



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΗΛΙΑΚΟΙ
ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ
ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Διπλωματική εργασία

της

Μαρίας Ι. Κοτοφόλου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: ΗΛΙΑΚΟΙ
ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ
ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Διπλωματική εργασία

Μαρία Ι. Κοτοφώλου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαΐου 2016

.....

Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π. Βασιλείου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Γ. Ματσόπουλος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Μαρία Κοτοφώλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός
Υπολογιστών

Copyright © Μαρία Κοτοφώλου , 2016 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τα Συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος, τη λειτουργία και τις προοπτικές εξέλιξης τους. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκε προγραμματιστικά ένας αλγόριθμος προσανατολισμού των ηλιοστατών του συστήματος, ο οποίος και παρουσιάζεται αναλυτικά.

Στην αρχή της εργασίας, γίνεται εκτενής αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και τη δυναμική της, ως πηγή καθαρής, ανανεώσιμης ενέργειας. Ακόμα, αναλύονται η λειτουργία και οι διάφορες τεχνολογίες των Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα Συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος, η τεχνολογία που χρησιμοποιούν και τα πλεονεκτήματά τους έναντι άλλων τεχνολογιών. Επίσης, παρουσιάζονται οι προοπτικές εξέλιξης τους στο μέλλον, τόσο από τεχνική σκοπιά, όσο και στα πλαίσια της διεθνούς ενεργειακής αγοράς.

Η αποτελεσματική λειτουργία των Συστημάτων Ηλιακών Πύργων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον έλεγχο του πεδίου των ηλιοστατών και την όσο το δυνατόν ακριβέστερη στόχευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο δέκτη του συστήματος στην κορυφή του πύργου. Γι' αυτό το λόγο, η παρούσα εργασία παρουσιάζει έναν σχετικά απλό μαθηματικό αλγόριθμο προσανατολισμού του ηλιοστάτη. Επίσης, στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε εισήχθησαν κάποια δεδομένα της θέσης του Ήλιου για συγκεκριμένες μέρες του χρόνου. Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης.

Τέλος, γίνεται αναφορά σε κάποια παραδείγματα πειραματικών και εμπορικών εφαρμογών Ηλιακών Πύργων Ισχύος.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος, Συστήματα Κεντρικού Δέκτη, Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, Ηλιοστάτης

Abstract

The subject of this diploma thesis is Solar Power Tower Systems, their function and potential development. Furthermore, in the context of the thesis, an algorithm to estimate the alignment of the heliostats in the system is developed and presented extensively.

Firstly, there is an extensive report in solar radiation and its potential as a clean, renewable energy source. Moreover, there is a presentation of Concentrated Solar Systems, their operation, and the various types of existing technologies.

Subsequently, Solar Power Tower Systems are described, giving emphasis on their operation and their advantages over other technologies. There is also a report on their potential advancements in the future from a technical perspective, as well as in the context of the international energy market.

The efficiency of Solar Power Towers depends strongly on the alignment and control of the heliostat field and the accuracy of solar deflection from the surface of the heliostat to a fixed receiver in the upper part of the tower. Therefore, in this thesis, a relatively simple mathematic model of heliostat alignment is developed. Data for the Sun position on particular days of the year was inserted in the model. The results of this simulation are displayed in the thesis.

At the end, some examples of experimental and commercial applications of Solar Power Tower Systems are reviewed.

Keywords: Solar Power Tower, Central Receiver Systems, Concentrated Solar Power Systems (CSP), Heliostat

Περιεχόμενα

Σκοπός	15
ΚΕΦ.1: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	16
1.1 Ο Ήλιος	16
1.2 Γεωμετρία Ήλιου-Γης	17
1.3 Το Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων	21
1.4 Η ηλιακή ακτινοβολία	24
1.5 Η ηλιακή ενέργεια	27
ΚΕΦ. 2: ΣΥΓΚΕΤΝΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	29
2.1 Η Λειτουργία των Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων ...	29
2.2 Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες	30
2.3 Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας	30
2.4 Υβριδοποίηση	36
2.5 Πλεονεκτήματα και Προοπτικές	38
2.6 Τεχνολογίες Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων	40
2.6.1 Γραμμικά Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα	42
2.6.1.1 Τα Παραβολικά Κοίλα	42
2.6.1.2 Οι Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel	46
2.6.2 Τα (Παραβολικά) Συστήματα Δίσκου-Μηχανής	47
ΚΕΦ. 3: ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ	50
3.1 Η Λειτουργία των Ηλιακών Πύργων Ισχύος	50
3.2 Οι Ηλιοστάτες	54
3.3 Ο Δέκτης	57
3.4 Πλεονεκτήματα και τεχνολογικές προοπτικές	59

3.5 Οικονομοτεχνική προσέγγιση	62
ΚΕΦ. 4: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ	
ΤΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ	66
4.1 Αλγόριθμος για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη	66
4.2 Αλγόριθμος για τον προσδιορισμό της θέσης του Ήλιου	75
4.3 Εφαρμογή του αλγορίθμου προσανατολισμού	
του ηλιοστάτη σε περιβάλλον N.I. Labview	80
4.3.1 Το Labview	80
4.3.2 Η εφαρμογή για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη	81
4.3.3 Πίνακες αποτελεσμάτων και γραφικές παραστάσεις	83
ΚΕΦ. 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΥΡΓΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	101
5.1 Πειραματικές εφαρμογές ηλιακών πύργων	101
5.1.1 Solar One	101
5.1.2 Solar Two	103
5.2 Εμπορικές εφαρμογές ηλιακών πύργων	109
5.2.1 Planta Solar 10	109
5.2.2 Planta Solar 20	112
5.2.3 Ivanpah Solar Electric Generating System	113
5.2.4 Gemasolar	114
Βιβλιογραφία	116

Σκοπός

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των Συστημάτων Ηλιακών Πύργων Ισχύος και η υλοποίηση ενός αλγορίθμου προσανατολισμού των ηλιοστατών του συστήματος κατά την κίνηση του Ήλιου.

Στα συστήματα Ηλιακού Πύργου, η ακριβής στόχευση της ακτινοβολίας και ο έλεγχος του πεδίου των ηλιοστατών αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ανάκλαση της ακτινοβολίας από τον ηλιοστάτη, όπως η θέση του Ήλιου, η ημερομηνία, η τοποθεσία της εγκατάστασης, το ύψος του πύργου και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ηλιοστάτη (μέγεθος, κλίση κτλ). Σε αυτή την εργασία γίνεται υπολογισμός του προσανατολισμού του ηλιοστάτη με βάση τις ηλιακές συντεταγμένες (ηλιακό αζιμούθιο, ηλιακό ύψος) και τις συντεταγμένες του πύργου στο οριζόντιο σύστημα (αζιμούθιο και ύψος).

Το πεδίο των ηλιοστατών αποτελεί το πιο ακριβό στοιχείο ενός σταθμού ηλιακού πύργου και η λειτουργία του παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση του πεδίου και του σταθμού γενικότερα. Ο ηλιοστάτης είναι το μέρος της εγκατάστασης που είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό της ηλιακής ακτινοβολίας και την ανάκλαση της στο σταθερό δέκτη. Μάλιστα, το κόστος του πεδίου των ηλιοστατών αποτελεί περίπου το 50% του συνολικού κόστους του σταθμού. Γίνεται, λοιπόν, σαφές γιατί η εύρεση ενός αποδοτικού και εύχρηστου αλγορίθμου για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη είναι εξαιρετικά σημαντική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1 Ο Ήλιος

Ο Ήλιος αποτελεί τη μοναδική πηγή ενέργειας που επηρεάζει τη δυναμική της ατμόσφαιρας και το κλίμα της Γης. Η ενέργεια από την ακτινοβολία του δίνει ζωή στη Γη για εκατομμύρια χρόνια και αποτελεί τη βασική ενεργειακή πηγή για τους ανθρώπους, αφού σε αυτήν οφείλεται ο σχηματισμός ή η διαθεσιμότητα της πλειονότητας των ενεργειακών πόρων που καταναλώνονται, εξαντλήσιμων και μη, με εξαιρέσεις την πυρηνική ενέργεια και τη γεωθερμική, που οφείλεται στη θερμοκρασία της Γης. Η ηλικία του εκτιμάται ότι είναι μεγαλύτερη από τα πέντε δισεκατομμύρια έτη, ενώ υπολογίζεται ότι θα συνεχίσει να εκπέμπει ακτινοβολία με τον ίδιο ρυθμό για άλλα τόσα έτη τουλάχιστον.

Ο Ήλιος είναι μια αέρια μάζα που αποτελείται βασικά από υδρογόνο. Το εσωτερικό του έχει την υψηλότερη θερμοκρασία και πυκνότητα. Η θερμοκρασία του είναι μεταξύ 15×10^6 - 40×10^6 Κ. Αποτελείται από αέρια με πυκνότητα μεταξύ 100 - 150 g/cm^3 , ενώ βρίσκεται σε μηχανική ισορροπία με το ίδιο το βάρος του. Το βάρος των αερίων πάνω από κάθε στρώμα στηρίζεται από την πίεση των αερίων και της ακτινοβολίας πάνω στο στρώμα αυτό. Για να διατηρηθεί ισορροπία μεταξύ βάρους και πίεσης, το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται στο κέντρο του και μεταδίδεται στην επιφάνεια είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που ακτινοβολεί.

Η «επιφάνεια» του Ήλιου ονομάζεται φωτόσφαιρα, αποτελείται από ανομοιογενή αέρια χαμηλής πυκνότητας και είναι η πηγή του μεγαλύτερου μέρους της ορατής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Μετά τη φωτόσφαιρα υπάρχουν διάφορα ακόμα στρώματα που αποτελούνται από διάφορα αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν και ο Ήλιος δεν έχει σταθερό μέγεθος, πρακτικά θεωρούμε τη διάμετρο του ίση με $1.391.960 \text{ km}$. Περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του περίπου μία φορά κάθε τέσσερις εβδομάδες (όπως φαίνεται από τη Γη). Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητας του, ο Ισημερινός του περιστρέφεται μία φορά κάθε 25-27 ημέρες ενώ οι πολικές περιοχές κάθε 30-35 ημέρες.

Ο Ήλιος λειτουργεί ως πυρηνικός αντιδραστήρας, όπου εκρήγνυνται αδιάκοπα εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου και μεταβάλλονται

σε ήλιο (He). Ενδεικτικά, κάθε δευτερόλεπτο 657 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου μεταβάλλονται σε 653 τόνους ηλίου. Η καύση αυτή είναι τόσο ισχυρή ώστε κάθε τετραγωνικό μέτρο του εκπέμπει περίπου 70000 Ηρ ενέργεια, ποσότητα που για να παραχθεί θα έπρεπε να καίμε κάθε δευτερόλεπτο περίπου 11 δισεκατομμύρια φορές την ετήσια παραγωγή της Γης σε κάρβουνο.

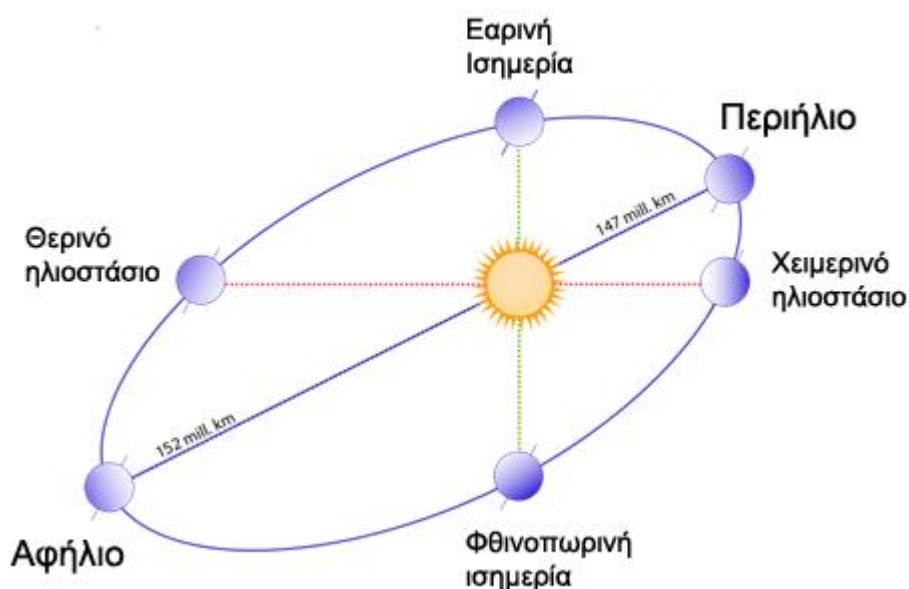
Από αυτές τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις, βασικά τη σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα(ο πυρήνας περιέχει το 40% της ηλιακής μάζας) παράγεται το 90% της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Ο Ήλιος εκπέμπει συνολικά ακτινοβολία ισχύος $3,72 \times 10^{23}$ kW. Για την εκπομπή της, η ισοδύναμη θερμοκρασία στην επιφάνεια του είναι 5777 K. Η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που φτάνει σε μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ακτινοβολίας, στη μέση απόσταση Γης-Ήλιου, ονομάζεται ηλιακή σταθερά (G_{sc}) και ισούται με 1367 W/m^2 .

1.2 Γεωμετρία Ήλιου-Γης

Η Γη βρίσκεται σε απόσταση περίπου $149,6 \times 10^6 \text{ km}$ από τον Ήλιο και κινείται γύρω από αυτόν ακολουθώντας μια ελλειπτική τροχιά με μικρή εκκεντρότητα. Το επίπεδο που περιέχει αυτή την τροχιά ονομάζεται εκλειπτικό επίπεδο (ecliptic plane). Ανάμεσα στο εκλειπτικό επίπεδο και τον άξονα της Γης, τον πολικό άξονα, σχηματίζεται μια γωνία που διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και ισούται με $23,45^\circ$. Η κλίση αυτή έχει ως αποτέλεσμα:

- Τη μεταβλητότητα της γωνίας με την οποία φτάνει η ηλιακή ακτινοβολία σε έναν τόπο κατά τη διάρκεια του έτους (άλλοτε κάθετα και άλλοτε με κλίση)
- Την επακόλουθη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους (μεγαλύτερη ακτινοβολία όταν φτάνει με μικρότερη κλίση ως προς την κατακόρυφη στον τόπο)
- Την ακολουθία των εποχών και τη διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας
- Τη μεταβλητότητα της θέσης του Ήλιου κατά το ηλιακό μεσημέρι (βρίσκεται ψηλότερα το καλοκαίρι και χαμηλότερα το χειμώνα)

Η Γη χρειάζεται 365 ημέρες για να ολοκληρώσει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο, ενώ περιστρέφεται και γύρω από τον πολικό άξονα και ολοκληρώνει μια πλήρη ιδιοπεριστροφή σε 24 ώρες. Η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του κέντρου του Ήλιου και του κέντρου της Γης μεταβάλλεται κατά την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο, κατά τη διάρκεια του έτους. Η πιο κοντινή απόσταση από τον Ήλιο σηματοδοτεί το περιήλιο της τροχιάς και είναι στις αρχές Ιανουαρίου, ενώ η πιο μακρινή της απόσταση σηματοδοτεί το αφήλιο της τροχιάς και συμβαίνει στις αρχές Ιουλίου. Η ετήσια μεταβολή της απόστασης Ήλιου-Γης λόγω της ελλειπτικής τροχιάς είναι $\pm 1,7\%$ και επαναλαμβάνεται με μικρές αλλαγές από χρόνο σε χρόνο. Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη είναι περίπου $\pm 3,4\%$.



Σχήμα 1.1: Το περιήλιο και το αφήλιο της εκλειπτικής τροχιάς της Γης

Η Γη, κάνοντας μια περιστροφή την ημέρα, γυρίζει με ένα ρυθμό 15° ανά ώρα σε σχέση με τον Ήλιο. Η περιστροφή της γύρω από τον άξονα της προκαλεί τις ημερήσιες μεταβολές στα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θέση του άξονα σε σχέση με τον Ήλιο προκαλεί εποχιακές μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία.

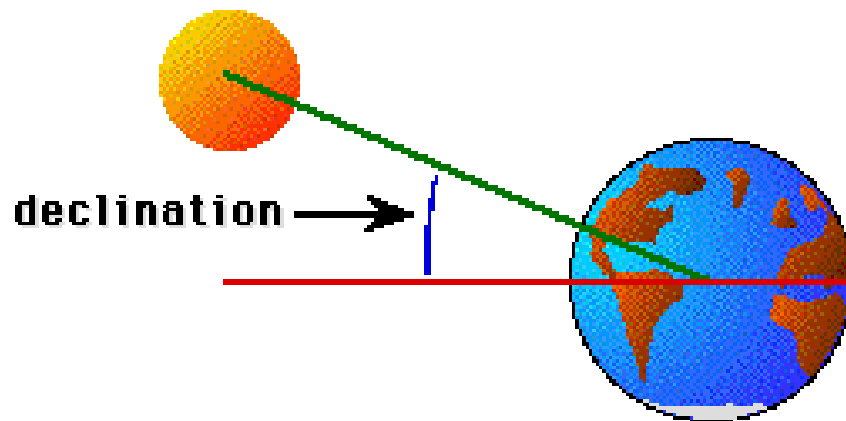
Για λόγους ευκολίας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η Γη είναι σταθερή και ότι ο Ήλιος είναι αυτός που κινείται γύρω της, διαγράφοντας τροχιά πάνω στο εκλειπτικό επίπεδο. Κάτω από αυτό το πρίσμα, μπορούμε

να ορίσουμε το επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού, το οποίο εμπεριέχει τον Ισημερινό της Γης και τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα στο κέντρο της. Τότε, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του εκλειπτικού επιπέδου και του επιπέδου του ουράνιου Ισημερινού είναι ίση προς $23,45^\circ$.

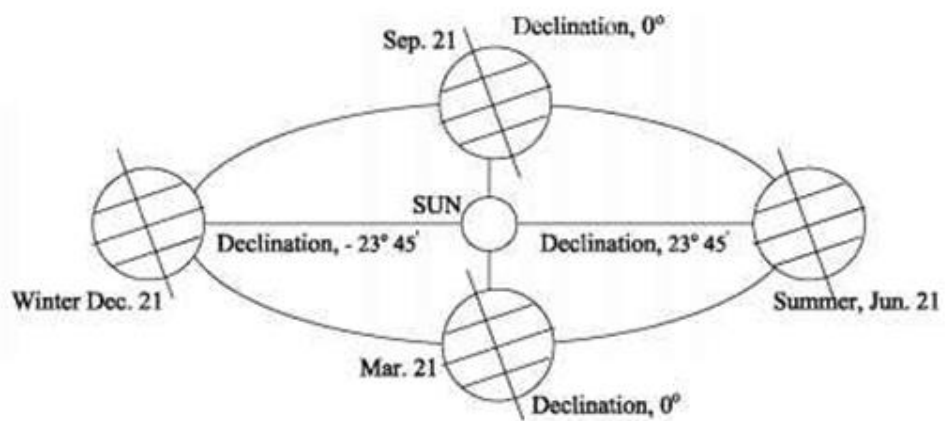


Σχήμα 1.2: Το επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού

Ως ηλιακή απόκλιση (declination angle, δ) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου Ισημερινού και της ευθείας που ενώνει το κέντρο της Γης με το κέντρο του Ήλιου. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ετήσιας περιστροφής, αλλά μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας, αφού μεταβάλλεται λιγότερο από $0,5^\circ$. Η ηλιακή απόκλιση είναι 0° κατά την εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία, ενώ λαμβάνει τις τιμές $\delta = +23,45^\circ$ κατά το θερινό ηλιοστάσιο και $\delta = -23,45^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.



Σχήμα 1.3: Η ηλιακή απόκλιση



Σχήμα 1.4: Οι μεταβολές της ηλιακής απόκλισης κατά τη διάρκεια του έτους

Στη διάρκεια μιας ημέρας, ένας υποθετικός παρατηρητής που βρίσκεται στο κέντρο της Γης και πάνω στο επίπεδο που τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα, βλέπει τον Ήλιο να διαγράφει μια ουράνια τροχιά, η οποία προβάλλεται στον ημισφαιρικό ουράνιο θόλο που περιβάλλει τη Γη σε άπειρη απόσταση και ονομάζεται ουράνια σφαίρα. Όταν μιλάμε για ουράνια σφαίρα δεν ενδιαφέρουν οι αποστάσεις των άστρων από τη Γη, αλλά μόνο οι γωνίες προβολής των άστρων ως προς το επίπεδο αναφοράς, εν προκειμένω το επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού. Για τον επίγειο παρατηρητή, η ουράνια σφαίρα ολοκληρώνει μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονα της Γης μέσα σε 24 ώρες, ενώ η ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας φαίνεται από τη Γη ότι πραγματοποιείται σε αντίθετη κατεύθυνση περιστροφής από εκείνη της ετήσιας τροχιάς του Ήλιου.

1.3 Το Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων

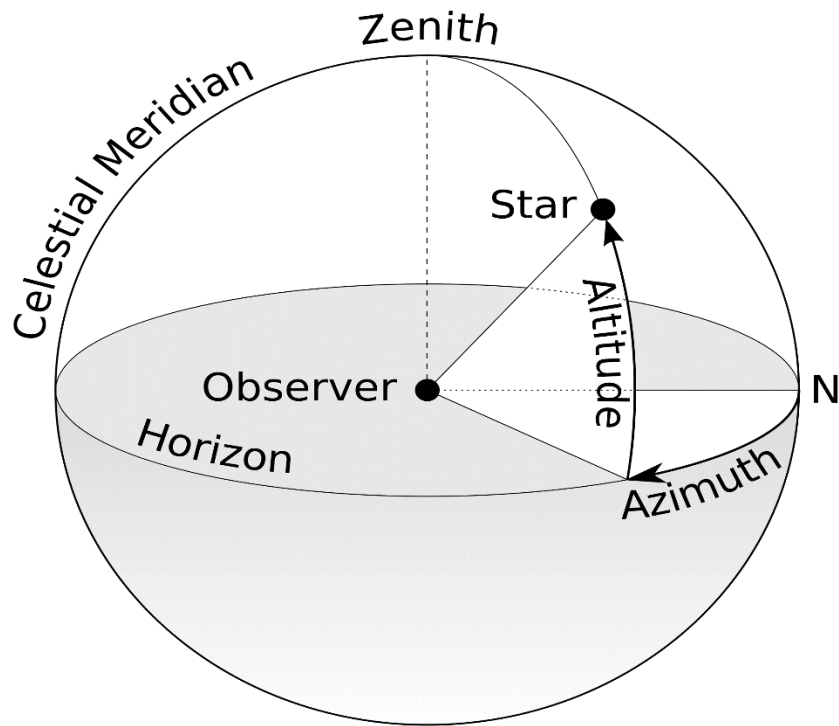
Για τον καθορισμό οποιασδήποτε τοποθεσίας στην επιφάνεια της Γης, αρκεί να προσδιοριστούν δύο σφαιρικές συντεταγμένες: τα γεωγραφικό μήκος (longitude) και το γεωγραφικό πλάτος (latitude). Ως βάση αυτών των συντεταγμένων λαμβάνεται ο Ισημερινός και ο πρώτος μεσημβρινός. Ως μεσημβρινοί ορίζονται οι ημικυκλικές γραμμές που ενώνουν τους δύο πόλους της Γης. Συμβατικά, θεωρούμε ως πρώτο μεσημβρινό τον μεσημβρινό που περνάει από το αστεροσκοπείο του Greenwich, κοντά στο Λονδίνο, όπου ορίζεται το γεωγραφικό μήκος μηδέν. Το γεωγραφικό μήκος μιας τοποθεσίας καθορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον μεσημβρινό που περνάει από το σημείο που θέλουμε να προσδιορίσουμε και τον πρώτο μεσημβρινό. Από σύμβαση πάλι, θεωρούμε θετικά τα γεωγραφικά μήκη που βρίσκονται δυτικά του Greenwich. Το γεωγραφικό πλάτος καθορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του Ισημερινού και τη νοητή γραμμή που ενώνει το κέντρο της Γης με τη θέση που θέλουμε να προσδιορίσουμε. Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται σε Βόρειο (North, N) ή Νότιο (South, S), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται η τοποθεσία που πρέπει να προσδιοριστεί.

Για να καθορίσουμε τώρα τη θέση ενός αστρικού σώματος ως προς ένα σημείο στην επιφάνεια της Γης, κρίνεται σκόπιμο να υιοθετήσουμε ένα άλλο σύστημα συντεταγμένων, το οριζόντιο σύστημα (Horizontal

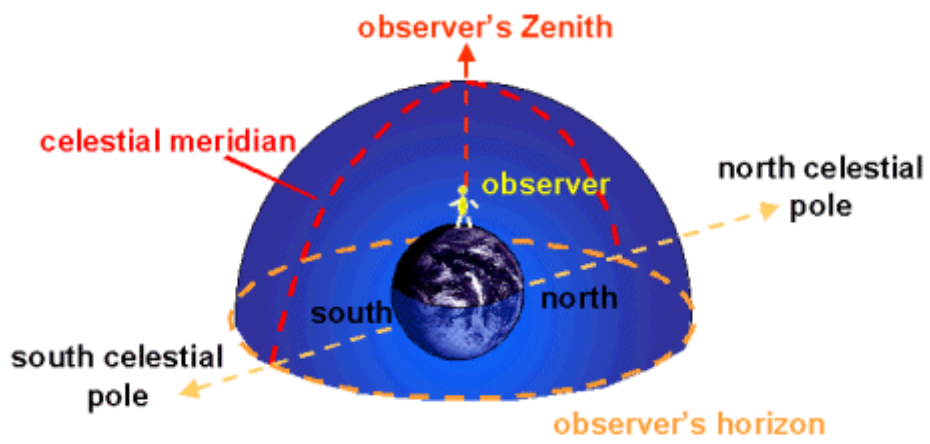
Coordinate System ή Alt/Az Coordinate System). Το Οριζόντιο Σύστημα Συντεταγμένων χρησιμοποιεί ως επίπεδο αναφοράς τον τοπικό ορίζοντα του κάθε παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της Γης. Αυτό χωρίζει την ουράνια σφαίρα στο άνω ημισφαίριο, που ο παρατηρητής μπορεί να δει, και στο κάτω ημισφαίριο, που δεν μπορεί να δει. Ο πόλος του επάνω ημισφαιρίου, που αποτελεί την τομή ανάμεσα στην κάθετο στο επίπεδο αναφοράς του παρατηρητή και την ουράνια σφαίρα, καλείται ζενίθ (zenith), ενώ ο πόλος του κατώτερου ημισφαιρίου καλείται ναδίρ (nadir).

Σύμφωνα με το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων, η Γη είναι αυτή που είναι σταθερή και όχι τα αστρικά σώματα, γεγονός που σημαίνει ότι η θέση ενός αστρικού σώματος, συμπεριλαμβανομένου και του Ήλιου, αλλάζει με την ώρα. Επίσης, στο οριζόντιο σύστημα θεωρούμε ότι η Γη βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος, ενώ ο Ήλιος και τα άλλα αστρικά σώματα είναι στερεωμένα στην επιφάνεια της ουράνιας σφαίρας, η οποία περιστρέφεται. Οι αστρικές αποστάσεις αγνοούνται.

