



Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:
Τεχνοοικονομική αξιολόγηση βιομηχανικής
αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας μέσω
παραβολικών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών με
μετατροπή ισχύος σε θερμότητα.

Τομέας: Δ.Π.Μ.Σ «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Επιβλέπων: Καρέλλας Σωτήριος , Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ονοματεπώνυμο

Αθηναίος Νικόλαος

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείτε μοντελοποίηση δύο συστημάτων παραγωγής αποθήκευσης ενέργειας με πηγή την ηλιακή ενέργεια. Η παραγωγή της ενέργειας γίνεται με χρήση Φωτοβολταϊκών και παραβολικών ηλιακών συλλεκτών. Μέρος της παραγόμενης θερμικής ενέργειας μέσω υδραυλικού δικτύου με κατάλληλο ρευστό μεταφοράς θερμότητας σε κλειστό κύκλωμα μεταφέρεται σε θερμοδοχείο υψηλών θερμοκρασιών με μέσο στερεάς κατάστασης (θερμοκρασίες λειτουργίας 200°C- 400°C). Έπειτα μέσω δευτερεύοντος υδραυλικού κυκλώματος και εναλλάκτη θερμότητας προσφέρετε θερμική ενέργεια για την ικανοποίηση σταθερού θερμικού φορτίου. Σκοπός της εργασίας είναι να γίνει συγκριτική μελέτη των δύο συστημάτων ώστε συμπερασματικά να αξιολογηθεί το καταλληλότερο σύστημα με βάση ενεργειακούς και οικονομικούς δείκτες. Επιπλέον θα αξιολογηθεί παραμετρικά και η αξία του συστήματος αποθήκευσης. Τέλος θα συνταχθούν συμπεράσματα για την συμβολή των παραπάνω συστημάτων στην περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ.

Abstract

In this diploma thesis, are simulating two energy production and storage systems powered by solar energy. Energy generation is happening, using photovoltaic and parabolic through collectors. A portion of the generated energy is transferred to a high-temperature solid state thermal storage tank (operating temperatures of 200°C to 400°C) through a hydraulic pipeline system with heat transfer fluid (closed-loop). Subsequently, through a secondary hydraulic circuit and a heat exchanger, thermal energy is provided to satisfy constant thermal loads. The aim of the thesis is to conduct a comparative study of the two systems and to conclusively evaluate the most suitable system based on energy and economic indicators. Additionally, the value of the storage system will be assessed parametrically. Finally, conclusions will be drawn regarding the contribution of the above systems to the further penetration of renewable energy sources (RES).

Νομενκλατούρα

I_c : Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας W/m^2

τ_c : Ενεργός διαπερατότητα του καλύμματος του συλλέκτη

α_c : Απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας

de_c/dt : ρυθμός συσσώρευσης εσωτερικής ενέργειας εντός συλλέκτη kWh/s

A_c, E_m : Επιφάνεια συλλεκτών m^2

η : συντελεστής απόδοσης

\dot{m} : παροχή μάζας kg/s

T_{out} : θερμοκρασία εξόδου $^{\circ}C$

T_{in} : θερμοκρασία εισόδου $^{\circ}C$

T_{tank} : θερμοκρασία θερμοδοχείου $^{\circ}C$

ρ : πυκνότητα kg/m^3

$E_{storage}$: αποθηκευμένη θερμική ενέργεια MWh

E_{in} : εισερχόμενη θερμική ενέργεια kWh

E_{out} : εξερχόμενη θερμική ενέργεια kWh

E_{losses} : Θερμικές απώλειες kWh

$Q_{storage}$: αποθηκευμένη θερμική ισχύς

Q_{in} : εισερχόμενη θερμική ισχύς (kW)

Q_{out} : εξερχόμενη θερμική ισχύς (kW)

Q_{losses} : Θερμικές απώλειες ισχύς (kW)

m : μάζα θερμοδοχείου kg

CR : Συντελεστής συγκέντρωσης

dT : Διαφορά θερμοκρασίας $^{\circ}C$

$Loads$: Θερμικά φορτία

h_2 : Ενθαλπία νερού υψηλής θερμοκρασίας $KJ/kg^{\circ}C$

h_1 : Ενθαλπία νερού χαμηλής θερμοκρασίας $KJ/kg^{\circ}C$

c_p : Ειδική θερμοχωρητικότητα $1 KJ/(^{\circ}C \cdot kg)$.

V : όγκος m^3

g_{ir} : συντελεστής γήρανσης

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

IRENA: International Renewable Energy Agency

NREL: National Renewable Energy Laboratory

PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System

O&M: Operation And Maintenance

TES: Thermal Energy Storage (Ταμειυτήρας αποθήκευσης Θερμικής ενέργειας)

HTF: Heat Transfer Fluid (Θερμικά αγωγίμο ρευστό)

CUF: Συντελεστής χρησιμοποίησης

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	8
2.	Ηλιακή Τεχνολογία	10
2.1	Ηλιακή ενέργεια	10
2.1.1	Αξιοποίηση της Ηλιακής ενέργειας	10
2.1.2	Ηλιακό δυναμικό	14
2.1.3	Θερμική και Φωτοβολταϊκή Μετατροπή	17
2.1.4	Περιορισμοί της Ηλιακής ενέργειας	17
2.2	Θερμικοί Ηλιακοί Συλλέκτες	19
2.2.1	Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	20
2.2.2	Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες	22
2.3	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	32
2.3.1	Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	33
2.3.2	Φωτοβολταϊκή Παραγωγή στη Ελλάδα	38
2.4	Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας	39
2.4.1	Συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας	40
2.4.2	Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	41
2.4.3	Θερμικά αγωγίμα ρευστά	46
2.4.4	Σχεδιασμός Συστήματος Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας	48
2.5	Οικονομικοί και ενεργειακοί δείκτες	50
3.	Περιγραφή Μεθοδολογίας και Case Study	59
3.1	Ανάλυση συστημάτων	59
3.1.1	Εισερχόμενη ενέργεια	59
3.1.2	Χωροθέτηση Συλλεκτών	61
3.1.3	Εγκατάσταση μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας	62
3.2	Λειτουργία συστήματος	66
3.2.1	Δεδομένα εισόδου	66
3.2.2	Δεδομένα λειτουργίας	69
3.2.3	Δεδομένα εξόδου	71
4.	Αποτελέσματα	72
4.1	Παρουσίαση γραφημάτων	76
5.	Συμπεράσματα	82
5.1	Συμπεράσματα	82
5.2	Συζήτηση	83
5.3	Μελλοντική ερευνά	84
6.	Βιβλιογραφία	86
7.	Παράρτημα	89

1. Εισαγωγή

Οι εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας την τελευταία 20ετία είναι ραγδαίες. Στην χώρα μας οι εξελίξεις χαρακτηρίζονται κυρίως από την απολιγνιτοποίηση με την χρήση του φυσικού αερίου ως κύριο καύσιμο για ηλεκτροπαραγωγή, καθώς και στροφή στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Το πετρέλαιο παραμένει κυρίαρχο καύσιμο παγκοσμίως ως και σήμερα. Οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου και πετρελαίου βιώνουν αυτήν τη μετάβαση με αρνητικό τρόπο, καθώς η σύνθετη κατάσταση της εποχής (πόλεμος, χρηματιστήριο ενέργειας, πράσινες επενδύσεις κ.α.) αυξάνουν τις τιμές της ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη μερίδα κόσμου να στρέφεται εναντίον της μετάβασης στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

Η συντονισμένη προσπάθεια για ανάπτυξη της έρευνας και της τεχνολογίας γύρω από την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική κ.α.) έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία υποδομών και την εκμετάλλευσή τους. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια το ηλιακό και αιολικό δυναμικό καθώς και η ηλεκτροπαραγωγή από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό του ενεργειακού μας μίγματος. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας έχει περισσότερα οφέλη από την μείωση το περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθώς οι ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι είναι άφθονοι με δυναμικό ικανό να υπερκαλύψει τις ενεργειακές ανάγκες. Συνεπώς η παραγωγή ενέργειας σαν μεταβλητό κόστος είναι μικρότερο από τα συμβατικά καύσιμα[16][6][10]

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας η **ισχύς ακτινοβολίας** κατά μέσο όρο ανέρχεται σε περίπου $1,36 \text{ kW/m}^2$ (άμεση ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας) [6]. Η πρώτη προσπάθεια για αξιοποίηση της σε μεγάλη κλίμακα έγινε μέσω συγκεντρωτικών συλλεκτών σε σταθμό (CSP) 354 MWe στην Καλιφόρνια. Το μεγάλο κόστος αρχικής επένδυσής για υποδομές συγκεντρωτικών ηλιακών, ώθησε την περεταίρω έρευνα για την μείωση του κόστους της τεχνολογίας καθώς και σε νέες τεχνολογίες, όπως η φωτοβολταϊκή μετατροπή. Τα φωτοβολταϊκά παρόλο που έχουν μικρότερη απόδοση (10-25%) από θερμικά ηλιακά(40-60%), έχουν πολύ μικρότερο κόστος αρχικής επένδυσης. Σήμερα η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται ευρέως για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και ενίοτε για θέρμανσή με ηλιακούς θερμοσίφωνες, καθώς και για παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος θερμικής ισχύος με συγκεντρωτικά ηλιακά πάρκα. Επιπλέον αξιοποιείται με εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών πάρκων είτε μικρής ισχύος που συμβάλλουν στην διεσπαρμένη ηλεκτροπαραγωγή και φωτοβολταϊκών πάρκων μεγάλης ισχύος για μαζική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγαλύτερης ισχύος[6].

Οι υποδομές και οι τεχνολογίες για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν έχουν αναπτυχθεί σε βαθμό ώστε η ηλεκτροπαραγωγή με αυτές να θεωρείται αξιόπιστη. Η συνεχής και σταθερή ηλεκτροπαραγωγή δεν εξασφαλίζεται λόγω της στοχαστικότητας των καιρικών συνθηκών (π.χ. συννεφιά, άπνοια). Το συγκεκριμένο φαινόμενο δεν επηρεάζει τόσο τα φορτία που υπάγονται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο άλλα δημιουργείται πρόβλημα στα φορτία που δεν είναι διασυνδεδεμένα. Το μεγαλύτερο μέρος

της νησιωτικής Ελλάδας δεν είναι διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό δίκτυο, γεγονός που δυσκολεύει την ανάπτυξη των υποδομών για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας στα νησιά. Για λόγους ασφαλείας και σταθερότητας του συστήματος δεν μπορεί μεγάλο ποσοστό της κατανάλωσης να καλυφθεί από υποδομές ΑΠΕ και η επένδυση σε αυτές καθίσταται λιγότερο βέλτιστη ως και μη βιώσιμη πολλές φορές. Η δημιουργία υποδομών αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας είτε σε δεξαμενές που θα λειτουργούν σαν θερμοδοχεία είτε μέσω συστάδων από χημικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) είτε όπως στα παράδειγμα της Ικαρίας με αντλησιοταμίευση μειώνουν σε σημαντικό βαθμό την τυχαιότητα με την οποία οι υποδομές ΑΠΕ μπορούν να παρέχουν συνεχή και σταθερή ηλεκτρική ενέργεια, και αυξάνουν την αξιοπιστία τους. Επιπρόσθετα τις ώρες χαμηλής ζήτησης η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται και να αξιοποιείται για την κάλυψη φορτίων που δεν είναι ηλεκτρικά (π.χ. θερμικά φορτία)[16][6][3].

Αντίστοιχά στον βιομηχανικό τομέα η ένταξη τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας με αποθήκευση αποτελεί αξιόλογο πεδίο επένδυσης για την κάλυψη φορτίων βάσης κατά κύριο λόγο. Η ταυτόχρονη χρήση ηλιοθερμικών συστημάτων ή συστημάτων ανάκτησης θερμότητας, μαζί με λέβητες ορυκτών καυσίμων αποτελούν τον εναλλακτικό τρόπο για την κάλυψη θερμικών φορτίων με σκοπό την κατεύθυνση ευρωπαϊκών χωρών για την απανθρακοποίηση (Decarbonization). Παρόλο την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας τα συστήματα ΑΠΕ παραμένουν βοηθητικά για την βιομηχανία. Η ανάπτυξη συστημάτων με μεγαλύτερη ευστάθεια μπορεί να αυξήσει το μερίδιο αξιοποίησης των ΑΠΕ στην βιομηχανία.

Τέλος οι υψηλές αποδόσεις τεχνολογιών των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς θερμότητας με χρήση ηλεκτρισμού (power to heat) σε σχέση με παραδοσιακά συστήματα παραγωγής θερμότητας με καύση ορυκτών καυσίμων (heat to heat) στρέφουν περισσότερο την τάση της έρευνας σε τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με αντλίες θερμότητας και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό τον αυξημένο βαθμό απόδοσης του συνολικού συστήματος.

2. Ηλιακή Τεχνολογία

2.1 Ηλιακή ενέργεια

Οι όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις της κοινωνίας σε ενέργεια μετά την βιομηχανική επανάσταση, οδήγησε στην αυξανόμενη καύση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνέπειες αυτής της επιλογής ώθησαν στην στροφή της έρευνας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια παγκοσμίως αποτελεί την πιο άμεσα εκμεταλλεύσιμη πηγή ενέργειας. Ανά τους αιώνες είχαν δημιουργηθεί τεχνολογίες για την εκμετάλλευση της σε ατομική χρήση. Το ερώτημα ήταν αν η ηλιακή ενέργεια συνέφερε να αποτελεί μέρος του κοινωνικού ενεργειακού μείγματος. Η επιστήμη που ασχολείται με την ηλιακή ενέργεια ανέπτυξε το θεωρητικό υπόβαθρο για ανάπτυξη τεχνολογιών για την μετατροπή της. Αρχικά έγινε χαρτογράφηση τόσο της ποσότητας που προσπίπτει στην γήινη επιφάνεια (ισχύ ακτινοβολίας) όσο και το ποσοστό αυτής που θα μπορούσε να είναι αξιοποιήσιμο. Τεχνολογίες όπως τα ηλιοθερμικά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα αναπτύσσονται συνεχώς για την όλο και πιο αποδοτική αξιοποίηση του άφθονου ενεργειακού αποθέματος της ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον σύγχρονο πεδίο έρευνας αποτελεί και η αποθήκευση. Οι προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν για την περαιτέρω ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών, δεν αφορούν μόνο την αύξηση της απόδοσης τους, αλλά και την ευστάθεια και ασφάλεια τους.

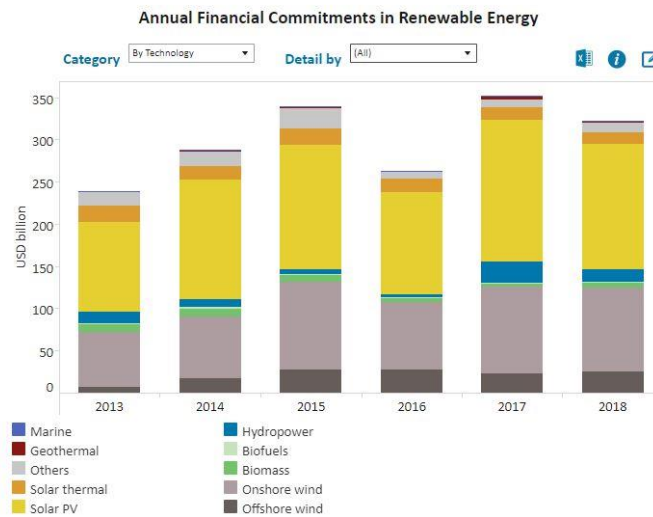
2.1.1 Αξιοποίηση της Ηλιακής ενέργειας

Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι η ισχύς ακτινοβολίας. Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται $1,05 \cdot 10^5$ TW με μέση διαπερατότητα της ατμόσφαιράς 60%. Οι μέγιστες ενεργειακές ανάγκες μέχρι το 2050 δεν θα ξεπεράσουν τα 30 TW. Συνεπώς η αξιοποίηση ενός μικρού ποσοστού 0,03% της ηλιακής ενέργειας μπορεί να καλύψει της ενεργειακές ανάγκες μέχρι το 2050. Βέβαια μόνο ένα μικρό ποσοστό της γήινης έκτασης μπορεί χρησιμοποιηθεί για εγκαταστάσεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον τα σύγχρονα ηλιοθερμικά συστήματα έχουν αποδόσεις έως και 60%, και τα σύγχρονα φωτοβολταϊκά συστήματα 23% χωρίς τις απώλειες ενέργειας κατά την διανομή.[6][16]

Μέσω οικονομικής και περιβαλλοντικής ανάλυσης που γίνεται για τα συστήματα παραγωγής ενέργειας λαμβάνονται αποφάσεις τόσο για την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί όσο και για το μέγεθος της εγκατάστασης. Οικονομικά κριτήρια, όπως το αρχικό κόστος επένδυσης, κύκλος ζωής, καθαρή παρούσα αξία, σταθμισμένο κόστος ενέργειας συνέβαλαν στις αποφάσεις ιδιωτικών κεφαλαίων για επενδύσεις στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα περιβαλλοντικά οφέλη ωθούν κυβερνήσεις στην ενθάρρυνση επενδύσεων και οικονομικών εγγυήσεων. Πρόσφατα θεσμοθετήθηκε δεδομένη τιμολόγηση παραγωγών που πωλούν ενέργεια προς το δίκτυο για ΑΠΕ[Άρθρο 4 Ν4414/2016].

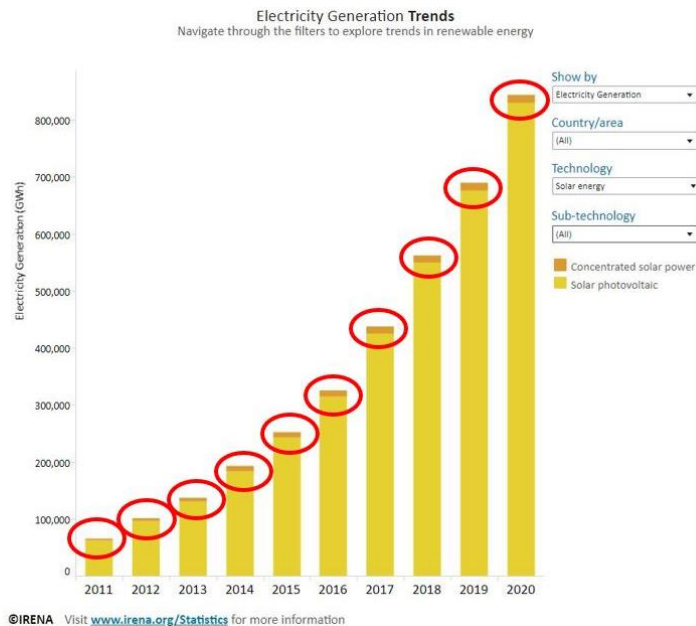
Παγκοσμίως και στην Ελλάδα έχει θεσμοθετηθεί ένα ευρύ νομοθετικό πλαίσιο ανάπτυξης ΑΠΕ που κατευθύνεται κατά κύριο λόγο στις ιδιωτικές επενδύσεις. Δεδομένα που ληφθήκαν από το ινστιτούτο IRENA έδειξαν ότι η πρώτη αξιοποίηση ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή και ότι αξιοποιείτε κυρίως μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Investment Trends



In 2013-2018, solar PV and onshore wind consolidated their dominance, attracting, respectively, 46% and 29% of global renewable energy investments. Investment in offshore wind has picked up, attracting 7% of the total, followed by solar thermal at 6%. Other renewable energy technologies (including hydropower, biomass, biofuels, geothermal and marine energy) altogether contributed only 7% of total investment in 2013-2018, with hydropower making up a relatively significant portion of the total.

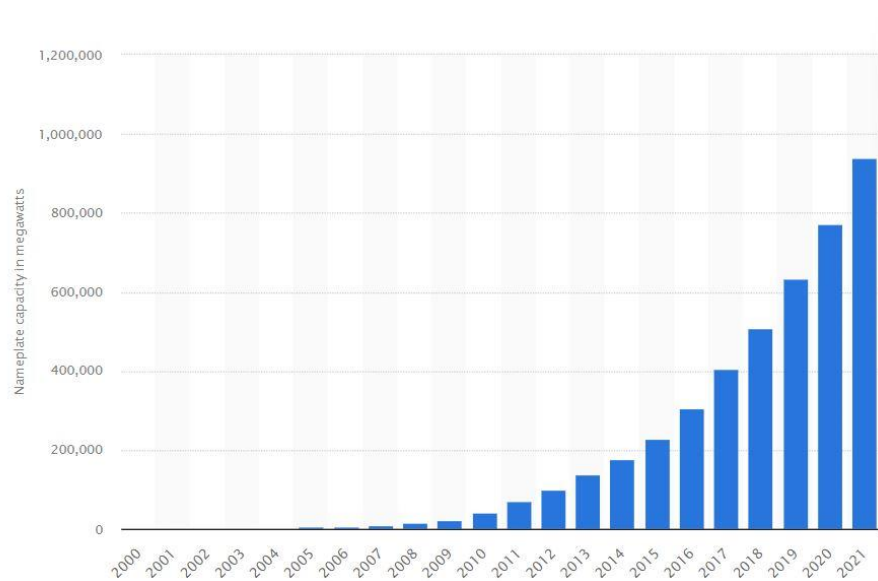
Εικόνα 1: Τάσεις Επενδύσεων. Έκθεση ινστιτούτου IRENA[10]



Εικόνα 2: Ανάπτυξη ηλεκτροπαραγωγής από Ηλιακή Ενέργεια. Έκθεση ινστιτούτου IRENA[10]

Παρόλο που τα ηλιοθερμικά συστήματα έχουν σημαντικά μεγαλύτερη απόδοση στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι οικονομικοί παράγοντες καθώς και το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι πιο ευκολά αξιοποιήσιμη από την θερμική, ωθήσαν στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

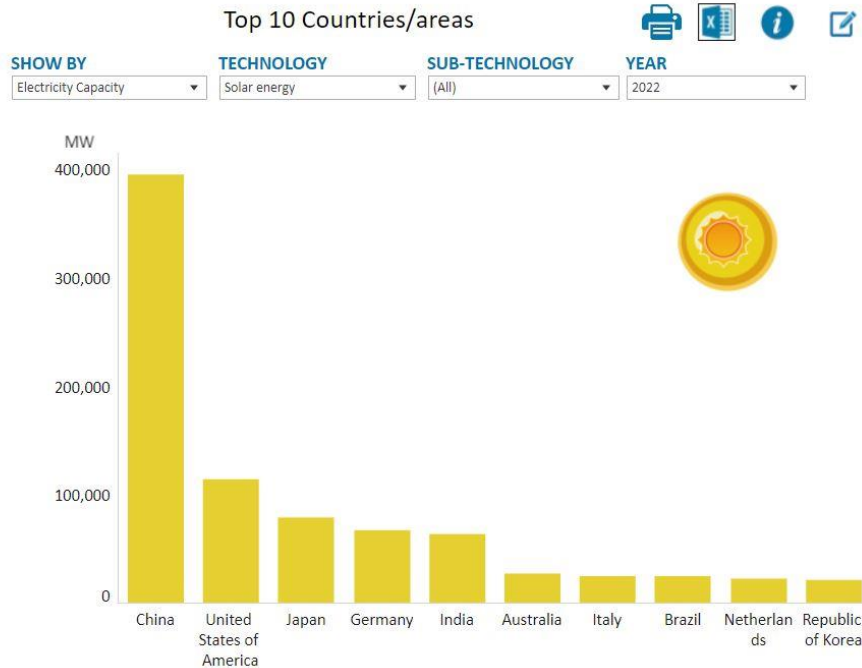
Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών έχει αυξηθεί εκθετικά την τελευταία 20ετία. Η τεράστια μείωση του κόστους της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών (περίπου 1000\$/Kw), η άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η δυνατότητα μικρής αρχικής επένδυσης σε μικρότερες μονάδες παραγωγής, έχει ωθήσει στην τεράστια ανάπτυξη τους.[10][11][41]



Εικόνα 3: Ανάπτυξη ηλεκτροπαραγωγής από φωτοβολταϊκά συστήματα. Έκθεση ινστιτούτου IRENA[41][10]

Μπορεί να βγει το γρήγορο συμπέρασμα ότι η το βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη των ΑΠΕ μέσω την ιδιωτικής πρωτοβουλίας είναι η πιο γρήγορη αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης με όσο καλύτερη απόδοση γίνεται. Ωστόσο πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών σταθμών έχει παίξει και το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται ο κάθε σταθμός στην Ελλάδα, την προηγούμενη δεκαετία δόθηκε κίνητρο στους παραγωγούς με φωτοβολταϊκά με υψηλές τιμές αναφοράς ανά παραγόμενης kWh, ενώ σήμερα οι μικροί σταθμοί μπαίνουν σε καθεστώς ενεργειακού συμψηφισμού παραγωγής και κατανάλωσης.

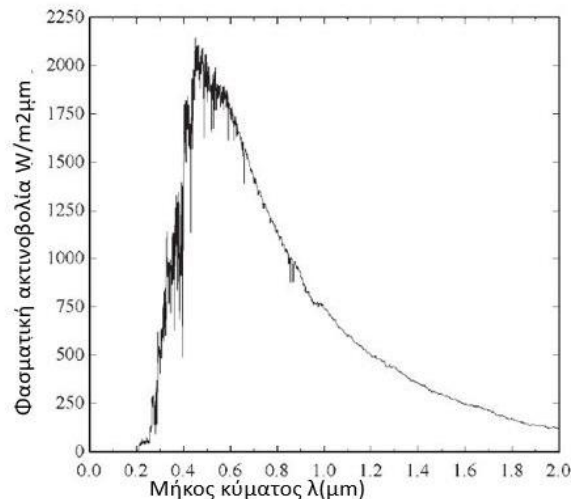
Οι χώρες με την υψηλότερη εγκατεστημένη ισχύ ηλιακών συστημάτων το 2022 από δεδομένα που πάρθηκαν από τον οργανισμό IRENA οι χώρες με την περισσότερη παραγωγή ενέργειας αξιοποιώντας τον ήλιο φαίνονται στην παρακάτω εικόνα(4).



Εικόνα 4: Εγκαταστάσεις ΑΠΕ με πηγή την ηλιακή ενέργεια ανά χώρα. Έκθεση ινστιτούτου IRENA

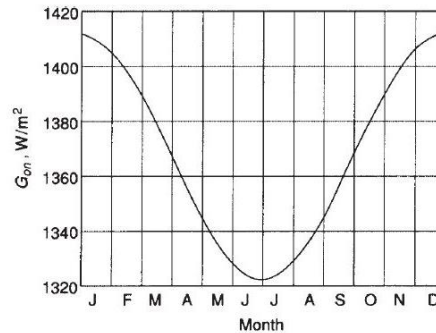
2.1.2 Ηλιακό δυναμικό

Η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην γη μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζει το ηλιακό δυναμικό. Η ακτινοβολία βρίσκεται στο φάσμα της υπεριώδους, ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας με μήκος κύματος από 0,3μm μέχρι 3μm. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας βρίσκεται στο φάσμα της ορατής ακτινοβολίας [6].



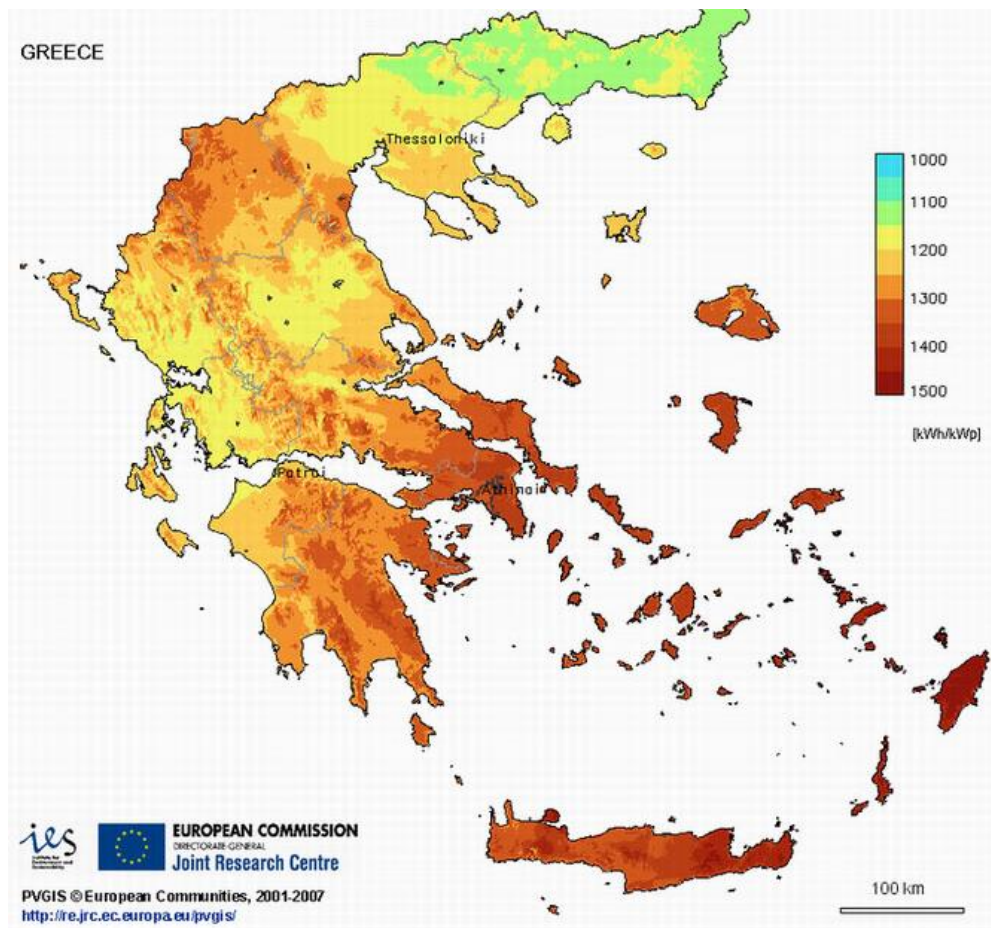
Εικόνα 5: Διάγραμμα Φασματικής ακτινοβολίας - Μήκος κύματος[6]

Η πυκνότητα της ακτινοβολίας σε μια περιοχή εξαρτάτε από την γεωμετρική σχέση της με τον ήλιο. Επομένως η ροή της ακτινοβολίας είναι διαφορετική στον ισημερινό και στους πόλους. Επίσης ο άξονας περιστροφής της γη $23,45^{\circ}$ και η ελλειπτική τροχιά της γης, δημιουργούν εποχιακή διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 6: Πυκνότητα ακτινοβολίας σε έναν χρόνο.[6]

Η διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό γης W/m^2 ανάλογα με την τοποθεσία είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό και την οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας. Η εκτίμηση για την διαστασιολόγηση ενός συστήματος γίνεται ετήσια, για να ληφθούν υπόψιν και διακυμάνσεις του ηλιακού δυναμικού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Δεδομένα για την επικράτεια της Ελλάδος φαίνονται στον παρακάτω χάρτη. Από το πρόγραμμα PVGIS.



Εικόνα 7: Ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα. Πηγή PVGIS.

Συμπεραίνεται ότι η διαστασιολόγηση που πρέπει να γίνει για παρόμοια εξυπηρετούμενα φορτία ενός ηλιακού συστήματος θα είναι διαφορετική στην Κρήτη και στο Έβρο. Το σύστημα στον Έβρο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο σε έκταση. Επίσης είναι πιο συμφέρον να γίνει μια εγκατάσταση στην Κρήτη παρά στον Έβρο καθώς το ηλιακό δυναμικό καθώς προς τον ισημερινό τείνει να είναι μεγαλύτερο.

Ινστιτούτα όπως το NREL ή της Ευρωπαϊκής Κομισιόν έχουν δημιουργήσει λογισμικά για την παρακολούθηση του ηλιακού δυναμικού. Στην παρούσα εργασία θα αξιοποιηθούν ιστορικά δεδομένα που έχουν παρθεί από το PVGIS πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Κομισιόν. Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού, είναι σημαντικά και τα δεδομένα της μέσης σκίασης λόγω καιρικών συνθηκών (συννεφιά) στην κάθε περιοχή. Σε γενικές γραμμές οι περιοχές του ισημερινού που έχουν μεγαλύτερη άμεση ηλιακή ακτινοβολία τείνουν να έχουν και περισσότερη ηλιοφάνεια.

2.1.3 Θερμική και Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

Η πιο διαδεδομένες μέθοδοι μετατροπής της ηλιακής ενέργειας είτε σε θερμική είτε σε ηλεκτρική είναι η θερμική και φωτοβολταϊκή μετατροπή. Στα πλαίσια του κεφαλαίου θα γίνει μια εισαγωγή στις μεθόδους και θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση σε επόμενο κεφάλαιο.

2.1.3.1 Θερμική Μετατροπή

Η θερμική μετατροπή βασίζεται στην απορρόφηση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Γνωρίζουμε ότι υπάρχουν τρεις τρόποι ώστε να γίνει η μετάδοση θερμότητας από ένα σώμα σε ένα άλλο, μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Οι συλλέκτες απορροφούν θερμότητα μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να είναι πιο αποδοτική η απορρόφηση, το χρώμα των συλλεκτών θα πρέπει να προσεγγίζει το μελανό. Μετά την θερμική μετατροπή, εργαζόμενο ρευστό μεταφέρει την παραγόμενη θερμότητα σε ταμειυτήρες. Η πιο απλή διάταξη για την θερμική μετατροπή είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας, ενώ για την ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών για ατμοπαραγωγή ή πιο αυξημένες ανάγκες θερμικής ισχύος, χρησιμοποιούνται συστήματα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. [16][6]

2.1.3.2 Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

Η ιδέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκή μετατροπή, αναπτύχθηκε στα πλαίσια διαστημικών προγραμμάτων. Η τεχνολογία αυτή αξιοποιεί τις ιδιότητες των ημιαγωγών για προσανατολισμένη κατεύθυνση των ηλεκτρονίων σε μία κυψέλη. Όταν ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στις κυψέλες, δημιουργείτε διαφορά δυναμικού στα άκρα των κυψελών. Η εν σειρά συνδεσμολογία των κυψελών, δημιουργούν έναν φωτοβολταϊκό συλλέκτη. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μικρότερη απόδοση από τη θερμική μετατροπή. Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης είναι 33% αλλά ο συνολικός βαθμός απόδοσης των εμπορικών πάνελ είναι περίπου 10-20 %. [6][8][16][41]

2.1.4 Περιορισμοί της Ηλιακής ενέργειας

Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Πρώτον η χαμηλή πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας καθιστά αναγκαία την διάθεση μεγάλων εκτάσεων γης για την τοποθέτηση ηλιοθερμικών η φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Συγκεκριμένα για την παραγωγή 100 kW ηλεκτρικής ισχύος ή 300 kW θερμικής ισχύος χρειάζεται περίπου ένα στρέμμα γης (γεωγραφικό πλάτος 36°), ενώ με ορυκτά καύσιμα, ένα πετρελαιοκινητήρας ή ένα σύστημα λέβητα καυστήρα με δεξαμενή, καλύπτει τις ίδιες ανάγκες σε ενέργεια, δεσμεύοντας μικρότερο μερίδιο γης. [6]

Δεύτερον όλα τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι εξαρτώμενα από της καιρικές συνθήκες. Η κύρια αξιοποιήσιμη πηγή ακτινοβολίας που μετατρέπεται είναι η άμεση ακτινοβολία. Σε περίπτωση συννεφιάς, είτε μερικής, είτε ολικής, η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι σχεδόν μηδενική. Ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας πρέπει να προσφέρει συνεχής και ευσταθές ρυθμό ενέργειας, για να μπορεί συνεχώς να καλύπτει τις ανάγκες σε

φορτία. Η στοχαστικότητα της παραγωγής καθιστά μεγάλη πρόκληση για την αντικατάσταση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τρίτον με την ημερήσια περιοδικότητα της ηλιακής ενέργειας ως πηγή άλλα και με τις ωριαίες διακυμάνσεις είναι αδύνατη η σταθερή κάλυψη φορτίου βάσης χωρίς την χρήση ταμιευτήρα ενέργειας.

