατμοποιείται στον ατμοποιητή (Evaporator: EVAP) και τέλος ανεβάζει την θερμοκρασία του-υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή (Superheater: SH).
- Στρόβιλος (Turbine): εκεί πραγματοποιείται η εκτόνωση της μεγάλης πίεσης του εργαζόμενου μέσου. Ο στρόβιλος συνδέεται με κάποιο φορτίο συνήθως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι όταν το μέσο είναι οργανικό ο στρόβιλος παρουσιάζει αντοχή στη διάβρωση λόγω των χαμηλότερων στροφών και πιέσεων.
- Συμπυκνωτής (Condenser): πρόκειται ουσιαστικά για άλλον ένα εναλλάκτη ο οποίος από την μια μεριά έρχεται σε επαφή είτε με αέρα, είτε με νερό και από την άλλη με την αέρια κατάσταση του εργαζόμενου μέσου. Το εργαζόμενο μέσο συμπυκνώνεται απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον.

Οι θέσεις που λαμβάνει το εργαζόμενο μέσο στον ORC είναι:

- Θέση 1: το εργαζόμενο μέσο έχει μόλις εξέλθει από τον συμπυκνωτή σε κατάσταση κορεσμένου υγρού σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία.
- Θέση 2: το εργαζόμενο μέσο έχει συμπιεστεί από την αντλία και εξέρχεται με αυξημένη πίεση.
- Θέση 3: το εργαζόμενο μέσο έχει αυξήσει την θερμοκρασία του χάρη στον ανακομιστή χωρίς να μεταβάλλει την πίεση του.
- Θέση 4: το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού με την ανώτατη πίεση και θερμοκρασία.
- Θέση 5: το εργαζόμενο μέσο έχει εκτονωθεί από τον στρόβιλο προσδίδοντας την θερμική του ενέργεια την οποία ο στρόβιλος μετατρέπει σε μηχανικό έργο.

- Θέση 6: το εργαζόμενο μέσο απορρίπτει θερμότητα στον ανακομιστή για να θερμάνει το ψυχρό ρεύμα πριν μπει ξανά στον συμπυκνωτή για να συνεχίσει ο κύκλος.

Οι μεταβολές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Μεταβολή 1-2: Συμπύεση
- Μεταβολή 2-3: Ισόθλιπτη θέρμανση
- Μεταβολή 3-4: Ισόθλιπτη θέρμανση
- Μεταβολή 4-5: Εκτόνωση
- Μεταβολή 5-6: Ισόθλιπτη ψύξη
- Μεταβολή 6-1: Ισόθλιπτη ψύξη

4.4 Εργαζόμενα μέσα στον ORC

Ο κύκλος ORC χρησιμοποιείται κυρίως όταν η θερμοκρασία ή και η θερμική ενέργεια είναι περιορισμένη. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που ενώ στον κύκλο Rankine χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο το νερό, στις χαμηλότερες θερμοκρασίες (δηλαδή στον ORC) επιλέγονται οργανικά μέσα. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση οργανικών ρευστών ξεπερνιούνται εμπόδια όπως πολυβάθμιοι, δαπανηροί και πολύπλοκοι στρόβιλοι καθιστώντας την λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες μια τεχνικά και οικονομικά δυνατή επιλογή [4.6].

4.4.1 Θερμοδυναμικές παράμετροι εργαζόμενου μέσου

Όσον αφορά τις θερμοδυναμικές παραμέτρους το εργαζόμενο μέσο πρέπει να παρουσιάζει υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ατμών ώστε να αποφευχθεί ακριβός στρόβιλος και συμπυκνωτής και θερμοκρασιακή σταθερότητα ώστε να αποφευχθεί χημική αστάθεια σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τέλος καίριας σημασίας είναι και η κλίση της καμπύλης ατμών κορεσμού. Αν είναι αρνητική θα πρέπει ο ατμός να υπερθερμαίνεται ώστε να αποφεύγονται σταγονίδια στον στρόβιλο ενώ αν είναι θετική γίνεται απαραίτητη η χρήση ανακομιστή για βελτίωση του βαθμού απόδοσης [4.7].

4.4.2 Περιβαλλοντικές παράμετροι εργαζόμενου μέσου

Εκτός από τις θερμοδυναμικές παραμέτρους λαμβάνονται υπόψη και οι παρακάτω περιβαλλοντικές-κανονιστικές παράμετροι επιλογής που χρησιμοποιήθηκαν πρώτα από την βιομηχανία κλιματισμού και ψύξης και ύστερα και από την βιομηχανία παραγωγής ενέργειας [4.8]:

- διαθεσιμότητα σε ένα λογικό κόστος, το οποίο γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις μεγάλων εγκαταστάσεων. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν εγκαταστάσεις που εκμεταλλεύονται γεωθερμική ενέργεια αρκετών MW όπου το εργαζόμενο μέσο έχει σημαντικό ρόλο στον συνολικό κόστος εγκατάστασης
- μη αναφλεξιμότητα
- μη τοξικότητα
- συμβατότητα με τα υπόλοιπα υλικά (ελαστομερή, λιπαντικά έλαια, μέταλλα κ.α)
- περιβαλλοντική επίδοση η οποία υπολογίζεται από δύο δείκτες την επίδραση στην στοιβάδα του όζοντος (Ozone Depletion Potential: ODP σύμφωνα με την οδηγία 2037/2000 EU) και την δυναμική του ρευστού στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Global Warming Potential: GWP σύμφωνα με την οδηγία 842/2006 EU). Ο δείκτης ODP ορίζεται ως το κλάσμα της συνολικής απώλειας όζοντος εξαιτίας του δοσμένου ρευστού προς την συνολική απώλεια όζοντος που θα χανόταν για την ίδια μάζα

CFC-11. Ο GWP συγκρίνει την ποσότητα της θερμότητας που παγιδεύεται από μια συγκεκριμένη μάζα αερίου σε σχέση με την ποσότητα θερμότητας που θα παγιδεύονταν με την ίδια μάζα CO₂.

4.4.3 Οργανικά ρευστά ως εργαζόμενα μέσα

Σημειώνεται ότι είναι πρακτικά αδύνατο να ικανοποιηθούν όλες οι παραπάνω παράμετροι με ένα οργανικό μέσο κατάλληλο για εφαρμογές ORC. Οι βιομηχανίες κλιματισμού και ψύξης χρησιμοποίησαν για αρκετές δεκαετίες ως εργαζόμενα μέσα χλωροφθοράνθρακες (chloro-fluoro-carbons: CFC) τα οποία είχαν πολύ καλά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά ήταν μη εύφλεκτα και μη τοξικά, ωστόσο είχαν υψηλό ODP. Για αυτό το λόγο απαγορεύτηκαν από το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ με την πλήρη απαγόρευση να λαμβάνει χώρα από το 2010. Απαγόρευση έχει τεθεί και στους υδροχλωροφθοράνθρακες (hydro-chloro-fluoro-carbons: HCFCs) για τον ίδιο λόγο, με την φάση της απόσυρσής τους να έχει ξεκινήσει από το 1996 και στόχο να ολοκληρωθεί μέχρι το 2030. Την θέση αυτών πήραν οι υδροφθοράνθρακες (hydro-fluoro-carbons: HFCs) οι οποίοι δεν επηρεάζουν το όζον, είναι επίσης μη τοξικοί, μη αναφλέξιμοι και ανακυκλώσιμοι. Ωστόσο, οι νέοι κανόνες της σύγχρονης εποχής επιβάλλουν χαμηλότερες τιμές του GWP στους HFCs καθιστώντας το πρόβλημα ανοικτό στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι δείκτες ODP και GWP ορισμένων ρευστών για τα οποία θα γίνει θερμοδυναμική διερεύνηση στην συνέχεια της εργασίας δίνονται παρακάτω, Πίνακας 4.1.

Εργαζόμενο μέσο	GWP	ODP	ASHRAE 34 Safety Group
Cyclohexane	-	0	A3
Toluene	3	0	B3
Isohexane	4-6	0	-
MDM	-	0	A2
n-pentane	4-6	0	-
Isopentane	4-6	0	600 A3
R134a	1430	0	1000 A1

Πίνακας 4.1: Περιβαλλοντικοί δείκτες εργαζόμενων μέσων

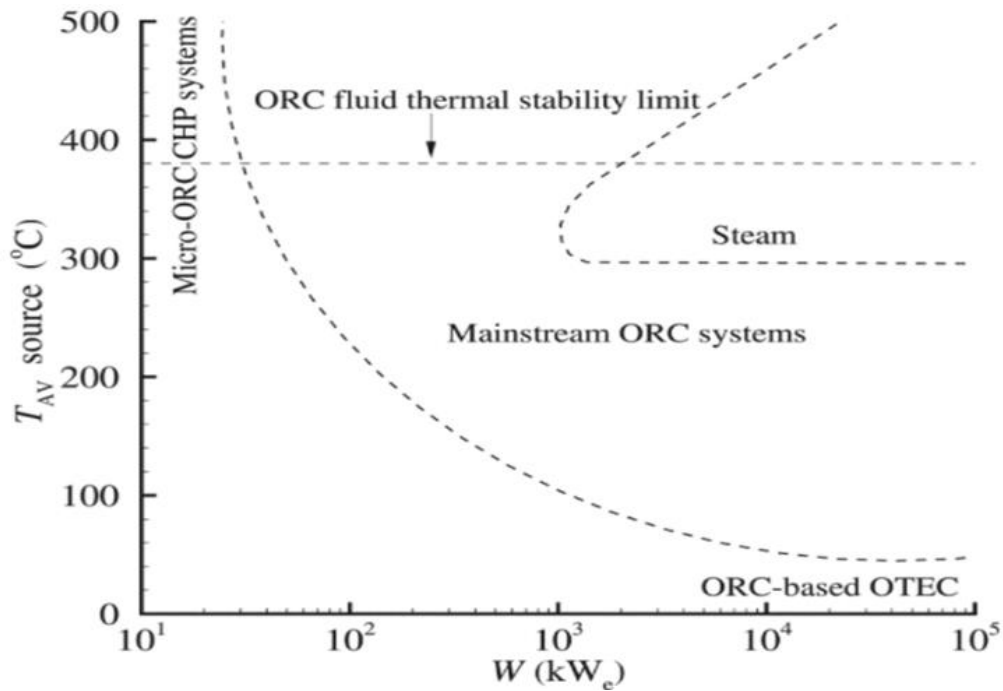
Εκτός από τους HFCs αν και με μικρότερη χρήση υπάρχουν οι υδρογονάνθρακες (hydro-carbons: HCs) με κύριο μειονέκτημα την υψηλή αναφλεξιμότητα και οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) οι οποίοι λόγω της περίπλοκης μοριακής δομής παρουσιάζουν μεν σταθερή και αδρανή συμπεριφορά αλλά και διαβρωτική και τοξική δράση [4.9].

Τέλος, σε διερεύνηση βρίσκονται για χρήση ως εργαζόμενα μέσα τα ζεοτροπικά μίγματα. Καθώς σε αυτά η διαδικασία εξάτμισης και συμπύκνωσης δεν γίνονται ισοθερμοκρασιακά, οι διαφορές στην θερμοκρασία εξομαλύνουν τις διαδικασίες συναλλαγής θερμότητας, μειώνεται η εξεργειακή καταστροφή και αυξάνεται ο θερμικός βαθμός απόδοσης [4.10].

4.5 Εφαρμογές του οργανικού κύκλου Rankine

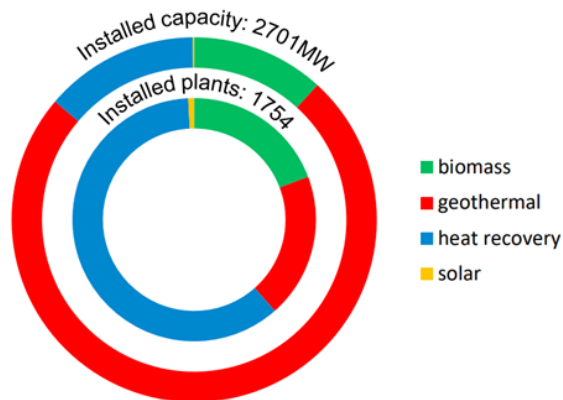
Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο οργανικός κύκλος Rankine μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας χαμηλών θερμοκρασιών. Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το εύρος στο οποίο τα συστήματα ORC αποτελούν την πιο κατάλληλη τεχνολογία από τεχνοοικονομική άποψη. Όπως φαίνεται ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, ο κύκλος ORC είναι γενικά η καλύτερη λύση για μικρή παραγωγή ισχύος, καθώς σε σύγκριση με τους συμβατικούς κύκλους Rankine το σύστημα είναι πιο απλό

και συμπαγές με υψηλότερη απόδοση του στροβίλου, καλύτερη λειτουργία σε μερικά φορτία και καλύτερη αντιστοίχιση των θερμοκρασιών [4.11].



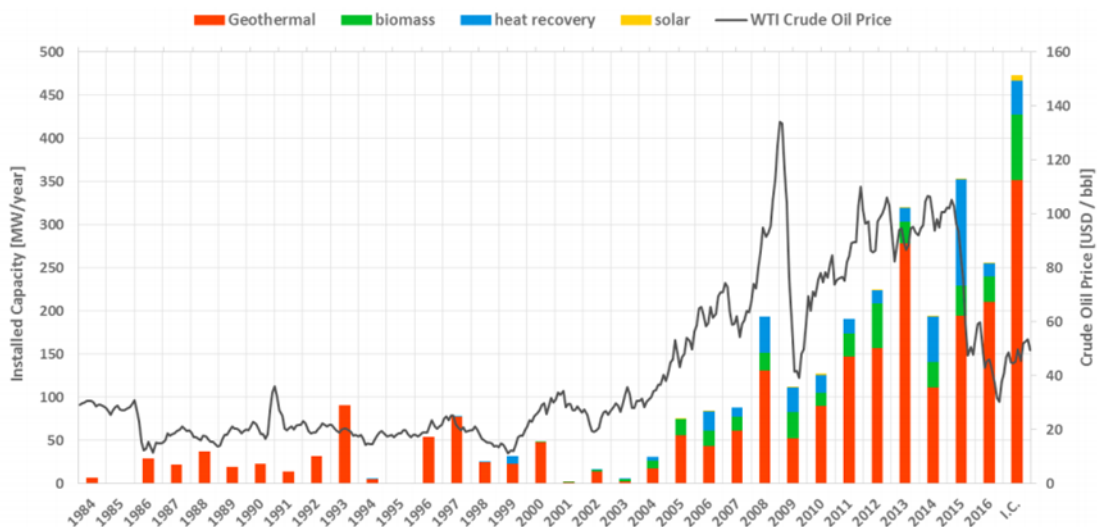
Σχήμα 4.2: Εύρος ισχύος και θερμοκρασίας συστημάτων ORC [4.12]

Σημειώνεται ότι τα όρια του χάρτη λειτουργίας επεκτείνονται, από την μία μεριά μεγάλες εγκαταστάσεις είναι ήδη εφικτές και ανταγωνιστικές από βιομηχανική άποψη, από την άλλη η αγορά είναι πολύ ζωντανή και στον τομέα της μικρής κλίμακας για λιγότερο από 100kW. Οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται με βάση την πηγή ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ανήκει στην γεωθερμική πηγή ενέργειας, ακολουθεί η ανάκτηση θερμότητας, η βιομάζα και τα ηλιακά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς για κάθε εφαρμογή μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2016 [4.13]

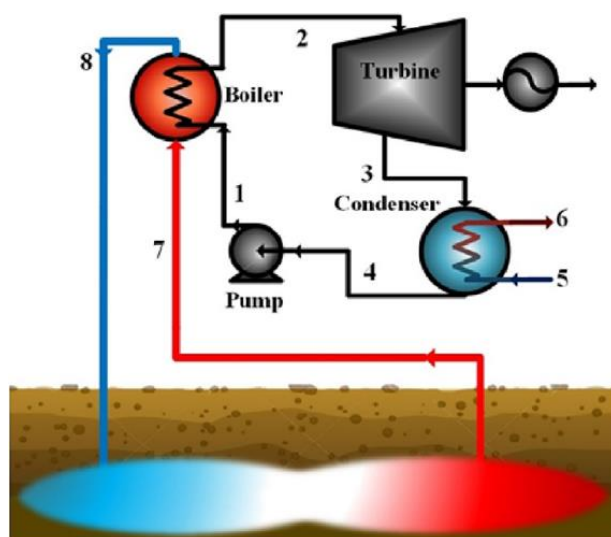
Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου τα ποσοστά διαφοροποιούνται και κάνουν εμφανή την παρουσία τους και τα ηλιακά.



Σχήμα 4.4: Εξέλιξη στο χρόνο συνολικής εγκατεστημένης ισχύος για κάθε εφαρμογή [4.13]

4.5.1 Γεωθερμική πηγή ενέργειας

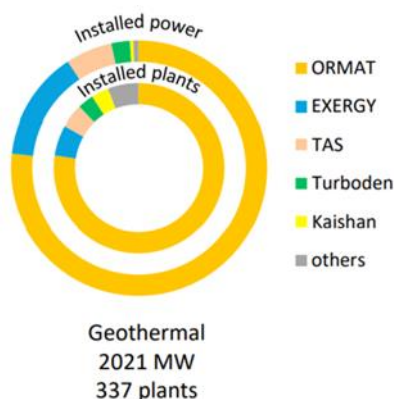
Πρόκειται για πηγή ενέργειας που υπάρχει φυσικά στο υπέδαφος της Γης καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται κατά μέσο όρο 3,3 °C κάθε 100 μέτρα βάθους. Η ενέργεια αξιοποιείται με τη γεώτρηση φρεατίων - συνήθως μερικά χιλιόμετρα - κάτω από την επιφάνεια και την άντληση του ατμού ή της ζεστής άλμης στην επιφάνεια, Σχήμα 4.5. Μερικές φορές ο ατμός μπορεί να διογκωθεί απευθείας σε στροβίλους, αλλά εάν ο ατμός δεν είναι αρκετά καθαρός ή εάν το γεωθερμικό υγρό είναι υπό πίεση νερό, η θερμική ενέργεια που υπάρχει στο ρευστό μπορεί να μετατραπεί σε ισχύ από μία μονάδα ORC, η οποία μπορεί να συνδυαστεί με την παραγωγή θερμότητας που χρησιμοποιείται για τηλεθέρμανση. Οι γεωθερμικές πηγές θερμότητας είναι συνήθως διαθέσιμες σε χαμηλές θερμοκρασίες στο εύρος (100 - 200 °C) [4.14].



Σχήμα 4.5: Απλή γεωθερμική με ORC μονάδα [4.15]

Σημειώνεται ότι ενώ η γεωθερμία καλύπτει το 75% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος για εφαρμογές με ORC, εντούτοις ο αριθμός των εγκαταστάσεων είναι σχετικά μικρός καθώς απαιτούνται μεγάλα κόστη επένδυσης για μονάδες αρκετών MW. Οπότε είναι πολύ λίγες οι

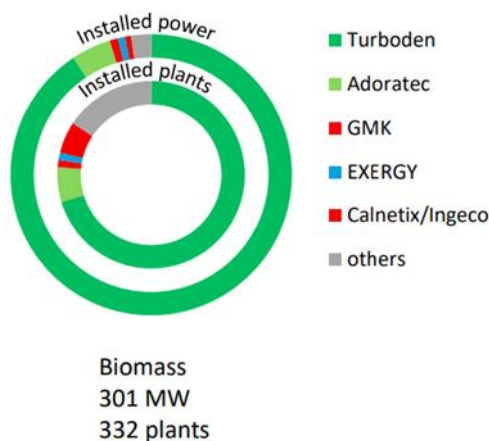
κατασκευαστικές εταιρείες που ασχολούνται με αυτό το πεδίο με την ORMAT να καταλαμβάνει το 75%, την EXERGY το 13%, την TAS το 6% και την TURBODEN το 2% όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Συνολικές εγκαταστάσεις και ισχύς από γεωθερμική ενέργεια για διαφορετικές εταιρείες μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2016 [4.13]

4.5.2 Βιομάζα

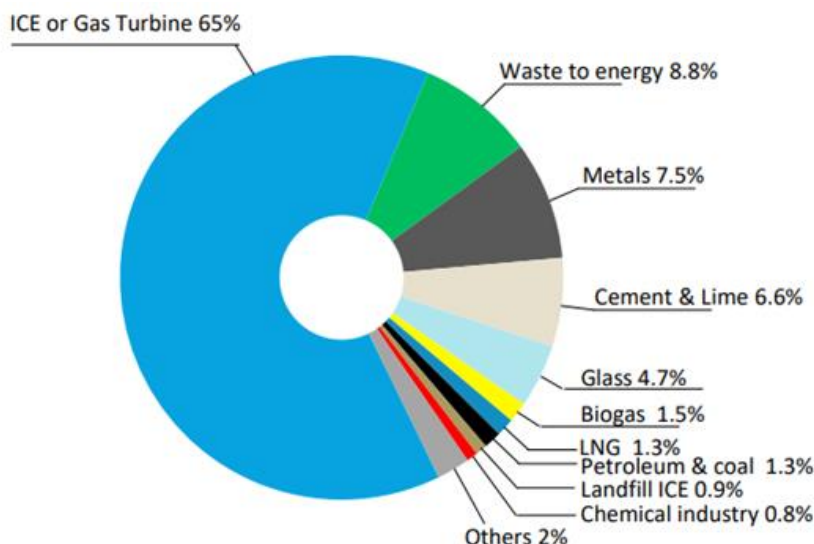
Διατίθεται ευρέως από διάφορες γεωργικές και βιομηχανικές διεργασίες, για παράδειγμα με τη μορφή πριονιδιού, φλοιού, αχύρου, βιολογικής λάσπης κ.λπ. Χρησιμοποιείται αποτελεσματικότερα σε μικρές, αποκεντρωμένες εγκαταστάσεις συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος (CHP). Στις εγκαταστάσεις βιομάζας CHP το σύστημα ORC παράγει ηλεκτρισμό και ζεστό νερό από τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων που προέρχονται από την καύση της βιομάζας. Το ζεστό νερό χρησιμοποιείται για να ικανοποιήσει την τοπική ζήτηση θερμότητας, για παράδειγμα, διαδικασίες ξήρανσης ξύλου ή τηλεθέρμανση. Η μέγιστη ισχύς των μονάδων συμπαραγωγής βιομάζας κυμαίνεται συνήθως στο εύρος (6-10MW) θερμικής και (1-2 MW) ηλεκτρικής ενέργειας [4.14]. Αποτελούν μόλις το 11% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος για εφαρμογές με ORC, ωστόσο ο αριθμός των εγκαταστάσεων είναι συγκρίσιμος με αυτόν της γεωθερμίας. Η κυρίαρχη κατασκευαστική εταιρεία είναι η TURBODEN με 228 εγκαταστάσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Συνολικές εγκαταστάσεις και ισχύς από βιομάζα για διαφορετικές εταιρείες μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2016 [4.13]

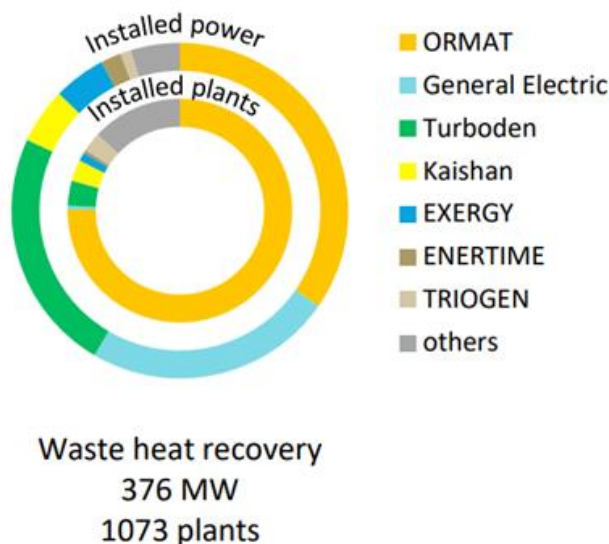
4.5.3 Ανάκτηση θερμότητας

Σημαντικές ποσότητες θερμικής ενέργειας σε διάφορες βιομηχανίες σε θερμοκρασίες στο εύρος (150-350 °C) απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα [4.14]. Πιθανές πηγές θερμότητας αποβλήτων για ανάκτηση με σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ORC βρίσκονται στη βιομηχανία τσιμέντου, γυαλιού, χάλυβα και πετρελαίου και φυσικού αερίου υψηλής έντασης ενέργειας, καθώς και σε διυλιστήρια και μονάδες αποτέφρωσης, *Σχήμα 4.8*.



Σχήμα 4.8: Ποσοστά πηγών ανάκτησης θερμότητας μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2016 [4.13]

Πιο συγκεκριμένα, η κύρια εφαρμογή είναι σε μεγάλο βαθμό ανάκτηση θερμότητας από κινητήρες ντίζελ ή αερίου και στροβίλους, με το 65% της συνολικής εγκατεστημένης χωρητικότητας. Η ORMAT έχει υπάρξει πολύ ενεργή σε αυτόν τον τομέα με 24 εργοστάσια στο εύρος (3-8 MW) εγκατεστημένα κατά μήκος αγωγών φυσικού αερίου στις ΗΠΑ και τον Καναδά. Η TURBODEN ακολουθεί με 9 μονάδες μέσου μεγέθους περίπου 1MW. Σημαντική πηγή που έχει εξελιχθεί σε δεύτερη σε ποσοστό, λόγω της ταχείας ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια, κυρίως στη Γαλλία και την Τουρκία, με 19 νέα έργα από το 2013 αποτελεί η εκμετάλλευση των απορριμμάτων. Τα πρωτογενή ή τα κατασκευασμένα μέταλλα αντιπροσωπεύουν παρόμοιο μερίδιο, με περίπου 28 έργα που βρίσκονται σε μεγάλο βαθμό στην Κίνα και την Ιταλία. Παρά το φαινομενικά μεγάλο δυναμικό ανάκτησης θερμότητας, το τσιμέντο και οι βιομηχανίες ασβέστου (9 έργα) και γυαλιού (8 έργα) αποτελούν μόνο ένα μικρό μερίδιο της αγοράς ανάκτησης θερμότητας με 81 μονάδες και 8,9 MW ενώ οι κινητήρες υγειονομικής ταφής και βιοαερίου αποτελούν το επίκεντρο πολλών κατασκευαστών ORC που προσφέρουν μικρές ORC μονάδες (έως 200 kW), που επωφελούνται από ευνοϊκά κίνητρα σε διαφορετικές χώρες. Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.9* είναι έντονη η παρουσία πολλών κατασκευαστών κυρίως επειδή επικεντρώνονται σε μικρές εγκαταστάσεις στο εύρος 10-15kW_{el}.



Σχήμα 4.9: Συνολικές εγκαταστάσεις και ισχύς ανάκτησης θερμότητας για διαφορετικές εταιρείες μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2016 [4.13]

4.5.4 Ηλιακά

Μέσω των εγκαταστάσεων συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας Concentrating solar power (CSP) η ακτινοβολία του ήλιου συγκεντρώνεται από έναν ηλιακό συλλέκτη και μεταφέρεται σε ένα υγρό σε υψηλή θερμοκρασία. Η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό σε έναν αποτελεσματικό θερμοδυναμικό κύκλο εν προκειμένω στον ORC. Όσον αφορά τη μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου όταν αυξάνεται, βελτιώνεται και ο βαθμός απόδοσης του ORC όμως μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη [4.14]. Επομένως, υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο το οποίο προκύπτει κάθε φορά από τεχνοοικονομική μελέτη.

Το αντίπαλο δέος της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας με κύκλο ORC αποτελεί η χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων ORC εμφανίζονται κυρίως όταν συνδυάζονται με κάποιο τρόπο αποθήκευσης καθώς η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας μπορεί να γίνει πιο αποδοτικά από αυτήν της ηλεκτρικής. Επίσης, τα συστήματα ORC πλεονεκτούν όταν συνδυάζονται με τις κατάλληλες τεχνολογίες συλλεκτών που λειτουργούν βέλτιστα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και έχουν παράλληλα χαμηλό επενδυτικό κόστος [4.16].

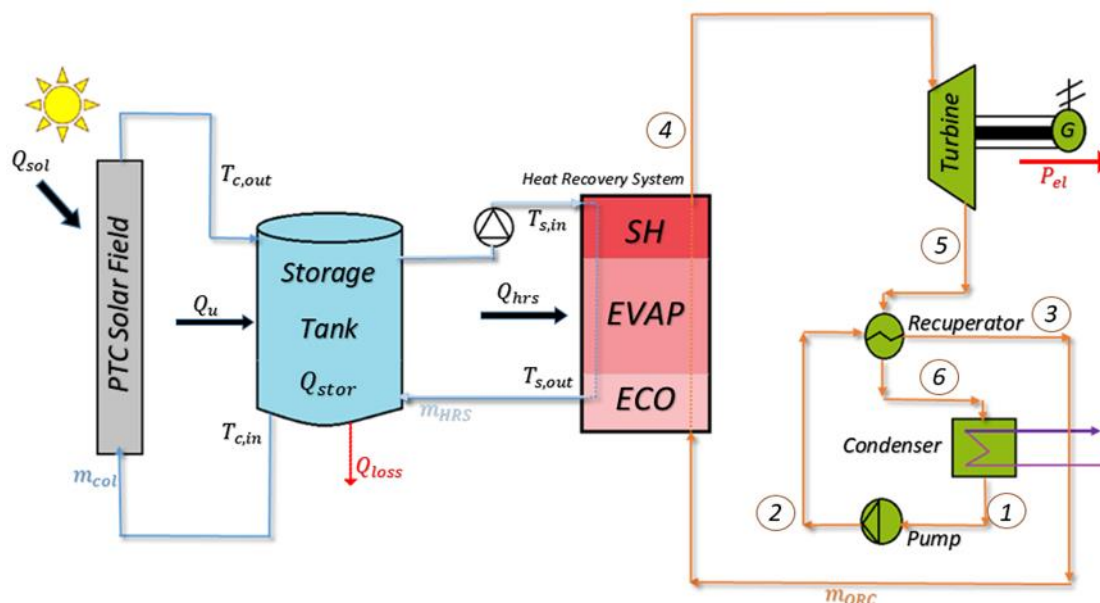
Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

- [4.1] “KCORC.org | What is an ORC power system?” Available: <http://www.kcorc.org/en/science-technology/what-orc-power-system/>.
- [4.2] “KCORC.org | History.” Available: <http://www.kcorc.org/en/science-technology/history/>.
- [4.3] “ORC System | TURBODEN.” Available: <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system>.
- [4.4] L. Y. Bronicki, “History of organic rankine cycle systems,” *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*. Elsevier Inc., pp. 25–66, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-100510-1.00002-8.
- [4.5] “Organic Rankine cycle - Wikipedia.” Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle.
- [4.6] M. Z. Stijepovic, P. Linke, A. I. Papadopoulos, and A. S. Grujic, “On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 406–413, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.10.057.
- [4.7] K. Braimakis, A. Mikelis, A. Charalampidis, and S. Karellas, “Exergetic performance of CO₂ and ultra-low GWP refrigerant mixtures as working fluids in ORC for waste heat recovery,” *Energy*, vol. 203, p. 117801, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117801.
- [4.8] E. Macchi and M. Astolfi, “Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications.” p. 22
- [4.9] J. Song and C. W. Gu “Analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) systems with pure hydrocarbons and mixtures of hydrocarbon and retardant for engine waste heat recovery,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 89, pp. 693–702, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.055.
- [4.10] Y. Zhu, W. Li, “Thermodynamic analysis of evaporation temperature glide of zeotropic mixtures on the ORC-CCHP system integrated with ejector and heat pump,” in *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 1632–1639, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.383.
- [4.11] “EXERGY - Radial Outflow Turbine for power conversion processes.” Available: <http://www.exergy-orc.com/application/heat-recovery-from-industrial-process>.
- [4.12] “KCORC.org | Research trends.” [Online]. Available: <http://www.kcorc.org/en/science-technology/future-trends/>.
- [4.13] T. Tartière and M. Astolfi, “A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market,” in *Energy Procedia*, 2017, vol. 129, pp. 2–9, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.159.
- [4.14] “KCORC.org | Applications.” Available: <http://www.kcorc.org/en/science-technology/applications/>.
- [4.15] A. Ahmadi *et al.*, “Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 274. Elsevier Ltd, p. 122950, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122950.
- [4.16] J. M. Rodríguez, “Techno-economic assessment of thermal energy storage solutions for a 1 MWe CSP-ORC power plant,” *Sol. Energy*, vol. 140, pp. 206–218, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.11.007.