Για να καθορίσουμε τη θέση του Ήλιου στο οριζόντιο σύστημα ως προς τη θέση που βρίσκεται ο παρατηρητής, αρκεί να προσδιορίσουμε δύο γωνίες, το ύψος (altitude) και το αζιμούθιο (azimuth). Ως ύψος ορίζεται η γωνία που φαίνεται ένα αντικείμενο επάνω ή κάτω από τον ορίζοντα με επίπεδο αναφοράς αυτό του παρατηρητή. Το ύψος μπορεί να κυμαίνεται από 0° (όταν είναι ακριβώς πάνω στον ορίζοντα) μέχρι 90° (όταν είναι στο ζενίθ) και μέχρι -90° αντίστοιχα (όταν βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα). Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται φανερό ότι όταν ο Ήλιος έχει ύψος 0° , είτε ανατέλλει, είτε δύει. Αν πρόκειται τελικά για την ανατολή ή τη δύση του θα καθορίζεται από το άλλο μέγεθος, το αζιμούθιο. Η γωνία ανάμεσα στην προβολή του αντικειμένου στο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς και την κατεύθυνση γύρω από τον ορίζοντα, με αρχή το Νότο, ορίζεται ως αζιμούθιο. Γίνεται φανερό, λοιπόν, ότι το ύψος και το αζιμούθιο του ίδιου αστρικού σώματος αλλάζουν τιμές ανάλογα με την ώρα, αφού κατά τη διάρκεια της ημέρας το σώμα φαίνεται να κινείται στην ουράνια σφαίρα. Ακόμα, για το ίδιο αντικείμενο, την ίδια ώρα, θα έχουμε διαφορετικές τιμές ύψους και αζιμούθιου για δύο διαφορετικούς παρατηρητές σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες στην επιφάνεια της Γης.



Σχήμα 1.5: Το ηλιακό ύψος και το αζιμούθιο



Σχήμα 1.6: Η ουράνια σφαίρα

1.4 Η ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι γενικός όρος για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο.

Η ηλιακή ακτινοβολία κατανέμεται σε διαφορετικά μήκη κύματος. Το μεγαλύτερο μέρος της κυμαίνεται στα μικρά μήκη κύματος, με το όριο περίπου στα 3-4 μm . Συνεπώς ακτινοβολία μεγαλύτερη των 4 μm μπορεί να ονομασθεί ακτινοβολία μεγάλου κύματος. Θεωρείται ότι το 99% της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0,25 έως 4 μm . Στο ορατό τμήμα της ακτινοβολίας (0,39-0,77 μm) περιέχεται το 46,41% της ενέργειας, ενώ στο υπεριώδες (μήκος κύματος < 0,4 μm) περιέχεται το 8,03% και τέλος η περιοχή με μήκος κύματος 0,77 μm περιέχει το υπόλοιπο 45,56%.

Κάθε τοποθεσία δέχεται ηλιακή ακτινοβολία τουλάχιστον για ένα μέρος του χρόνου. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της Γης διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωγραφική τοποθεσία, η ώρα της ημέρας, η εποχή, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τοπίου και ο καιρός.

Οι ηλιακές ακτίνες πέφτουν στην επιφάνεια της Γης με διαφορετικές γωνίες που κυμαίνονται από 0° έως 90° (στο ζενίθ). Όταν οι ακτίνες πέφτουν κάθετα, τότε έχουμε τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ενέργεια. Από την άλλη, όσο πιο «πλάγιες» είναι οι ακτίνες, τόσο περισσότερο «ταξιδεύουν» μέσα στην ατμόσφαιρα και διαχέονται. Λόγω της σφαιρικότητας της Γης, στις πολικές περιοχές της η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι ποτέ κάθετη.

Στο περιήλιο του εκλειπτικού επιπέδου η επιφάνεια του πλανήτη λαμβάνει λίγη περισσότερη ηλιακή ενέργεια. Το περιήλιο συμπίπτει με το καλοκαίρι στο νότιο ημισφαίριο και το χειμώνα στο βόρειο ημισφαίριο. Παρόλα αυτά, η παρουσία των αχανών ωκεανών μετριάζει τα θερμότερα καλοκαίρια και τους ψυχρότερους χειμώνες που θα ανέμενε κάποιος να δει στο νότιο ημισφαίριο ως αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς.

Καθοριστικό ρόλο στο ποσό της ηλιοφάνειας που παρατηρείται σε κάθε τοποθεσία παίζει η κλίση του πολικού άξονα της Γης. Λόγω αυτής της κλίσης, από την εαρινή έως τη φθινοπωρινή ισημερία παρατηρούνται ημέρες μεγαλύτερης διάρκειας στο βόρειο ημισφαίριο και αντίστοιχα μεγαλύτερες μέρες στο νότιο ημισφαίριο κατά τη διάρκεια των άλλων έξι

μηνών. Οι μέρες και οι νύχτες είναι αμφότερες ακριβώς δώδεκα ώρες κατά τις ισημερίες.

Οι χώρες που βρίσκονται σε γεωγραφικά πλάτη περίπου στο μέσο λαμβάνουν περισσότερη ηλιακή ενέργεια, όχι μόνο επειδή οι ημέρες είναι μεγαλύτερες, αλλά και επειδή οι ηλιακές ακτίνες πέφτουν σχεδόν κάθετα. Οι ακτίνες είναι πολύ πιο πλάγιες κατά τη διάρκεια των μικρότερων ημερών των χειμερινών μηνών. Για παράδειγμα, περιοχές με γεωγραφικό πλάτος γύρω στις 40° λαμβάνουν περίπου τρεις φορές περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία τον Ιούνιο απ' ό τι τον Δεκέμβρη.

Η περιστροφή της Γης είναι επίσης υπεύθυνη για τις ωριαίες διαφορές στην ηλιοφάνεια. Νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα ο ήλιος είναι χαμηλά στον ουρανό. Οι ακτίνες του καθώς περνούν από την ατμόσφαιρα διαχέονται περισσότερο απ' ό τι το μεσημέρι, που ο ήλιος είναι στο υψηλότερο σημείο. Σε μια ατμοσφαιρικά καθαρή μέρα το μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της Γης γύρω στο μεσημέρι.

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε ένα συλλέκτη στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από μία συνιστώσα άμεσης δέσμης, μία συνιστώσα διάχυτης ακτινοβολίας και μια συνιστώσα από επιτόπιες ανακλάσεις του εδάφους (albedo).

Ως άμεση ακτινοβολία ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η απορρόφηση και η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, το ύψος του Ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο του τόπου, η κλίση της επιφάνειας, η απόσταση Ήλιου-Γης και η ηλιακή απόκλιση.

Διάχυτη ακτινοβολία ονομάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει διεύθυνση από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από παράγοντες όπως το ύψος του Ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, το ποσό και το είδος των νεφών, η σκόνη, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, οι υδρατμοί και γενικά τα σωματίδια και τα αέρια στην ατμόσφαιρα.

Η συνιστώσα albedo εκφράζεται από το συντελεστή ανάκλασης albedo μιας επιφάνειας, ο οποίος αποτελεί αδιάστατο μέγεθος μικρότερο της μονάδας και ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος προς την

προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη θέση της επιφάνειας που προκαλεί την ανάκλαση.

Μέχρι και τα όρια της ατμόσφαιρας οι απώλειες της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ελάχιστες. Με την είσοδο όμως στην ατμόσφαιρα σημειώνονται σημαντικές απώλειες στην ένταση της, ανάλογα με την ατμοσφαιρική σύσταση και την παρουσία νεφών. Πιο συγκεκριμένα, σε μια καθαρή ατμοσφαιρικά, ξηρή ημέρα, οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες μπορούν να περιορίσουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία κατά 10%, ενώ τις ημέρες με συννεφιά και μεγάλη ατμοσφαιρική επιβάρυνση το ποσοστό αυτό αγγίζει το 100%.

Γενικά, η νέφωση προκαλεί τις μεγαλύτερες απώλειες, απορροφώντας και αντανακλώντας την ηλιακή ακτινοβολία. Σε συνθήκες πλήρους νέφωσης δεν υπάρχει άμεση ακτινοβολία αλλά μόνο διάχυτη, η οποία ισούται με την ολική ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο καιρός αίθριος, η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στα υψηλότερα δυνατά επίπεδα και η άμεση ακτινοβολία αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, υπάρχει πάντα κατά τη διάρκεια της ημέρας ένα ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας, εξαιτίας της διάχυσης που προκαλείται από τα μόρια του αέρα ή από σωματίδια ή αέρια που περιέχονται στην ατμόσφαιρα.

Πάντως, ο προσανατολισμός των ηλιακών συλλεκτών, στις περισσότερες εφαρμογές, βασίζεται στον εντοπισμό της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, γιατί η άμεση δέσμη μπορεί να συγκεντρωθεί σε μικρές επιφάνειες με τη βοήθεια κατόπτρων ή φακών, πράγμα που είναι αδύνατο να συμβεί με τη διάχυτη ακτινοβολία.

1.5 Η ηλιακή ενέργεια

Ως ηλιακή ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που φτάνει από τον Ήλιο στη Γη. Η ενέργεια αυτή εκπέμπεται από τον Ήλιο και μεταδίδεται μέσα από το διάστημα με ακτινοβολία. Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη είναι κατά μέσο όρο 173×10^{15} W και είναι τάξεις μεγαλύτερη από τη μέση ισχύ που απαιτεί συνολικά η ανθρωπότητα και η οποία υπολογίζεται στα 7×10^{12} W. Σε άλλα στατιστικά, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη σε 90 λεπτά είναι αρκετή για να εξασφαλίσει τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη για έναν ολόκληρο χρόνο.

Η ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα ή σε ηλεκτρισμό. Όταν μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως θέρμανση κτηρίων, οικιακή χρήση, σε θερμοκήπια και άλλα. Επίσης, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να θερμάνει υγρά σε υψηλές θερμοκρασίες και κατ' αυτόν τον τρόπο να θέσει σε λειτουργία τουρμπίνες που παράγουν ηλεκτρισμό.

Ακόμα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό με δύο τρόπους: είτε μέσω φωτοβολταϊκών, που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρισμό, είτε μέσα από ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις ισχύος, που παράγουν ηλεκτρισμό συγκεντρώνοντας ακτινοβολία για να θερμάνουν κάποιο υγρό και να παραγάγουν ατμό που στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για να ενεργοποιήσει κάποια γεννήτρια.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας προσφέρει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων. Είναι μια καθαρή, περιβαλλοντικά φιλική μορφή ενέργειας, αφού δεν παράγει διοξείδιο του άνθρακα ή ατμοσφαιρικούς ρύπους και ο Ήλιος αποτελεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Ακόμα, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχουν μεγάλο χρόνο ζωής (περίπου 20-30 χρόνια), έχουν μικρά κόστη συντήρησης και είναι αθόρυβες.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί, καθώς η ηλιοφάνεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, την ώρα και τις καιρικές συνθήκες. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι λόγω της ανισοκατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας χρειάζονται μεγάλες επιφάνειες για να συλλεχθεί ακτινοβολία σε ικανοποιητικό βαθμό.

Αν και η δυναμική της ηλιακής ενέργειας είναι γνώστη εδώ και δεκαετίες, δεν αξιοποιήθηκε σημαντικά εξαιτίας κυρίως της εύκολης πρόσβασης και αξιοποίησης των ορυκτών καυσίμων. Όταν, πριν κάποια χρόνια, άρχισαν να εγείρονται στην παγκόσμια κοινότητα μείζονα ζητήματα όπως η υπερκατανάλωση των ορυκτών καυσίμων από τον ανεπτυγμένο κόσμο και η επικείμενη εξάντληση τους, η κλιματική αλλαγή, η κλιμακούμενη περιβαλλοντική επιβάρυνση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και άλλα, έγινε σαφής η ανάγκη στροφής σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ενεργειακής ανάπτυξης, στο οποίο η ηλιακή ενέργεια μπορεί να παίξει κομβικό ρόλο.

Εκτιμάται ότι αν ακολουθηθούν οι σωστές πολιτικές και η χρήση της ηλιακής ενέργειας διαδοθεί σε ικανοποιητικό βαθμό σε πολλές χώρες μέσα στα επόμενα χρόνια, μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην επίλυση καίριων ζητημάτων για την ανθρωπότητα, όπως η κλιματική αλλαγή, η ενεργειακή ασφάλεια και η ευρύτερη πρόσβαση σε ενεργειακές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας σε παγκόσμια κλίμακα. Παράλληλα, καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται, τα κόστη της ηλιακής ενέργειας πέφτουν, γεγονός που καθιστά τα φωτοβολταϊκά και τα ηλιοθερμικά συστήματα εν δυνάμει ικανά να μπορέσουν να ανταγωνιστούν τις συμβατικές πηγές παραγωγής ενέργειας, ιδίως στις χώρες με υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Λειτουργία των Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων

Τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (Concentrated Solar Power, CSP) χρησιμοποιούν την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας για να παράγουν ηλεκτρισμό. Πιο συγκεκριμένα, η άμεση δέσμη του Ήλιου ανακλάται από κάτοπτρα και συγκεντρώνεται σε ένα δέκτη, προκειμένου να παραχθεί μέσης ή υψηλής κλίμακας θερμότητα. Στη συνέχεια, αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να θέσει σε λειτουργία ένα συμβατικό θερμοδυναμικό κύκλο, για παράδειγμα μέσω ενός ατμοστρόβιλου ή μιας θερμικής μηχανής, πχ μια μηχανή Stirling. Το τελικό προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι ο ηλεκτρισμός. Η ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να αποθηκευτεί σε διάφορα μέσα, υγρής, στερεής ή εναλλασσόμενης φάσης, όπως τηγμένα άλατα (molten salts), κεραμικά, σκυρόδεμα ή αλατούχα μίγματα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κατά τις νυχτερινές ώρες και γενικά όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, το ποσό ενέργειας που έχει αποθηκευτεί θα μπορεί να κρατά σε λειτουργία τον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

Στην πραγματικότητα, οι σταθμοί παραγωγής ισχύος που χρησιμοποιούν ηλιοθερμική τεχνολογία παράγουν ηλεκτρισμό περίπου με τον ίδιο τρόπο που παράγουν και οι συμβατικοί. Η βασική διαφορά είναι ότι αποκτούν την ενέργεια που μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό μέσω της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, την οποία αφού συλλέξουν, τη μετατρέπουν σε υψηλής θερμοκρασίας ατμό ή αέριο για να οδηγήσουν έναν στρόβιλο ή μια μηχανή. Για αυτή τη λειτουργία απαιτούνται τέσσερα βασικά στοιχεία: ένας συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης, ένας δέκτης της ακτινοβολίας, ένα μέσο μεταβίβασης ή αποθήκευσης της θερμότητας και ένας εναλλάκτης ισχύος (heat exchanger).

2.2 Συγκεντρωτικοί Ηλιακοί Συλλέκτες

Στην ευρεία τους έννοια, οι ηλιακοί συλλέκτες περιλαμβάνουν όλες τις διατάξεις που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια δεσμεύοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα.

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες, για να λειτουργήσουν, κινούνται και ακολουθούν την πορεία του Ήλιου, συγκεντρώνοντας με ανάκλαση την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μία περιοχή εστίασης. Η κίνηση τους μπορεί να γίνεται γύρω από έναν ή δύο άξονες ελευθερίας.

Συγκεντρώνοντας την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνεται σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες στις επιφάνειες εστίασης. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, όπως για τη λειτουργία ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων.

Το μέγεθος και το κόστος παραγωγής των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι μεγάλο, απαιτούν πολύπλοκους μηχανισμούς κίνησης και έχουν γενικότερα υψηλό κόστος συντήρησης. Εξαιτίας όλων αυτών, το κομμάτι των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών θεωρείται εξαιρετικά σημαντικό για τη λειτουργία των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

2.3 Η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας

Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνολογία των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι η επέκταση της δυνατότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας τις ώρες μετά τη δύση του Ήλιου και κατά τις ημέρες με νεφώσεις. Μία βιώσιμη λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελούν οι τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Όπως προαναφέρθηκε, στα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα οι ηλιακές ακτίνες ανακλώνται στο δέκτη και δημιουργείται θερμότητα, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να παραχθεί ηλεκτρισμός. Η βασική ιδέα της θερμικής αποθήκευσης είναι απλή: η πλεονάζουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας διοχετεύεται σε ένα μέσο

αποθήκευσης (π.χ. τηγμένα άλατα). Όταν απαιτείται παραγωγή ηλεκτρισμού μετά τη δύση του Ήλιου, η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται στον ατμοστρόβιλο και ο σταθμός εξακολουθεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Το μέγεθος που εκφράζει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μετριέται τεχνικά σε GWh_{th} , αλλά πιο συχνά εκφράζεται σε ώρες, εννοώντας τις ώρες που μπορεί να λειτουργήσει ο σταθμός στην εκτιμώμενη ισχύ στηριζόμενος μόνο στο σύστημα αποθήκευσης. Το βέλτιστο μέγεθος αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και το ρόλο του κάθε σταθμού παραγωγής. Επίσης, εξαρτάται από τον «ηλιακό πολλαπλασιαστή» (solar multiple) ενός σταθμού, ο οποίος είναι ο λόγος του πραγματικού μεγέθους του ηλιακού πεδίου ως προς το μέγεθος που θα χρειαζόταν να έχει το πεδίο για να έχουμε την εκτιμώμενη απόδοση με δεδομένο ότι έχουμε τις καλύτερες δυνατές συνθήκες στη διάρκεια του χρόνου. Αυτός ο λόγος είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ισχύς εφόσον υπάρχει διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο σταθμό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότεροι σταθμοί συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων χρησιμοποιούν τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Μάλιστα, η ραγδαία πτώση στις τιμές των φωτοβολταϊκών συστημάτων φαίνεται να καθιστά τη δυνατότητα ενεργειακής αποθήκευσης απαραίτητη για την ανταγωνιστικότητα και τελικά την επιβίωση των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

Εκτός από το γεγονός ότι η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει σε αυτά τα συστήματα να είναι οικονομικά ανταγωνιστικά στην αγορά ενέργειας, μπορεί επίσης να συντελέσει σημαντικά στην υψηλότερη διείσδυση στο ηλεκτρικό δίκτυο, όχι μόνο των ίδιων των CSP αλλά και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Εφόσον τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια, μπορούν να δίνουν ενέργεια στο δίκτυο εξ' ολοκλήρου ή σε μεγάλο ποσοστό τις ώρες που δεν υπάρχει άνεμος ή ήλιος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τις ώρες ηλιοφάνειας ή ύπαρξης δυνατών ανέμων μπορούν τα φωτοβολταϊκά ή οι ανεμογεννήτριες αντίστοιχα να έχουν μεγαλύτερο μερίδιο διείσδυσης στο δίκτυο. Αυτό καθιστά τα συγκεντρωτικά συστήματα την πλέον ευέλικτη για το δίκτυο ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Από το 1985 αρκετές τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ενέργειας έχουν εξεταστεί. Οι πιο βασικές είναι τρεις: το άμεσο σύστημα δύο δεξαμενών, το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών και το σύστημα θερμοκρασιακής κλίσης μίας δεξαμενής.

- Το άμεσο σύστημα δύο δεξαμενών (two-tank direct system)

Η ηλιοθερμική ενέργεια σε αυτό το σύστημα αποθηκεύεται στο ίδιο υγρό που χρησιμοποιούμε για να τη συλλέξουμε. Το υγρό είναι αποθηκευμένο σε δύο δεξαμενές, μία σε υψηλή και μία σε χαμηλή θερμοκρασία. Το υγρό από τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας ρέει μέσα στον ηλιακό συλλέκτη ή στο δέκτη, όπου η ηλιακή ενέργεια το θερμαίνει σε υψηλή θερμοκρασία και εν συνεχεία ρέει στη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας για αποθήκευση. Το υγρό από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας (heat exchanger) όπου παράγεται ατμός για τη μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρισμού. Το υγρό εξέρχεται από τον εναλλάκτη σε χαμηλή θερμοκρασία και επιστρέφει στη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας.

Το άμεσο σύστημα δύο δεξαμενών εφαρμόστηκε στις πρώτους σταθμούς παραβολικών κοίλων (όπως ήταν το Solar Electric Generating Station I) και στον ηλιακό πύργο ισχύος Solar Two στην Καλιφόρνια. Τα παραβολικά κοίλα χρησιμοποιούσαν ορυκτό έλαιο για υγρό μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας, ενώ ο Solar Two χρησιμοποιούσε τηγμένα άλατα.



Εικόνα 2.1: Φωτογραφία του άμεσου συστήματος δύο δεξαμενών για αποθήκευση θερμότητας με χρήση τηγμένων αλάτων στις εγκαταστάσεις του Solar Two

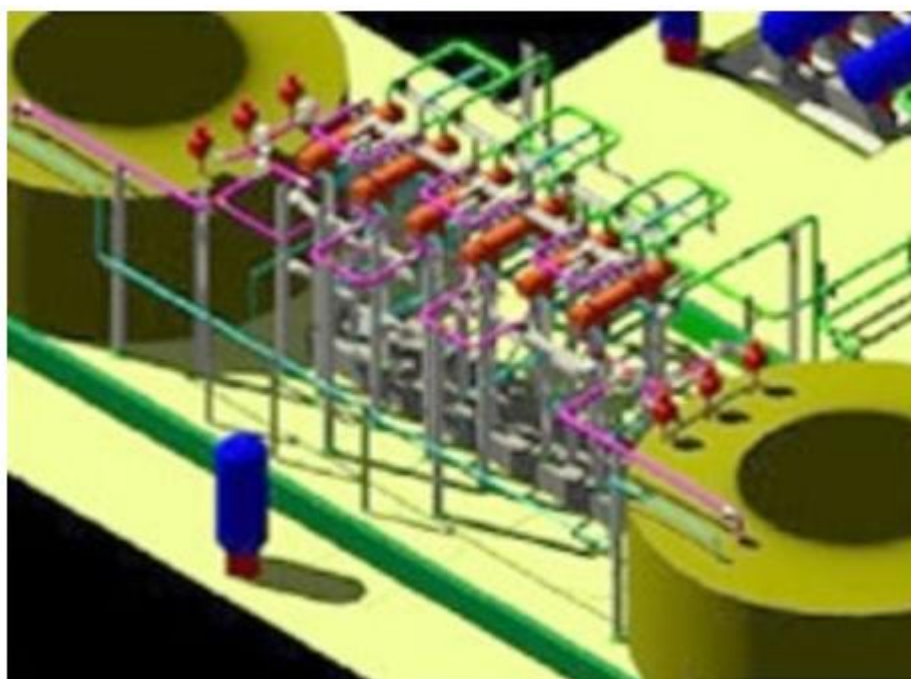
- Το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών (two-tank indirect system)

Το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, όπως και το άμεσο, με μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικά υγρά για τη μεταφορά και την αποθήκευση θερμότητας. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις στις οποίες το υγρό για τη μεταφορά θερμότητας είναι πολύ ακριβό ή δεν ενδείκνυται για αποθήκευση θερμότητας.

Το υγρό αποθήκευσης από τη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας ρέει μέσα από έναν επιπρόσθετο (σε σχέση με το άμεσο σύστημα) εναλλάκτη θερμότητας, όπου θερμαίνεται μέσω του υγρού για τη μεταφορά θερμότητας, το οποίο έχει υψηλή θερμοκρασία. Έπειτα, το υψηλής θερμοκρασίας υγρό αποθήκευσης ρέει πίσω στην υψηλής θερμοκρασίας δεξαμενή αποθήκευσης. Κατόπιν, το υγρό εξέρχεται από αυτόν τον εναλλάκτη θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία και επιστρέφει στον ηλιακό συλλέκτη ή στον δέκτη, όπου θερμαίνεται για να φτάσει ξανά σε υψηλή θερμοκρασία. Το υγρό αποθήκευσης, από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό με τον ίδιο τρόπο

όπως και στο άμεσο σύστημα. Όπως αναφέρθηκε, το έμμεσο σύστημα απαιτεί την παρουσία ενός επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας σε σχέση με το άμεσο, ο οποίος προσθέτει κόστος.

Το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς σταθμούς παραβολικών κοίλων στην Ισπανία και έχει επίσης προταθεί για κάποιους σταθμούς κοίλων στις Η.Π.Α. Οι σταθμοί αυτοί θα χρησιμοποιούν οργανικό έλαιο ως υγρό μεταφοράς θερμότητας και τηγμένα άλατα ως υγρό αποθήκευσης.

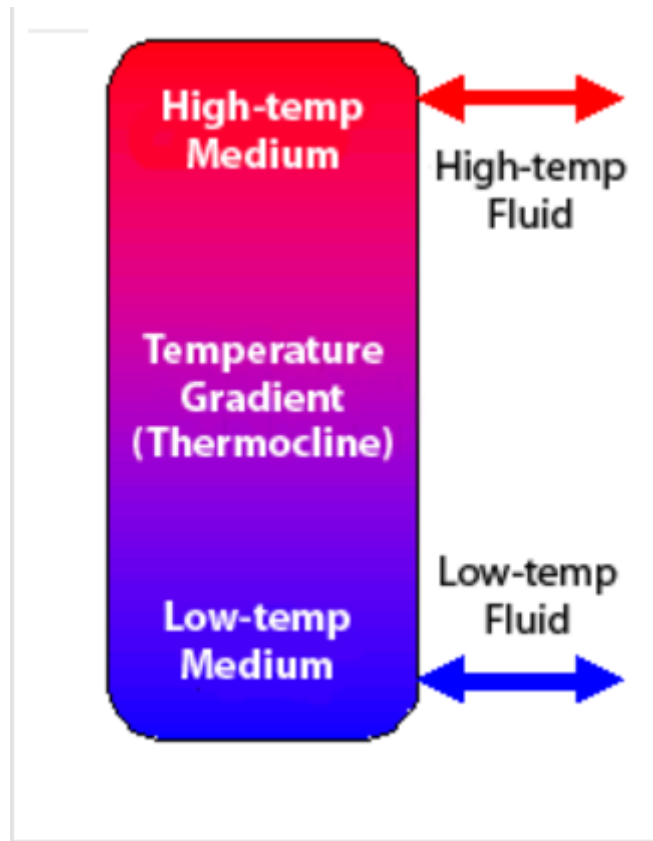


Σχήμα 2.1: Το έμμεσο σύστημα δύο δεξαμενών για αποθήκευση θερμότητας στους σταθμούς Andasol – 1 και Andasol – 2

- Σύστημα μίας δεξαμενής με θερμοκρασιακή κλίση (single-tank thermocline system)

Τα συστήματα μίας δεξαμενής με θερμοκρασιακή κλίση αποθηκεύουν θερμική ενέργεια σε ένα στερεό μέσο, συνήθως πυριτική άμμο (silica sand), που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή. Σε κάθε στιγμή, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ένα μέρος του μέσου βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και ένα άλλο μέρος σε χαμηλή θερμοκρασία. Οι περιοχές υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας διαχωρίζονται από μία θερμοκρασιακή κλίση (temperature gradient ή thermocline). Το υγρό υψηλής θερμοκρασίας, που είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά θερμότητας, ρέει στην κορυφή της θερμοκρασιακής κλίσης και εξέρχεται από τη βάση που βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία μετατοπίζει τη θερμοκρασιακή κλίση προς τα κάτω και προσθέτει στο σύστημα θερμική ενέργεια για αποθήκευση. Αντιστρέφοντας τη ροή, η θερμοκρασιακή κλίση μετατοπίζεται προς τα πάνω και αποσπά θερμική ενέργεια από το σύστημα, προκειμένου να παραχθεί ατμός και κατόπιν ηλεκτρισμός. Αυτή η κινητικότητα έχει ως αποτέλεσμα τη θερμική διαστρωμάτωση του υγρού μέσα τη δεξαμενή, γεγονός που βοηθά στη σταθεροποίηση και διατήρηση της θερμοκρασιακής κλίσης.