Οι ταμιευτήρες ενέργειας, είτε ηλεκτρικής είτε θερμικής, μπορούν να εξαλείψουν περιορισμούς που δημιουργεί η φύση της ηλιακής ενέργειας. Η αποθήκευση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε περιοχές μη διασυνδεδεμένες με κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού και συμβάλει στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα. Η μικρότερης κλίμακας αποθήκευση θερμικών φορτίων είναι μια έξυπνη μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας που πραγματοποιείτε και σήμερα σε πολλές εφαρμογές είτε οικιακές είτε βιομηχανικές. Ωστόσο η μεγαλύτερης κλίμακας αποθήκευση σε επίπεδο πόλεων αποτελεί πρόκληση και πεδίο έρευνας. [6]

Η ερεύνα γύρω από την αποθήκευση της ενέργειας αποτελεί σύγχρονο αντικείμενο μελέτης και ερευνάς. Στόχος είναι η ανάπτυξη υλικών και μεθόδων για την πυκνότερη αποθήκευση ενέργειας, η μείωση του κόστους αποθηκευμένης ενέργειας, η σταθερή παροχή της ενέργειας ανεξάρτητα με το ενεργειακό απόθεμα κ.α. Οι ταμιευτήρες ενέργειας θα αναλυθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

2.2 Θερμικοί Ηλιακοί Συλλέκτες

Όπως γνωρίζουμε από την θερμοδυναμική, η θερμότητα μεταφέρετε μεσώ της αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας δημιουργήθηκαν διατάξεις απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν η ακτινοβολία προσκρούει σε ένα κάτοπτρο ένα μέρος της ανακλάται, ένα μέρος της απορροφάτε και ένα μέρος της το διαπερνά. Εφόσον το κάτοπτρο είναι μη διαφανές σώματος η διαπερατότητα είναι μηδέν.

Έχει λοιπόν ιδιαίτερη σημασία η σωστή ανάκλαση και η όσο δυνατόν μεγαλύτερη απορρόφηση της ηλιακή ακτινοβολίας από του συλλέκτες. Οι συλλέκτες είναι διατάξεις που αποτελούνται από απορροφητικές επιφάνειες (απορροφητήρες) και ανακλαστικές επιφάνειες (ανακλαστήρες). Η επιφάνεια του απορροφητήρα λέγεται επιλεκτική και είναι σχεδιασμένη ώστε να έχει υψηλή απορροφητικότητα και χαμηλή εκπεμπιμότητα ακτινοβολίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την βέλτιστή απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Αντίστοιχα για της ανακλαστικές επιφάνειες (κάτοπτρα) επιλέγονται υλικά με υψηλής ανακλαστικότητας όπου σχηματίζουν μεταλλικές επιφάνειες καλά γυαλισμένες με κατάλληλες επιστρώσεις.

Οι ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Οι συλλέκτες είναι κατασκευασμένοι από υλικά έτσι ώστε το μεγαλύτερο κομμάτι της ηλιακής ακτινοβολίας να απορροφάτε από τον συλλέκτη. Η θερμότητα μέσω συναγωγής μεταφέρετε με ρευστό και η θερμική ενέργεια πλέον αποδίδεται προς χρήση. Συνεπώς οι ηλιακοί συλλέκτες είναι εναλλάκτες θερμότητας που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση της ενέργειας γίνεται μέσω ενός δεύτερου εναλλάκτη που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την θερμική ενέργεια από το ρευστό σε νερό. Η καλύτερη απόδοση του συλλέκτη δεν εξαρτάτε μόνο στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας άλλα και στην μείωση των απωλειών θερμότητας στο εσωτερικό του. Η πιο γνωστή διάταξη με ηλιακό συλλέκτη είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας που χρησιμοποιείται ευρέως για την θέρμανση ζεστού νερού είτε για οικιακή είτε για επαγγελματική χρήση. Οι ηλιακοί συλλέκτες κατηγοριοποιούνται σε επίπεδους και συγκεντρωτικούς συλλέκτες. Οι συλλέκτες ανάλογα με την κατηγορία όπου ανήκουν χαρακτηρίζονται από τον λόγο συγκέντρωσης και την θερμοκρασία λειτουργίας.

Πίνακας 1: Κατηγορία συλλεκτών- Λόγος συγκέντρωσης [6].

Κατηγορία	Λόγος Συγκέντρωσης	Εύρος Θερμοκρασιών
Επίπεδος συλλέκτης	1	<70
Επίπεδος συλλέκτης υψηλής αποδόσεως	1	60-120
Σταθερός συγκεντρωτικός συλλέκτης	3-5	100-150
Παραβολικός επιμήκης συλλέκτης	10-50	150-350
Παραβολικός κυκλικός συλλέκτης	200-500	250-700
Πύργοι ηλιακής ισχύος	500-3000	500-1000

2.2.1 Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες

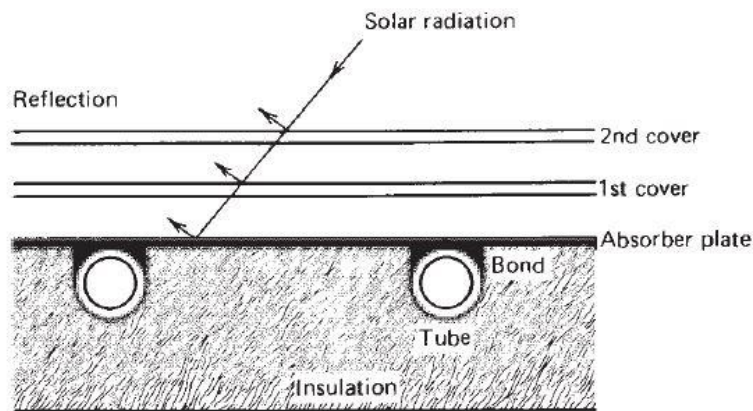
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες λειτουργούν σαν μετατροπείς θερμότητας μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και του ρευστού του κυκλώματος. Εφαρμογές βρίσκουν κυρίως για την θέρμανση ζεστού νερού έως τους 70 βαθμούς Κελσίου. Λόγω του μικρού κόστους που έχουν χρησιμοποιούνται ευρέως για οικιακή χρήση, ζεστών νερών χρήσης και θέρμανσης.

Περιγραφή Συλλεκτών:

Τα κύρια μέρη των επίπεδων συλλεκτών είναι ο καθρέφτης μελανού χρώματος για την καλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και το πλαίσιο με το δίκτυο των σωληνώσεων (απορροφητήρας) όπου διαρρέονται από ρευστό (εργαζόμενο μέσο) κατάλληλο για την παραλαβή και μεταφορά της θερμότητας προς κάποιο θερμοδοχείο. Το κύκλωμα του ρευστού είναι κλειστό. Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι κατάλληλα μονωμένος για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών και τοποθετείτε σε μεταλλική βάση. Οι συλλέκτες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Του συλλέκτες υγρού τύπου, όπου θερμικό ρευστό χρησιμοποιείτε για την μεταφορά θερμότητας (ηλιακός θερμοσίφωνα κ.α.) και τους συλλέκτες τύπου αέρα, όπου το θερμικό ρευστό είναι ο αέρας (ηλιακός ξηραντής κ.ά.) [6]



Εικόνα 8: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης



Εικόνα 9: Τομή ηλιακού συλλέκτη.[6]

Ισοζύγιο ενέργειας σε επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες

Η μελέτη για την θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη γίνεται βάση του ισοζυγίου ενέργειας κατά την θερμοδυναμική διαδικασία της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης θα μπορούσε να δοθεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση.

$$\text{Θερμική απόδοση} = \frac{\text{Εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια}}{\text{Εξερχόμενη θερμική ενέργεια}} \quad 2.1$$

Για ηλιακό συλλέκτη επιφάνειας A_c , η απόδοση του απορροφητήρα μπορεί να υπολογιστεί ως[6]:

$$I_c A_c \tau_s a_s = q_u + q_{loss} + \frac{de_c}{dt} \quad 2.2$$

I_c : Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

τ_s : Ενεργός διαπερατότητα του καλύμματος του συλλέκτη

a_s : Απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας

q_u : Παραγωγή θερμικής ενέργειας

q_{loss} : Απώλειες θερμότητας στον συλλέκτη

de_c/dt : ρυθμός συσσώρευσης εσωτερικής ενέργειας εντός συλλέκτη

Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη δίνεται από τον τύπο:

$$n_c = \frac{q_u}{A_c I_c} \quad 2.3$$

Η αναλυτικότερη επίλυση του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης του συλλέκτη γίνεται με υπολογιστική επίλυση των θερμικών συνθηκών στον απορροφητήρα και στον συλλέκτη. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαν να υπολογιστούν εκτενώς τα μεταβατικά φαινόμενα στην ηλιακή ακτινοβολία, οι απώλειες θερμότητας συλλέκτη, η ικανότητα απορρόφησης και απαγωγής θερμότητας του συλλέκτη. Στα πλαίσια της διπλωματική εργασίας θα αξιοποιηθούν οι παραπάνω τύποι καθώς και δεδομένα από το PVGIS. Η μελέτη θα γίνει σε παραβολικούς θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, η ανάλυση τους θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.[6]

Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο θα μπορούσε να υπολογιστεί ως :

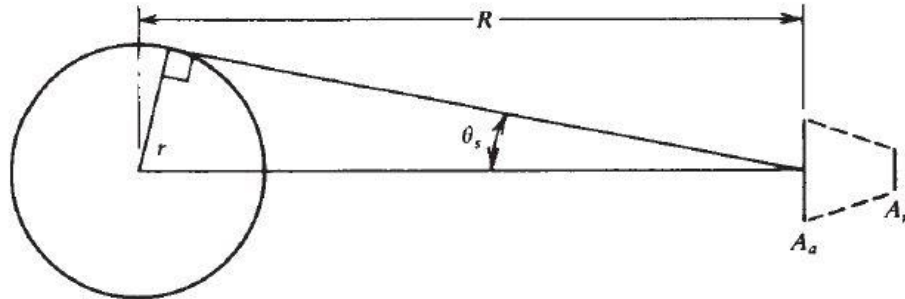
$$n_c = \frac{\int q_u dt}{\int A_c I_c dt} = \frac{\dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})}{\int A_c I_c dt} \quad 2.4$$

2.2.2 Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες αποτελούνται από διάταξη από καθρέφτες επιφάνειας A_a και διάταξη απορροφητήρα ή δέκτη συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας επιφάνειας A_r , αρκετά μικρότερης από την επιφάνεια των καθρεφτών. Με την συγκεκριμένη τεχνολογία αξιοποιείτε ή άμεση ακτινοβολία (DNI) και πολύ μικρό ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας, οπότε συνήθως τα συστήματα παραγωγής ενέργειας με συγκεντρωτικούς συλλέκτες εδράζονται σε κινούμενες βάσεις με σύστημα αυτομάτου ελέγχου παρακολούθηση ηλίου για μεγαλύτερη απόδοση. Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, επιτυγχάνεται με την ανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

επιφάνειας A_a σε μικρότερο απορροφητήρα επιφάνειας A_r . Ο γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης ορίζεται βάση του λόγου των εμβαδών των επιφανειών.

$$CR = \frac{A_a}{A_r} \quad 2.5$$



Εικόνα 10: Γεωμετρικός λόγος συγκέντρωσης. [6][8][16]

Ωστόσο ο πραγματικός λόγος συγκέντρωσης ορίζεται ως ο λόγος των ροών της ηλιακής ακτινοβολίας σε καθρέπτη και απορροφητήρα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι περισσότεροι από τις θερμικές απώλειες σε απορροφητήρα και καθρέπτη. Ανάλογα με το είδος του συγκεντρωτικού συλλέκτη προκύπτουν παρακάτω παράγοντες απόδοσης του συλλέκτη όπως:

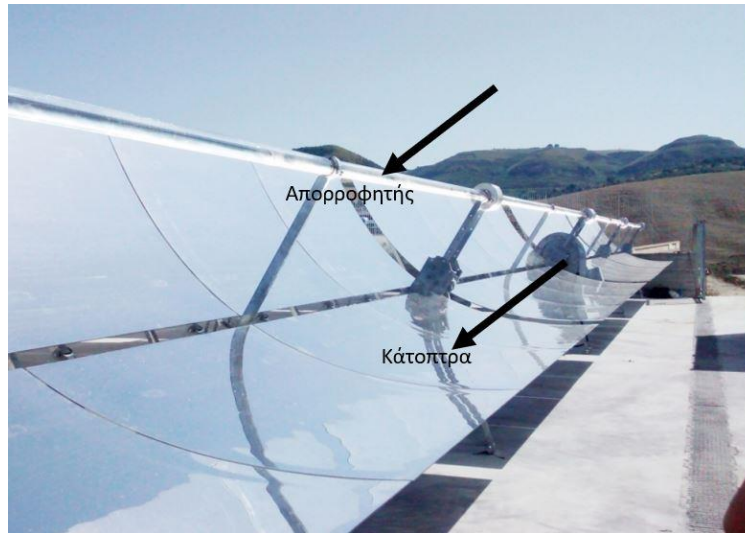
- Η ανακλαστικότητα του καθρέπτη, οι συνήθεις γυάλινοι καθρέφτες όπου χρησιμοποιούνται σε διατάξεις συγκεντρωτικών συλλεκτών έχουν ανακλαστικότητα 93-94%
- Απορροφητικότητα του απορροφητήρα ή δέκτη της συγκεντρωμένης ηλιακής ροής
- Παράγοντες γεωμετρικών σφαλμάτων, σκιάσεων και μηχανικών ανακολουθιών συστήματος παρακολούθησης του ηλίου.

Με την μέτρηση των λόγων των ηλιακών ροών σε καθρέπτη και απορροφητήρα, λαμβάνονται υπόψιν και οι παραπάνω παράγοντες στην θερμική απόδοση των συλλεκτών.

Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης έχει $CR=1$, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες έχουν βαθμό συγκέντρωσης $CR>1$ συνεπώς με την μεγαλύτερη συγκέντρωση ενέργειας, μπορούν να σχεδιαστούν συστήματα μεγαλύτερης ισχύος ικανά να τροφοδοτήσουν πιο απαιτητικά φορτία. Ανάλογα με το είδος των συγκεντρωτικών συλλεκτών επιτυγχάνεται μεγαλύτερος ή μικρότερος βαθμός συγκέντρωσης. Παρόλα αυτά ένα μειονέκτημα των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι ότι μπορεί να αξιοποιηθεί μικρό μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας, επιπλέον υπάρχει ένα θερμοδυναμικό όριο των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Το θερμοδυναμικό όριο ορίζεται βάση της γεωμετρίας του συστήματος και εξαρτάτε από την καμπυλότητα του καθρέπτη και την απόσταση του καθρέπτη και του απορροφητήρα. [6]

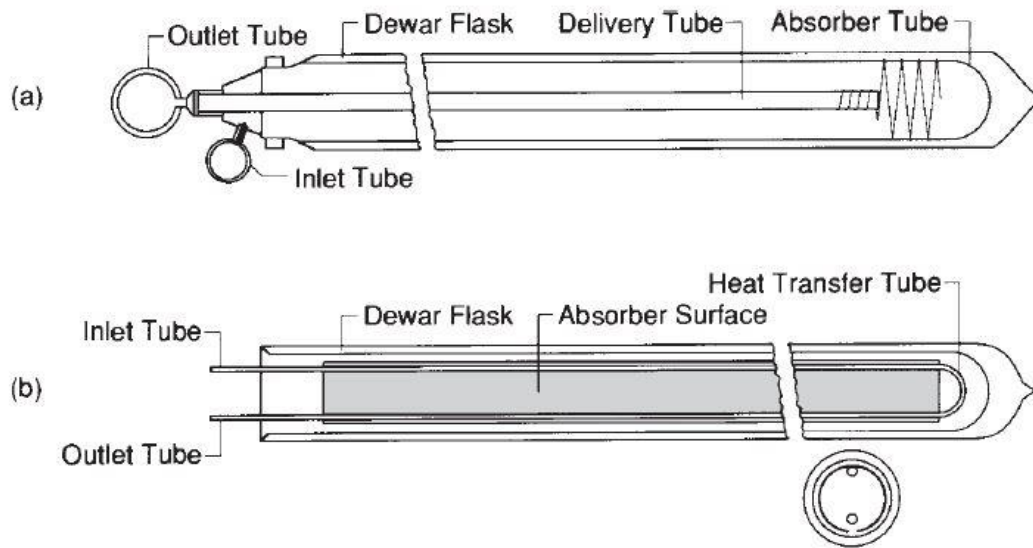
2.2.2.1 Κοίλοι Ηλιακοί Συλλέκτες

Οι πιο κοινή γεωμετρία για συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο κοίλος παραβολικός συγκεντρωτής (Parabolic trough concentrator PTC). Με την γεωμετρία των παραβολικών συλλεκτών επιτυγχάνεται η συγκέντρωση των ακτινών που ανακλώνται στην επιφάνεια των καθρεπτών σημειακά όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [6]



Εικόνα 11: Παραβολικοί ηλιακοί συλλέκτες της εταιρείας Solingua μοντέλο PTMΧ[27]

Οι διάταξη των καθρεπτών τοποθετούνται στον άξονα της ανατολής-δύσης και η παρακολούθηση του ηλίου γίνεται από αυτόνομο σύστημα ελέγχου με ανάδραση. Το αυτόνομο σύστημα δίνει τις κατάλληλες εντολές για την περιστροφή της διάταξης έτσι ώστε η άμεση ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας να είναι μέγιστη. Ο απορροφητήρας του παραβολικού συλλεκτή, τοποθετείτε γεωμετρικά στο σημείο συγκέντρωσης των ηλιακών ακτινών κατά μήκος της διάταξης των καθρεπτών. Κατά κανόνα είναι σωληνωτός και περιέχεται σε γυάλινο σωλήνα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 12). Για την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών λόγω συναγωγής με το εξωτερικό περιβάλλον, επιλέγετε μεταξύ απορροφητήρα και εξωτερικού γυάλινου σωλήνα να υπάρχει κενό. Η σωστή στήριξη του απορροφητήρα επιτυγχάνεται με μεταλλικά στηρίγματα ανά μερικά μέτρα.[6][8][16]



Εικόνα 12: Απορροφητής παραβολικού ηλιακού. [6][16]

Οπτικός βαθμός απόδοσης

Ο οπτικός βαθμός απόδοσης η_0 ενός συλλέκτη εκφράζει τον λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάτε από τον απορροφητήρα προς την ηλιακή ακτινοβολία που παραλαμβάνεται από τους καθρέφτες. Ο βαθμός απόδοσης η_0 όπως αναλύθηκε και παραπάνω εξαρτάτε από :

- Τον βαθμό ανακλαστικότητας, ρ : Για του ανακλαστήρες που χρησιμοποιούνται στα παραβολικά ηλιακά η ανακλαστικότητα $\rho = 0,93-0,94$
- Τη διαπερατότητα του γυάλινου σωλήνα $\tau = 0,93-0,96$
- Την απορροφητικότητα του απορροφητήρα (δέκτη), $\alpha = 0,94-0,95$
- Παράγοντες σύλληψης της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, όπως
 1. Γεωμετρικά σφάλματα γ_1 : Οι διάταξη των ανακλαστήρων γεωμετρικά προσεγγίζει τον γεωμετρικό τόπο της παραβολής. Συνεπώς ένα μικρό ποσοστό των ακτινών που ανακλώνται δεν καταλήγουν στον σωληνωτό δέκτη.

$$\gamma_1 = 0,97-0,98$$
 2. Σκίαση γ_2 : Τόσο τα στηρίγματα του απορροφητήρα όσο και ο ίδιος ο απορροφητήρας σκιάζουν μικρό ποσοστό των ανακλαστήρων, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ωφέλιμη επιφάνεια του να είναι μικρότερη από την συνολική. $\gamma_2 = 0,96-0,97$
 3. Μηχανικές ανακολουθίες: Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου παρακολούθησης ηλίου, περιέχει μικρές ανακολουθίες, κυρίως στο διάστημα ανατολής και δύσης του ηλίου, επομένως μειώνεται η άμεση ακτινοβολία που δέχονται οι ανακλαστήρες.

4. Ο συνολικός οπτικός απόδοσης n_0 υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο

$$n_0 = \rho\tau\alpha\gamma_1\gamma_2\gamma_3 \quad 2.6$$

5. Κατά την λειτουργία του συστήματος ο οπτικός βαθμός απόδοσης του συστήματος δεν είναι σταθερός και εξαρτάτε από την γωνία πρόσπτωσης, την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στου ανακλαστήρες, τον παράγοντα της επικαθίμενης σκόνης κ.α. Στην βιβλιογραφία [6] αναφέρονται κάποιες έρευνες που έχουν γίνει για τον υπολογισμό του οπτικού βαθμού απόδοσης παραβολικού συλλέκτη. Στα πλαίσια της εργασίας, ο υπολογισμός θα γίνει βάση της [2] ερευνητικής δημοσίευσης.

Θερμικές απώλειες παραβολικού συλλέκτη

Η μεταφορά της θερμότητας στο απορροφητήρα (δέκτη) της συγκεντρωμένης πλέον ηλιακής ακτινοβολίας, γίνεται με την χρήση εργαζόμενου ρευστού (Heat Transfer Fluid). Λόγω της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας τα παραβολικά συστήματα παραγωγής θερμικής ισχύος, μπορούν να εργάζονται και σε χαμηλές θερμοκρασίας (70-90° C) όπως οι επίπεδοι συλλέκτες, αλλά και σε υψηλότερες θερμοκρασίας (200-400° C). Οι αυξημένες θερμοκρασίες συνεπάγονται θερμικές απώλειες κατά την μεταφορά της θερμικής ενέργειας από του δέκτες στα θερμοδοχεία αποθήκευσης.

Οι θερμικές απώλειες οφείλονται κατά κύριο λόγω στην διαφορά θερμοκρασία του σωληνωτού απορροφητήρα και εξωτερικού περιβάλλοντος. Η μετάδοση θερμότητα γίνεται μέσω αγωγής στις επαφές που έχει ο απορροφητήρας με τα στηρίγματα και μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας με το εξωτερικό περιβάλλον. Για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών υπολογίζεται ο γενικευμένος συντελεστής θερμικών απωλειών [W/m²K]:

$$U_c = a + b(T_r - T_a) + c(T_r - T_a)^2 \quad 2.7$$

Οι τιμές των α, β, γ δίνονται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2: Απόδοση παραβολικού συστήματος

T(δέκτη) [°C]	α	B	c
<200	0,687257	0,001941	0,000026
200-300	1,433242	-0,00566	0,000046
>300	2,895474	-0,0165	0,000065

*Πηγή [...] F. Lippke, Simulation of the part load behaviour of a 30 Mwe SEGS plant, Tech. Rep., SAND-95-1293, Sandia National Labs, Albuquerque (1995)

Για την συνολική απόδοση του συστήματος ο υπολογισμός του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης:

$$n_c = n_0 - U_c \frac{T_r - T_a}{I_c} \frac{A_r}{A_a} \quad 2.8$$

Η ανάπτυξη γύρω από τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα για την παραγωγή θερμικής ενέργειας και ηλεκτρισμού είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η αυξημένη ανάγκη της θερμικής ενέργειας στην βιομηχανία μαζί με τους στόχους για Decarbonization των κρατών, έχει κατευθύνει τους ερευνητές στην περαιτέρω μελέτη για αύξηση της βιωσιμότητας συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών. Στόχος είναι τόσο η αύξηση του βαθμού απόδοσης και η ευστάθεια παροχής θερμικής ισχύος στην παραγωγή, όσο και η μείωση της αρχικής επένδυσης. Η έρευνα κινείται γύρω από την ανάπτυξη ρευστών με αυξημένη ικανότητα μετάδοσης θερμότητας, την ανάπτυξη πιο ανθεκτικών κατόπτρων με μεγαλύτερη ανακλαστικότητα, την ανάπτυξη υλικών για την αυξημένη θερμική θωράκιση, τόσο τον δικτύων όσο και τον θερμοδοχείων.

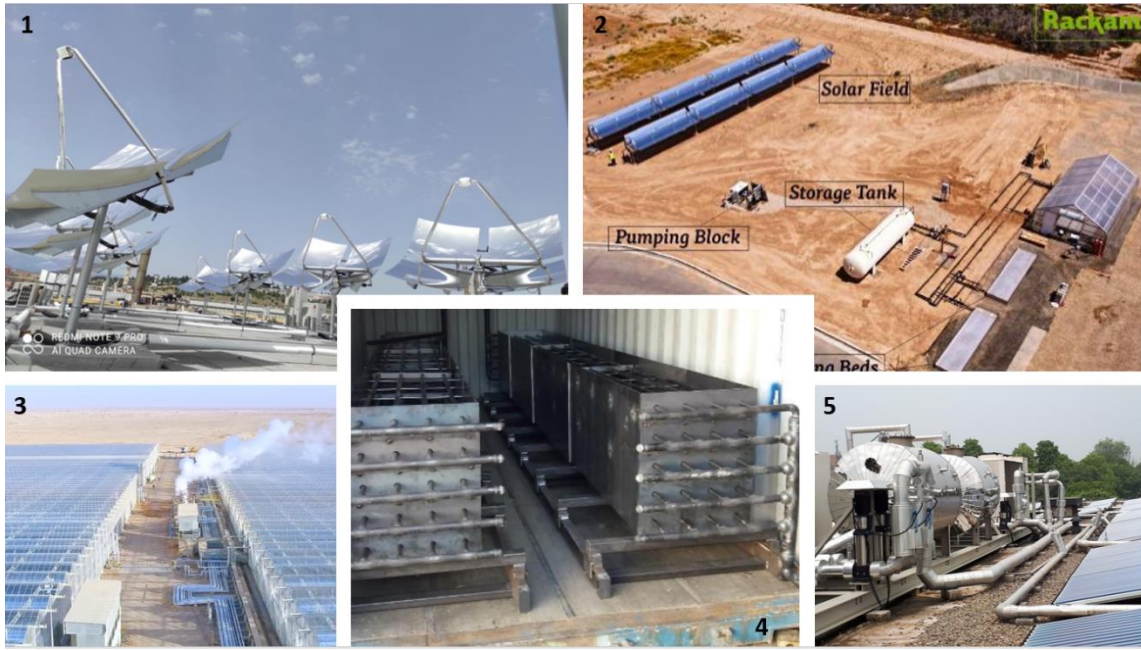
Ο αυξημένος βαθμός απόδοσης(60-70%) τους σε σχέση με τις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών(15-23%), σε πολλές περιπτώσεις κάνει πιο συμφέρων της εγκαταστάσεις ηλιακών θερμικών για την παραγωγή και την αξιοποίηση απευθείας θερμικής ισχύος. Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται και οι δύο τεχνολογίες για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας ξεχωριστά. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις για βιομηχανική χρήση και μεγάλα ηλιοθερμικά πάρκα για ηλεκτροπαραγωγή. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με το είδος της βιομηχανίας η θερμική ισχύς που παρέχεται από τα θερμικά ηλιακά χρησιμοποιείτε για πληθώρα εφαρμογών.

Πίνακας 3:Τα μεγαλύτερα ηλιοθερμικά πάρκα με κοίλους παραβολικούς συλλέκτες.

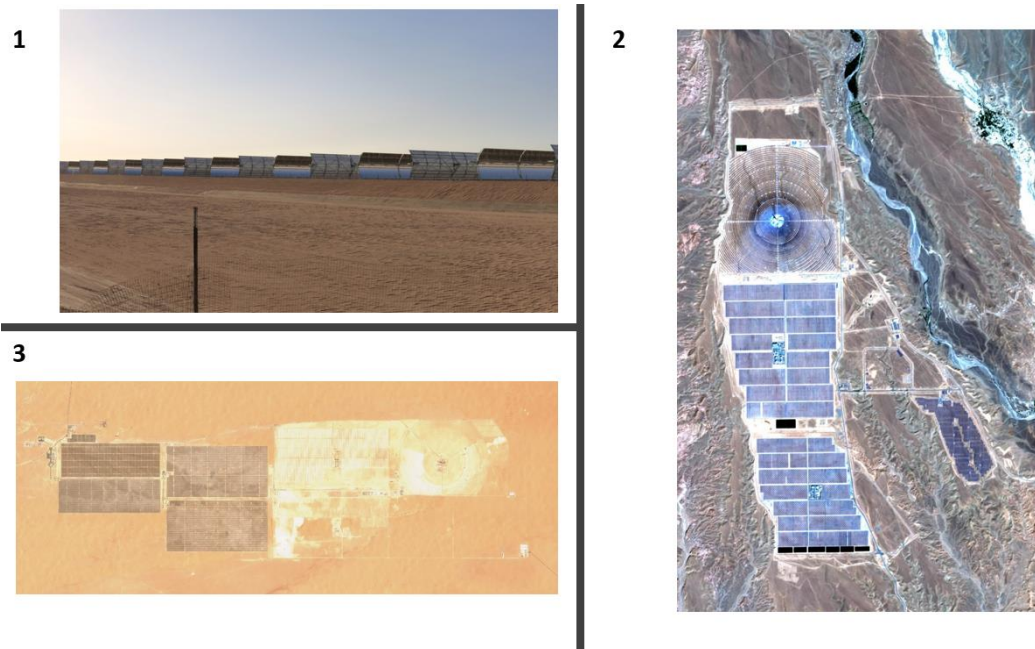
Περιγραφή	Περιοχή	Εγκατάσταση	Σκοπός	Παραγωγή
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park 517MW	Dubai, UAE	417MW Παραβολικά Ηλιακά και 100MW Ηλιακός Πύργος	Παραγωγή Θερμικής και Ηλεκτροπαραγωγή	0-2,8TWh/year
Ouarzazate Solar Power Station 510MW	Ghassate, Morocco	360MW Παραβολικά Ηλιακά και 150MW Ηλιακός Πύργος	Παραγωγή Θερμικής και Ηλεκτροπαραγωγή	0-1,47TWh/year
Mojave Solar Project	Mojave Desert, California	280MW Παραβολικά Ηλιακά	Παραγωγή Θερμικής και Ηλεκτροπαραγωγή	0-0,650TWh/year

Πίνακας 4: Παραδείγματα βιομηχανιών με παραβολικά ηλιοθερμικά συστήματα

Περιγραφή	Περιοχή	Εγκατάσταση	Σκοπός	Παραγωγή
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά της εταιρίας Heineken	Σεβίλλη, Ισπανία	Παραβολικά Ηλιακά 692,4m ² και Συγκεντρωτικές Παραβολικές Νησίδες	Παραγωγή νερού 210 C στα 35 bar για την υποστήριξη της παραγωγής ζύθου	Ετήσια Παραγωγή 28,5GWh Κάλυψη 55% των θερμικών αναγκών
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά της εταιρίας Kean Soft Drinks	Λεμεσός, Κυπρός	Παραβολικά Ηλιακά με silicon-based thermal oil, Συστοιχίες με επίπεδους συλλέκτες και σύστημα αποθήκευσης	Παραγωγή ατμού 425 C και νερού έως 100 C για την διατήρηση και παστερίωση των τροφίμων	Κάλυψη του 10-15% των θερμικών αναγκών για την ατμοπαραγωγή
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά της εταιρίας Hatsun Agro Products	Salem, Ινδία	Παραβολικά Ηλιακά με σύστημα αποθήκευσης 320kW Θερμικής ισχύος	Παραγωγή ατμού 220 C στα 20bar για την παραγωγή προϊόντων γάλατος	Κάλυψη αναγκών 80% για την ατμοπαραγωγή
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με Σύνθετα (Compound) παραβολικά Ηλιακά της εταιρίας Swiss	Νέο Δελχί, Ινδία	Σύνθετα (Compound) παραβολικά Ηλιακά για την τροφοδότηση του συστήματος ψύξης	Υποστήριξη συστήματος ψύξης	Μείωση 40% της Ηλεκτρική ενέργειας στον ψύκτη
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά 2GW στο Miraah, Oman	Miraah, Νότιο Oman	Παραβολικά Ηλιακά με σύστημα αποθήκευσης 2GW Θερμικής ισχύος	Παραγωγή ατμού 200-300 C για την αναγέννηση λαδιών στην πετρελαιοβιομηχανία	Παραγωγή 1,6TWh Θερμικής ενέργειας και μείωσης 300.000 εκπομπών CO ₂
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά 12.000m ² στην Βραζιλία. Συμπραξη 10 εταιριών	Jaborandi, Brazil	Παραβολικά Ηλιακά 2092m ²	Παραγωγή θερμικής ενέργειας θερμοκρασίας 150-350C	Υποστήριξη βιομηχανιών γεωργίας και παραγωγής καπνών. 5,3kWh/m ² day
Πάρκο Παραγωγής Θερμικής Ενέργειας Με παραβολικά Ηλιακά της εταιρίας Heat2Hydro	Arizona, USA	Παραβολικά Ηλιακά 78,58m ² με σύστημα αποθήκευσης	Παραγωγή νερού 121C στα 5 bar για την επεξεργασία νερού και τον διαχωρισμό sludge	Υπολογιζόμενη αξιοποίηση 0,643kW/m ²



Εικόνα 13: Βιομηχανικές Εφαρμογές → 1) Heineken, Σεβίλλη 2) Heat2Hydro, Arizona 3) Miraan, Oman 4) Kean Soft Drinks, Λεμεσός 5) Swiss, Ινδία



Εικόνα 14: Τα μεγαλύτερα ηλιοθερμικά πάρκα → 1) Mojave Solar Project, California 2) Ouarzazate Solar Power Station, Morocco 3) Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park, Dubai

2.2.2.2 Συγκεντρωτές σύνθετης καμπυλότητας

Με στόχο την αύξηση της ισχύος ανά τετραγωνικό εγκατάστασης, αναπτυχθήκαν διατάξεις ανακλαστήρων σε μορφή νησίδων με στόχο την αύξηση του λόγου συγκέντρωσης. Για τις συγκεκριμένες διατάξεις έχουν αναπτυχθεί σύνθετης καμπυλότητας κάτοπτρα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας αυτών των διατάξεων είναι υψηλές (200-400°C). Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι [6]:

- Νησίδες με σφαιρικά κάτοπτρα και λόγο συγκέντρωσης 50-150
- Νησίδες με παραβολοειδής κάτοπτρα και λόγο συγκέντρωσης 500-3000
- Νησίδες με φακούς Fresnel και λόγο συγκέντρωσης 100-1000
- Νησίδες με κάτοπτρα Fresnel και λόγο συγκέντρωσης 1000-3000

Στόχος το συγκεκριμένων διατάξεων είναι η αύξηση του οπτικού συντελεστή συγκέντρωσης καθώς συγκεντρώνουν σημειακά τις ανακλώμενες ηλιακές ακτίνες.

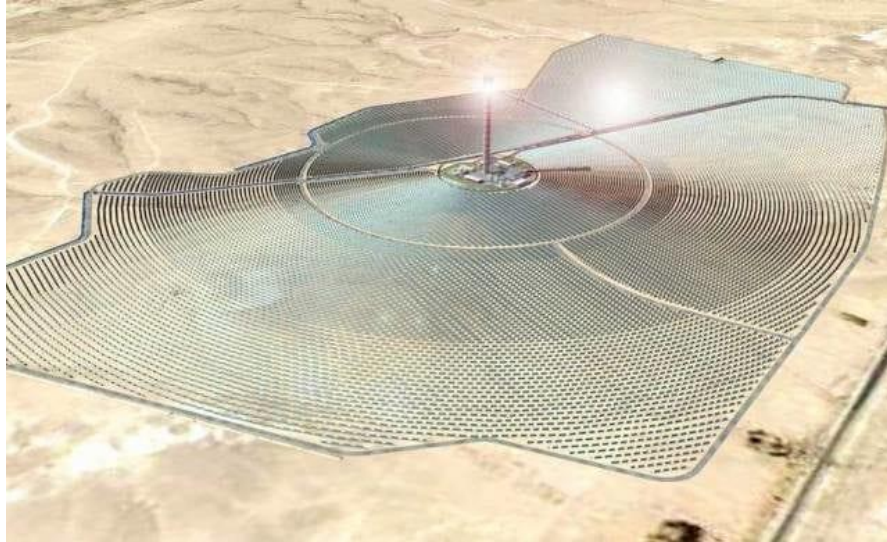


Εικόνα 15: Νησίδα με κάτοπτρο Fresnel

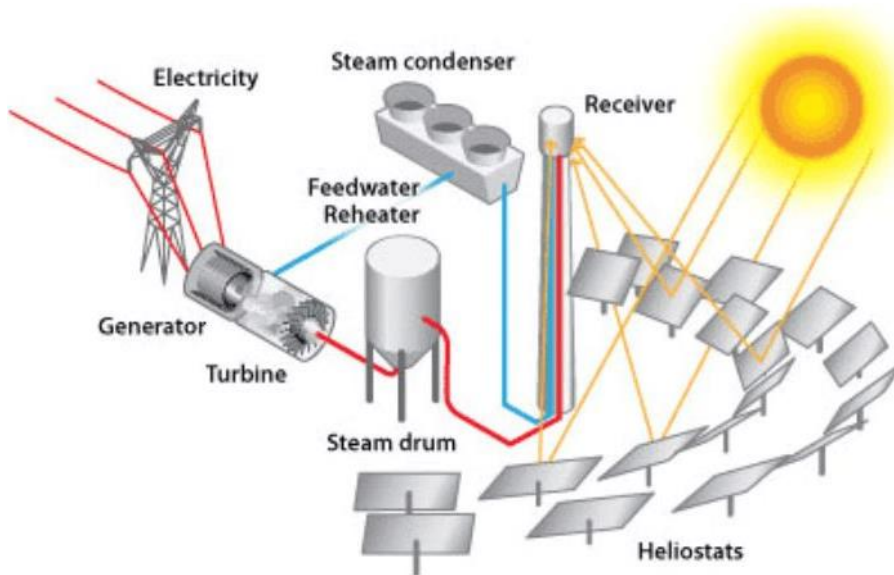
2.2.2.3 Ηλιακοί Πύργοι

Ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος υψηλής συγκέντρωσης ισχύος είναι οι ηλιακοί πύργοι. Οι ηλιακοί πύργοι είναι πολύπλοκες διάταξης που σκοπό έχουν την τροφοδοσία κύκλων παραγωγής υψηλής ισχύος με ατμό. Ο δέκτης-απορροφητήρας βρίσκεται στο κέντρο της εγκατάστασης και σε ύψος ανάλογα με το μέγεθος του σταθμού παραγωγής. Στην βάση του πύργου και περιμετρικά τοποθετούνται επίπεδα κάτοπτρα με συγκεκριμένη κατεύθυνσή και κλίση ώστε να συγκεντρώνονται όλες οι ηλιακές ακτίνες στον δέκτη όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [16] Στον απορροφητήρα, ρευστό κατάλληλο για υψηλές

θερμοκρασίες ρέει σε κλειστό κύκλωμα υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται σε θερμοδοχεία αποθήκευσης θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και για την ατμοπαραγωγή νερού μέσω εναλλακτών.