5 Μεθοδολογία

5.1 Εισαγωγή

Η συνολική διάταξη που μελετάται παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Αποτελείται από τον ηλιακό συλλέκτη, το δοχείο θερμικής αποθήκευσης, τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας και τον κύκλο ORC. Αρχικά, σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί για κάθε ένα από αυτά τα επιμέρους συστήματα ο τρόπος μοντελοποίησης και οι εξισώσεις που ισχύουν. Σημειώνεται ότι στο δοχείο αποθήκευσης θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικές μοντελοποιήσεις, μία για δοχείο με αισθητό τρόπο αποθήκευσης, μία για δοχείο με αισθητό τρόπο αποθήκευσης με χρήση στερεών υλικών και μία για δοχείο με χρήση διφασικών υλικών. Έπειτα θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την θερμοδυναμική και οικονομική αξιολόγηση του ενιαίου μοντέλου.



Σχήμα 5.1: Συνολική διάταξη προς μελέτη

5.2 Μοντελοποίηση συστήματος ORC

Το σύστημα ORC το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται και ανακομιστής θερμότητας (Recuperator) ο οποίος είναι συνηθισμένη παραλλαγή του κλασικού κύκλου ORC, για αύξηση της θερμοδυναμικής απόδοσης του κύκλου. Αυτό επιτυγχάνεται με την συναλλαγή θερμότητας στο ψυχρό ρεύμα μετά τον συμπυκνωτή και το θερμό ρεύμα στην έξοδο του στροβίλου.

Τα υπόλοιπα μέρη του κύκλου έχουν αναλυθεί εκτενώς στην θεωρία, παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις που ισχύουν ανά θέση.

Θέση 1:

$$T_1 = T_{con} \quad 5-1$$

$$p_{low} = p(T_{con}, x = 0) \quad 5-2$$

$$p_1 = p_{low} \quad 5-3$$

$$h_1 = h(p_{low}, x = 0) \quad 5-4$$

$$s_1 = s(p_{low}, x = 0) \quad 5-5$$

Θέση 2_{is}:

$$p_{crit} = p_{crit}(fluid) \quad 5-6$$

$$p_{high} = a * p_{crit} \quad 5-7$$

$$p_{2is} = p_{high} \quad 5-8$$

$$h_{2is} = h(p_{high}, s_1) \quad 5-9$$

Θέση 2:

$$p_2 = p_{high} \quad 5-10$$

$$T_2 = T(p_{high}, h_2) \quad 5-11$$

$$n_{is,pump} = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad 5-12$$

Θέση 3:

$$p_3 = p_{high} \quad 5-13$$

$$T_3 = T(p_{high}, h_3) \quad 5-14$$

$$h_3 = h_2 + h_5 - h_6 \quad 5-15$$

Θέση 33:

$$h_{33} = h(p_{high}, x = 0) \quad 5-16$$

$$T_{33} = T(p_{high}, x = 0) \quad 5-17$$

$$T_{sat} = T_{33} \quad 5-18$$

Θέση 34:

$$h_{34} = h(p_{high}, x = 1) \quad 5-19$$

$$T_{34} = T_{sat} \quad 5-20$$

Θέση 4:

$$p_4 = p_{high} \quad 5-21$$

$$T_4 = T_{sat} + \Delta T_{SH} \quad 5-22$$

$$h_4 = h(p_{high}, T_4) \quad 5-23$$

$$s_4 = s(p_{high}, T_4) \quad 5-24$$

Θέση 5_{is}:

$$p_{5is} = p_{low} \quad 5-25$$

$$h_{5is} = (p_{low}, s_4) \quad 5-26$$

Θέση 5:

$$p_5 = p_{low} \quad 5-27$$

$$T_5 = T(p_{low}, h_5) \quad 5-28$$

$$n_{is,turbine} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5is}} \quad 5-29$$

Θέση 6:

$$p_6 = p_{low} \quad 5-30$$

$$T_6 = T_2 + \Delta T_{REC} \quad 5-31$$

Ισολογισμοί ενέργειας:

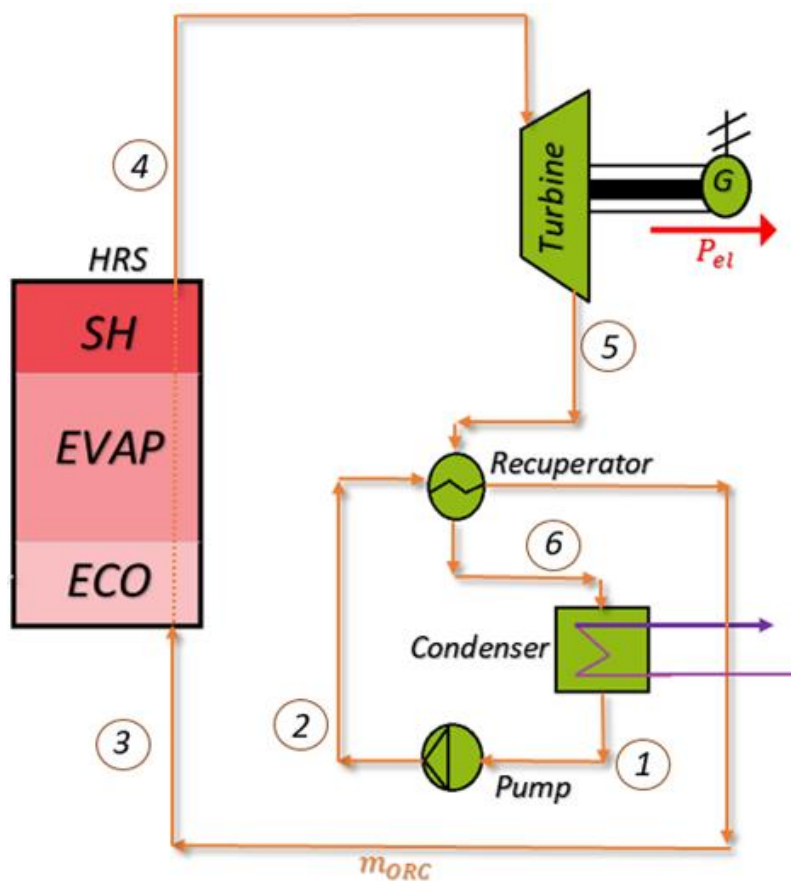
$$Q_{in} = m_{orc}(h_4 - h_3) \quad 5-32$$

$$W_{pump} = \frac{m_{orc}}{n_{motor}}(h_2 - h_1) \quad 5-33$$

$$P_{turbine} = m_{orc}n_{mg}(h_4 - h_5) \quad 5-34$$

$$P_{el} = P_{turbine} - W_{pump} \quad 5-35$$

$$n_{orc} = \frac{P_{el}}{Q_{in}} \quad 5-36$$



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου ORC

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι απαραίτητο να καθοριστούν ορισμένες μεταβλητές. Οι μεταβλητές οι οποίες επιλέγονται σε όλη την παρούσα εργασία να έχουν σταθερή τιμή φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.1.

Μεταβλητή	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
$n_{is,pump}$	70	(%)
$n_{is,turbine}$	85	(%)
n_{mg}	98	(%)
n_{motor}	80	(%)
P_{el}	10	kW

Πίνακας 5.1: Σταθερές μεταβλητές λειτουργίας ORC

Σημειώνεται ότι για τους βαθμούς απόδοσης έχουν επιλεγθεί τυπικές τιμές για τέτοιες εγκαταστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη παρόμοιες μελέτες [5.1], [5.2], [5.3].

Εκτός των παραπάνω σταθερών μεταβλητών, για να επιλυθεί το σύστημα απαιτείται να καθοριστούν και οι μεταβλητές που φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.2. Για αυτές τις μεταβλητές πραγματοποιείται για κάθε μια διερεύνηση στο εύρος που φαίνεται, με τις υπόλοιπες να έχουν κάθε φορά την τιμή σχεδιασμού. Όλες οι διερευνήσεις πραγματοποιούνται για κάθε ένα από τα εργαζόμενα μέσα με σκοπό να επιλεγεί το ιδανικότερο για την παρούσα μελέτη.

Μεταβλητή	Τιμή σχεδιασμού	Εύρος διερεύνησης	Μονάδα μέτρησης
α	90	(20-90)	(%)
T_{con}	40	(40-60)	(°C)
ΔT_{SH}	20	(10-60)	(°C)
ΔT_{REC}	10	(10-20)	(°C)

Πίνακας 5.2: Μεταβλητές λειτουργίας ORC προς διερεύνηση

Όσον αφορά την μεταβλητή α πρόκειται για τον λόγο της μέγιστης προς την κρίσιμη πίεση του κύκλου. Δεν μπορεί να υπερβεί το 90% δηλαδή η μέγιστη πίεση να υπερβεί το 90% της κρίσιμης για λόγους σταθερότητας [5.4]. Για την θερμοκρασία εισόδου του συμπυκνωτή, την υπερθέρμανση και την μεταβολή θερμοκρασίας στον ανακομιστή επιλέγονται τιμές σχεδιασμού από παρόμοιες μελέτες [5.5], [5.6].

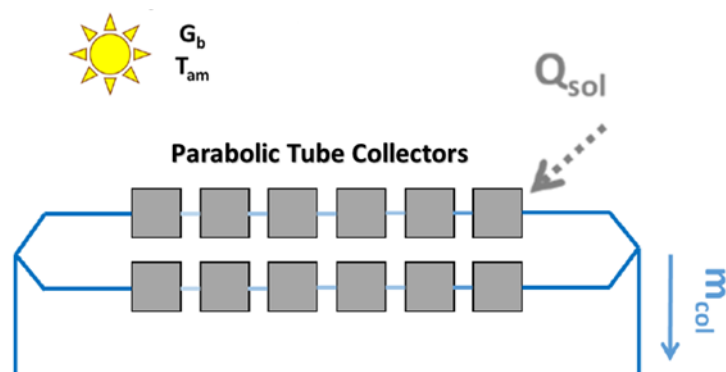
Όσον αφορά τα εργαζόμενα μέσα εξετάζονται τα παρακάτω ρευστά όπως φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.3.

Εργαζόμενο μέσο	P_{crit} (bar)	T_{crit} (°C)
Cyclohexane	40,75	280,49
Toluene	41,26	318,60
Isohexane	30,40	224,55
MDM	14,15	290,90
n-Pentane	33,70	196,55
Isopentane	33,78	187,20

Πίνακας 5.3: Εξετάζόμενα εργαζόμενα μέσα και κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία αυτών

5.3 Μοντελοποίηση συλλέκτη

Για την δέσμευση της ηλιακής ενέργειας και την μετατροπή της σε ωφέλιμη θερμική είναι απαραίτητη η χρήση ηλιακού συλλέκτη, Σχήμα 5.3. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται, λαμβάνοντας υπόψη αντίστοιχες μελέτες [5.4], [5.7], να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο παραβολικού ηλιακού συλλέκτη (Parabolic through solar collector:PTC) το Eurothrough module.



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση ηλιακού συλλέκτη

Ο βαθμός απόδοσης για αυτό το μοντέλο έχει προκύψει από πειραματικά δεδομένα και δίνεται στην εξίσωση 5-37.

$$n_{col} = 0,7408K(\theta) - 0,0432 \left(\frac{T_{c,in} - T_{amb}}{G_b} \right) - 0,000503 \frac{(T_{c,in} - T_{amb})^2}{G_b} \quad 5-37$$

Ο συλλέκτης τοποθετείται στον άξονα Βορρά-Νότου και περιλαμβάνει σύστημα ελέγχου κίνησης στον άξονα Ανατολής-Δύσης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά δίνεται η μεταβλητή $K(\theta)$ στην εξίσωση 5-38 και η γωνία θ στην εξίσωση 5-39.

$$K(\theta) = \cos(\theta) - 5,25097 \cdot 10^{-4}\theta - 2,859621 \cdot 10^{-5}\theta^2 \quad 5-38$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{\cos^2(\theta_z) + \cos^2(\delta)\sin^2(\omega)} \quad 5-39$$

Όπου για τον υπολογισμό της γωνίας θ χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\delta = 23,45 \sin\left(2\pi \frac{284 + DD}{365}\right) \quad 5-40$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad 5-41$$

$$\omega = 15(t_h - 12) \quad 5-42$$

Σημειώνεται ότι DD είναι ο αριθμός των ημερών του έτους και το t_h είναι σε ώρες.

Οι ισολογισμοί ενέργειας στον ηλιακό συλλέκτη δίνονται παρακάτω:

$$Q_u = m_{col} C_p (T_{cout} - T_{cin}) \quad 5-43$$

$$Q_{sol} = G_b A_c \quad 5-44$$

$$n_{col} = \frac{Q_u}{Q_{sol}} \quad 5-45$$

Για την παροχή στον συλλέκτη λαμβάνεται τυπική παραδοχή σύμφωνα με την πηγή [8] που την συνδέει με την συλλεκτική επιφάνεια όπως φαίνεται στην εξίσωση 5-46

$$m_{col} = 0,02 A_c \quad 5-46$$

Η ηλιακή ακτινοβολία G_b μοντελοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση 5-47.

$$G_b = A \exp\left(-\frac{B}{\cos\theta_z}\right) \quad 5-47$$

Οι τιμές των A, B δίνονται από την βιβλιογραφία [5.9] για το κλίμα της Αθήνας και παίρνουν διαφορετικές τιμές για κάθε μήνα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Σημειώνεται ότι σε αυτή την μοντελοποίηση ο ουρανός θεωρείται ηλιόλουστος και η ηλιακή ενέργεια είναι αποτέλεσμα των μέσων πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων για την τοποθεσία της

Αθήνας. Τονίζεται ότι τα δεδομένα αφορούν μέσες ηλιόλουστες μέρες κάθε μήνα, καθώς τότε ο παραβολικός συλλέκτης δουλεύει πιο αποτελεσματικά.

Η εξίσωση 5-47 εφαρμόζεται στο εύρος $[(12:00 - \frac{N_D}{2}) - (12:00 + \frac{N_D}{2})]$ όπου N_D η διάρκεια της ημέρας η οποία δίνεται από την εξίσωση 5-48, όπου $\varphi = 37,58^\circ$ γεωγραφικό πλάτος.

$$N_D = \frac{2}{15} \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad 5-48$$

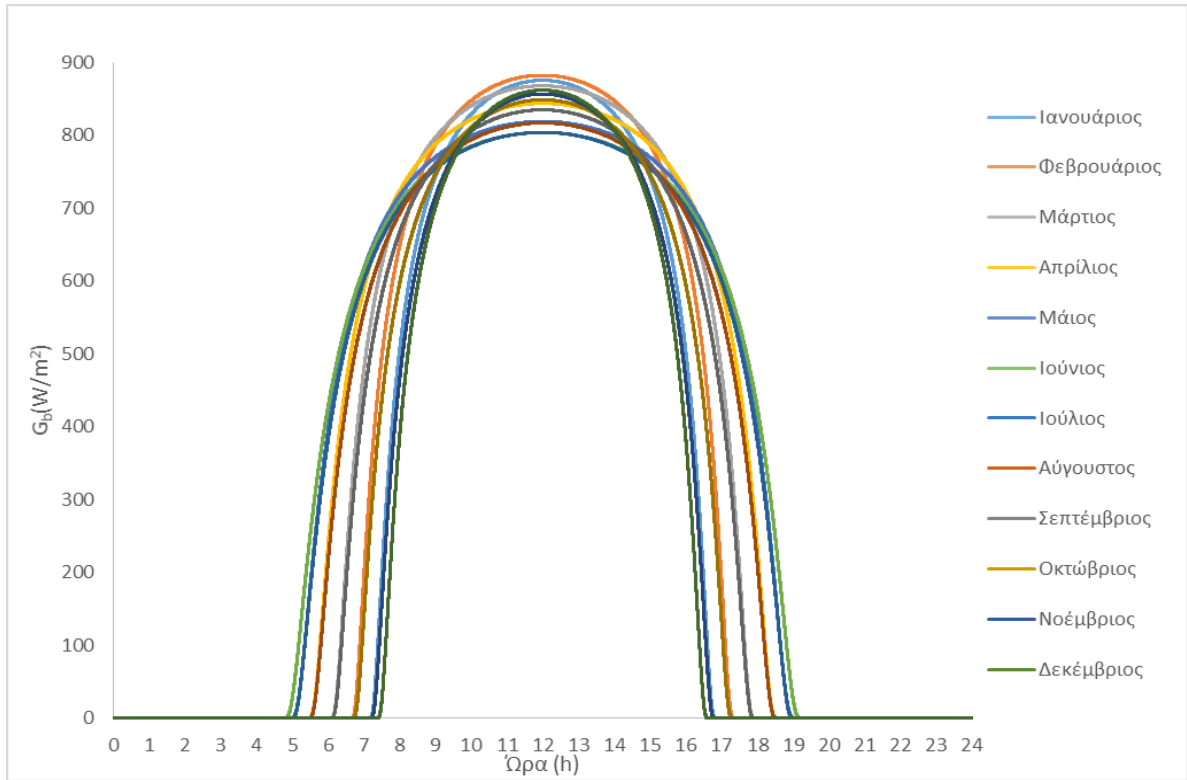
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος δίνεται από την εξίσωση 5-49 όπου $T_{amb,m}$, DR λαμβάνονται από την βιβλιογραφία [5.9] και δίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.4. Η παράμετρος $t_{h,max}$ λαμβάνεται ίση με 14h καθώς θεωρείται ότι η θερμοκρασία μεγιστοποιείται στις 14:00.

$$T_{amb} = T_{amb,m} + \frac{DR}{2} \cos\left(2\pi \left(\frac{t_h - t_{h,max}}{24}\right)\right) \quad 5-49$$

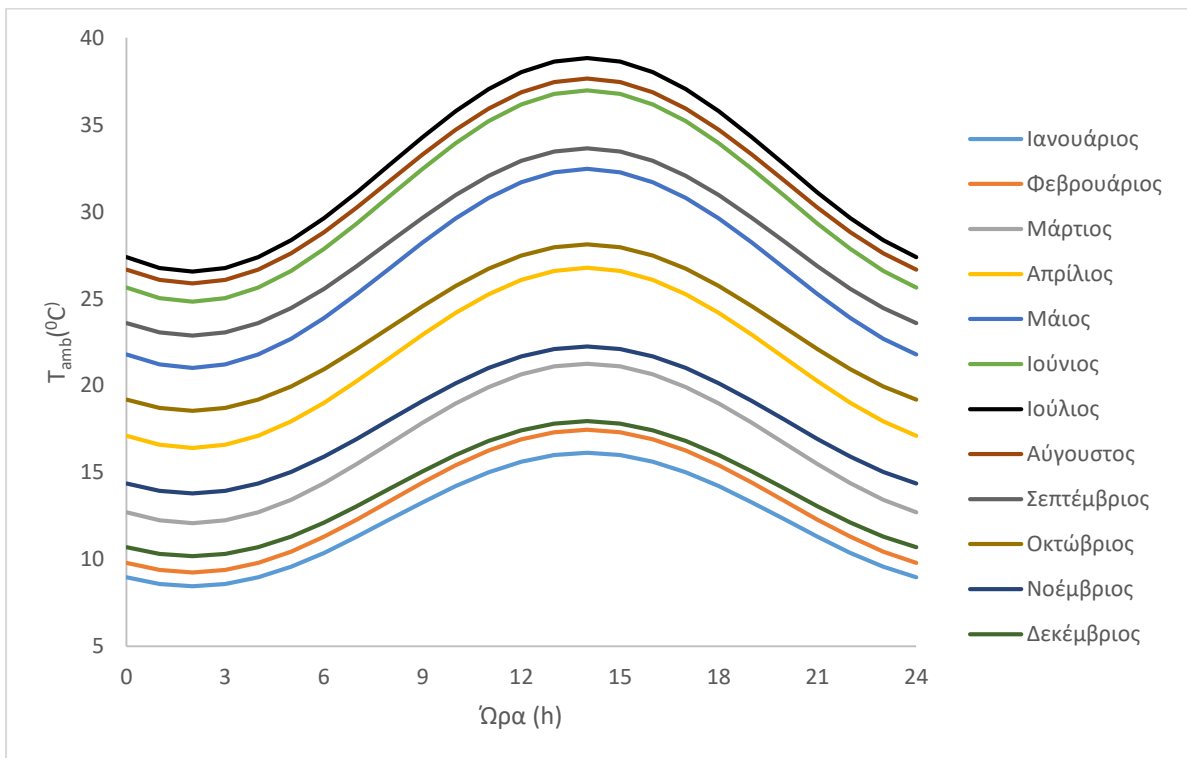
Μήνας	$A (W/m^2)$	$B(-)$	$T_{amb,m} (^\circ C)$	$DR (^\circ C)$
Ιανουάριος	1107,40	0,1243	12,29	7,67
Φεβρουάριος	1091,82	0,1393	13,35	8,21
Μάρτιος	1064,08	0,1600	16,67	9,17
Απρίλιος	1033,22	0,1817	21,59	10,36
Μάιος	1008,56	0,1985	26,74	11,45
Ιούνιος	995,55	0,2074	30,90	12,17
Ιούλιος	997,79	0,2062	32,70	12,29
Αύγουστος	1015,14	0,1951	31,77	11,78
Σεπτέμβριος	1044,22	0,1761	28,26	10,77
Οκτώβριος	1077,09	0,1542	23,33	9,57
Νοέμβριος	1106,10	0,1339	18,02	8,45
Δεκέμβριος	1116,91	0,1241	14,06	7,77

Πίνακας 5.4: Μηνιαίοι παράμετροι μετεωρολογικών δεδομένων [5.9]

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι απεικονίζουν την 21^η μέρα κάθε μήνα.



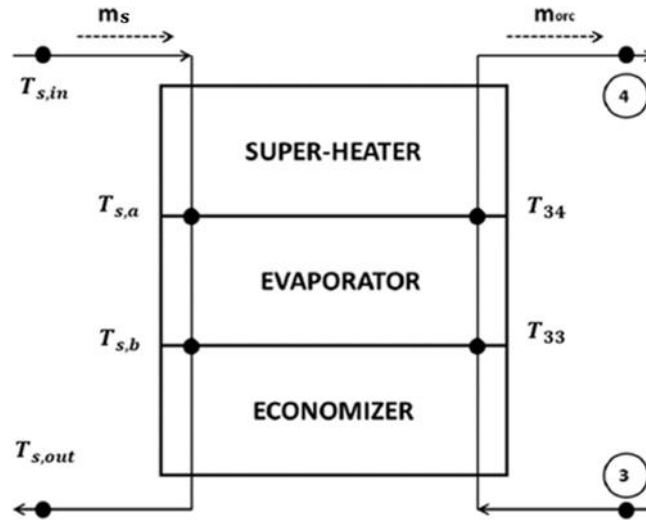
Διάγραμμα 5.1: Ηλιακή ακτινοβολία για 12 εξεταζόμενες μέρες στην διάρκεια του έτους



Διάγραμμα 5.2: Θερμοκρασία περιβάλλοντος για 12 εξεταζόμενες μέρες στην διάρκεια του έτους

5.4 Μοντελοποίηση λέβητα ανάκτησης θερμότητας

Ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery System:HRS) αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ του κύκλου ORC και της υπόλοιπης διάταξης, αποθηκευτικού δοχείου και ηλιακού συλλέκτη. Πρακτικά αποτελεί έναν μεγάλο εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος χωρίζεται σε τρία τμήματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση λέβητα ανάκτησης θερμότητας

Το εργαζόμενο μέσο του ρεύματος του ORC αρχικά προθερμαίνεται στον οικονομητήρα (Economizer: ECO), έπειτα ατμοποιείται στον ατμοποιητή (Evaporator: EVAP) και τέλος ανεβάζει την θερμοκρασία του-υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή (Superheater: SH). Πιο συγκεκριμένα, στον οικονομητήρα μετατρέπεται από υπόψυκτο υγρό σε κορεσμένο υγρό με γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας, στον ατμοποιητή μετατρέπεται από κορεσμένο υγρό σε κορεσμένο ατμό με την θερμοκρασία να παραμένει σταθερή και τέλος στον υπερθερμαντή μετατρέπεται από κορεσμένο ατμό σε υπέρθερμο ατμό με γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας. Από την άλλη μεριά το θερμικό έλαιο δέχεται γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας του. Η βέλτιστη μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται με την χρήση εναλλάκτη αντιρροής όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.3.

Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά των δύο ρευμάτων που εμφανίζεται στην είσοδο του ατμοποιητή αποτελεί σημαντική παράμετρο σχεδιασμού που ονομάζεται Pinch Point. Για την παρούσα εργασία επιλέγεται $PP_t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Οι εξισώσεις που ισχύουν δίνονται παρακάτω:

$$T_{s,b} = T_4 + PP_t \quad 5-50$$

$$Q_{SH} = m_s C_p (T_{s,in} - T_{s,a}) = m_{orc} (h_4 - h_{34}) \quad 5-51$$

$$Q_{EVAP} = m_s C_p (T_{s,a} - T_{s,b}) = m_{orc} (h_{34} - h_{33}) \quad 5-52$$

$$Q_{ECO} = m_s C_p (T_{s,a} - T_{s,out}) = m_{orc} (h_{34} - h_3) \quad 5-53$$

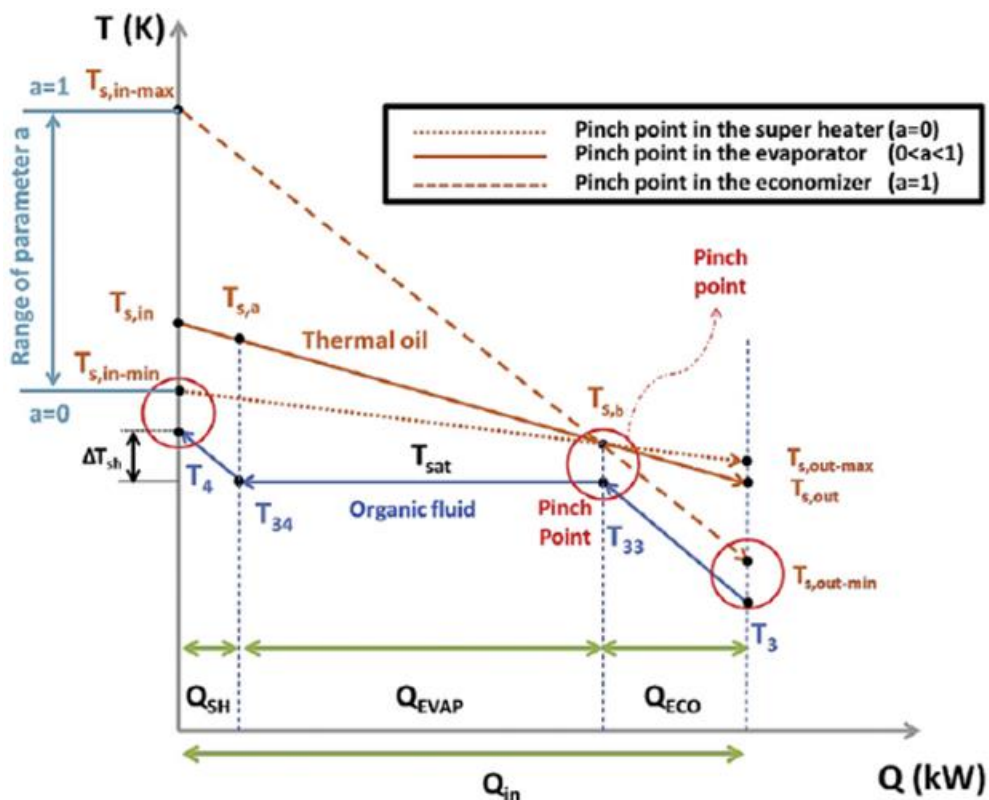
$$Q_{hrs} = m_s C_p (T_{s,in} - T_{s,out}) \quad 5-54$$

$$T_{sin-min} = T_{sat} + \Delta T_{SH} + PP_t \quad 5-55$$

$$T_{sin-max} = T_3 + PP_t + (T_{sat} - T_3) \frac{h_4 - h_3}{h_{33} - h_3} \quad 5-56$$

Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις 5-55, 5-56 είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στο δυναμικό κομμάτι ως συνθήκες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της λειτουργίας του ORC

αντίστοιχα. Είναι απαραίτητες προκειμένου η διαφορά $T_{s,in} - T_4$ να είναι μικρότερη από το PP_t και η διαφορά $T_{s,out} - T_3$ να είναι μεγαλύτερη από το PP_t .



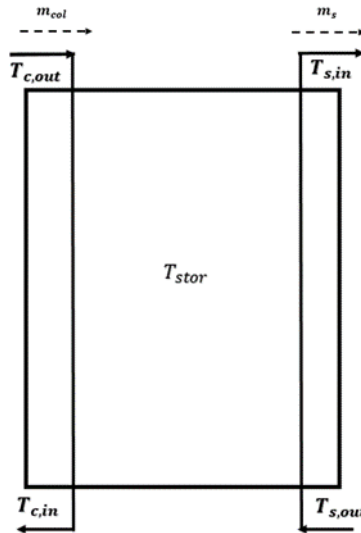
Διάγραμμα 5.3: Μοντελοποίηση λέβητα ανάκτησης θερμότητας [5.2]

5.5 Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης

Το δοχείο αποθήκευσης αποτελεί την διάταξη που ενώνει τον συλλέκτη με τον λέβητα και τον κύκλο ORC. Αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της εγκατάστασης καθώς αποθηκεύει την θερμική ενέργεια που έχει το εργαζόμενο μέσο από τον συλλέκτη για εκμετάλλευση σε ώρες όπου δεν λειτουργεί ο συλλέκτης. Είναι το σημείο στο οποίο δίνεται παραπάνω έμφαση στην παρούσα εργασία καθώς εξετάζονται τρία διαφορετικά μοντέλα αποθήκευσης.