Η χρήση στερεού μέσου αποθήκευσης και η ανάγκη μόνο μίας δεξαμενής μειώνει το κόστος αυτού του συστήματος σε σχέση με τα συστήματα δύο δεξαμενών. Το σύστημα θερμοκρασιακής κλίσης χρησιμοποιήθηκε στον ηλιακό πύργο Solar One, όπου για τη μεταφορά θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ατμός και ως υγρό αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκε ορυκτό έλαιο.



Σχήμα 2.2: Το σύστημα θερμοκρασιακής κλίσης μίας δεξαμενής

2.4 Υβριδοποίηση

Σχεδόν όλοι οι υπάρχοντες σταθμοί συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν κάποια ορυκτά καύσιμα, ως εφεδρεία, για να μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό όταν η ηλιοφάνεια είναι σε χαμηλά επίπεδα, αλλά και για να εξασφαλίζουν μια εναλλακτική πηγή θερμότητας που θα μπορεί να αντισταθμίζει θερμικές απώλειες κατά τη διάρκεια της νύχτας και να εξασφαλίζει μια ταχύτερη εκκίνηση της λειτουργίας του σταθμού νωρίς το πρωί. Κάποια από τα συστήματα είναι πλήρως υβριδικά καθώς, εκτός από ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιούν κάποιο καύσιμο (συνήθως ορυκτό καύσιμο, άλλα όχι πάντα) ή κάποια άλλη πηγή θερμότητας για την παραγωγή ενός ποσοστού του ηλεκτρισμού που εξέρχεται του συστήματος, σε μόνιμη βάση.

Η υβριδοποίηση ηλιακής ενέργειας-καυσίμου αναφέρεται επίσης στην προσθήκη ενός μικρού ηλιακού πεδίου σε ένα θερμοηλεκτρικό

σταθμό, είτε χρησιμοποιεί φυσικό αέριο είτε κάρβουνο. Σε αυτά τα συστήματα, το ηλιακό πεδίο παρέχει ατμό (κατά προτίμηση ατμό υψηλής πίεσης) στον ατμοστρόβιλο του σταθμού. Επειδή το συμπληρωματικό κόστος του στρόβιλου, εξαιτίας της επιπρόσθετης ισχύος, είναι οριακό, τα υβριδικά αυτά συστήματα παρέχουν φθινό ηλεκτρισμό από ηλιοθερμική ενέργεια. Τέτοια υβριδικά συστήματα έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές του κόσμου (Αλγερία, Αίγυπτος, Ιράν, Ιταλία, Μαρόκο, Η.Π.Α) και η ισχύς τους φτάνει μέχρι τα 75MW.

Η ηλιακή αυτή «ενίσχυση» στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς άνθρακα έδωσε μια νέα επιλογή αξιοποίησης των ηλιακών πεδίων. Σε κάθε θερμοηλεκτρικό σταθμό άνθρακα, το νερό που χρησιμοποιείται προθερμαίνεται πριν εισέλθει στον στρόβιλο, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη σε μια σειρά από προθερμαντήρες, που εξάγουν ατμό από τον στρόβιλο σε διαφορετικά επίπεδα πίεσης. Αντικαθιστώντας τον ατμό υψηλής πίεσης με ατμό από ηλιακή ενέργεια, μερικά ή ολικά, διατηρείται η προθέρμανση του νερού, ενώ εξαπλώνεται περισσότερος ατμός στον στρόβιλο και κατ' αυτόν τον τρόπο ενισχύεται η ισχύς εξόδου. Συνεπώς, η υβριδοποίηση παρέχει ενίσχυση της παραγόμενης ισχύος, χωρίς να υπάρχει επιπλέον επιβάρυνση σε κατανάλωση άνθρακα. Στα υπάρχοντα υβριδικά συστήματα Ήλιου-άνθρακα, ο προερχόμενος από την ηλιακή ενέργεια ατμός μπορεί να τροφοδοτεί μόνο τον προθερμαντήρα υψηλής πίεσης, αλλά άλλες ιδέες υβριδοποίησης μπορούν να υιοθετηθούν και να συνδυαστούν προκειμένου να αυξηθεί το μερίδιο συμμετοχής της ηλιακής ενέργειας. Αυτή η ηλιακή «ενίσχυση», λοιπόν, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος και της παραγωγής ενέργειας, χωρίς επιπλέον κατανάλωση άνθρακα και ως εκ τούτου χωρίς επιπλέον περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενώ ταυτόχρονα το μόνο επιπρόσθετο κόστος στο σύστημα είναι αυτό του ηλιακού πεδίου.

Ακόμα πιο προσοδοφόρα είναι η ηλιακή ενίσχυση για υπάρχοντες σταθμούς άνθρακα που έχουν τροποποιηθεί για να καίνε και βιομάζα, αφού η δυναμική της ηλιακής ενέργειας αντισταθμίζει την απόδοση που χάνεται εξαιτίας της μικρότερης θερμικής αξίας του καυσίμου. Είναι, επίσης, δυνατός ο συνδυασμός ενός ηλιακού πεδίου σε συνδυασμό με θερμοηλεκτρικό σταθμό που χρησιμοποιεί μόνο βιομάζα. Αυτό το σύστημα μάλιστα εφαρμόστηκε στο σταθμό Termosolar Borges στην Καταλονία της Ισπανίας, στα τέλη του 2012. Ο σταθμός αυτός είναι ισχύος 22MW και συνδέει ένα πεδίο παραβολικών κοίλων και δύο καυστήρες

βιομάζας, οι οποίοι θερμαίνουν το υγρό μεταφοράς θερμότητας (έλαιο) όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή όταν η ηλιοφάνεια είναι ανεπαρκής.

2.5 Πλεονεκτήματα και προοπτικές

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα αποτελούν μια εξαιρετικά υποσχόμενη τεχνολογία, αφού η είσοδος ηλιακής ενέργειας στο σύστημα αξιοποιείται κατά τον αποδοτικότερο τρόπο, φτάνοντας σε επίπεδα απόδοσης 85%. Επιπλέον, μέρος της θερμικής ενέργειας, που προκύπτει κατά τη διαδικασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς, όπως βιομηχανικές εφαρμογές, περιφερειακή ψύξη και αφαλάτωση θαλασσινού νερού.

Οι σταθμοί συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας μπορούν να σχεδιαστούν, ιδανικά, για να καλύπτουν τις απαιτήσεις του φορτίου του ηλεκτρικού συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο μέλλον όμως, με τη βελτίωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, θα μπορούν να καλύψουν σχεδόν όλη τη ζώνη βάσης του φορτίου. Οι μικρότεροι σταθμοί είναι ικανοί να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως πχ μικρά συστήματα δίσκου-μηχανής, που παράγουν 3-25 kW ενέργειας, μπορούν να τοποθετηθούν κατευθείαν σε σημεία κατανάλωσης.

Αν και οι δυνατότητες υλοποίησης τους κυμαίνονται από μικρά απομακρυσμένα ενεργειακά συστήματα της τάξης των λίγων kW μέχρι μεγάλες μονάδες παραγωγής της τάξης των εκατοντάδων MW που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο, είναι προτιμότερο τα CSP να χρησιμοποιούνται σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ισχύος, εξαιτίας του υψηλού κόστους εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης.

Μέχρι η τεχνολογία των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων να φτάσει στο στάδιο της ωρίμανσης φαίνεται ότι θα υπάρχει επέκταση των υβριδικών θερμοηλεκτρικών συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν εφεδρείες ορυκτών καυσίμων για να εξασφαλίσουν την ηλεκτροπαραγωγή ακόμα και τις ώρες και τις ημέρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Το γεγονός ότι χρησιμοποιούν την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας σημαίνει ότι τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι αποδοτικά σε περιοχές με υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας, όπως οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, οι νοτιοδυτικές ακτές των ΗΠΑ, η

Κεντρική και Νότια Αμερική, η Αφρική, η Μέση Ανατολή, η Κίνα, η Αυστραλία κτλ. Σε αυτές τις περιοχές του κόσμου ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο επιφάνειας είναι αρκετό για να παράγει 100-200 GWh ηλεκτρικής ενέργειας το χρόνο. Αυτό είναι ισοδύναμο ενεργειακά με την ετήσια παραγωγή μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ενέργειας ισχύος 50 MW με καύσιμο τον άνθρακα ή το φυσικό αέριο.

Οι σταθμοί ηλιοθερμικής τεχνολογίας μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό σε μεγάλη κλίμακα, αλλά και να αποτελέσουν μια οικονομικά βιώσιμη εναλλακτική για τη χρήση ορυκτών καυσίμων, βοηθώντας παράλληλα να αμβλυνθούν η περιβαλλοντική επιβάρυνση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η κλιματική αλλαγή.

Η λειτουργία τους δεν περιλαμβάνει καμία από τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που συνεπάγονται οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρισμού. Δεν υπάρχει εκπομπή ρύπων, λειτουργούν χωρίς θόρυβο και μπορούν ανά πάσα στιγμή να τεθούν εκτός λειτουργίας χωρίς κανένα πρόβλημα. Το πιο σημαντικό είναι ότι κατά τη λειτουργία τους δεν εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα – το κύριο αέριο που είναι υπεύθυνο για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Παρότι υπάρχουν κάποιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε άλλα στάδια, όπως η κατασκευή τους, είναι και πάλι πολύ χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές που αποφεύγονται. Μάλιστα, εκτιμάται ότι σε παγκόσμια κλίμακα η εκμετάλλευση του 1% της συνολικής δυναμικής των ηλιοθερμικών συστημάτων θα μπορούσε να περιορίσει τόσο τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ώστε να αναστείλει την κλιματική αλλαγή.

Παράλληλα, η παραγωγή ηλεκτρισμού από συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα γίνεται όλο και φθηνότερη. Οι προηγμένες τεχνολογίες, η μαζική παραγωγή και η βελτιωμένη λειτουργία των συστημάτων αυτών στο μέλλον αναμένεται να μειώσει θεαματικά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μάλιστα σε τέτοιο επίπεδο ώστε τα συστήματα αυτά να μπορούν να είναι ανταγωνιστικά ακόμα και με τους συμβατικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων σε ορίζοντα 10-15 χρόνων.

2.6 Τεχνολογίες Συγκεντρωτικών Ηλιακών Συστημάτων

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων και συνδυασμών με άλλες τεχνολογίες, ανανεώσιμες ή μη, αλλά οι πιο ευρεία διαδεδομένες και υποσχόμενες τεχνολογίες είναι:

- Τα Παραβολικά Κοίλα (Parabolic Trough Systems, PT)
- Οι Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel (Linear Fresnel Reflector Systems, LFR)
- Τα Συστήματα Δίσκου-Μηχανής (Parabolic Dish-Engine Systems)
- Οι Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος ή Συστήματα Κεντρικού Δέκτη (Solar Power Tower Systems ή Central Receiver Systems, CRS)

Οι τέσσερις αυτές τεχνολογίες διαφέρουν όσον αφορά την οπτική σχεδίαση, το σχήμα του δέκτη, τη φύση του υγρού μεταφοράς και τη δυνατότητα τους να αποθηκεύουν θερμότητα πριν μετατραπεί σε ηλεκτρισμό.

Ακολουθεί πίνακας με τις «οικογένειες» τεχνολογιών συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του δέκτη και τα χαρακτηριστικά εστίασης:

<p style="text-align: center;">Τύπος Εστίασης</p> <p style="text-align: center;">Τύπος δέκτη</p>	<p><u>Εστίαση Γραμμής:</u> Οι συλλέκτες ιχνηλατούν τον Ήλιο κατά μήκος ενός και μόνου άξονα και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε ένα γραμμικό δέκτη. Αυτό κάνει τον εντοπισμό του Ήλιου ευκολότερο.</p>	<p><u>Εστίαση Σημείου:</u> Οι συλλέκτες ιχνηλατούν τον Ήλιο κατά μήκος δύο αξόνων και συγκεντρώνουν την ακτινοβολία σε ένα σημείο-δέκτη. Αυτό επιτρέπει υψηλότερη αποδοτικότητα του δέκτη σε υψηλότερες θερμοκρασίες.</p>
<p><u>Σταθερός:</u> Οι σταθεροί δέκτες είναι ακίνητοι και παραμένουν ανεξάρτητοι από το σύστημα εστίασης του σταθμού. Αυτό διευκολύνει τη μεταβίβαση της συλλεχθείσας θερμότητας στο μπλοκ ισχύος</p>	<p style="text-align: center;">Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel</p>	<p style="text-align: center;">Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος</p>
<p><u>Κινητός:</u> Οι κινητοί δέκτες μετακινούνται μαζί με το σύστημα εστίασης. Συλλέγουν περισσότερη ενέργεια τόσο στα συστήματα με γραμμική εστίαση, όσο και σε αυτά με εστίαση σημείου</p>	<p style="text-align: center;">Παραβολικά Κοίλα</p>	<p style="text-align: center;">Συστήματα Δίσκου- Μηχανής</p>

2.6.1 Γραμμικά Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (Linear Concentrating Solar Power ή Linear CSP)

Τα πεδία των Γραμμικών CSP αποτελούνται από μεγάλο αριθμό συγκεντρωτικών συλλεκτών, σε διάταξη παράλληλων σειρών, που τυπικά ευθυγραμμίζονται σε έναν προσανατολισμό Βορρά-Νότου, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τη θερινή και ετήσια συλλογή ηλιακής ισχύος. Με σύστημα ηλιακού ιχνηλάτη κινούμενου σε έναν άξονα (single-axis sun tracking system), αυτή η ρύθμιση επιτρέπει στα κάτοπτρα του συστήματος να ιχνηλατούν τον Ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, από την ανατολή έως τη δύση, γεγονός που εξασφαλίζει ότι η άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας θα ανακλάται αδιάλειπτα πάνω στους δέκτες.

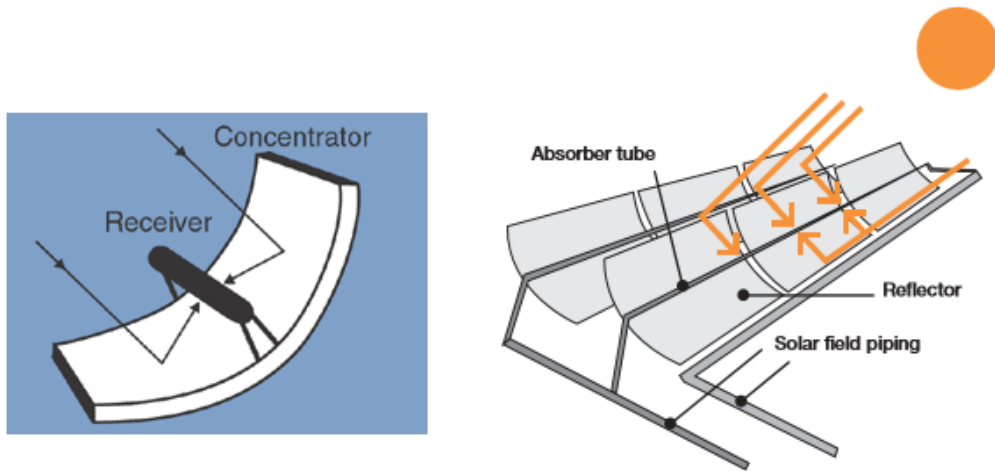
Οι συλλέκτες των γραμμικών CSP δεσμεύουν την ηλιακή ενέργεια με τη βοήθεια μεγάλων κατόπτρων που ανακλούν και συγκεντρώνουν τις ηλιακές ακτίνες πάνω σε ένα γραμμικό δέκτη-σωλήνα (linear receiver tube). Ο δέκτης περιέχει ένα υγρό που θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και κατόπιν χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει υπέρθερμο ατμό που στρέφει έναν στρόβιλο και εν συνεχεία οδηγεί μια γεννήτρια για να παράγει ηλεκτρισμό. Εναλλακτικά, ο ατμός μπορεί να παραχθεί απευθείας στο ηλιακό πεδίο, οπότε και εξαλείφεται η ανάγκη για δαπανηρούς εναλλάκτες θερμότητας.

Στην τεχνολογία των Γραμμικών Συγκεντρωτικών Ηλιακών συστημάτων υπάρχουν τα Παραβολικά Κοίλα και τα Γραμμικά Συστήματα Fresnel.

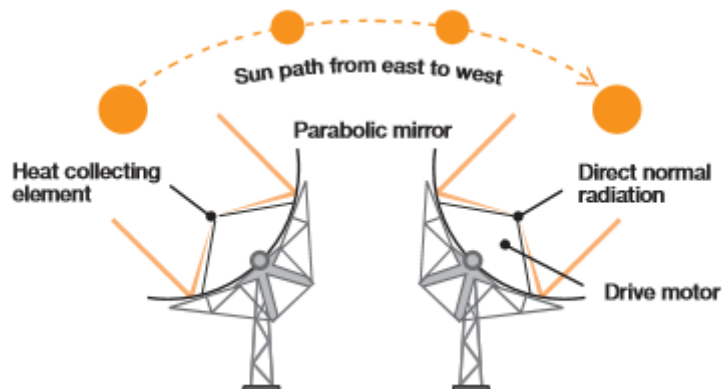
2.6.1.1 Τα Παραβολικά Κοίλα

Σε ένα τέτοιο σύστημα, τα κοίλα ανακλαστικά κάτοπτρα συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμικά αποδοτικούς δέκτες-σωλήνες. Ο δέκτης-σωλήνας είναι τοποθετημένος κατά μήκος της κεντρικής (εστιακής) γραμμής (focal line) κάθε παραβολικού ανακλαστικού κατόπτρου. Ο σωλήνας έχει φτιαχτεί με βάση την κατασκευή του κατόπτρου. Το θερμαινόμενο υγρό που ρέει σε αυτούς τους σωλήνες είναι είτε υγρό μεταφοράς θερμότητας, όπως συνθετικό έλαιο, είτε νερό/ατμός. Στην περίπτωση υγρού μεταφοράς θερμότητας, το έλαιο, που θερμαίνεται από τις ηλιακές ακτίνες, φτάνει περίπου στους 400°C και

αντλείται από μια σειρά εναλλακτών θερμότητας για να παράγει υπέρθερμο ατμό. Ο ατμός μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω συμβατικού αμοστροβίλου ή μέσω συνδυασμένου κύκλου. Στην περίπτωση του δέκτη νερού/ατμού, στέλνεται κατευθείαν στο στρόβιλο.

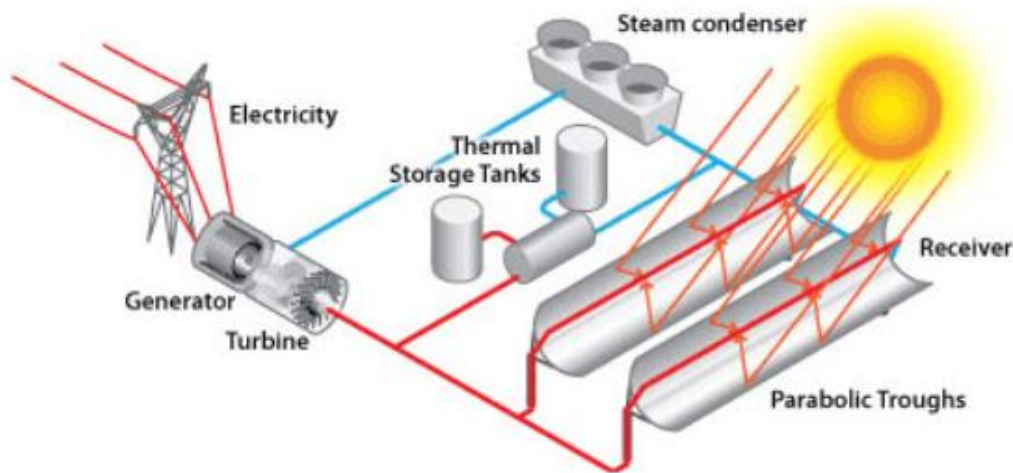


Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση παραβολικών κοίλων



Σχήμα 2.4: Παρακολούθηση του Ήλιου από συλλέκτη παραβολικού κοίλου

Τα παραβολικά κοίλα, ως συστήματα, μπορούν να ενσωματώσουν αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Σε τέτοια συστήματα, το πεδίο του συλλέκτη είναι πολύ μεγάλο, προκειμένου να είναι δυνατή η δημιουργία θερμότητας σε ένα σύστημα αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να χρησιμοποιηθεί το βράδυ ή σε ημέρες με νεφελώδη καιρό για να παραχθεί επιπρόσθετος ατμός και εν συνεχεία ηλεκτρισμός.



Σχήμα 2.5: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης συστήματος Παραβολικών Κοίλων

Από το 2006, οι μισοί ενεργειακοί σταθμοί παραβολικών κοίλων που δημιουργήθηκαν στην Ισπανία είναι εξοπλισμένοι με συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δύο δεξαμενών, που χρησιμοποιούν ως μέσο τηγμένα άλατα και έχουν ονομαστική χωρητικότητα για αντοχή μέχρι και επτά ώρες σε πλήρη ισχύ (δηλαδή αν το σύστημα αποθήκευσης είναι πλήρες, μπορούν να λειτουργούν για επτά ώρες σε πλήρη ισχύ χωρίς καθόλου ηλιοφάνεια). Στις Η.Π.Α, το 2013 και στις αρχές του 2014, δημιουργήθηκαν και συνδέθηκαν στο δίκτυο τρεις σταθμοί των 280 MW, από τους οποίους δύο είναι χωρίς συστήματα αποθήκευσης (Genesis και Mojave στην Καλιφόρνια) και άλλος ένας που έχει δυνατότητα αποθήκευσης για παροχή ενέργειας για έξι ώρες (ο σταθμός Solana στην Αριζόνα).

Τα παραβολικά κοίλα μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ως υβριδικά συστήματα, δηλαδή να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για να συμπληρώνουν την ηλιακή απόδοση σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Σε τέτοιο σύστημα χρησιμοποιείται ένας λέβητας φυσικού αερίου ή ένας λέβητας ατμού.

Τα Παραβολικά Κοίλα αποτελούν την πιο ώριμη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Παρότι επιτυχημένη ως

τεχνολογία, υπάρχουν ακόμα πολλά περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση. Παραδείγματος χάριν, ο προηγμένος δομικός σχεδιασμός των συστημάτων αυτών μπορεί να βελτιώσει την οπτική ακρίβεια των κατόπτρων και ταυτόχρονα να μειώσει τα κόστη. Αναμένεται ότι η επόμενη γενιά δεκτών-σωλήνων θα προκαλεί μικρότερες θερμικές απώλειες, αυξάνοντας παράλληλα την αξιοπιστία του συστήματος. Επίσης, βελτιώσεις στο μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία λειτουργίας και ως εκ τούτου την απόδοση του συστήματος. Το πιο σημαντικό βήμα βέβαια είναι η αυτοματοποίηση της παραγωγής τέτοιων συστημάτων, προκειμένου να αυξάνεται σταθερά η εφαρμογή τους, με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση του κόστους.

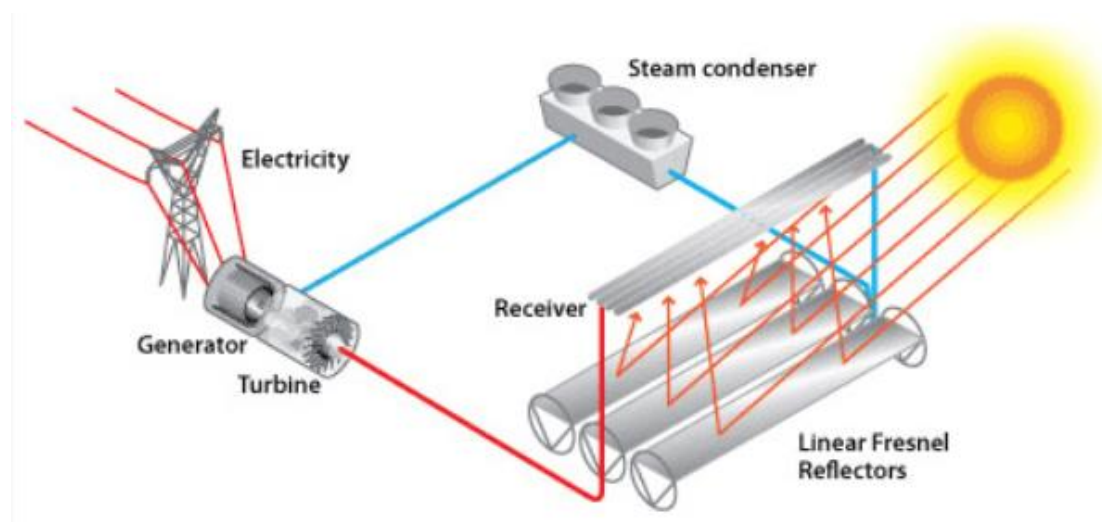


Εικόνα 2.2: Φωτογραφία από το σταθμό του Solar Electric Generating Station IV στην Καλιφόρνια στις Η.Π.Α, όπου χρησιμοποιείται τεχνολογία Παραβολικών Κοίλων

2.6.1.2 Οι Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel

Μια δεύτερη τεχνολογία γραμμικού συλλέκτη είναι οι Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel. Σε αυτά τα συστήματα, επίπεδα ή ελαφρά κυρτά κάτοπτρα τοποθετούνται σε ιχνηλάτες (trackers) στο έδαφος και ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλούν τις ηλιακές ακτίνες σε ένα δέκτη-σωλήνα, τοποθετημένο στο χώρο πάνω από τα κάτοπτρα. Για περαιτέρω εστίαση της ακτινοβολίας, μερικές φορές προστίθεται στην κορυφή του δέκτη ένα μικρό παραβολικό κάτοπτρο.

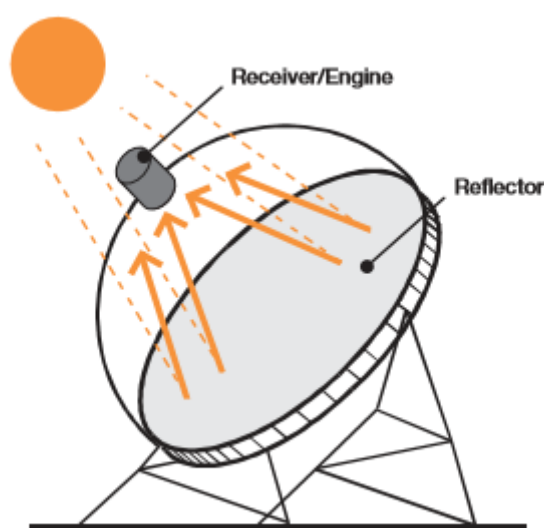
Τα σχεδόν επίπεδα κάτοπτρα, που χρησιμοποιούν οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel, είναι πιο εύκολα κατασκευάσιμα από τα παραβολικά κοίλα, γι' αυτό και τα πρώτα είναι φθηνότερα σε σχέση με τα δεύτερα. Η δομή των LFR επιτρέπει υψηλότερη ηλιακή συγκέντρωση από αυτή στα παραβολικά κοίλα, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο και τις θερμικές απώλειες. Παρόλα αυτά, τα Fresnel παρουσιάζουν υψηλότερες οπτικές απώλειες, ειδικά όταν ο Ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα. Αυτό μειώνει την παραγωγή ενέργειας νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, καθώς επίσης και κατά του χειμερινούς μήνες, αλλά εν μέρει αντισταθμίζεται από τις υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας.