Εικόνα 16: Ηλιακό πάρκο με ηλιακό πύργο[wiki]

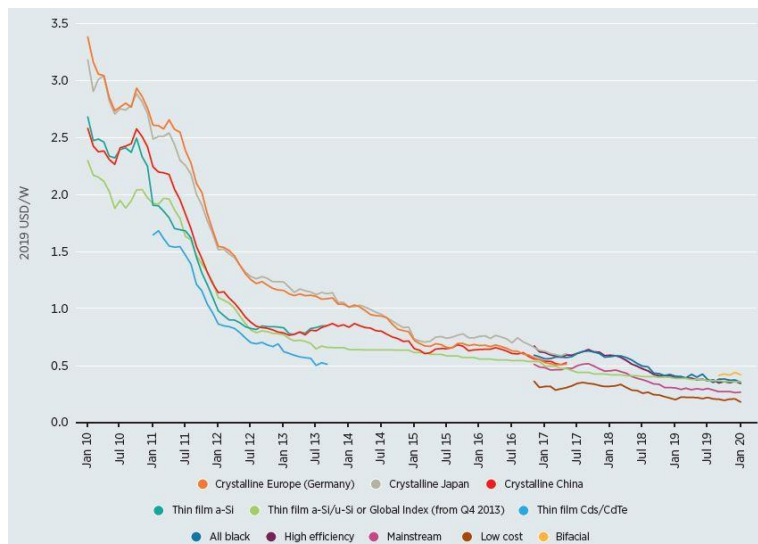


Εικόνα 17: Διάγραμμα Ηλιακού πύργου by Terrence L. Chambers

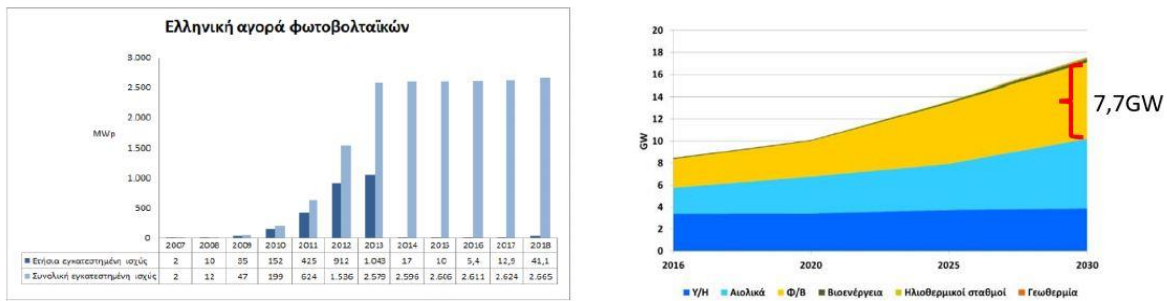
2.3 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η ηλεκτροπαραγωγή με φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής ενέργειας από τον ήλιο. Η αυξημένη έρευνα των τελευταίων ετών καθώς και η ανάπτυξη των ημιαγωγών, έχει μειώσει το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε τέτοιο βαθμό που στις περισσότερες περιπτώσεις η επένδυση σε φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πιο συμφέρουσα. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μια άμεση μετατροπή ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς την μεσολάβηση θερμικής διεργασίας. Το μεγαλύτερο προνόμιο είναι η απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ μικρό κόστος αρχικό κόστος επένδυσης (περίπου 1000 €/Kw ηλεκτρικής ενεργείας)[11]. Η εγκατάσταση τους γίνεται από στέγες και δώματα οικιστικών περιοχών μέχρι και σταθμούς υψηλής ισχύος. Η περίοδος αποπληρωμής της αρχικής επένδυσης εξαρτάτε από το πρόγραμμα στο οποίο εντάσσεται ο φωτοβολταϊκός σταθμός (πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, συμψηφισμός ηλεκτρικής ενέργειας κ.α.) και τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Η γρήγορη αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης τα προηγούμενα χρόνια και τα κίνητρα που έχουν δοθεί για την εγκατάσταση τους, έχουν ωθήσει πολλούς ιδιώτες στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μικρής ισχύος (μέχρι 5-50 kW), δημιουργώντας και πλέον ενισχύοντας το πεδίο της διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής.

Κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, απαιτούνταν περισσότερη ενέργεια για την δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού κελιού. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά κελία είχαν μικρότερο χρόνο ζωής. Στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του κλάσματος της ενέργειας για την παραγωγή του κελιού προς τον χρόνο ζωής του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα και την μείωση του κόστους των Φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Το 2008 απαιτούνταν 2-5 χρόνια (Energy Payback Time) για την « επιστροφή» της αρχικής ενέργειας ενώ ο μέσος χρόνος ζωής είχε αυξηθεί στα 30 έτη μειώνοντας σημαντικά την τιμή του πάνελ και εν συνεχεία της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.



Εικόνα 138: Γράφημα τιμής ανά εγκατεστημένο Watt για φωτοβολταϊκά συστήματα [IRENA 10]



Εικόνα 19: Ελληνική αγορά Φωτοβολταϊκών. Εγκατεστημένη ισχύς [41]

Στην Ελλάδα η εγκατάσταση ξεκίνησε με αργούς ρυθμούς. Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και τα κίνητρα που δόθηκαν ενίσχυσαν σημαντικά την ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά. Από δεδομένα που πάρθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2021, υπολογίζεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς είναι 3,4 GW, ενώ στόχος είναι τα 7,7 GW μέχρι το 2030.

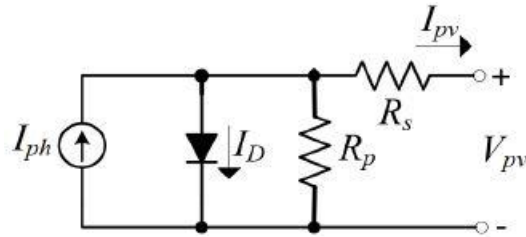
Σημαντικό είναι και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα όπου έχει η κατασκευή και η εγκατάσταση των σταθμών. Για τα ελληνικά δεδομένα υπάρχει νομοθεσία ν. 2637/1998 άρθρο 24. που απαγορεύει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών σε περιοχές με υψηλή αγροτική παραγωγή. Επιπλέον οι συλλέκτες στο τέλος της ζωής του ανακυκλώνονται, επαναχρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο μέρος των υλικών που τα συνθέτουν. Τα πλαίσια αποτελούνται περίπου από 76% Γυαλί, 10% πλαστικό, 8% Αλουμίνιου 5% Πυρίτιο και 1% άλλα μέταλλα[41]. Τα περισσότερα από τα υλικά επαναχρησιμοποιούνται, ενώ η διαδικασία ανακύκλωσης δεν απαιτεί υπερβολικά ποσά ενέργειας, καθιστώντας την ανακύκλωση τους βιώσιμη και μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η βάσεις και τα καλώδια εγκατάστασης αποτελούνται κυρίως από σίδηρο και χαλκό, υλικά άμεσα ανακυκλώσιμα και πολύτιμα, ενώ ανακυκλώνεται και ο αντιστροφάας. Η μονώσεις των καλωδίων και τα πλαστικά μέρη των πλαισίων συνήθως δεν ανακυκλώνονται.

Όπως προαναφέρθηκε η γεωγραφία της Ελλάδος κάνει την ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ πιο δυσμενής σε τοποθεσίες όπου δεν είναι διασυνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Σκοπός της παρούσα εργασίας είναι να διεξάγει συμπεράσματα, βελτίωσης της απορρόφησης τέτοιων συστημάτων με χρήση της αποθήκευσης της ενέργειας σε θερμοδοχεία υψηλών θερμοκρασιών.[41]

2.3.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Η διάταξη που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ρεύμα είναι οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, από ημιαγώγιμα υλικά (πυρίτιο κ.α.). Η παρόμοια κρυσταλλική δομή που έχουν οι κυψέλες με τα τρανζίστορ δημιουργούν τις επαφές p-n. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην κυψέλη, μέρος της απορροφάτε από το ημιαγώγιμο υλικό δημιουργώντας δυναμικό στο ακροδέκτες του στοιχείου.

Το ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β πλαισίου μία διόδου φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 20) :



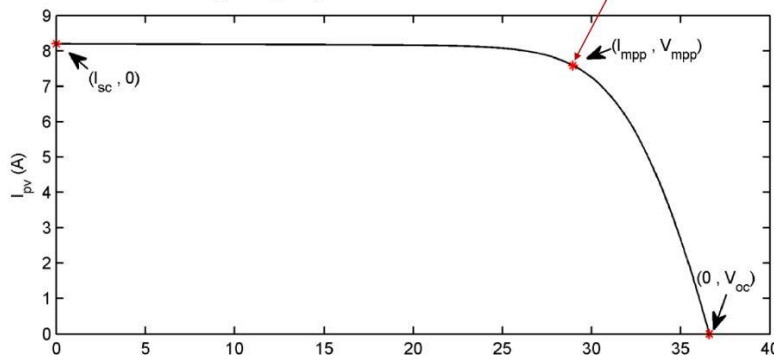
Εικόνα 20: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου μίας διόδου

Επιπλέον σημαντικές χαρακτηριστικές καμπύλες είναι η καμπύλη Ρεύματος-Τάσης και Ισχύος-Τάσης φωτοβολταϊκών πάνελ με μεταβλητούς παράγοντες την στιγμιαία ακτινοβολία και την θερμοκρασία στο πλαίσιο. Στα παρακάτω διαγράμματα ορίζεται το σημείο μέγιστης ισχύς εξόδου (I_{mpp}, V_{mpp}) W_{peak} ή Σημείο μέγιστης ισχύος MPP.[41]

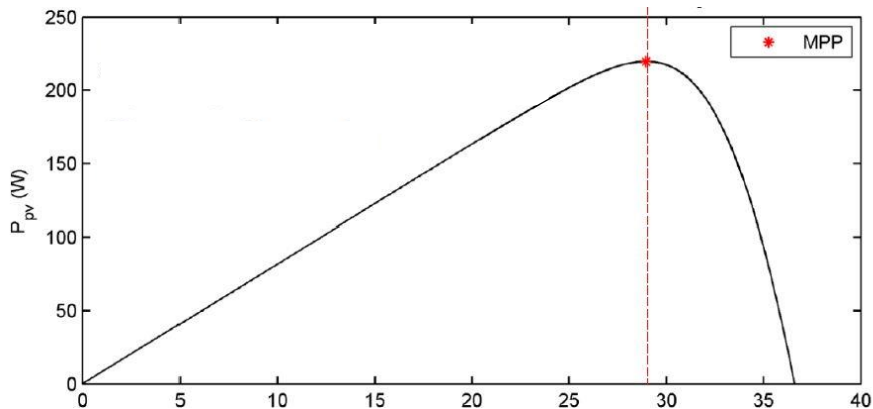
Από την εικόνα [23] φαίνεται ότι η ισχύς εξόδου ενός πλαισίου είναι ανάλογη με την ηλιακή ακτινοβολία και επηρεάζεται αρνητικά για υψηλές θερμοκρασίες.

- Ρεύμα βραχυκύκλωσης: $I_{sc} = I(V = 0)$
- Τάση ανοικτοκύκλωσης: $V_{oc} = V(I = 0)$
- Ρεύμα μέγιστης ισχύος: I_{mpp}
- Τάση μέγιστης ισχύος: V_{mpp}
- Μέγιστη ισχύς: $P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp}$

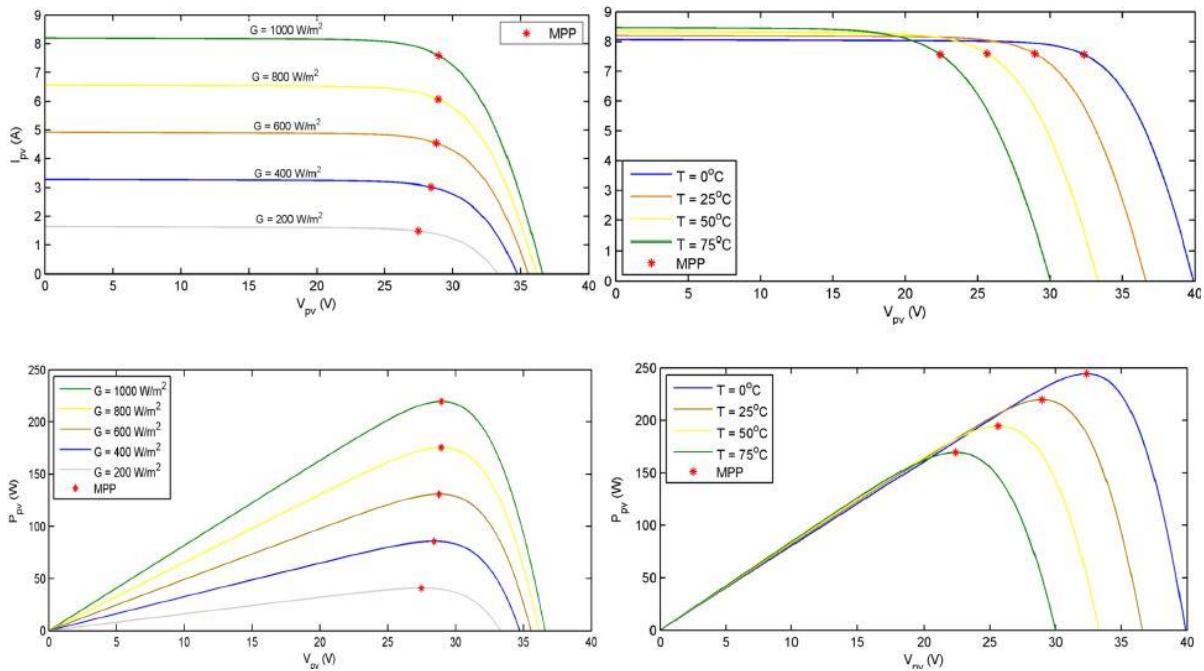
Σημείο μέγιστης ισχύος
(Maximum Power Point – MPP)



Εικόνα 21: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V



Εικόνα 22 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V [41]



Εικόνα 23: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V & P-V με επίδραση έντασης ακτινοβολίας & θερμοκρασίας [41]

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κελίων με διαφορετικές κρυσταλλικές δομές. Οι τρεις πιο γνωστές είναι τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα thin film πάνελ. Κάθε τεχνολογία έχει και διαφορετική απόδοση του πλαισίου όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. [41]

Πίνακας 5: Συντελεστής απόδοσης συλλεκτών

Κατηγορία	Απόδοση (%)
Si (Μονοκρυσταλλικό)	24,4±0,5
Si (Πολυκρυσταλλικό)	20,4±0,3
GaAs (Thin film)	25,1±0,8
CIGS (Cd free)	19,2±0,5
CdTe (thin film)	19,0±0,9
a-Si/nc-Su (tandem)	12,3±0,3

*GaAs: Gallium arsenide

CIGS: copper indium gallium selenide

CdTe: Cadmium telluride

Η απόδοση στις διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πάνελ ορίζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η απόδοση εξαρτάται και από δυναμικούς παράγοντες κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η θερμοκρασία στο πάνελ και η σκίαση. Συνεπώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ σταθμού δεν είναι σταθερή κάθε στιγμή.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των πάνελ είναι ο αριθμός των φωτοβολταϊκών κελίων, οι διαστάσεις, το βάρος, το είδος και η μέγιστη ισχύς W_p τυπικού πλαισίου κ.α.

Οι χρησιμοποιούμενος τύπος για τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης των πλαισίων είναι ο συντελεστής μετατροπής ενέργειας:

$$n = \frac{P_{mpp}}{GA} \quad 2.9$$

P_{mpp} : Μέγιστη ισχύς W_{peak}

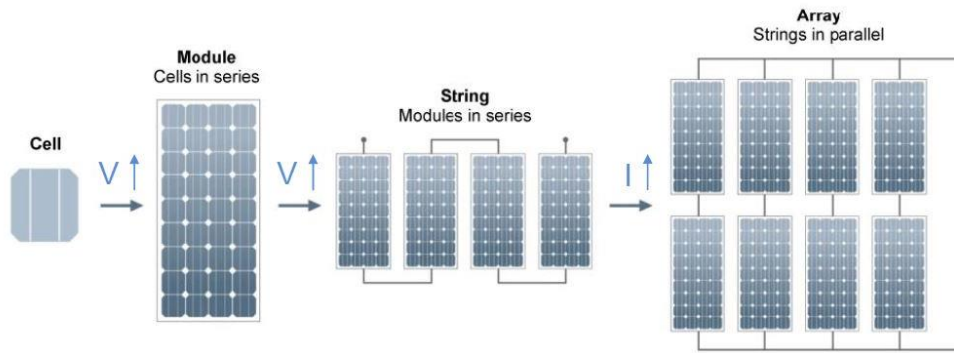
G : Ηλιακή ακτινοβολία

A : Επιφάνεια πλαισίου

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαστασιολογούνται από πολλούς παράγοντες. Το βασικό κριτήριο για την επιλογή μεγέθους ενός φωτοβολταϊκού πάρκου είναι τα φορτία τα οποία θα εξυπηρετήσει. Όταν η διάταξη-συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών κελίων γίνεται σε σειρά, επιτυγχάνεται η αύξηση της τάσης στην έξοδο του συστήματος, ενώ όταν η διάταξη είναι παράλληλη επιτυγχάνεται η αύξηση του ρεύματος στην έξοδο του συστήματος.

Πολλές κυψέλες σε σειρά αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Συνηθίζεται η συνδεσμολογία των πάνελ να γίνεται σε σειρά μέχρι η τάση εξόδου των πάνελ να είναι μικρότερη της τάσης δικτύου. Εφόσον η τάση εξόδου είναι στα επιθυμητά επίπεδα, η συνδεσμολογία από εκεί και πέρα γίνεται παράλληλα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα φωτοβολταϊκά πάρκα συνδέονται στην χαμηλή τάση 230/400V. Η τάση εξόδου εξαρτάται και από τα όρια του αντιστροφέα που θα επιλεγεί στην συνέχεια. Τοποθέτηση με σκοπό την αύξηση της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερο ρεύμα για δεδομένη ισχύς, συνεπώς το ηλεκτρικό δίκτυο μέχρι τις καταναλώσεις έχει μικρότερες απώλειες.

Η εγκατάσταση μπορεί να γίνει σε στέγες κτηρίων, δώματα, ανεκμετάλλευτες εκτάσεις γης κ.α. Ο κυρίως παράγοντας για την επιλογή της περιοχής είναι η μικρότερη όσο το δυνατόν σκίαση. Κατά την εγκατάσταση έχουν δημιουργηθεί τεχνολογίες Solar tracking για την καλύτερη απόδοση του συστήματος, καθώς και διόδων παράκαμψης, για την αντιμετώπιση προβλημάτων μείωσης της αποδοτικότητας όλου του συστήματος λόγω σκίασης μερικών πάνελ είτε από σταθερούς παράγοντες (γειτονικά κτήρια, καμινάδες), είτε από μεταβλητούς παράγοντες (χιόνι, σκόνη).



Εικόνα 24:Σύνθεση φωτοβολταϊκού πάρκου [41]

Η χωροθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ επηρεάζει απόδοση του σταθμού. Εκτενής μελέτη πρέπει να γίνει για την επιλογή περιοχής, τον προσανατολισμό και την κλίση των πάνελ. Συγκεκριμένα η Ελλάδα ανήκει στο βόρειο ημισφαίριο, οπότε ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι προς τον Νότο. Εν συνεχεία πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη τοποθέτηση για την ελαχιστοποίηση της σκίασης μεταξύ συστοιχιών πάνελ. Τυχόν κλίσεις στο έδαφος πρέπει να αξιοποιηθούν για την εξάλειψη των σκιάσεων. Μελέτη χωροθέτησης, βάση βιβλιογραφίας γίνεται παρακάτω εκτενέστερα.

Οι αντιστροφείς είναι διατάξεις που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα στην έξοδο των συστοιχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ σε εναλασσόμενο ρεύμα κατάλληλο για το δίκτυο σύμφωνα με τους κανονισμούς. Οι αντιστροφείς είναι μονοφάσικη για εγκαταστάσεις μέχρι 5 kW και 3φασικοί για εγκαταστάσεις ως και 100kW . Για φωτοβολταϊκούς σταθμούς από 100kw και πάνω οι εγκαταστάσεις συνδέονται στην μέση τάση. Οι μετατροπείς διαθέτουν προστασία ενάντι διαρροής, σφαλμάτων γης, ορίων συχνότητας και τάσης,νησιδοποίησης, υπερέντασης και μείωσης της άεργου ισχύος σύμφωνα με τους κανονισμούς. Επιπλέον κάποιοι μετατροπείς διαθέτουν πολλαπλές εισόδους για την τοποθέτηση δύο η παραπάνω διαφορετικών διατάξεων από πάνελ.

Ανάλογα με την τεχνολογία διασύνδεσης οι αντιστροφείς χωρίζονται σε :

- Κεντρικούς αντιστροφείς
- Αντιστροφείς κλάδων
- Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων
- Μικροαντιστροφείς επί των φ/β πλασίων

Οι απώλειες στο μετατροπέα είναι μικρές. Οι σύγχρονοι μετατροπείς έχουν βαθμό απόδοσης 97-99% .Η τεχνολογία των μετατροπέων είναι ένα αρκετά εύρη αντικείμενο, στα πλαίσια της εργασία δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση του μετατροπέα καθώς οι απώλειες θα υπολογιστούν συνολικά ως ένα ποσοστό της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βάση βιβλιογραφίας.

Ωστόσο η επιλογή του σωστού μετατροπέα επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και ευστάθεια του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Είναι απαραίτητο για την σύνδεση με το διασυνδεδεμένο δίκτυο τόσο για μικρούς όσο και για μεγαλύτερους σταθμούς η κατάθεση

του μοντέλου του μετατροπέα και τον πιστοποιητικών που τον συνοδεύουν για την αδειοδότηση του σταθμού.

2.3.2 Φωτοβολταϊκή Παραγωγή στη Ελλάδα

Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος παγκοσμίως, με πρωτοπόρα χώρα την Κίνα. Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών πάρκων παγκόσμιος κατά κύριο λόγο γίνεται συγκεντρωμένα σε μεγάλες εκτάσεις εκτός αστικού ιστού. Η μεταφορά της ενέργειας διαχέεται στο δίκτυο μέσω δικτύου υπερύψηλης και υψηλής τάσης.

Στην Ελλάδα η ανάπτυξη της ηλεκτροπαραγωγής με φωτοβολταϊκά γίνεται κυρίως μέσω της ιδιωτικής πρωτοβουλίας με διεσπαρμένα έργα. Σήμερα το μεγαλύτερο φωτοβολταϊκό πάρκο βρίσκεται στην Κοζάνη, μεγέθους 204MW και ανήκει στην HellenicEnergy θυγατρική εταιρία των Ελληνικών Πετρελαίων Ελλάδος το αμέσως επόμενο έχει σχεδιαστεί και θα κατασκευαστεί στην Μεγαλόπολη, ισχύος 50MW και θα ανήκει στην εταιρία ΔΕΗ Ανανεώσιμες, θυγατρική της ΔΕΗ.

Το σχέδιο ανάπτυξης φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ελλάδα την προηγούμενη 10-ετία έδωσε κίνητρο σε μικρούς παραγωγούς να επενδύσουν στην κατασκευή μικρών πάρκων με υψηλή χρηματική αποζημίωση €/kWh που διαχέεται στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Επιπλέον δημιουργήθηκαν οι ενεργειακές κοινότητες, όπου αποτελούν οντότητες πολλών μικρών παραγωγών για την δημιουργία πάρκων μεγαλύτερης ισχύος. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την διεσπαρμένη ηλεκτροπαραγωγή μέσω πολλών μικρών και μεσαίων (σε ισχύ) φωτοβολταϊκών πάρκων.

Σήμερα τα φωτοβολταϊκά έργα από ιδιώτες εντάσσονται είτε σε προγράμματα επιδότησης με σκοπό την κάλυψη των ιδίων καταναλώσεων (ενεργειακός συμψηφισμός ή net metering) είτε εντάσσονται σε 20-ετη συμβόλαια χρηματικής αποζημίωση €/kWh με μικρότερη αποζημίωση (ταρίφα) από αυτήν που ισχύει το 2010-2014.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο στόχος για την ανάπτυξη της ηλεκτροπαραγωγής από φωτοβολταϊκά μέχρι το 2030 είναι ο υπερδιπλασιασμός της συνολικής εγκατεστημένης παραγωγικής ισχύος. Η αύξηση αυτή προβλέπεται να γίνει και από μεγάλα έργα υποδομής, αλλά και από διεσπαρμένη παραγωγή. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θα συμβάλουν σημαντικά σε αυτόν τον στόχο, καθώς και θα αυξήσουν το ποσοστό διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα (κυρίως σε περιοχές μη διασυνδεδεμένες), αλλά και θα δοθεί η δυνατότητα αποθήκευσής την παραπάνω ενέργειας, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση.

2.4 Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια ως ενεργειακή πηγή είναι συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή η ισχύς που τροφοδοτείτε από τα ηλιακά συστήματα είναι μεταβαλλόμενη και πιο συγκεκριμένα περιοδική. Επιπλέον η εξάρτηση της παραγωγής ενέργειας, από τα καιρικά φαινόμενα (συννεφιά, βροχή κ.α.) αυξάνει την στοχαστικότητα της ηλεκτροπαραγωγής. Η παροχή της ενέργειας προς του καταναλωτές πρέπει να είναι επαρκής και συνεχής ως ένα σύστημα παραγωγής-μεταφοράς ενέργειας να είναι ευσταθές.

Η αποθήκευση της ενέργειας και η παροχή της προς τους καταναλωτές όταν το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες, καθιστάτε αναγκαία για όλα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ΑΠΕ και κυρίως στα συστήματα ηλιακής ενέργειας, λόγω του εποχιακού και ενδοημερίσιου διακοπτόμενου χαρακτήρα της παραγωγής. Η αποθήκευση μπορεί να γίνει με πολλαπλούς τρόπους, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση των συστημάτων αποθήκευσης και διανομής ενέργειας και κυρίως συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Η αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας προσφέρει μια συνεχή ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης και την κατάλληλη ελαστικότητα για την μεγαλύτερη απορρόφηση συστημάτων ΑΠΕ. Σε πολλές περιπτώσεις η υπεδιαστασιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης έχει σκοπό την εποχιακή χρήση. Όπως παράδειγμα η ενεργειακή κοινότητα Drake Landing [28] στην περιοχή της Νότιας Καρολίνας όπου η παραγωγή του ζεστού νερού γίνεται το καλοκαίρι, αποθηκεύετε σε υπόγειες δεξαμενές και η κατανάλωση γίνεται τον χειμώνα ή κατά την διάρκεια νέφωσης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρει η αποθήκευση ενέργειας είναι :

- Η αδιάλειπτη παροχή της ενέργειας ανεξαρτήτως εξωτερικών παραγόντων.
- Η ρύθμιση τιμών μεταξύ προσφοράς και ζήτησης.
- Η διεύθυνση των ΑΠΕ σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο.
- Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης ενέργειας όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση.
- Η εποχική αποθήκευση.

**Με τον όρο εποχιακή αποθήκευση ορίζετε η παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας σε μια εποχή του χρόνου και η αξιοποίηση της, σε μια άλλη εποχή του χρόνου (π.χ. παραγωγή θερμικής ενέργειας το καλοκαίρι και αξιοποίηση της, τον χειμώνα. [28]*

Η αποθήκευση ανοιγμένης ενέργειας μπορεί να είναι ως θερμική ενέργεια (σε θερμοδοχεία) ως χημική ενέργεια (μπαταρίες), μηχανική ενέργεια (υψηλής αδράνειας περιστρεφόμενους ατράκτους), δυναμικής ενέργειας (υδροηλεκτρικά έργα), βιομάζα. Η επιλογή του αποθηκευτικού μέσου εξαρτάτε από τις εγκαταστάσεις παραγωγής, μεταφοράς και κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος.[6][13]

Το κύριο κριτήριο για τον ορθό σχεδιασμό του συστήματος αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας θα πρέπει να είναι η παροχή σταθερής ισχύος εξόδου προς τους καταναλωτές. Βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να επιλέγονται κατά τον σχεδιασμό είναι:

- Η ενεργειακή χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου.
- Το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας και ή θερμοκρασία αδρανείας.
- Η σταθερή ισχύς εξόδου.
- Η θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση.
- Το κόστος.

Ο ενεργειακός υπολογισμός γίνεται μέσω του ισοζυγίου ενέργειας:

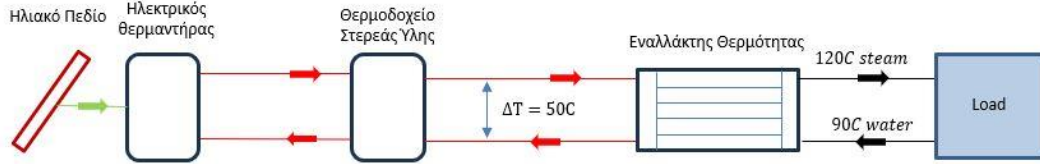
$$E_{storage} = E_{in} - E_{out} - E_{losses} \quad 2.10$$

Για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας το υπολογιζόμενο μέγεθος είναι η θερμότητα.

2.4.1 Συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας

Η έρευνα για την ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας μέσω θερμότητας έχει αναπτυχθεί πολύ και μέχρι το 2030 θα τριπλασιαστεί. Η έρευνα άφορα την δημιουργία υλικών και διατάξεων μεγάλης θερμοχωρητικότητας και σε θερμοδοχεία υψηλών θερμοκρασιών, την ανάπτυξη δικτύων για την πιο άμεση αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, την ανάπτυξη μεγαλύτερων και αποδοτικότερων θερμικών εναλλακτών, την ανάπτυξη συστημάτων για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση θερμικών και ψυκτικών φορτίων κ.α. Οι επένδυση σε συστήματα αποθήκευσης χαρακτηρίζεται από την γρήγορη περίοδο απόσβεσης, καθώς όχι μόνο αυξάνει το ποσοστό συμμετοχής ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, αλλά αποθηκεύεται μέρος της απορριπτόμενης ενέργειας στο ταμιευτήρα τις ώρες όπου η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. [6][13]

Στον τομέα των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών σταθμών, με την ανάπτυξη ταμιευτήρων αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας και ενέργειας ως μέσο αποθήκευσης για την ηλεκτροπαραγωγή, αυξήθηκε η ευστάθεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. Ο σχεδιασμός των ηλιοθερμικών σταθμών αξιοποιώντας θερμοδοχεία υψηλών θερμοκρασιών ως θερμοδοχείο (Buffer) μπορεί να γίνει αξιόπιστα για εφαρμογές με συνεχή καταναλώσεις υψηλής ανοιγμένης ισχύος. Η διάρθρωση του θερμικών σταθμών με μέσο αποθήκευσης γίνεται ως εξής, το πρωτεύον κύκλωμα θερμικά αγωγίμου ρευστού υψηλών θερμοκρασιών (molten salts) μεταφέρει θερμότητα από τον απορροφητή στον ταμιευτήρα μέσω εναλλάκτη θερμότητας. Εν συνεχεία σε δευτερεύον κύκλωμα η θερμότητα μεταφέρετε μέσω αγωγών σε δεύτερο εναλλάκτη για την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες των φορτίων(θερμοκρασία λειτουργείας, θερμική ισχύς). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του θερμικά αγωγίμου ρευστού είναι 200-400°C.[6][16]



Εικόνα 25: Διάγραμμα Case study

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται σε ηλιοθερμικά συστήματα όπου γίνεται μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα. Η θερμότητα μεταφέρετε μέσω αγωγού με εργαζόμενο ρευστό από τον απορροφητή στο θερμοδοχείο. Ο ενεργειακός υπολογισμός γίνεται υπολογίζοντας την εισερχόμενη και εξερχόμενη θερμορροή.

$$Q_{storage} = Q_{in} - Q_{out} - Q_{losses} \quad 2.11$$

Η απώλειες θερμότητας, σε αρχικό βαθμό αφορούν απώλειες δικτύου και απώλειες θερμοδοχείου και είναι ανάλογες με το πόσο της μεταφερόμενης και αποθηκευμένης θερμότητας. Τα κελύφη των θερμοδοχείων είναι σχεδιασμένα ώστε να έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής αντίστασης για την μείωση των θερμικών απωλειών . [6]

2.4.2 Μέθοδοι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Έχουν αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων για την αποθήκευση της θερμικής ενέργειας, οι κύριες μέθοδοι είναι η αποθήκευση σε ταμιευτήρες με υγρό ή στερεό μέσο αποθήκευσης. Η θερμική ενέργεια αξιοποιείται για την θέρμανση και ψύξη χώρων για βιομηχανικές εφαρμογές και ηλεκτροπαραγωγή, ανάλογα με την εφαρμογή, την περιοχή και τις εξωτερικές συνθήκες μπορεί να εφαρμοστεί διαφορετική μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας. Κύρια κριτήρια για την επιλογή μεθόδου και ταμιευτήρα είναι η θερμική ισχύς, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο χρόνος φόρτισης και αποφόρτισης του ταμιευτήρα κ.α. .

Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται κυρίως αυξάνοντας την αισθητή θερμοκρασίας στην μάζα του αποθηκευτικού υλικού. Έτσι η θερμότητα που αποθηκεύτε δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho V c_p dT \quad 2.12$$

Q : θερμότητα

ρ : πυκνότητα

V : όγκος

c_p : ειδική θερμότητα

dT : Διαφορά θερμοκρασίας

Η αποθήκευση της αισθητής θερμοκρασίας γίνεται σε υλικά στερεάς ή υγρής μορφής όπως (νερό, οργανικά λάδια, molten salts, τσιμέντο, πέτρες, άμμο κ.α.) για την επιλογή του υλικού σημαντικό ρόλο παίζει η ειδική θερμότητα, η αντοχή στην θερμοκρασία λειτουργίας, η πυκνότητα και το κόστος. Για θερμοκρασίες μέχρι 100°C το κύριο αποθηκευτικό μέσο είναι το νερό σε αναλογία με προπυλενογλυκόλη(C₃H₈O₂) , σε θερμοκρασίες άνω των 100 °C μέχρι 400-500 °C χρησιμοποιούνται οργανικά έλαια και molten salts ενώ πάνω από 400-500°C χρησιμοποιούνται μέσα στερεάς κατάστασης (Solid state thermal tanks).[6][13]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η θερμοφυσικές ιδιότητες υλικών αποθήκευσης ενέργειας :

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά θερμικά αγωγίων ρευστών.[16]

Μέσο Αποθήκευσης	Θερμοκρασια κό εύρος °C	Πυκνότητ α(ρ) , kg/m ³	Ειδική θερμότητ α °C, J/kgK	Ενεργειακή πυκνότητα (ρ°C) kWh/m ³ K	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Water	0-100	1000	4190	1.16	0.63 at 38°C
Water 10bar	0-180	881	4190	1.03	-
50-ethylene glycol-50-water	0-100	1075	3480	0.98	-
Dowtherm A® (Dow Chem. Co.)	12-260	867	2200	0.53	0.122 at 260°C
Therminol 66® (Monsanto Co.)	-9-343	750	2100	0.44	0.106 at 343°C
Draw salt(50NaNO ₃ -50KNO ₃) ^a	220-540	1733	1550	0.75	0.57
Molten salt (53KNO ₃ /40NaNO ₃ /7NaNO ₃) ^a	142-540	1680	1560	0.72	0.61
Liquid sodium	100-760	750	1260	0.26	67.5

Cast iron	m.p. 1150-1300C	7200	540	1.08	42.0
Taconite	-	3200	800	0.71	-
Aluminum	m.p.660	2700	920	0.69	200
Fireclay	-	2100-2600	1000	0.65	1.0-1.5
Rock	-	1600	880	0.39	-

Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας γίνεται επίσης μέσω της λανθάνουσας θερμότητας, πολλές εφαρμογές αποθήκευσης αξιοποιούν την διφασική περιοχή μεταξύ υγρής και αέριας κατάστασης της ύλης. Συνεπώς η συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται είναι :

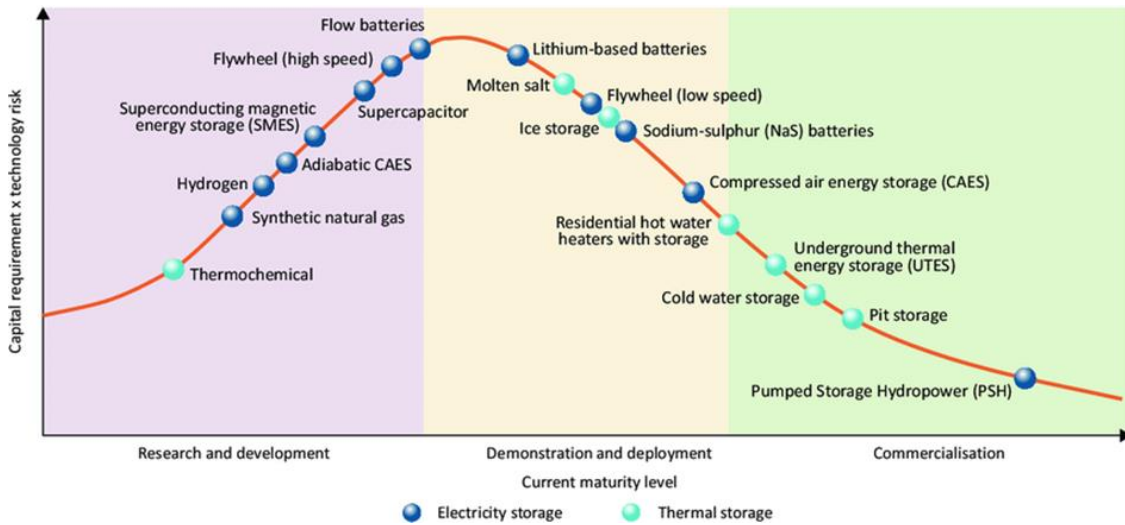
$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mc_p dT + m\lambda + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT \quad 2.13$$

Οπού λ η θερμότητα για την αλλαγή φάσης του υλικού.

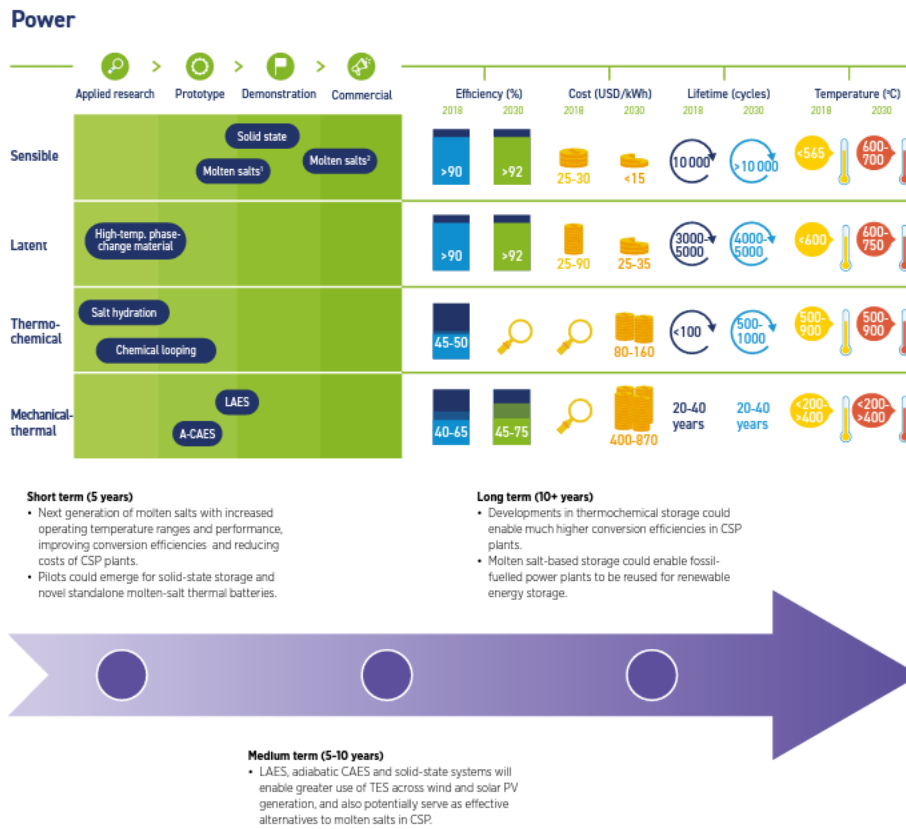
Πίνακας 7: Περιγραφή μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας[13]

Thermal (TES)		
UTES (ATES, BTES, Pit TES)	Aquifer thermal energy storage 30-40kWh/m ³ Borehole thermal energy storage 15-30kWh/m ³ Pit thermal energy storage 60-80kWh/m ³	Γεωθερμικές μέθοδοι: Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται υδροφόρους ταμιευτήρες και η αξιοποίηση της γίνεται μέσω αντλιών θερμότητας.
SSTES	Solid State thermal energy storage	Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται σε ταμιευτήρα στερεάς ύλης. Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται μέσω ρευστών-εργαζόμενων μέσων κατάλληλο σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας)
WTES	Water Tank energy storage	Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται σε ταμιευτήρα νερού.
Compress air Mechanical (TES)		

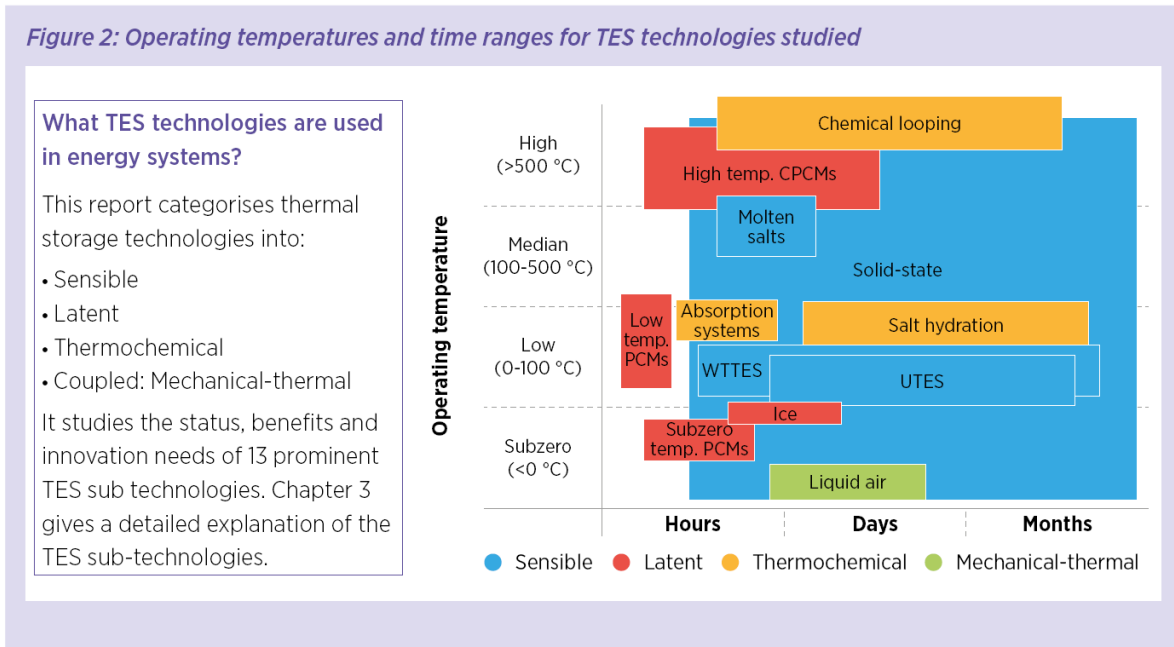
A-CAES, CAES	Adiabatic compressed air energy storage	Η αποθήκευση γίνεται σε υπόγειους ταμειυτήρες που λειτουργούν ως αεριοφυλάκια πεπιεσμένου αέρα. Η συμπίεση του αέρα γίνεται από συμπιεστή και με την εκτόνωση του παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτρια
LAES	Liquid air energy storage	Αφορά αποθήκευση υγροποιημένου αέρα σε ταμειυτήρα.
Thermochemical		
CaL	Calcium looping (chemical looping)	Αποθήκευση ενέργειας μέσω της χημικής διεργασίας $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$. Το προϊόν κατά την καύση παράγει υψηλές θερμοκρασίες
Salt hydration and dehydration		Κατά την ενυδάτωση και την αφυδάτωση μορίων αλατιού ζητείτε και παράγετε θερμότητα
Absorption systems	Αντλίες θερμότητας που μεταφέρουν θερμότητα από ψυχρούς σε θερμούς και από θερμούς σε ψυχρούς ανάλογα με τις ανάγκες	Σε χώρους με πολλαπλές χρήσεις, η απορριπτόμενη θερμότητα ενός χώρου καλύπτει τα φορτία κάποιου άλλου χώρου. Χρειάζεται να υπάρχουν απαιτήσεις και σε ψυχρά και σε θερμά φορτία



Εικόνα 26: Επίπεδο υλοποίησης τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας[13].



Εικόνα 27: Χαρακτηριστικά τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.[13]



Εικόνα 28 :Θερμοκρασίες λειτουργίας τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας[13]

2.4.3 Θερμικά αγωγή ρευστά

Τα εργαζόμενα ρευστά στο πρωτεύον και δευτερεύον κύκλωμα είναι υπεύθυνα για την μεταφορά θερμότητας προς και από τον ταμιευτήρα. Η σωστή επιλογή θερμικών αγωγίων ρευστών είναι σημαντική για την λειτουργικότητα και την απόδοση του συνολικού συστήματος.

Στις πιο απλές διατάξεις με επίπεδους συλλέκτες και θερμοκρασίες μέχρι 100⁰ ως εργαζόμενο μέσω χρησιμοποιείται το νερό σε συγκέντρωση με προπυλενογλυκόλη για αυξημένη ροή θερμότητας και μεγαλύτερη αντοχή σε ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες. Το παραπάνω μείγμα ρέει στο πρωτεύον κύκλωμα και μεταφέρει θερμότητα από τα επίπεδα κάτοπτρα στον ταμιευτήρα. Σε διατάξεις με συγκεντρωτικούς συλλέκτες και με υψηλότερες θερμοκρασίες οι ιδιότητες των θερμικών αγωγίων ρευστών είναι ανεβασμένες.

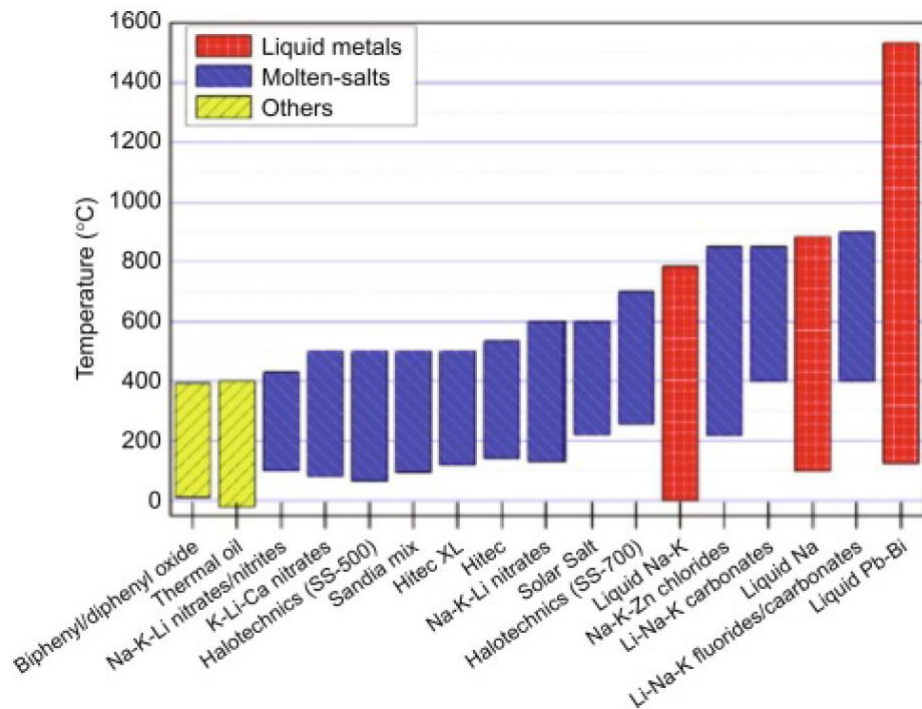
Οι ιδιότητες των αγωγίων ρευστών που λαμβάνονται υπόψιν για την επιλογή τους είναι, οι καλές συνθήκες ροής δηλαδή το χαμηλό δυναμικό ιξώδες, η υψηλή θερμοχωρητικότητα και η συμπεριφορά τους στο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Το νερό είναι φθινό και έχει καλή θερμοχωρητικότητα και χαμηλό ιξώδες, για αυτό χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών, όμως η θερμοκρασία λειτουργίας του είναι από 0 έως 100 βαθμούς Κελσίου. Για βιομηχανικές εφαρμογές σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες καθώς και στην ηλεκτροπαραγωγή, απαιτούνται θερμοκρασίες 250-1000 βαθμών Κελσίου. Molten-salts, Liquid metals καθώς και θερμικά αγωγή λάδια χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες.

Στην ηλεκτροπαραγωγή με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συγκεκριμένα σε εφαρμογές με ηλιακή ενέργεια, τόσο και την μεταφορά της θερμότητας, όσο και για την

αποθήκευση της θερμότητας σε ταμειυτήρες σε συγκεντρωτικά ηλιακά χρησιμοποιούνται molten salts. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες από κάποια θερμικά αγωγίμα ρευστά: [6][16]

Πίνακας 8:Χαρακτηριστικά θερμικά αγωγίμων ρευστών

HTF	Σημείο Τήξεως (C)	Θερμοκρασι ακό όριο (C)	Θερμοχωρητικό τητα (J/kgK)	Πυκνότητα (kg/m3)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
NaNO3 KNO3	220	600	1517	1817	0.49
Ca (NO3)2 NaNO3 KNO3	133	500	1447	1992	0.485
KNO3 NaNO2 NaNO3	142	535	1560	1640	0.483
Therminol 66	-3	345	1490-2780	770-1020	0.118-0.089
Water	0	100	4200	1000	0.6
50/50 Ethylene- Glycol + Water	-40	110	3300	1050	0.4
Ammonia	-70	10	4600	630	0.55
PAO Polyalphaolefi n (PAO)	-50	175	2200	800	0.55



Εικόνα 29: Μέγιστη θερμοκρασία θερμικά αγωγίμων ρευστών[19]

2.4.4 Σχεδιασμός Συστήματος Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας

Ο σχεδιασμός συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αφορά την επιλογή μεθόδου αποθήκευσης, υλικών, μεγέθους, δικτύων κ.α. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αναλυτικά:

2.4.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συστήματος αποθήκευσης

Συστήμα παραγωγής ενέργειας

Η επιλογή και διαστασιολόγηση ενός συστήματος αποθήκευσης εξαρτάτε σε μεγάλο βαθμό από το σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας και το 'καύσιμο' που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της. Συμβατικά συστήματα με καύση ορυκτών καυσίμων χρησιμοποιούν μικρούς έως και καθόλου ταμειυτήρες ενέργειας, καθώς η ροή της ενέργειας είναι συνεχής και σταθερή καλύπτοντας τα ζητούμενα φορτία. Αντιθέτως σε συστήματα ΑΠΕ η διασπορά της ροής της ενέργειας είναι μεγάλη με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνεται ασταθές όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Είναι σημαντικό κατά την διαστασιολόγηση να παρατηρούνται επαναληψιμότητες στην ισχύ της παραγόμενης ενέργειας ώστε να γίνεται πρόβλεψη της μελλοντικής παραγόμενης ισχύος.

Η αξιοποιήσιμη πηγή ΑΠΕ και η εφαρμογή που καλύπτει η παραγόμενη ενέργεια, καθορίζει το είδος του θερμικού ταμειυτήρα, όταν η αξιοποιήσιμη πηγή είναι η ηλιακή ενέργεια, το είδος του ηλιακού πεδίου καθορίζει τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα. Πιο

συγκεκριμένα η θερμοκρασία στο ταμειυτήρα, η ροή του θερμικά αγωγίμου ρευστού, το μέγεθος της ισχύος της εφαρμογής, καθορίζουν το υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, (για επίπεδους συλλέκτες και θερμοκρασίες μέχρι 100 °C το μέσο αποθήκευσης είναι το νερό, ενώ για παραβολικούς συγκεντρωτικούς συλλέκτες επιλέγονται molten salts ή σε υψηλότερες θερμοκρασίες Solid state θερμοδοχεία), το θερμικό αγωγή ρευστό, τις αντλίες και την υδραυλική εγκατάσταση καθώς και τους εναλλάκτες θερμότητας. Σημαντικό ανάλογα και με την εφαρμογή είναι η διαστασιολόγηση του ταμειυτήρα να γίνεται ώστε η ροή θερμικού φορτίου να είναι αδιάλειπτη για αρκετό χρονικό διάστημα. Επιπλέον ανάλογα με την επιλογή του συστήματος πρέπει να γίνει η κατάλληλη μόνωση στον ταμειυτήρα και στο δίκτυο. Τέλος σε ορισμένες εφαρμογές το ποσοστό της λανθάνουσας ενέργειας του υλικού που επιλέγετε ως αποθηκευτικό είναι καθοριστικό για την επιλογή.

Εφαρμογή

Η εφαρμογή και το προφίλ ενέργειας που εξυπηρετείτε από το σύστημα παραγωγής αποθήκευσης προσδιορίζει την ροή ισχύος, τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου στον εναλλάκτη θερμότητας και την επαναληψιμότητα φόρτισης και εκφόρτωσης του συστήματος. Σε εφαρμογές παραγωγής ζεστού νερού ή επιλογή νερού εξυπηρετεί και για την μεταφορά και για την αποθήκευσή της ενέργειας, όμως για βιομηχανικές εφαρμογές υπέρθερμου ατμού και ηλεκτροπαραγωγή, η χρήση άλλων υλικών όπως αναφέρετε παραπάνω. Στην βιβλιογραφία επισυνάπτονται ερευνητικές εφαρμογές για την ανάπτυξη υλικών με σκοπό την βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας.

Άλλοι περιοριστικοί παράγοντες

Εξωγενής περιοριστικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τις αποφάσεις για τον σχεδιασμό του συστήματος, όπως ο περιορισμός του χώρου, το κόστος, η ευστάθεια του συστήματος, η πολυπλοκότητα και η έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού για την διαχείριση και την συντήρηση του, η επιλογή των υλικών και η επικινδυνότητα σε περίπτωση διαρροών κ.α. . Ενδογενής περιορισμοί στο κύκλωμα παρουσιάζουν η αλλαγές στην συμπεριφορά των ρευστών κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και γήρανσης.

2.4.4.2 Ανάλυση παρελκόμενων στοιχείων συστήματος

Εκτός από την επιλογή των ηλιακών συλλεκτών ή κάτοπτρων και του θερμοδοχείου, σε επόμενο στάδιο γίνεται διαστασιολόγηση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος υδραυλικού δίκτυο του θερμικά αγωγίμου ρευστού. Η διαστασιολόγηση αφορά την επιλογή του υλικού και τις διαμέτρους των σωληνώσεων, την επιλογή βαλβίδων ασφαλείας και ρυθμιστικών βαλβίδων και τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε κάθε δίκτυο. Εν συνεχεία γίνεται η επιλογή κυκλοφορητών βάση της πτώσης πίεσης και της μέγιστης ροής του θερμικά αγωγίμου ρευστού. Τέλος Η σωστή επιλογή του είδους των εναλλακτών θερμότητας και του μεγέθους, εξασφαλίζει την σωστή ροή θερμότητας και την εξάλειψη των αλλαγών φάσεως του ρευστού. Στην παρούσα εργασία η επιλογή του δικτύου δεν

λαμβάνεται υπόψιν και οι ιδιοκαταναλώσεις των αντλιών θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με την μεταφορά του θερμικού φορτίου.

2.5 Οικονομικοί και ενεργειακοί δείκτες

Η ανάπτυξη συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας αποτελούν την πιο φιλική προς τον περιβάλλον και πιο φθηνή σε μεταβλητό κόστος ενέργεια. Η επένδυση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, περιορίζοντας την κλιματική αλλαγή, μειώνοντας την καύση ορυκτών καυσίμων και περιορίζοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κ.α. Παράλληλα όμως μειώνει την τιμή της ενέργειας, τα παραδείγματα στην χώρα μας είναι πολλά, όπου όταν όλο το φορτίο καλυπτόταν από ΑΠΕ η τιμή της ενέργειας ήταν σχεδόν μηδενική. [16]

Η επένδυση στις τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ, όπως αναφέρετε και στην εισαγωγή γίνεται κυρίως από τον ιδιωτικό τομέα, συνεπώς οικονομικοί δείκτες για την αξιολόγηση της επένδυσης με κριτήριο το κέρδος καθορίζουν την καταλληλότητα της επένδυσης στις περισσότερες τον περιπτώσεων. Ωστόσο σημαντική είναι και η προσπάθεια κρατών να προωθήσουν την περαιτέρω επένδυση στις ΑΠΕ με κίνητρα που αφορούν τόσο την επιδότηση της εγκατάστασης, όσο και την εξασφάλιση κατώτατου βαθμού απόδοσης της αρχικής επένδυσης ως προς τους επενδυτές. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Το πλαίσιο ανάλυσης της απόδοσης μιας επένδυσης περιλαμβάνει τα κόστη της επένδυσης και πιο συγκεκριμένα το αρχικό κόστος επένδυσης και το κόστος ανά χρόνο που χρειάζεται για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Τέτοια κόστη αφορούν

- Το αρχικό κόστος επένδυσης
- Κόστη λειτουργίας
- Κόστη συντήρησης, ασφάλειας και τυχόν βελτιώσεων
- Φόροι κ.α.

Τα παραπάνω κόστη αφορούν το αρνητικό ισοζύγιο στην εξίσωση για την απόδοση του συστήματος. Αντίθετα στο θετικό ισοζύγιο βρίσκονται τα κέρδη που αφορούν την πώληση ή αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Σε περίπτωση αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας ως κέρδος θεωρείται το ποσοτικοποιημένο χρηματικό αντίτιμο που εξοικονομείτε. Επιπλέον καθοριστικός παράγοντας είναι και η περίοδος αποπληρωμής, όταν δηλαδή το συνολικό ισοζύγιο είναι θετικό. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζονται δείκτες όπως η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) το LCOE (Levelized Cost Of Energy), IRR (Internal rate of return), Payback Time [21]

Για τον υπολογισμό των παραπάνω οικονομικών δεικτών στο case study λαμβάνονται δεδομένα για την προμήθεια των υλικών και την εγκατάσταση των συστημάτων από [23]

Καθαρή παρούσα αξία

Η καθαρή παρούσα αξία προσεγγίζει το άθροισμα των παρουσών αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου.

$$ΚΠΑ = \frac{R_t}{(1+i)^t} - K_0 \quad 2.14$$

ΚΠΑ: Καθαρή παρούσα αξία

R_t: Χρηματοροή την χρονική στιγμή t (κέρδος- πάγια έξοδα (συντήρηση κλπ.)

i: Επιτόκιο

t: Χρόνος σε έτη

K₀: Κόστος αρχικής επένδυσης

Η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται συνάρτηση κάποιου χρονικού ορίζοντα επένδυσης και αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης της επένδυσης. Αν κατά το χρονικό διάστημα ΚΠΑ>0 η επένδυση γίνεται αποδεκτή, αν ΚΠΑ=0 Η επένδυση θεωρείται οριακή και η απόφαση λαμβάνεται από άλλους παράγοντες και αν ΚΠΑ<0 η επένδυση δεν γίνεται αποδεκτή.

LCOH (Levelized Cost of Heat) Σταθμισμένο κόστος θερμότητας.

Ο όρος LCOE υπολογίζει το μέση τιμή της παραγόμενης θερμικής ενέργειας (€/MWh) για μία χρονική περίοδο. Το LCOH είναι το κλάσμα συνολικού κόστους με τις συνολικές παραγόμενες MWh. Ο χρονικός ορίζοντας υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι σταθερός και αφορά τον χρόνο ζωής της εγκατάστασης.

$$LCOH(t) = \frac{Total\ Cost(t)}{Electricity\ Generation\ (t)} \quad 2.15$$

LCOH: Levelized Cost of heat

t: χρονικό διάστημα (Χρόνος ζωής εγκατάστασης)

Electricity generation: Παραγόμενη ενέργεια

Total Cost: Investment Cost + Operation and maintenance cost+ fuel expenditure

Ο παραπάνω δείκτης είναι χρήσιμος για την σύγκριση ενεργειακών projects καθώς καθορίζει πιο είναι πιο ανταγωνιστικό.

Εσωτερικός Βαθμός απόδοσης- Internal Rate of Return (IRR)

Ο όρος IRR είναι οικονομικός δείκτης για την πρόβλεψη της κερδοφορίας και την μακροχρόνια απόδοση μιας επένδυσης και χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό του CAPEX μιας επένδυσης. Με τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης, εξισώνεται η παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών πλέον της τελικής αγοραίας αξίας με την τρέχουσα αγοραία αξία της επένδυσης.

$$ΚΠΑ = \frac{R_t}{(1+i)^t} - K_0 = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \quad 2.16$$

C_t = Χρηματοροές σε χρονικό διάστημα t

IRR : Εσωτερικός βαθμός απόδοσης

t : Χρονικό διάστημα

Payback Time [21]

Με τον όρο Payback time ή Payback period ορίζεται το χρονικό διάστημα (σε χρόνια) το οποίο αποσβένεται η αρχική επένδυση , δηλαδή η καθαρή παρούσα αξία είναι μηδέν.

Συντελεστής Χρησιμοποίησης-Capacity Utilization factor[21]

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης εκφράζει το ποσοστό αξιοποίησης ενέργειας μιας εγκατάστασης με συγκεκριμένη εγκατεστημένη ισχύ . Ο υπολογισμός του συντελεστή γίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$CUF = \frac{E_{gen}}{P_{installed} \cdot 8760}$$

Συνολικός προϋπολογισμός έργου-CAPEX[21]

Η αρχική προσέγγιση του κόστους επένδυσης για την δημιουργία ηλιακού σταθμού ενέργειας είναι σύνθετος παράγοντας που εξαρτάτε από πληθώρα μεταβλητών. Η περιοχή, ο πληθωρισμός, το μέγεθος του σταθμού, η μεταφορά των υλικών, η εργασία και τεχνική μελέτη είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τόσο το ύψος της αρχικής επένδυσης όσο και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Το αρχικό κόστος επένδυσης έχει μειωθεί πολύ τις τελευταίες δεκαετίες. Πλέον η εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού σταθμού λόγω της ραγδαίας μείωσης του κόστους εγκατάστασης πάνω από 82,94% (μέσος όρος από 5124\$/kW σε 874\$/kW*) την τελευταία δεκαετία θεωρείται η πιο ανταγωνιστική τεχνολογία παρόλο του χαμηλού Capacity factor.

Αντίστοιχα υπάρχει μείωση και στο κόστος των συγκεντρωτικών θερμικών ηλιακών 50%(μέσος όρος από 10082\$/kW σε 4274\$/kW**).[10] Λόγω του υψηλού κόστους ανά εγκατεστημένου kW τα υλοποιήσιμα έργα αφορούν μεγαλύτερης ισχύος σταθμούς.

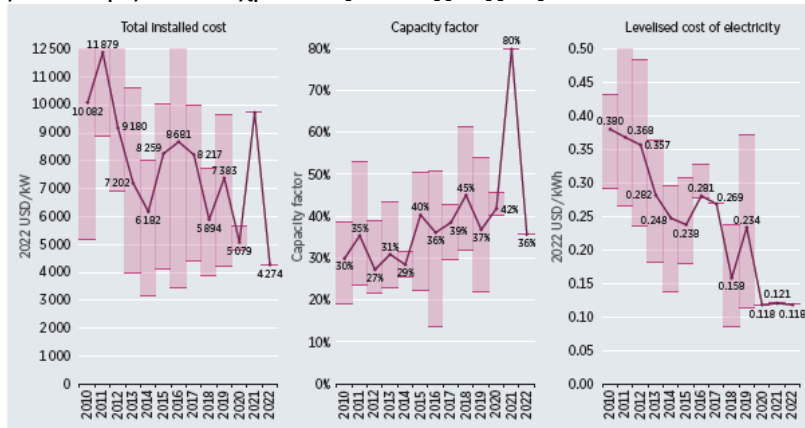
*Το κόστος αφορά στην εγκατάσταση 1 MW

** Η διασπορά των τιμών στο διάγραμμα είναι μεγάλη καθώς το πλήθος των έργων που πραγματοποιούνται είναι μικρό.

Παραβολικά Ηλιακά Συστήματα

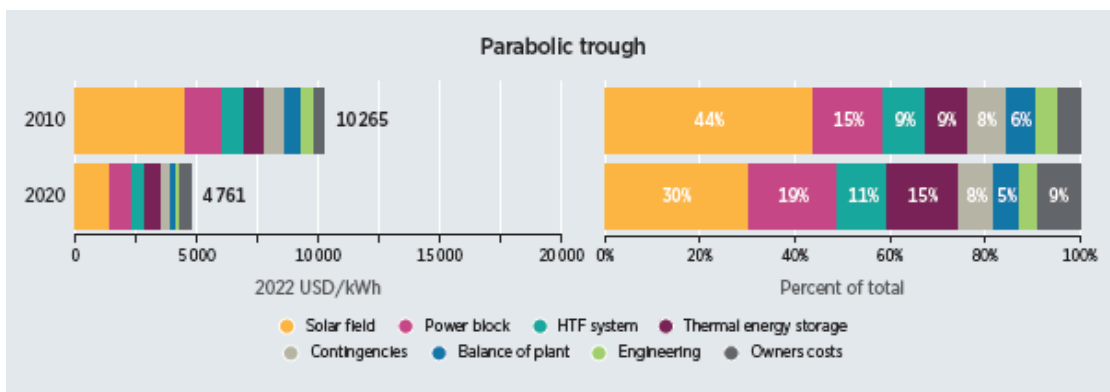
Από το 2010 μέχρι το 2022, έχει μειωθεί το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης ενός συγκεντρωτικού θερμικού ηλιακού σταθμού και έχει αυξηθεί η

συντελεστής ισχύος, μειώνοντας το κόστος παραγωγής ενέργειας σε όλη την διάρκεια ζωής του παραβολικού ηλιακού κατά μέσο όρο 68%(0,389\$/kWh σε 0,118\$/kWh). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι διακυμάνσεις του κόστους εγκατάστασης ηλιοθερμικών σταθμών, ο συντελεστής ισχύος και το LCOE (Σταθμισμένο κόστος ενέργειας). Ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης υπολογίζεται 25 χρόνια. [IRENA][10][11]



Εικόνα 30: Μέσο κόστος εγκατάστασης ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικούς συλλέκτες- Capacity factor- LCOE source IRENA database[11]

Στην μελέτη του πρακτορείου IRENA φαίνεται και η αναλογία του κόστους σε κάθε στάδιο της εγκατάστασης. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών στους παραβολικούς συλλέκτες και στον συγκεντρωτή, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους προμήθειας και εγκατάστασης του ηλιακού πεδίου (από 4209 \$/kW και 44% του συνολικού ποσού σε 1282,2\$/kW κατά μέσο όρο). Σημαντική μείωση στο κόστος γίνεται και στο δίκτυο με το θερμικά αγωγίμο ρευστό, Σταθμό αποθήκευσης ενέργειας και σταθμό παραγωγής ενέργειας όπου ενώ ποσοστιαία φαίνεται να λαμβάνουν μεγαλύτερο μερίδιο του κόστους, σε απόλυτα νούμερα είναι μικρότερα.



Εικόνα 31: Ανάλυση κόστους ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικούς συλλέκτες, τα έτη 2010 και 2020 source IRENA database[11]

Ο υπολογισμός του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (O&M) αφορά τα κόστη ασφάλισης και διαχείρισης, το κόστος συντήρησης και τυχόν διακοπών στην παραγωγή και

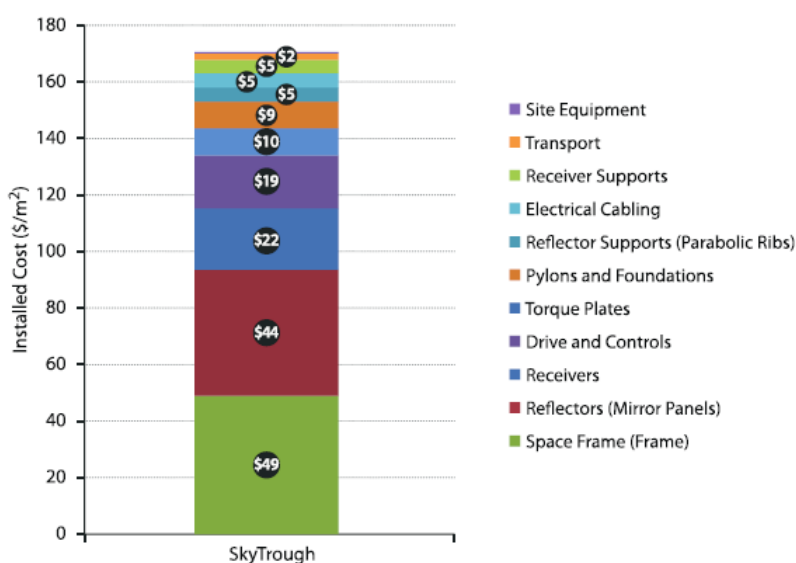
εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως η περιοχή και οι κλιματολογικές συνθήκες. Δεδομένα από εν λειτουργία σταθμούς, συνοψίζουν τα σημαντικά κόστη σε αντικατάσταση καθρεπτών και δεκτών, συντήρηση δικτύου και μηχανολογικών εγκαταστάσεων (καθαρισμός καθρεπτών, ευθυγράμμιση, συντήρηση θερμοδοχείου κλπ.). Επίσης σταθερό κόστος είναι τα έξοδα ασφάλισής . Ένα τυπικό εύρος είναι 0,5% με 1 % της αρχικής επένδυσης ή (0,019-0,028 \$/kWh) για ετήσια έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης συμμετέχουν και επηρεάζουν το σταθμισμένο κόστος της ενέργειας LCOE.

Πίνακας 9: Case study parabolic through plants [20]

Breakdown of Investment Cost of A 50MW A Parabolic Power Plant	Cost(2010 USD million)	Share%
Labour cost: Site and solar field	62.4	17.1
Solar field	11.3	3.1
Site preparation and Infrastructure	21.2	5.8
Steel Construction	9.1	2.5
Piping	6.4	1.8
Electric installations and others	14.4	4.0
Equipment: Solar field, HTF and system	140.3	38.5
Mirrors & Receivers	49	13.5
Steel Construction& Pylons	42.9	11.8
Foundations	7.8	2.1
Trackers (hydraulics and electrical motors)	1.6	0.4
Swivel joints	2.6	0.7
HTF System (piping, insulation, heat exchanges, pumps)	19.5	5.4
Heat transfer fluid	7.8	2.1
Electronics, controls, electrical and solar equipment	9.1	2.5
Thermal storage system	38.4	10.5
Salt	18.6	5.1
Storage tanks & Insulation Materials	7.3	2
Foundations	2.3	0.6
Heat Exchanges	5.1	1.4
Pumps	1.6	0.4
Balance of system	3.5	1.0
Conventional plant components and plant system	52.0	14.3
Power block	20.8	5.7
Balance of plant	20.7	5.7
Grid Connection	10.5	2.9
Others	71.0	19.5

Project development	10.5	2.9
Project management (EPC)	28.1	7.7
Financing	21.8	6.0
Other costs (allowances)	10.5	2.9
Total cost	364	100

Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει την οικονομική ανάλυση του εργαστηρίου NREL για την παραγωγή, συναρμολόγηση, εγκατάσταση και κατασκευή παραβολικού ηλιοθερμικού σταθμού 100 MWe με δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Το έργο ονομάζεται 1500SCA. Η τιμή είναι ορισμένες ανά τετραγωνικό παραγωγής.