5.5.1 Με αισθητό τρόπο αποθήκευσης και μόνο θερμικό έλαιο

Το πρώτο μοντέλο που εξετάζεται είναι το δοχείο να αποθηκεύει με αισθητό τρόπο αποθήκευσης με τη χρήση μόνο κατάλληλου θερμικού ελαίου (Single Media Thermocline: SMT). Επιλέγεται το δοχείο να μοντελοποιηθεί με μία θερμική ζώνη μία παραδοχή που έχει γίνει και σε παρόμοια μελέτη [5.10]. Αυτή η παραδοχή είναι εφικτή καθώς τα δοχεία τα οποία εξετάζονται έχουν υψηλή χωρητικότητα, οπότε δεν παρουσιάζονται υψηλές θερμοκρασιακές αποκλίσεις μέσα στην ημέρα. Απεικόνιση του δοχείου δίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Απεικόνιση δοχείου αποθήκευσης με αισθητό τρόπο αποθήκευσης

Σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή η μέση θερμοκρασία σε όλο το δοχείο είναι η ίδια για κάθε χρονικό βήμα και συμβολίζεται με T_{stor} . Επίσης, για την θερμοκρασία εισόδου στον συλλέκτη και την θερμοκρασία εξόδου του δοχείου στην επάνω μεριά ισχύει η εξίσωση 5-57:

$$T_{c,in} = T_{stor} = T_{s,in} \quad 5-57$$

Η εξίσωση η οποία επιλύεται στο δυναμικό κομμάτι για κάθε χρονικό βήμα και δίνει την μεταβολή της θερμοκρασίας του δοχείου είναι η εξίσωση 5-58. Παράλληλα, χρησιμοποιείται και η εξίσωση 5-59 η οποία αποτελεί την σύνδεση μεταξύ των διαφορετικών μερών της συνολικής εγκατάστασης.

$$Q_{stor} = \rho C p V \frac{dT_{stor}}{dt} \quad 5-58$$

$$Q_{stor} = Q_u - Q_{hrs} - Q_{loss} \quad 5-59$$

Οι απώλειες στο δοχείο δίνονται από την εξίσωση 5-60:

$$Q_{loss} = A_T U_T (T_{stor} - T_{amb}) \quad 5-60$$

Για τον συντελεστή εκπομπής λαμβάνεται τυπική τιμή $U_T = 0,5 \frac{W}{m^2K}$ [5.7], [5.10] και για την επιφάνεια του δοχείου θεωρείται κυβικό δοχείο οπότε χρησιμοποιείται η εξίσωση 5-61.

$$A_T = 6V^{\frac{2}{3}} \quad 5-61$$

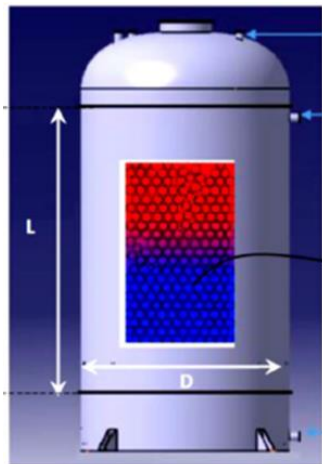
Το θερμικό έλαιο που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη επιλέγεται να είναι το Therminol VP-1 μία συνηθισμένη επιλογή σε παρόμοιες μελέτες [5.2], [5.10]. Αυτό το έλαιο είναι σταθερό και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες έως και 400°C με ακρίβεια, αξιοπιστία και ασφάλεια [5.11]. Οι ιδιότητες που χρειάζονται στο μοντέλο είναι η πυκνότητα και η θερμοχωρητικότητα του που δίνονται συναρτήσει της θερμοκρασίας του στις εξισώσεις 5-62, 5-63 αντίστοιχα.

$$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right) = -0,90797T(^{\circ}C) + 0,00078116T^2(^{\circ}C) - 2,367 * 10^{-6}T^3(^{\circ}C) + 1083,25 \quad 5-62$$

$$c_p \left(\frac{kJ}{kgK} \right) = 0,002414T(^{\circ}C) + 5,9591 * 10^{-6}T^2(^{\circ}C) - 2,9879 * 10^{-8}T^3(^{\circ}C) + 4,4172 * 10^{-11}T^4(^{\circ}C) + 1,498 \quad 5-63$$

5.5.2 Με αισθητό τρόπο αποθήκευσης με προσθήκη στερεών υλικών

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η χρήση δοχείου αποθήκευσης το οποίο περιλαμβάνει και στερεά υλικά (Dual Media Thermocline: DMT). Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης έχει τις βασικές αρχές με αυτές του τρόπου αποθήκευσης με θερμικό έλαιο με διαφορά την προσθήκη και στερεών υλικών *Σχήμα 5.6*.



Σχήμα 5.6: Δοχείου αποθήκευσης με παρουσία στερεών υλικών [5.12]

Όπως έχει αναλυθεί και στην θεωρία με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το κόστος και η αρχική οικονομική επένδυση καθώς μεγάλη ποσότητα του θερμικού ελαίου αντικαθίσταται από συγκριτικά πολύ φθηνότερα στερεά υλικά. Για την μοντελοποίηση υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Είτε επιλέγεται το μοντέλο με την παραδοχή κοινής θερμοκρασίας μεταξύ ρευστού και στερεών υλικών, οπότε γίνεται δυνατό να αντικατασταθεί το θερμικό έλαιο και το στερεό υλικό με ένα ισοδύναμο ρευστό, γνωστό στην βιβλιογραφία ως *equivalent single medium model*. Είτε χρησιμοποιείται το μοντέλο διπλής φάσης στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η παραπάνω παραδοχή και λύνονται οι εξισώσεις μεταφοράς ενέργειας και μάζας για θερμικό έλαιο και στερεό μέσο με την προσθήκη κατάλληλων όρων που περιγράφουν την μεταφορά θερμότητας μεταξύ αυτών (*dual phase model*). Σημειώνεται ότι και τα δύο μοντέλα επιβεβαιώνονται από πειραματικά δεδομένα σε δοχεία διαφορετικού μεγέθους με ικανοποιητική ακρίβεια [5.13]. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται το πρώτο μοντέλο καθώς επιλέγεται πιο συχνά σε περιπτώσεις όπου λύνονται αριθμητικά οι εξισώσεις σύμφωνα με [5.14]. Ορισμένες από τις παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη σε αυτό το μοντέλο είναι ότι η δεξαμενή θεωρείται τέλειος κύλινδρος, ο ρυθμός διήθησης είναι αρκετά χαμηλός ώστε να αποφευχθεί η επίλυση εξισώσεων διατήρησης δύναμης και συνέχειας και η διάμετρος των στερεών σωματιδίων είναι αρκετά μικρή για να αποφευχθεί οποιοσδήποτε περιορισμός στη μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του [5.15].

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να βρεθεί η ισοδύναμη πυκνότητα και ισοδύναμη θερμοχωρητικότητα που θα χρησιμοποιηθεί στο δυναμικό μοντέλο είναι η εξίσωση 5-65 και η εξίσωση 5-66 αντίστοιχα, όπου ε το ποσοστό λαδιού έχει τυπική τιμή 0,4 και δίνεται στην εξίσωση 5-64 :

$$\varepsilon = \frac{V_{oil}}{V_{oil} + V_{solid}} = \frac{V_{oil}}{V_{st}} \quad 5-64$$

$$\rho_{st} = \frac{M_{st}}{V_{st}} = \frac{M_{oil} + M_{solid}}{V_{st}} = \frac{\rho_{oil}V_{oil}}{V_{st}} + \frac{\rho_{solid}V_{solid}}{V_{st}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \rho_{st} = \varepsilon\rho_{oil} + (1 - \varepsilon)\rho_{solid} \quad 5-65$$

$$Q_{st} = Q_{oil} + Q_{solid} \rightarrow V_{st}\rho_{st} C p_{st}\Delta T = V_{oil}\rho_{oil}C p_{oil}\Delta T + V_{solid}\rho_{solid}C p_{solid}\Delta T \rightarrow$$

$$\rho_{st}C p_{st} = \frac{V_{oil}}{V_{st}}\rho_{oil}C p_{oil} + \frac{V_{solid}}{V_{st}}\rho_{solid}C p_{solid} \rightarrow C p_{st} = \frac{\varepsilon\rho_{oil}C p_{oil} + (1-\varepsilon)\rho_{solid}C p_{solid}}{\rho_{st}} \rightarrow$$

$$C p_{st} = \frac{\varepsilon\rho_{oil}C p_{oil} + (1 - \varepsilon)\rho_{solid}C p_{solid}}{\varepsilon\rho_{oil} + (1 - \varepsilon)\rho_{solid}} \quad 5-66$$

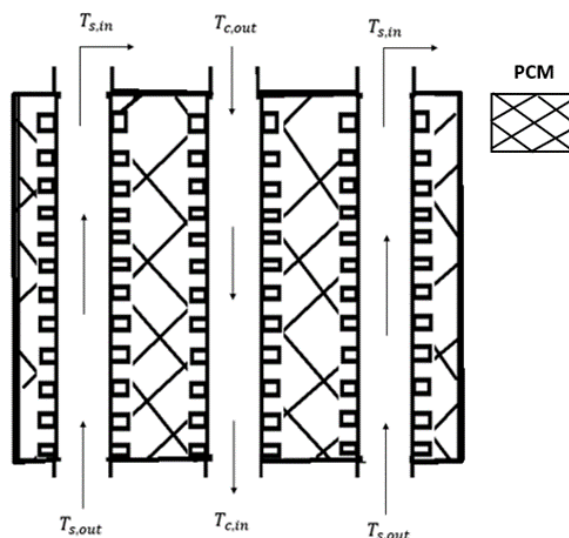
Όσον αφορά την πυκνότητα και την θερμοχωρητικότητα του λαδιού λαμβάνονται οι ίδιες τιμές με αυτές που προκύπτουν από τις εξισώσεις 5-62, 5-63 καθώς χρησιμοποιείται και εδώ ως θερμικό έλαιο το Therminol VP-1. Όσον αφορά τα στερεά υλικά πραγματοποιείται διερεύνηση σε αυτά που δίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.5.

Στερεό	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	λ ($\frac{W}{mK}$)	E ($\frac{J}{kgm^2\sqrt{s}}$)
Quartzite	2600	850	5,5	3486
Basalt	2900	900	2,0	2285
Concrete	2200	850	1,5	1675
Bricks	3200	800	1,6	2024
Ceramic	3550	900	1,3	2038
Alumina	4000	900	1,1	6293

Πίνακας 5.5: Φυσικές ιδιότητες στερεών υλικών [5.16]

5.5.3 Με χρήση διφασικών υλικών

Ο τρίτος και τελευταίος τρόπος αποθήκευσης που εξετάζεται περιλαμβάνει την χρήση διφασικών υλικών (Phase change material:PCM) . Για την μοντελοποίηση γίνεται η υπόθεση ότι γεμίζει όλος ο όγκος του δοχείου με PCM εκτός από τα σημεία όπου διέρχονται οι αγωγοί με το θερμικό έλαιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Σχηματική απεικόνιση δοχείου με PCM

Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν δύο ρεύματα ένα προς τον συλλέκτη και ένα προς τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας για τα οποία ισχύουν οι εξισώσεις 5-67, 5-68.

$$n_{hex,c} = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{c,out} - T_{pcm}} \quad 5-67$$

$$n_{hex,s} = \frac{T_{s,in} - T_{s,out}}{T_{pcm} - T_{s,out}} \quad 5-68$$

Οι βαθμοί απόδοσης λαμβάνουν τυπική τιμή 90% καθώς θεωρείται πολύ καλός σχεδιασμός των αγωγών και των πτερυγίων και βέλτιστη μεταφορά θερμότητας. Για την εύρεση της μέσης θερμοκρασίας στο PCM επιλύεται η εξίσωση 5-68 για τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας που έχουν προκύψει σε σταθερές συνθήκες. Αυτή η θερμοκρασία μετά την διαδικασία της εκκίνησης της εγκατάστασης θεωρείται σταθερή για όλη την διάρκεια λειτουργίας. Στην παρούσα εργασία θα έχει τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από 320°C επομένως το PCM που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης στην διφασική περιοχή (Melting Temperature). Επιλέγεται το NaNO_3 το οποίο σύμφωνα με την [5.17] έχει $T_{melt} = 308^\circ\text{C}$.

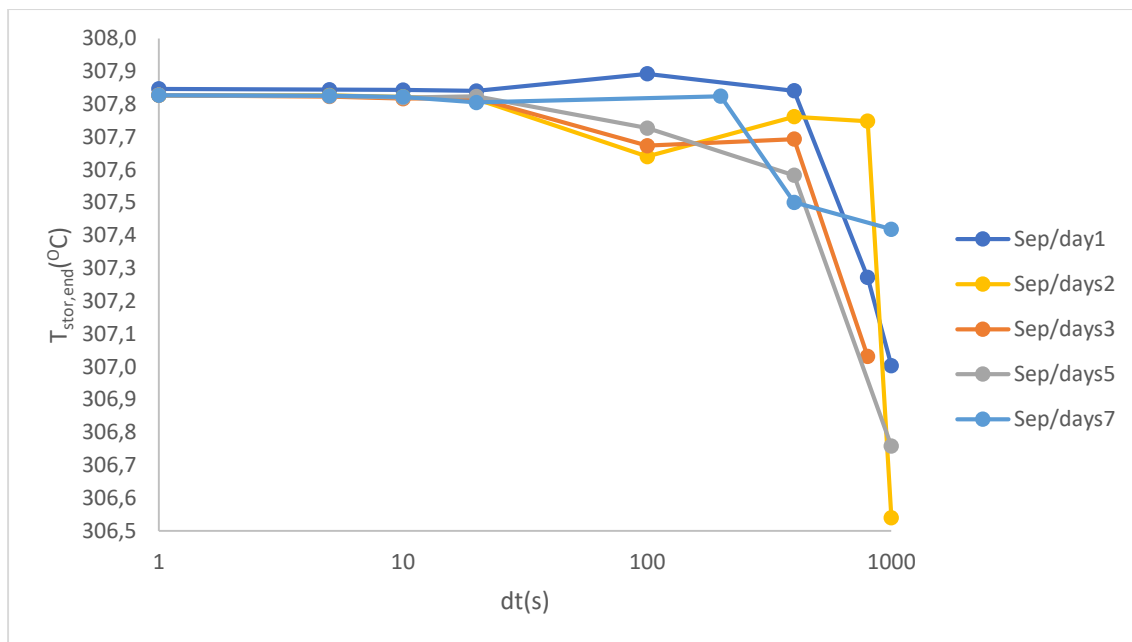
Όσον αφορά τα πτερύγια με τα οποία επιτυγχάνεται αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας, όπως έχει αναλυθεί και στην θεωρία, η χρήση τους είναι μεν επιβεβλημένη, ωστόσο παράλληλα αυξάνεται και το κόστος. Υλικά τα οποία λαμβάνονται υπόψη φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.6. Τελικά για την παρούσα εργασία επιλέγεται ως υλικό το αλουμίνιο.

Ιδιότητες	Graphite foil	Aluminum	Stainless steel	Carbon steel	Copper
Θερμική αγωγιμότητα ($\frac{W}{mK}$)	150	200	20	30	350
Πυκνότητα ($\frac{kg}{m^3}$)	1000	2700	7800	7800	8800
Εκτιμώμενο ειδικό κόστος ($\frac{\epsilon}{m^3}$)	8400	5880	16800	12600	33600

Πίνακας 5.6: Ιδιότητες υλικών για πτερύγια [5.18]

5.6 Σύνδεση όλων των στοιχείων εγκατάστασης

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν οι μοντελοποιήσεις των επιμέρους διατάξεων. Σε αυτήν λαμβάνεται υπόψη η συνολική εγκατάσταση και περιγράφονται η πορεία ανάλυσης της καθώς και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, χρησιμοποιείται το λογισμικό EES (Equation Engineering Solver) για την εύρεση του εργαζόμενου μέσου στον οργανικό κύκλο. Θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για έξι διαφορετικά ρευστά για διαφορετικές θερμοκρασίες κορεσμού με κριτήριο την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης στον ORC. Επιπλέον, πραγματοποιείται διερεύνηση στην συμπεριφορά των ρευστών για ορισμένες παραμέτρους προκειμένου να εντοπιστεί το πιο σταθερό. Έπειτα, καταστρώνεται κώδικας σε περιβάλλον Matlab για να εξεταστεί η συνολική εγκατάσταση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Σημαντική είναι η επιλογή του χρονικού βήματος (dt), δηλαδή το πλέγμα της χρονικής διάρκειας για την οποία επιλύονται οι εξισώσεις καθώς και ο αριθμός των πανομοιότυπων ημερών (days). Ως πανομοιότυπες ημέρες ορίζονται οι φορές για τις οποίες ο κώδικας πρέπει να λύσει επαναληπτικά την ίδια τυπική ημέρα μέχρι να συγκλίνει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η τελευταία ημέρα αυτής της διαδικασίας είναι και η τυπική ημέρα που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και χρησιμοποιείται στους επόμενους υπολογισμούς. Η επιλογή αυτών των δύο παραμέτρων δεν είναι ανεξάρτητη για αυτό χρειάζεται ανάλυση. Ως κριτήριο χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία του δοχείου στο τέλος της ημέρας $T_{stor,end}$ όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.4.



Διάγραμμα 5.4: Μεταβολή της θερμοκρασίας του δοχείου αποθήκευσης στο τέλος της ημέρας για τον Σεπτέμβριο για μεταβλητά χρονικό βήμα και μέρες

Είναι φανερό ότι για $dt > 20s$ ο κώδικας δεν συγκλίνει προς τις επιθυμητές τιμές. Επιλέγεται $dt=5s$ και $days=5$ καθώς είναι οι ελάχιστες τιμές στις οποίες παρουσιάζεται η επιθυμητή ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το πλέγμα σε συνδυασμό με χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Σημειώνεται ότι η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για άλλους μήνες με παρόμοια αποτελέσματα, ωστόσο επιλέχθηκε για παρουσίαση ο Σεπτέμβριος ως ο πιο αντιπροσωπευτικός.

Στο δυναμικό μοντέλο εξετάζονται μία τυπική μέρα για κάθε μήνα, οπότε ο χρόνος θα περιλαμβάνει δώδεκα διαφορετικές. Κάθε μήνας περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο αριθμό από ηλιόλουστες μέρες (sunny days: SD), προκειμένου να ληφθούν υπόψη μόνο οι ημέρες που έχουν ηλιακό δυναμικό προς εκμετάλλευση. Σύμφωνα με [5.19] οι ηλιόλουστες μέρες δίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.7. Οι αριθμοί αυτοί έχουν προκύψει υπολογίζοντας τους μέσους μηνιαίους αριθμούς ηλιόλουστων ημερών για τα τελευταία 5 χρόνια [5.20].

Μήνας	Ηλιόλουστες μέρες (SD)
Ιανουάριος	13
Φεβρουάριος	10
Μάρτιος	15
Απρίλιος	18
Μάιος	20
Ιούνιος	22
Ιούλιος	29
Αύγουστος	29
Σεπτέμβριος	20
Οκτώβριος	18
Νοέμβριος	17
Δεκέμβριος	15

Πίνακας 5.7: Ηλιόλουστες μέρες στον χρόνο

Για τον υπολογισμό του ενεργειακού βαθμού απόδοσης συστήματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις:

$$n_{syst} = \frac{E_{el}}{E_{sol}} \quad 5-69$$

$$E_{el} = \sum_{i=1}^{12} (SD_i \int_0^{24} P_{el} dt) \quad 5-70$$

$$E_{el} = \sum_{i=1}^{12} (SD_i \int_0^{24} Q_{sol} dt) \quad 5-71$$

Οι μόνοι παράμετροι οι οποίες δεν έχουν σταθερή τιμή αλλά πραγματοποιείται διερεύνηση γύρω από αυτές είναι η συλλεκτική επιφάνεια (A_c) και ο όγκος του δοχείου (V). Αρχικά, όταν επιλέγεται δοχείο με αισθητό τρόπο αποθήκευσης και παρουσία μόνο θερμικού ελαίου πραγματοποιείται διερεύνηση για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες και διαφορετικούς όγκους με δύο στόχους, πρώτον να διερευνηθεί η μεταβολή των εκάστοτε δεικτών και έπειτα να καθοριστεί η περιοχή στην οποία βελτιστοποιούνται οι εκάστοτε δείκτες. Στην συνέχεια όταν πλέον το αρχικό εύρος (A_c, V) έχει περιοριστεί πραγματοποιείται σύγκριση σε αυτό για διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης με την χρήση στερεών και διφασικών υλικών λαμβάνοντας υπόψη τα μοντέλα που αναλύθηκαν παραπάνω. Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι ενεργειακοί όπως φαίνονται από τις εξισώσεις 5-70, 5-71 αλλά και οικονομικοί όπως αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

5.7 Οικονομική αξιολόγηση

Για την οικονομική αξιολόγηση ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη :

Αρχικό κόστος επένδυση (C_o):

$$C_o = K_{col}A_c + K_{tank}V + K_{ORC}P_{el} \quad 5-72$$

Χρηματοροπή (Cash Flow: CF):

$$CF = E_{el}K_{el} - K_{O\&M}C_o \quad 5-73$$

Καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value: NPV):

$$NPV = -C_o + R \cdot CF \quad 5-74$$

Συντελεστής αναγωγής (R):

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} \quad 5-75$$

Απλή περίοδος αποπληρωμής (Simple Payback Period: SPP):

$$SPP = \frac{C_o}{Time \cdot CF} \quad 5-76$$

Περίοδος αποπληρωμής (Payback Period: PP):

$$PP = \frac{\ln\left(\frac{CF}{CF - C_o r}\right)}{\ln(1+r)} \quad 5-77$$

Σταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy: LCOE):

$$LCOE = \frac{C_0 + N \cdot K_{O\&M}}{N \cdot E_{el}} \quad 5-78$$

Τα κοινά δεδομένα για όλους τους τρόπους αποθήκευσης για τα οποία έχουν ληφθεί υπόψη τα [5.10], [5.19], δίνονται παρακάτω, Πίνακας 5.8.

Παράμετροι	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα μέτρησης
Ειδικό κόστος συλλέκτη	K_{col}	250	€/m ²
Ειδικό κόστος ORC	K_{ORC}	3000	€/kW _{el}
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	K_{el}	0,28485	€/kWh _{el}
Συντελεστής κόστους λειτουργίας και συντήρησης	$K_{O\&M}$	1	(%)
Διάρκεια ζωής επένδυσης	N	25	χρόνια
Επιτόκιο προεξόφλησης	r	3	(%)

Πίνακας 5.8: Δεδομένα για οικονομική ανάλυση

Το κόστος το οποίο μεταβάλλεται για τους διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης είναι το κόστος του δοχείου K_{tank} . Για την περίπτωση μόνο με θερμικό έλαιο λαμβάνεται από [5.3],[5.10] η τιμή 1000 €/m³.

Στην περίπτωση με χρήση στερεών υλικών αντικαθίσταται το 60% ($\varepsilon = 0,4$) του όγκου του θερμικού ελαίου από στερεό υλικό το οποίο είναι κατά πολύ φθηνότερο. Το θερμικό έλαιο καταλαμβάνει κατά προσέγγιση το 40% του κόστους του K_{tank} [5.21] οπότε θα υπάρχει μείωση κατά 24% από την τιμή των 1000 €/m³. Βέβαια υπάρχει και η προσθήκη του εκάστοτε στερεού υλικού, τυπικές τιμές κόστους ανά τόνο των οποίων κυμαίνονται από 15-50 €/tn [5.22], [5.23]. Επειδή αυτές οι τιμές των στερεών δεν μπορούν να είναι ακριβείς καθώς υπεισέρχονται παράγοντες όπως η προέλευση και η ποιότητα, η τελική τιμή του κόστους $K_{tank,solid}$ για κάθε στερεό δίνεται σε εύρος όπως φαίνεται παρακάτω, Πίνακας 5.9.

Στερεό	Εύρος $K_{tank,solid}$ (€/m ³)	Βήμα
Quartzite	(800-900)	50
Basalt	(850-950)	50
Concrete	(750-850)	50
Bricks	(800-900)	50
Ceramic	(800-900)	50
Alumina	(900-1000)	50

Πίνακας 5.9: Τιμές κόστους δοχείου για διαφορετικά στερεά υλικά

Στην περίπτωση με PCM το κόστος είναι επίσης δύσκολο να καθοριστεί με ακρίβεια. Πέρα από το κόστος του υλικού που χρησιμοποιείται υπάρχει και το κόστος ενσωμάτωσης (encapsulation cost) και το κόστος των πτερυγών που χρησιμοποιούνται για να μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση στην μεταφορά θερμότητας, Πίνακας 5.6. Λαμβάνοντας υπόψη τα [5.18], [5.21] το $K_{tank,PCM}$ προσεγγίζεται με βάση το K_{tank} με προσαύξηση 10% οπότε προκύπτει $K_{tank,PCM} = 1100$ €/m³.

Βιβλιογραφία 5^{ου} Κεφαλαίου

- [5.1] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Parametric analysis and optimization of an Organic Rankine Cycle with nanofluid based solar parabolic trough collectors," *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 1376–1393, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.06.055.
- [5.2] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump," *J. Clean. Prod.*, vol. 161, pp. 493–509, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.159.
- [5.3] H. Gnaifaid and H. Ozcan, "Multi-objective optimization of a concentrated solar energy driven trigeneration plant with thermal energy storage: A case study for Turkey," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 20, p. 100642, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100642.
- [5.4] C. Tzivanidis, E. Bellos, and K. A. Antonopoulos, "Energetic and financial investigation of a stand-alone solar-thermal Organic Rankine Cycle power plant," *Energy Convers. Manag.*, vol. 126, pp. 421–433, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.08.033.
- [5.5] Y. Cao, Y. Gao, Y. Zheng, and Y. Dai, "Optimum design and thermodynamic analysis of a gas turbine and ORC combined cycle with recuperators," *Energy Convers. Manag.*, vol. 116, pp. 32–41, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.073.
- [5.6] M. Sadeghi, A. Nemati, A. ghavimi, and M. Yari, "Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of various ORC (organic Rankine cycle) configurations using zeotropic mixtures," *Energy*, vol. 109, pp. 791–802, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.05.022.
- [5.7] E. Bellos, C. Tzivanidis, and V. Belessiotis, "Daily performance of parabolic trough solar collectors," *Sol. Energy*, vol. 158, pp. 663–678, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.10.038.
- [5.8] G. Smestad, "Solar energy of thermal processes 2nd edition," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 30, no. 2, p. 192, Jul. 1993, doi: 10.1016/0927-0248(93)90023-v.
- [5.9] D. A. Kouremenos, K. A. Antonopoulos, and E. S. Domazakis, "Solar radiation correlations for the Athens, Greece, area," *Sol. Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 259–269, Jan. 1985, doi: 10.1016/0038-092X(85)90105-7.
- [5.10] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Financial Optimization of a Solar-Driven Organic Rankine Cycle," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 3, no. 2, p. 23, 2020, doi: 10.3390/asi3020023.
- [5.11] "Heat Transfer Fluids By Vapour Phase Liquid Phase Heat Transfer Fluid 12°C to 400°C." Available: <http://twf.mpei.ac.ru/tthb/hedh/htf-vp1.pdf>.
- [5.12] Y. Filali Baba, A. Al Mers, and H. Ajdad, "Dimensionless model based on dual phase approach for predicting thermal performance of thermocline energy storage system: Towards a new approach for thermocline thermal optimization," *Renew. Energy*, vol. 153, pp. 440–455, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.102.
- [5.13] Y. Filali Baba, H. Ajdad, A. A. L. Mers, Y. Grosu, and A. Faik, "Multilevel comparison between magnetite and quartzite as thermocline energy storage materials," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, pp. 1142–1153, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.002.

- [5.14] R. Bayón and E. Rojas, “Simulation of thermocline storage for solar thermal power plants: From dimensionless results to prototypes and real-size tanks,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 60, no. 1, pp. 713–721, May 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.047.
- [5.15] J. F. Hoffmann, T. Fasquelle, V. Goetz, and X. Py, “A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 753–761, May 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.110.
- [5.16] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, and J. F. Fourmigué, “A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems,” *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 628–654, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.032.
- [5.17] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, vol. 13, no. 2. 2009.
- [5.18] M. Liu, W. Saman, and F. Bruno, “Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2118–2132, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.01.020.
- [5.19] E. Bellos, C. Tzivanidis, and K. Torosian, “Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven trigeneration system,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 7, pp. 99–106, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.06.001.
- [5.20] “Climate Athens - meteoblue.”
https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/athens_greece_264371.
- [5.21] R. Jacob, W. Saman, and F. Bruno, “Capital cost expenditure of high temperature latent and sensible thermal energy storage systems,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1850, 2017, doi: 10.1063/1.4984433.
- [5.22] D. Tang *et al.*, “The reuse of red brick powder as a filler in styrene-butadiene rubber,” *J. Clean. Prod.*, vol. 261, p. 120966, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120966.
- [5.23] C. Martin, A. Bonk, M. Braun, C. Odenthal, and T. Bauer, “Investigation of the long-term stability of quartzite and basalt for a potential use as filler materials for a molten-salt based thermocline storage concept,” *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 827–840, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.06.090.