Σχήμα 2.6: Σχηματική απεικόνιση εγκατάστασης συστήματος Γραμμικών Συλλεκτών Fresnel

2.6.2 Τα (Παραβολικά) Συστήματα Δίσκου-Μηχανής

Το Σύστημα Δίσκου-Μηχανής είναι μια συγκεντρωτική ηλιακή τεχνολογία που παράγει σχετικά μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων – τυπικά οι τιμές παραγωγής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 3-25 kW.



Σχήμα 2.7: Σύστημα Δίσκου-Μηχανής

Τα συστήματα Δίσκου-Μηχανής χρησιμοποιούν έναν παραβολικό δίσκο από κάτοπτρα για να ανακλούν και να συγκεντρώνουν το ηλιακό φως πάνω σε μία κεντρική μηχανή που παράγει ηλεκτρισμό. Τα δύο βασικά τμήματα του συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης (solar concentrator) και η μονάδα μετατροπής ισχύος (power conversion unit).



Εικόνα 2.3: Φωτογραφίες συστημάτων Δίσκου-Μηχανής

Ο ηλιακός συλλέκτης ή δίσκος συλλέγει και συγκεντρώνει τις ηλιακές ακτίνες και στη συνέχεια τις ανακλά πάνω σε ένα θερμικό δέκτη (thermal receiver) που απορροφά την ηλιακή θερμότητα. Ο δίσκος είναι τοποθετημένος πάνω σε μία κατασκευή που εντοπίζει τον Ήλιο αδιάλειπτα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να ανακλάται το υψηλότερο δυνατό ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο θερμικό δέκτη.

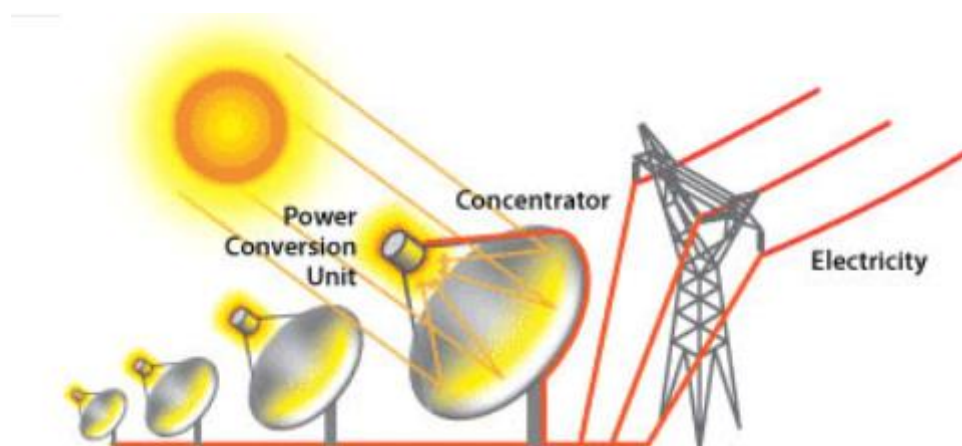
Η μονάδα μετατροπής ισχύος περιλαμβάνει το θερμικό δέκτη και τη μηχανή/γεννήτρια. Ο θερμικός δέκτης είναι το σημείο σύνδεσης μεταξύ του δίσκου και της μηχανής/γεννήτριας. Απορροφά τις δέσμες της ηλιακής ακτινοβολίας, τις μετατρέπει σε θερμότητα και μεταφέρει τη θερμότητα στη μηχανή/γεννήτρια. Ένας θερμικός δέκτης μπορεί να είναι μια σειρά από σωλήνες με υγρό ψύξης (συνήθως υδρογόνο ή ήλιο), που αποτελεί το μέσο μεταφοράς θερμότητας και επίσης το λειτουργικό υγρό της μηχανής. Ανά δύο οι θερμικοί δέκτες είναι σωλήνες θερμότητας στους οποίους ο βρασμός και η συμπύκνωση ενός ενδιάμεσου υγρού μεταφέρει θερμική ενέργεια στη μηχανή.

Το σύστημα μηχανής/γεννήτριας είναι το υποσύστημα που παίρνει τη θερμότητα από το θερμικό δέκτη και τη χρησιμοποιεί για να παράγει ηλεκτρισμό. Ο πιο συνηθισμένος τύπος θερμικής μηχανής που χρησιμοποιείται στα συστήματα Δίσκου-Μηχανής είναι η μηχανή Stirling. Μια μηχανή Stirling χρησιμοποιεί θερμαινόμενο υγρό για να κινήσει ένα έμβολο και να δημιουργήσει μηχανική ισχύ. Το μηχανικό έργο, στη μορφή

περιστροφής του άξονα της μηχανής, οδηγεί μια γεννήτρια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Εξαιτίας της υψηλής οπτικής εστίασης και του συστήματος παρακολούθησης του Ήλιου σε δύο άξονες που χρησιμοποιούν, τα συστήματα δίσκου-μηχανής επιτυγχάνουν την πιο υψηλή συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως την πιο υψηλή απόδοση από όλα τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα.

Παρά την υψηλότερη οπτική τους απόδοση, τα συστήματα δίσκου-μηχανής έχουν σχεδόν εξαφανιστεί από το τοπίο της ενεργειακής αγοράς. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί δεν έχει αποδειχθεί αν το υψηλό κόστος και τα τεχνολογικά ρίσκα που συνεπάγονται αυτά τα συστήματα μπορούν να περιοριστούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να τα καταστήσουν ανταγωνιστικά σε σχέση με άλλες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Θεωρείται ότι ίσως το μέλλον αυτής της τεχνολογίας βρίσκεται κυρίως στην διεσπαρμένη παραγωγή ισχύος σε απομακρυσμένες περιοχές.

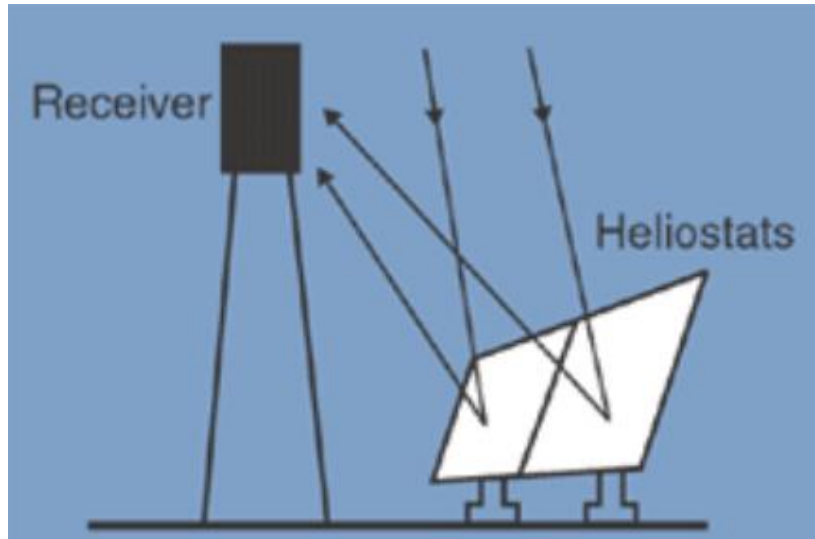


Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση σταθμού με συστήματα Δίσκου-Μηχανής

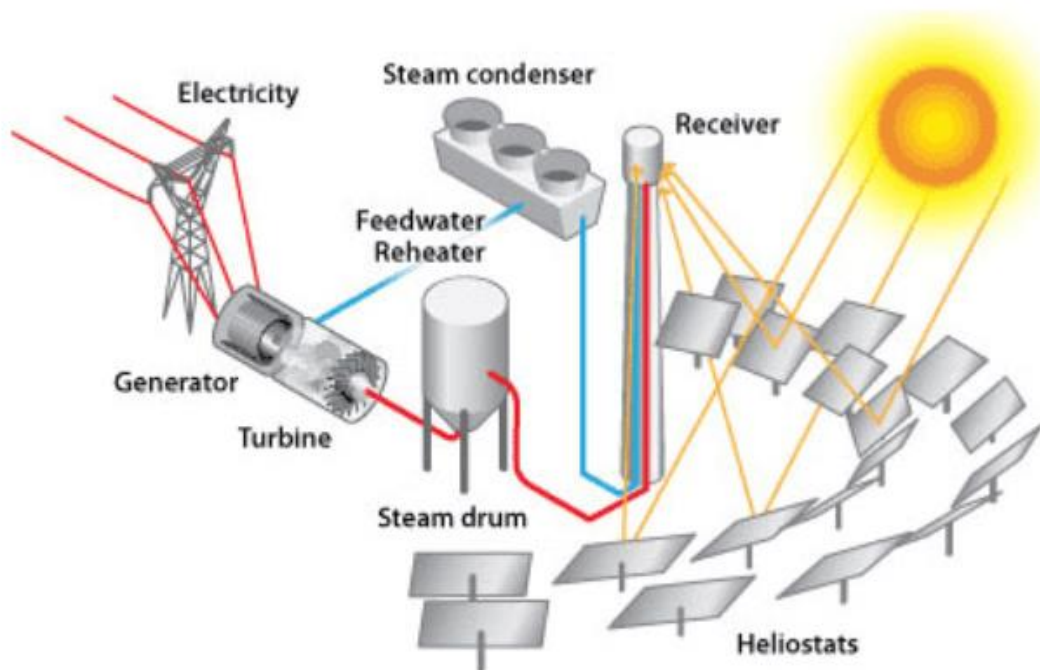
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΗΛΙΑΚΟΙ ΠΥΡΓΟΙ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Η Λειτουργία των Ηλιακών Πύργων Ισχύος

Οι ηλιακοί πύργοι ισχύος (ή συστήματα κεντρικού δέκτη) παράγουν ηλεκτρισμό από την ηλιακή ενέργεια, εστιάζοντας τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία σε έναν εναλλάκτη θερμότητας στην κορυφή ενός πύργου, ο οποίος αποτελεί και τον δέκτη του συστήματος. Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί από εκατοντάδες έως χιλιάδες κάτοπτρα, τοποθετημένα συνήθως σε κυκλική διάταξη γύρω από τον κεντρικό δέκτη, τα οποία είναι προγραμματισμένα να ιχνηλατούν τον Ήλιο και ονομάζονται ηλιοστάτες (heliostats). Ο ρόλος κάθε ηλιοστάτη είναι να ανακλά την προσπίπτουσα σε αυτόν άμεση ηλιακή δέσμη πάνω στον (κεντρικό) δέκτη του συστήματος. Ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας στο δέκτη απορροφά τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία που έχει ανακλαστεί από τους ηλιοστάτες και τη μετατρέπει σε θερμική ενέργεια, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί εν συνεχεία για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού για τη λειτουργία ενός στροβίλου. Μέχρι στιγμής, τα μέσα μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται είναι νερό/ατμός, τηγμένα άλατα, υγρό νάτριο και αέρας. Αν στο δέκτη χρησιμοποιείται κάποιο αέριο ή ακόμα και αέρας και συμπιεστούν, μπορούν εναλλακτικά να οδηγήσουν έναν αεριοστρόβιλο, αντί να παραχθεί ατμός για κάποιον ατμοστρόβιλο.



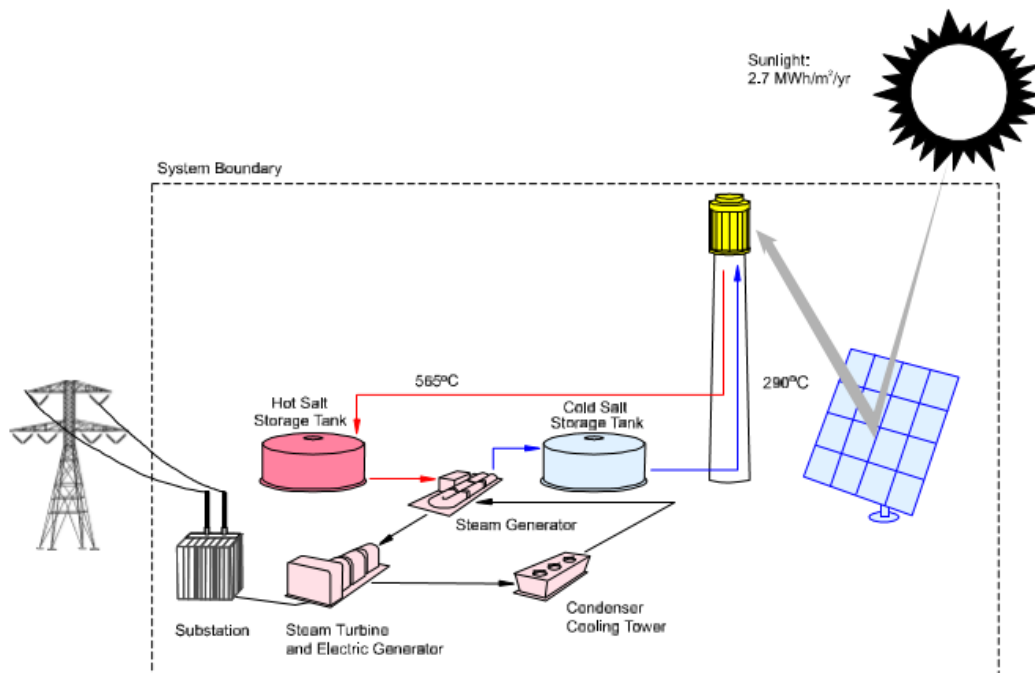
Σχήμα 3.1: Σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση σταθμού ηλιακού πύργου ισχύος

Σε έναν ηλιακό πύργο που χρησιμοποιεί τηγμένα άλατα, το αλατούχο υγρό, που αρχικά βρίσκεται σε θερμοκρασία 285°C, αντλείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης χαμηλής θερμοκρασίας, περνά από το δέκτη όπου θερμαίνεται για να φτάσει στους 565 °C και κατόπιν οδηγείται στη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας για αποθήκευση. Όταν απαιτείται παραγωγή ισχύος από το σταθμό, το θερμό υγρό αντλείται για να παραγάγει υπέρθερμο ατμό για έναν συμβατικό κύκλο Rankine. Από την παραγωγή ατμού, το υγρό επιστρέφει στη δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας, όπου θα αποθηκευτεί μέχρι να θερμανθεί εκ νέου από το δέκτη.

Το πλεονέκτημα της χρήσης τηγμένων αλάτων ως υγρού μεταφοράς θερμότητας είναι ότι μπορεί να γίνει σε χαμηλή θερμοκρασία και με τη χρήση εξαιρετικά αποτελεσματικών ηλιακών δεκτών με λεπτά τοιχώματα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι αποφεύγεται η επένδυση και οι θερμοκρασιακές διαφορές σε εναλλάκτες θερμότητας που θα παρεμβάλλονταν μεταξύ του υγρού μεταφοράς θερμότητας και του μέσου αποθήκευσης.



Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ηλιακού πύργου ισχύος με χρήση τηγμένων αλάτων

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου μεγέθους αποθήκευσης, προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ζήτησης ισχύος, είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος. Οι δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκή χωρητικότητα ώστε να τροφοδοτούν πλήρως έναν στρόβιλο μέχρι και 13 ώρες.

Σε μία τυπική εγκατάσταση ο ρυθμός συλλογής ηλιακής ενέργειας υπερβαίνει τη μέγιστη ακτινοβολία που απαιτείται για να παραχθεί ατμός για τον στρόβιλο. Ως συνέπεια, το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας μπορεί να γεμίζει την ίδια στιγμή που ο σταθμός παράγει ηλεκτρισμό πλήρους ισχύος. Ο λόγος της θερμικής ισχύος που παρέχεται από το σύστημα συλλέκτη (δηλαδή το ηλιακό πεδίο και το δέκτη) ως προς τη μέγιστη θερμική ισχύ που απαιτείται από τη στροβιλογεννήτρια καλείται ηλιακός πολλαπλασιαστής (solar multiple).

Τα συστήματα ηλιακών πύργων πρέπει να είναι μεγάλα για να είναι οικονομικά αποδοτικά. Οι ηλιακοί πύργοι δεν αποτελούν αρθρωτά συστήματα, ούτε μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρότερα μεγέθη, όπως τα συστήματα δίσκου-μηχανής ή τα συστήματα παραβολικών κοίλων, και συγχρόνως να παραμένουν οικονομικά ανταγωνιστικά. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούν συμβατικά μπλοκ ισχύος και μπορούν να διανείμουν εύκολα ενέργεια, ειδικά όταν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης.

Οι σταθμοί που χρησιμοποιούν συστήματα ηλιακού πύργου ισχύος είναι καταλληλότεροι για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος κλίμακας από 30 έως 400MW.



Εικόνα 3.1: Φωτογραφία συστήματος ηλιακού πύργου ισχύος

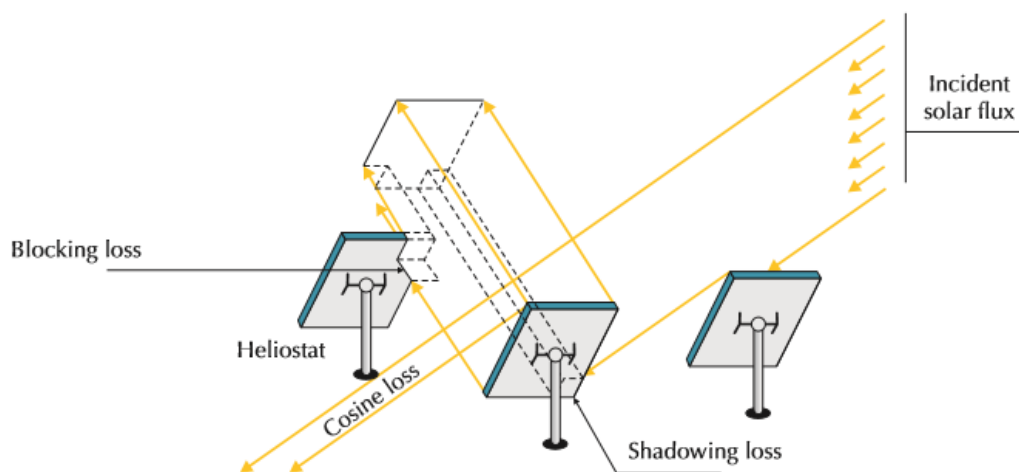
3.2 Οι Ηλιοστάτες

Το μέγεθος των ηλιοστατων ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό (ξεκινάει από $1m^2$ και φτάνει μέχρι και $160m^2$). Όταν ένας ηλιαστάτης είναι μικρός, μπορεί να είναι επίπεδος και η μικρή του επιφάνεια θα αντέχει στους ανέμους. Αντίθετα, οι μεγάλοι ηλιοστάτες πρέπει να είναι κυρτοί για να μπορούν να στέλνουν συγκεντρωμένη την ηλιακή ακτινοβολία στον κεντρικό δέκτη. Επίσης, χρειάζονται ισχυρές διατάξεις στήριξης και κινητήρες για να έχουν αντίσταση στους ανέμους. Όμως, για το ίδιο ποσό συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, οι μικροί ηλιοστάτες πρέπει να ομαδοποιηθούν ανά χιλιάδα, απαιτώντας πολλαπλάσιο αριθμό κινητήρων και συνδέσεων και με τον προσανατολισμό τους να απαιτεί πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Καθώς όμως το υπολογιστικό κόστος μειώνεται ραγδαία, φαίνεται ότι η τάση για περισσότερους και μικρότερους ηλιοστάτες θα κερδίζει έδαφος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ηλιοστάτες πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους για να περιοριστεί η σκίαση μεταξύ τους αλλά και η παρεμπόδιση της ηλιακής ακτινοβολίας (blocking), η οποία λαμβάνει

χώρα όταν ένας ηλιοστάτης «υποκλέπτει» μέρος της ακτινοβολίας που ανακλάται από κάποιον άλλο ηλιοστάτη.

Το πεδίο των ηλιοστατών, που περικλείει τον πύργο, διατάσσεται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιείται η ετήσια απόδοση του σταθμού. Πεδία σε μικρά γεωγραφικά πλάτη τείνουν να περικλείουν κυκλικά τον κεντρικό δέκτη, ενώ σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη είναι συνήθως ημικυκλικά για να περιορίσουν τις απώλειες συνημιτόνου (cosine losses). Οι απώλειες του συνημιτόνου παρουσιάζονται όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ουρανό, οπότε η ακτινοβολία διαχέεται σε μεγαλύτερη περιοχή με αποτέλεσμα να είναι ασθενέστερη ανά μονάδα επιφάνειας. Τα μικρά πεδία θα είναι διατεταγμένα κυρίως αντιδιαμετρικά του πύργου, ενώ τα μεγαλύτερα θα έχουν πιο κυκλική διάταξη εξαιτίας της ατμοσφαιρικής εξασθένησης της ακτινοβολίας που μειώνει την αποδοτικότητα των απομακρυσμένων ηλιοστατών.



Σχήμα 3.4: Σκίαση, απώλειες συνημιτόνου και “blocking” σε πεδίο ηλιοστατών

Επίσης, ο προσδιορισμός του μεγέθους που πρέπει να έχει το πεδίο, όπως και ο δέκτης, εξαρτάται από τις ανάγκες που καλείται να καλύψει ο σταθμός σε επίπεδο ισχύος. Το πεδίο των ηλιοστατών φαίνεται να περιορίζεται πρακτικά σε θερμική ισχύ της τάξης των $600MW_{th}$, το οποίο αναλογικά σημαίνει ότι οι ηλιοστάτες πρέπει να διαταχθούν περίπου 1,5 χιλιόμετρο από έναν πύργο ύψους 160m. Οι μεγαλύτερες αποστάσεις

περιπλέκουν την ακριβή στόχευση της ανακλώμενης στον πύργο ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ και η ατμοσφαιρική εξασθένιση κοντά στο επίπεδο του εδάφους θα μείωνε την ακτινοβολία.

Το σύστημα ελέγχου των ηλιοστατών πρέπει να εξασφαλίζει τη στόχευση με μεγάλη ακρίβεια προκειμένου η ακτινοβολία να ακολουθεί τη βέλτιστη δυνατή διαδρομή και να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή πρόσληψη ηλιακής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα να αποφεύγονται ενδεχόμενα τοπικής υπερθέρμανσης στους σωλήνες του δέκτη.

Τα συστήματα ηλιακού πύργου μπορούν να εγκατασταθούν σε επίπεδο ελαφρά κεκλιμένο, σε αντίθεση με τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα που απαιτούν επίπεδο έδαφος. Μάλιστα, μια πιθανή κλίση του εδάφους μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά για το σύστημα, αφού μπορεί να μειώσει τα φαινόμενα της σκίασης και του “blocking” και, κατ’ αυτόν τον τρόπο, να επιτρέψει μεγαλύτερη πυκνότητα ηλιοστατών στο πεδίο.

Για τον προσανατολισμό των ηλιοστατών χρησιμοποιείται ευρέως το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων (Alt-Azimuth coordinate system). Αυτό το σύστημα διευκολύνει τον προσδιορισμό του προσανατολισμού τους, ο οποίος δεν είναι απλός, επειδή η επιφάνεια τους δεν είναι κάθετη στο διάνυσμα της ανακλώμενης, αλλά στο διάνυσμα της διχοτόμου της γωνίας που σχηματίζεται από τη διεύθυνση του Ήλιου και από αυτή του πύργου.



Εικόνα 3.2: Φωτογραφία συστήματος ηλιακού πύργου ισχύος από το πεδίο των ηλιοστατών

3.3 Ο Δέκτης

Υπάρχουν δύο βασικοί σχεδιασμοί του δέκτη: ο εξωτερικός (external) και ο δέκτης κοιλότητας (cavity).

Οι εξωτερικοί δέκτες έχουν κατακόρυφους σωλήνες όπου προσπίπτει η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία από τους ηλιοστάτες. Σε αυτούς τους σωλήνες κυκλοφορεί ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας. Στην περίπτωση της άμεσης παραγωγής ατμού, διαφορετικοί ηλιοστάτες μπορεί να στοχεύουν σε δύο ή τρία διαφορετικά σημεία-στάδια, όπου το νερό προθερμαίνεται, μετά ατμοποιείται, και – αν απαιτείται – γίνεται υπέρθερμος ατμός. Αν ο δέκτης έχει μορφή κοιλότητας, η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην κοιλότητα, η οποία πιθανώς να κλείνεται από παράθυρο, γεγονός που εγείρει προκλήσεις σε σχέση με το υλικό που χρησιμοποιείται. Ο δέκτης κοιλότητας θεωρείται πιο αποδοτικός, μειώνει τις θερμικές απώλειες, αλλά δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι μία ορισμένη γωνία. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι οι πύργοι που περιβάλλονται από μεγάλα πεδία ηλιοστατών χρειάζεται να διαθέτουν αρκετούς δέκτες.

Προκειμένου να περιορίσουν την οπτική απορρόφηση, αλλά και να επωφεληθούν από την υψηλότερη απόδοση και την οικονομία κλίμακας των μεγάλων στροβίλων, αρκετοί πύργοι μπορούν να συνδεθούν σε έναν στρόβιλο. Αυτή η επιλογή σχεδιασμού του συστήματος καθιστά καταλληλότερη την επιλογή κοιλότητας αντί εξωτερικού δέκτη.



Εικόνα 3.3: Φωτογραφία ηλιακών πύργων

3.4 Πλεονεκτήματα και τεχνολογικές προοπτικές

Αν και οι ηλιακοί πύργοι είναι λιγότερο ώριμη τεχνολογία σε σχέση με τα συστήματα παραβολικών κοίλων, είναι η πλέον υποσχόμενη ανάμεσα στα CSP για υψηλότερες αποδόσεις και κατ' επέκταση μείωση κόστους στο μέλλον.

Θεωρητικά, οι ηλιακοί πύργοι ισχύος έχουν έναν πολύ πιο αποδοτικό σχεδιασμό από αυτόν που έχουν τα γραμμικά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα ηλιακών πύργων επιτυγχάνουν υψηλότερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και άρα υψηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για μείωση των θερμικών απωλειών στο δέκτη και καλύτερη απόδοση στο μπλοκ ισχύος. Πρακτικά, η πραγματική απόδοση των δεκτών στα συστήματα ηλιακού πύργου ποικίλλει. Στα γραμμικά συστήματα οι δέκτες μπορούν να μονωθούν, πράγμα που δεν μπορεί να γίνει στους ηλιακούς πύργους. Από την άλλη, οι πύργοι είναι λιγότερο ευάλωτοι σε εποχιακές διακυμάνσεις, σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, τα οποία έχουν μεγαλύτερες οπτικές απώλειες κατά τους χειμερινούς μήνες.