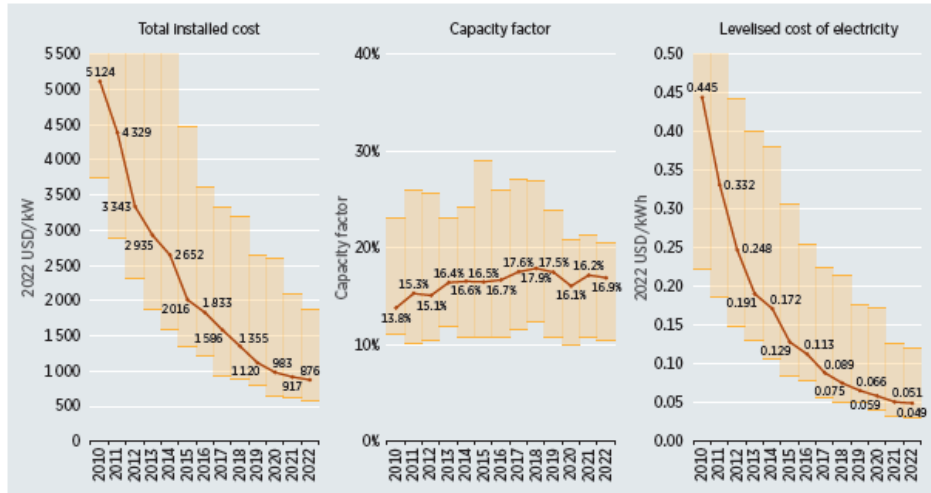


Εικόνα 32: Ανάλυση κόστους ανά m² για την εγκατάσταση ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικούς συλλέκτες Πηγή NREL

Φωτοβολταϊκά Συστήματα:

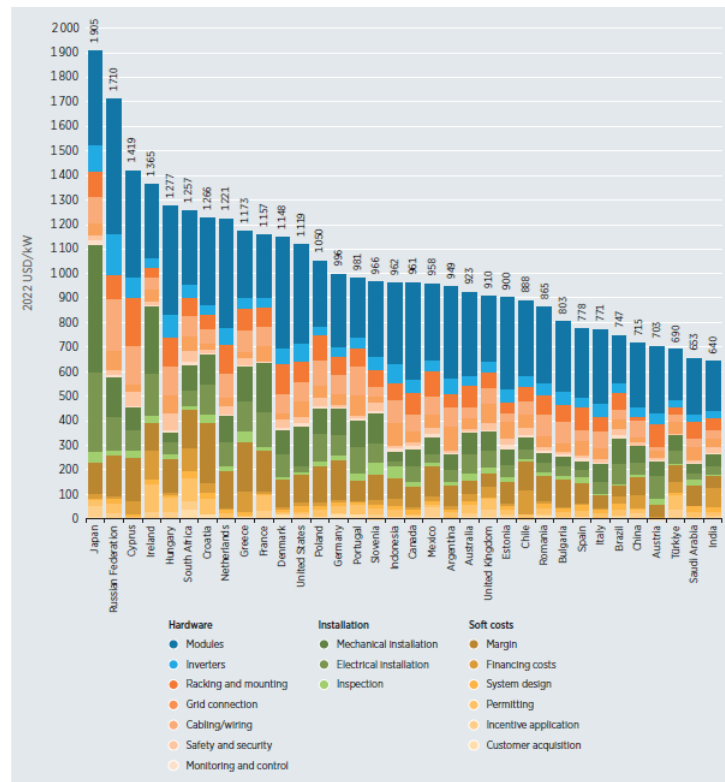
Η ανάπτυξη γύρω από την παραγωγή ενέργειας με φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια καθιστώντας την επιλογή φωτοβολταϊκών σταθμών ενέργειας για μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας έργα την πιο ανταγωνιστική επιλογή. Ένα βασικό πλεονέκτημα του είναι η άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπου είναι εύκολα και άμεσα αξιοποίηση πηγή ενέργειας. Επιπλέον η αύξηση της τιμής εγκατάστασης ανά kW δεν αυξάνεται πολύ σε μικρής και μεσαίας κλίμακας έργα.

Από το 2009 μέχρι το 2021 η μείωση των τιμών στις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών πάνελ από 88-95% και η μικρή αύξηση του συντελεστή ισχύος κατά 120% περίπου, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας κατά 88% (0,417\$/kWh σε 0,049\$/kWh)[10][11]



Εικόνα 33: Μέσο κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού- Capacity factor- LCOE source IRENA database[11]

Παρόλο την σημαντική μείωσή του κόστους συνολικά στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, το κόστος του αντιστροφέα και της εξισορρόπησης του συστήματος παραμένει σημαντικό ποσοστό της συνολικής επένδυσης και διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Αναλυτικότερα το κόστος του αντιστροφέα έχει μειωθεί 61% ενώ τα κόστη εγκατάστασης, χωροθέτησης και εξισορρόπησης του συστήματος έχουν μειωθεί 7%, 3% και 16% αντίστοιχα. Το παρακάτω διάγραμμα αναλύει το κόστος της επένδυσης ανά κατηγορία και ανά χώρα για το έτος 2021.



Εικόνα 34: Κόστος επένδυσης εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού ανά χώρα το έτος 2021 source IRENA database[11]

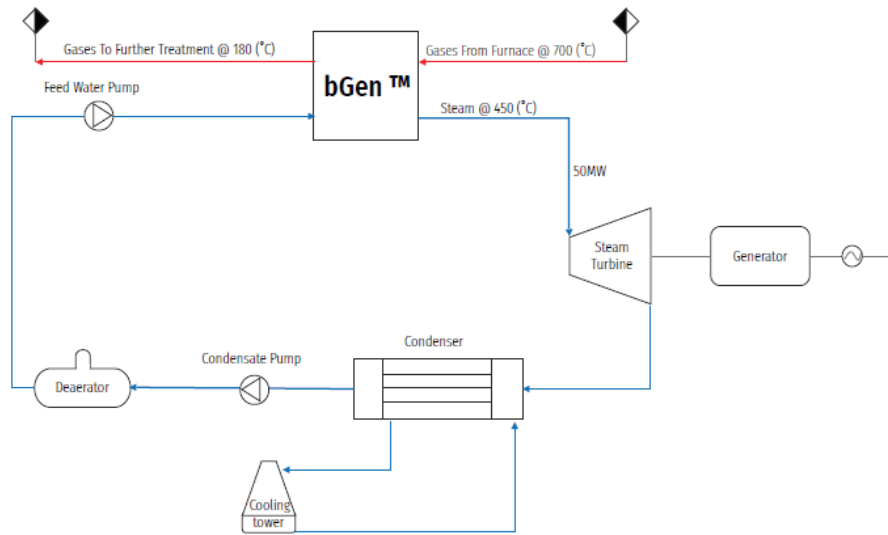
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης ενός Φωτοβολταϊκού σταθμού είναι ανάλογα του μεγέθους της εγκατάστασης σε τετραγωνικά και εγκατεστημένη ισχύς. Με την ανάπτυξη τεχνολογιών αυτοματισμού και παρακολούθησης το κόστος έχει μειωθεί.

Στις Η.Π.Α το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης έχουν μειωθεί 58% από 29\$/kW/year το 2011 σε 12\$/kW/year το 2020. Στην Ευρώπη υπάρχουν αναφορές όπου το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται σε 10\$/kW/year[10][11]

Παράδειγμα Case Study Solid State Thermal Storage [1]

Σύμφωνα με case study της εταιρείας bGen™ Bren miller Energy Industrial Waste Heat για ανάκτηση θερμότητας σε θερμοδοχείο στέρεας κατάστασης και υψηλών θερμοκρασιών, σε βιομηχανία Σίδηρου και Ατσάλιου. Φούρνος με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και θερμικές απώλειες >50% συνδέεται σε σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με ατμό. Στο παρακάτω διάγραμμα το θερμοδοχείο στέρεας κατάστασης λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ της απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας από τον φούρνο και του κυκλώματος παραγωγής ισχύος με ατμό.



Εικόνα 35:Σχεδιάγραμμα Case study [1]

Μέγεθος εγκατάστασης

Ανάκτηση θερμότητας [MWt/h]	85,5
Ισχύς τουρμπίνας παραγωγής ατμού [MW]	50
Απόδοση Τουρμπίνας %	40
Μέγεθος θερμικής Αποθήκευσης [Mwh]	750
Συνολική απόδοση συστήματος %	35,7
Ετήσια παραγωγή ενέργειας [Mwh]	267.500

Δεδομένα της παραπάνω εγκατάστασης X1000

Ετήσια Ανάκτηση ενέργειας [Mwh]	267,500
Μέση τιμή KW(cent)	5,46
Ετήσια απόσβεση ηλεκτρικής ενέργειας \$	11.730
Σύστημα TTES και Παραγωγής Ισχύος \$	52.500
Υποδομές και κατασκευή	3.500
EPC	10%
Σύνολο	61.600
OPEX (annual)	2.875
ROI (year)	5,25

3. Περιγραφή Μεθοδολογίας και Case Study

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για δύο συστήματα παραγωγής αποθήκευσης ενέργειας, με φωτοβολταϊκούς και παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Η ανάπτυξη των μοντέλων γίνεται για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμικής ενέργειας και την τεχνοοικονομική σύγκριση των δύο συστημάτων. Το θεωρητικό υπόβαθρο και οι θερμοδυναμικές εξισώσεις που περιέχονται στο μοντέλο αναλύονται στα παραπάνω κεφάλαια.

3.1 Ανάλυση συστημάτων

Η μελέτη του Case study περιλαμβάνει δύο συστήματα παραγωγής-αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας και η θερμικές αποδόσεις των θερμικών μηχανών είναι πεδίο που δεν περιλαμβάνεται στην παρούσα εργασία και αντικείμενο για μελλοντική έρευνα.

3.1.1 Εισερχόμενη ενέργεια

Η εισερχόμενη ενέργεια στα δύο συστήματα (με φωτοβολταϊκούς, και παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες) είναι η ηλιακή ενέργεια. Ο υπολογισμός της ποσότητας της ηλιακής ενέργειας γίνεται με αντίστοιχο εργαλείο υπολογισμού από την ιστοσελίδα Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), επίσημη ιστοσελίδα της ευρωπαϊκής ένωσης για τον υπολογισμό ηλιακής ακτινοβολίας και φωτοβολταϊκής ισχύος ανά εγκατεστημένη ισχύ Peak.

Η επιλογή τόσο των φωτοβολταϊκών πάνελ όσο και τον ηλιοθερμικών συλλεκτών έγινε από τεχνολογίες όπου κυκλοφορούν στο εμπόριο για την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

Φωτοβολταϊκά πάνελ [18]

Η επιλογή των πάνελ έγινε από το κατασκευαστή LUXOR, και αφορά μονοκρυσταλλικά πάνελ 650-670Watt peak. Οι διαστάσεις των πάνελ είναι 1303mm X 2384mm για 670W_{peak}. Η πυκνότητα της ισχύος σε 215,43Watt/m². Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο σχετικό έντυπο που βρίσκεται στο παράρτημα. Η επιλογή power optimizer, inverter καθώς και άλλων παρελκόμενων της εγκατάστασης περιλαμβάνονται στον οικονομικό υπολογισμό. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική μέσω κατάλληλα διαστασιολογημένης αντίστασης με απόδοσης 100% και θερμαίνει το θερμικά αγωγίμο ρευστό, που λειτουργεί ως εργαζόμενο μέσο, μεταφέροντας την θερμική ενέργεια στο θερμοδοχείο και στις θερμικές καταναλώσεις.

Παραβολικό ηλιοθερμικό σύστημα[27]

Η επιλογή των παραβολικών συλλεκτών (συγκεντρωτικοί καθρέπτες) καθώς και συλλέκτη είναι το σύστημα Soltigua PTMx της εταιρείας Soltigua. Το σύστημα είναι κατάλληλο για παραγωγή θερμικής ενέργειας για Solar Cooling, παραγωγή θερμικής ενέργειας για βιομηχανικές διεργασίες και παροχή θερμικής ενέργειας σε θερμικό κύκλο ισχύος για ηλεκτροπαραγωγή. Η αντοχή του συστήματος αγγίζει θερμοκρασίες ως 400C και πιέσεις μεγαλύτερες από 10 bar.

Η επιλογή της περιοχής εγκατάστασης του σταθμού παραγωγής-αποθήκευσης ενέργειας είναι κοινή και για τις δύο τεχνολογίες, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Συγκεκριμένα επιλέγεται το Μη διασυνδεδεμένο Νησί του Αγίου Ευστρατίου, και η θέση ΑΠΕ όπως αυτή προσεγγίζεται από την παρακάτω φωτογραφία της παρουσίασης του πιλοτικού έργου.



Εικόνα 36: Επιλογή θέσης πεδίου παραγωγής ενέργειας [40]

Για το φωτοβολταϊκό σύστημα ο υπολογισμός της αξιοποιήσιμης ενέργειας έγινε από το εργαλείο PVGIS ορίζοντας της παρακάτω αρχικές συνθήκες :

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| Selected coordinates | Γεωγραφικό πλάτος 39.532 |
| | Γεωγραφικό μήκος 25.011 |
| Solar radiation database | PVGIS-SARAH2 |
| PV technology | |

Installed peak PV power [kWp]	Παραμετροποιήσιμο μέγεθος
System loss	14%
Mounting position	Optimize slope and azimuth

Για το σύστημα με τα παραβολικά ηλιακά πάρθηκαν δεδομένα της άμεσης ακτινοβολίας από το 2005 μέχρι το 2020 ώστε με τον μέσο όρο να βρεθεί ένα πιο ασφαλές αποτέλεσμα. Οι υπολογισμοί έγιναν χρησιμοποιώντας μόνο την άμεση ακτινοβολία DNI. Ο βαθμός απόδοσης των συλλεκτών των παραβολικών ηλιακών υπολογίζεται όπως αναφέρετε και παραπάνω από τον τύπο [2]

3.1.2 Χωροθέτηση Συλλεκτών

Η χωροθέτηση τόσο του ηλιοθερμικού σταθμού παραγωγής όσο και του Φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής, γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς ασφαλείας και την μεγιστοποίηση της απόδοσης. Για επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης του σταθμού παραγωγής ενέργειας επιλέγεται έκταση σε μη διασυνδεδεμένο νησί (Άγιος Ευστράτιος) με συντεταγμένες [39.532 , 25.011]. Στην συγκεκριμένη περιοχή πραγματοποιείται το έργο “Άγιος Ευστράτιος Πράσινο Νησί”.

Από τα όρια του οικοπέδο η εγκατάσταση των συλλεκτών τοποθετείτε τουλάχιστον μισό μέτρο εσωτερικά από κάθε πλευρά για ασφάλεια και πρόσβαση στους συλλέκτες. Συνεπώς αν παράδειγμα η συνολική επιφάνεια ήταν $50 \times 20 = 1000 \text{m}^2$, η επιφάνεια τοποθέτησης των συλλεκτών θα είναι $49 \times 19 = 931 \text{m}^2$. Επί πρόσθετα σημαντική είναι και η χωροθέτηση των συλλεκτών με τέτοιων τρόπο ώστε οι πίσω σειρές να μην σκιάζονται από τις μπροστινές για μεγάλο διάστημα της μέρας. Η αύξηση της απόστασης μεταξύ των σειρών είναι μια πρώτη λύση, έχει ως συνέπεια την μείωση της ωφέλιμης επιφάνειας. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι, η απόσταση μεταξύ των σειρών να είναι διπλάσια του ύψους των συλλεκτών όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Η ποσότητα της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης. Ένας πιο αναλυτικός υπολογισμός της απόστασης μεταξύ των σειρών γίνεται μέσω του διαγράμματος 3.1 ή του τύπου:

$$D = L(\cos(\text{tilt}) + (\sin(\text{tilt}) * \tan(\text{lat} + 23.5 + 50\% \text{ of elevation}))) \quad 3.1$$

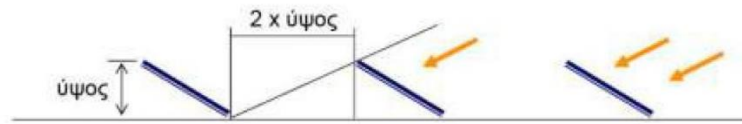
L: μήκος του πάνελ

tilt: γωνία πάνελ

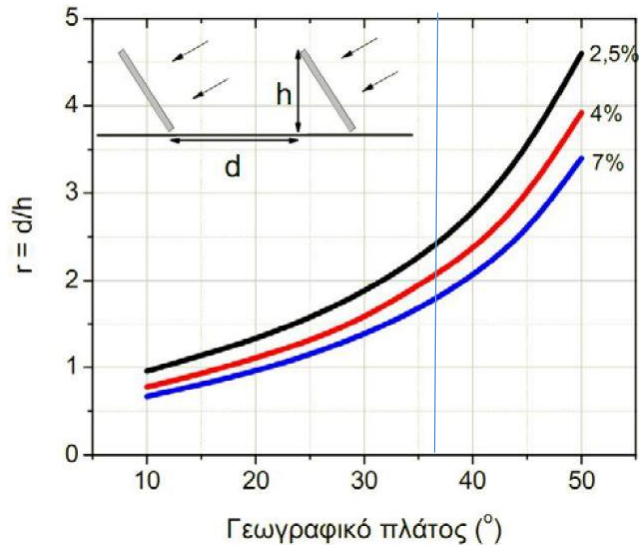
lat: Γεωγραφικό πλάτος εγκατάστασης

elevation: Ύψος της βάσης του πάνελ

*Πηγή Arizona Solar Center



Εικόνα 3: Πρόταση χωροθέτησης σειρών συλλεκτών Πηγή ΤΕΕ



Εικόνα 37: Απώλειες ισχύος λόγω σκίασης μεταξύ σειρών συλλεκτών [44]

3.1.3 Εγκατάσταση μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας

Περιγραφή

Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με σωληνώσεις κατάλληλης διατομής που διαρρέονται από θερμικά αγωγίμο ρευστό (Heat transfer fluid) υψηλών θερμοκρασιών. Στο case study του παραδείγματος το θερμικά αγωγίμο ρευστό θεωρείται ότι είναι στην κατηγορία των molten salts. Το υδραυλικό κύκλωμα καταλήγει σε Θερμοδοχείο στέρεας μορφής και υψηλών θερμοκρασιών. Η υδραυλική επίλυση (διατομή σωληνώσεων, επιλογή αντλιών- κυκλοφορητών- ηλεκτροβάνες και βαλβίδες), δεν υπολογίζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στις παραδοχές που αναγράφονται παρακάτω έχει οριστεί συντελεστής αυτοκατανάλωσης ενέργειας συστήματος.

Η επιλογή του Θερμοδοχείου στερεάς κατάστασης γίνεται λαμβάνοντας δεδομένα από δύο εταιρίες την bGen™ και την Rondo. Το θερμοδοχείο που επιλέγεται είναι παραμετροποιήσιμο βάση του όγκου του. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι:

Υλικό :	Πέτρα, τσιμέντο, Χαλκός, Πολυκαρβονικά υλικά
Θερμοχωρητικότητα C(kJ/kgK)	1,62
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	2-4
Πυκνότητα(kg/m ³)	2100
Διαφορά θερμοκρασίας με το εξωτερικό περιβάλλον (C)	350

Στο θερμοδοχείο είναι εγκατεστημένο δευτερεύον κύκλωμα με heat transfer fluid (molten salts), όπου τροφοδοτεί κατάλληλα διαστασιοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας . Ο εναλλάκτης θερμότητας θερμαίνει κύκλωμα νερού ατμού από 90 C στους 140 C. Στο κύκλωμα νερού ατμού υπάρχει εγκατάσταση επιτήρησης θερμοκρασίας και ελέγχου ροής. Ελέγχοντας την παροχή του ζεστού νερού τροφοδοτούνται τα θερμικά φορτία. Το επιθυμητό ΔT είναι 50 C

Γενικές Παραδοχές[39] :

- Ο χρόνος ζωής και των δύο συστημάτων θεωρείται 20 χρόνια
- Θεωρείται ότι οι εναλλάκτες και το θερμοδοχείο είναι κατάλληλα διαστασιοποιημένοι ώστε να γίνεται εξ ολοκλήρου η μεταφορά θερμότητας.
- Το θερμικό φορτίο της ζήτησης θεωρείτε σταθερό και ίσο με 500kW
- Οι θερμικές απώλειες στο θερμοδοχείο και στο δίκτυο μεταφορά θερμικά αγωγίμου ρευστού 5-8% μεταφερόμενης θερμικής ισχύος
- Η μείωση της απόδοσης λόγω γήρανσης του πεδίου θεωρείται 1% τον χρόνο για τα φωτοβολταϊκά συστήματα και 0% το χρόνο για τα ηλιοθερμικά συστήματα.
- Το σύστημα θεωρείται ότι δουλεύει αδιάλειπτα 8760 ώρες το έτος
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν εξωγενής παράγοντες όπου μπορεί να μειώσουν τον χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης
- Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 400 C και η ελάχιστη 140 C

Οικονομικές Παραδοχές

- Η τιμή του φυσικού αερίου θεωρείται σταθερή κατά μέσο όρο για όλη την διάρκεια μελέτης 0,13 €/kWh

- Κατά την εκτίμηση του αρχικού κεφαλαίου δεν περιλαμβάνεται το κόστος της γης που θα χρειαστεί για την εγκατάσταση
- Στο πάγιο κόστος περιλαμβάνεται το κόστος ασφάλισης, συντήρησης και αντικατάστασης του εξοπλισμού σε περίοδο βλάβης. Ο συνολικός χρόνος συντήρησης διακόπτει την συνεχόμενη λειτουργία του συστήματος.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν εξωγενής παράγοντες που μπορεί αυξήσουν το πάγιο κόστος ή το κόστος εγκατάστασης.

Ανάλυση κόστους

Για τον αναλυτικό υπολογισμό τόσο του κόστους εγκατάστασης όσο και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης λαμβάνονται δεδομένα από τις εκθέσεις του Ινστιτούτου [IRENA] και πιο συγκεκριμένα η έκθεση [10] όπου περιγράφετε και η πλήρης ανάλυση τιμών, Συντελεστών χρησιμοποίησης, Σταθμισμένα κόστη ενέργειας ανά τα έτη για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής ενέργειας και τον διαχωρισμό των τιμών στα διάφορα που απαρτίζουν τα πεδία.

Επιπλέον για τον υπολογισμό κόστους για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στέρεας κατάστασης (Solid Thermal Energy Storage) λαμβάνονται δεδομένα τόσο από την παραπάνω έκθεση του Ινστιτούτου [IRENA], όσο και από την έκθεση [10][11][13]

Ανάλυση κόστους εγκατάστασης πεδίου με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Πεδίο με Παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες	Κόστος
Παραβολικοί Ηλιακοί συλλέκτες	1282,2€/kW
Δίκτυο θερμικά αγωγίμων ρευστών	470,14€/kW
Εξισορρόπηση συστήματος	213,7€/kW
Μηχανολογική μελέτη	128,22€/kW
Σύνολο	2094,26€/kW

Κόστη λειτουργίας και συντήρησης

$$O\&M=0,028\text{€/kWh/έτος}$$

Ανάλυση κόστους εγκατάστασης πεδίου με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες

	Κόστος
Πεδίο με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες	1173 €/kW
Ηλεκτρικός θερμαντήρας	40 €/kW
Δίκτυο θερμικά αγωγίμων ρευστών	470,14€/kW
Εξισορρόπηση συστήματος	213,7€/kW
Μηχανολογική μελέτη	85,48€/kW
Σύνολο	1982,32€/kW

Κόστη λειτουργίας και συντήρησης

$$O\&M=(10\cdot P+0,02\text{€/kWh})/\text{έτος}$$

P: Εγκατεστημένη ισχύς

Κόστος συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

$$K=(15000\cdot MWh+5000)\text{€}$$

Σύστημα Αποθήκευσης Στερεάς Κατάστασης

$$C=1,62\text{KJ/kgK}$$

$$\rho=2100\text{kg/m}^3$$

Πίνακας10: Στοιχεία συστημάτων αποθήκευσης[10][11][13]

Όγκος m ³	Βάρος kg	Μέγεθος Αποθήκευσης MWh	Κόστος \$
9,07	19047,62	3	50.000
18,14	38095,24	6	95.000
27,21	57142,86	9	140.000
36,28	76190,48	12	185.000

Η ανάλυση του κόστους όπως περιγράφεται παραπάνω επαυξάνεται ανά περίπτωση κατά 8%, για την κάλυψη περαιτέρω εξόδων που δεν έχουν ληφθεί υπόψιν στην ανάλυση.

3.2 Λειτουργία συστήματος

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που προσομοιώνει την διεργασία μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική για τα δύο συστήματα παραγωγής-αποθήκευσης (των φωτοβολταϊκών και τον παραβολικών ηλιακών) αποτελείτε από δεδομένα εισόδου, υπολογιστικές εξισώσεις σε επαναληπτική διαδικασία (δεδομένα λειτουργίας) και δεδομένα εξόδου.

3.2.1 Δεδομένα εισόδου

Στην κατηγορία των δεδομένων εισόδου περιλαμβάνονται τα τεχνικά μεγέθη των στοιχείων που έχουν επιλεγεί και περιγράφονται παραπάνω, οι πίνακες μεγεθών ηλιακής ακτινοβολίας και φωτοβολταϊκής ισχύς (από το PVGIS), η καμπύλη φορτίου, οι συνθήκες λειτουργίας του κύκλου νερού ατμού, καθώς και οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και οι περιορισμοί. [39]

Η καμπύλη φορτίου θερμικής ισχύος θεωρείτε σταθερή και ίση με 500kW και στις δύο περιπτώσεις.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται παραμετρικά για τα πεδία με της παρακάτω τιμές ονομαστικής ισχύς.

Πίνακας 11: Πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Εγκατεστημένη ισχύς kW	Ωφέλιμο εγκατεστημένο εμβαδόν m ²
540,0	800
742,5	1100
945,0	1400
1147,5	1700
1350,0	2000

Πίνακας 12: Πεδίο Φωτοβολταϊκών συλλεκτών

Εγκατεστημένη ισχύς kW	Ωφέλιμο εγκατεστημένο εμβαδόν m ²
540,0	2511,63
742,5	3453,49
945,0	4395,35
1147,5	5337,21
1350,0	6279,07

Πίνακας 13: Οικονομικά Δεδομένα πεδίου παραβολικών ηλιακών συλλεκτών

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Ενέργεια (MWh)	Αρχικό Κόστος (€)	Κόστος O&M (€)	Συνολικό Κόστος (€)
540,0	3	1.275.372,43	1.241.362,08	2.516.734,51
742,5	3	1.733.387,09	1.633.564,80	3.366.951,89
742,5	6	1.781.987,09	1.670.602,08	3.452.589,17
742,5	9	1.830.587,09	1.677.200,00	3.507.787,09
742,5	12	1.879.187,09	1.681.639,68	3.560.826,77
945,0	3	2.191.401,76	1.810.902,24	4.002.304,00
945,0	6	2.240.001,76	1.873.693,92	4.113.695,68
945,0	9	2.294.001,76	1.893.584,00	4.187.585,76
945,0	12	2.337.201,76	1.902.391,68	4.239.593,44
1147,5	3	2.649.416,42	1.904.844,48	4.554.260,90
1147,5	6	2.698.016,42	2.000.994,24	4.699.010,66
1147,5	9	2.746.616,42	2.035.088,16	4.781.704,58
1147,5	12	2.795.216,42	2.048.088,00	4.843.304,42
1350,0	3	3.107.431,08	1.967.145,60	5.074.576,68
1350,0	6	3.156.031,08	2.088.313,92	5.244.345,00
1350,0	9	3.204.631,08	2.130.128,00	5.334.759,08
1350,0	12	3.253.231,08	2.152.332,00	5.405.563,08

Πίνακας 14: Οικονομικά δεδομένα πεδίου φωτοβολταϊκών συλλεκτών

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Ενέργεια (MWh)	Αρχικό Κόστος (€)	Κόστος O&M (€)	Συνολικό Κόστος (€)
540,0	3	1.210.089,02	767.978,40	1.978.067,42
742,5	3	1.643.622,41	1.055.860,80	2.699.483,21
945,0	3	2.077.155,79	1.343.743,20	3.420.898,99
1147,5	3	2.510.689,18	1.547.179,20	4.057.868,38
1147,5	6	2.559.289,18	1.590.103,20	4.149.392,38
1147,5	9	2.607.889,18	1.592.460,00	4.200.349,18
1147,5	12	2.656.489,18	1.594.658,40	4.251.147,58
1350,0	3	2.944.222,56	1.673.176,80	4.617.399,36
1350,0	6	2.992.822,56	1.727.839,20	4.720.661,76
1350,0	9	3.041.422,56	1.731.680,00	4.773.102,56
1350,0	12	3.090.022,56	1.733.971,20	4.823.993,76

Στον κύκλο λειτουργίας νερού ατμού για την αξιοποίηση της θερμικής ισχύος επιλέγετε στο κλειστό κύκλωμα οι παρακάτω συνθήκες λειτουργίας.

Πίεση λειτουργίας	P=5bar
Θερμοκρασία ατμού (προσαγωγή)	T=120 °C
Θερμοκρασία νερού (επιστροφή)	T=80 °C
Δt	40 °C
Ενθαλπία ατμού	H _{max} =2739,4kJ/kg
Ενθαλπία νερού	H _{min} =377,22kJ/kg

Όσο αφορά τις αρχικές συνθήκες

$T_{\text{ambient}}=20^{\circ}\text{C}$ θερμοκρασία περιβάλλοντος

$T_{\text{tank}}=200^{\circ}\text{C}$ αρχική θερμοκρασία θερμοδοχείου

$T_{\text{fluid}}=200^{\circ}\text{C}$ αρχική θερμοκρασία θερμικά αγωγίμου ρευστού (molten salts)

Περιορισμοί

$T_{\text{tank_min}}=140^{\circ}\text{C}$ ελάχιστη θερμοκρασία θερμοδοχείου

$T_{\text{tank_max}}=400^{\circ}\text{C}$ μέγιστη θερμοκρασία θερμοδοχείου

$T_{\text{fluid_max}}=400^{\circ}\text{C}$ μέγιστη θερμοκρασία θερμικά αγωγίμου ρευστού (molten salts)

3.2.2 Δεδομένα λειτουργίας

Η παροχή του κύκλου νερού-ατμού εξαρτάτε από τις καμπύλη φορτίου δεδομένου ότι η πίεση και η διαφορά ενθαλπίας είναι σταθερές συνθήκες και είναι ίση με:

$$\dot{m}_{\text{water}} = \frac{\text{Loads}}{(h_2 - h_1)} \quad 3.2$$

Η παροχή του θερμικά αγωγίμου ρευστού (molten salts) στο δευτερεύον κύκλωμα βάση του ισοζυγίου ενέργειας είναι ίση με :

$$\dot{m}_{\text{htf2}} = \frac{\dot{m}_{\text{water}} \cdot (h_2 - h_1)}{c_{p_htf_2} \cdot dt_{\text{htf2}}} \quad 3.3$$

$dt_{\text{htf2}}=50\text{K}$

$c_{p_htf_2}=1.52\text{KJ/kgK}$

Η παροχή του θερμικά αγωγίμου ρευστού (molten salts) στο πρωτεύων κύκλωμα είναι σταθερή και ίση με [39]:

$$\dot{m}_{\text{htf1}} = 0.2 \cdot A_c \quad 3.4$$

A_c : Εμβαδόν πεδίου

Η θερμοκρασίες του θερμικά αγωγίμου ρευστού είναι μεταβλητές και εξαρτώνται από τις θερμικές απώλειες και την καμπύλη φορτίου.

Σε επαναληπτική εντολή :

Υπολογίζεται η q_{in} (θερμική ενέργεια εισόδου στο θερμοδοχείο) για το φωτοβολταϊκό λαμβάνεται η μέτρηση από το PVGIS και για το ηλιοθερμικό χρησιμοποιείται η ακτινοβολία DNI από το PVGIS και η απόδοση υπολογίζεται μέσω του τύπου που αναφέρετε παραπάνω από [2]

Εν συνεχεία υπολογίζεται η ποσότητα q_{in2}

Έπειτα υπολογίζεται το μέγεθος q_{out} (θερμική ενέργεια για κάλυψη φορτίου). Η ποσότητα q_{out} ήταν μηδενική, όταν η θερμοκρασία στο θερμικά αγώγιμο ρευστό του δευτερεύοντος κυκλώματος $T < T_{tank_min}$. Αλλιώς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$q_{out} = q_{in} + \dot{m}_{htf2} \cdot c_{p_htf_2} \cdot \Delta T2 \quad 3.5$$

q_{out} : θερμική ισχύς για κάλυψη φορτίου

q_{in} : θερμική ισχύς εισόδου

m_{htf_2} : παροχή μάζας θερμικά αγώγιμου ρευστού δευτερεύον κυκλώματος

$c_{p_htf_2}$: Ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμικά αγώγιμου ρευστού

$\Delta T2$: Διαφορά θερμοκρασίας θερμικά αγώγιμου ρευστού- T_{tank_min}

Η μέγιστη θερμική ισχύς εξόδου είναι μικρότερη ίση από το φορτίο σε κάθε ώρα

$$q_{out_max} \leq loads \quad 3.6$$

Κατά την επαναληπτική εντολή, η θερμοκρασία των θερμικά αγώγιμων ρευστών και στα δύο κυκλώματα εξαρτάται από την θερμοκρασία του θερμοδοχείου. Όταν η θερμοκρασία του θερμοδοχείου είναι $T \leq T_{tank_min}$ η ενέργεια εισόδου αποθηκεύεται αυξάνοντας την θερμοκρασία του θερμοδοχείου, συνεπώς δεν εξυπηρετεί το φορτίο. Αυτό γίνεται ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθεί ο κύκλος νερού-ατμού που έχει επιλεγεί.

Τέλος εφαρμόζοντας ενεργειακό ισοζύγιο στο θερμοδοχείο και υπολογίζεται η θερμοκρασία και η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια ανά ώρα

$$E_{in} - E_{out} - E_{losses} = E_{θερμοδοχείου} \quad 3.7$$

$$q_{in} - q_{out} - E_{losses} = mC\Delta T \quad 3.8$$

$$\Delta T = \frac{m_{htf_1} \cdot cp_{htf_1} \cdot dt_{htf1} - m_{htf_2} \cdot cp_{htf_2} \cdot dt_{htf2} - E_{losses}}{mC} \quad 3.9$$

ΔT : Διαφορά θερμοκρασίας θερμοδοχείου ανά ώρα

$m_{htf_...}$: Παροχή μάζας θερμικά αγώγιμου ρευστού

$cp_{htf_...}$: Ειδική θερμοχωρητικότητα, θερμικά αγώγιμου ρευστού

$dt_{htf_...}$: Διαφορά θερμοκρασίας θερμικά αγώγιμου ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο του θερμοδοχείου

m : μάζα θερμοδοχείου

C : θερμοχωρητικότητα θερμοδοχείου

3.2.3 Δεδομένα εξόδου

Τα μεγέθη του υπολογίζονται από το πρόγραμμα προσομοίωσης έχουν σκοπό τόσο την σύγκριση των δύο συστημάτων ενεργειακά, όσο και την διεξαγωγή συμπερασμάτων για την χρησιμότητα συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας διαφορετικών μεγεθών.

Για την διεξαγωγή αποτελεσμάτων έγινε πολλαπλή προσομοίωση του προγράμματος για διαφορετικά μεγέθη πεδίων και μεγέθη θερμοδοχείων για το ίδιο θερμικό φορτίο. Οι συντελεστές που υπολογίζονται και αφορούν την απόδοση του συστήματος είναι:

- Συντελεστής κάλυψης φορτίου σε ένα έτος (n) :

$$n = \frac{q_{out}}{loads} \quad 3.10$$

- Συνολική παραγόμενη θερμική ενέργεια (MWh) E_{gen}
- Συντελεστής χρησιμοποίησης CUF

Οι οικονομικοί δείκτες όπου θα υπολογιστούν αφορούν :

- Καθαρή Παρούσα Αξία με $i=4\%$
- Εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR
- Περίοδος αποπληρωμής
- Σταθμισμένο κόστος Θερμικής ενέργειας

4. Αποτελέσματα

Με βάση την δομή των παραπάνω εγκαταστάσεων (φωτοβολταϊκά-παραβολικά ηλιακά) δημιουργήθηκε ο απαραίτητος υπολογιστικός κώδικας στο MATLAB, για τον υπολογισμό φυσικών και οικονομικών μεγεθών ώστε να γίνει η τεχνοοικονομική σύγκριση των δύο συστημάτων. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της θερμικής ισχύος που μπορεί να εξυπηρετηθεί από ηλιακή ενέργεια, ο ρόλος του θερμοδοχείου στέρεας κατάστασης σε μια τέτοια εγκατάσταση και το ποσοστό του θερμικού φορτίου που εξυπηρετείτε. Για αυτόν τον λόγο πραγματοποιείται παραμετρικός υπολογισμός για διαφορετικά μεγέθη εγκατάστασης και αποθήκευσης ενέργειας σε σταθερό φορτίο 500 kW.