6 Αποτελέσματα

6.1 Διερεύνηση Εργαζόμενου Μέσου στον ORC

Για την επιλογή του εργαζόμενου μέσου στον ORC εξετάζονται τα παρακάτω ρευστά:

Cyclohexane, Toluene, Isohexane, MDM, n-Pentane, Isopentane

Οι υποθέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση σε μόνιμη κατάσταση στο EES συνοψίζονται παρακάτω, Πίνακας 6.1:

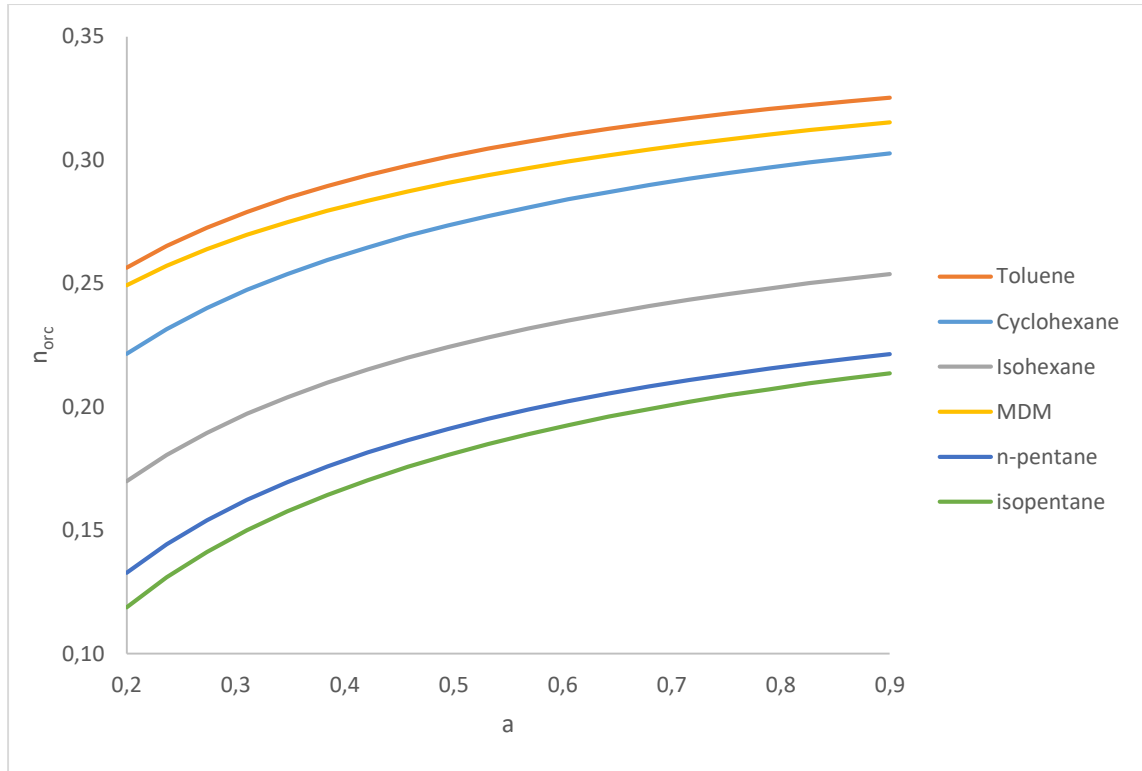
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
U_T	0,5	W/m ² K
$\eta_{is,P}$	70	%
$\eta_{is,T}$	85	%
η_{mg}	98	%
η_{motor}	80	%
PP_t	5	K
A_c	100	m ²
G_b	700	W/ m ²
θ	20	μοίρες
Cp_L	2,4	KJ/kgK
T_{amb}	25	°C
ΔT_{SH}	20	°C
ΔT_{REC}	10	°C
T_{CON}	40	°C

Πίνακας 6.1: Υποθέσεις λειτουργίας για ORC σε μόνιμη κατάσταση

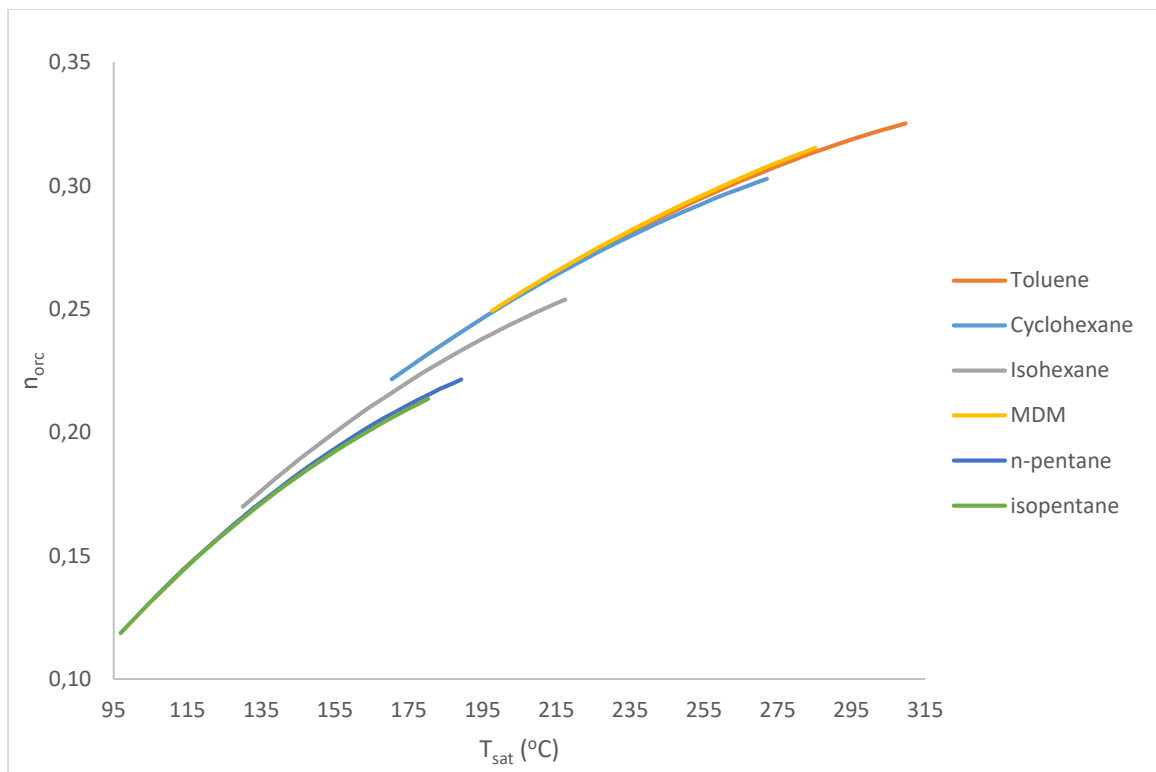
Στο *Διάγραμμα 6.1* παρατηρείται ότι όσο η υψηλή πίεση κάθε ρευστού πλησιάζει τη κρίσιμη τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του ORC. Τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης παρουσιάζουν κατά φθίνουσα σειρά το Toluene, το MDM και το Cyclohexane. Σημειώνεται ότι το εύρος του ποσοστού της μέγιστης πίεσης προς την κρίσιμη ξεκινάει από το 0,2 και περιορίζεται στο 0,9 για λόγους σταθερότητας όπως έχει αναφερθεί στην μοντελοποίηση.

Στο *Διάγραμμα 6.2* όσο αυξάνεται η θερμοκρασία κορεσμού για κάθε ρευστό αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης του ORC. Για τα τρία προηγούμενα ρευστά Toluene, MDM και Cyclohexane για θερμοκρασία κορεσμού στο εύρος (195-272°C) ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει ελάχιστες αποκλίσεις. Το Toluene φθάνει σε μεγαλύτερη θερμοκρασία κορεσμού, μέχρι τους 309,7 °C και σε αυτό το σημείο επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης του ORC για όλα τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα $\eta_{orc}=32,52\%$.

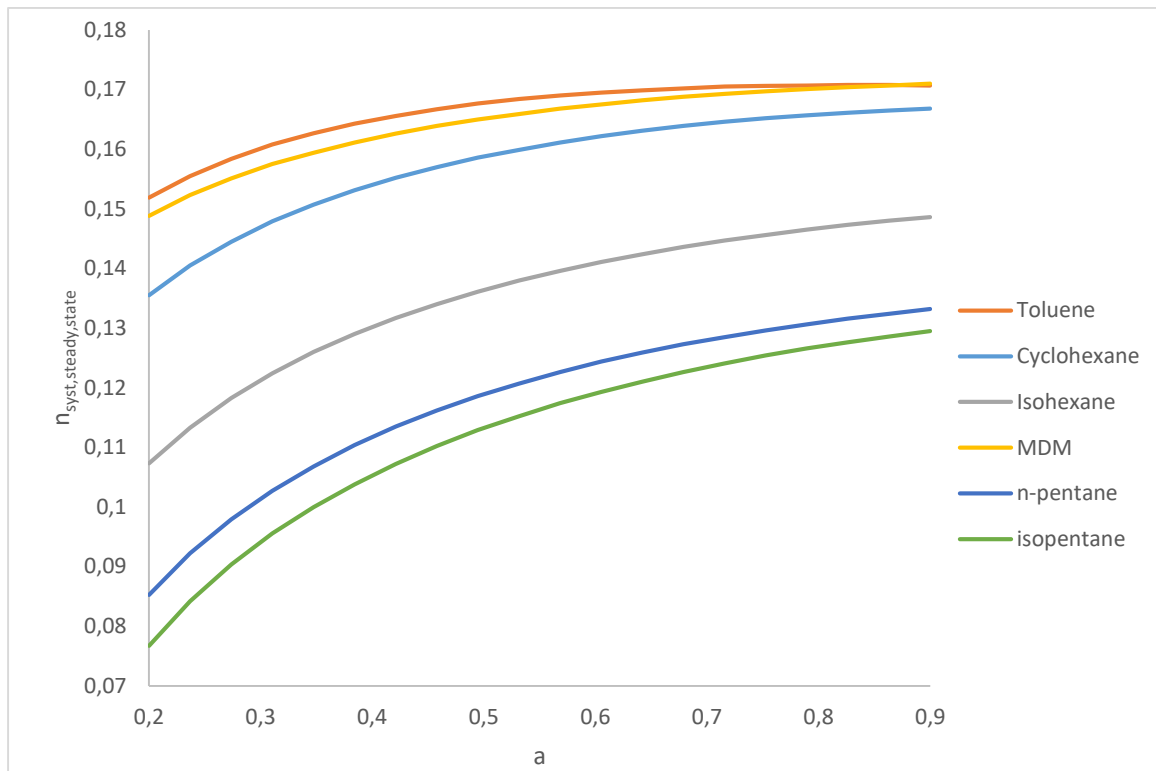
Στο *Διάγραμμα 6.3* και στο *Διάγραμμα 6.4* παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά με τον βαθμό απόδοσης του ORC, όσο αυξάνεται ο λόγος μέγιστης προς κρίσιμης πίεσης, δηλαδή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία κορεσμού για κάθε εργαζόμενο μέσο βελτιώνεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος. Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται και πάλι στο Toluene. Σημειώνεται ότι πρόκειται για τον στιγμιαίο βαθμό απόδοσης του συστήματος για συγκεκριμένες μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και γωνίας πρόσπτωσης όπως αναφέρονται στον Πίνακα 6.1. Ακριβής υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης θα προκύψει στην πορεία της εργασίας όταν χρησιμοποιηθεί το δυναμικό σύστημα όπου θα επιλυθεί όλος ο χρόνος.



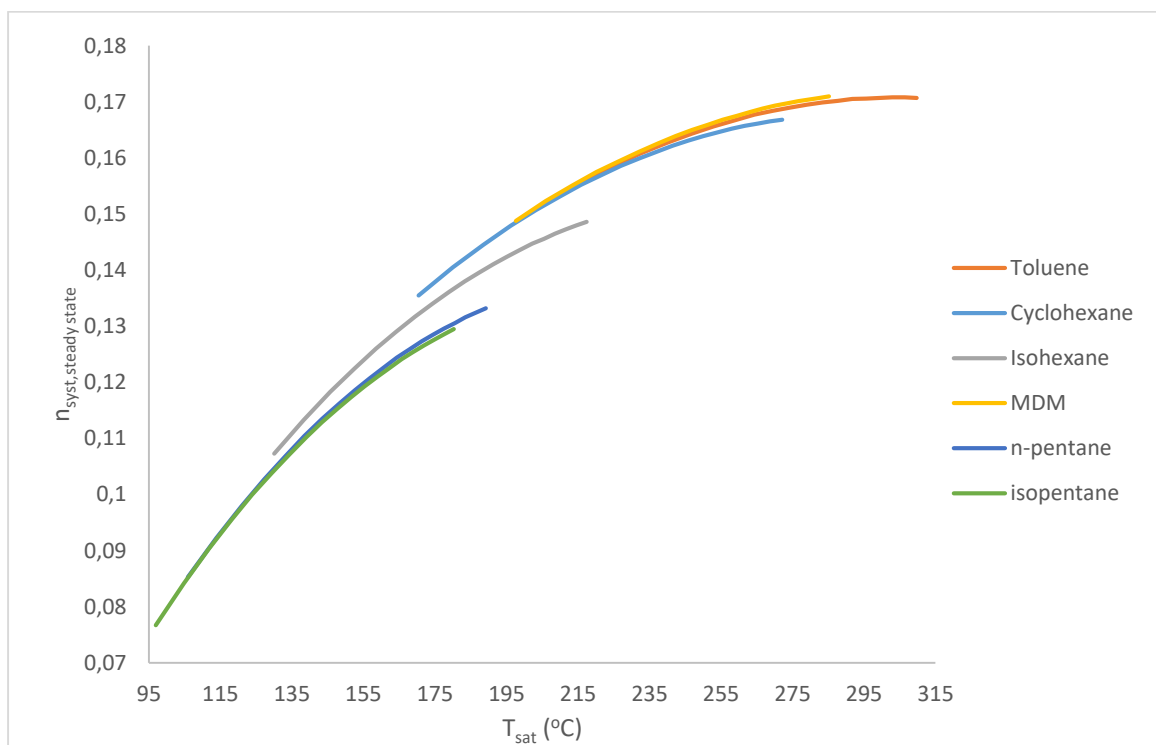
Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει του λόγου μέγιστης προς κρίσιμη πίεση για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα



Διάγραμμα 6.2: Διάγραμμα μεταβολής βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα



Διάγραμμα 6.3: Διάγραμμα μεταβολής συνολικού βαθμού απόδοσης συστήματος σε μόνιμες συνθήκες συναρτήσει του λόγου μέγιστης προς κρίσιμη πίεση για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα



Διάγραμμα 6.4: Διάγραμμα μεταβολής συνολικού βαθμού απόδοσης συστήματος σε μόνιμες συνθήκες συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα

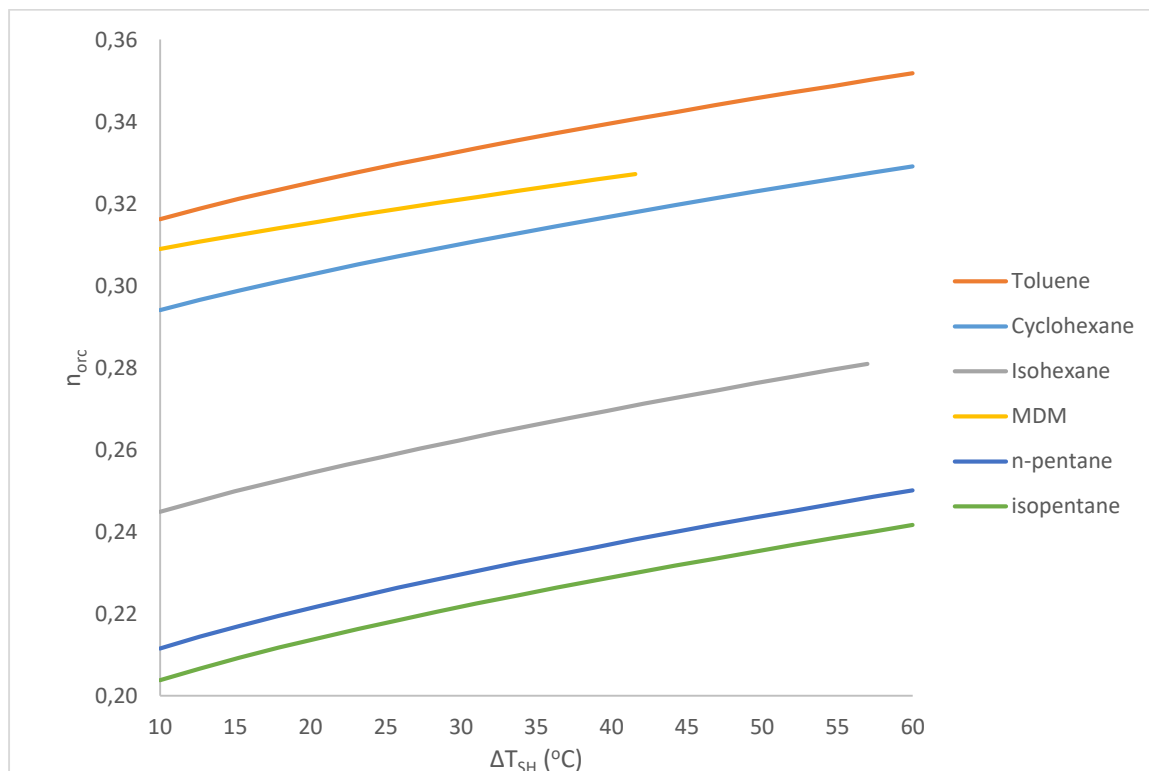
6.1.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων ΔT_{SH} , ΔT_{REC} , T_{con} στον η_{ORC}

Ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους ΔT_{SH} , ΔT_{REC} , T_{con} . Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι μεταβολές του βαθμού απόδοσης του οργανικού κύκλου για όλα τα ρευστά για τις προαναφερθέντες μεταβλητές σε έναν εύρος τιμών όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στην μεθοδολογία. Σημειώνεται ότι παρουσιάζονται τόσο η απόλυτη μεταβολή του βαθμού απόδοσης, όσο και το ποσοστό μεταβολής με το οποίο μπορεί να φανεί καλύτερα η επίδραση των παραμέτρων.

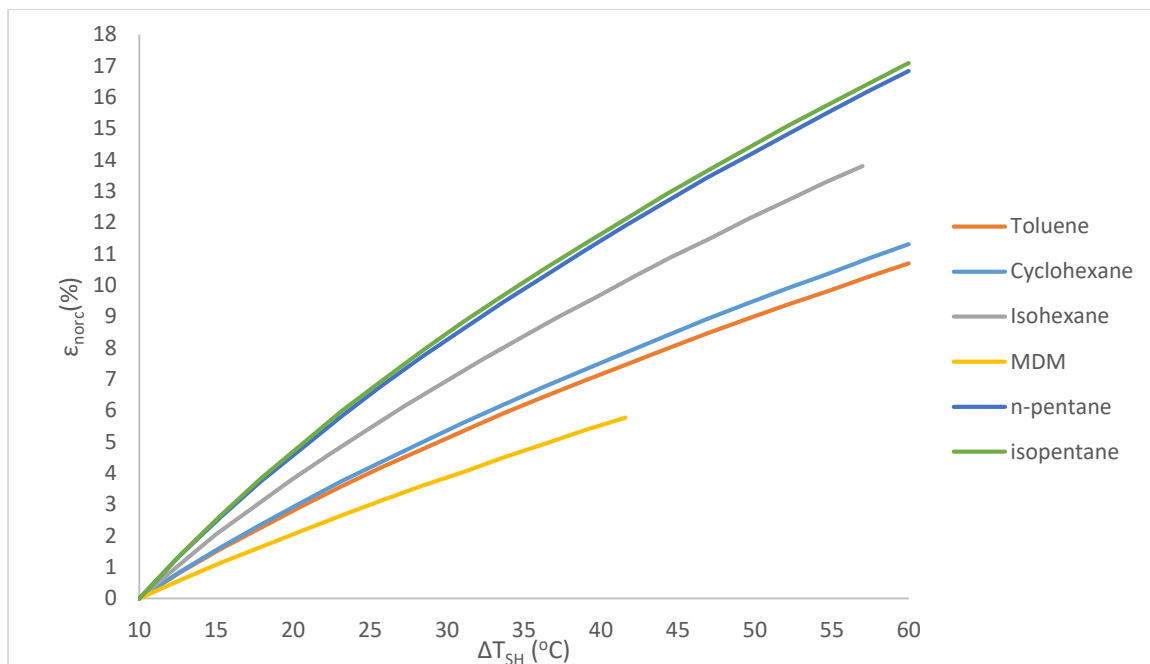
Παράμετρος ΔT_{SH}

Στο Διάγραμμα 6.5 παρατηρείται η αύξηση του βαθμού απόδοσης για αύξηση της υπερθέρμανσης σε όλα τα εργαζόμενα μέσα. Σημειώνεται ότι το ανώτατο όριο στην υπερθέρμανση τίθενται είτε από την ανώτερη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει το ρευστό, όπως στην περίπτωση του MDM και του isohexane, είτε λόγω του κόστους του εναλλάκτη θερμότητας.

Στο Διάγραμμα 6.6 παρατηρείται ότι μεταξύ των τριών εργαζόμενων μέσων με τους μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης η αύξηση της υπερθέρμανσης επηρεάζει περισσότερο κατά φθίνουσα σειρά τα Cyclohexane, Toluene, MDM. Σημειώνεται ότι για το Toluene από τους 20°C και έπειτα για κάθε 5°C υπερθέρμανση σημειώνεται 1% αύξηση στον βαθμό απόδοσης του ORC.



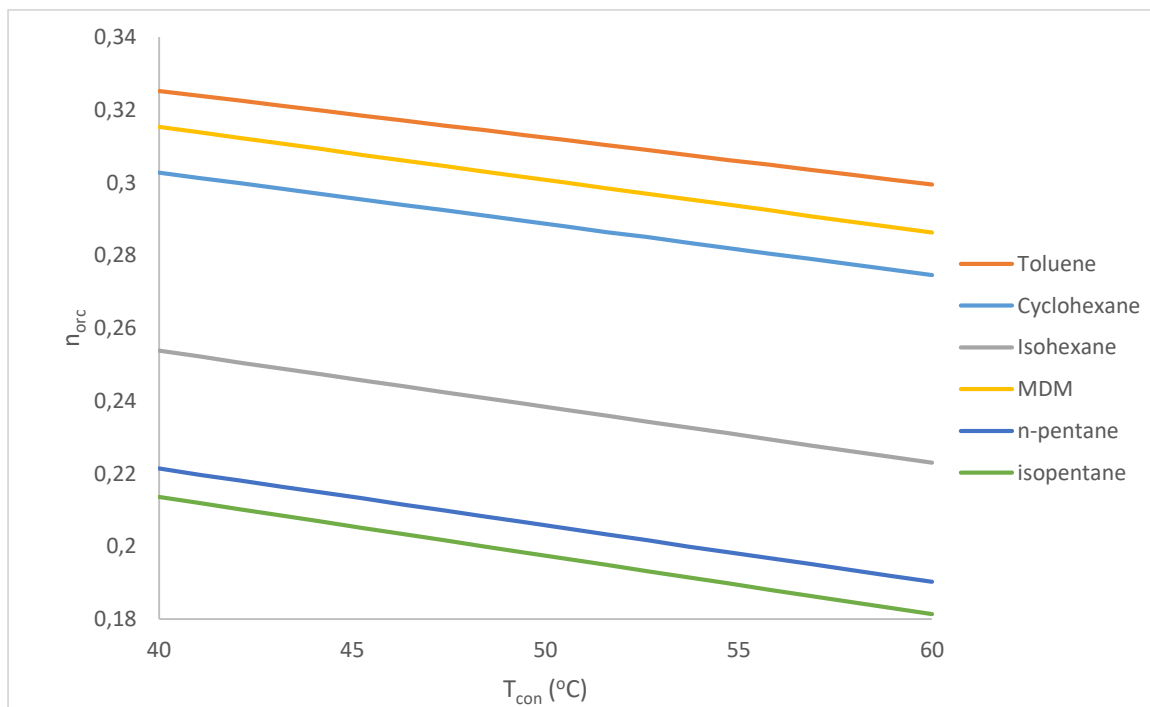
Διάγραμμα 6.5: Διάγραμμα μεταβολής βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της υπερθέρμανσης για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$



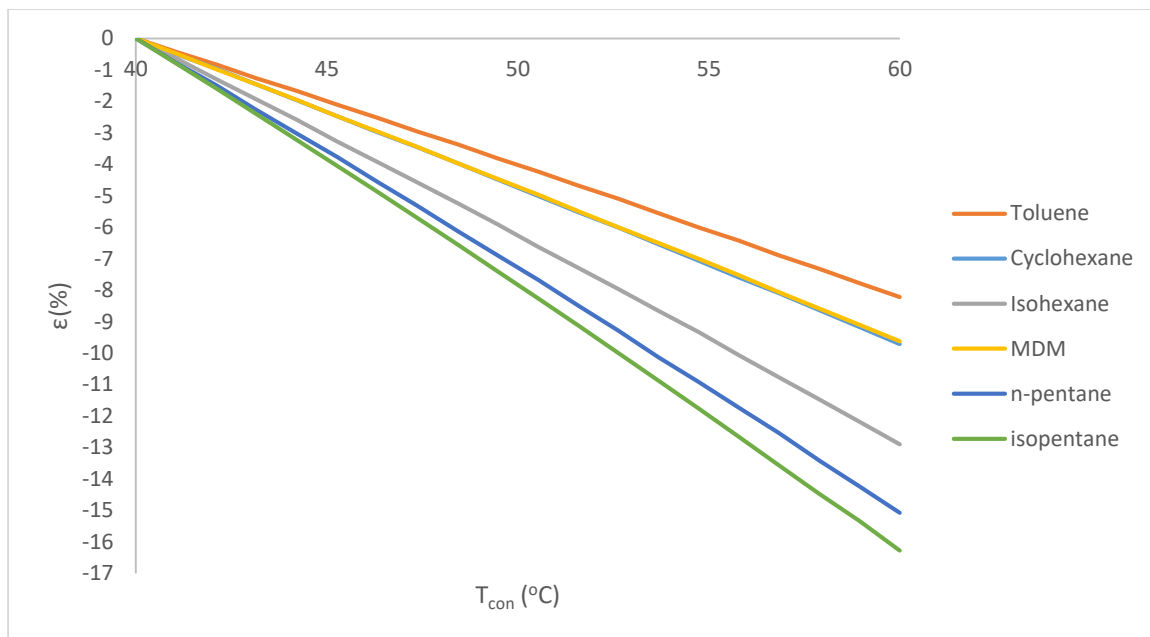
Διάγραμμα 6.6: Διάγραμμα ποσοστού απόλυτης μεταβολής του βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της υπερθέρμανσης για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$

Παράμετρος ΔT_{con}

Στο Διάγραμμα 6.7 και στο Διάγραμμα 6.8 παρατηρείται η μείωση του βαθμού απόδοσης όσο αυξάνεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης. Για το MDM και το Cyclohexane το ποσοστό μεταβολής ταυτίζεται ενώ για το Toluene για κάθε 5°C αύξηση στην θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται κατά 2% ο βαθμός απόδοσης του ORC.



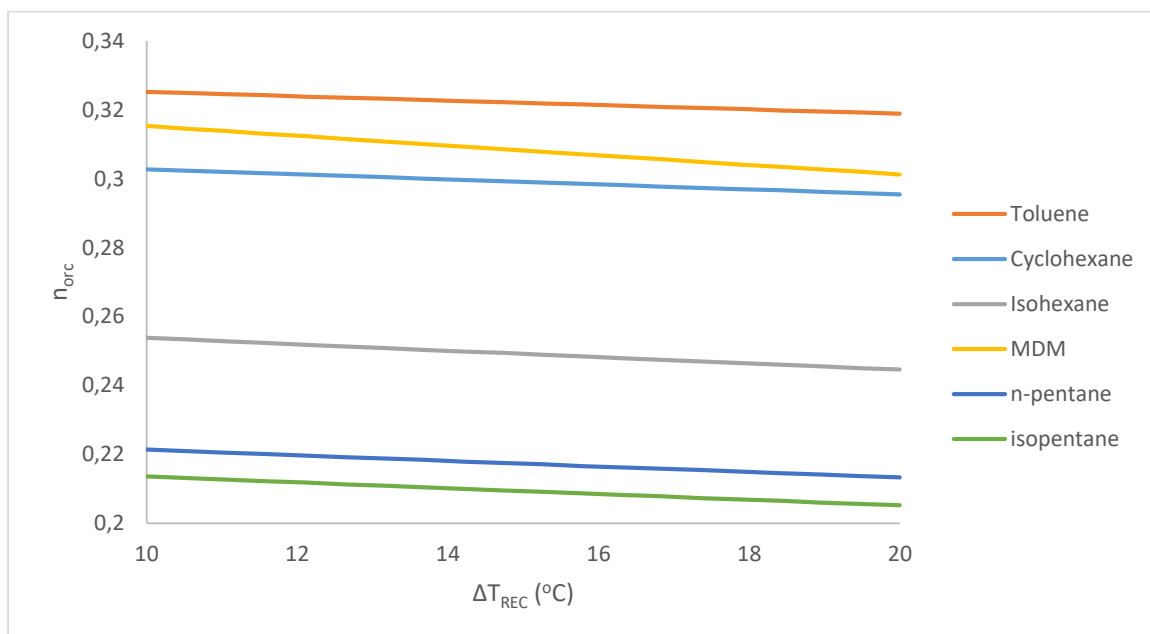
Διάγραμμα 6.7: Διάγραμμα μεταβολής βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$



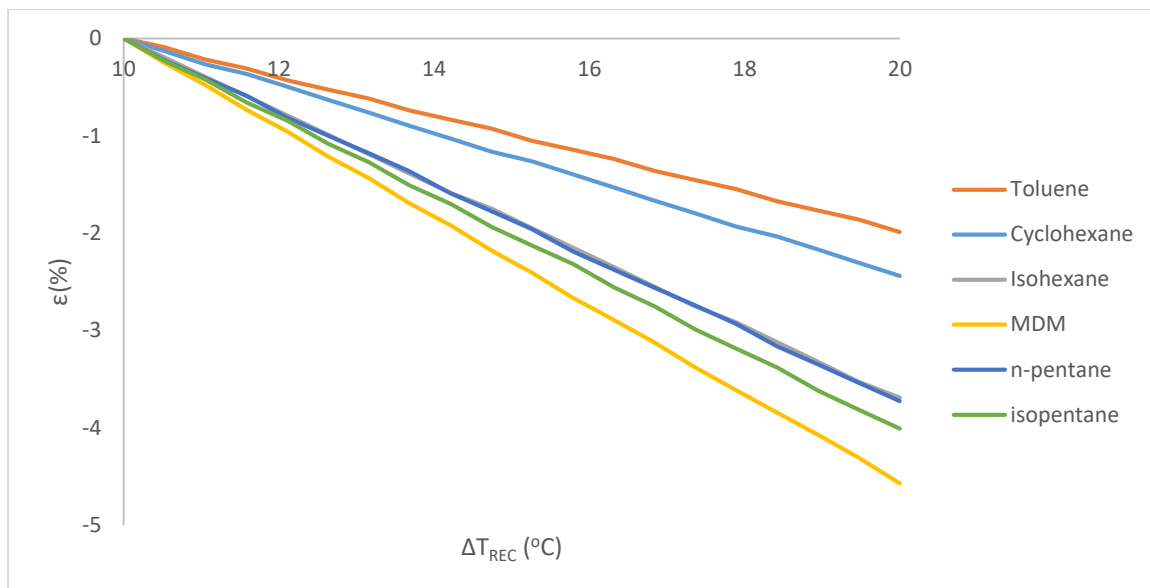
Διάγραμμα 6.8: Διάγραμμα ποσοστού μεταβολής του βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$

Παράμετρος ΔT_{REC}

Στο Διάγραμμα 6.9 και στο Διάγραμμα 6.10 παρατηρείται ότι όλα τα εργαζόμενα μέσα παρουσιάζουν μικρή μείωση του βαθμού απόδοσης για μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς στον ανακομιστή. Την μικρότερη μείωση την παρουσιάζει το Toluene. Σημειώνεται ότι όσο μικρότερη η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του ανακομιστή, επομένως αυξάνεται και το κόστος περιορίζοντας την επιλογή του σχεδιαστή.