Κάποιοι από τους εμπορικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν συστήματα ηλιακού πύργου παράγουν τον ατμό απευθείας στο δέκτη. Άλλοι πάλι, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούν τηγμένα άλατα ως υγρό μεταφοράς θερμότητας και ως μέσο αποθήκευσης. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, ο υψηλός λόγος συγκέντρωσης της ακτινοβολίας στον πύργο προκαλεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (για την ακρίβεια 550°C για τον ατμό και 565 °C για τα τηγμένα άλατα), αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα της μετατροπής της θερμότητας σε ηλεκτρισμό. Η βελτιωμένη αποδοτικότητα έχει ως αποτέλεσμα και το μειωμένο φορτίο ψύξης, μειώνοντας την κατανάλωση νερού σε σταθμούς που βρίσκονται σε ξηρές και άνυδρες περιοχές.

Επιπρόσθετά, τα συστήματα ηλιακού πύργου είναι εξαιρετικά ευέλικτα όσον αφορά το σχεδιασμό τους, αφού υπάρχει μια πληθώρα επιλογών από ηλιοστάτες, δέκτες, υγρά μεταφοράς και μπλοκ ισχύος. Μάλιστα, κάποιοι σταθμοί έχουν αρκετούς πύργους που συνιστούν ένα μπλοκ ισχύος.

Επίσης, οι προοπτικές για μείωση του κόστους στο επίπεδο της θερμικής αποθήκευσης είναι εντυπωσιακές. Πιο συγκεκριμένα, οι ηλιακοί

πύργοι που χρησιμοποιούν τηγμένα άλατα χρειάζονται τρεις φορές λιγότερα μέσα αποθήκευσης σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα παραβολικών κοίλων, γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των θερμών και των ψυχρών τηγμένων αλάτων.

Η πιθανότητα επίτευξης ακόμα υψηλότερων θερμοκρασιών πρέπει να διερευνηθεί στο πλαίσιο χρήσης διαφορετικών τεχνολογιών δέκτη. Μια προοπτική είναι αυτή της χρήσης υπερκρίσιμων κύκλων ατμού (supercritical steam cycles), όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στους σύγχρονους θερμικούς σταθμούς άνθρακα, οι οποίοι φτάνουν, σε γενικές γραμμές, αποδόσεις 42-46% σε υπερκρίσιμη (supercritical) και εξαιρετικά υπερκρίσιμη (ultra-supercritical) κατάσταση. Τυπικά, οι σύγχρονοι σταθμοί καύσης άνθρακα χρησιμοποιούν ατμό θερμοκρασίας μέχρι και 620°C και πίεσης από 24MPa μέχρι 30 MPa, αλλά υπολογίζεται ότι μέχρι το 2020 μπορούν τα επίπεδα αυτά να φτάσουν 700 °C και 35 MPa αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας κράματα με βάση το νικέλιο και επιτυγχάνοντας αποδόσεις που θα αγγίζουν το 50%. Βέβαια, για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στα συστήματα ηλιακών πύργων θα απαιτηθούν κάποιες προσαρμογές.

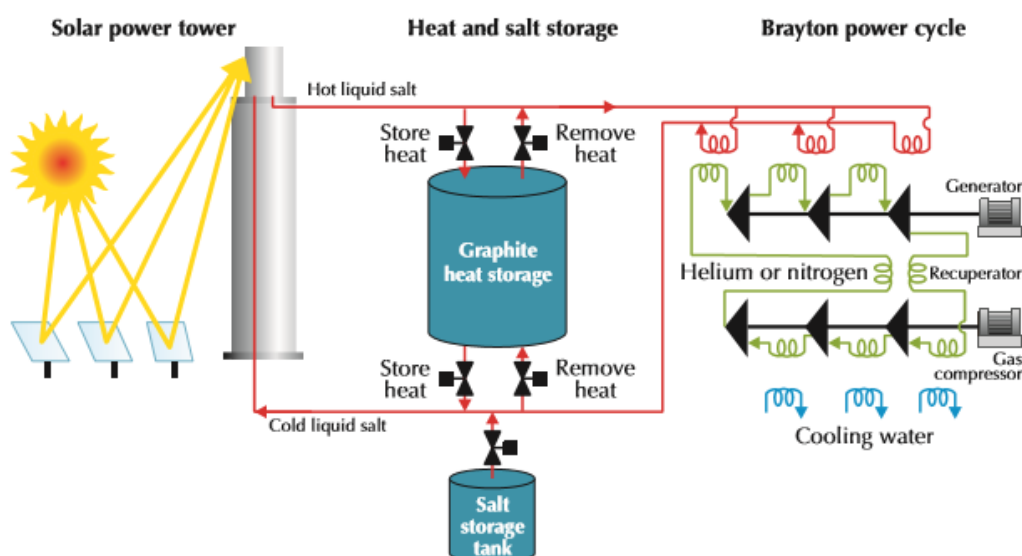
Όσον αφορά την τεχνολογία άμεσης παραγωγής ατμού (direct steam generation, DSG), αναμένεται να πυροδοτήσει κάποιες προκλήσεις για το συγχρονισμό των ηλιακών πεδίων με δέκτες και των υπερκρίσιμων ατμοστρόβιλων (supercritical steam turbines). Σε αυτή την περίπτωση θα απαιτείται συνεχής έλεγχος των ηλιακών συλλεκτών για να αποφευχθούν προβλήματα κατά την εκκίνηση του συστήματος και διακυμάνσεις της ισχύος που μπορεί να προκαλούνται λόγω νεφελώδους καιρού και μετά τη δύση του Ήλιου. Τα συστήματα ηλιακών πύργων που χρησιμοποιούν υγρά μεταφοράς θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα αποθήκευσης φαίνεται να είναι ικανότερα να εκπληρώσουν αυτές τις προϋποθέσεις, αφού μπορούν να αποσυνδέουν τη συλλογή ηλιοθερμικής ενέργειας από την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η υπερθέρμανση με τη βοήθεια κάποιου καυσίμου, η πλήρης υβριδοποίηση ηλιακής ενέργειας-φυσικού αέριου και κάποιοι θερμικοί σταθμοί με καύσιμο άνθρακα που χρησιμοποιούν επικουρικά ηλιακό πεδίο (solar-coal plants) μπορούν επίσης να συντελέσουν σε αυτή την κατεύθυνση. Οι ηλιακοί πύργοι που θα χρησιμοποιούν στροβίλους υπερκρίσιμης λειτουργίας θα πρέπει να μπορούν να τροφοδοτούν καθένα από αυτούς τους στροβίλους με καύσιμο.

Μια άλλη τεχνολογία πύργου που φτάνει σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικό αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας (δοκιμάστηκε στον ηλιακό πύργο Julich στη Γερμανία) και μέσο αποθήκευσης σε στέρεα φάση. Οι πύργοι αυτής της τεχνολογίας μπορούν να φτάσουν σε αποδοτικότητα μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό μέχρι και 25%, αλλά δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο αν το κέρδος που υπάρχει σε επίπεδο απόδοσης μπορεί να αντισταθμίσει το κόστος και την πολυπλοκότητα του κύκλου.

Από την άλλη, τα τηγμένα άλατα αποσυντίθεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, ενώ η οξείδωση που προκαλούν περιορίζει τις θερμοκρασίες των ατμοστροβίλων. Υψηλότερες θερμοκρασίες και αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση τηγμένων φθοριούχων αλάτων ως υγρό μεταφοράς θερμότητας, με θερμοκρασίες που θα κυμαίνονται από 700 °C μέχρι 850 °C και με τη χρήση κύκλων Brayton κλειστού βρόχου πολλαπλής επαναθέρμανσης (closed-loop multi-reheat Brayton cycle), που χρησιμοποιούν ήλιο (He) ή άζωτο και αρχικά είχαν αναπτυχθεί για υψηλής θερμοκρασίας πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα λειτουργούν σε σχετικά υψηλή πίεση και υψηλές πυκνότητες ισχύος, με αποτέλεσμα να απαιτούν μικρότερο εξοπλισμό από τους ατμοστροβίλους και άρα να έχουν μειωμένο κόστος. Σε αυτή την περίπτωση το προτιμώμενο μέσο αποθήκευσης θερμότητας θα είναι ο γραφίτης.

Οι κύκλοι Brayton ανοιχτού τύπου που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια προσφέρουν έναν εντελώς διαφορετικό τρόπο εκμετάλλευσης των υψηλών θερμοκρασιών που μπορούν να επιτύχουν οι ηλιακοί πύργοι. Σε αυτή την περίπτωση, συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται στους ηλιακούς δέκτες και κατόπιν στέλνεται απευθείας σε αεριοστρόβιλο, σε θερμοκρασία που φτάνει στους 800 °C. Ο συμπιεσμένος αέρας μπορεί να θερμανθεί περαιτέρω και να φτάσει τους 1300 °C, γεγονός που θα καταστήσει τον αεριοστρόβιλο αποδοτικότερο. Η πλεονάζουσα θερμότητα από τον αεριοστρόβιλο μπορεί να σταλεί σε έναν κύκλο ατμού που θα οδηγεί μια δεύτερη γεννήτρια. Με αυτόν τον τρόπο, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό μπορεί να ξεπεράσει το 30%. Παρόλα αυτά, η αποθήκευση θερμότητας σε αυτά τα συστήματα εξακολουθεί να αποτελεί ένα ζήτημα που δεν έχει επιλυθεί ικανοποιητικά. Αντιθέτως, για τους σταθμούς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ή βιομάζα ως εφεδρεία, η κατάσταση είναι πιο ξεκάθαρη. Η θέρμανση του αέρα του ηλιακού δέκτη από το εφεδρικό καύσιμο μπορεί να ελέγξει τις

διακυμάνσεις της ηλιακής ενέργειας και αν είναι απαραίτητο να αυξάνει αδιάλειπτα το επίπεδο της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.5 : Σύστημα ηλιακού πύργου ισχύος με χρήση τηγμένων φθοριούχων αλάτων σε συνδυασμό με κλειστό κύκλο Brayton

3.5 Οικονομοτεχνική προσέγγιση

Οι εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων ισχύος, όπως και γενικά των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων, αποτελούν επενδύσεις εντάσεως κεφαλαίου, με το μεγαλύτερο μέρος να πρέπει να επενδυθεί προκαταβολικά. Γίνεται σαφές λοιπόν ότι η χρηματοδότηση καθίσταται δύσκολη και ιδιαίτερα εφόσον μιλάμε για σχετικά καινούριες, αναδυόμενες τεχνολογίες σε περιβάλλον νέων και αβέβαιων αγορών.

Το γεγονός ότι οι ηλιακοί πύργοι ισχύος έχουν μεγάλο επενδυτικό κόστος αλλά πολύ λίγα έξοδα λειτουργίας καθιστά αυτά τα συστήματα ευάλωτα στην αβεβαιότητα της διακύμανσης των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, αφού στην ουσία οι τιμές των ορυκτών καυσίμων είναι αυτές που καθορίζουν την τιμή του ηλεκτρισμού στην ενεργειακή

αγορά και άρα την ίδια την ενεργειακή αγορά. Γίνεται σαφές, λοιπόν, ότι με τις παρούσες συνθήκες είναι δύσκολο κάποιος να προσδιορίσει τα έσοδα από ένα σταθμό ηλιακών πύργων και κατά πόσο αυτά μπορούν να αποσβέσουν το κόστος επένδυσης και να παράγουν κέρδος.

Το ακριβές κόστος επένδυσης για τα συστήματα ηλιακών πύργων ισχύος είναι αρκετά δύσκολο να εκτιμηθεί, αλλά προς το παρόν θεωρείται υψηλότερο σε σχέση με αυτό των παραβολικών κοίλων. Παρόλα αυτά, μια αύξηση της αποδοτικότητας από 15% σε 25% θα προκαλέσει εκτιμώμενη μείωση της τάξης του 40% στο επενδυτικό κόστος για τα εξαρτήματα που συνδέονται με την ηλιακή τεχνολογία και 20% μείωση στο συνολικό επενδυμένο κόστος. Η τελευταία τάση για προώθηση πολυάριθμων, μικρών, επίπεδων ηλιοστατών που παράγονται μαζικά φαίνεται να οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του κόστους, αφού τα προβλήματα της αντίστασης στον άνεμο και της ακρίβειας στη στόχευση της ακτινοβολίας επιλύονται με τη χρήση υπολογιστών. Καθώς η βιομηχανία των ηλιακών πύργων ωριμάζει ραγδαία, το κόστος επένδυσης μπορεί να περιοριστεί από 30 έως 75%.

Το γεγονός ότι οι ηλιακοί πύργοι ισχύος προσφέρουν το πλεονέκτημα της φτηνής και πολύ αποτελεσματικής ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στην αποσύνδεση της παραγωγής ηλεκτρισμού από την ευμετάβλητη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να λειτουργήσει καταλυτικά στο να καλύπτει στο ηλεκτρικό δίκτυο τη ζήτηση τις ώρες αιχμής, ειδικά όταν αυτές οι ώρες δεν ταυτίζονται με τις ώρες υψηλής ηλιοφάνειας και δεδομένου ότι για τους διαχειριστές του δικτύου η παραγωγή ηλεκτρισμού όταν μιλάμε για φορτίο αιχμής είναι πάντα πιο ακριβή. Αργότερα, με την εξέλιξη των συστημάτων, η αποθήκευση ενέργειας θα μπορεί να χρησιμοποιείται ακόμα και για την κάλυψη του φορτίου βάσης.

Δυστυχώς, το μεγάλο πλεονέκτημα της ενεργειακής αποθήκευσης δε φαίνεται προς το παρόν να αντανακλάται στην ενεργειακή αγορά, με αποτέλεσμα, ενώ το κόστος των φωτοβολταϊκών επενδύσεων μειώνεται σημαντικά, το μερίδιο αγοράς που αφορά τους ηλιακούς πύργους, και γενικότερα τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα, να μην παρουσιάζει την ίδια δυναμική. Όσο απαισιόδοξο κι αν φαίνεται αυτό όμως, σύμφωνα με την καμπύλη μάθησης, μια μικρή ανάπτυξη των συστημάτων ηλιακών πύργων θα οδηγήσει σε ραγδαία μείωση του κόστους επένδυσης. Επιπλέον, υπάρχει ακόμα μεγάλο περιθώριο για περαιτέρω τεχνολογικές

βελτιώσεις και μειώσεις κόστους. Ήδη η τρέχουσα ανάπτυξη μεγάλων συστημάτων ηλιακών πύργων στις Η.Π.Α., στην Ισπανία και αλλού αναμένεται να οδηγήσει στην εισαγωγή καινοτομιών και στη τόνωση του επενδυτικού ενδιαφέροντος από νέους φορείς, με συνεπακόλουθη μείωση του κόστους.

Γενικά, θεωρείται ότι οι τεχνολογικές εξελίξεις τα επόμενα χρόνια, εφόσον συνδυαστούν με το κατάλληλο μίγμα ενεργειακών πολιτικών, μπορούν να καταστήσουν τα συστήματα ηλιακών πύργων οικονομικά ανταγωνιστικά ακόμα και σε σχέση με τις συμβατικές πηγές παραγωγής ενέργειας, τουλάχιστον όσον αφορά τις χώρες με υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας.

Σίγουρα, οι χώρες με υψηλή ηλιοφάνεια (Νότια Ευρώπη, Αφρική, Αυστραλία, Μέση Ανατολή, Λατινική Αμερική, νοτιοδυτικές πολιτείες των Η.Π.Α., Κίνα, Ινδία) έχουν το προβάδισμα στην προοπτική χρήσης ηλιακών πύργων για ηλεκτρική παραγωγή. Όμως, υπάρχουν προοπτικές κατασκευής μεγάλων δικτύων μεταφοράς, που θα μπορούν να μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ από καθαρές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τις γεωγραφικά προνομιούχες περιοχές σε άλλες καταναλώτριες χώρες με μεγάλο πληθυσμό και υψηλή ενεργειακή κατανάλωση, αλλάζοντας τον οικονομικό, περιβαλλοντικό και ενεργειακό χάρτη όχι μόνο της χώρας παραγωγής αλλά και άλλων. Η μεγάλης κλίμακας μεταφορά ισχύος δεν είναι καινούριο δεδομένο, αφού έχει ήδη εφαρμοστεί σε έργα υδροηλεκτρικών φραγμάτων και βασίζεται στην τεχνολογία Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (High-Voltage Direct-Current, HVDC). Οι HVDC γραμμές μεταφοράς έχουν απώλειες της τάξης του 3% για κάθε 1000χλμ, συν 0,6% απώλειες για τη μετατροπή στα δύο άκρα της γραμμής. Αυτές οι γραμμές μεταφοράς μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα και στον πάτο της θάλασσας, σε πολύ μεγάλα βάθη, ενώνοντας ακόμα και ηπείρους.

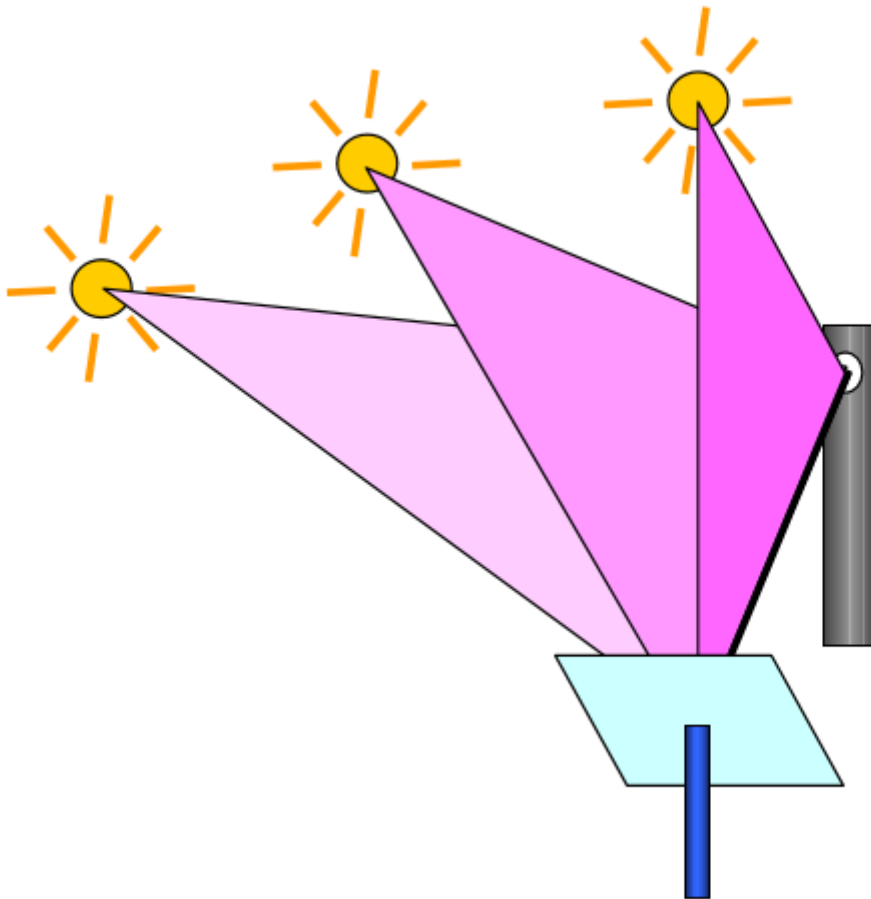
Πρέπει να τονιστεί ότι, παρά την τεράστια δυναμική των ηλιακών πύργων ισχύος ως συστήματα και της ηλιακής τεχνολογίας γενικότερα, θα χρειαστεί ένα μεγάλο εύρος κατάλληλων πολιτικών για να «ξεκλειδώσει» τις προοπτικές αξιοποίησής τους. Αυτό το μίγμα πολιτικών περιλαμβάνει την καθιέρωση κινήτρων για το αρχικό άνοιγμα της αγοράς, την άρση μεγάλων γραφειοκρατικών εμποδίων, την ενίσχυση της τεχνολογικής έρευνας και την ενθάρρυνση και υποστήριξη της καινοτομίας. Ακόμα, περιλαμβάνει ιδανικά την καθιέρωση νέων πιο υγιών και λειτουργικών οικονομικών και επιχειρηματικών μοντέλων, την προώθηση της

ενεργειακής συνεργασίας μεταξύ χωρών σε διεθνές επίπεδο και την συμπερίληψη των αναπτυσσόμενων χωρών στο διεθνή ενεργειακό χάρτη. Τα μακροπρόθεσμα οφέλη από τέτοιες ενέργειες θα είναι αξιολογώσιμα, από την άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέχρι τη μείωση της αβεβαιότητας των τιμών στην ενεργειακή αγορά και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ

4.1 Αλγόριθμος για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη κατά την κίνηση του Ήλιου

Η άμεση ηλιακή δέσμη μπορεί να ανακλαστεί σε κάποιο σημείο ενός ακίνητου στόχου, εν προκειμένω του ηλιακού πύργου, μέσω ενός υπολογιστικού ελεγκτή, ο οποίος θα χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις για να συνδέσει τη μηχανική κίνηση του κατόπτρου με την εκάστοτε θέση του Ήλιου και τον σταθερό στόχο στο δέκτη. Αυτά τα τρία στοιχεία, δηλαδή ο Ήλιος, ο δέκτης (που είναι ο στόχος της ανάκλασης) και ο ηλιοστάτης – ή για να είμαστε πιο ακριβείς τα κέντρα τους – ορίζουν το επίπεδο της ανάκλασης.



Σχήμα 4.1: Το επίπεδο ανάκλασης της ακτινοβολίας

Η κορυφή αυτού του στρεφόμενου τριγώνου είναι ο Ήλιος, ενώ η βάση του τριγώνου είναι σταθερή και ορίζεται από το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το κέντρο του ηλιοστάτη με το σημείο του στόχου που μας ενδιαφέρει. Πρέπει, λοιπόν, σε ακριβώς αυτό το επίπεδο, το ζητούμενο διάνυσμα της θέσης του ηλιοστάτη να βρίσκεται στη μέση μεταξύ του Ήλιου και του στόχου, προκειμένου η άμεση ηλιακή δέσμη να ανακλάται ακριβώς στο επιθυμητό σημείο του σταθερού στόχου.

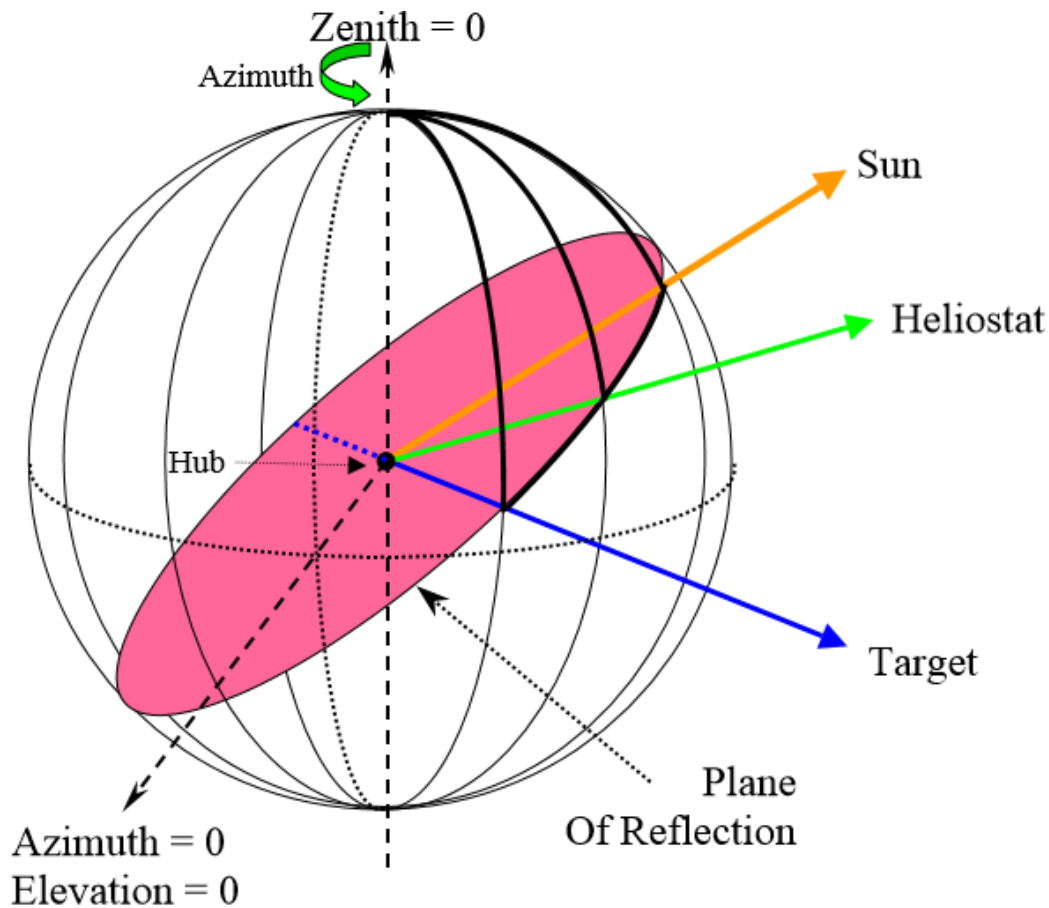
Όπως προαναφέρθηκε, το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων είναι αυτό που ενδείκνυται περισσότερο για τους απαιτούμενους υπολογισμούς, αφού οι αλγεβρικές πράξεις και οι εξισώσεις που απαιτούνται είναι πολύ πιο απλές απ' ό,τι στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Για την επίλυση του προβλήματος θεωρούμε μια σφαίρα και τον ηλιοστάτη ως κέντρο αυτής της σφαίρας. Με αυτή την παραδοχή, το διάνυσμα της θέσης του Ήλιου μπορεί να προσδιοριστεί, σχετικά απλά, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα την τοπική ώρα, την ημερομηνία, τη ζώνη ώρας και το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της τοποθεσίας του ηλιοστάτη.

Ο αλγόριθμος προσδιορισμού της ακριβούς θέσης του Ήλιου θα αναλυθεί παρακάτω. Το διάνυσμα της θέσης του στόχου είναι σταθερό, αφού δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του βάθρου του ηλιοστάτη και του στόχου. Παρόλα αυτά, υπάρχει μία μικρή μετατόπιση του διανύσματος του στόχου (target vector offset), εξαιτίας της μικρής κίνησης του κέντρου του κατόπτρου όταν η επιφάνεια του δε βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της περιστροφής (συνήθως οφείλεται σε μικρές κατασκευαστικές αστοχίες). Στην παρούσα εργασία το μικρό offset που παρουσιάζεται σε πραγματικά συστήματα θα θεωρηθεί μηδενικό για λόγους απλούστευσης.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας της μακρινής απόστασης από τον Ήλιο, θεωρούμε ότι η γωνιακή του θέση δεν αλλάζει όταν υπάρχει μικρή μετατόπιση της θέσης του. Παρόλα αυτά, πρέπει να επισημανθεί ότι σε πραγματικές συνθήκες ηλιακού πεδίου, ακόμα και μια ελάχιστη μετατόπιση της θέσης του Ήλιου προκαλεί εμφανείς αλλαγές στο διάνυσμα του στόχου. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που επηρεάζει τη στόχευση της ακτινοβολίας και συμβάλλει στην εμφάνιση του offset.