Πίνακας 15: Ενεργειακά αποτελέσματα πεδίου με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Αποθηκευμένη Ενέργεια (MWh)	Ποσοστό κάλυψης φορτίου	Παραγόμενη ενέργεια (MWh)	Συντελεστής χρησιμοποίησης (CUF)
540,0	3	50,61%	2216,72	0,47
742,5	3	66,60%	2917,08	0,45
742,5	6	68,11%	2983,22	0,46
742,5	9	68,38%	2995,00	0,46
742,5	12	68,56%	3002,93	0,46
945,0	3	73,83%	3233,75	0,39
945,0	6	76,39%	3345,88	0,40
945,0	9	77,20%	3381,40	0,41
945,0	12	77,56%	3397,13	0,41
1147,5	3	77,66%	3401,51	0,34
1147,5	6	81,58%	3573,20	0,36
1147,5	9	82,97%	3634,09	0,36
1147,5	12	83,50%	3657,30	0,36
1350,0	3	80,20%	3512,76	0,30
1350,0	6	85,14%	3729,13	0,32

1350,0	9	86,84%	3803,80	0,32
1350,0	12	87,75%	3843,45	0,33

Πίνακας 16: Ενεργειακά αποτελέσματα πεδίου με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Αποθηκευμένη Ενέργεια (MWh)	Ποσοστό κάλυψης φορτίου	Παραγόμενη ενέργεια (MWh)	Συντελεστής χρησιμοποίησης (CUF)
540,0	3	37,67%	1649,95	0,35
742,5	3	51,79%	2268,40	0,35
945,0	3	65,91%	2886,86	0,35
1147,5	3	75,21%	3294,20	0,33
1147,5	6	77,66%	3401,51	0,34
1147,5	9	77,90%	3407,40	0,34
1147,5	12	77,92%	3412,90	0,34
1350,0	3	80,09%	3507,94	0,30
1350,0	6	83,21%	3644,60	0,31
1350,0	9	83,43%	3654,20	0,31
1350,0	12	83,56%	3659,93	0,31

Οικονομικά αποτελέσματα συστημάτων

Πίνακας 17: Οικονομικά αποτελέσματα πεδίου με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Αποθηκευμένη Ενέργεια (MWh)	Καθαρή παρούσα αξία (€) 4%	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	Περίοδος αποπληρωμής (χρόνια)	Σταθμισμένο κόστος θερμικής ενέργειας (€/kwh)
540,0	3	1.797.471	16,96%	5,64	0,057
742,5	3	2.310.307	16,33%	5,83	0,058

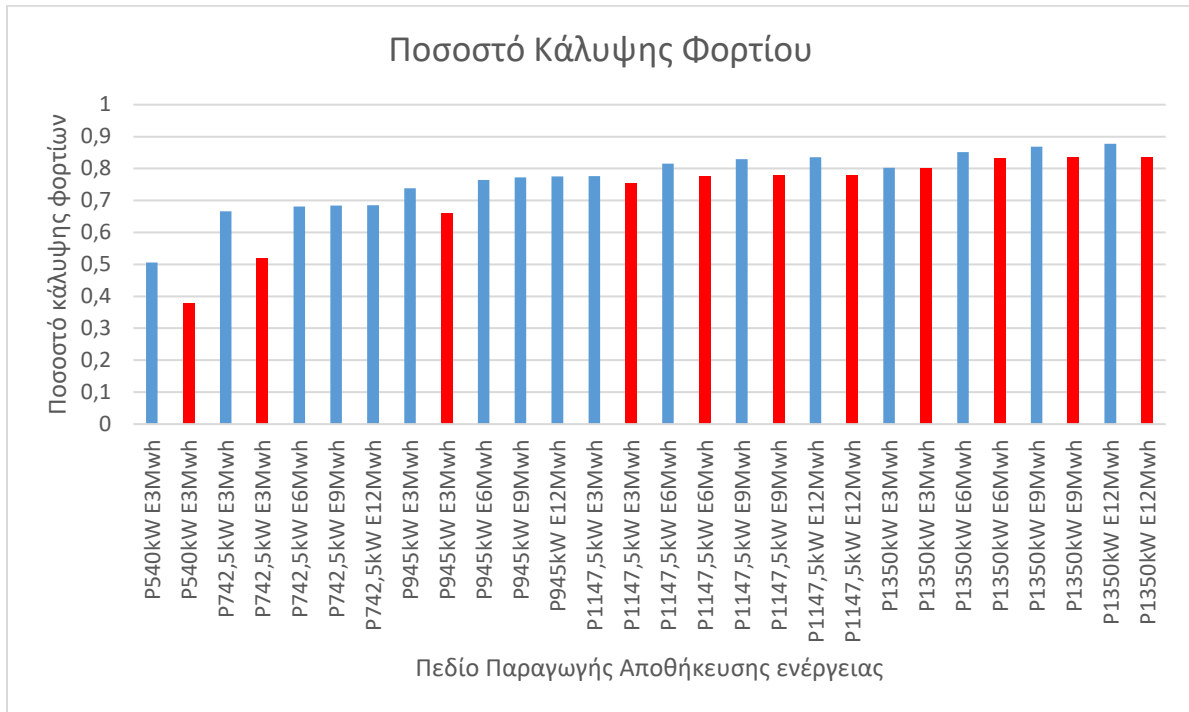
742,5	6	2.353.389	16,23%	5,86	0,058
742,5	9	2.321.121	15,80%	5,99	0,059
742,5	12	2.283.511	15,36%	6,14	0,059
945,0	3	2.291.271	13,95%	6,64	0,062
945,0	6	2.482.613	14,45%	6,56	0,061
945,0	9	2.393.339	13,93%	6,65	0,062
945,0	12	2.371.942	13,69%	6,75	0,062
1147,5	3	2.065.799	11,65%	7,64	0,067
1147,5	6	2.255.206	12,14%	7,40	0,066
1147,5	9	2.291.001	12,13%	7,41	0,066
1147,5	12	2.274.581	11,95%	7,49	0,066
1350,0	3	1.762.003	9,73%	8,67	0,072
1350,0	6	2.013.341	10,38%	8,30	0,070
1350,0	9	2.068.247	10,45%	8,26	0,070
1350,0	12	2.074.610	10,38%	8,30	0,070

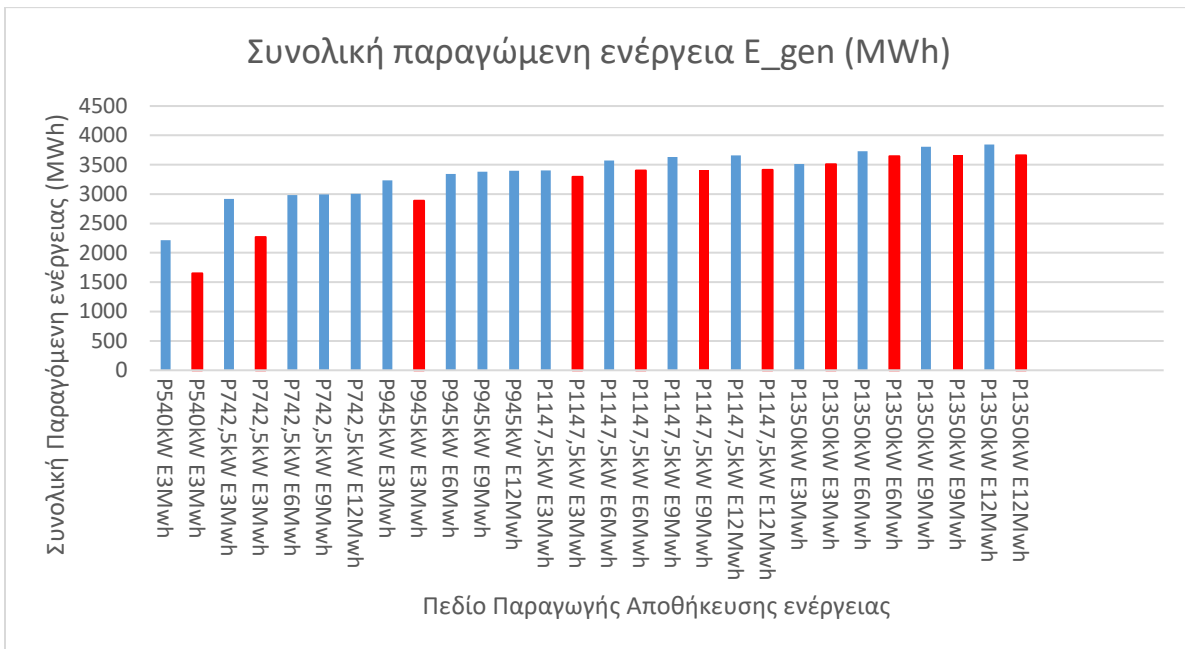
Πίνακας 18: Οικονομικά αποτελέσματα πεδίου με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες

Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Αποθηκευμένη Ενέργεια (MWh)	Καθαρή παρούσα αξία (€) 4%	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	Περίοδος αποπληρωμής (years)	Σταθμισμένο κόστος θερμικής ενέργειας (€/kwh)
540,0	3	997.137	12,40%	6,87	0.068
742,5	3	1.391.858	12,61%	6,79	0.068
945,0	3	1.785.908	12,73%	6,74	0.067

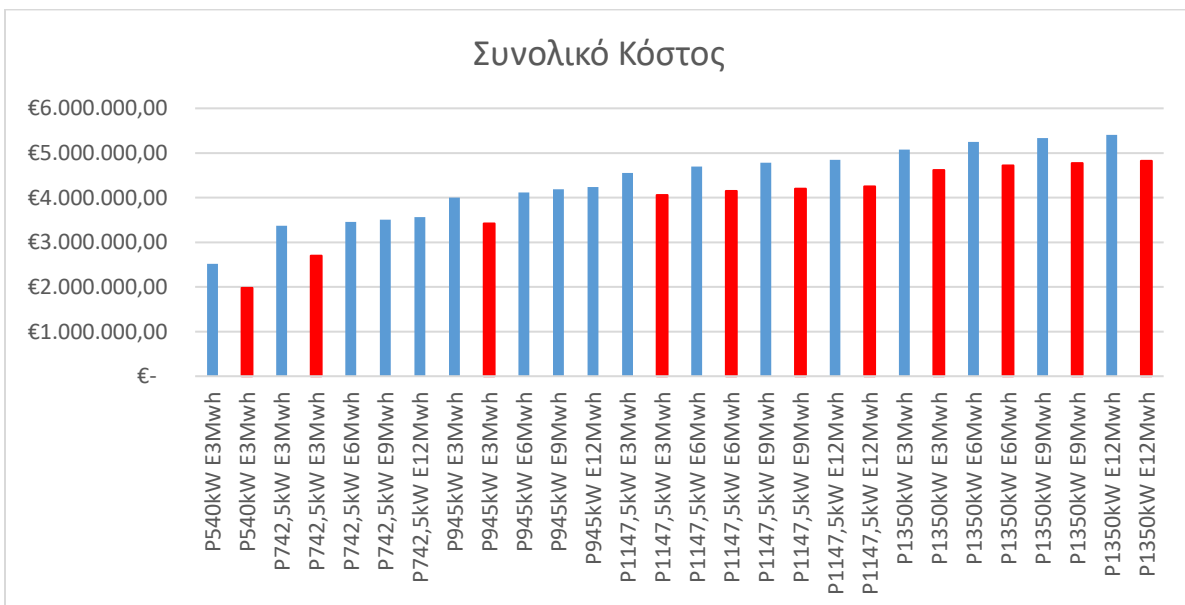
1147,5	3	1.888.788	11,73%	7,16	0.070
1147,5	6	1.988.189	11,96%	7,06	0.069
1147,5	9	1.946.332	11,68%	7,18	0.070
1147,5	12	1.849.698	11,21%	7,30	0.070
1350,0	3	1.666.081	9,96%	7,91	0.074
1350,0	6	1.803.673	10,32%	7,73	0.073
1350,0	9	1.827.699	10,30%	7,83	0.073
1350,0	12	1.727.359	9,90%	7,94	0.074

4.1 Παρουσίαση γραφημάτων

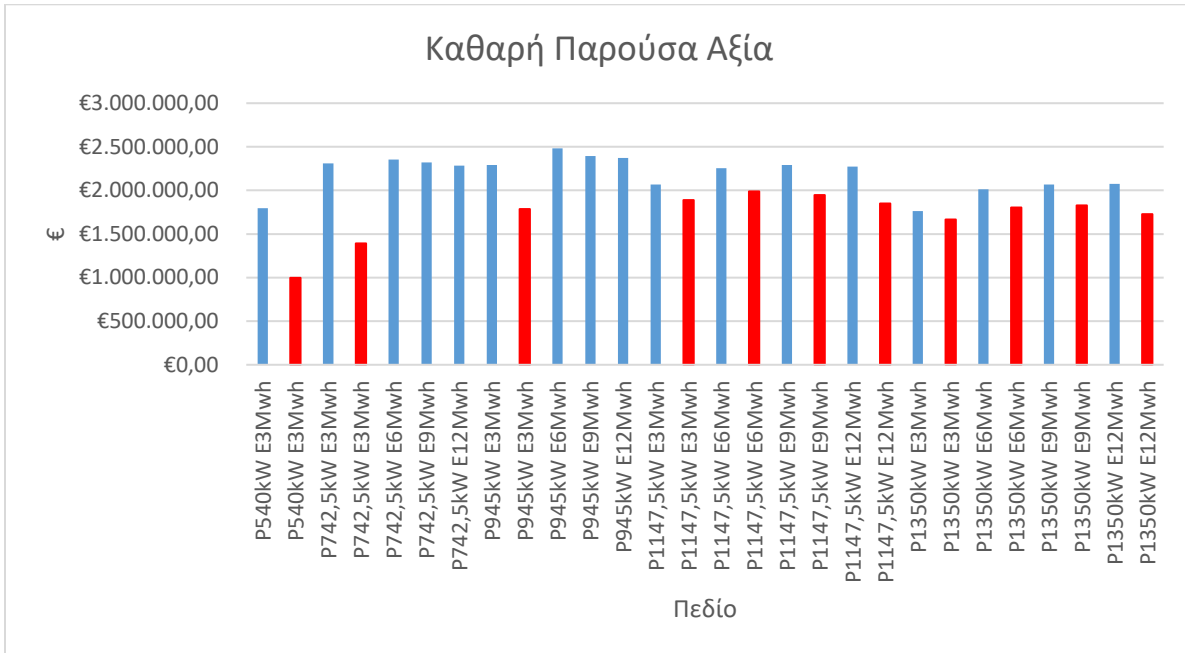




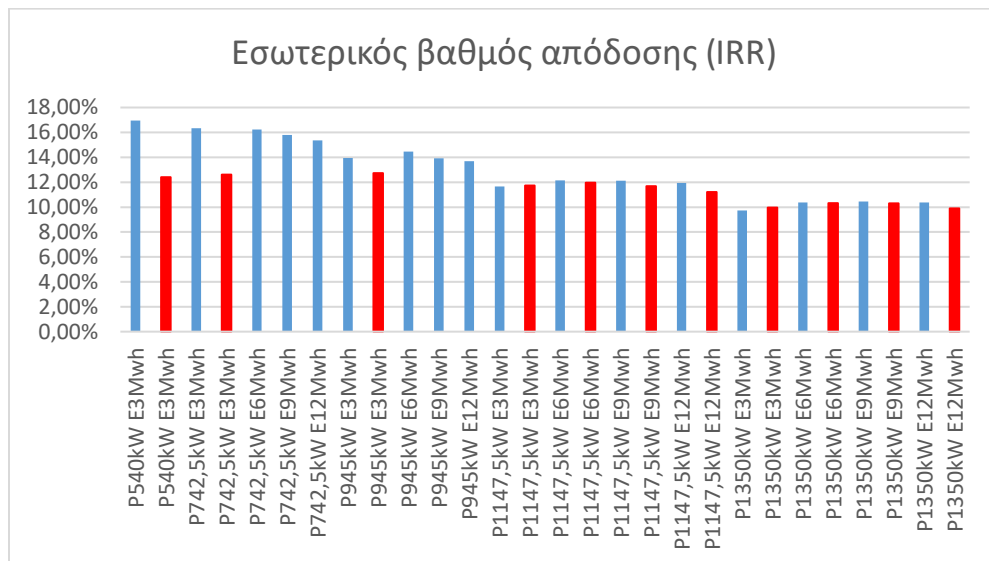
Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς και το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης, το ποσοστό κάλυψης φορτίου αυξάνεται. Επίσης για παρόμοια ισχύς και αποθήκευσης συστήματα, τα παραβολικά ηλιακά συστήματα αποδίδουν περισσότερο από τα φωτοβολταϊκά. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και στην συνολική παραγόμενη ενέργεια.



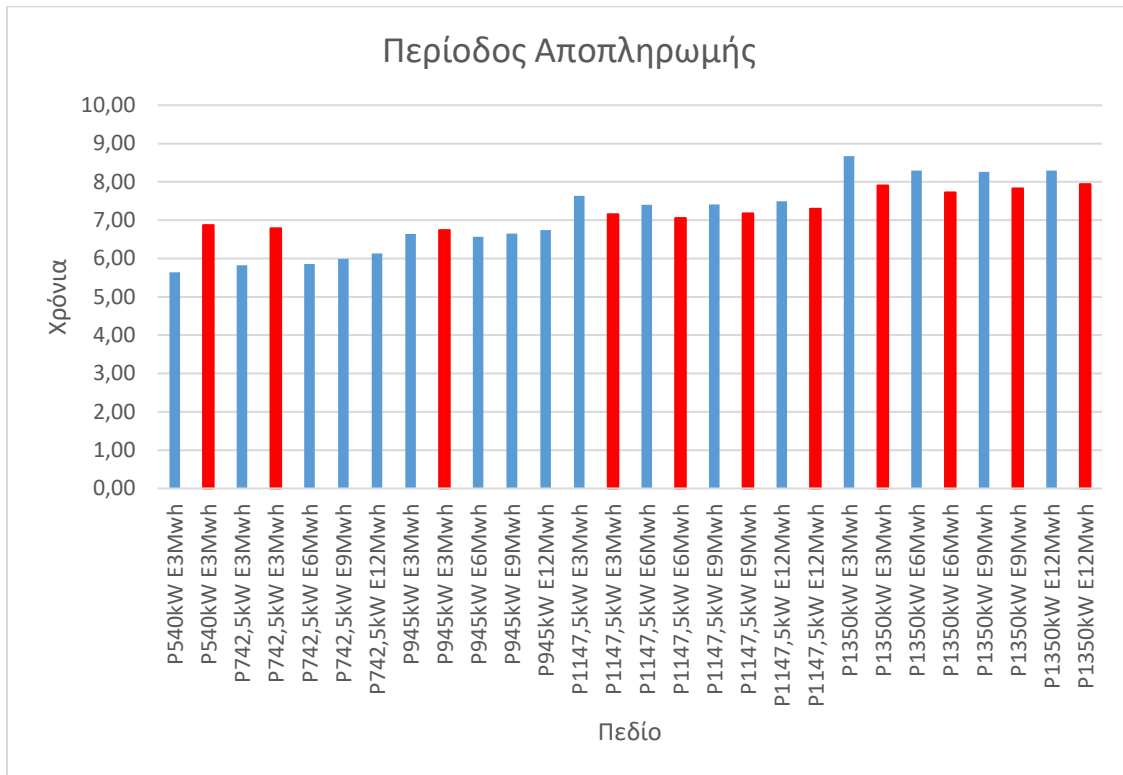
Παρατηρείτε πως το συνολικό κόστος επένδυσης στην 20ετία είναι μεγαλύτερο για πεδία με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, από τα αντίστοιχα πεδία με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες



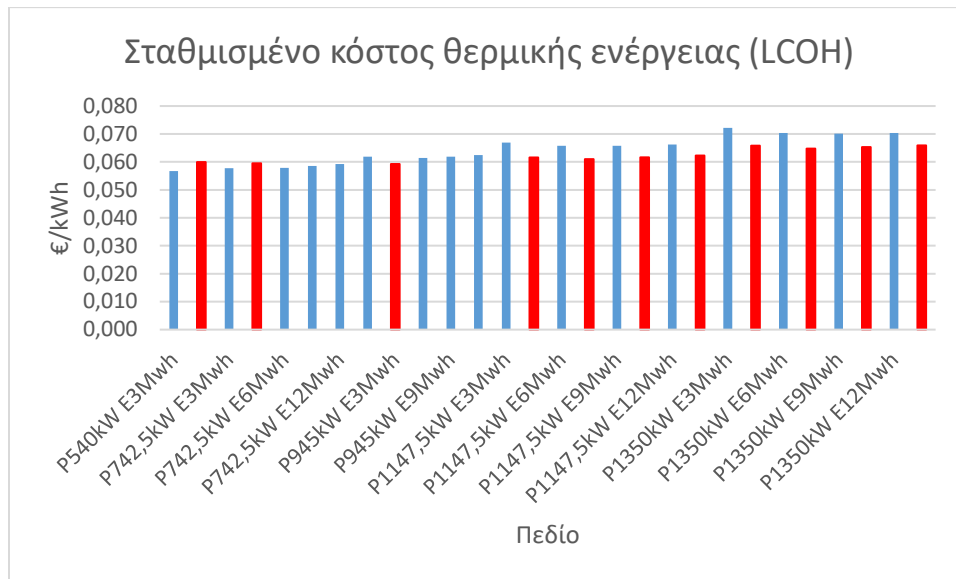
Η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία παρουσιάζεται σε πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος P=945kW και μέγιστο μέγεθος αποθήκευσης θερμοδοχείου 6 MWh. Η τιμή της είναι 2.482.613,20 . Επίσης για παρόμοιας ισχύς και αποθήκευσης πεδία, τα παραβολικά ηλιακά συστήματα έχουν μεγαλύτερες τιμές καθαρή παρούσας αξίας από τα φωτοβολταϊκά.



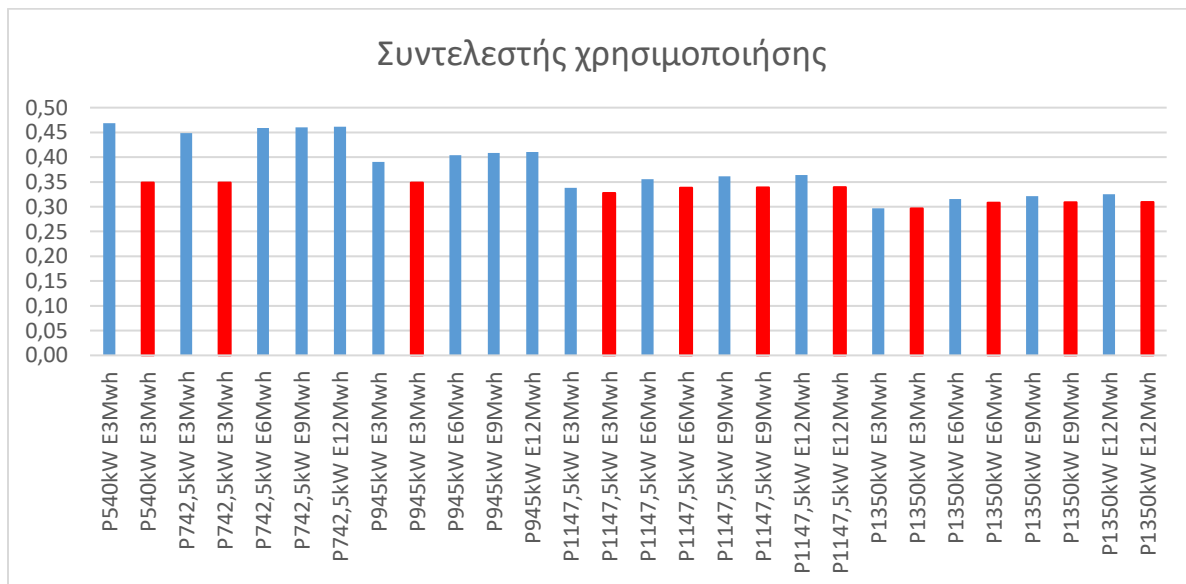
Ο μέγιστος εσωτερικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται σε πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος P=540kW και μέγιστο μέγεθος αποθήκευσης θερμοδοχείου 3 MWh. Η τιμή του είναι 16,96%.



Παρατηρείται ότι σε πεδία χαμηλότερης ισχύος (<945kW) η περίοδος αποπληρωμής είναι μικρότερη για τα αντίστοιχα πεδία με τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Ενώ όταν η ισχύς στα πεδία είναι μεγαλύτερη (>1147,5kW), τότε η περίοδος αποπληρωμής είναι μικρότερη στα αντίστοιχα πεδία με τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Η ελάχιστη περίοδος αποπληρωμής είναι 5,64 χρόνια για πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος P=540kW και μέγεθος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας E=3MWh. Επιπλέον παρατηρείται ότι σε παρόμοιας τύπου και ισχύος πεδία, η αύξηση του μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης, αυξάνει την περίοδο αποπληρωμής.



Παρατηρείται ότι σε πεδία χαμηλότερης ισχύος (<945kW) η σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μικρότερη για τα αντίστοιχα πεδία με τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Ενώ όταν η ισχύς στα πεδία είναι μεγαλύτερη (>1147,5kW), σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μικρότερη στα αντίστοιχα πεδία με τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Η ελάχιστη σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι 0,0568 €/kWh για πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος P=540kW και μέγεθος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας E=3MWh. Επιπλέον παρατηρείται ότι σε παρόμοιας τύπου και ισχύος πεδία, η αύξηση του μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης, αυξάνει την σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας στην εικοσαετία.



Παρατηρείτε ότι όσο αυξάνεται η ισχύς του πεδίου, ο συντελεστής χρησιμοποίησης μειώνεται. Επιπλέον όσο αυξάνεται ο ταμιευτήρας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αυξάνεται και ο συντελεστής χρησιμοποίησης. Τέλος Επίσης για παρόμοιας ισχύς και αποθήκευσης πεδία, τα παραβολικά ηλιακά συστήματα έχουν μεγαλύτερους συντελεστές χρησιμοποίησης από τα φωτοβολταϊκά.

5. Συμπεράσματα

Η μελέτη και ανάλυση των παραπάνω συστημάτων πραγματοποιήθηκε με σκοπό να διεξαχθούν συμπεράσματα σε δύο κατευθύνσεις. Μέσω της παραμετροποίησης που έγινε πραγματοποιήθηκαν είκοσι οκτώ (28) προσομοιώσεις για ηλιακά πεδία παραγωγής θερμικής ενέργειας με διαφορετική ισχύς και μεγέθους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Οι έντεκα (11) προσομοιώσεις αφορούσαν πεδία με φωτοβολταϊκούς συλλέκτες και οι δεκαεφτά(17) προσομοιώσεις, πεδία με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες.

5.1 Συμπεράσματα

Το αρχικό κατευθυντήριο συμπέρασμα αφορά την τεχνοοικονομική μελέτη των δύο συστημάτων μέσω των δεικτών που υπολογίστηκαν στον παραπάνω κεφαλαίο. Δυο βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι η αρκετά μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση των παραβολικών συλλεκτών έναντι των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, σε πεδία με κοινής ισχύος και η μεγαλύτερη κάλυψη ποσοστού του σταθερού φορτίου. Σημαντικό στοιχείο για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι η παραδοχή ότι το φορτίο παραμένει σταθερό καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου, σε περιπτώσεις με άλλα προφίλ φορτίων ενδεχομένως η κάλυψη ποσοστού φορτίου να ήταν διαφορετική. Η παραδοχή θεωρείται βάσιμη καθώς κατά κύριο λόγο βιομηχανίες κρατούν έχουν σταθερά φορτία βάσης σε όλη την διάρκεια του έτους.

Βάση των δεικτών που ορίστηκαν προκύπτει ότι:

- Η μέγιστη καθαρή παρούσα αξία είναι 2.482.613 για ισχύς $P=945\text{kW}$ και μέγεθος θερμοδοχείου $E=6\text{ MWh}$. Για πεδία με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες προκύπτουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές καθαρή παρούσας αξίας. Αυτό οφείλετε και στο αυξημένο κόστος επένδυσης και στην μεγαλύτερη παραγωγή θερμικής ενέργειας για πεδία με κοινή θερμική ισχύς.
- Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης σε πεδία με μικρότερη ισχύ ($P<1147,5\text{kW}$) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για πεδία με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες ενώ για μεγαλύτερη ισχύ ($P>1147,5\text{kW}$) κοινές τιμές και για τα δύο συστήματα. Το συμπέρασμα δικαιολογείτε δεδομένου του αυξημένου κόστους ανά εγκατεστημένο €/ kW που έχει το πεδίο με τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες σε σχέση με το πεδίο με τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες
- Παρατηρείται ότι σε πεδία χαμηλότερης ισχύος ($<945\text{kW}$) η περίοδος αποπληρωμής είναι μικρότερη για τα αντίστοιχα πεδία με τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Ενώ όταν η ισχύς στα πεδία είναι μεγαλύτερη ($>1147,5\text{kW}$), τότε η περίοδος αποπληρωμής είναι μικρότερη στα αντίστοιχα πεδία με τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες . Η ελάχιστη περίοδος αποπληρωμής είναι 5,64 χρόνια για πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος $P=540\text{kW}$ και μέγεθος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας $E=3\text{MWh}$. Επιπλέον παρατηρείται ότι σε παρόμοιας τύπου και

ισχύος πεδία, η αύξηση του μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης, αυξάνει την περίοδο αποπληρωμής.

- Παρατηρείται ότι σε πεδία χαμηλότερης ισχύος (<945kW) η σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μικρότερη για τα αντίστοιχα πεδία με τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες. Ενώ όταν η ισχύς στα πεδία είναι μεγαλύτερη (>1147,5kW), σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι μικρότερη στα αντίστοιχα πεδία με τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες. Η ελάχιστη σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας είναι 0,0568 €/kWh για πεδίο με παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, ισχύος $P=540\text{kW}$ και μέγεθος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας $E=3\text{MWh}$. Επιπλέον παρατηρείται ότι σε παρόμοια τύπου και ισχύος πεδία, η αύξηση του μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης, αυξάνει την σταθμισμένη τιμή της θερμικής ενέργειας στην εικοσαετία.

Επιπλέον κατευθυντήριο συμπέρασμα αποτέλεσε και η διεξαγωγή πρώτων συμπερασμάτων για την χρησιμότητα μεγαλύτερων αποθηκευτικών συστημάτων. Αντίστοιχα και εδώ σημαντικό στοιχείο είναι η παραδοχή ότι το φορτίο είναι σταθερό. Παρατηρείτε η αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης του πεδίου όσο αυξάνεται και το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης, παρόλα αυτά η αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης είναι αρκετά μικρή. Ενδεχομένως σε φορτίο που παρουσιάζει περιοδικότητες, η αύξηση του συντελεστή χρησιμοποίησης να ήταν μεγαλύτερη. Σε περίοδο εικοσαετίας, η αύξηση του μεγέθους συστήματος αποθήκευσης, αυξάνει το συνολικό κόστος, την καθαρή παρούσα αξία, την περίοδο αποπληρωμής καθώς και το σταθμισμένο κόστος θερμικής ενέργειας, ενώ μειώνεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του συστήματος.

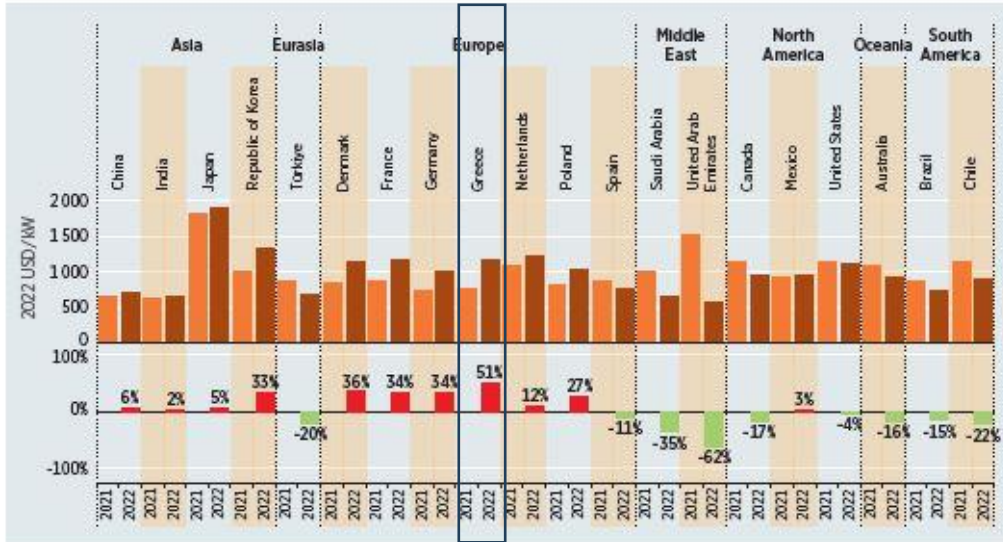
5.2 Συζήτηση

Κατά την διαδικασία αποτίμησης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, αξία αναφοράς είναι μερικοί παράγοντες, όπου δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία και επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα ανά περίπτωση εγκατάστασης.

- Η έκταση γης όπου χρειάζεται για παρόμοια εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων φωτοβολταϊκών είναι πολύ μεγαλύτερη την αντίστοιχη έκταση για παρόμοια ισχύς με παραβολικούς συλλέκτες (Περίπου τριπλάσια έκταση). Στην εργασία θεωρείτε ότι ο οργανισμός που προχωράει στην επένδυση κατέχει ο ίδιος την γη.
- Παρατηρήθηκε μεγάλη μεταβλητότητα τιμών στις εκθέσεις του ινστιτούτου IRENA για την έκθεση του 2021 και την έκθεση του 2022 όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα. Η αναλυτική μελέτη διαστασιολόγηση και κοστολόγηση για την εγκατάσταση των παραπάνω συστημάτων εξατομικεύεται με βάση τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εγκατάστασης.
- Η μελέτη για την εγκατάσταση των πεδίων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας γίνεται σε δεδομένο γεωγραφικό ύψος και πλάτος. Η εγκατάσταση σταθμών

αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας σε άλλη περιοχή στην Ελλάδα επηρεάζει τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Figure 3.5 Utility-scale solar PV total installed cost trends in top 20 utility-scale markets, 2021-2022



5.3 Μελλοντική ερευνά

Το πεδίο μελέτης και διεξαγωγής αποτελεσμάτων σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί ένα ευρύ και αναπτυσσόμενο πεδίο έρευνας. Σε ότι αφορά την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας οι ραγδαία ανάπτυξη φωτοβολταϊκών πάρκων και ηλιοθερμικών σταθμών οφείλετε στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών σε πολλούς παράγοντες (οικονομικούς, περιβαλλοντικούς, προσθήκης νέων υλικών κ.α.). Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη και διεξαγωγή αποτελεσμάτων με βάση δείκτες κάλυψης φορτίου και οικονομικούς δείκτες, λαμβάνοντας υπόψιν αρκετές παραδοχές. Παρακάτω περιγράφονται προτάσεις για επέκταση της έρευνας στους άξονες της εργασίας

- Η περαιτέρω ανάπτυξη των δεικτών με βάση περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως (μείωση κατανάλωσης υδρογονανθράκων (decarbonization) ή μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κ.α.).
- Ένταξη νέων παραμέτρων στην εργασία που θεωρήθηκαν ως παραδοχές, όπως σταθερή τιμή ενέργειας, μελέτη τεχνικών χαρακτηριστικών στοιχείων εγκατάστασης όπως (θερμικό αγωγή ρευστό, εναλλάκτες, δίκτυο σωληνώσεων, αντλιών κ.α.)
- Εύρεση μελέτη αυτοματισμών για την αύξηση της απόδοσης συστημάτων (έλεγχος δικτύου ηλεκτροβανών μέσω PLC, live tracking κ.α.)
- Παραμετρική σύγκριση θερμοδοχείων διαφορετικής χωρητικότητας με δείκτη την χαμηνή ενέργεια που απορρίπτεται λόγω της υπερκάλυψης του φορτίου

- Μελέτη φωτοβολταϊκού συστήματος με υβριδική λειτουργία για την ταυτόχρονη κάλυψη θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων.