Διάγραμμα 6.9: Διάγραμμα μεταβολής βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς στον ανακομιστή για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$



Διάγραμμα 6.10: Διάγραμμα ποσοστού μεταβολής του βαθμού απόδοσης ORC συναρτήσει της θερμοκρασιακής διαφοράς στον ανακομιστή για τα εξεταζόμενα εργαζόμενα μέσα για $\alpha=90\%$

Επιλογή εργαζόμενου μέσου

Το εργαζόμενο μέσο το οποίο τελικά επιλέγεται είναι το Toluene. Κυρίως επειδή παρουσιάζει τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης ORC όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.2 και συνολικό βαθμό απόδοσης συστήματος σε μόνιμες συνθήκες όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.4, σε σχέση με τους δύο ανταγωνιστές το MDM και το Cyclohexane. Επιπλέον, πρόκειται για το πιο σταθερό ρευστό σε μεταβολές των παραμέτρων ΔT_{SH} , ΔT_{REC} , T_{con} όπως φαίνεται στα Διάγραμμα 6.6, Διάγραμμα 6.8, Διάγραμμα 6.10. Το ρευστό αποτέλεσε τελική επιλογή και στην παρακάτω εφαρμογή όπου έχει επιλεγεί η ίδια ισχύς $P_{el} = 10 kW$ [5.10].

6.1.2 Εγκυρότητα μοντέλου στο EES

Για να επιβεβαιωθεί η ακριβής λειτουργία του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο EES πραγματοποιείται σύγκριση με αποτελέσματα από την βιβλιογραφία. Χρησιμοποιείται το [5.4] στο οποίο έχουν γίνει κάποιες διαφορετικές υποθέσεις από τις υποθέσεις του Πίνακα 6.1 οπότε πραγματοποιούνται οι κατάλληλες τροποποιήσεις στο παρόν μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, έλεγχος πραγματοποιείται με την σύγκριση των βαθμών απόδοσης όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2. Οι νέες τιμές από τις τροποποιήσεις φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Εργαζόμενο Μέσο	$n_{orc_validation}$	n_{orc}	Απόκλιση (%)
Cyclohexane	0,2536	0,2535	0,039
Toluene	0,2341	0,2342	0,042
Isohexane	0,2125	0,2076	2,360
MDM	0,1957	0,1959	0,102
n-Pentane	0,1800	0,1744	3,211
Isopentane	0,1714	0,1653	3,690

Πίνακας 6.2: Σύγκριση βαθμών απόδοσης ORC του υπάρχοντος μοντέλου με αυτές του μοντέλου από βιβλιογραφία [5.4]

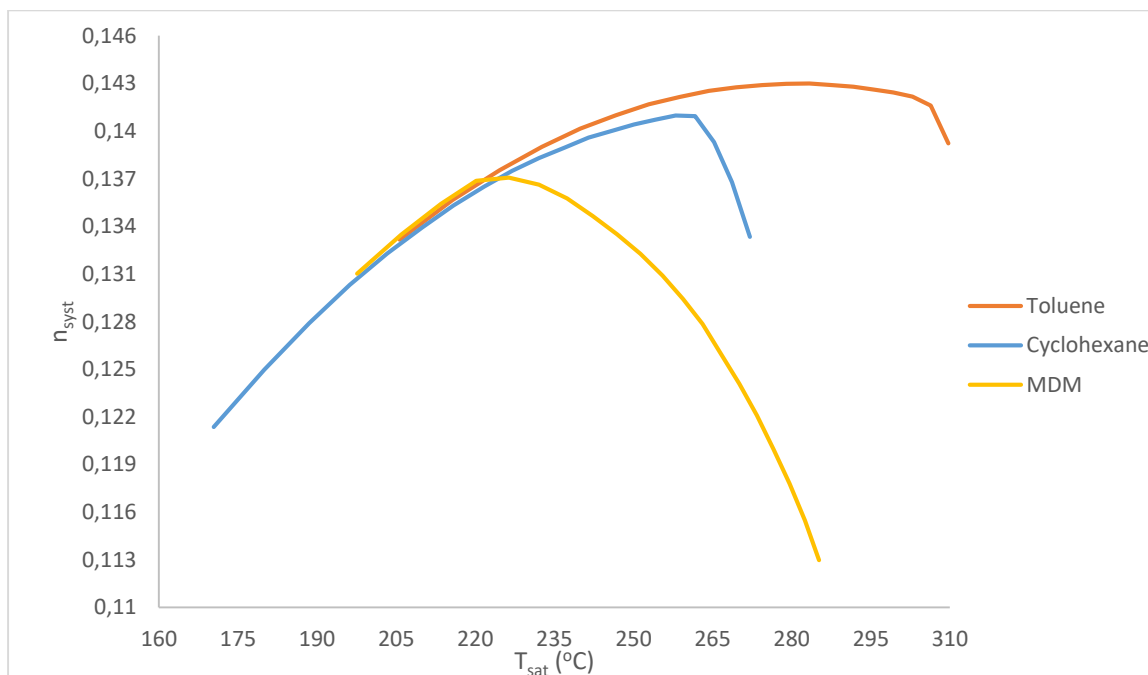
Παράμετρος	Τιμή	Τιμή από Βιβλιογραφία	Μονάδα Μέτρησης
U_t	0,5	1	W/m ² K
$\eta_{is,P}$	70	70	%
$\eta_{is,T}$	85	85	%
η_{mg}	98	97	%
η_{motor}	80	70	%
PP_t	5	20	K
Cp_L	2,4	2,3	kJ/kgK
ΔT_{SH}	20	10	°C
ΔT_{REC}	10	20	°C
T_{CON}	40	60	°C

Πίνακας 6.3: Σύγκριση τιμών του υπάρχοντος μοντέλου με αυτές του μοντέλου από βιβλιογραφία [5.4]

Παρατηρείται ότι η απόκλιση στα ρευστά Toluene, Cyclohexane, MDM είναι αμελητέα. Στα ρευστά Isohexane, n-Pentane, Isopentane η απόκλιση είναι της τάξης του 3% μια τιμή αποδεκτή για την παρούσα μελέτη.

6.2 Διερεύνηση T_{sat} στο δυναμικό μοντέλο

Το ρευστό το οποίο επιλέγεται από την προηγούμενη ανάλυση είναι το Toluene. Στο δυναμικό μοντέλο τα θερμοκρασιακά όρια για τα οποία θα λειτουργεί ο κύκλος ORC ορίζονται από την $T_{sin-min}$ και την $T_{sin-max}$ όπως έχει αναπτυχθεί στην θεωρία. Αυτό το εύρος εξαρτάται αποκλειστικά από την T_{sat} , οπότε πραγματοποιείται διερεύνηση για το Toluene για διαφορετικές θερμοκρασίες κορεσμού. Σημειώνεται ότι για διαφορετικές T_{sat} , στο δυναμικό κομμάτι αλλάζουν οι παρακάτω τρεις παράμετροι ($T_{sin-min}$, $T_{sin-max}$, η_{orc}). Για το δοχείο και την συλλεκτική επιφάνεια επιλέχθηκαν τυπικές τιμές από το [5.10] $A_c=140m^2$, $V=12m^3$.



Διάγραμμα 6.11: Διάγραμμα μεταβολής συνολικού βαθμού απόδοσης δυναμικού συστήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού για το Toluene, το Cyclohexane και το MDM

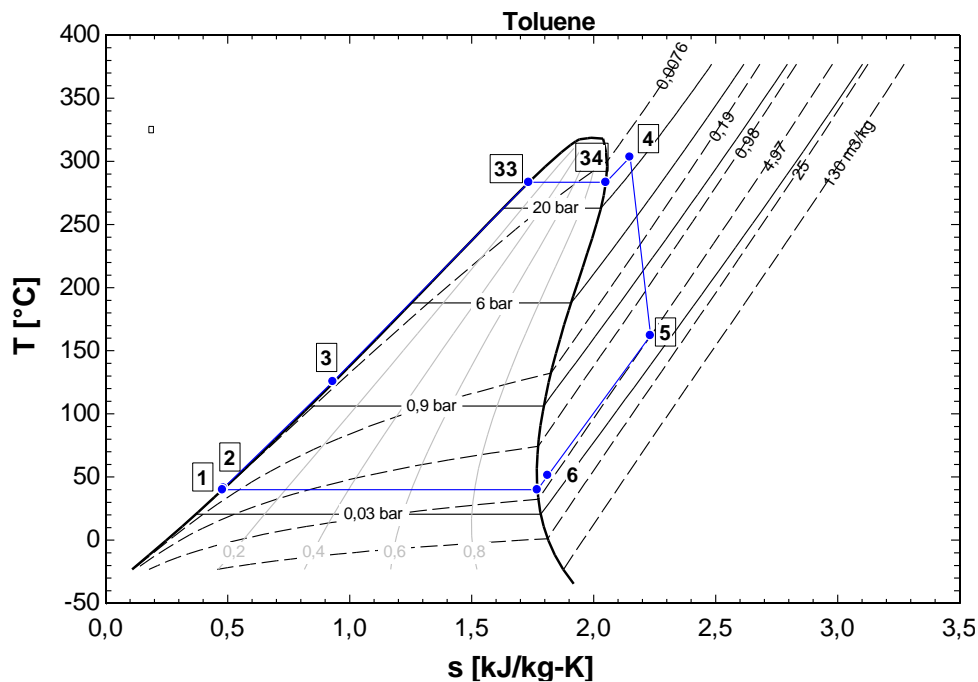
Παρατηρήσεις:

- ❖ Εκτός από το Τολουενο διερευνήθηκαν και το Cyclohexane και MDM για εποπτικούς λόγους και καθώς το υπολογιστικό κόστος ήταν πολύ μικρό. Επιβεβαιώνεται και εδώ ότι με το Τολουενο επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος n_{syst} , αν και πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι συλλεκτική επιφάνεια και όγκος είναι κοντά στις βέλτιστες τιμές τους για το Τολουενο.
- ❖ Άξιος αναφοράς είναι ο λόγος για τον οποίο τα εργαζόμενα μέσα φθάνουν μέχρι έναν βέλτιστο n_{syst} και έπειτα παρουσιάζουν πτωτική πορεία. Παρόλο που για μεγαλύτερες T_{sat} αυξάνεται ο n_{orc} όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.2, παράλληλα αυξάνεται και η $T_{sin-min}$ για την οποία λειτουργεί ο ORC η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μειώνεται ο n_{syst} .
- ❖ Όσον αφορά το Τολουενο για θερμοκρασίες κορεσμού στο εύρος (265-300 °C) παρατηρείται αμελητέα διαφορά στον βαθμό απόδοσης συστήματος. Σημειώνεται ότι και για διαφορετικά δοχεία και συλλεκτικές επιφάνειες η βέλτιστη θερμοκρασία κορεσμού υπολογίστηκε στο ίδιο εύρος. Για την υπόλοιπη εργασία επιλέγονται τα μεγέθη όπως φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 6.4:

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
T_{sat}	283,4	°C
$T_{sin-min}$	308,4	°C
$T_{sin-max}$	384,0	°C
n_{orc}	31,27	%

Πίνακας 6.4: Συνθήκες λειτουργίας δυναμικού μοντέλου για το Τολουενο για βέλτιστο n_{syst}

Στο Διάγραμμα 6.12 θερμοκρασίας εντροπίας παρατηρούνται όλα τα σημεία του κύκλου ORC. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασία κορεσμού η οποία βρίσκεται αρκετά κοντά στην κρίσιμη. Επιπλέον, το σημείο 5, μετά τον στρόβιλο βρίσκεται μακριά από την καμπύλη κορεσμού το οποίο τονίζει την αξία χρήσης του ανακομιστή θερμότητας. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα δημιουργήθηκε στο EES χρησιμοποιώντας ως αναφορά κατάσταση το πρότυπο της ASHRAE ($h=0$ kJ/kg - $s=0$ kJ/kgK για κορεσμένο υγρό στους -40°C).



Διάγραμμα 6.12: T-S διάγραμμα για την επιλεγθείσα θερμοκρασία κορεσμού για το Τολουενο

6.3 Δυναμικό μοντέλο με αισθητό τρόπο αποθήκευσης

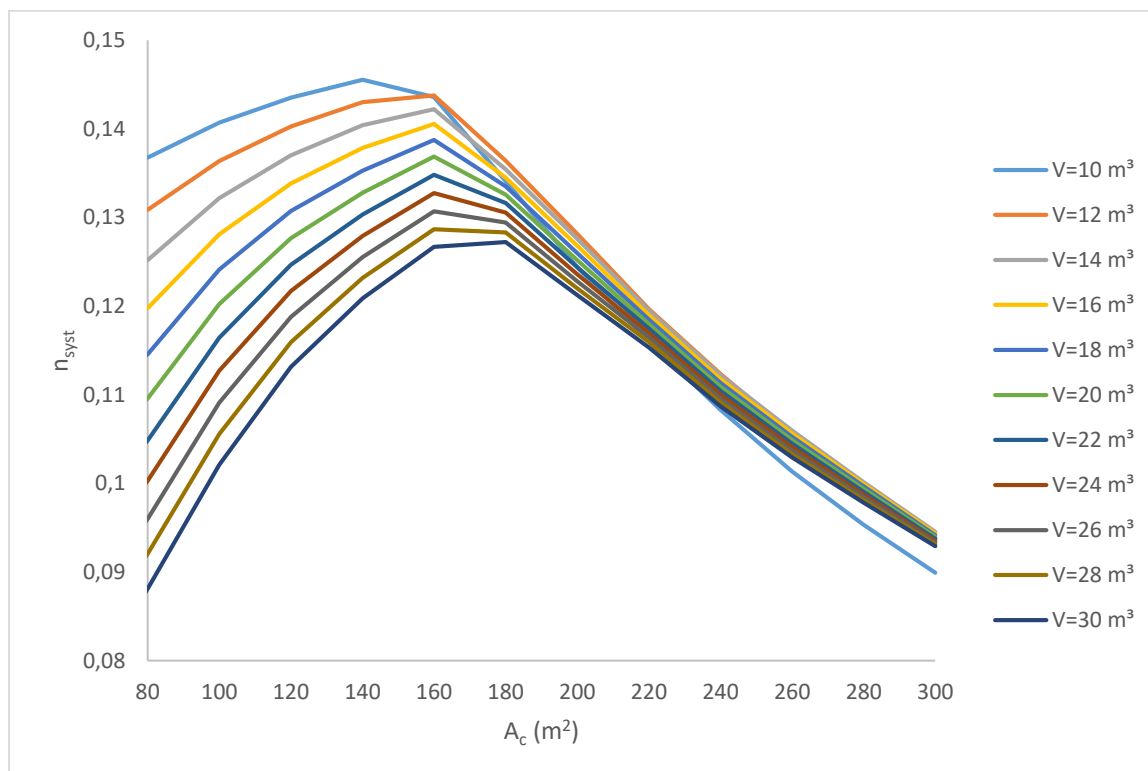
Στόχος των παρακάτω είναι η επιλογή του δοχείου αποθήκευσης V και της συλλεκτικής επιφάνειας A_c που επιτυγχάνουν τον μέγιστο βαθμό απόδοσης συστήματος η_{sys} , την μεγιστοποίηση της καθαρής παρούσας αξίας (NPV), την ελαχιστοποίηση του χρόνου αποπληρωμής (PP) και την ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας (LCOE). Οι περιπτώσεις που εξετάζονται είναι στο σύνολο 132 με την συλλεκτική επιφάνεια να κυμαίνεται στο εύρος (80-300 m^2) και βήμα 20 m^2 και τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης στο εύρος (10-30 m^3) με βήμα 2 m^3 όπως φαίνονται παρακάτω, Πίνακας 6.5.

	Εύρος	Βήμα	Μονάδα Μέτρησης
A_c	(80-300)	20	m^2
V	(10-30)	2	m^3

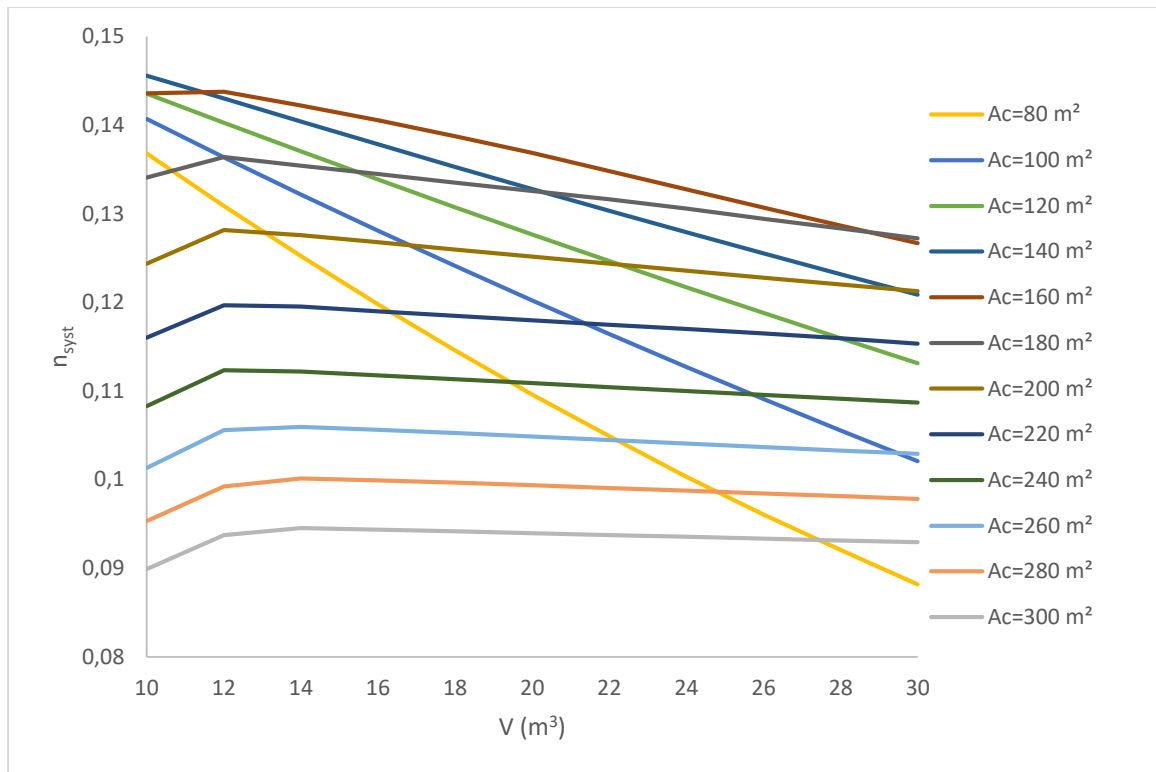
Πίνακας 6.5: Εύρος και βήμα συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου αποθήκευσης

6.3.1 Ενεργειακά Αποτελέσματα

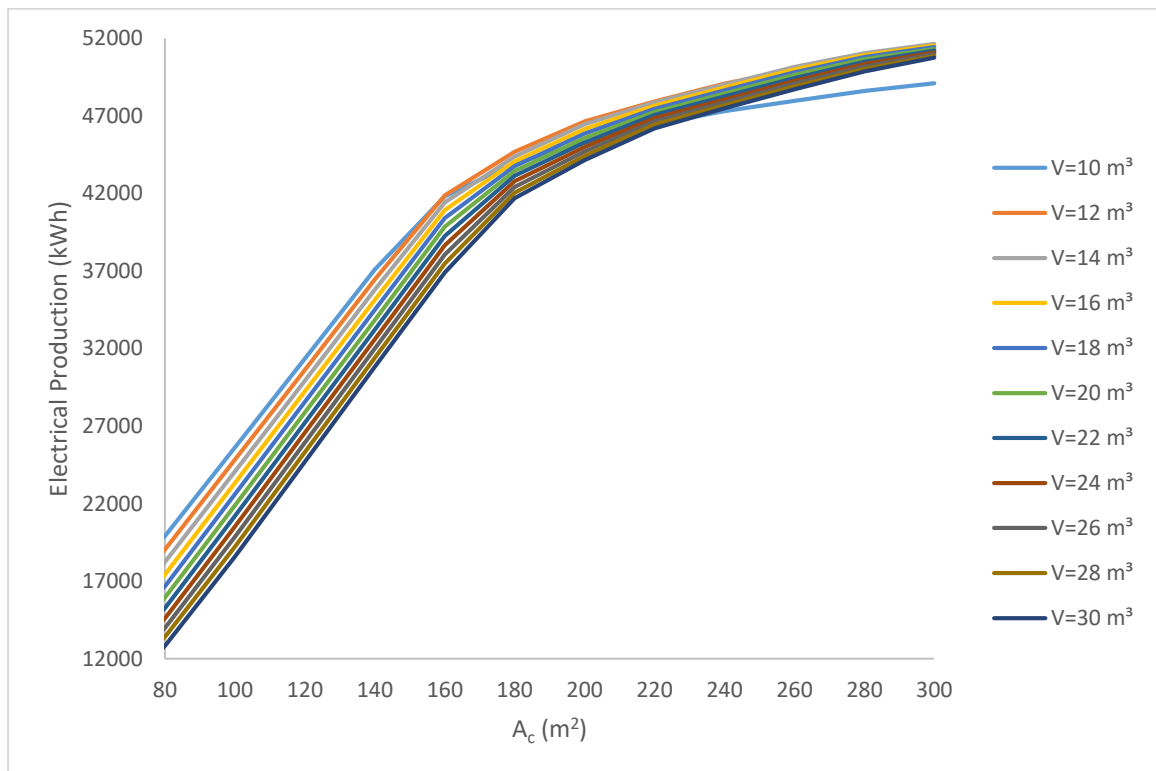
Ακολουθούν όλα τα αποτελέσματα για τους ενεργειακούς δείκτες. Οι παρατηρήσεις για κάθε διάγραμμα δίνονται στο τέλος της ενότητας.



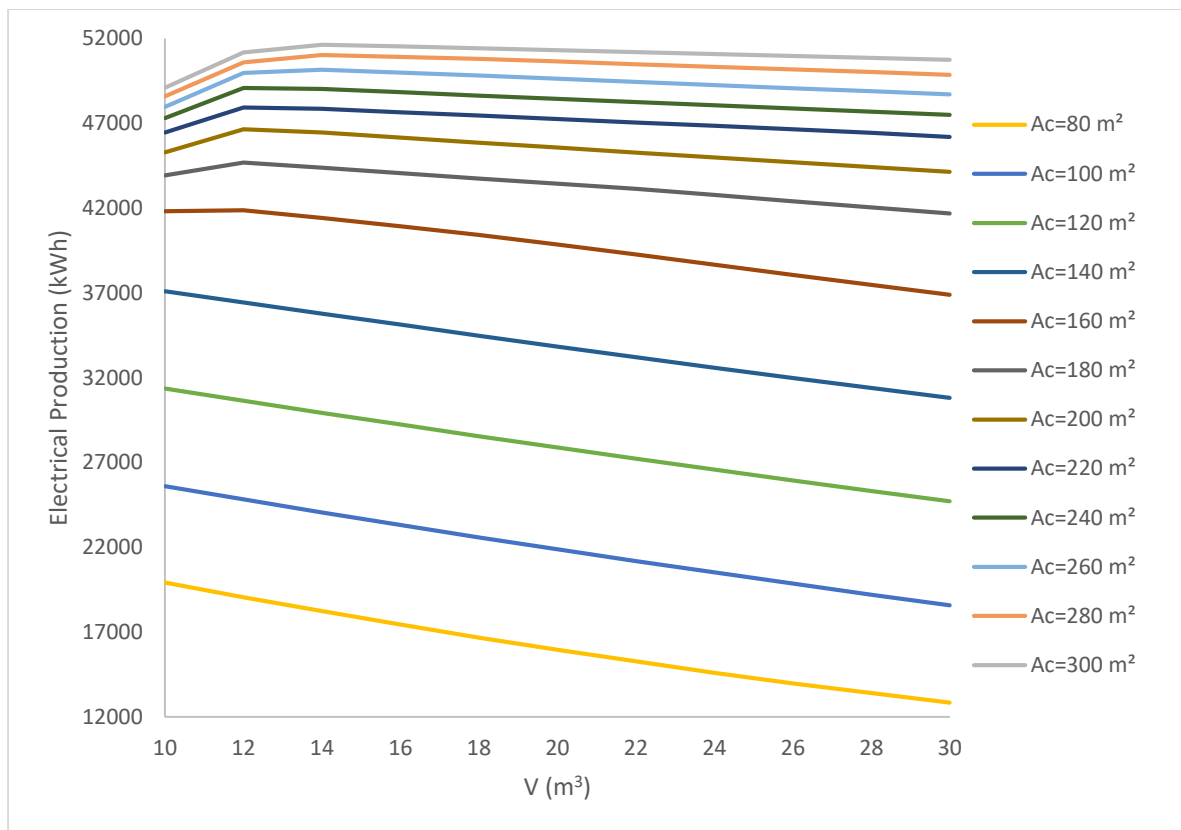
Διάγραμμα 6.13: Συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.14: Συνολικός βαθμός απόδοσης για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.15: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.16: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο

Παρατηρήσεις:

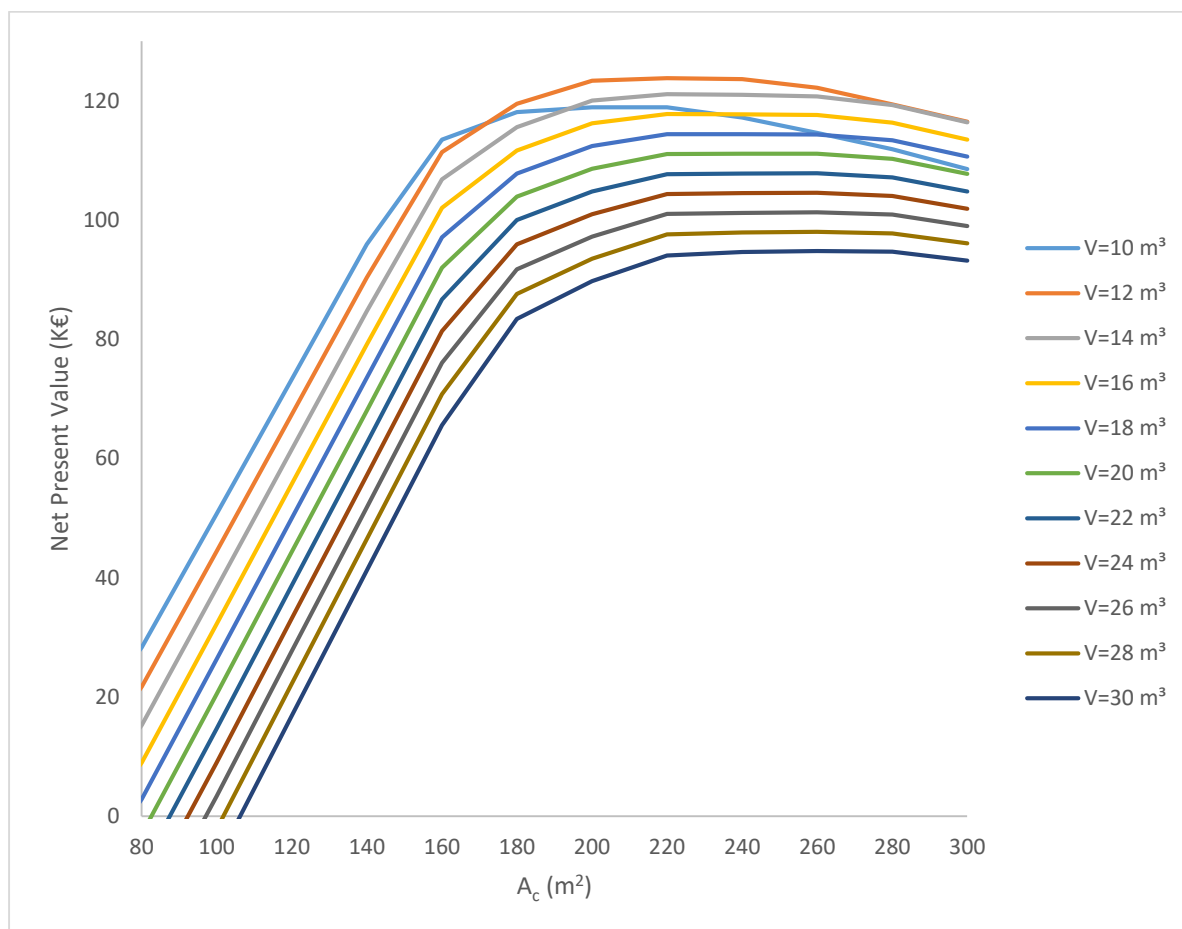
- Στο Διάγραμμα 6.13 φαίνεται ότι για κάθε δοχείο αποθήκευσης εμφανίζεται ο βέλτιστος συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος για συλλεκτική επιφάνεια 160m². Εξάιρεση αποτελεί το δοχείο με όγκο 10 m³ στο οποίο ο βέλτιστος παρουσιάζεται στα 140m².
- Στο Διάγραμμα 6.14 εμφανίζεται ότι για συλλεκτική επιφάνεια στο εύρος 80-180m² ο όγκος που βελτιστοποιεί τον συνολικό βαθμό απόδοσης συστήματος είναι ο ελάχιστος δυνατός στα 10m³. Ενώ στις υπόλοιπες συλλεκτικές επιφάνειες ο βέλτιστος όγκος εμφανίζεται στα 12m³. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για δεδομένη συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 180 m² και δοχείο αποθήκευσης μεγαλύτερο από 12 m³ ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζει σταθερή πορεία με μικρή πτώση. Ο λόγος για τον οποίο εμφανίζεται ένας βέλτιστος όγκος είναι γιατί όσο αυξάνεται ο όγκος του δοχείου μπορεί να αποθηκευτεί μεν περισσότερη ενέργεια αυξάνοντας δε τις απώλειες. Επιπλέον, από την μια μεριά ο μεγάλος όγκος αποθήκευσης βοηθάει κατά την διάρκεια του καλοκαιριού ώστε να μην ξεπεραστεί το ανώτατο θερμοκρασιακό όριο που έχει τεθεί $T_{sin,max}=380^{\circ}C$ και αναγκαστεί να διακόψει την λειτουργία ο ORC. Από την άλλη μεριά ένα πολύ μεγάλο δοχείο μπορεί να μην επιτρέψει την λειτουργία το χειμώνα καθώς μπορεί να μην υπάρχει η ικανότητα να φτάσει το σύστημα στην ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας $T_{sin,min}=308,4^{\circ}C$.
- Στο Διάγραμμα 6.15 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια μέχρι τα 160m² τόσο αυξάνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μετά τα 160 m² έως τα 300m² η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχίζει να αυξάνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό. Επιπλέον, για μικρότερους όγκους δοχείων η ενέργεια μειώνεται αισθητά,

ενώ όσο αυξάνονται οι όγκοι των δοχείων σε συνδυασμό με την αύξηση των συλλεκτικών επιφανειών οι καμπύλες τείνουν προς την ίδια ενέργεια.