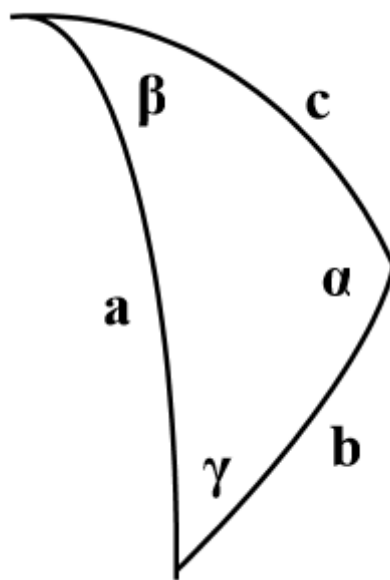
Το offset που δημιουργείται, όμως, μπορεί να προβλεφθεί και να διορθωθεί χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα του συστήματος και τεχνικές βελτιστοποίησης, τα οποία όμως δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.2: Το τμήμα της επιφάνειας της σφαίρας (τρίγωνο) που θα χρησιμοποιήσουμε για τον προσδιορισμό των εξισώσεων ανάκλασης

Το παραπάνω σχήμα δείχνει το καμπυλόγραμμο τρίγωνο που θα χρησιμοποιήσουμε για τις εξισώσεις ανάκλασης, το οποίο, όπως φαίνεται, αποτελεί ένα τμήμα της επιφάνειας της σφαίρας. Για να προσδιορίσουμε τις τιμές των «πλευρών» και των γωνιών του τριγώνου θα χρησιμοποιήσουμε το νόμο των ημιτόνων και το νόμο των συνημιτόνων. Ως γνωστόν, αυτές οι γεωμετρικές σχέσεις συνδέουν τις πλευρές ενός τριγώνου με τις γωνίες του. Με τη χρήση αυτών των σχέσεων, μπορούν να προσδιοριστούν οι άγνωστες τιμές του τριγώνου και, συνεπακόλουθα, να υπολογιστεί αλγεβρικά το ζητούμενο διάνυσμα της θέσης του ήλιοστατη, με δεδομένα το ηλιακό διάνυσμα ανά πάσα στιγμή και το σταθερό διάνυσμα του στόχου. Το επίπεδο της ανάκλασης στρέφεται γύρω από το διάνυσμα του στόχου, με την κατεύθυνση του να καθορίζεται από το διάνυσμα της θέσης του Ήλιου.

Σύμφωνα με το νόμο των ημιτόνων, οι τρεις λόγοι μίας πλευράς του τριγώνου προς την απέναντι της γωνία είναι ίσοι. Από την άλλη, ο νόμος των συνημιτόνων ορίζει τη σχέση μεταξύ μίας πλευράς ή μίας γωνίας του τριγώνου με τις άλλες δύο πλευρές ή γωνίες και την απέναντι γωνία ή πλευρά αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Βοηθητικό σχήμα για τον ορισμό των νόμων ημιτόνων και συνημιτόνων ^[9]

Ο νόμος των ημιτόνων, σύμφωνα με το παραπάνω βοηθητικό τρίγωνο του σχήματος 4.3, ορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin \beta}{\sin b} = \frac{\sin \gamma}{\sin c}$$

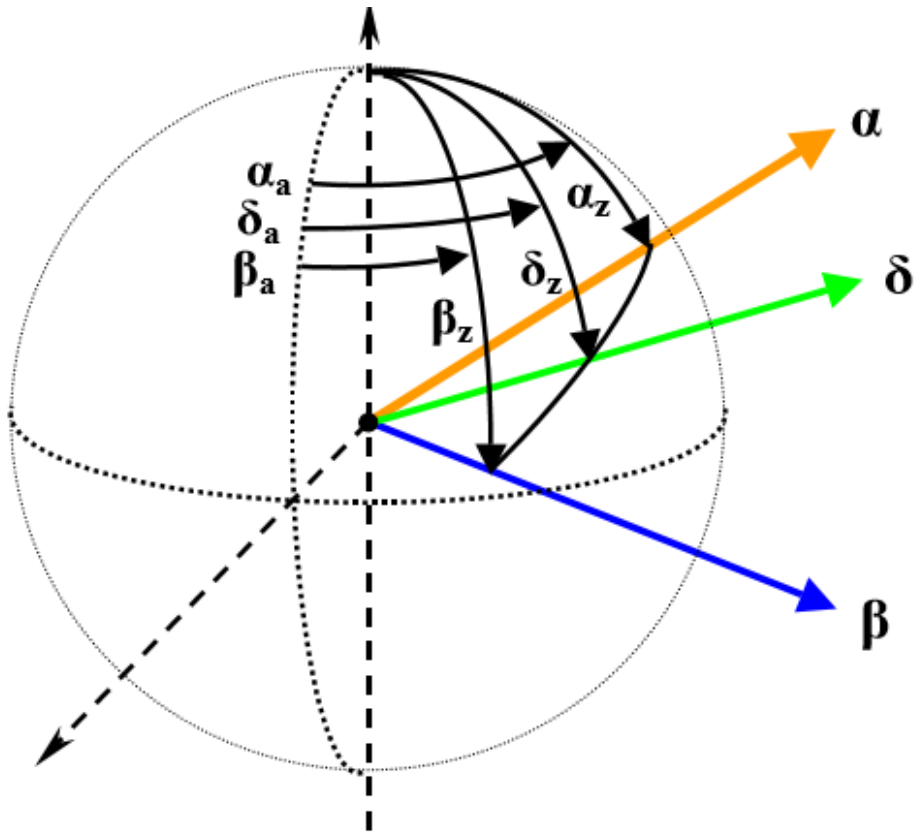
Αντίστοιχα, ο νόμος των συνημιτόνων εκφράζεται από τις σχέσεις:

$$\cos \alpha = -\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma \cos a$$

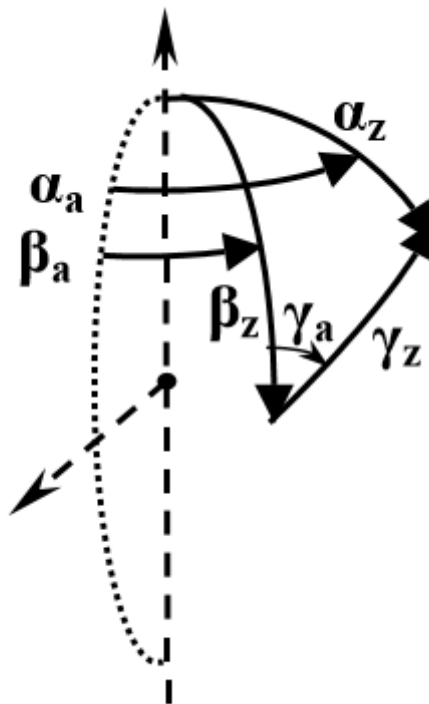
$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha$$

Καθεμία από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει μια άγνωστη τιμή που εμπλέκεται στις εξισώσεις ανάκλασης.

Οι μεταβλητές στο πρόβλημα αυτό είναι έξι. Στις θεμελιώδεις εξισώσεις ανάκλασης το διάνυσμα θέσης του Ήλιου (α) και το διάνυσμα στόχου (β) είναι γνωστά, ενώ το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του διανύσματος της θέσης του ηλιοστάτη (δ), τα οποία φαίνονται στο επίπεδο της σφαίρας στο σχήμα 4.4. Η θέση του Ήλιου μπορεί να προσδιοριστεί από έναν αλγόριθμο που θα αναλύσουμε παρακάτω. Στο πρόγραμμα που θα υλοποιήσουμε ο χρήστης θα εισάγει τις δύο μεταβλητές εισόδου που περιγράφουν το ηλιακό διάνυσμα (ηλιακό αζιμούθιο, ηλιακό ύψος), καθώς και τις άλλες δύο μεταβλητές εισόδου που ορίζουν το σταθερό διάνυσμα του στόχου. Αρκεί, λοιπόν, ο αλγόριθμος, δεχόμενος τις παραπάνω τέσσερις εισόδους, να δίνει ως εξόδους τις δύο γωνίες που καθορίζουν το διάνυσμα της θέσης του ηλιοστάτη.



Σχήμα 4.4: Βοηθητικό σχήμα για τον ορισμό του προβλήματος



Σχήμα 4.5: Βοηθητικό σχήμα για την επίλυση του προβλήματος

Στην ουσία, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο υπολογισμός των γωνιών που προσδιορίζουν τη διχοτόμο μεταξύ του Ήλιου και του στόχου.

Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, το νόμο των συνημιτόνων, στο τρίγωνο του σχήματος 4.5, έχουμε:

$$\cos \gamma_z = \cos \alpha_z \cos \beta_z + \sin \alpha_z \sin \beta_z \cos(\alpha_a - \beta_a)$$

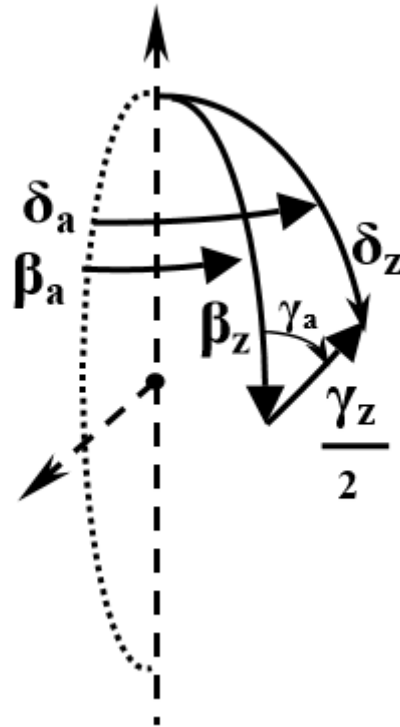
$$\gamma_z = \cos^{-1}(\cos \gamma_z)$$

Οπότε προέκυψε το γ_z . Χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά το νόμο των ημιτόνων έχουμε:

$$\frac{\sin(\alpha_a - \beta_a)}{\sin \gamma_z} = \frac{\sin \gamma_a}{\sin \alpha_z}$$

$$\sin \gamma_a = \sin \alpha_z \frac{\sin(\alpha_a - \beta_a)}{\sin \gamma_z}$$

$$\gamma_a = \sin^{-1}(\sin \gamma_a)$$



Σχήμα 4.6: Βοηθητικό σχήμα για την επίλυση του προβλήματος

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.6, εφόσον υπολογίσαμε τη γωνία μεταξύ του γ_z και του β_z – που παραμένει αμετάβλητη – και διαιρώντας το γ_z με 2, προκύπτουν οι ζητούμενες γωνίες του διανύσματος της διχοτόμου, όπως φαίνεται παρακάτω.

Χρησιμοποιώντας το νόμο των συνημιτόνων και σύμφωνα με το σχήμα 4.6:

$$\cos \delta_z = \cos \beta_z \cos \left(\frac{\gamma_z}{2} \right) + \sin \beta_z \sin \left(\frac{\gamma_z}{2} \right) \cos \gamma_a$$

$$\delta_z = \cos^{-1}(\cos \delta_z)$$

Από το νόμο των ημιτόνων:

$$\frac{\sin(\delta_a - \beta_a)}{\sin\left(\frac{\gamma_z}{2}\right)} = \frac{\sin \gamma_a}{\sin \delta_z}$$

$$\sin(\delta_a - \beta_a) = \sin\left(\frac{\gamma_z}{2}\right) \frac{\sin \gamma_a}{\sin \delta_z}$$

$$\delta_a = \sin^{-1}\left[\sin\left(\frac{\gamma_z}{2}\right) \frac{\sin \gamma_a}{\sin \delta_z}\right] + \beta_a$$

Οπότε, έχουμε το ζητούμενο διάνυσμα της θέσης του ηλιοστάτη.

4.2 Αλγόριθμος για τον προσδιορισμό της θέσης του Ήλιου

Όπως αναφέρθηκε, δύο από τις εισόδους που δέχεται ο αλγόριθμος προσδιορισμού της θέσης του ηλιοστάτη είναι οι γωνίες που προσδιορίζουν το ηλιακό διάνυσμα, δηλαδή το ηλιακό αζιμούθιο και το ηλιακό ύψος. Σκοπός είναι ο αλγόριθμος να προσδιορίζει το ηλιακό διάνυσμα ανά πάσα στιγμή.

Παρακάτω φαίνονται τα βήματα για τον προσδιορισμό του ηλιακού διανύσματος σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο βιβλίο «Φωτοβολταϊκά Συστήματα από τη Θεωρία στην Πράξη»^[1].

Τα δεδομένα εισόδου του αλγόριθμου είναι τρία σχετικά με την τοποθεσία που βρίσκεται ο παρατηρητής (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και ζώνη ώρας) και άλλα τρία σχετικά με το χρόνο (την ημέρα του έτους, την ωρολογιακή ώρα και την εφαρμογή ή όχι της θερινής ώρας). Με αυτά λοιπόν τα δεδομένα, για τον προσδιορισμό του ηλιακού διανύσματος ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογισμός μεσημβρινού αναφοράς

Για να προσδιορίσουμε επαρκώς τη θέση ενδιαφέροντος στην επιφάνεια της Γης προσαρμόζουμε χρονικά το γεωγραφικό μήκος στην αντίστοιχη ζώνη ώρας που υπάγεται.

$$L_{ST} = (15^\circ/h) \cdot \Delta T_{GMT}$$

όπου L_{ST} : ο μεσημβρινός αναφοράς

ΔT_{GMT} : η ζώνη ώρας

Ο τύπος βασίζεται στη διαίρεση των 360° της ιδιοπεριστροφής της Γης με τις 24 ώρες που χρειάζεται για να κάνει αυτή την περιστροφή. Αυτό σημαίνει ότι η Γη περιστρέφεται κατά 15° ανά μία ώρα.

- Υπολογισμός γωνίας ημέρας

$$B = \frac{360^\circ}{364} \cdot (DoY - 81)$$

όπου B: η γωνία ημέρας

DoY: η ημέρα του έτους κατά την οποία επιθυμούμε να υπολογιστεί η ηλιακή ώρα

Η ημέρα του έτους DoY παίρνει ακέραιες τιμές από το 1 (δηλαδή ξεκινώντας από την πρώτη μέρα του έτους, την 1^η Ιανουαρίου) μέχρι το 365.

- Υπολογισμός εξίσωσης χρόνου

Η εξίσωση του χρόνου αποτελεί μία διόρθωση για τον υπολογισμό της ηλιακής ώρας στον αλγόριθμο. Στην ουσία συνυπολογίζει τη χρονική διάρκεια που χρειάζεται ο Ήλιος για να κινηθεί στην ουράνια σφαίρα, διορθώνοντας χρονικές αποκλίσεις στον αλγόριθμο, που οφείλονται κυρίως στην κλίση του πολικού άξονα της Γης. Η εξίσωση χρόνου προκύπτει από εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις, μία από τις οποίες είναι:

$$E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B)$$

όπου E: η εξίσωση του χρόνου

και B: η γωνία ημέρας

- Υπολογισμός ηλιακής ώρας

Η ηλιακή ώρα έχει ως αναφορά τον Ήλιο και δεν ταυτίζεται με την τοπική ώρα. Επίσης, η ηλιακή ώρα λαμβάνει πάντα ως δεδομένο την χειμερινή ώρα, αφού η θερινή ώρα είναι προϊόν σύμβασης.

Η ηλιακή ώρα δίνεται από τον τύπο:

$$T_{SOLAR} = T_{LOCAL} + E + 4 \frac{min}{\circ} \cdot (L_{ST} - L_{LOCAL})$$

όπου: T_{SOLAR} : η ηλιακή ώρα, για δεδομένο τόπο, δεδομένη ημέρα και σε συγκεκριμένη ηλιακή θέση

T_{LOCAL} : η αντίστοιχη τοπική ώρα

E: η διόρθωση που εισάγεται από την εξίσωση χρόνου

L_{ST} : ο μεσημβρινός αναφοράς για την ώρα τοπικής ζώνης

L_{LOCAL} : το γεωγραφικό μήκος της τοποθεσίας

- Υπολογισμός ωριαίας γωνίας

Η ωριαία γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο ημιεπίπεδο που ορίζεται από τον πολικό άξονα της Γης και το ηλιακό ζενίθ της τοποθεσίας και το ημιεπίπεδο που ορίζεται από τον πολικό άξονα της Γης και το σημείο που βρίσκεται ο Ήλιος στην ουράνια σφαίρα.

$$\omega = 15^\circ/\text{h} \cdot (T_{SOLAR} - 12\text{h})$$

όπου ω : η ωριαία γωνία

και T_{SOLAR} : η ηλιακή ώρα

Ο όρος $15^\circ/\text{h}$ προέρχεται, όπως προαναφέρθηκε, από τη διαίρεση των 360° της περιστροφής της Γης με τις 24 ώρες που χρειάζεται για την περιστροφή. Στην ουσία εκφράζει το γεγονός ότι η Γη στρέφεται κατά 15° την ώρα. Το 12 αναλογεί στην ώρα για την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ.

Η ωριαία γωνία παίρνει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές τιμές το απόγευμα. Όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τροχιάς του στην ουράνια σφαίρα, δηλαδή κατά την ηλιακή μεσημβρία, η ωριαία γωνία ισούται με μηδέν.

- Υπολογισμός ηλιακής απόκλισης

Η γωνία της ηλιακής απόκλισης σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου Ισημερινού και της νοητής ευθείας που ενώνει το κέντρο της Γης με το κέντρο του Ήλιου και μπορούμε να την ορίσουμε από τον παρακάτω τύπο:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left[\frac{360^\circ}{365} \cdot (\text{DoY} + 284)\right]$$

όπου δ : η ηλιακή απόκλιση

και DoY : η ημέρα του έτους που μας ενδιαφέρει, σε ακέραιες τιμές από το 1 έως το 365

Ο όρος 284 εκφράζει τον αριθμό των ημερών που πρέπει να περάσουν από την εαρινή ισημερία, προκειμένου η θέση του Ήλιου να αντιστοιχεί στην έναρξη του ημερολογιακού έτους.

. Η ηλιακή απόκλιση είναι 0° κατά την εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία, ενώ λαμβάνει τις τιμές $\delta = +23,45^\circ$ κατά το θερινό ηλιοστάσιο και $\delta = -23,45^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.

- Υπολογισμός του ύψους Ηλίου

Το ηλιακό ύψος δίνεται από τον τύπο:

$$\sin\beta = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega$$

όπου β : το ύψος Ηλίου για συγκεκριμένη περιοχή και ώρα

δ : η ηλιακή απόκλιση της συγκεκριμένης ημερολογιακής ημέρας

φ : το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας που εξετάζεται

ω : η ωριαία γωνία

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι γωνίες που εμπλέκονται στον παραπάνω τύπο είναι σε μοίρες.

- Υπολογισμός αζιμούθιου

Η ηλιακή αζιμούθια γωνία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\cos Z = \frac{\sin\beta \cdot \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\beta \cdot \cos\varphi}$$

όπου Z : το ηλιακό αζιμούθιο με αναφορά το Νότο, για συγκεκριμένη τοποθεσία και ώρα

β : το ηλιακό ύψος

δ : η ηλιακή απόκλιση για τη συγκεκριμένη ημερολογιακή ημέρα

φ : το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας που εξετάζεται

Όπως και στον υπολογισμό του ηλιακού ύψους, όλες οι γωνίες που εμπλέκονται στον παραπάνω τύπο υπολογισμού της αζιμούθιας γωνίας είναι σε μοίρες.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ο παραπάνω τύπος προσδιορίζει το αζιμούθιο μόνο όταν η ηλιακή ωριαία γωνία είναι μικρότερη ή ίση του μηδενός ($\omega \leq 0$). Σε αντίθετη περίπτωση ($\omega > 0$) ο τύπος υπολογίζει το $-\cos Z$.

4.3 Εφαρμογή του αλγορίθμου προσανατολισμού ηλιοστάτη σε περιβάλλον NI Labview

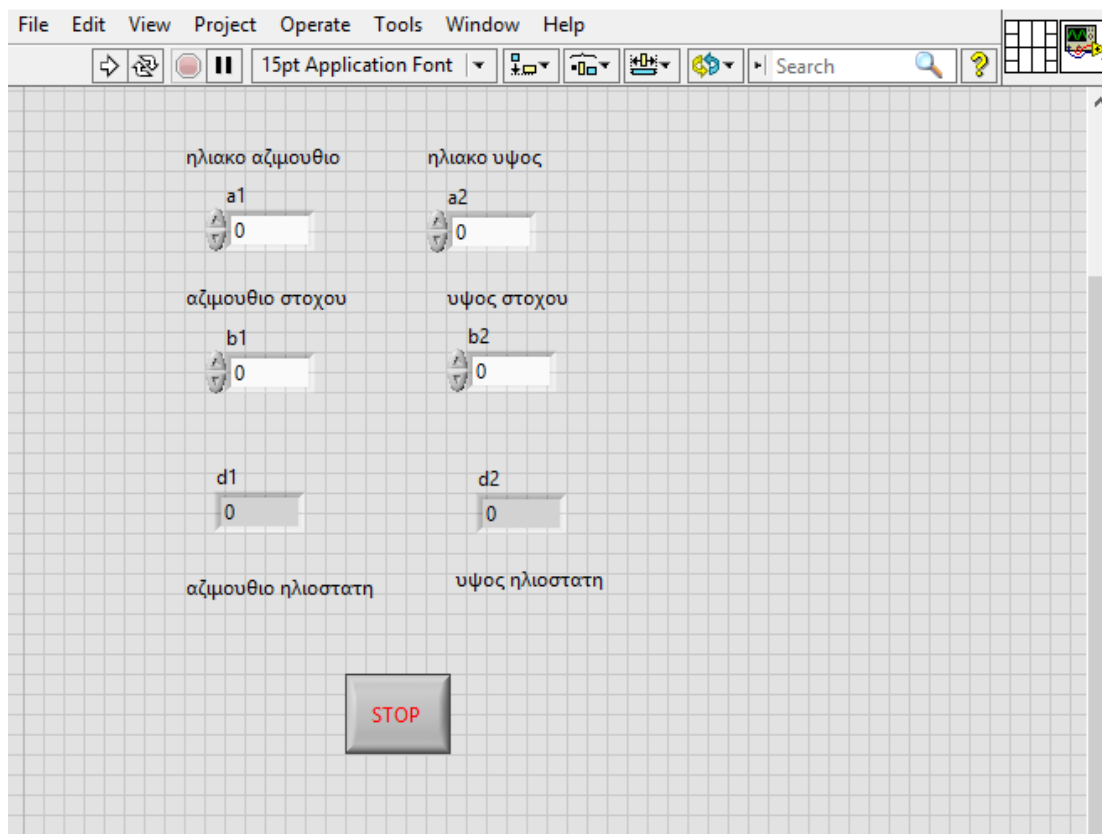
4.3.1 Το Labview

Το λογισμικό Labview είναι μία γλώσσα προγραμματισμού μετρήσεων, ελέγχου και ανάλυσης για συστήματα συλλογής δεδομένων. Το Labview ξεφεύγει από την παραδοσιακή φύση των γλωσσών προγραμματισμού που κάνουν χρήση λεκτικών εντολών, εισάγοντας ένα γραφικό περιβάλλον. Με τη χρησιμοποίηση γραφικών εντολών αναπτύσσουμε τον κώδικα της εφαρμογής που θέλουμε να υλοποιήσουμε.

Το Labview διαθέτει ένα λειτουργικό διάγραμμα (block diagram) στο οποίο υλοποιούμε τις εντολές του αλγορίθμου και ένα εποπτικό πάνελ (front panel) το οποίο προσομοιώνει την εικόνα ενός φυσικού οργάνου και είναι αυτό που συνδέει τον χρήστη με τον κώδικα.

4.3.2 Η εφαρμογή για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη

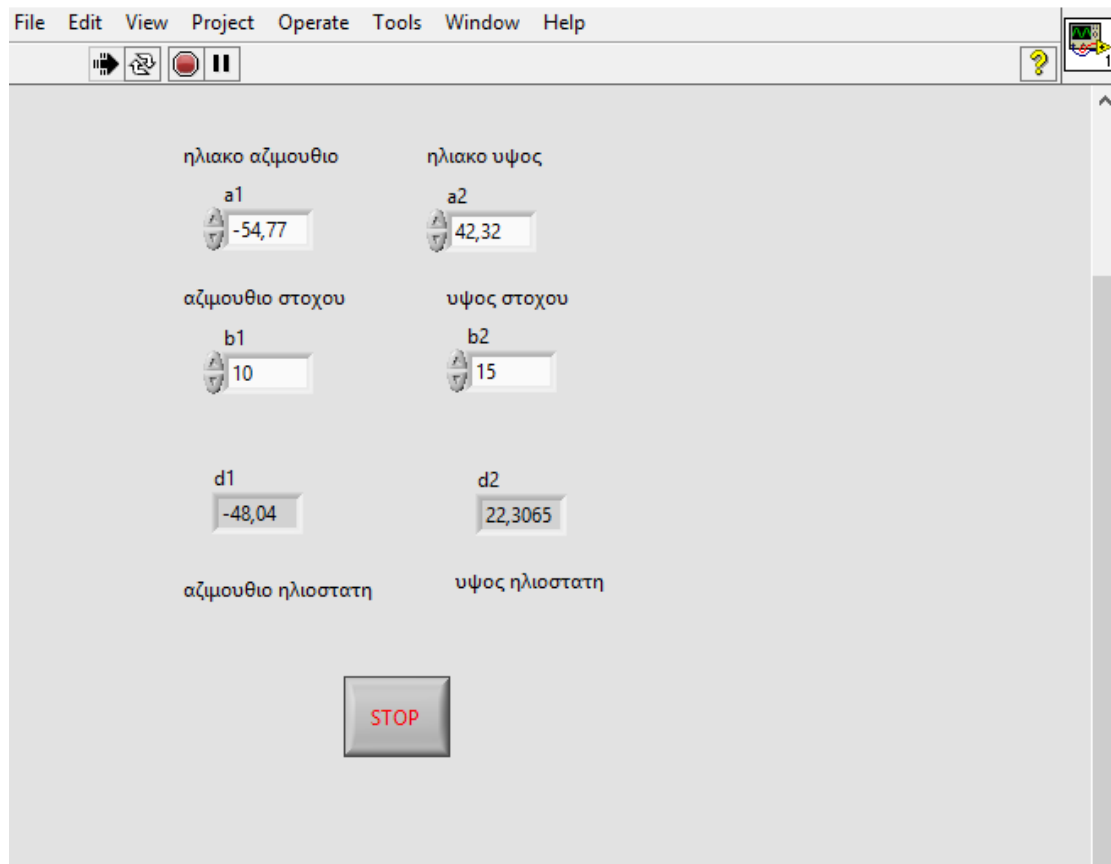
Παρακάτω φαίνεται το front panel της εφαρμογής για τον προσανατολισμό του ηλιοστάτη, δηλαδή η εικόνα που βλέπει ο χρήστης μόλις ανοίγει την εφαρμογή.



Ο χρήστης εισάγει ως δεδομένα το ηλιακό αζιμούθιο (a_1) και το ηλιακό ύψος (a_2) και τις γωνίες αζιμούθιου και ύψους του στόχου (b_1 και b_2 αντίστοιχα). Μόλις ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα και «τρέξει» για πρώτη φορά την εφαρμογή, το πρόγραμμα εισέρχεται σε έναν βρόχο συνεχούς λειτουργίας, ο οποίος τερματίζεται όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί stop.