6. Βιβλιογραφία

- [1] bGen™ Brenmiller Energy Industrial Waste Heat Brochure
- [2] Braimakis Konstantinos, Solar ejector cooling systems: A review
- [3] C. Tzivanidis, E. Bellos n, D. Korres, K.A. Antonopoulos, G. Mitsopoulos, Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector
- [4] Cengel Ghajar, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας
- [5] D. Manolakos a, Essam Sh. Mohamed a, I. Karagiannis b, G. Papadakis a, Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island
- [6] D. Yogi Goswami ; επιστημονική επιμελεια Χρήστος Τζιβανίδης ; μετάφραση Δημήτριος Νικ. Τερτίπης. , Ηλιακή ενέργεια για μηχανικούς
- [7] E. Casati a,b, A. Galli b, P. Colonna a, Thermal energy storage for solar-powered organic Rankine cycle engines
- [8] Frank Kreith and Jan F. Kreider , Principles of solar engineering
- [9] Hank Price , Eckhard Lupfert, David Kearney, Eduardo Zarza, Gilbert Cohen Randy Gee, Rod Mahoney, Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology
- [10] IRENA Renewable power generation costs in 2021
- [11] IRENA Renewable power generation costs in 2022
- [12] IRENA The cost of financing for renewable power
- [13] IRENA, Innovation outlook thermal energy storage
- [14] IRENA, Renewable power to heat Innovation landscape brief
- [15] Jeffrey Gordon, Solar energy : the state of the art
- [16] John A. Duffie, William A. Beckman Solar Engineering of Thermal Processes
- [17] K. Brankera, M.J.M. Pathaka, J.M. Pearcea,b, A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity
- [18] LUXOR Solar Technical book

- [19] Nishith B. Desai *, Maria E. Mondejar 1, Fredrik Haglind, Techno-economic analysis of two-tank and packed-bed rock thermal energy storages for foil-based concentrating solar collector driven cogeneration plants.
- [20] NREL Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model. (SAM)
- [21] NREL Technoeconomic Cost Analysis of NREL Concentrating Solar Power Gen3 Liquid Pathway.
- [22] NREL, Thermal Insulation for a High Temperature Molten Salt Storage Tank in a CSP Plant
- [23] R.P. Praveen a, Kotturu V.V. Chandra Mouli b, Performance enhancement of parabolic trough collector solar thermal power plants with thermal energy storage capability.
- [24] Randy Gee, A Simple Energy Calculation Method for Solar Industrial Process Heat Steam Systems.
- [25] S. Khare n, M. Dell'Amico, C. Knight, S. McGarry, Selection of materials for high temperature sensible energy storage.
- [26] Solar ejector cooling systems: A review
- [27] Soltigua_PTmx_EN Technical Brochure.
- [28] Mark Roseland, Maria Spiliotopoulou, Sustainable Community Planning and Development
- [29] Taqiy eddineBoukelia n, Mohamed-SalahMecibah, Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria
- [30] Tarun Kumar Aseri, Chandan Sharma, Tara C. Kandpal, 'Estimating capital cost of parabolic trough collector based concentrating solar power plants for financial appraisal: Approaches and a case study for India'.
- [31] US Department of Energy, Energy Storage Technology and Cost Characterization Report.
- [32] Vikas R. Patil a, Vijay Irappa Biradar b, R. Shreyas b, Pardeep Garg c, Matthew S. Orosz c, N.C. Thirumalai a, Techno-economic comparison of solar organic Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage.
- [33] Y. Tian a, C.Y. Zhao b, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications
- [34] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Θερμοδυναμική για μηχανικούς.

- [35] ΑΝΤΩΝΙΟΣ Α. ΜΑΝΤΗΚΟΣ, Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων
- [36] Ε. Κακαράς, Σ. Καρέλλας., Αποκεντρωμένα θερμικά συστήματα
- [37] Κίμωνος Α Αντωνόπουλος, Θερμικά-Ηλιακά Συστήματα
- [38] ΚΟΛΛΙΑΣ ΜΕΛΕΤΙΟΣ «Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών».
- [39] Νικολάου Α. Φωστιέρη, Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση ηλιακά τροφοδοτούμενου Οργανικού Κύκλου Rankine για πηγές θερμότητας μέσης και υψηλής θερμοκρασίας μέσω γενετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης.
- [40] Παναγιώτης Ζορλός Ναυπηγός-Μηχανολόγος Μηχανικός Υπ. Πράξης «ΠΡΑΣΙΝΟ ΝΗΣΙ», Το πιλοτικό έργο «ΑΗ ΣΤΡΑΤΗΣ – ΠΡΑΣΙΝΟ ΝΗΣΙ»
- [41] Παναγιώτης Ι. Τετώρος, Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα.
- [42] Παπαθανασίου Σταύρος, Φωτοβολταϊκά συστήματα «Σημειώσεις»
- [43] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων
- [44] Υδροθερμική συνεργασία σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκών και ηλιοθερμικών συστημάτων

7. Παράρτημα

ECO LINE HALF CELL BIFACIAL M132 / 650-670 W, TRANSPARENT

Module type	LX - XXXM/210-132+ Bif XXX = Rated power Pmpp				
Electrical data at STC					
Rated power Pmpp [Wp]	650.00	655.00	660.00	665.00	670.00
Pmpp range to	656.49	661.49	666.49	671.49	676.49
Rated current Impp [A]	17.41	17.43	17.45	17.46	17.47
Rated voltage Vmpp [V]	37.35	37.60	37.85	38.10	38.36
Short-circuit current Isc [A]	18.38	18.41	18.43	18.44	18.45
Open-circuit voltage Uoc [V]	44.46	44.76	45.06	45.36	45.67
Efficiency at STC up to	21.13%	21.29%	21.46%	21.62%	21.78%
Efficiency at 200 W/m ²	20.68%	20.84%	21.01%	21.16%	21.31%
Electrical data at NOCT					
Power at Pmpp [Wp]	482.56	486.27	489.98	493.70	497.41
Rated current Impp [A]	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Rated voltage Vmpp [V]	34.47	34.73	35.00	35.26	35.53
Short-circuit current Isc [A]	14.85	14.87	14.89	14.90	14.90
Open-circuit voltage Uoc [V]	41.04	41.33	41.62	41.91	42.21

Specification as per STC (Standard test conditions): irradiance 1000W/m² | module temperature 25°C | Air Mass = 1.5
 NOCT (nominal operating cell temperature): irradiance 800 W/m² | wind speed 1 m/sec | ambient temperature 20°C | cell operating temperature 45 +/-2°C | Air Mass = 1.5

Bifacial Gain* (e.g. 660Wp)					
Backside power gain [Wp]	5%	10%	15%	20%	30%
Rated power Pmpp [Wp]	693.00	726.00	759.00	792.00	825.00
Rated current Impp [A]	18.31	19.18	20.05	20.92	21.79
Rated voltage Vmpp [V]	37.85	37.85	37.85	37.86	37.86
Short-circuit current Isc [A]	15.38	16.11	16.84	17.57	18.30
Open-circuit voltage Uoc [V]	45.06	45.06	45.06	45.07	45.07

*depending on the reflection of the underlying surface

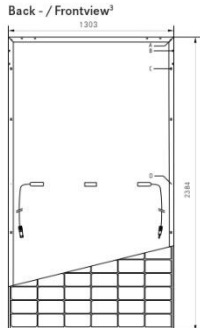
Limiting values	
Max. system voltage max. return current	1500 V 30 A
Safety class Fire safety class	II A (according to IEC 61730)
Operating Temperature	-40 bis 85°C
Max. tested pressure load-/tensile ²	2400 Pa / 1600 Pa

Temperature coefficient	
Temperature coefficient [U] [I] [P]	-0.285% /°C 0.049% /°C -0.360% /°C

Specifications	
Number of cells (matrix)	132 (6x22) 210 mm x 105 mm
Module dimensions (L x W x H) ³ Weight	2384 mm x 1303 mm x 35 mm 34,0 kg
Bifaciality factory	75 +/-5% approx. 5%
Front-side	3,2 mm tempered, highly transparent, anti-reflection solar glass
Back-side	transparent foil
Frame	stable, anodised aluminium frame
Embedding material	POE (polyolefin elastomer)
Junction Box	At least IP67
Cable	Symmetrical cable lengths > 0.3 m and 0.4 m, 4 mm ² solar cable
Diodes	3 Schottky Diodes
Connectors	MC4 or equivalent with IP67
Hail test (max. hailstorm)	Ø 45 mm impact velocity 23 m/s ± 83 km/h

The specifications and average values can vary slightly. Relevant is the corresponding data of the individual measurement. Specifications are subject to change without notice. Measurement tolerance depending on equipment: rated power +/- 3%, other values +/- 10%. All information given in this data sheet corresponds to DIN EN 60380. A potential light-induced degradation of the power after commissioning is not considered here.
 Further information in the installation manuals.
 1 The specific warranty conditions are given under www.luxor.solar/downloads.html
 2 Horizontal mounted; for details please check mounting instruction
 3 Tolerance L/W +/- 3 mm, H +/- 2mm, the dimensions given in the order confirmation will be decisive
 4 Location and dimensions of holes on request

Luxor, your specialised company




Drilled holes⁴

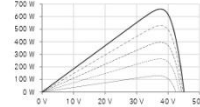
- A: 4 x drainage
- B: 16 x ventilation
- C: 8 x mounting
- D: 2 x earthing

Electrical characteristics


UI-diagram e.g. 660Wp



UF-diagram e.g. 660Wp



Legend for irradiance levels:
 --- 200 W/m²
 - - - 400 W/m²
 - - - 600 W/m²
 - - - 800 W/m²
 ——— 1000 W/m²




Guidelines:
 93/68/EEC
 2014/35/EU (LVD)
 2014/30/EU (EMC)

The validity of the certificates/listings for a specific country has to be examined under:
www.luxor.solar/downloads.html

Eco Line_HC_Bifacial_SW_M132/650-670W_04/2022

Εικόνα 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάνελ



Technical overview

PTMx is available in four basic models of different size, that can be combined in order to realize customized solar fields, starting from few hundred square meters of collecting surface.

Model	PTMx-18	PTMx-24	PTMx-30	PTMx-36
Net collecting surface [m ²]	41	54	68	82
Aperture width [m]	2,4			
Length [m]	20,7	27,2	33,2	39,6
Reference thermal capacity* [kWh]	23	31	39	47
Mirrors	Weather resistant highly reflective tempered glass			
Receiver	Not evacuated and selectively coated receiver			
Working temperature	Hot water up to 110°C; thermal oil up to 250°C			
Heat transfer fluid	Hot water or thermal oil			
Pressure	Up to 10 bar			

*= corresponding to a specific power of 537 W/m² at the following operating conditions: T_{collector} = 200°C; T_{oil} = 180°C; T_{external} = 30°C; DNI = 900 W/m²; Longitudinal Angle = 0°.

Further features of Soltigua PTMx collectors include:

- Maximum efficiency for solar cooling
- High energy savings
- Reduction of CO₂ emission
- Elimination of environmental impact
- Modern design for a sustainable architecture
- Wide range of working temperature, unreachable by traditional collectors
- Adaptable to all sizes, from mini to maxi

Εικόνα 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά Παραβολικών ηλιακών συλλεκτών

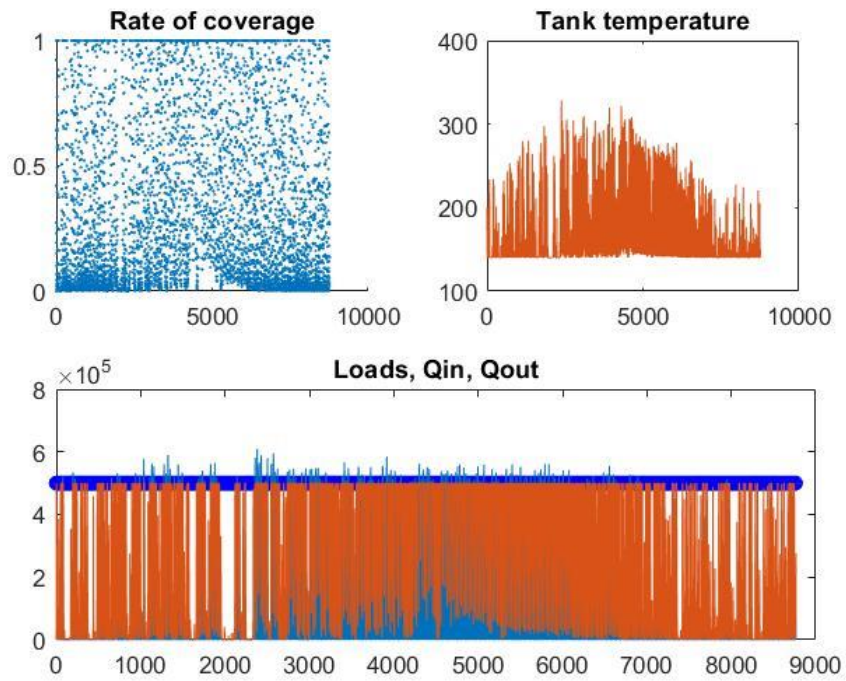
<https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/237723/nomos-4414-2016>

Άρθρο 4

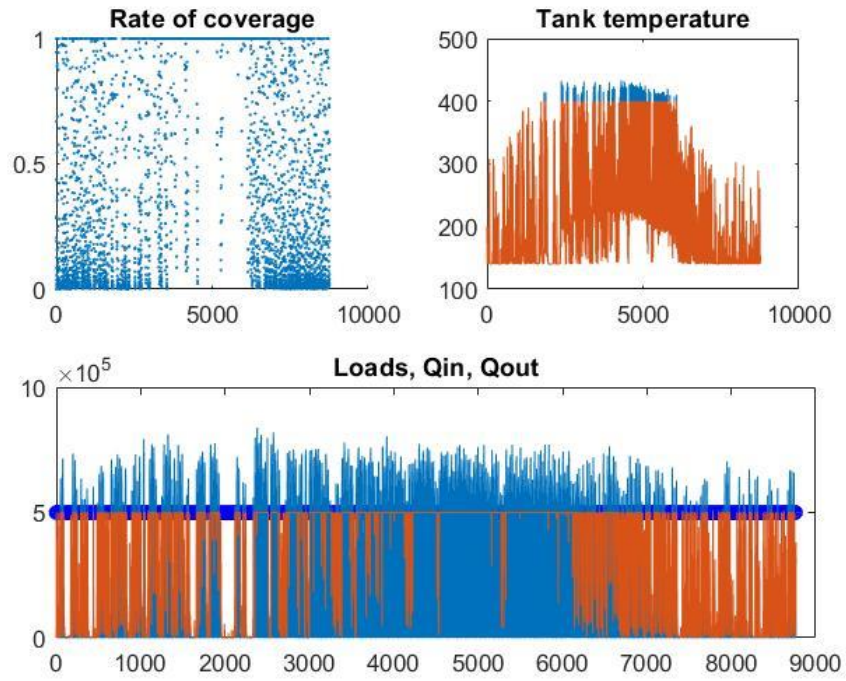
Διαγράμματα Κάλυψης φορτίου – Θερμοκρασίας θερμοδοχείου