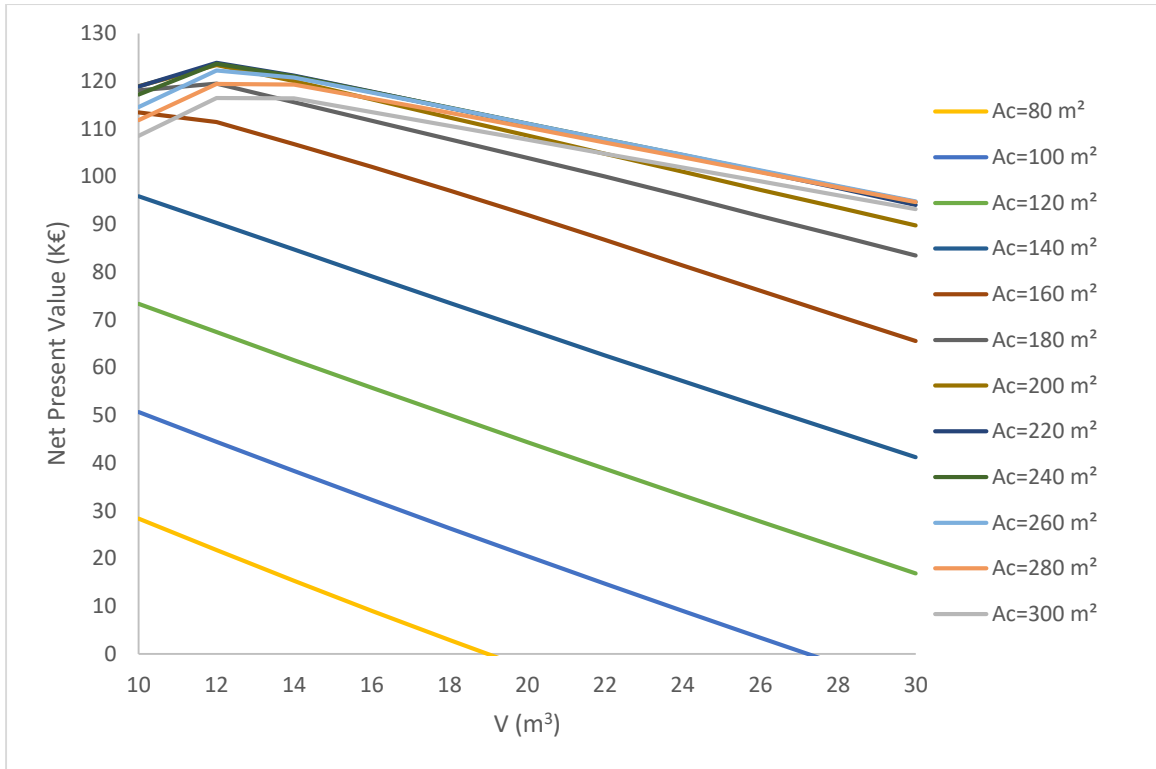
- Στο Διάγραμμα 6.16 παρατηρείται ότι η περισσότερη ενέργεια επιτυγχάνεται για μικρούς όγκους αποθήκευσης. Πιο συγκεκριμένα στο εύρος (80-140 m²) συλλεκτική επιφάνεια η περισσότερη ενέργεια επιτυγχάνεται για τον ελάχιστο δυνατό όγκο δοχείου στα 10m³, στο εύρος (160-240 m²) επιτυγχάνεται για όγκο δοχείου 12m³, στο εύρος (260-300 m²) επιτυγχάνεται για όγκο δοχείου 14m³.

6.3.2 Οικονομικά Αποτελέσματα

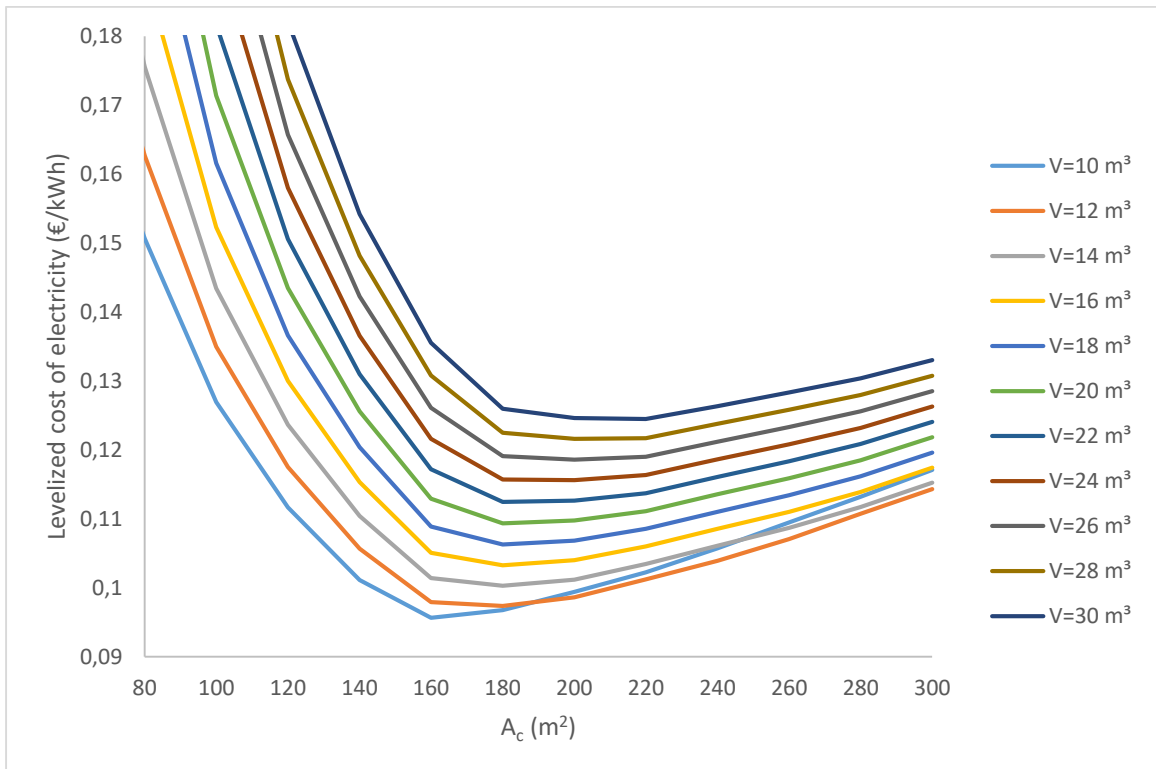
Ακολουθούν όλα τα αποτελέσματα για τους οικονομικούς δείκτες. Οι παρατηρήσεις για κάθε διάγραμμα δίνονται στο τέλος της ενότητας.



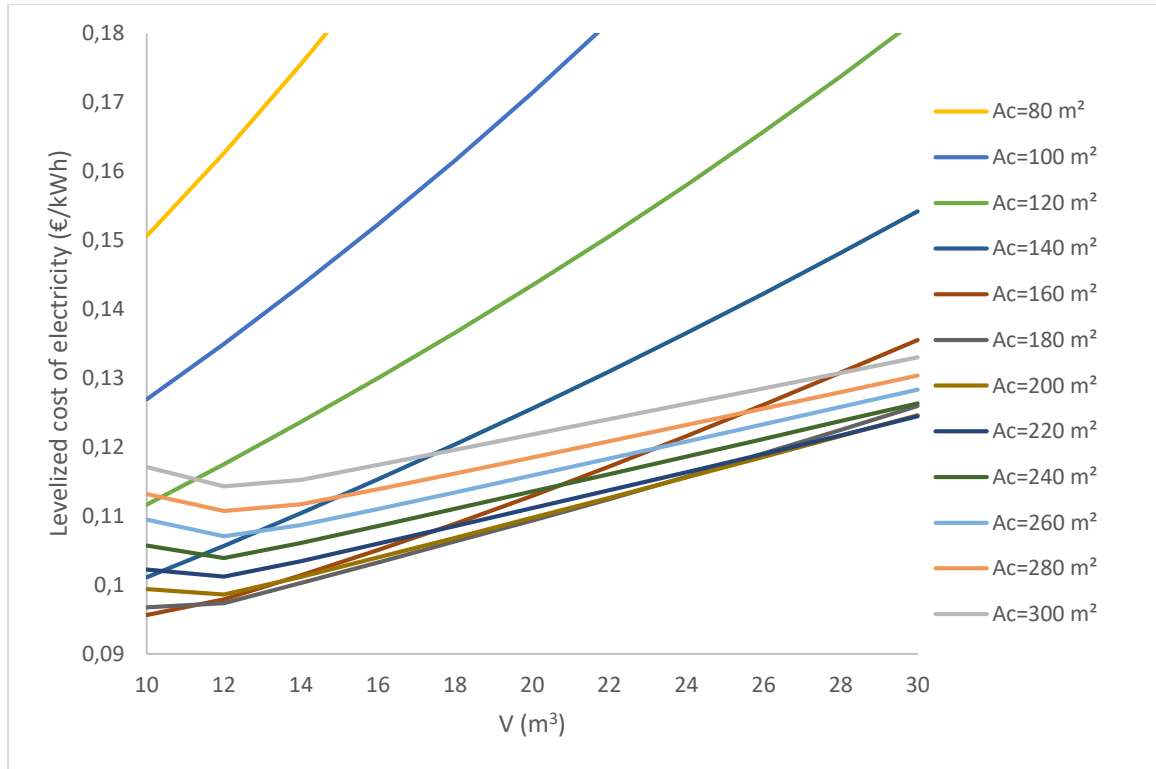
Διάγραμμα 6.17: Καθαρή παρούσα αξία για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



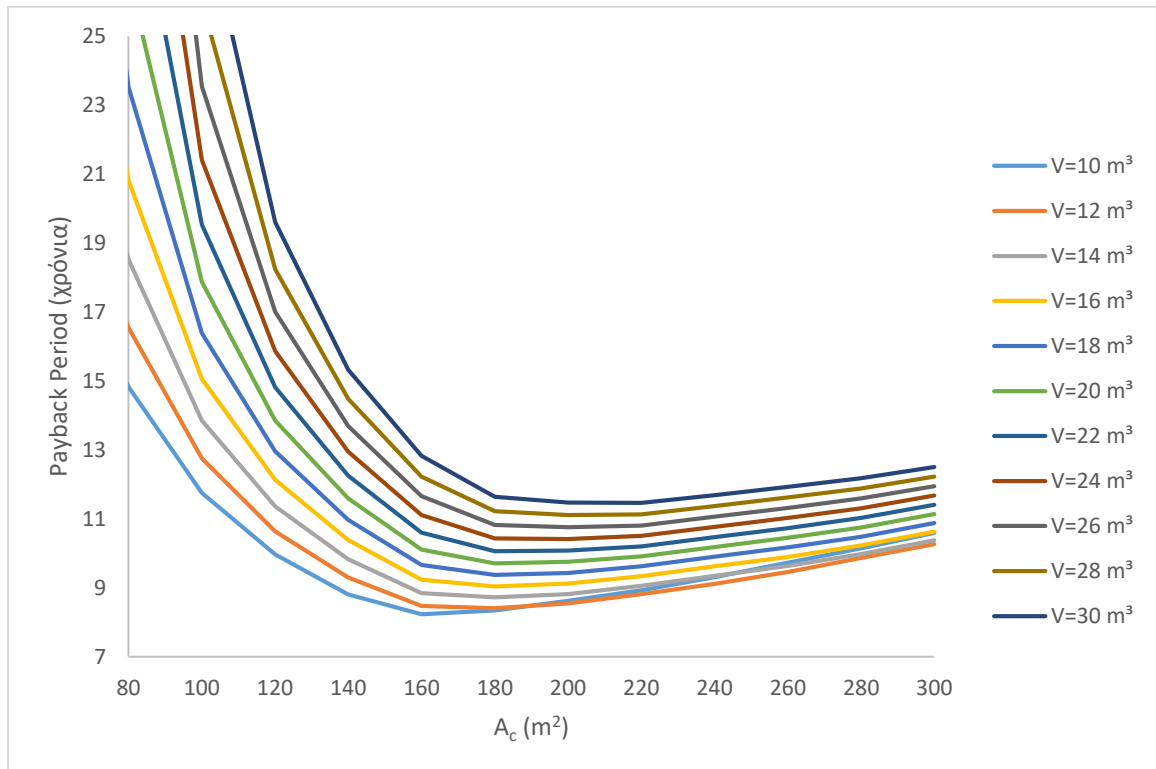
Διάγραμμα 6.18: Καθαρή παρούσα αξία για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο



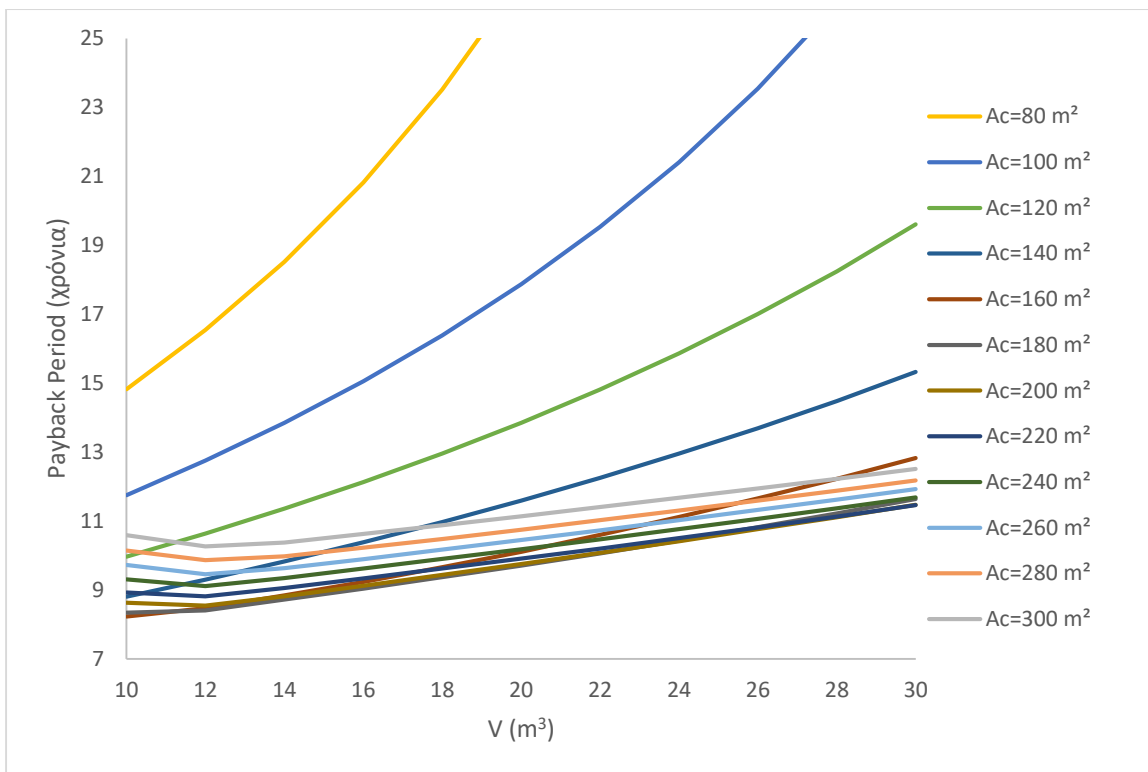
Διάγραμμα 6.19: Σταθμισμένο κόστος ενέργειας για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



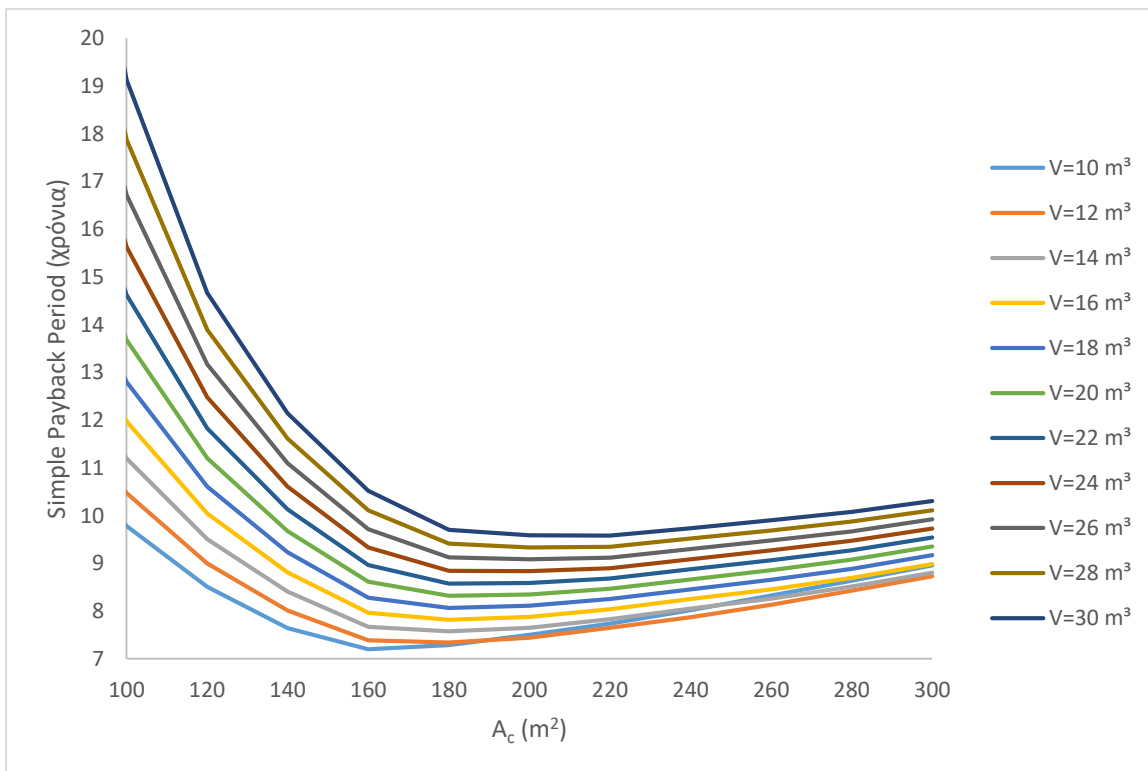
Διάγραμμα 6.20: Σταθμισμένο κόστος ενέργειας για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο



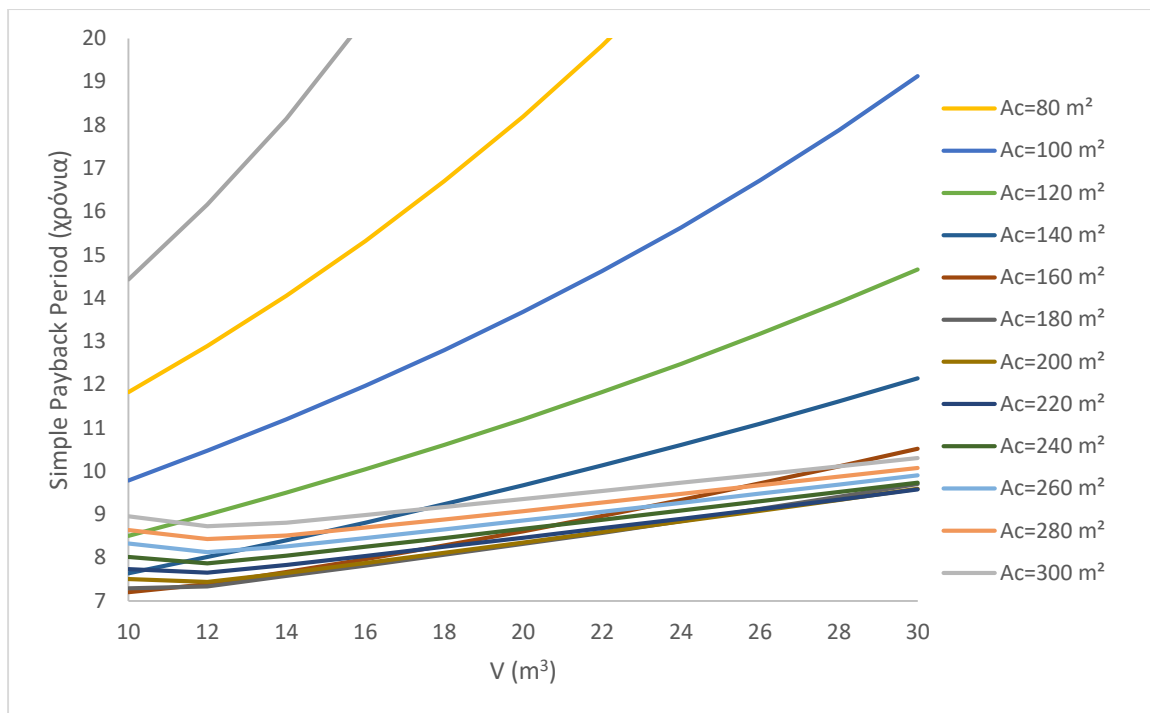
Διάγραμμα 6.21: Χρόνος αποπληρωμής για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.22: Χρόνος αποπληρωμής για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.23: Απλός χρόνος αποπληρωμής για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης ως βασική παράμετρο



Διάγραμμα 6.24: Απλός χρόνος αποπληρωμής για διαφορετικά δοχεία αποθήκευσης με την συλλεκτική επιφάνεια ως βασική παράμετρο

Παρατηρήσεις:

- Στο Διάγραμμα 6.17 παρουσιάζεται η καθαρή παρούσα αξία να μεγιστοποιείται για συλλεκτικές επιφάνειες στο εύρος (180-220 m²). Στο Διάγραμμα 6.18 παρουσιάζεται η καθαρή παρούσα αξία να μεγιστοποιείται για δοχείο αποθήκευσης στο εύρος (10-12 m³). Σημειώνεται ότι στο Διάγραμμα 6.18 φαίνονται και οι μέγιστοι όγκοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συλλεκτικές επιφάνειες 80 m² και 100 m² ώστε να είναι θετική η καθαρή παρούσα αξία.
- Στο Διάγραμμα 6.19 παρουσιάζεται το σταθμισμένο κόστος ενέργειας να ελαχιστοποιείται για συλλεκτικές επιφάνειες στο εύρος (160-180 m²). Στο Διάγραμμα 6.20 το σταθμισμένο κόστος ενέργειας ελαχιστοποιείται για δοχείο αποθήκευσης στο εύρος (10-12 m³). Η ελάχιστη τιμή του LCOE είναι 0,0957 €/kWh, αλλά και γενικά προκύπτουν λογικές τιμές, χαμηλότερες από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας τη συγκεκριμένη μελέτη ρεαλιστική.
- Στο Διάγραμμα 6.21 παρουσιάζεται η περίοδος αποπληρωμής η οποία ελαχιστοποιείται για συλλεκτικές επιφάνειες στο εύρος (180-220 m²). Στο Διάγραμμα 6.22 η περίοδος αποπληρωμής ελαχιστοποιείται για δοχείο αποθήκευσης στο εύρος (10-12 m³). Αξίζει να σημειωθεί ότι χρόνος αποπληρωμής και σταθμισμένο κόστος ενέργειας παρουσιάζουν ελάχιστα στα ίδια εύρη δοχείων και συλλεκτικών επιφανειών.
- Στο Διάγραμμα 6.23 και Διάγραμμα 6.24 παρουσιάζεται η απλή περίοδος αποπληρωμής στην οποία δεν λαμβάνεται υπόψη το επιτόκιο αναγωγής. Σε αυτήν εμφανίζονται πιο χαμηλές περίοδοι αποπληρωμής, ωστόσο η τάση και τα σημεία όπου εμφανίζονται τα ελάχιστα των καμπυλών είναι τα ίδια σε σχέση με την περίοδο αποπληρωμής και είναι για Ac=160 m² και V=10 m³ με PP=8,23 χρόνια και SPP=7,2 χρόνια.

Οι παράμετροι που βελτιστοποιούν κάθε φορά τον βαθμό απόδοσης και τους οικονομικούς δείκτες παρουσιάζονται παρακάτω, Πίνακας 6.6.

Παράμετρος	Βέλτιστο A_c (m^2)	Βέλτιστο V (m^3)	Βέλτιστη Τιμή Παραμέτρου
n_{syst} (%)	140	10	14,55 %
NPV (κ€)	220	12	123,81 κ€
LCOE (€/kWh)	160	10	0,0957 €/kWh
PP (χρόνια)	160	10	8,23 χρόνια

Πίνακας 6.6: Βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια και δοχείο αποθήκευσης για τον βαθμό απόδοσης συστήματος και οικονομικές παραμέτρους

Γίνεται φανερό ότι διαφορετικές τιμές συλλεκτικής επιφάνειας και δοχείου αποθήκευσης βελτιστοποιούν την κάθε παράμετρο. Η τελική επιλογή των βέλτιστων διαστάσεων εξαρτάται από την βαρύτητα που δίνει ο σχεδιαστής στην κάθε οικονομική παράμετρο σε συνδυασμό με τον ενεργειακό δείκτη. Σε κάθε περίπτωση στην παρούσα εργασία αυτό που ενδιαφέρει είναι να συγκριθεί ο αισθητός τρόπος αποθήκευσης με τους επόμενους τρόπους αποθήκευσης και να βρεθούν οι βέλτιστοι παράμετροι μεταξύ αυτών. Οπότε όπως αναλύεται και παρακάτω για την διαδικασία σύγκρισης χρησιμοποιείται εύρος συλλεκτικής επιφάνειας και όγκου που περιλαμβάνει αυτές τις βέλτιστες τιμές.

6.4 Δυναμικό μοντέλο με χρήση στερεών υλικών στο εσωτερικό

6.4.1 Επιλογή στερεού υλικού

Για το μοντέλο με χρήση στερεών υλικών στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης επιλέγονται για διερεύνηση τα στερεά με τις ιδιότητες που φαίνονται στον Πίνακα 6.7.

Στερεό	ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)
Quartzite	2600	850
Basalt	2900	900
Concrete	2200	850
Bricks	3200	800
Ceramic	3550	900
Alumina	4000	900

Πίνακας 6.7: Πυκνότητα και θερμοχωρητικότητα επιλεγθέντων στερεών υλικών

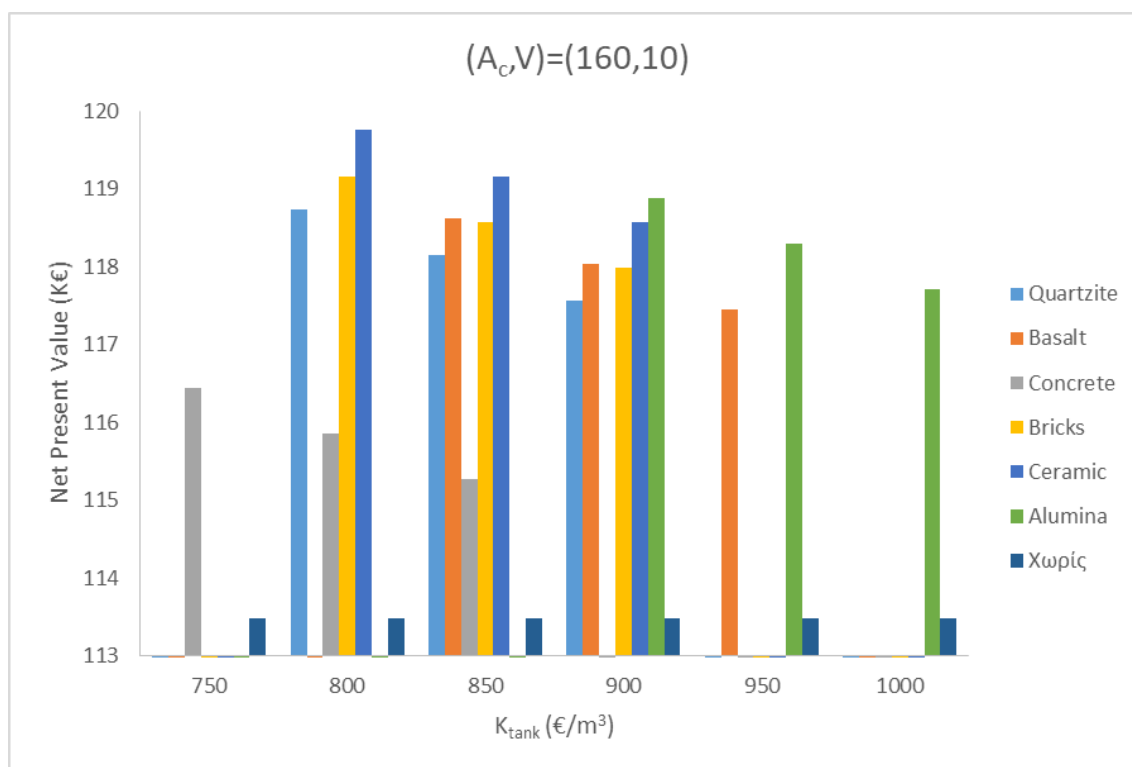
Για τα παραπάνω στερεά υλικά είναι φανερό ότι οι τιμές της συλλεκτικής επιφάνειας και του όγκου δοχείου για τις οποίες βελτιστοποιούνται ο βαθμός απόδοσης συστήματος και οι οικονομικοί δείκτες είναι κοντά στις τιμές που προέκυψαν από τον αισθητό τρόπο αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό. Για την ακρίβεια αναμένεται στα στερεά υλικά να προκύψει ανάλογη βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια και λίγο μικρότερος όγκος δοχείου όπως αναλύεται στην θεωρία. Πράγματι όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.8 για τα στερεά Ceramic και Alumina οι καλύτεροι βαθμοί απόδοσης συστήματος επιτυγχάνονται για δοχείο όγκου $8 m^3$ σε αντίθεση με τα υπόλοιπα όπου επιτυγχάνεται για $10 m^3$.

	n_{syst} (-) για ($160m^2, 10m^3$)	n_{syst} (-) για ($160m^2, 8m^3$)
Quartzite	0,1456	0,1403
Basalt	0,1459	0,1457
Concrete	0,1436	0,1357
Bricks	0,1459	0,1451
Ceramic	0,1463	0,1479
Alumina	0,1465	0,1482

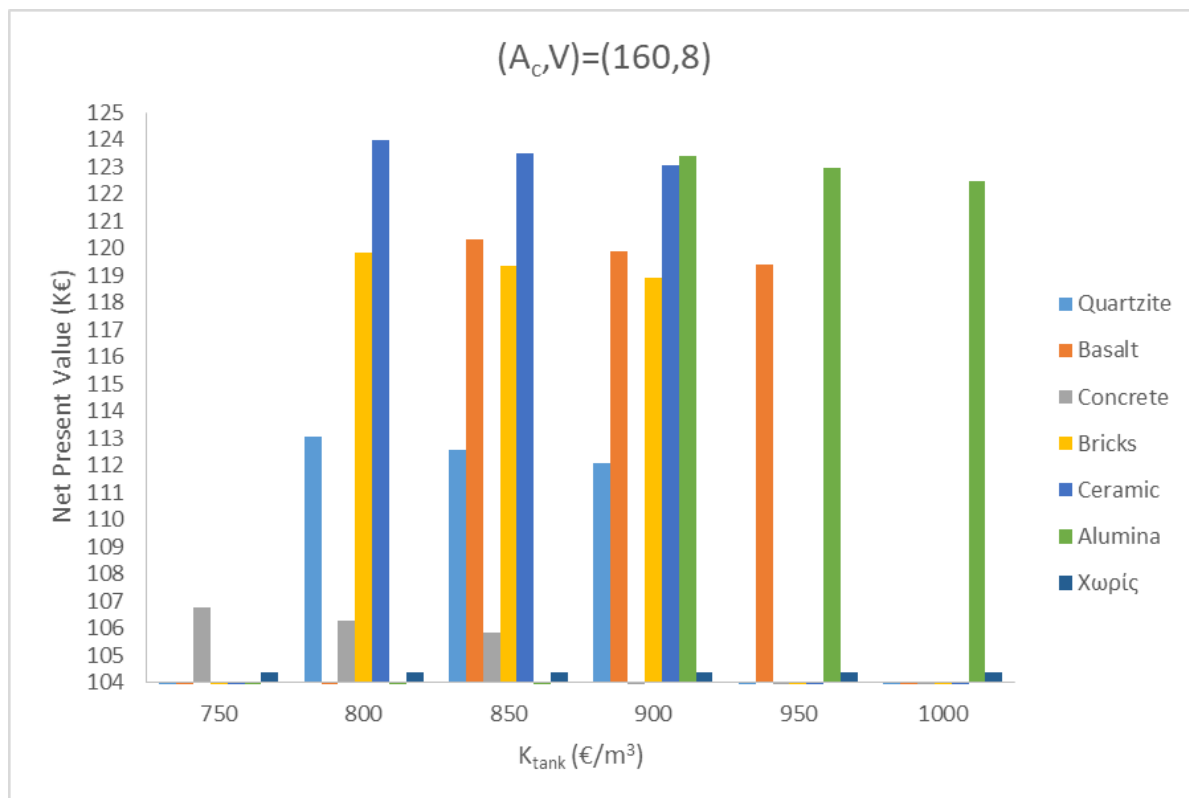
Πίνακας 6.8: Συνολικός βαθμός απόδοσης συστήματος για διαφορετικά στερεά

Σημαντική παράμετρος που διαφοροποιείται στον τρόπο αποθήκευσης με στερεά υλικά είναι το ειδικό κόστος του δοχείου στο οποίο υπεισέρχεται το κόστος του κάθε στερεού. Καθώς η ακριβής τιμή αυτού του κόστους, όπως έχει αναφερθεί στην μεθοδολογία, Πίνακας 5.9, είναι δύσκολο να καθορισθεί με ακρίβεια, πραγματοποιείται διερεύνηση και σύγκριση για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών.