Το πρόγραμμα δίνει ως έξοδο, όπως έχει προαναφερθεί, τις γωνίες αζιμούθιου και ύψους της διχοτόμου της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ του ηλιακού διανύσματος και του διανύσματος του στόχου, η οποία ορίζει και τον προσανατολισμό της επιφάνειας του ηλιοστάτη.

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα χρήσης της εφαρμογής. Εισάγουμε ως δεδομένα τις ηλιακές συντεταγμένες (a_1 και a_2) για την 1^η Απριλίου 2016 και ώρα 11^η πρωινή για τις γεωγραφικές συντεταγμένες του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επίσης εισάγουμε το αζιμούθιο του στόχου (b_1) και το ύψος του στόχου (b_2). Όπως φαίνεται παρακάτω, το πρόγραμμα μας δίνει το αζιμούθιο (d_1) και το ύψος (d_2) του ηλιοστάτη.

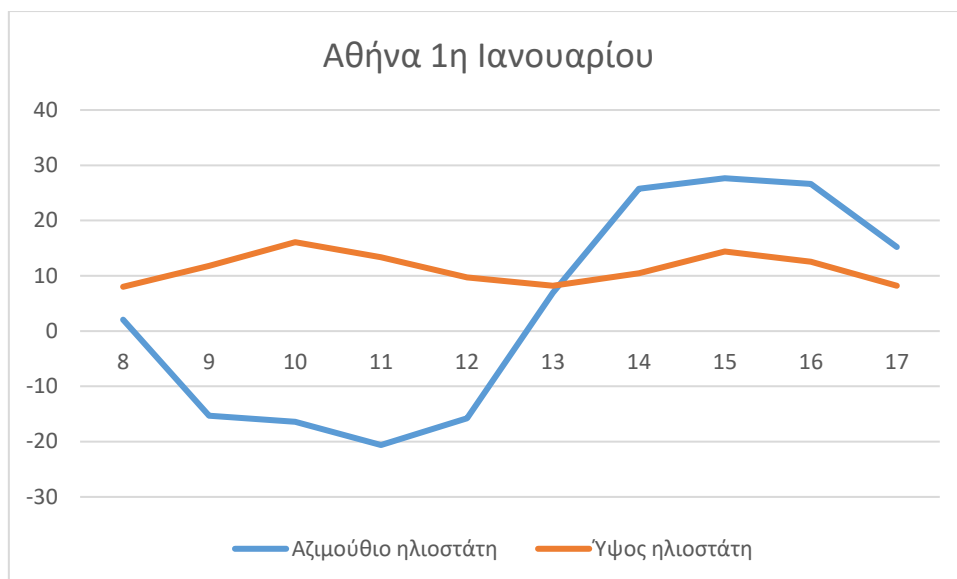


4.3.3 Πίνακες αποτελεσμάτων και γραφικές παραστάσεις

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα του εργαστηρίου για την καταγραφή της θέσης του Ήλιου – το οποίο κατασκεύασε ο διπλωματούχος ηλεκτρολόγος μηχανικός Ιωάννης Μπούρδαλης στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας – καταγράψαμε τις ηλιακές συντεταγμένες για την τοποθεσία της Αθήνας, για συγκεκριμένες ημερομηνίες, ξεκινώντας από πρωινές ώρες μέχρι αργά το απόγευμα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τέθηκαν ως είσοδοι στον αλγόριθμο προσανατολισμού του ηλιοστάτη. Ως είσοδοι για το διάνυσμα του στόχου τέθηκαν $b1 = 10^\circ$ (αζιμούθιο στόχου) και $b2 = 15^\circ$ (ύψος στόχου). Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακες αλλά και γραφικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Όλες οι τιμές αζιμούθιου και ύψους είναι σε μοίρες.

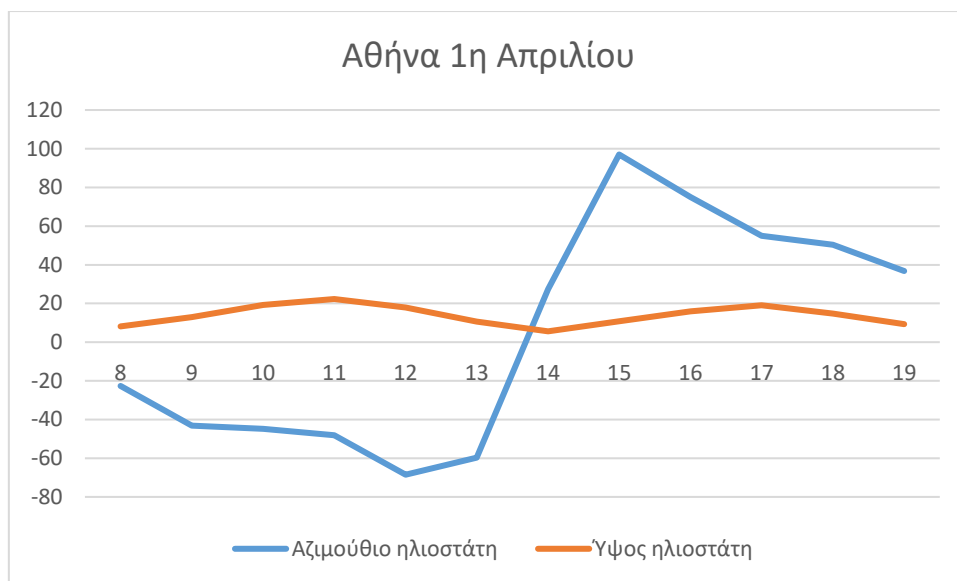
- Για την 1^η Ιανουαρίου:

Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-58,1321	2,36361	2,05327	8,01902
9.00	-47,9975	11,8267	-15,3152	11,8056
10.00	-36,2599	19,7752	-16,3852	16,0895
11.00	-22,6919	25,6129	-20,612	13,3726
12.00	-7,5648	28,7129	-15,7427	9,69215
13.00	8,17685	28,6494	6,91043	8,19355
14.00	23,2565	25,4319	25,784	10,4805
15.00	36,7536	19,4995	27,6585	14,3853
16.00	48,422	11,4811	26,6064	12,5397
17.00	58,5022	1,96918	15,222	8,18716



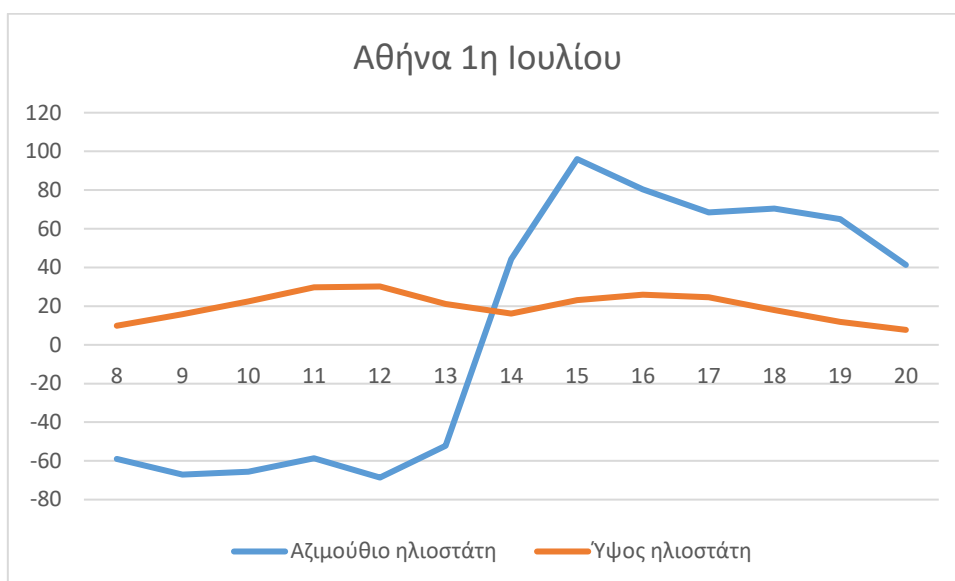
- Για την 1^η Απριλίου:

Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-88,7552	8,7929	-22,676	8,14941
9.00	-79,1816	20,5514	-43,0701	12,9981
10.00	-68,2975	31,9062	-44,731	19,2535
11.00	-54,7703	42,3158	-48,0347	22,3057
12.00	-36,7711	50,8273	-68,511	17,958
13.00	-13,0229	55,8596	-59,6197	10,6698
14.00	13,7656	55,7818	27,2794	5,59753
15.00	37,3604	50,6249	97,0125	10,8357
16.00	55,2065	42,0407	75,0046	15,8646
17.00	68,6353	31,5938	54,9216	18,9989
18.00	79,4662	20,2213	50,4202	14,6897
19.00	89,0177	8,45707	36,7177	9,32768



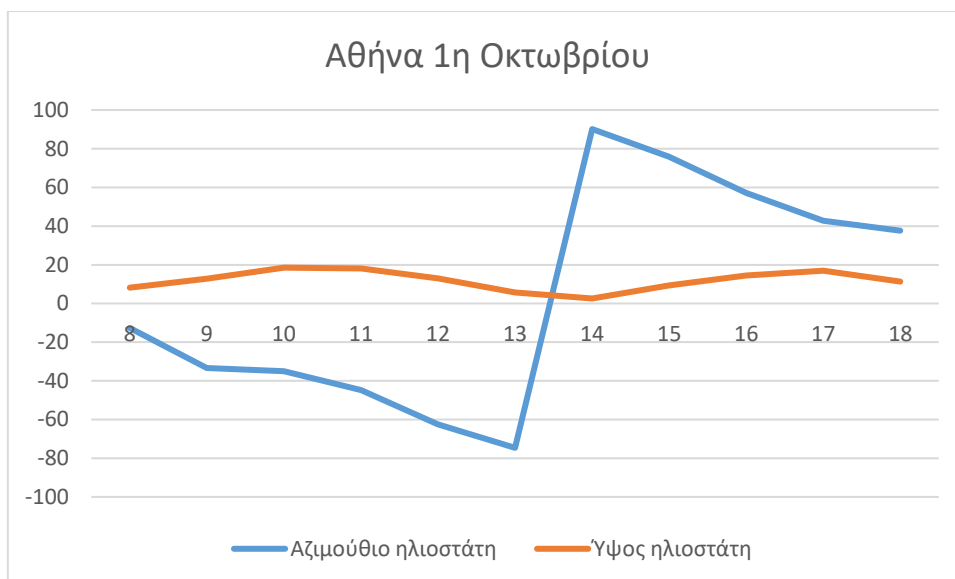
- Για την 1^η Ιουλίου 2016:

Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-104,289	19,8231	-58,8911	9,85816
9.00	-96,0472	31,4626	-67,1373	15,7946
10.00	-87,0446	43,2818	-65,5971	22,5245
11.00	-75,7458	54,975	-58,6288	29,6614
12.00	-58,3319	65,8951	-68,5937	30,1792
13.00	-24,5887	73,9211	-52,1861	21,0637
14.00	26,4618	73,7135	44,392	16,1143
15.00	59,2594	65,483	96,022	23,0731
16.00	76,2855	54,5075	80,3934	25,8614
17.00	87,4412	42,8006	68,4903	24,5925
18.00	96,3906	30,9837	70,4302	17,9512
19.00	104,621	19,3566	64,9082	11,9398
20.00	112,933	8,15796	41,3458	7,7411



- Για την 1^η Οκτωβρίου 2016:

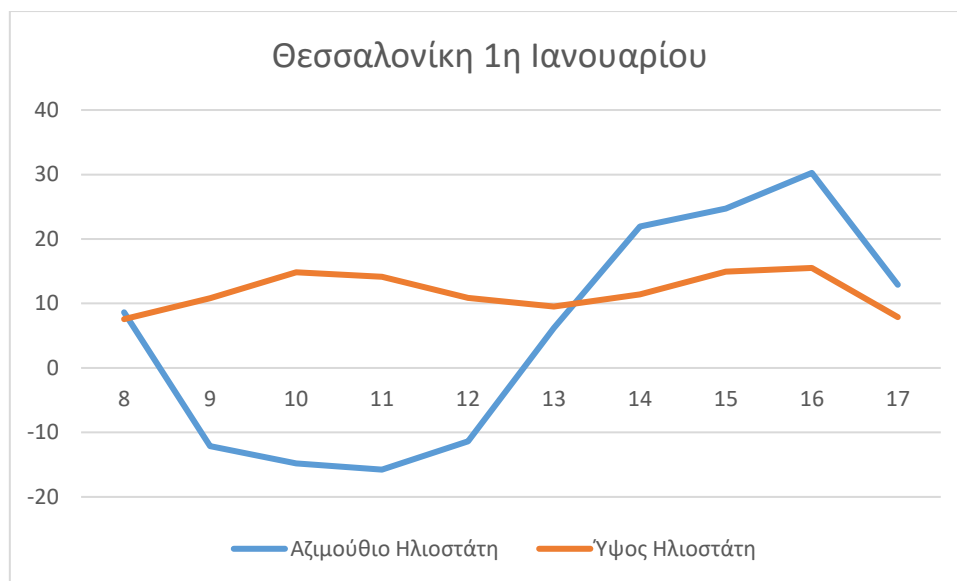
Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-79,1881	6,23698	-12,6475	8,19056
9.00	-69,2595	17,6182	-33,3305	12,7251
10.00	-57,7756	28,2105	-34,9986	18,5229
11.00	-43,6873	37,3853	-44,8328	18,0749
12.00	-26,034	44,1778	-62,487	12,9544
13.00	-5,02053	47,3702	-74,6207	5,73283
14.00	16,8021	46,145	90,1335	2,57988
15.00	36,1391	40,8393	75,931	9,35807
16.00	51,7621	32,6056	57,2356	14,4549
17.00	64,2921	22,5617	42,8364	16,9143
18.00	74,8083	11,4779	37,66124	11,2721



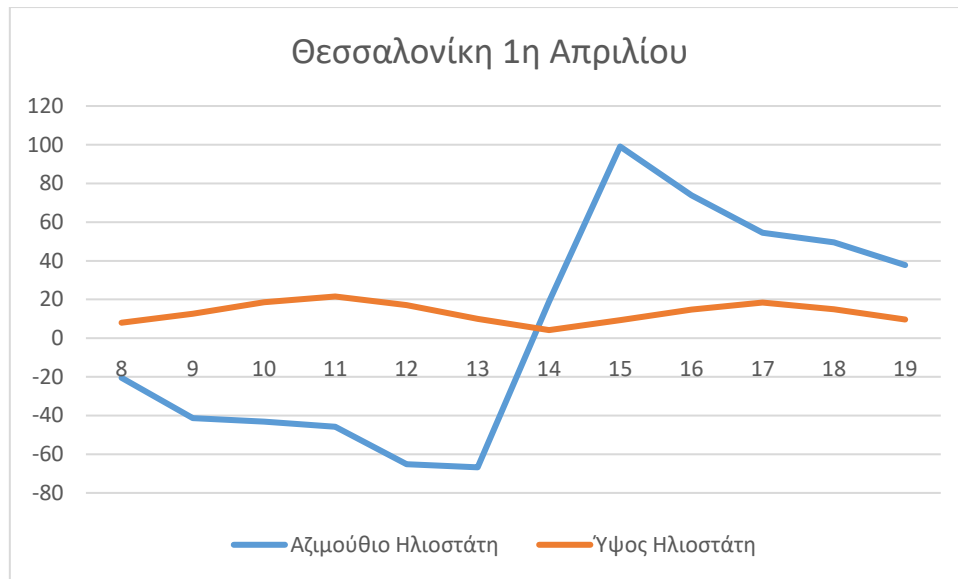
Ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία για τις ίδιες συντεταγμένες στόχου, αλλά για δύο άλλες πόλεις, τη Θεσσαλονίκη και το Μόναχο της Γερμανίας. Παρακάτω φαίνονται οι πίνακες των αποτελεσμάτων και οι γραφικές παραστάσεις:

- Για τη Θεσσαλονίκη:

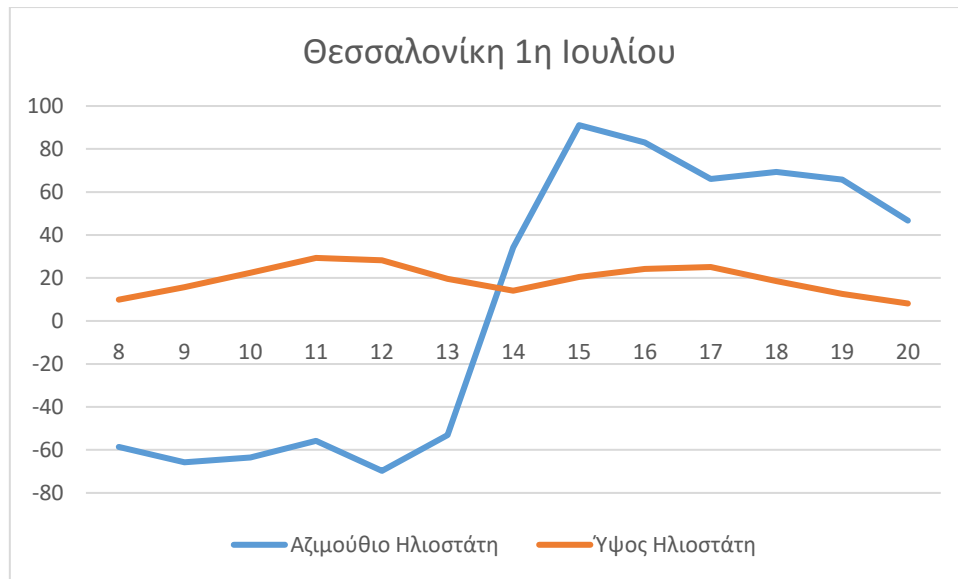
1^η Ιανουαρίου				
Ώρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-58,6033	0,380642	8,64364	7,5716
9.00	-48,2108	9,51762	-12,1116	10,8281
10.00	-36,4054	17,1837	-14,8249	14,8558
11.00	-22,9941	22,8321	-15,7647	14,1597
12.00	-8,21389	25,9018	-11,3534	10,8718
13.00	7,14293	26,0085	6,19799	9,53104
14.00	21,9954	23,1377	21,954	11,4054
15.00	35,5169	17,6526	24,6905	14,9586
16.00	47,4324	10,1094	30,2501	15,5109
17.00	57,9123	1,05979	12,8972	7,86546



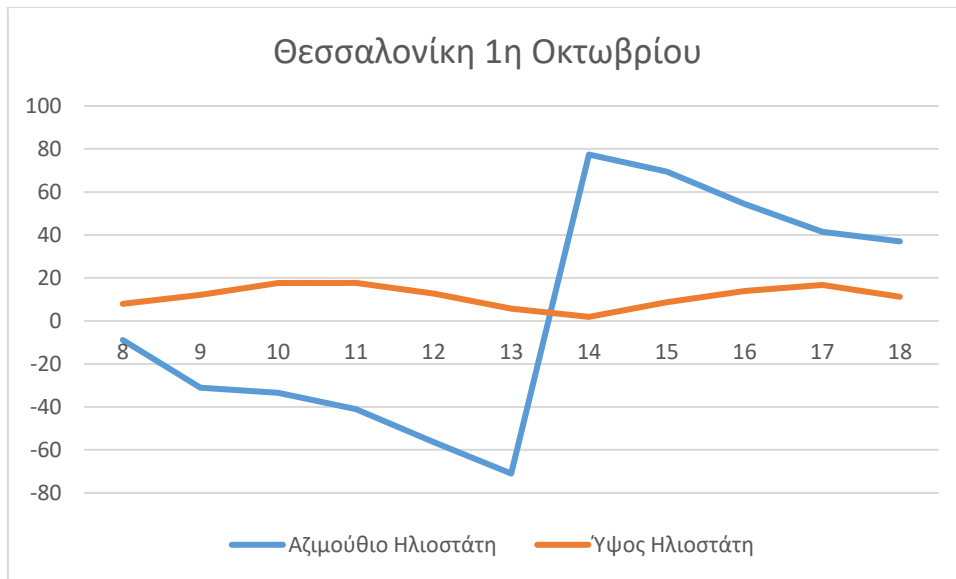
1^η Απριλίου				
Ώρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-88,868	8,10106	-20,4238	8,00187
9.00	-78,7636	19,4021	-41,3095	12,5645
10.00	-67,4245	30,2815	-43,1679	18,5774
11.00	-53,6582	40,1924	-45,8188	21,5456
12.00	-35,9775	48,2365	-65,0775	17,1211
13.00	-13,5232	53,0374	-66,7644	10,0264
14.00	11,5327	53,2373	18,9881	4,16239
15.00	34,3351	48,767	99,069	9,36467
16.00	52,3929	40,9284	73,775	14,8106
17.00	66,419	31,1291	54,4402	18,3899
18.00	77,9053	20,3043	49,5503	14,8545
19.00	88,0733	9,02201	37,7819	9,56439



1^η Ιουλίου				
Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-103,789	19,8743	-58,6348	9,93835
9.00	-94,8665	31,092	-65,7973	15,7772
10.00	-85,057	42,4587	-63,4897	22,3752
11.00	-72,8197	53,6181	-55,7721	29,3279
12.00	-54,7061	63,847	-69,7286	28,1815
13.00	-23,3969	71,1503	-53,134	19,5903
14.00	20,5868	71,4429	34,1158	14,0178
15.00	53,0849	64,4781	91,1	20,5023
16.00	71,8227	54,3623	83,09	24,2477
17.00	84,3193	43,2365	66,0531	25,1356
18.00	94,2337	31,8707	69,3041	18,6017
19.00	103,186	20,6339	65,7871	12,6109
20.00	112,051	9,79673	46,6943	8,12191

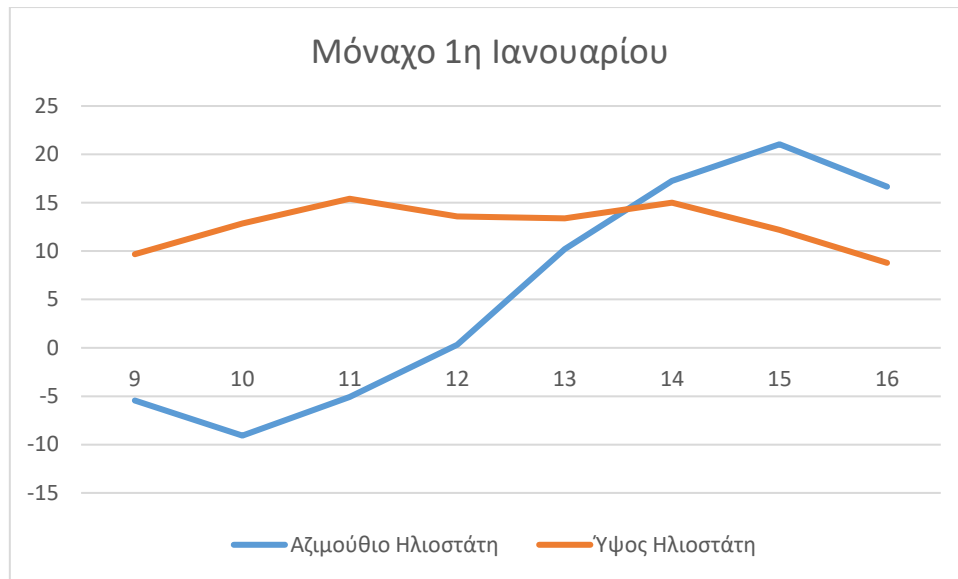


1^η Οκτωβρίου				
Ώρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-79,4507	5,1033	-8,9083	7,96413
9.00	-69,0694	16,0466	-31,0893	12,0956
10.00	-57,2773	26,1982	-33,4842	17,6197
11.00	-43,1615	34,9514	-41,0078	17,7083
12.00	-25,9651	41,4278	-56,382	12,6931
13.00	-5,92234	44,5722	-70,9874	5,79646
14.00	14,9245	43,6731	77,4252	1,89891
15.00	33,866	38,9505	69,5058	8,7095
16.00	49,6625	31,3553	54,4213	13,9814
17.00	62,651	21,9013	41,4354	16,7113
18.00	73,72	11,3431	37,0143	11,2818

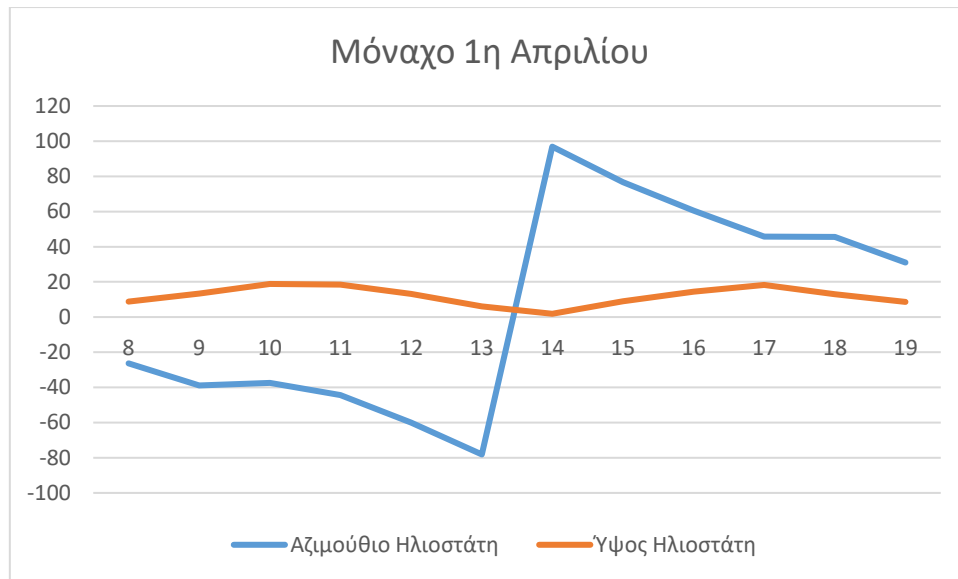


- Για το Μόναχο:

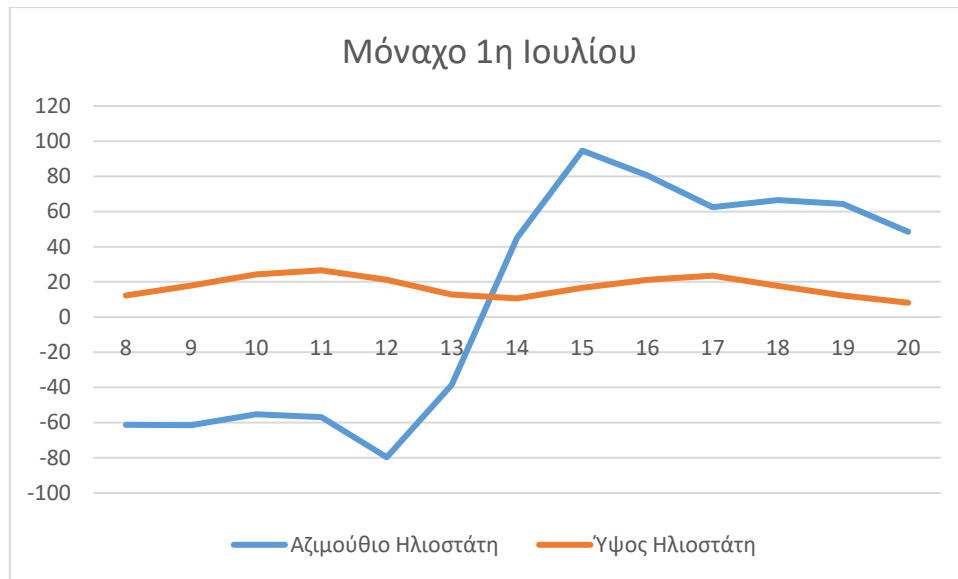
1^η Ιανουαρίου				
Ώρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
9.00	-44,6305	6,25544	-5,431	9,66888
10.00	-32,1354	12,4708	-9,07516	12,8563
11.00	-18,5742	16,7602	-5,07494	15,414
12.00	-4,2297	18,7415	0,311297	13,5868
13.00	10,3138	18,2095	10,2117	13,3955
14.00	24,3861	15,2215	17,2448	14,9972
15.00	37,5143	10,0714	21,044	12,2002
16.00	49,5579	3,17811	16,6779	8,78629