Παραβολικά Ηλιακά

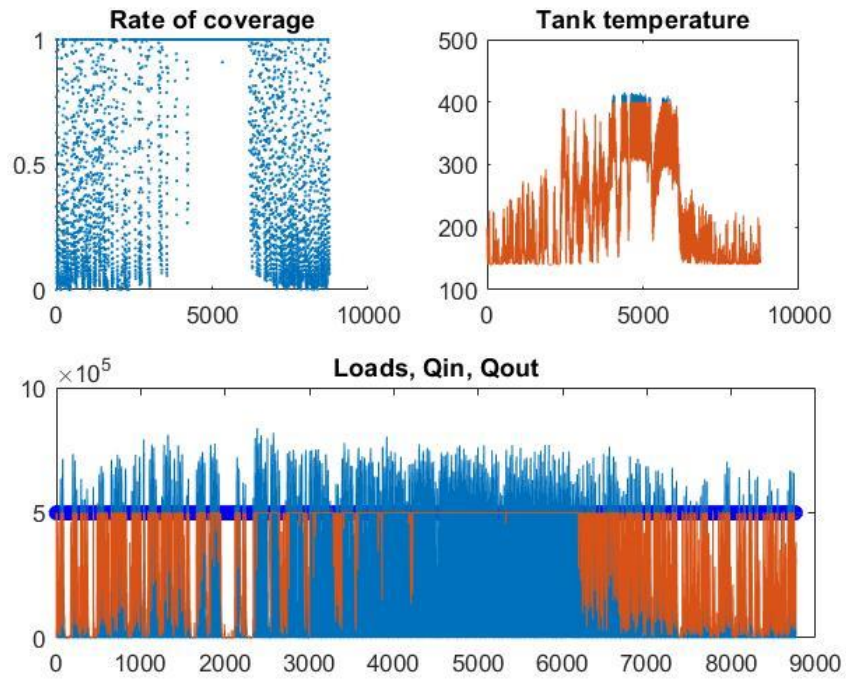
P=540kW E=3MWh



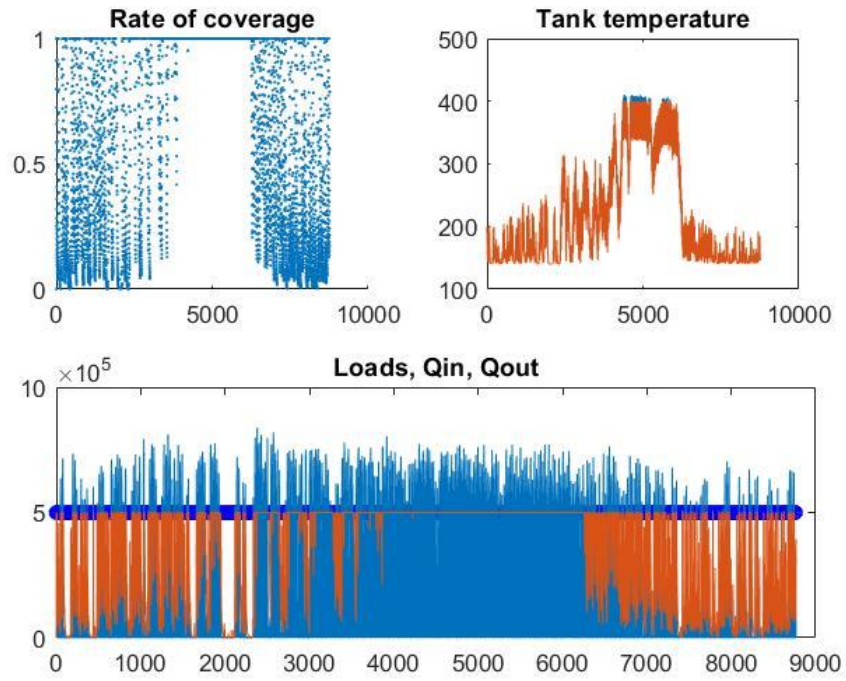
P=742,5kW E=3MWh



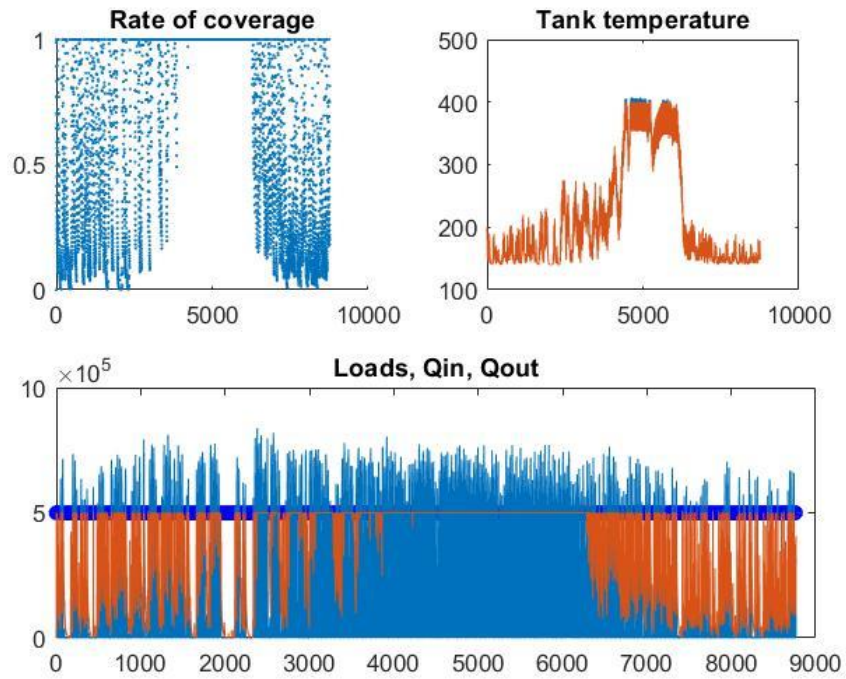
P=742,5kW E=6MWh



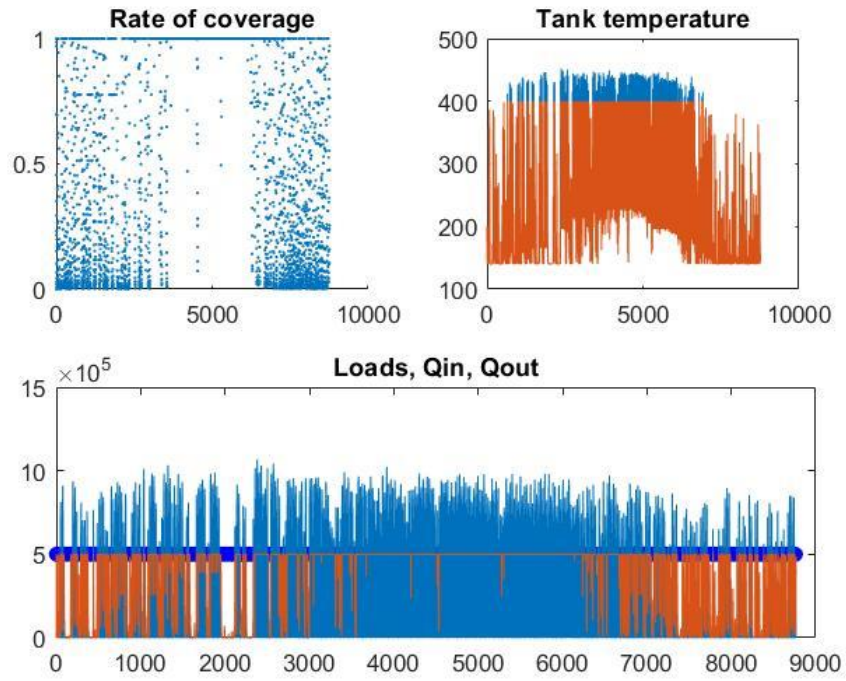
P=742,5kW E=9MWh



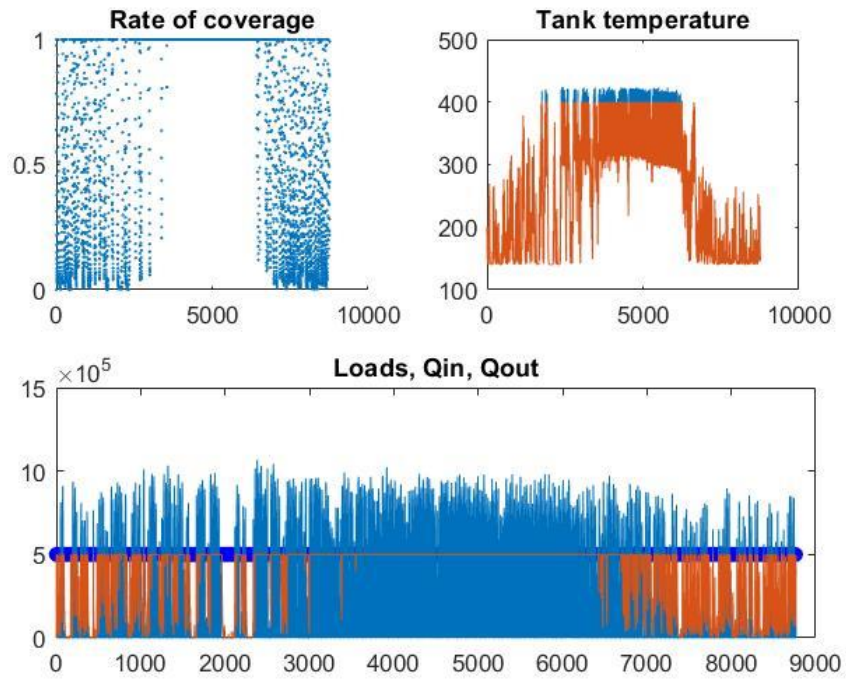
P=742,5kW E=12MWh



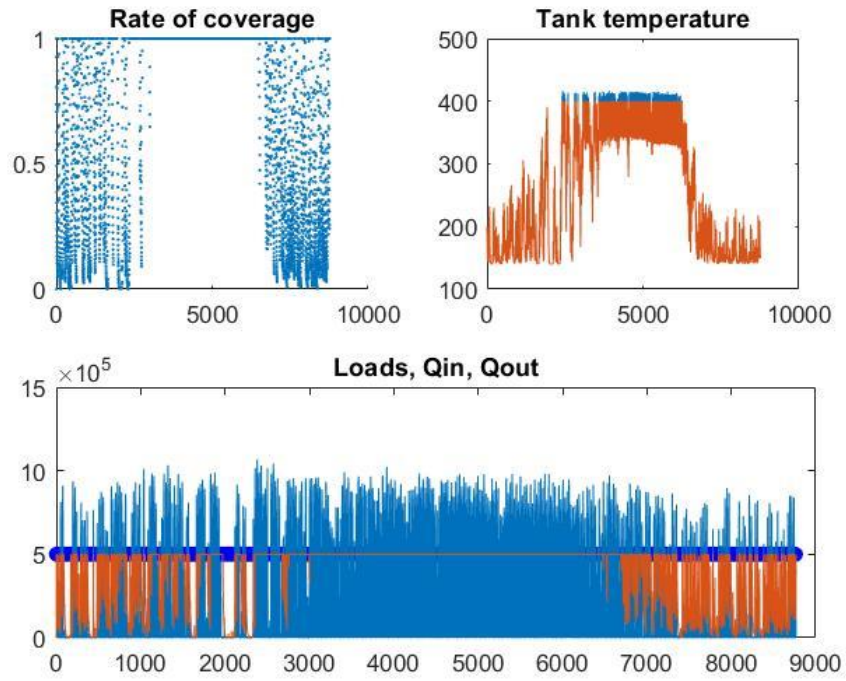
P=945kW E=3MWh



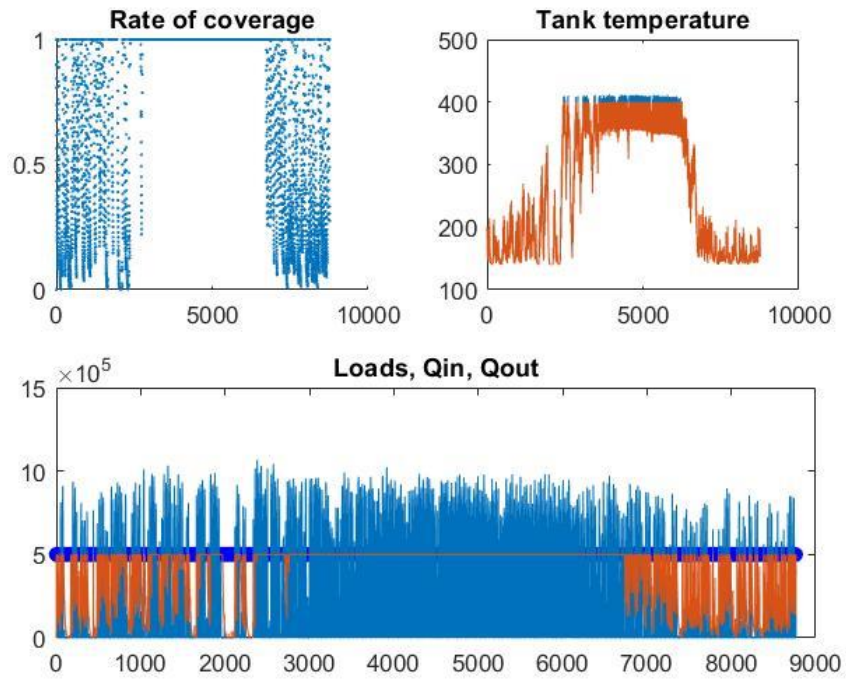
P=945kW E=6MWh



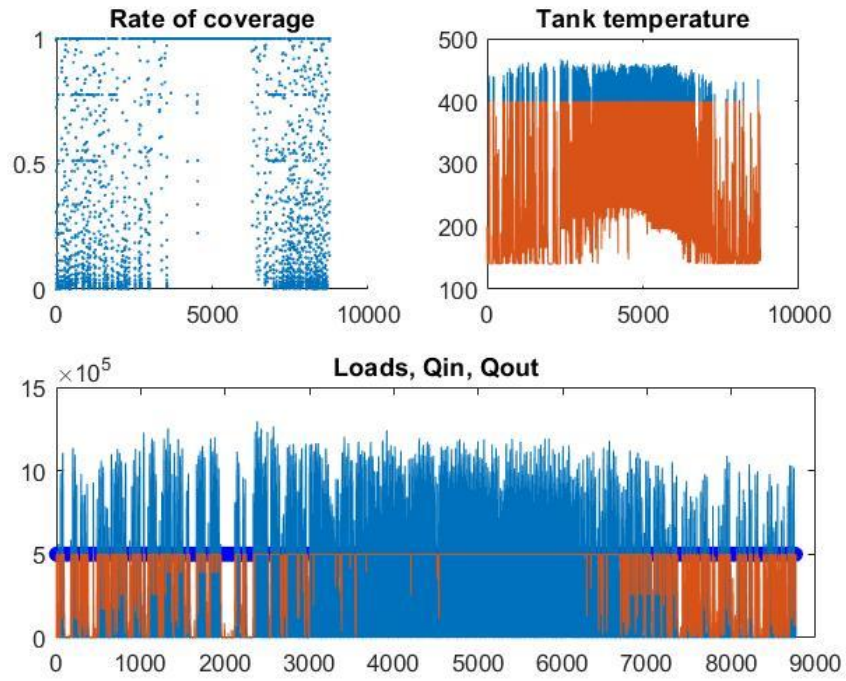
P=945kW E=9MWh



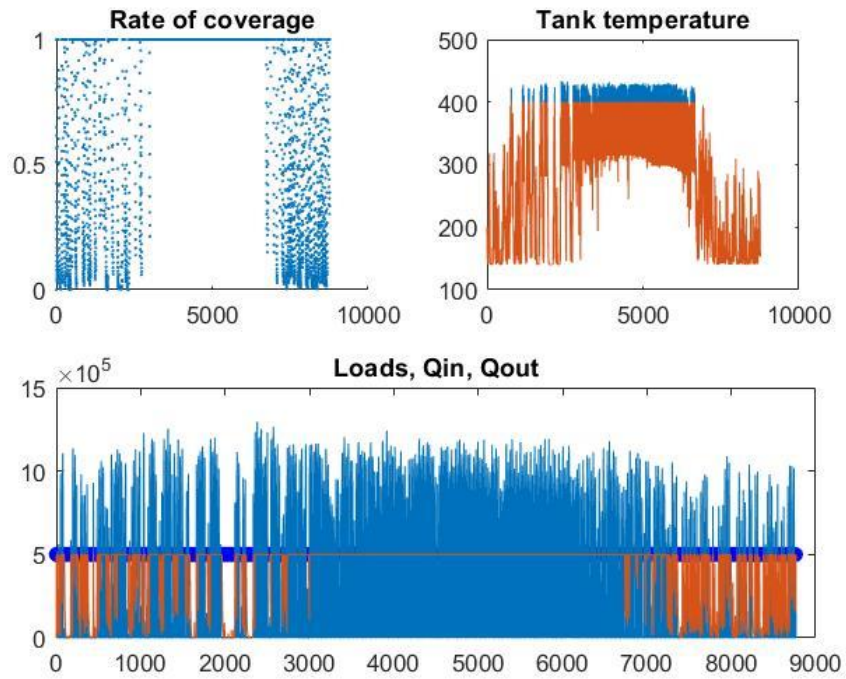
P=945kW E=12MWh



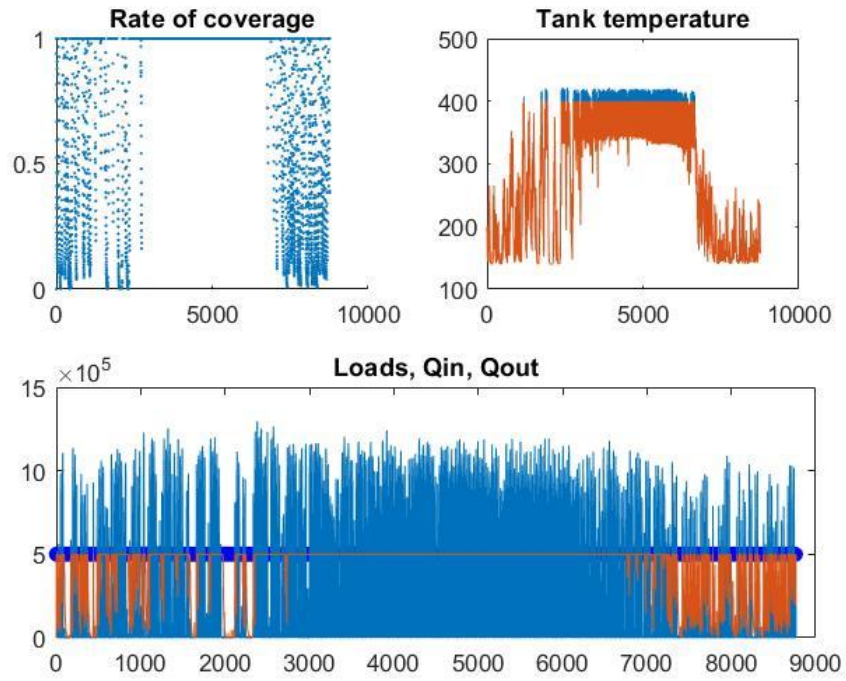
P=1147,5kW E=3MWh



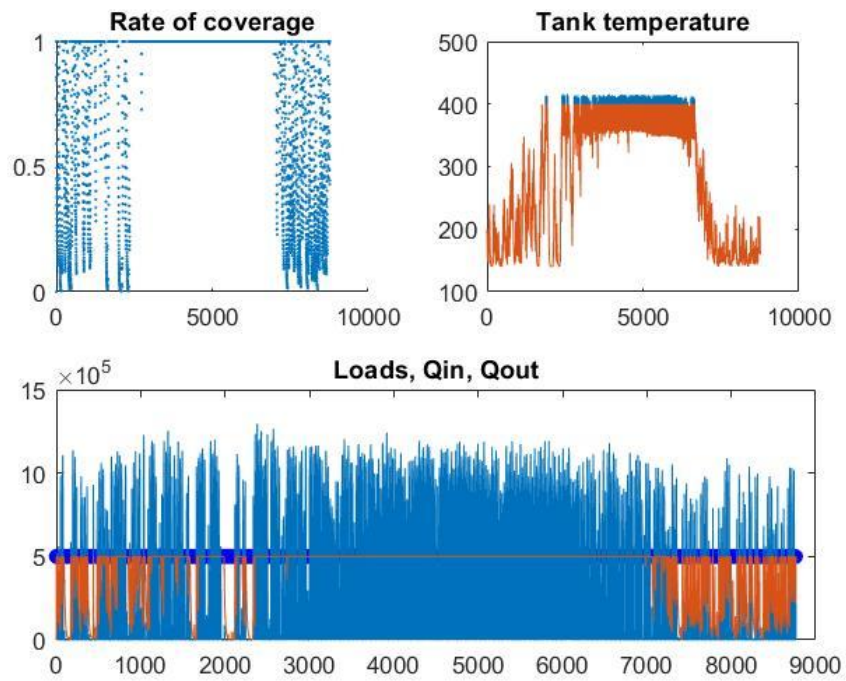
P=1147,5kW E=6MWh



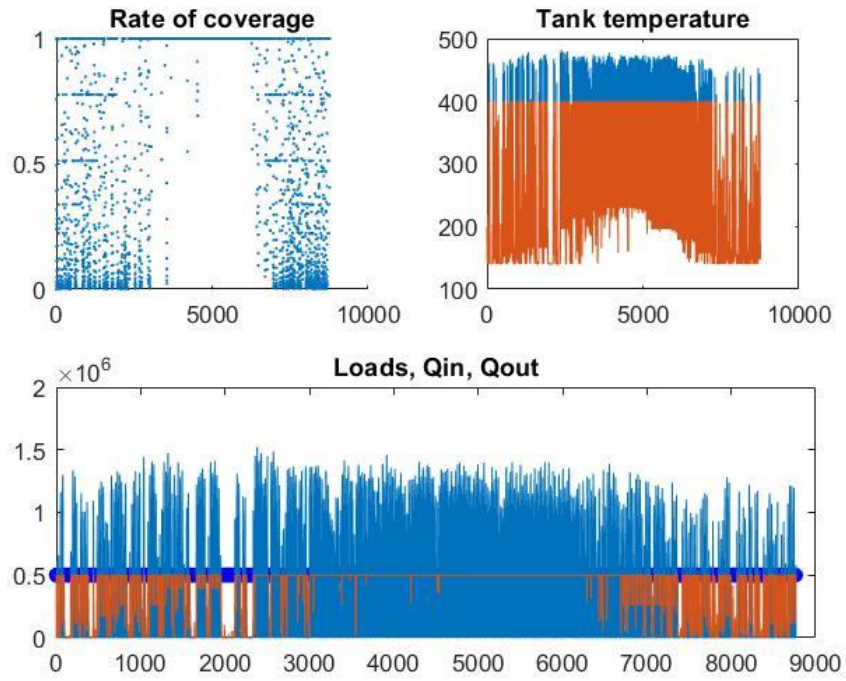
P=1147,5kW E=9MWh



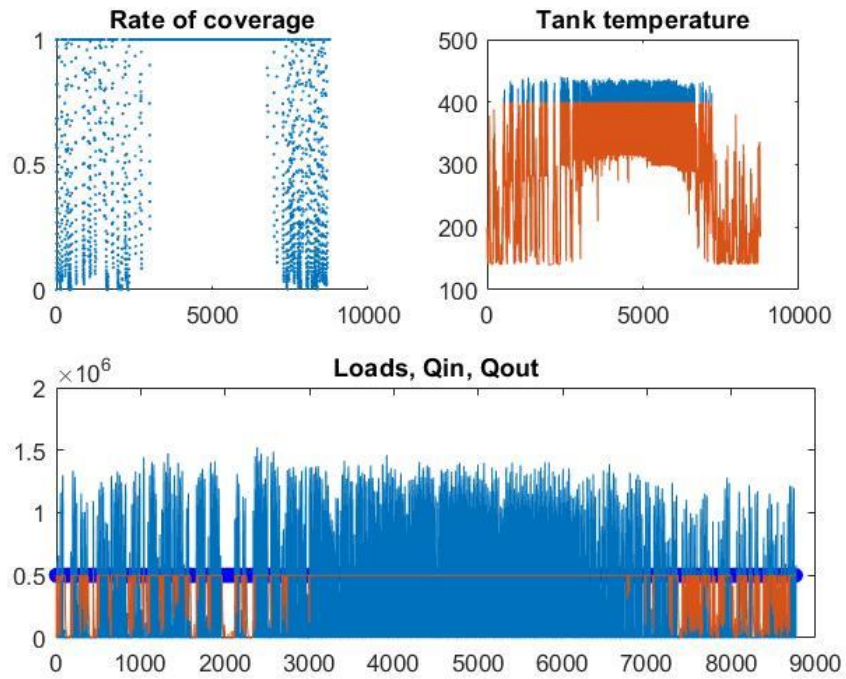
P=1147,5kW E=12MWh



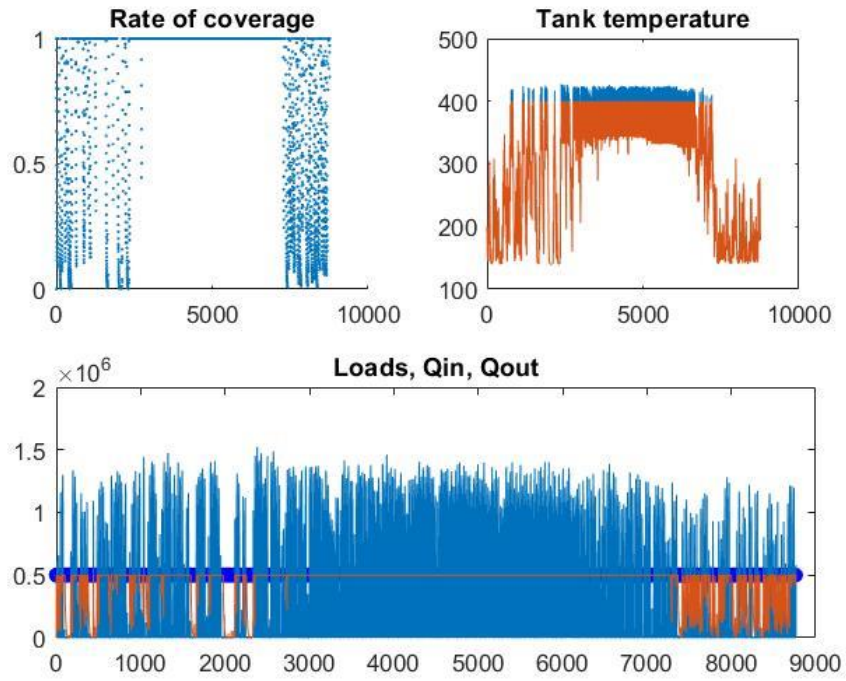
P=1350kW E=3MWh



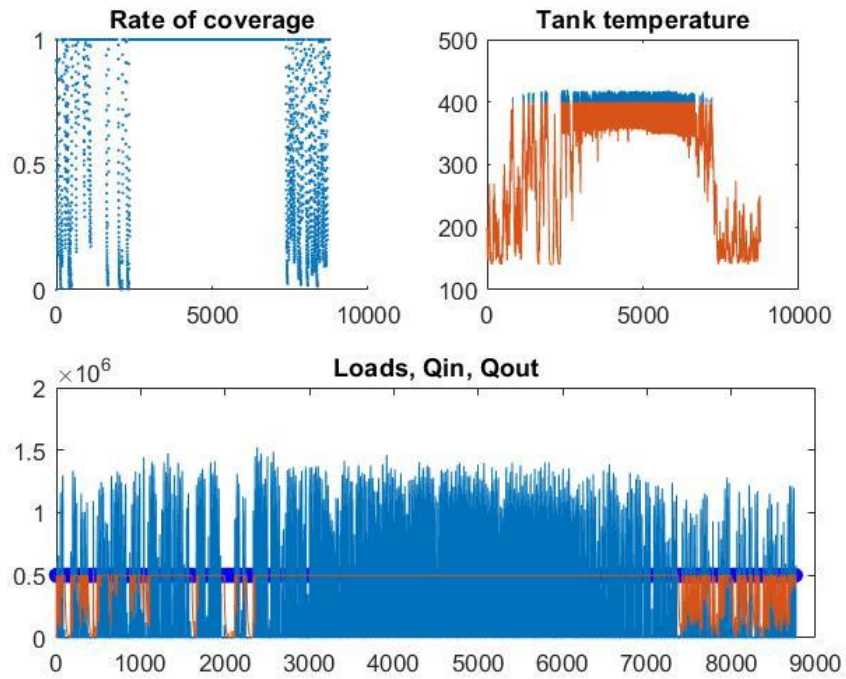
P=1350kW E=6MWh



P=1350kW E=9MWh

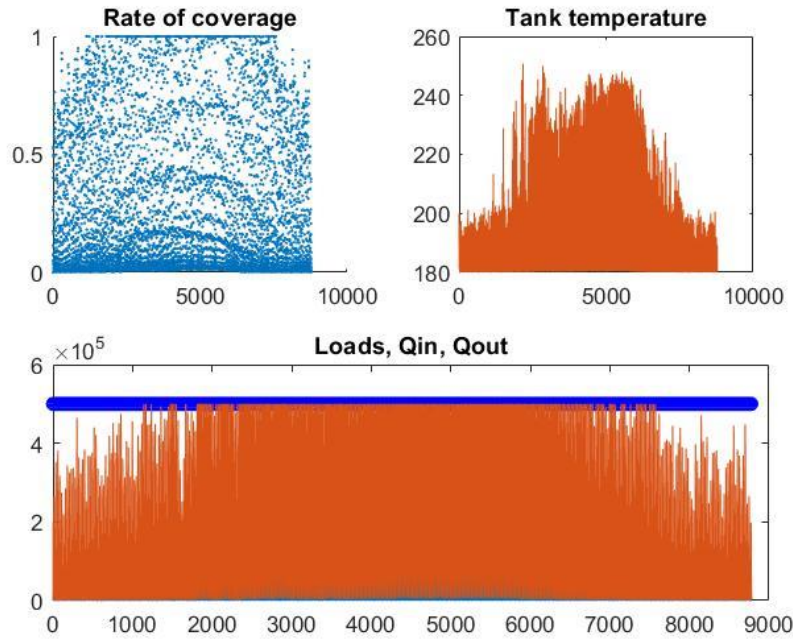


P=1350kW E=12MWh

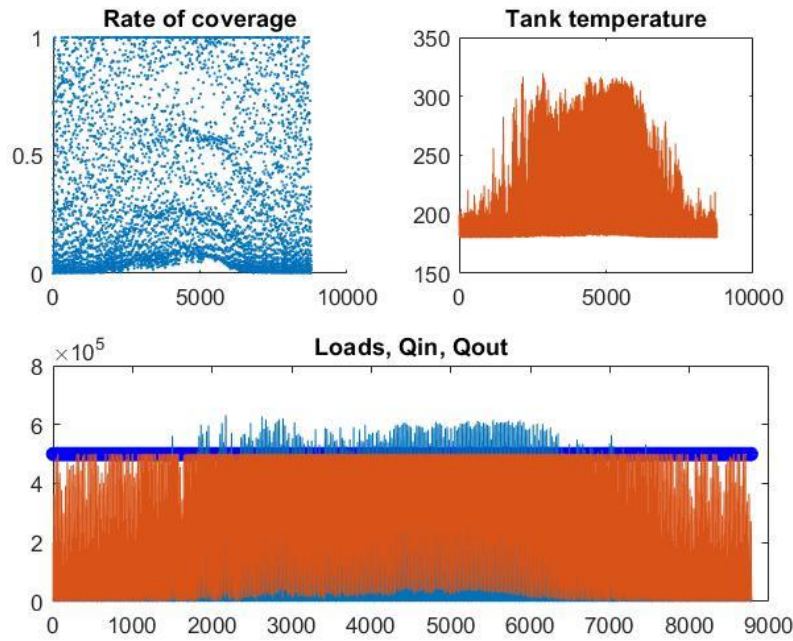


Φωτοβολταϊκά

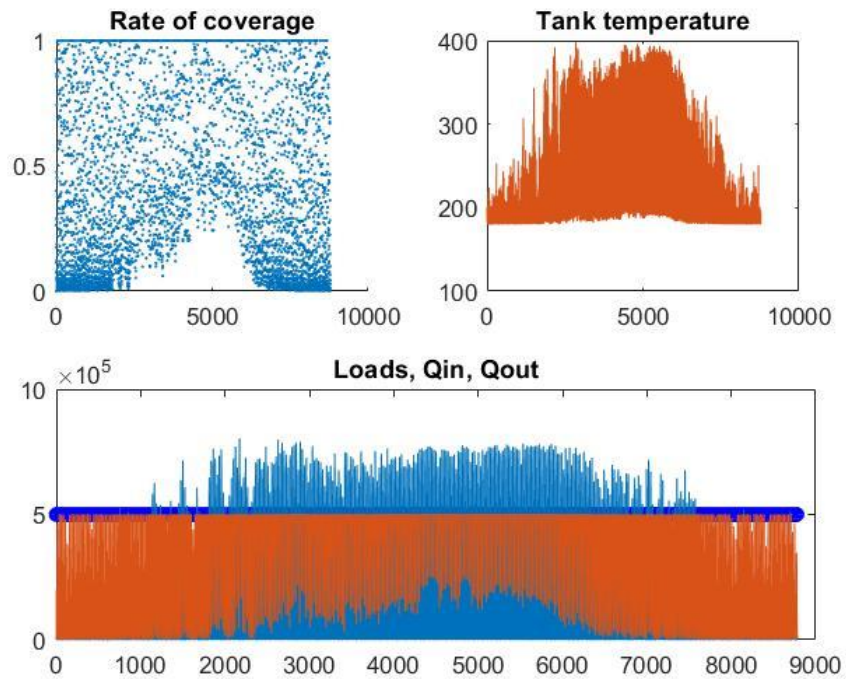
P=540kW E=3MWh



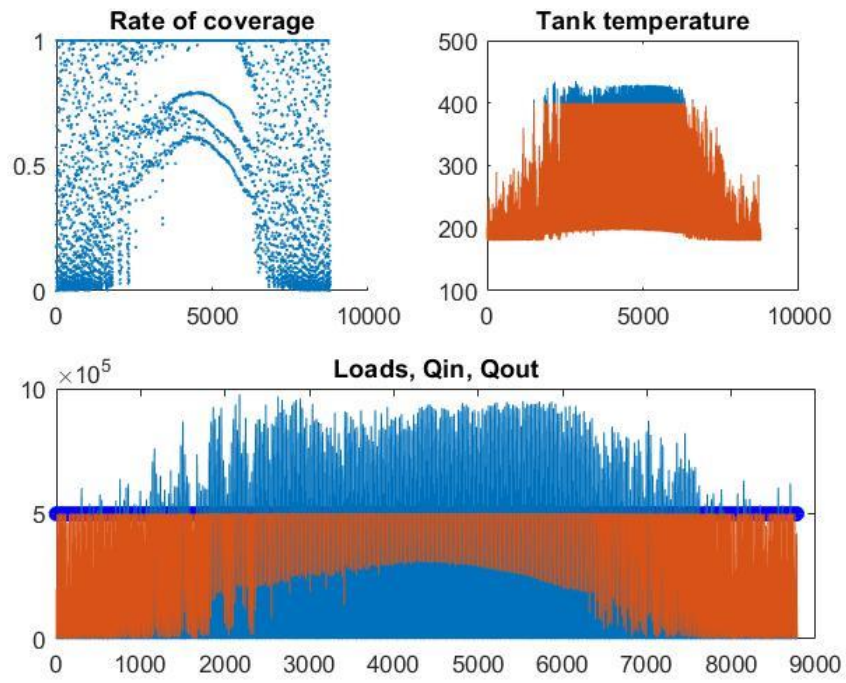
P=742,5kW E=3MWh



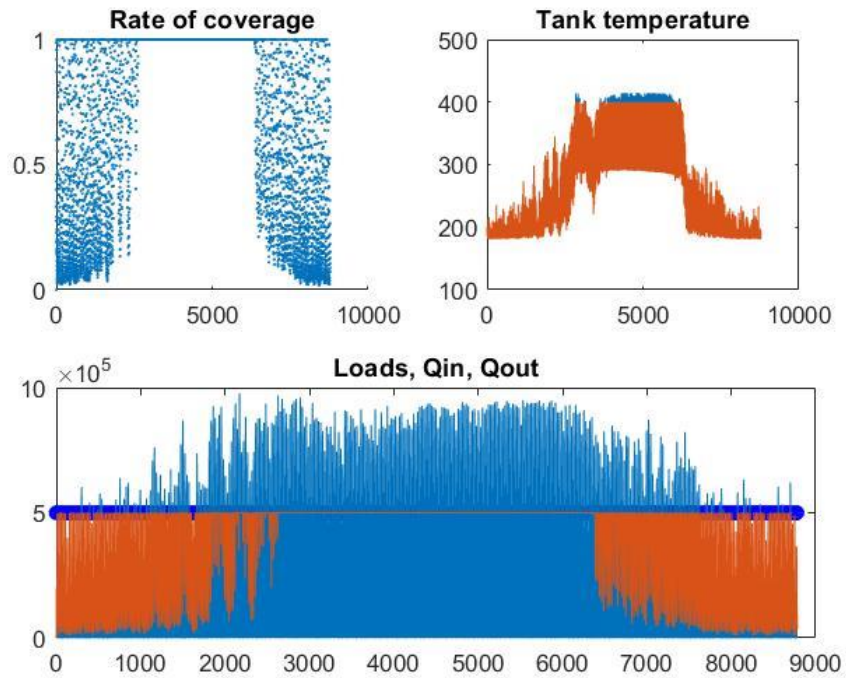
$P=945\text{kW}$ $E=3\text{MWh}$



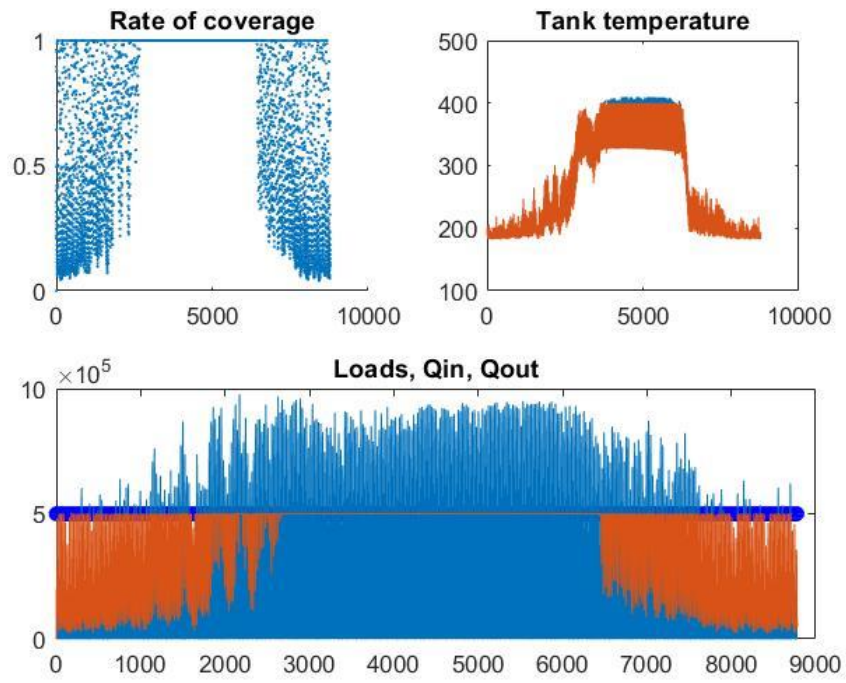
$P=1147,5\text{kW}$ $E=3\text{MWh}$



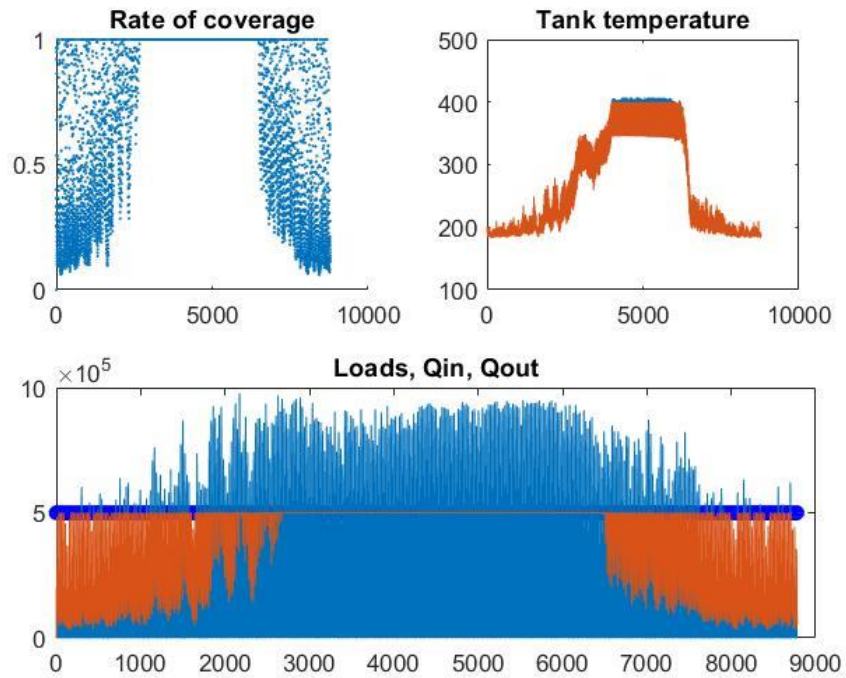
P=1147,5kW E=6MWh



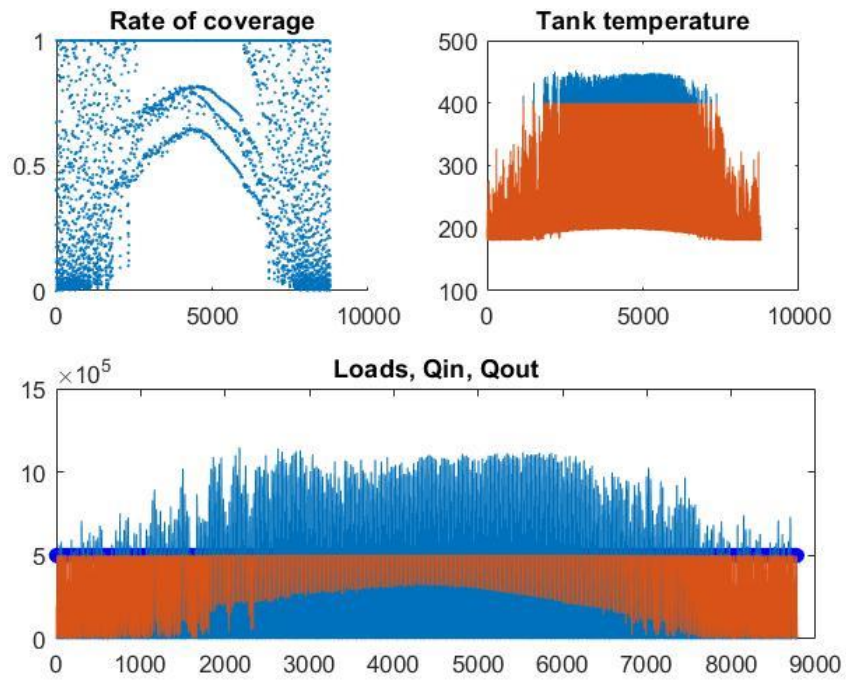
P=1147,5kW E=9MWh



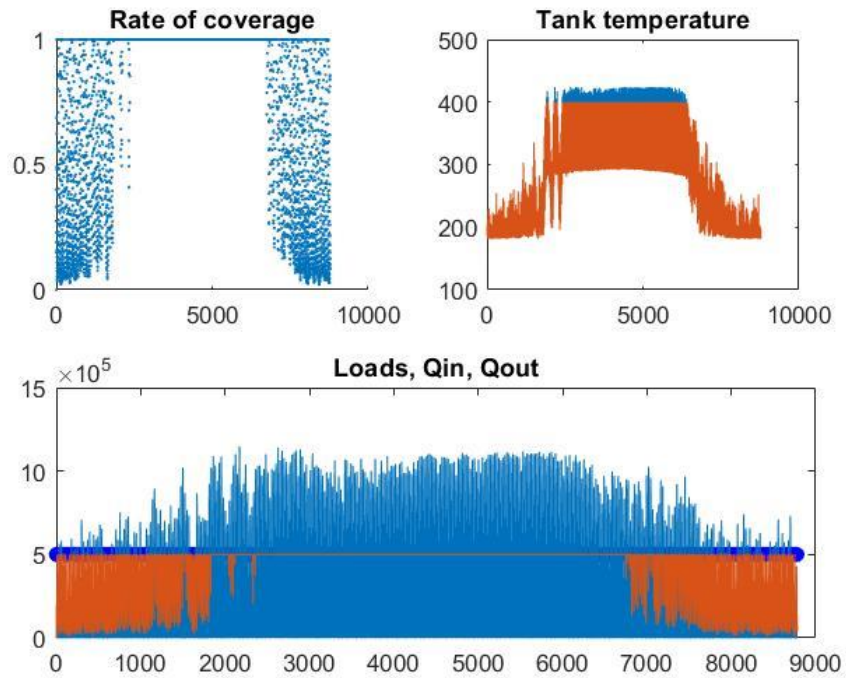
$P=1147,5\text{kW}$ $E=12\text{MWh}$



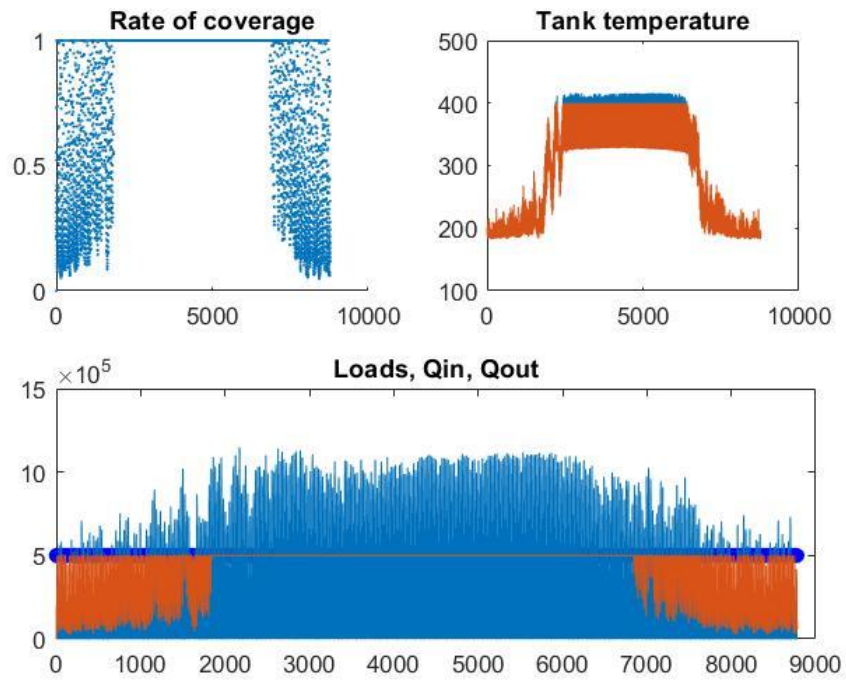
$P=1350\text{kW}$ $E=3\text{MWh}$



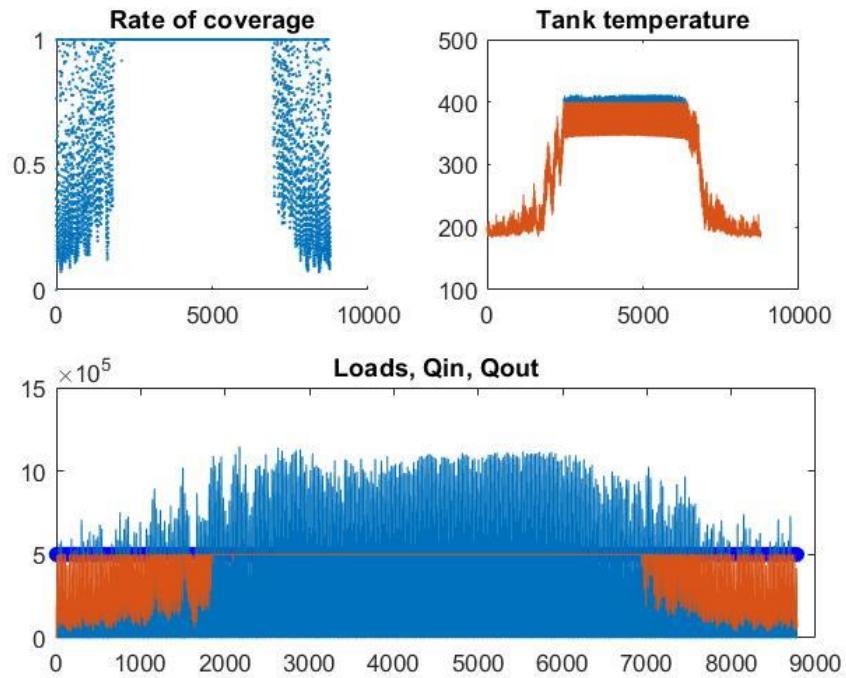
$P=1350\text{kW}$ $E=6\text{MWh}$



$P=1350\text{kW}$ $E=9\text{MWh}$



P=1350kW E=12MWh



Κώδικας Παραβολικών Ηλιακών

```

%test duo tha valoume to arxeio tw n fwtovoltaikwn
t1=1:1:8767;
%parabolic tetragwnika
Em=2000;
% dedomena paragogis
path(path, 'C:\Users\Nikos Athineos\Desktop\kwdikas
2\parabolic code\parabolic code 2')
y= xlsread('Timeseries_DNI.xlsx');
y1=y(:,1);
%dedomena katanomis
parabolic_power=y1(8:8774).*E;%Watt
t=t1';
gir=0.99 ;
% Ypologismos HTF1
t_steps_htf1 = length(parabolic_power);
r_htf1=1000;%piknotita
cp_htf1=1.52;%specific heat (J/kgK)
m_htf1=0.2*E; %(m')HTF fluid flow rate(kg/s)
tout=tin+p/(m'cp)
T_fluid = zeros(1, t_steps_htf1);
T_fluid(1) = 200;% temperature start
T_htf_max=400;

% Ypologismos HTF2
t_steps_htf2 = length(parabolic_power);
r_htf2=1000;%piknotita
cp_htf2=1.52;%specific heat (KJ/kgK)
m_htf2=0.4*E; %(m')HTF fluid flow rate(kg/s)
tout=tin+p/(m'cp)
T_fluid2 = zeros(1, t_steps_htf2);
T_fluid2(1) = 200;% temperature start
T_htf2_max=500;
dt_htf2=50;

% Calculate energy stored in solid state heat tank
%Solid state tank dimensions(m)
max_capacity=200000;
L=2;
W=2;

```

```

H=2;
% Calculate tank volume (m^3)
V = L*W*H;
%Tank material properties
r_cement=9000; %density (kg/m^3)
cp_cement = 500; % specific heat (J/kgK)
k = 25; % thermal conductivity (W/mK)
m=57142.86;
% Calculate tank heat capacity (J/K)
Cp = V*r_cement*cp_cement;%kg
% Calculate number of time steps
t_steps = length(T_fluid);

% Initialize tank temperature array (°C)
T_tank = zeros(1, t_steps);
% Set initial tank temperature
T_tank(1) = 200;
T_ambient=20;

%dedomena thermikis katanalwsis
loads2=ones(8767);% thermal
loads_2=(loads2(8767,:)*500000)'; %thermal load

%THERMAL LOADS 2
P=5; %ypsili piesi kiklou nerou atomou (bar)
h1=377.22;
h2=2739.4;
m_water=(loads_2./(h2-h1));
dt_water=40;%
%paroxi nerou
T_mirror(1)=200;
C=1.62;%kj/kgK
% temperature
% Loop through time steps
m_htf2=(m_water.*(h2-h1))./(cp_htf2*dt_htf2);
% parabolic trough coeff
a=0.75;
b=0.22;
T_or=140;
T_tank2(1)=200;
T_max=400;

```

```

for i= 2:t_steps
    % Calculate temperature change (°C)
    if parabolic_power(i)==0
        parabolic_power(i)=0.01;
    end
    c(i)=b*(T_fluid(i-1)-T_ambient)/parabolic_power(i-
1);
    if parabolic_power==0.01
        c(i)=0.76;
    end
    q_in(i)=parabolic_power(i-1).*(a)-c(i);
    if q_in(i)<0
        q_in(i)=0;
    end
    q_in2(i)=q_in(i);
    if q_in2(i)>loads_2(i)
        q_in2(i)=loads_2(i) ;
    end
    if T_fluid(i-1)<T_or
        T_fluid(i-1)=T_or;
        q_out(i)=0;
    end
    if T_or<=T_fluid(i-1)<=T_max
        T_fluid(i)=T_tank(i-1);
        q_out(i)=q_in(i)+m_htf2(i-
1)*cp_htf2*(T_fluid(i)-T_or);
    end
    if q_out(i)>loads_2(i);
        q_out(i)=loads_2(i);
    end
    k(i)=(2*q_in(i) - q_out(i)*1.05)/(C*m);
    T_tank(i)=T_tank(i-1)+k(i);
    T_tank2(i)=T_tank(i-1)+k(i);
    if T_tank(i)>T_max
        T_tank(i)=T_max;
    end
    if T_tank(i)<T_or
        T_tank(i)=T_or;
        T_tank2(i)=T_or;
    end
end

```

```
end

subplot(2,2,1)
n=q_out./loads_2';
n1=sum(n)/8760
scatter(t,n,1)
title('Rate of coverage')

subplot(2,2,2)
plot(t,T_tank2)
hold on
plot(t,T_tank)
title('Tank temperature')

subplot(2,2,[3,4])
plot(t,loads_2,'b--o')
hold on
plot(t,q_in)
hold on
plot(t,q_out)
title('Loads, Qin, Qout')

n1=sum(n)/8760
energy_wasted=sum(T_tank2-T_tank)*C*m

energy_stored(i)=T_tank(i)*C*m;
energy_stored_tot=sum(energy_stored)
q_no_storage=sum(q_in)
q_gen=sum(q_out)
Dq=q_gen-q_no_storage
```

Κώδικας Φωτοβολταϊκών

```

%test duo tha valoume to arxeio twm fwtovoltaikwn
t1=1:1:8784;
%tetragwnika pv
E=6279.07;
% dedomena paragogis
path(path, 'C:\Users\Nikos Athineos\Desktop\kwdikas 2\pv
code\pv code 2')
y= xlsread('Timeseries_pv 2010_2020-1.xlsx');
y1=y(:,11);
pv_power=y1(10:8793).*10.05697;
t=t1';
% Ypologismos HTF1
t_steps_htf1 = length(pv_power);
r_htf1=1000;%piknotita
cp_htf1=1.52;%specific heat (J/kgK)
m_htf1=0.2*E; %(m')HTF fluid flow rate(kg/s)
T_fluid = zeros(1, t_steps_htf1);
T_fluid(1) = 200;% temperature start
T_htf_max=400;
% Ypologismos HTF2
t_steps_htf2 = length(pv_power);
r_htf2=1000;%piknotita
cp_htf2=1.52;%specific heat (KJ/kgK)
m_htf2=5; %(m')HTF fluid flow rate(kg/s)
tout=tin+p/(m'cp)
T_fluid2 = zeros(1, t_steps_htf2);
T_fluid2(1) = 200;% temperature start
T_htf2_max=500;
dt_htf2=50;
%Solid state tank dimensions(m)
max_capacity=200000;
L=2;
W=2;
H=2;
% Calculate tank volume (m^3)
V = L*W*H;
%Tank material properties
r_cement=9000; %density (kg/m^3)

```

```

cp_cement = 500; % specific heat (J/kgK)
k = 25; % thermal conductivity (W/mK)
m=57142.86;
% Calculate tank heat capacity (J/K)
Cp = V*r_cement*cp_cement;%kg
% Calculate number of time steps
t_steps = length(T_fluid);
% Initialize tank temperature array (°C)
T_tank = zeros(1, t_steps);
% Set initial tank temperature
T_tank(1) = 200;
T_tank2(1) = 200;
dt=8784;
gir=0.99 ;
%dedomena thermikis katanalwsis
loads2=ones(8784);% thermal
loads_2=(loads2(8784,:)*500000)'; %thermal load

%THERMAL LOADS 2

P=5; %ypsili piesi kiklou nerou atomou (bar)
h1=377.22;
h2=2739.4;
m_water=(loads_2./(h2-h1));
dt_water=40;%
%paroxi nerou
T_mirror(1)=200;
C=1.62;%kj/kgK
% temperature
% Loop through time steps
m_htf2=(m_water.*(h2-h1))./(cp_htf2*dt_htf2);

qin=pv_power;

% Set initial tank temperature
T_tank(1) = 200;
T_or=180;
T_max=400;
% temperature
%loop
for i = 2:t_steps

```

```

% Calculate temperature change (°C)
q_in(i)=pv_power(i-1);
if q_in(i)<0
    q_in(i)=0;
end
q_in2(i)=q_in(i);
if q_in2(i)>loads_2(i)
    q_in2(i)=loads_2(i) ;
end
if T_fluid(i-1)<T_or
    T_fluid(i-1)=T_or;
    q_out(i)=0;
end
if T_or<=T_fluid(i-1)<=T_max
    T_fluid(i)=T_tank(i-1);
    q_out(i)=q_in(i)+m_htf2(i-
1)*cp_htf2*(T_fluid(i)-T_or);
end
if q_out(i)>loads_2(i);
    q_out(i)=loads_2(i);
end
k(i)=(2*q_in(i) - q_out(i)*1.05)/(C*m);
T_tank(i)=T_tank(i-1)+k(i);
T_tank2(i)=T_tank(i-1)+k(i);

if T_tank(i)>T_max
    T_tank(i)=T_max;
end
if T_tank(i)<T_or
    T_tank(i)=T_or;
    T_tank2(i)=T_or;
end

end

subplot(2,2,1)
n=q_out./loads_2';
n1=sum(n)/8760
scatter(t,n,1)
title('Rate of coverage')

subplot(2,2,2)

```



```
plot(t,T_tank2)
hold on
plot(t,T_tank)
title('Tank temperature')

subplot(2,2,[3,4])
plot(t,loads_2,'b--o')
hold on
plot(t,q_in)
hold on
plot(t,q_out)
title('Loads, Qin, Qout')

n1=sum(n)/8760
energy_wasted=sum(T_tank2-T_tank)*C*m

energy_stored(i)=T_tank(i)*C*m;
energy_stored_tot=sum(energy_stored)
q_no_storage=sum(q_in)
q_gen=sum(q_out)
Dq=q_gen-q_no_storage
```