Παρατηρείται στο Διάγραμμα 6.25 ότι η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία για $(A_c, V)=(160, 10)$ επιτυγχάνεται με τα Ceramics, προφανώς στην περίπτωση όπου το ειδικό κόστος δοχείου έχει την πιο μικρή τιμή. Στο Διάγραμμα 6.26 εμφανίζεται η ολική μέγιστη καθαρή παρούσα αξία με την χρήση Ceramic με τιμή $NPV=123,99$ Κ€ και ακολουθεί το στερεό Alumina. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι ακόμα και στην πιο αισιόδοξη τιμή δοχείου με Alumina παρουσιάζεται παρόμοια τιμή με την χρήση Ceramics αλλά για την ενδιάμεση τιμή κόστους δοχείου. Επομένως, το στερεό που επιλέγεται για σύγκριση με τον αισθητό τρόπο αποθήκευσης χωρίς στερεό είναι το Ceramic. Σημειώνεται επίσης ότι για όλα τα στερεά παρουσιάζεται βελτίωση του τρόπου αποθήκευσης με μόνο θερμικό έλαιο.



Διάγραμμα 6.25: Διάγραμμα καθαρής παρούσας αξίας για όλα τα στερεά για εύρος ειδικού κόστους δοχείου για $(A_c, V)=(160, 10)$

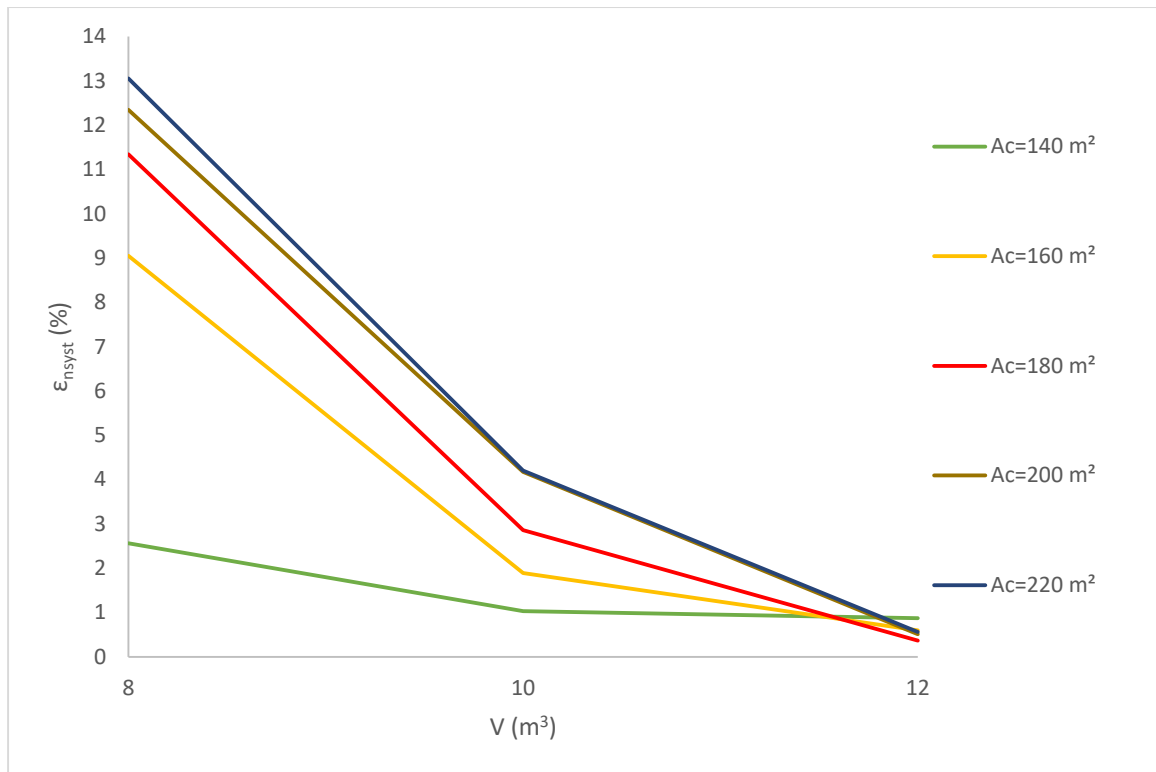


Διάγραμμα 6.26: Διάγραμμα καθαρής παρούσας αξίας για όλα τα στερεά για εύρος ειδικού κόστους δοχείου για $(A_c, V)=(160,8)$

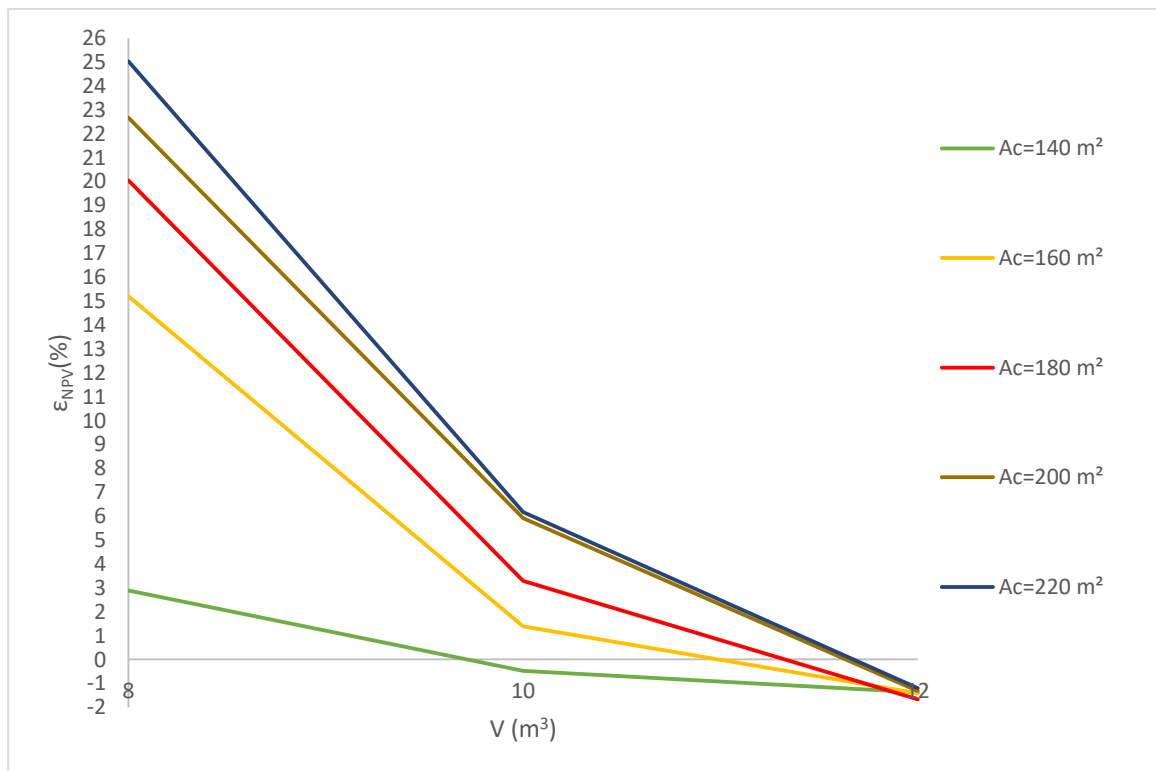
6.4.2 Σύγκριση αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με χρήση Ceramics

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται στο σύνολο τους είναι 15 με την συλλεκτική επιφάνεια να κυμαίνεται στο εύρος (140-220 m²) και βήμα 20 m² και τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης στο εύρος (8-12 m³) με βήμα 2 m³ και προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 6.6. Σημειώνεται ότι για το στερεό υλικό Ceramics επιλέγεται $K_{\text{tank,ceramics}}=850 \text{ €/m}^3$.

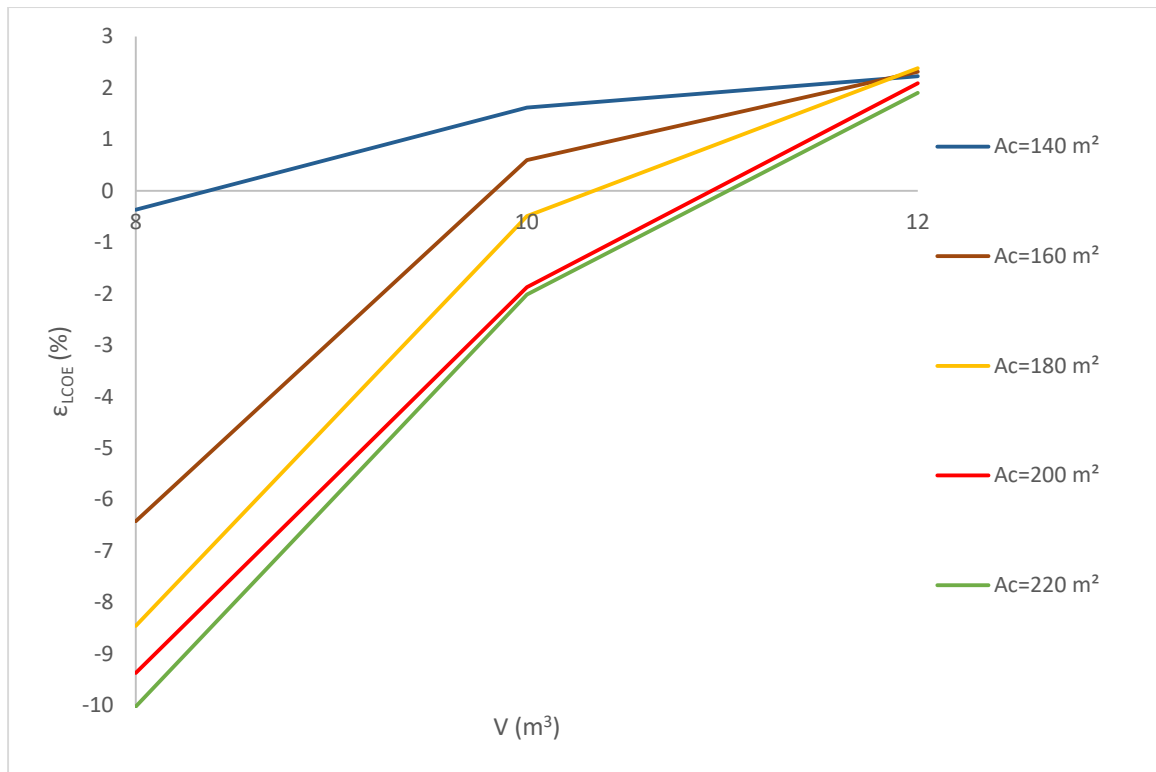
Σημαντικό είναι ότι η παράμετρος που επιλέγεται να παρουσιαστεί στα παρακάτω διαγράμματα είναι το ποσοστό μεταβολής του εκάστοτε ενεργειακού και οικονομικού δείκτη από τον τρόπο αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με τον τρόπο αποθήκευσης με χρήση Ceramics. Τονίζεται ότι όταν αυτό το ποσοστό είναι θετικό σημαίνει ότι ο εκάστοτε δείκτης αυξάνεται με την χρήση των Ceramics και αντίστοιχα όταν είναι αρνητικό. Οι παρατηρήσεις για κάθε διάγραμμα δίνονται στο τέλος της ενότητας.



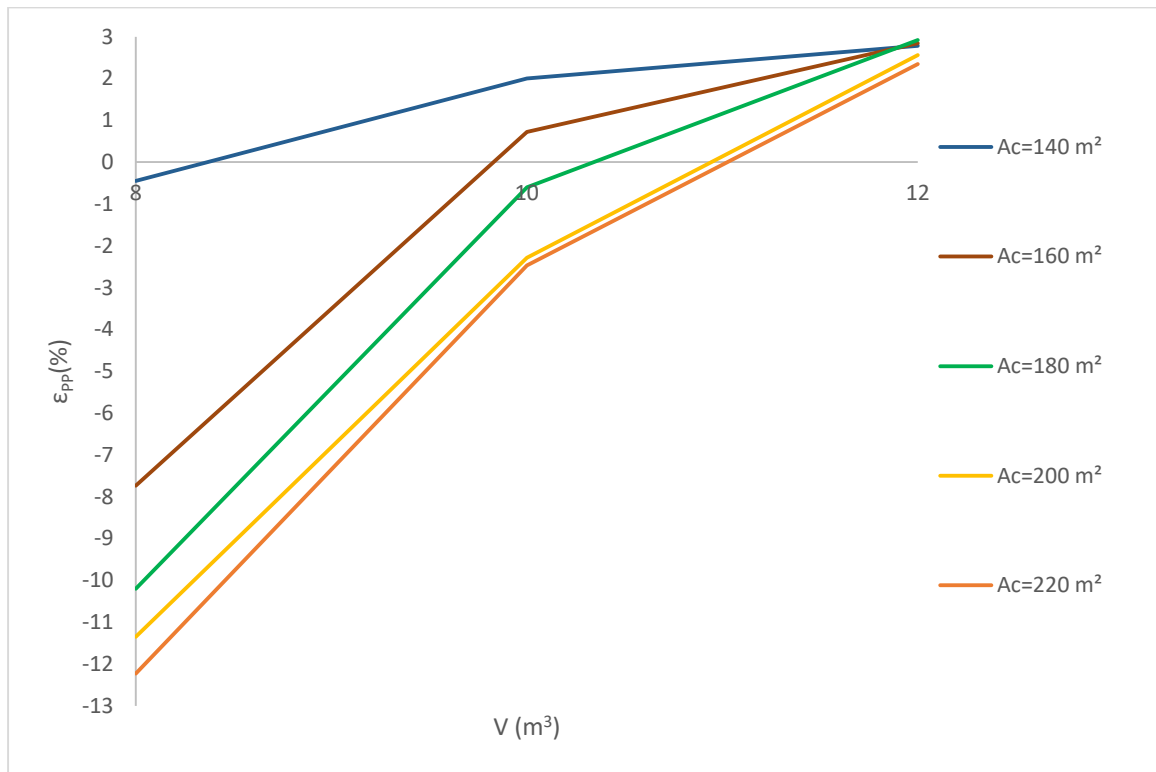
Διάγραμμα 6.27: Ποσοστό μεταβολής βαθμού απόδοσης συστήματος με χρήση Ceramics σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.28: Ποσοστό μεταβολής καθαρής παρούσας αξίας με χρήση Ceramics σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.29: Ποσοστό μεταβολής σταθμισμένου κόστους ενέργειας με χρήση Ceramics σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.30: Ποσοστό μεταβολής χρόνου αποπληρωμής με χρήση Ceramics σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό

Παρατηρήσεις:

- Στο Διάγραμμα 6.27 παρατηρούνται μόνο θετικές τιμές οπότε η χρήση κεραμικών σε κάθε περίπτωση βελτιώνει-αυξάνει τον βαθμό απόδοσης συστήματος όπως ήταν αναμενόμενο. Αυτή η βελτίωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια και όσο μειώνεται ο όγκος δοχείου.
- Στο Διάγραμμα 6.28 παρατηρούνται μόνο θετικές τιμές δηλαδή βελτίωση-αύξηση της καθαρής παρούσας αξίας με χρήση Ceramics σε όλο το εύρος όγκου και συλλεκτικής επιφάνειας. Αυτή η βελτίωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια και όσο μειώνεται ο όγκος δοχείου με εξαίρεση για συλλεκτική επιφάνεια 140 m².
- Στα Διάγραμμα 6.29 και στο Διάγραμμα 6.30 παρατηρούνται μόνο αρνητικές τιμές δηλαδή βελτίωση-μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας και του χρόνου αποπληρωμής αντίστοιχα με χρήση Ceramics. Αυτή η βελτίωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια για 8,10 m³ και όσο μειώνεται ο όγκος δοχείου με εξαίρεση για συλλεκτική επιφάνεια 140 m².

Σημειώνεται ότι παρουσιάζεται μεν σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις βελτίωση για όλες τις συλλεκτικές επιφάνειες και τους όγκους, ωστόσο στα σημεία όπου αυτή η βελτίωση είναι πολύ μικρή (στους μεγαλύτερους όγκους δοχείων και μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες) αν είχε ληφθεί μεγαλύτερη τιμή κόστους δοχείου για τα Ceramics τότε μπορεί η αποθήκευση με μόνο θερμικό έλαιο να ήταν η προτιμητέα επιλογή.

Εκτός από το ποσοστό μεταβολής που είναι απαραίτητο για να γίνει η σύγκριση των δύο τρόπων αποθήκευσης, παρακάτω, Πίνακας 6.9 παρουσιάζονται σε απόλυτα νούμερα ο βαθμός απόδοσης συστήματος και οι οικονομικοί δείκτες για συλλεκτική επιφάνεια 160 m² και όγκους δοχείων 8 και 10 m³.

A _c (m ²)	V (m ³)	n _{sys} (-)	NPV (Κ€)	LCOE (€/kWh)	PP (χρόνια)
160	8	0,1479	123,52	0,0891	7,56
160	10	0,1463	119,17	0,0921	7,87
180	8	0,1389	129,73	0,0900	7,63
180	10	0,1379	126,10	0,0923	7,89
200	8	0,1297	132,36	0,0919	7,84
200	10	0,1295	130,05	0,0938	8,04

Πίνακας 6.9: Βαθμός απόδοσης και οικονομικοί δείκτες για βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια και βέλτιστο όγκο δοχείου με χρήση Ceramics

Παρατηρείται ότι με την χρήση Ceramics επιτυγχάνεται βέλτιστη καθαρή παρούσα αξία για (A_c, V)=(200, 8) και έχει τιμή NPV=132,36 Κ€. Βέλτιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας για (A_c, V)=(160, 8) και τιμή LCOE=0,0891 €/kWh. Βέλτιστη περίοδο αποπληρωμής για (A_c, V)=(160, 8) και τιμή PP=7,56 έτη.

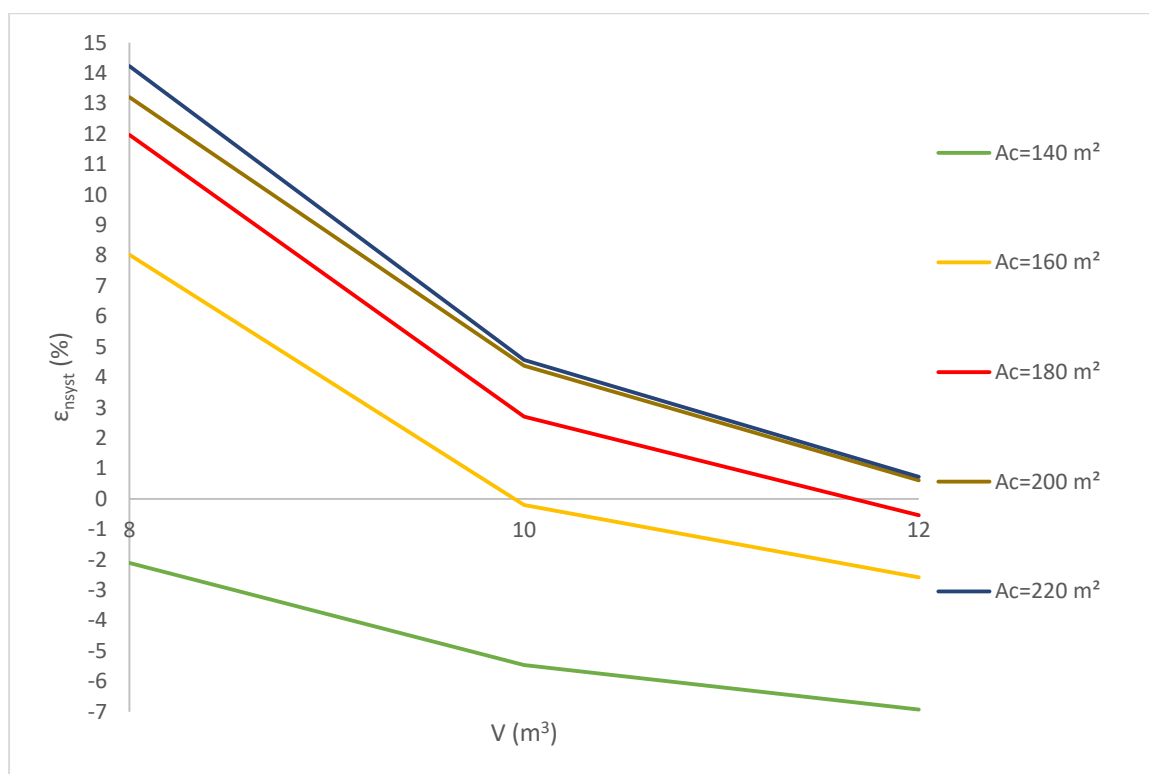
Συμπεράσματα:

- ❖ Σε κάθε περίπτωση με την χρήση Ceramics όλοι οι δείκτες βελτιώνονται με την χρήση μικρότερου όγκου δοχείου και πιο συγκεκριμένα για V=8 m³.
- ❖ Η συλλεκτική επιφάνεια μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με τον δείκτη που ο σχεδιαστής θα δώσει περισσότερη βαρύτητα.

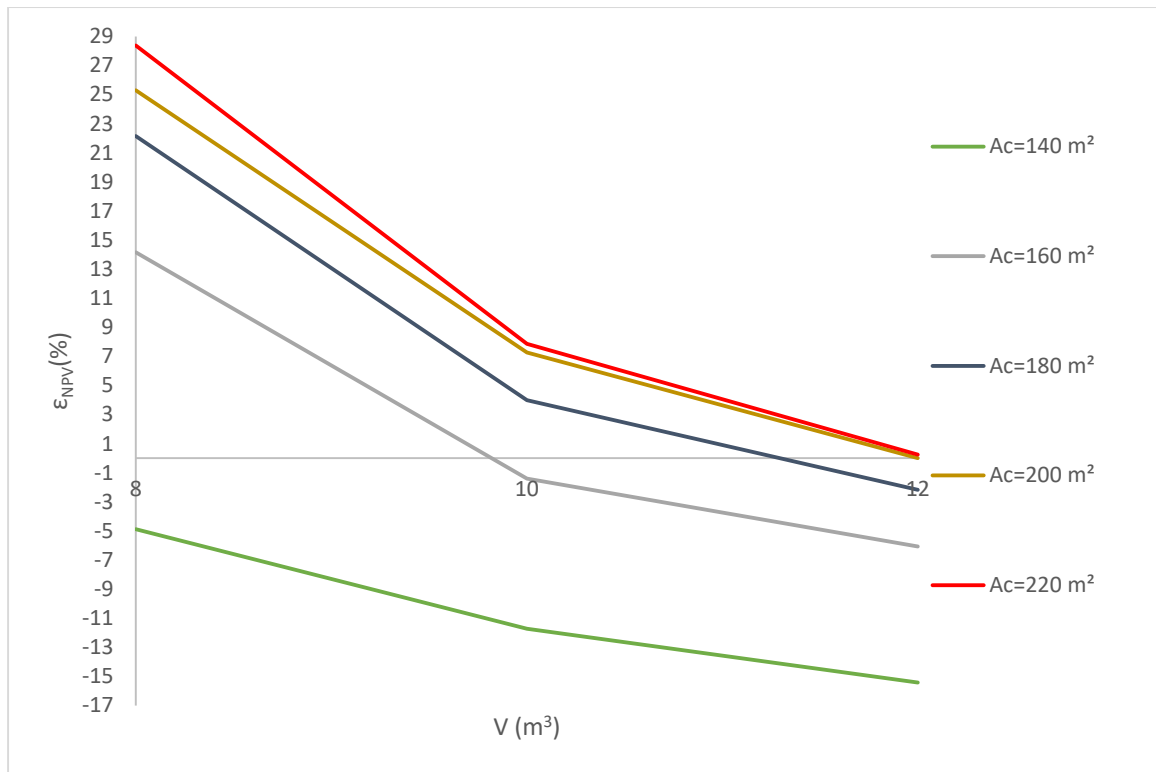
6.5 Σύγκριση αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με χρήση PCM

Για το δοχείο με διφασικό υλικό (PCM) επιλέγεται να γίνει αντίστοιχη διερεύνηση και σύγκριση όπως αυτή μεταξύ στερεών υλικών και μόνο θερμικού ελαίου. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται στο σύνολο τους είναι 15 με την συλλεκτική επιφάνεια να κυμαίνεται στο εύρος (140-220 m²) και βήμα 20 m² και τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης στο εύρος (8-12 m³) με βήμα 2 m³. Σημειώνεται ότι το κόστος του δοχείου επιλέγεται σύμφωνα με την μεθοδολογία $K_{\text{tank,pcm}}=1100 \text{ €/m}^3$.

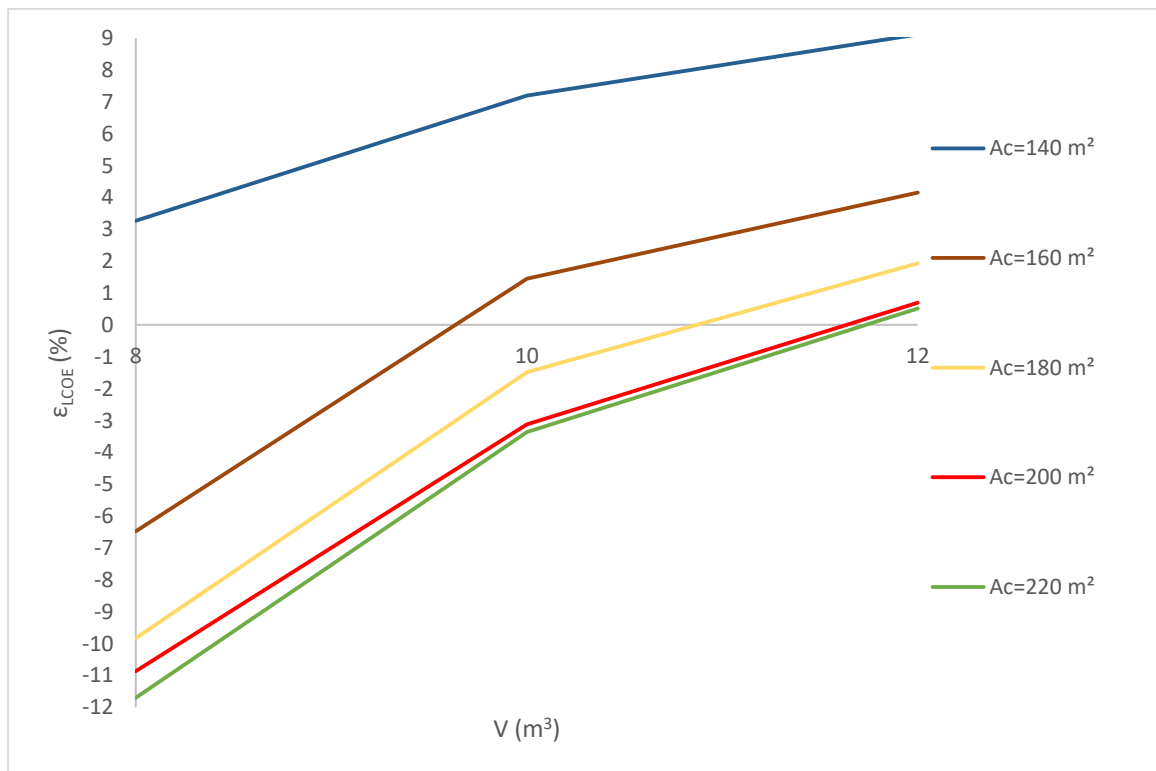
Η παράμετρος που επιλέγεται να παρουσιαστεί στα παρακάτω διαγράμματα είναι το ποσοστό μεταβολής του εκάστοτε ενεργειακού και οικονομικού δείκτη από τον τρόπο αποθήκευσης χωρίς στερεό υλικό με τον τρόπο αποθήκευσης με χρήση PCM. Τονίζεται ότι όταν αυτό το ποσοστό είναι θετικό σημαίνει ότι ο εκάστοτε δείκτης αυξάνεται με την χρήση των PCM και αντίστοιχα όταν είναι αρνητικό. Οι παρατηρήσεις για κάθε διάγραμμα δίνονται στο τέλος της ενότητας.



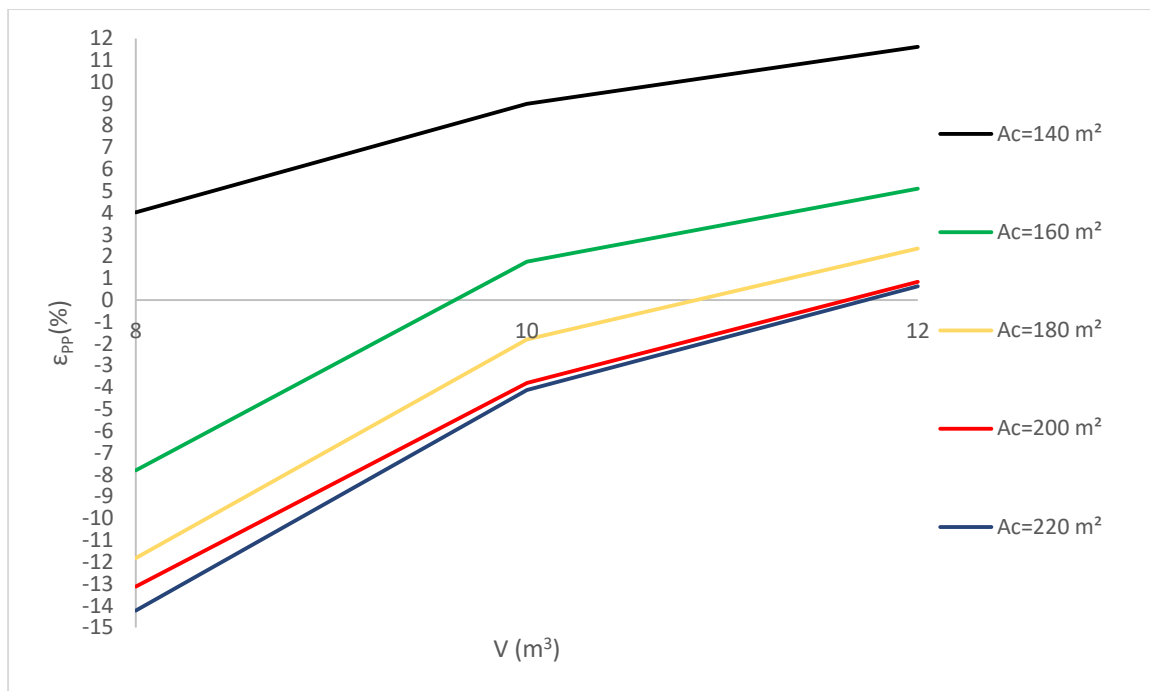
Διάγραμμα 6.31: Ποσοστό μεταβολής βαθμού απόδοσης συστήματος με χρήση PCM σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.32: Ποσοστό μεταβολής καθαρής παρούσας αξίας με χρήση PCM σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.33: Ποσοστό μεταβολής σταθμισμένου κόστους ενέργειας με χρήση PCM σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό



Διάγραμμα 6.34: Ποσοστό μεταβολής χρόνου αποπληρωμής με χρήση PCM σε σύγκριση με αποθήκευση χωρίς στερεό υλικό

Παρατηρήσεις:

- Στο Διάγραμμα 6.31 και στο Διάγραμμα 6.32 παρατηρούνται θετικές τιμές δηλαδή βελτίωση-αύξηση του βαθμού απόδοσης και της καθαρής παρούσας αξίας αντίστοιχα με χρήση PCM για όγκους 8 m³ για συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 140 m², για όγκους 10 m³ για συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 160 m², για όγκους 12 m³ για συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 180 m². Αυτή η βελτίωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια και όσο μειώνεται ο όγκος δοχείου.
- Στο Διάγραμμα 6.33 και στο Διάγραμμα 6.34 παρατηρούνται αρνητικές τιμές δηλαδή βελτίωση-μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας και του χρόνου αποπληρωμής αντίστοιχα με χρήση PCM για όγκους 8 m³ για συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 140 m², για όγκους 10 m³ για συλλεκτική επιφάνεια μεγαλύτερη από 160 m². Αυτή η βελτίωση αυξάνεται όσο αυξάνεται η συλλεκτική επιφάνεια και όσο μειώνεται ο όγκος δοχείου.

Παρακάτω, Πίνακας 6.10, παρουσιάζονται σε απόλυτα νούμερα ο βαθμός απόδοσης συστήματος και οι οικονομικοί δείκτες για συλλεκτική επιφάνεια 160 m² και όγκους δοχείων 8 και 10 m³.

A _c (m ²)	V (m ³)	n _{sys} (-)	NPV (Κ€)	LCOE (€/kWh)	PP (χρόνια)
160	8	0,1465	119,16	0,0923	7,89
160	10	0,1432	111,89	0,0970	8,38
180	8	0,1397	128,66	0,0915	7,81
180	10	0,1377	122,81	0,0953	8,20
200	8	0,1307	131,83	0,0932	7,99
200	10	0,1298	127,56	0,0963	8,30

Πίνακας 6.10: Βαθμός απόδοσης και οικονομικοί δείκτες για βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια και βέλτιστο όγκο δοχείου με χρήση PCM

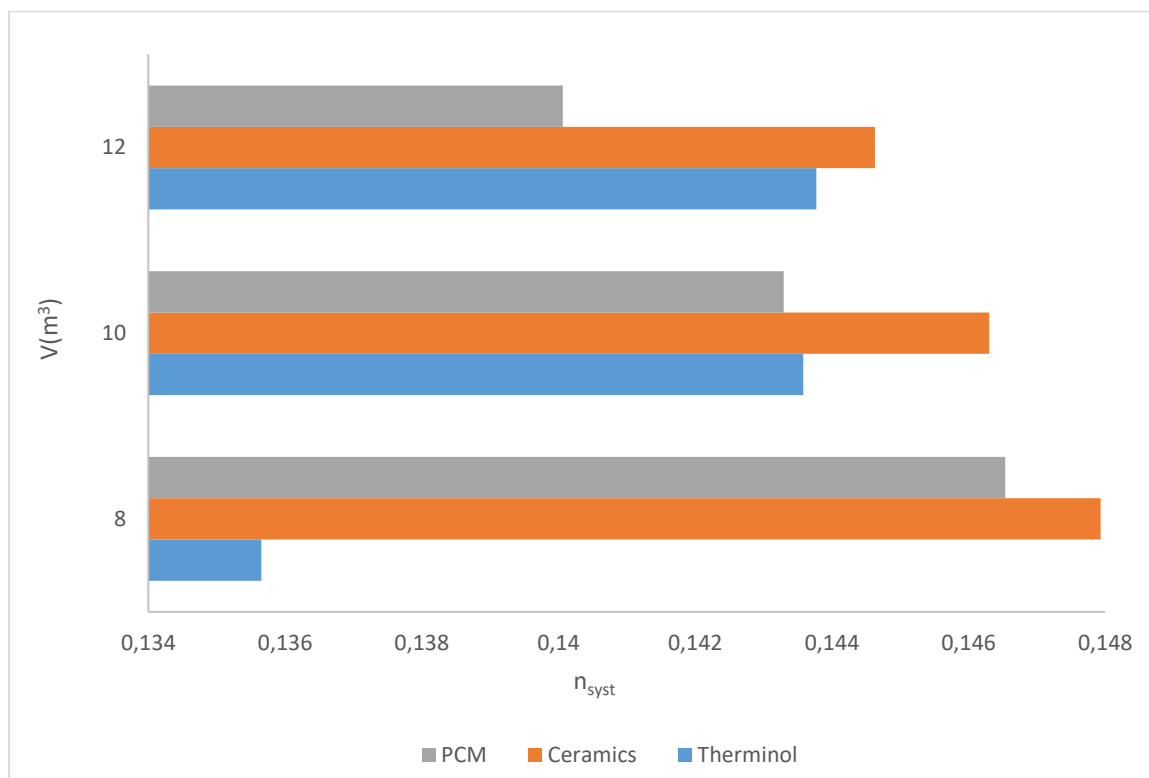
Παρατηρείται ότι με την χρήση PCM επιτυγχάνεται βέλτιστη καθαρή παρούσα αξία για $(A_c, V)=(200, 8)$ και έχει τιμή $NPV=131,83$ Κ€. Βέλτιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας για $(A_c, V)=(180, 8)$ και τιμή $LCOE=0,0915$ €/kWh. Βέλτιστη περίοδος αποπληρωμής για $(A_c, V)=(180, 8)$ και τιμή $PP=7,81$ (χρόνια).

Συμπεράσματα:

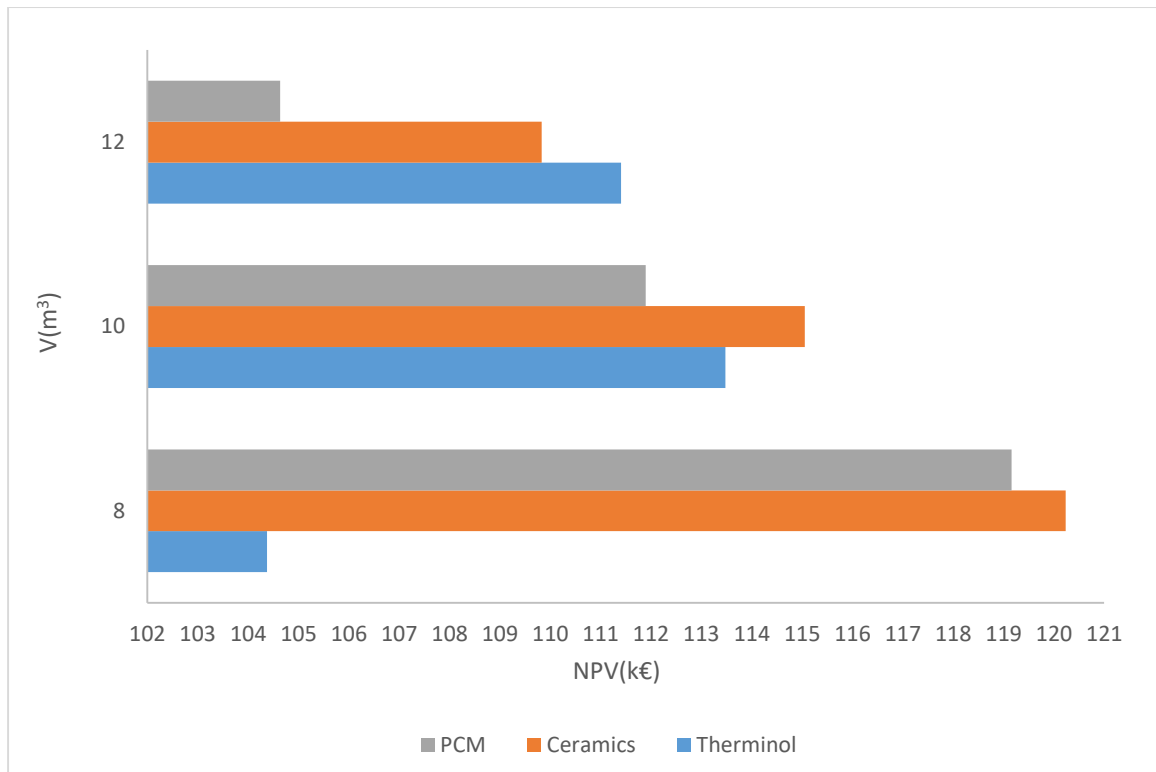
- ❖ Σε κάθε περίπτωση με την χρήση PCM όλοι οι δείκτες βελτιώνονται με την χρήση μικρότερου όγκου δοχείου και πιο συγκεκριμένα για $V=8 \text{ m}^3$.
- ❖ Η συλλεκτική επιφάνεια μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με τον δείκτη που ο σχεδιαστής θα δώσει περισσότερη βαρύτητα.

6.6 Σύγκριση των τριών τρόπων αποθήκευσης για σταθερή συλλεκτική επιφάνεια

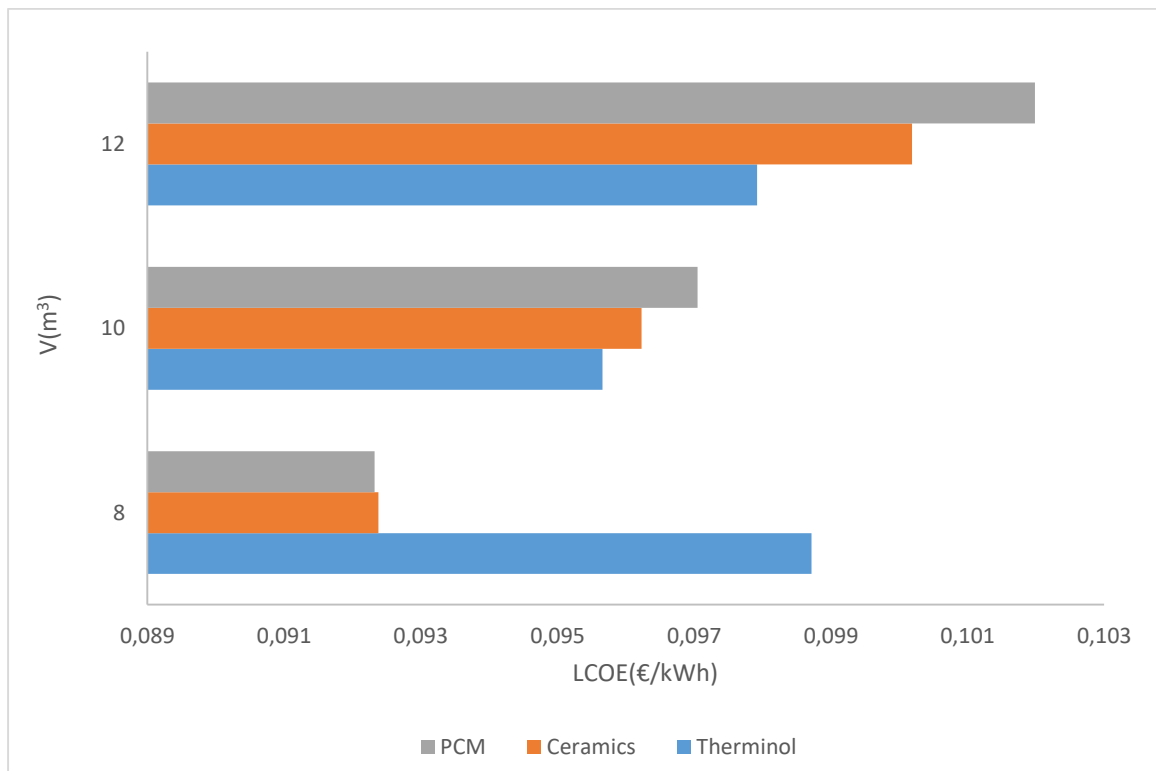
Σε αυτή την ενότητα επιλέγεται να γίνει η σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης με συλλεκτική επιφάνεια 160 m^2 για τρεις διαφορετικούς όγκους $8, 10, 12 \text{ m}^3$. Η συλλεκτική επιφάνεια επιλέγεται ως μια πιθανή τιμή επιφάνειας που θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη σε μια εγκατάσταση που παράγει 10 kW , όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Όσον αφορά τους όγκους που εξετάζονται, επιλέχθηκαν καθώς εκεί εμφανίζονται οι βέλτιστες τιμές των ενεργειακών και οικονομικών δεικτών για τους διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.6, Πίνακα 6.9, Πίνακα 6.10. Προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα σύγκρισης, για τα οποία γίνονται οι παρατηρήσεις στο τέλος της ενότητας:



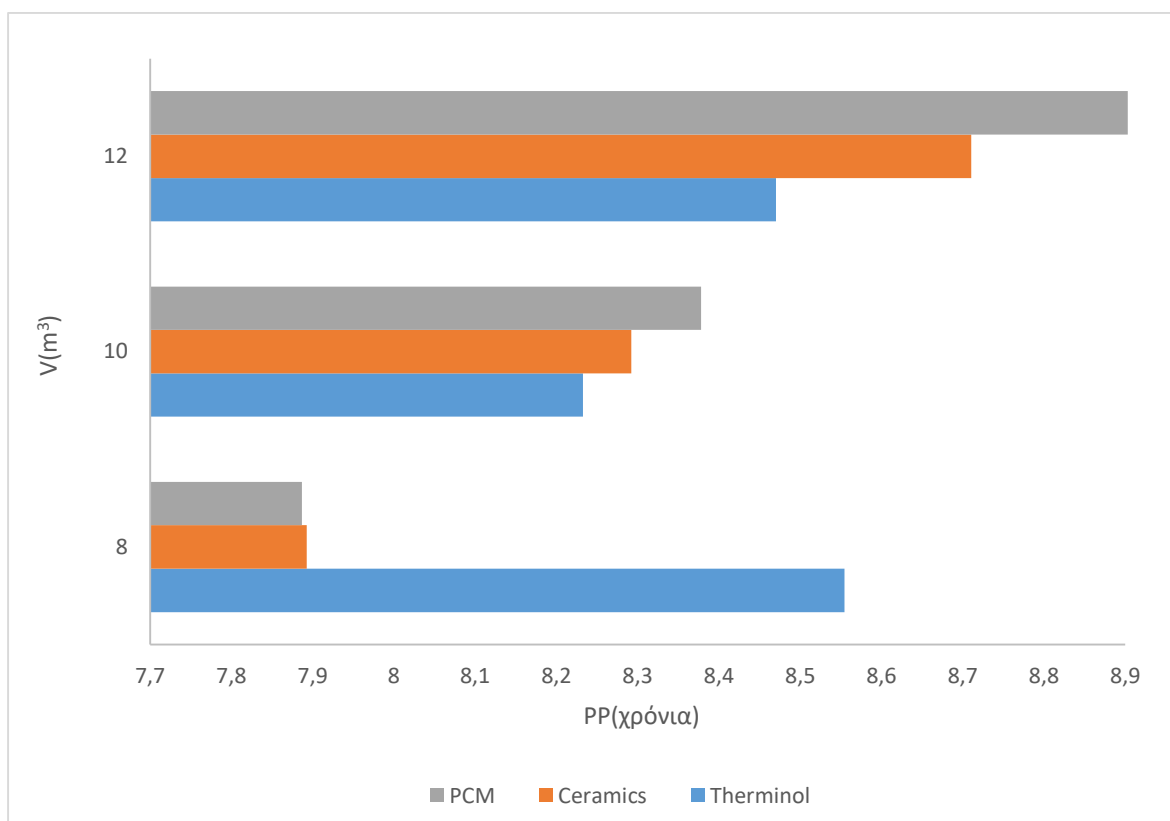
Διάγραμμα 6.35: Σύγκριση βαθμού απόδοσης διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης για $A_c=160 \text{ m}^2$



Διάγραμμα 6.36: Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης για $A_c=160 \text{ m}^2$



Διάγραμμα 6.37: Σύγκριση σταθμισμένου κόστους ενέργειας διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης για $A_c=160 \text{ m}^2$



Διάγραμμα 6.38: Σύγκριση χρόνου αποπληρωμής διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης για $A_c=160 \text{ m}^2$

Παρατηρήσεις:

- Στο Διάγραμμα 6.35 φαίνεται ότι με την χρήση Ceramics επιτυγχάνονται οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης για όλους τους όγκους. Για μικρούς όγκους σε κοντινές τιμές βρίσκονται τα PCM ενώ για μεγαλύτερους κοντινές τιμές έχει η αποθήκευση μόνο με Therminol.
- Στο Διάγραμμα 6.36 η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία εμφανίζεται με χρήση Ceramics για τον μικρότερο όγκο και έπειτα βρίσκονται τα PCM. Και στους δύο τρόπους επιβεβαιώνεται και εδώ ότι όσο αυξάνεται ο όγκος μειώνεται το NPV, ενώ για την περίπτωση με Therminol η βέλτιστη τιμή εμφανίζεται για 10 m^3 .
- Στο Διάγραμμα 6.37 και στο Διάγραμμα 6.38 το ελάχιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας και ο ελάχιστος χρόνος αποπληρωμής για αποθήκευση με Ceramics, PCM εμφανίζονται για όγκο 8 m^3 και έχουν αρκετά μικρότερες τιμές από τις ελάχιστες τιμές για αποθήκευση με Therminol που εμφανίζονται για όγκο 10 m^3 .

6.7 Ολικά βέλτιστα μεταξύ των διαφορετικών τρόπων αποθήκευσης

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται για τον βαθμό απόδοσης, την καθαρή παρούσα αξία, το σταθμισμένο κόστος ενέργειας και τον χρόνο αποπληρωμής τα ολικά βέλτιστα κάθε τρόπου αποθήκευσης χωρίς περιορισμό στον όγκο και την συλλεκτική επιφάνεια στους Πίνακες 6.11, Πίνακας 6.12, Πίνακας 6.13 και Πίνακας 6.14 αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η στήλη δίπλα από τον εκάστοτε δείκτη δείχνει την μεταβολή του κάθε δείκτη σε σχέση με το Therminol.

Τρόπος Αποθήκευσης	$n_{syst,opt}$ (%)	$\frac{\Delta n_{syst}}{n_{syst,therm}}$ (%)	$A_{c,opt}$ (m^2)	V_{opt} (m^3)
Therminol	14,55	-	140	10
Ceramics	14,79	+1,65	160	8
PCM	14,65	+0,69	160	8

Πίνακας 6.11: Ολικός βέλτιστος βαθμός απόδοσης για διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης

Τρόπος Αποθήκευσης	NPV_{opt} (Κ€)	$\frac{\Delta(NPV)}{NPV_{therm}}$ (%)	$A_{c,opt}$ (m^2)	V_{opt} (m^3)
Therminol	123,82	-	220	12
Ceramics	132,36	+6,90	200	8
PCM	131,83	+6,47	200	8

Πίνακας 6.12: Ολική βέλτιστη καθαρή παρούσα αξία για διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης

Τρόπος Αποθήκευσης	$LCOE_{opt}$ (€/kWh)	$\frac{\Delta(LCOE)}{LCOE_{therm}}$ (%)	$A_{c,opt}$ (m^2)	V_{opt} (m^3)
Therminol	0,0957	-	160	10
Ceramics	0,0891	-6,90	160	8
PCM	0,0915	-4,39	180	8

Πίνακας 6.13: Ολικό βέλτιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας για διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης

Τρόπος Αποθήκευσης	PP_{opt} (χρόνια)	$\frac{\Delta(PP)}{PP_{therm}}$ (%)	$A_{c,opt}$ (m^2)	V_{opt} (m^3)
Therminol	8,23	-	160	10
Ceramics	7,56	-8,14	160	8
PCM	7,81	-5,10	180	8

Πίνακας 6.14: Ολική βέλτιστη περίοδος αποπληρωμής για διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης

Παρατηρήσεις:

- Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης σύμφωνα με τον Πίνακα 6.11 ο μέγιστος επιτυγχάνεται με χρήση Ceramics με τιμή $n_{syst} = 14,79\%$. Η αύξηση του σε σχέση με την χρήση Therminol είναι +1,65%. Τα PCM εμφανίζονται στην μέση, με αύξηση του βαθμού απόδοσης σε σχέση με την χρήση Therminol +0,69%.
- Όσον αφορά την καθαρή παρούσα αξία σύμφωνα με τον Πίνακα 6.12 η μέγιστη επιτυγχάνεται με χρήση Ceramics με τιμή $NPV = 132,36$ Κ€. Η αύξηση της σε σχέση με την χρήση Therminol είναι +6,90%. Τα PCM εμφανίζονται με μικρή διαφορά στην μέση, με αύξηση της καθαρής παρούσας αξίας σε σχέση με την χρήση Therminol +6,47%.
- Όσον αφορά το σταθμισμένο κόστος ενέργειας σύμφωνα με τον Πίνακα 6.13 το ελάχιστο επιτυγχάνεται με χρήση Ceramics με τιμή $LCOE = 0,0891$ €/kWh. Η μείωση του σε σχέση με την χρήση Therminol είναι -6,90%. Τα PCM εμφανίζονται στην μέση, με μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας σε σχέση με την χρήση Therminol -4,39%.
- Όσον αφορά την περίοδο αποπληρωμής σύμφωνα με τον Πίνακα 6.14 η ελάχιστη επιτυγχάνεται με χρήση Ceramics με τιμή $PP = 7,56$ χρόνια. Η μείωση της σε σχέση με την χρήση Therminol είναι -8,14%. Τα PCM εμφανίζονται με μικρή διαφορά στην μέση, με μείωση της περιόδου αποπληρωμής σε σχέση με την χρήση Therminol -5,10%.

7 Συμπεράσματα

7.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Αρχικά, όσον αφορά το εργαζόμενο μέσο επιλέχθηκε το Τολουένιο. Σε αυτό εμφανίστηκε ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του οργανικού κύκλου ORC, $n_{ORC} = 32,52\%$ για θερμοκρασία κορεσμού $T_{sat} = 309,7\text{ }^\circ\text{C}$, όπως μοντελοποιήθηκε σε σταθερές συνθήκες στο EES, σε σχέση με τα υπόλοιπα οργανικά ρευστά που εξετάστηκαν. Επίσης, το Τολουένιο παρουσίασε την πιο σταθερή συμπεριφορά σε μεταβολές των παραμέτρων $\Delta T_{SH}, T_{con}, \Delta T_{REC}$ και πιο συγκεκριμένα για κάθε 5°C υπερθέρμανση σημειώνεται 1% αύξηση στον βαθμό απόδοσης του ORC, για κάθε 5°C αύξηση στην θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται κατά 2% ο βαθμός απόδοσης του ORC και για κάθε 5°C αύξηση στην διαφορά της θερμοκρασίας του ανακομιστή μειώνεται κατά 1% ο βαθμός απόδοσης του ORC.

Η θερμοκρασία κορεσμού που τελικά επιλέχθηκε για την υπόλοιπη εργασία προέκυψε μετά από διερεύνηση και στο δυναμικό μοντέλο και είναι $T_{sat} = 283,4\text{ }^\circ\text{C}$ με $n_{ORC} = 31,27\%$. Αυτές είναι οι τιμές που βελτιστοποιούν τον συνολικό βαθμό απόδοσης συστήματος αν και αξίζει να σημειωθεί ότι για τιμές $265 \leq T_{sat} \leq 300^\circ\text{C}$ οι διαφορές στον n_{syst} είναι αμελητέες.

Έπειτα, όσον αφορά την διερεύνηση της συλλεκτικής επιφάνειας και του όγκου δοχείου για τρόπο αποθήκευσης μόνο με θερμικό έλαιο (Therminol) προέκυψαν τα παρακάτω:

- ❖ ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης συστήματος είναι 14,55% και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 140 m^2 και όγκο δοχείου 10 m^3
- ❖ η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία είναι 123,81 k€ και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 220 m^2 και όγκο δοχείου 12 m^3
- ❖ το ελάχιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας είναι $0,0957\text{ €/kWh}$, η ελάχιστη περίοδος αποπληρωμής είναι 8,23 χρόνια και εμφανίζονται και τα δύο για συλλεκτική επιφάνεια 160 m^2 και όγκο δοχείου 10 m^3

Στην συνέχεια, για τον τρόπο αποθήκευσης με στερεά υλικά επιλέχθηκαν έπειτα από σύγκριση όλων των στερεών τα κεραμικά. Σημειώνεται ότι η επιλογή έγινε με βάση τον βαθμό απόδοσης και κυρίως την καθαρή παρούσα αξία με βαθμό ελευθερίας στα κόστη των στερεών. Ενώ τα στερεά υλικά με αλουμίνιο παρουσίασαν ελαφρώς καλύτερο βαθμό απόδοσης συστήματος, παρουσίασαν αρκετά χειρότερη καθαρή παρούσα αξία με την οποία και έγινε η τελική επιλογή. Η διερεύνηση και σύγκριση του τρόπου αποθήκευσης μόνο με το Therminol με του τρόπου με Therminol και κεραμικά για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες και όγκους αποθήκευσης έδωσαν τα παρακάτω:

- ❖ ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης συστήματος με κεραμικά είναι 14,79% και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 160 m^2 και όγκο δοχείου 8 m^3 , η αύξηση του σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι +1,65%
- ❖ η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία με κεραμικά είναι 132,26 k€ και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 220 m^2 και όγκο δοχείου 12 m^3 , η αύξηση της σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι +6,90%
- ❖ το ελάχιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας με κεραμικά είναι $0,0891\text{ €/kWh}$, η ελάχιστη περίοδος αποπληρωμής είναι 7,56 χρόνια και εμφανίζονται και τα δύο για συλλεκτική επιφάνεια 160 m^2 και όγκο δοχείου 8 m^3 . Η μείωση του LCOE σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι -6,90%, ενώ η μείωση της PP σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι -8,14%

Όσον αφορά τα διαφασικά υλικά η σύγκριση με την αποθήκευση μόνο με Therminol έδωσε τα παρακάτω:

- ❖ ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης συστήματος με PCM είναι 14,65% και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 160 m^2 και όγκο δοχείου 8 m^3 , η αύξηση του σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι +0,69%
- ❖ η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία με PCM είναι 131,83 k€ και εμφανίζεται για συλλεκτική επιφάνεια 200 m^2 και όγκο δοχείου 8 m^3 , η αύξηση της σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι +6,47%
- ❖ το ελάχιστο σταθμισμένο κόστος ενέργειας με PCM είναι 0,0915 €/kWh, η ελάχιστη περίοδος αποπληρωμής είναι 7,81 χρόνια και εμφανίζονται και τα δύο για συλλεκτική επιφάνεια 180 m^2 και όγκο δοχείου 8 m^3 . Η μείωση του LCOE σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι -4,39%, ενώ η μείωση της PP σε σχέση με την αποθήκευση με Therminol είναι -5,10%

Συνοψίζεται από τα παραπάνω ότι ο τρόπος αποθήκευσης με Therminol και κεραμικά υλικά είναι αυτός που βελτιστοποιεί ενεργειακό και οικονομικούς δείκτες σε σχέση με τους άλλους τρόπους αποθήκευσης. Η συλλεκτική επιφάνεια και όγκος του δοχείου που επιλέγονται είναι αυτοί που βελτιστοποιούν βαθμό απόδοσης, σταθμισμένο κόστος ενέργεια και χρόνο αποπληρωμής. Οπότε βέλτιστη περίπτωση για $A_c = 160 \text{ m}^2, V = 8 \text{ m}^3$ με $NPV = 119,16 \text{ k€}, LCOE = 0,0891 \text{ €/kWh}$ και $PP = 7,56$ χρόνια.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρεις διαφορετικοί τρόποι αποθήκευσης με συγκεκριμένες μοντελοποιήσεις όπως περιγράφονται στην μεθοδολογία. Μια καλή ιδέα θα ήταν να βρεθούν πειραματικά δεδομένα από την βιβλιογραφία για εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν αυτούς τους τρόπους αποθήκευσης, με σκοπό να υπολογιστεί η ακρίβεια των μοντέλων. Επίσης, σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να εξεταστούν:

- διαφορετικές μοντελοποιήσεις, όπως για παράδειγμα για τον τρόπο μόνο με Therminol μια διαφορετική μοντελοποίηση θα περιλάμβανε περισσότερες θερμικές ζώνες στο δοχείο ή στον τρόπο αποθήκευσης με στερεά το μοντέλο διπλής φάσης
- διαφορετικοί τρόποι αποθήκευσης, όπως θα μπορούσε να είναι ο θερμοχημικός τρόπος για τον οποίο υπάρχει αρκετά μεγάλη προοπτική

Ακόμη, θα μπορούσε να εξεταστεί αντίστοιχη εγκατάσταση αλλά για μεγαλύτερη εφαρμογή, οπότε μεγαλύτερη ισχύ. Σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσε να εξεταστεί και διαφορετικός τύπος συλλέκτη για μεγαλύτερη απόδοση σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.

Επίσης, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ευρύτερη ανάλυση στο κόστος του δοχείου αποθήκευσης με ανάλυση του κύκλου ζωής των υλικών και μέσων που χρησιμοποιούνται.

Τέλος, διαφορετικά σύνθετα εργαζόμενα μέσα θα μπορούσαν να εξεταστούν. Ορισμένα από αυτά για τα οποία ήδη παρουσιάζεται μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι τα νανουλικά ή ζεοτροπικά μίγματα.