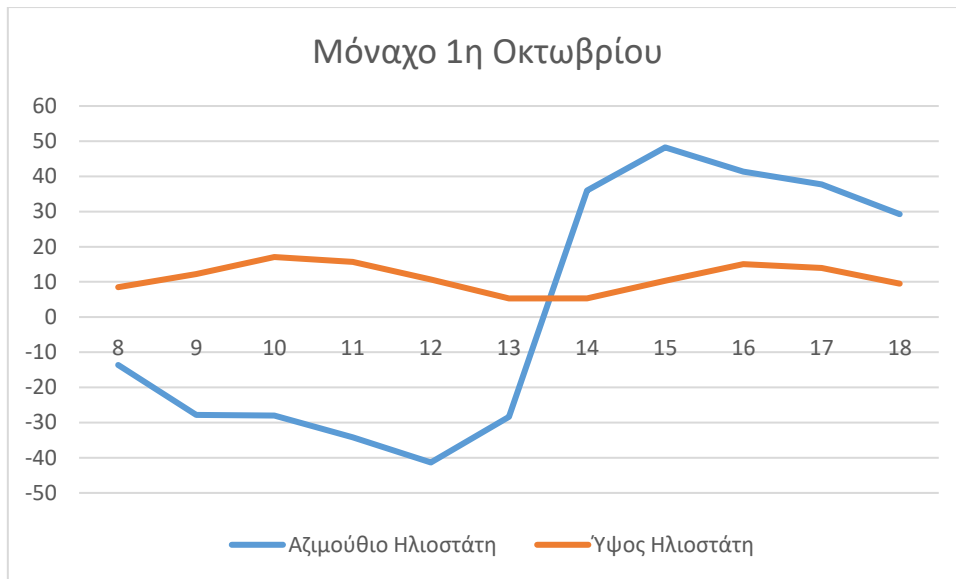
1^η Απριλίου				
Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-85,0539	10,331	-26,3185	8,79373
9.00	-73,3422	20,1488	-38,8724	13,4127
10.00	-60,3254	29,3415	-37,433	18,8255
11.00	-45,1354	37,3068	-44,3658	18,5063
12.00	-27,0756	43,2162	-60,0216	13,2172
13.00	-6,38171	46,1095	-78,1172	6,07114
14.00	15,0797	45,3467	96,8914	1,87304
15.00	34,8265	41,1099	76,725	8,91056
16.00	51,665	34,2453	60,5282	14,3668
17.00	65,8614	25,6915	45,736	18,2057
18.00	78,2427	16,1812	45,5553	13,0108
19.00	89,6522	6,24279	31,0222	8,6508



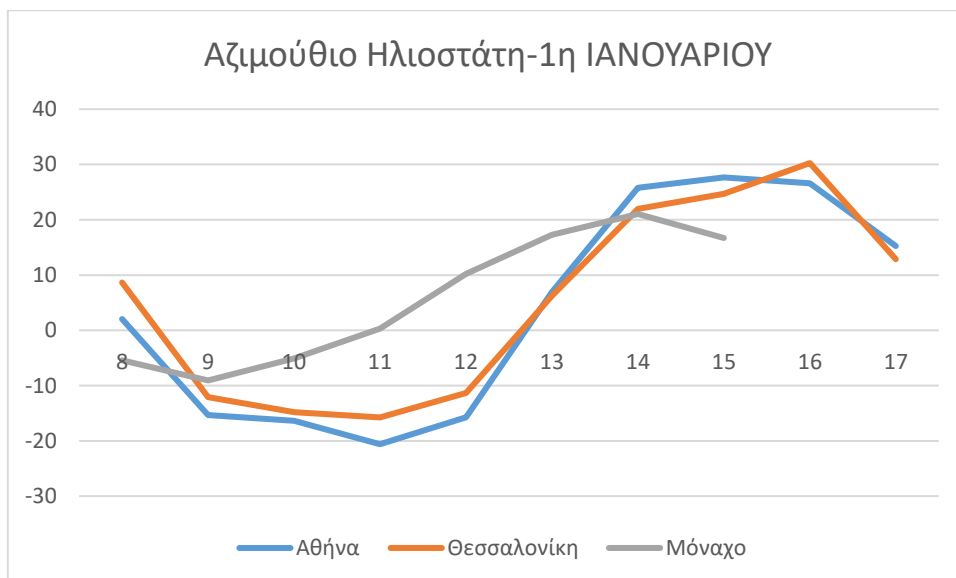
1^η Ιουλίου				
Ώρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-98,4604	23,9026	-61,2427	12,1821
9.00	-87,5502	33,8828	-61,4395	17,9825
10.00	-75,1366	43,7639	-55,2681	24,2036
11.00	-59,5955	52,9981	-56,9425	26,574
12.00	-38,336	60,574	-79,7324	21,1617
13.00	-9,3689	64,673	-38,4406	12,804
14.00	22,4361	63,5143	45,0132	10,6341
15.00	48,1841	57,6812	94,6271	16,5921
16.00	66,668	49,2363	80,4382	21,1105
17.00	80,634	39,6418	62,5729	23,5545
18.00	92,263	29,667	66,4326	17,7861
19.00	102,856	19,7594	64,3731	12,2885
20.00	113,225	10,2543	48,4706	8,12999

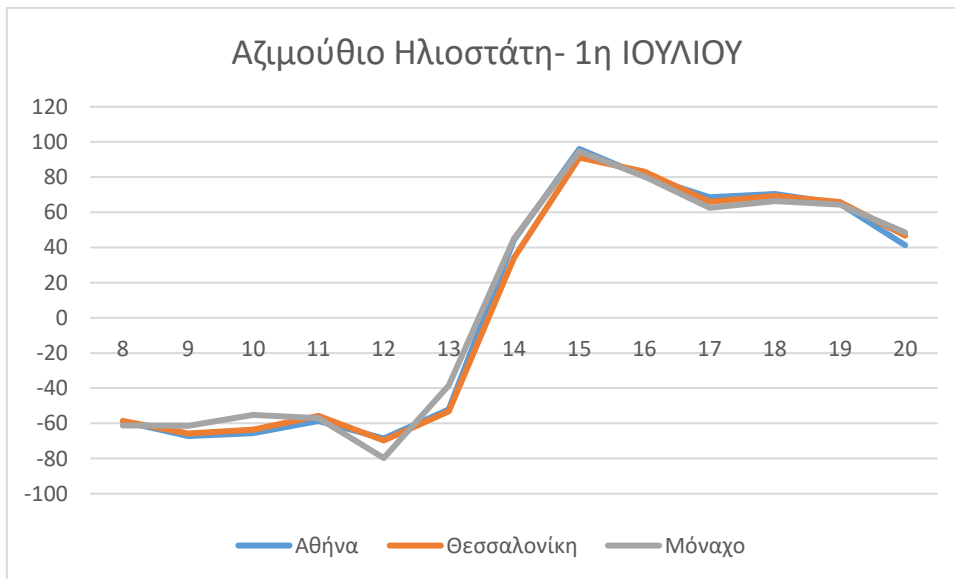
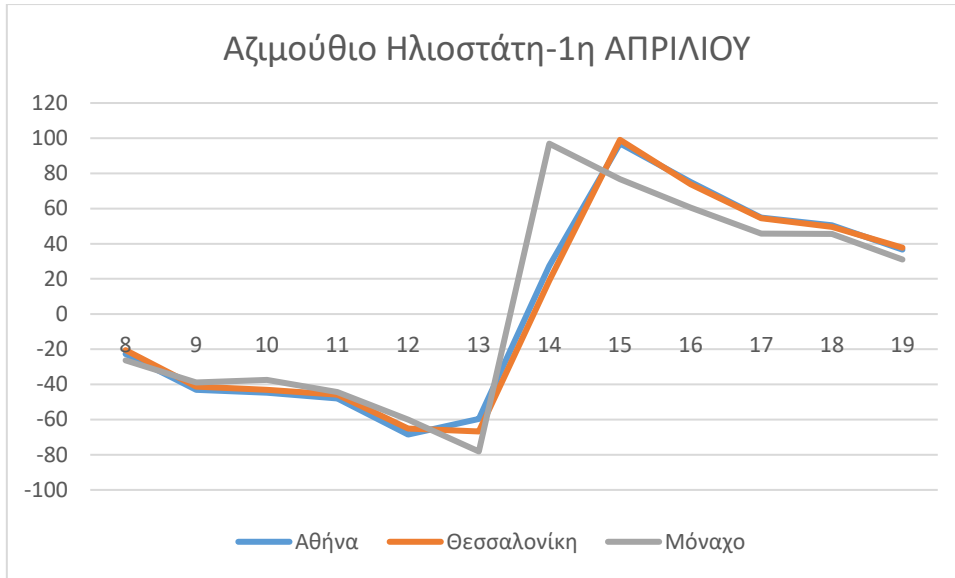


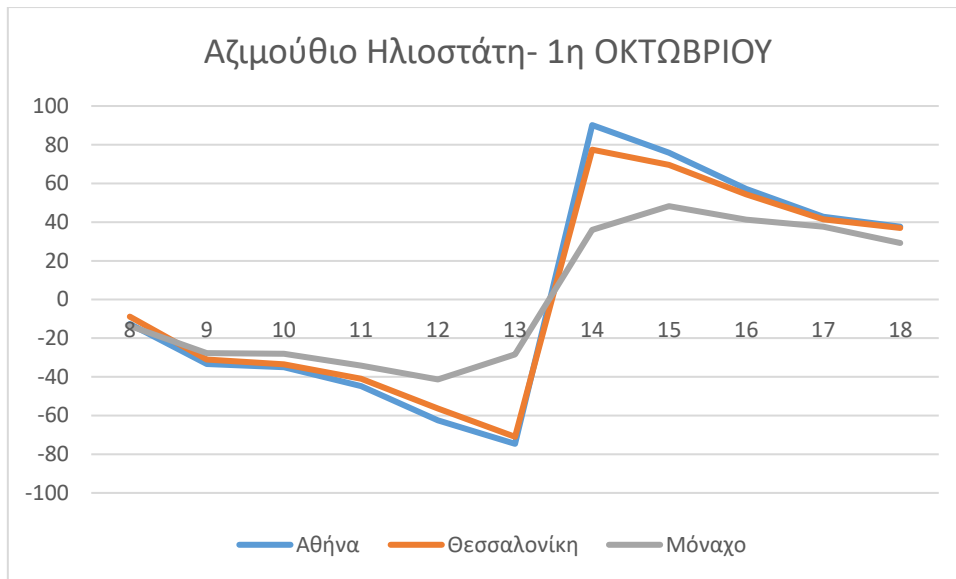
1^η Οκτωβρίου				
Ωρα	Ηλιακό Αζιμούθιο	Ηλιακό Ύψος	Αζιμούθιο Ηλιοστάτη	Ύψος Ηλιοστάτη
8.00	-76,1016	6,08732	-13,6012	8,45209
9.00	-64,2541	15,4919	-27,8102	12,2611
10.00	-51,1347	23,9461	-28,0121	17,0686
11.00	-36,1761	30,8579	-34,2053	15,7098
12.00	-19,1702	35,5146	-41,3388	10,6704
13.00	-0,69430	37,2461	-28,3829	5,29242
14.00	17,8412	35,7495	36,0073	5,30361
15.00	34,9875	31,2885	48,2355	10,3477
16.00	50,0974	24,5181	41,3453	15,0375
17.00	63,3355	16,1559	37,7089	13,9917
18.00	75,255	6,80435	29,2331	9,46696



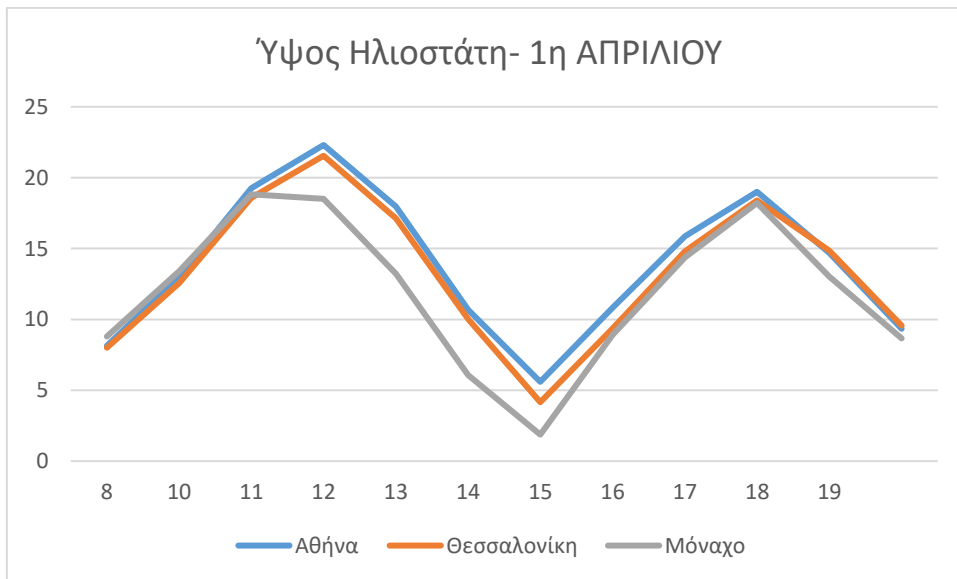
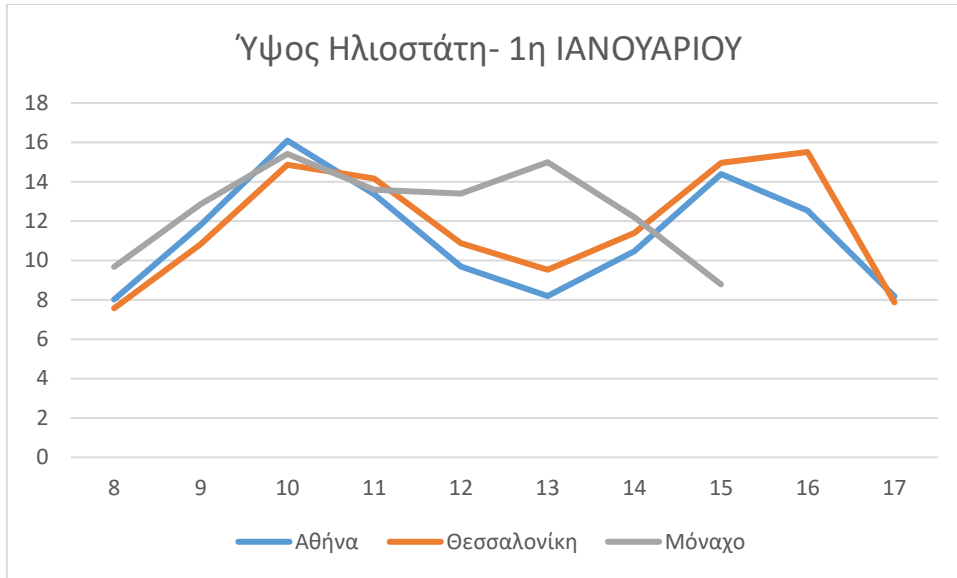
Παρακάτω φαίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα του αζιμούθιου και του ύψους για τις τρεις πόλεις για κάθε ημερομηνία:

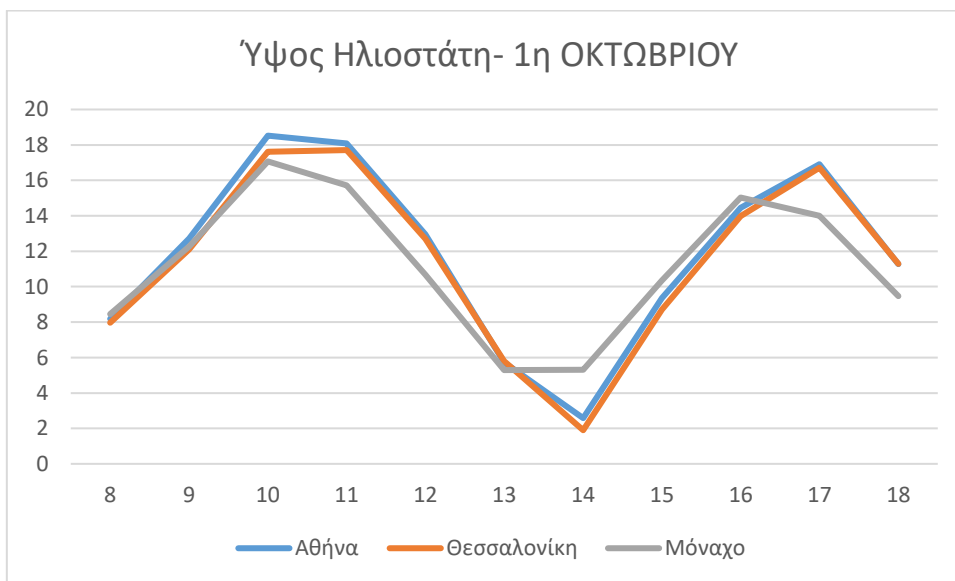
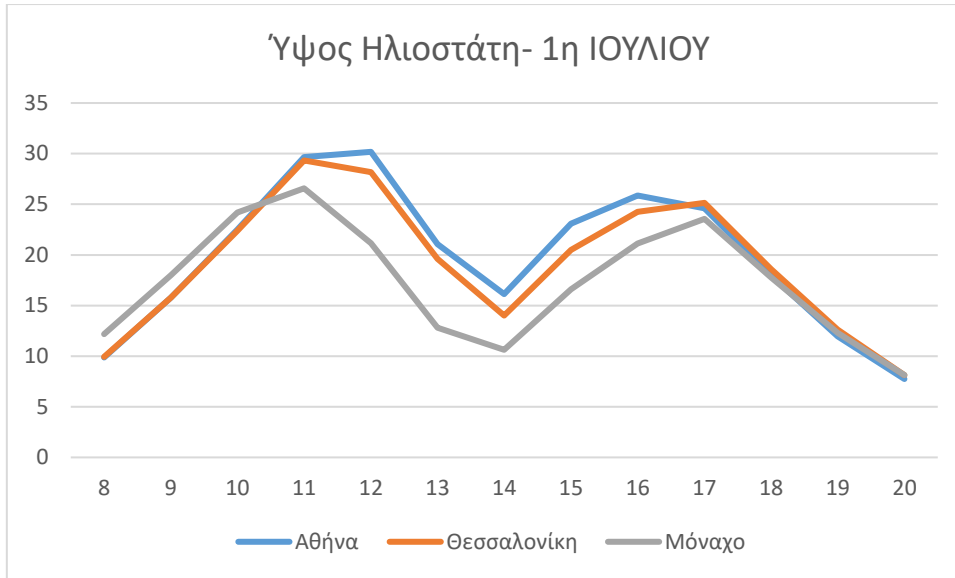






Παρατηρούμε ότι, όσον αφορά το αζιμούθιο του ηλιοστάτη, οι καμπύλες για την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα λόγω της μικρής διαφοράς των γεωγραφικών συντεταγμένων και άρα και της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται. Όσον αφορά το αζιμούθιο ηλιοστάτη στο Μόναχο, οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται απόλυτα με αυτές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης για την 1^η Ιουλίου, ενώ για την 1^η Απριλίου παρουσιάζονται μικρές αποκλίσεις. Αντίθετα, μεγάλες αποκλίσεις παρατηρούνται κατά την 1^η Ιανουαρίου και την 1^η Οκτωβρίου, το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της διαφοράς ηλιοφάνειας μεταξύ των πόλεων, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες.





Στις γραφικές παραστάσεις για το ύψος του ηλιοστάτη παρατηρούμε ότι, όπως και στο αζιμούθιο, οι τιμές για Αθήνα και Θεσσαλονίκη σχεδόν ταυτίζονται σε όλες τις ημερομηνίες. Για το Μόναχο παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις σε σχέση με την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη κατά τον Απρίλιο, τον Ιούλιο και τον Οκτώβριο, αλλά αντίθετα υπάρχει μεγάλη διαφορά στις τιμές του Ιανουαρίου. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι το Μόναχο βρίσκεται αρκετά βορειότερα και κατά τον Ιανουάριο έχει ελάχιστη ηλιοφάνεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΠΥΡΓΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

5.1 Πειραματικές εφαρμογές ηλιακών πύργων

Από τις αρχές του 1980, συστήματα ηλιακών πύργων ισχύος εγκαταστάθηκαν στις Η.Π.Α., στην Ισπανία, στην Ιταλία, στη Γαλλία, στην Ιαπωνία και στη Ρωσία. Οι πρώτες εγκαταστάσεις είχαν πειραματικό χαρακτήρα και κατασκευάστηκαν ουσιαστικά για να αποδείξουν ότι οι ηλιακοί πύργοι ισχύος μπορούν να παράγουν ηλεκτρισμό και ότι ως τεχνολογία μπορούν να εξελιχθούν.

Παρακάτω εξετάζονται κάποια παραδείγματα πειραματικών εφαρμογών ηλιακών πύργων ισχύος.

5.1.1 Solar One

Ο σταθμός Solar One, ο οποίος λειτούργησε από το 1982 μέχρι το 1988, ήταν για την εποχή του ο μεγαλύτερος σταθμός ηλιακού πύργου στον κόσμο. Με τη λειτουργία του απέδειξε ότι η παραγωγή ισχύος μεγάλης κλίμακας από συστήματα ηλιακών πύργων είναι εφικτή.

Σε αυτή την εγκατάσταση το νερό ήταν το μέσο μεταφοράς θερμότητας, το οποίο μετατρεπόταν σε ατμό στο δέκτη και χρησιμοποιούταν απευθείας για να εκκινήσει ένα συμβατικό ατμοστρόβιλο κύκλου Rankine. Στη συνέχεια, μεταφερόταν στη βάση του πύργου για να παράγει ηλεκτρισμό ή για να θερμάνει μια μεγάλη δεξαμενή που περιείχε έλαιο, πέτρες και άμμο.

Το πεδίο των ηλιοστατών αποτελούνταν από 1818 ηλιοστάτες – ο καθένας με ανακλαστική επιφάνεια $39,3m^2$ – διαταγμένους κυκλικά γύρω από έναν πύργο 90 μέτρων, ο οποίος ήταν κατασκευασμένος για να παράγει ισχύ 10MW.

Το εγχείρημα υλοποίησης και λειτουργίας του Solar One ανταποκρίθηκε στους περισσότερους από τους τεχνικούς στόχους που

είχαν τεθεί, αφού απέδειξε αφενός τη δυνατότητα παραγωγής ισχύος από την τεχνολογία ηλιακού πύργου και αφετέρου την ικανότητα να παράγει $10MW_e$ για οχτώ ώρες τη μέρα κατά το θερινό ηλιοστάσιο και τέσσερις ώρες τη μέρα κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο. Κατά τον τελευταίο χρόνο λειτουργίας του, ο Solar One είχε διαθεσιμότητα 96% κατά τις ώρες ηλιοφάνειας και η ετήσια απόδοση του ήταν περίπου 7%. Η ετήσια απόδοση ήταν σχετικά μικρή εξαιτίας του μικρού μεγέθους του σταθμού και του γεγονότος ότι συμπεριλάμβανε μη βελτιστοποιημένα υποσυστήματα.

Στα έξι χρόνια λειτουργίας του, ο Solar One παρήγαγε περισσότερες από 38.000MWh ενέργειας και λειτουργούσε αδιάλειπτα στην ισχύ των 10MW, όπως ακριβώς φιλοδοξούσαν οι μηχανικοί κατά την κατασκευή του. Παρόλα αυτά, παρουσίαζε και κάποιες ανεπάρκειες που αφορούσαν κυρίως τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και τη δυσκολία να λειτουργεί όταν παρουσιάζονταν παροδικές νεφώσεις.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του Solar One, άρχισε η έρευνα για πιο προηγμένα συστήματα ηλιακού πύργου που θα χρησιμοποιούσαν τηγμένα άλατα. Παράλληλα, φαινόταν επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής κάποιων βελτιώσεων στην ήδη υπάρχουσα και λειτουργική εγκατάσταση, προκειμένου αυτή να εκσυγχρονιστεί και να συμπεριλάβει τις τεχνολογικές εξελίξεις. Αν και το σύστημα νερού/ατμού που χρησιμοποιούσε ο Solar One λειτουργούσε ικανοποιητικά σε σχέση με τις αρχικές προσδοκίες τους, οι ερευνητές ήξεραν ότι τα άλατα κατά την τήξη τους μπορούσαν να αποθηκεύσουν θερμότητα πολύ πιο αποτελεσματικά και πιο οικονομικά. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ενσωμάτωση στην εγκατάσταση ενός μεγάλου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, όχι μόνο θα αύξανε την αξία της παραγόμενης ενέργειας, αλλά παράλληλα θα μείωνε και το συνολικό κόστος παραγωγής. Αυτές οι εξελίξεις κατέληξαν στη δημιουργία του Solar Two.

5.1.2 Solar Two

Για να προωθήσουν την εξέλιξη της χρήσης τηγμένων αλάτων στους ηλιακούς πύργους ισχύος, μια κοινοπραξία υπηρεσιών, με επικεφαλής την Southern California Edison, συνεργάστηκαν με το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. για να επανασχεδιάσουν τον σταθμό Solar One, ώστε να συμπεριλαμβάνει το σύστημα μεταφοράς θερμότητας με τη χρήση τηγμένων αλάτων. Όπως προαναφέρθηκε, ο σταθμός Solar One λειτουργούσε με νερό, το οποίο μετατρέποταν σε ατμό για να εκκινεί έναν συμβατικό στρόβιλο. Οι μηχανικοί της εγκατάστασης υπολόγισαν ότι το σύστημα θα λειτουργούσε πολύ πιο αποδοτικά, αν χρησιμοποιούσαν για τη λειτουργία κάποιο υγρό που να μπορεί να απορροφά και να αποθηκεύει θερμική ενέργεια αποτελεσματικά. Έτσι, επιλέχθηκαν τα τηγμένα άλατα λόγω της υπεροχής των φυσικών τους χαρακτηριστικών και με δεδομένο ότι ήταν ήδη γνωστό ότι ήταν απόλυτα ασφαλή και περιβαλλοντικά φιλικά.

Οι στόχοι αυτού του ανασχεδιασμένου σταθμού, που ονομάστηκε Solar Two, ήταν να επικυρώσει τη λειτουργικότητα της τεχνολογίας τηγμένων αλάτων, να μειώσει το τεχνικό και οικονομικό ρίσκο των ηλιακών πύργων ισχύος και να ενεργοποιήσει την εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας ηλιακού πύργου. Ο Solar Two παρήγαγε 10MW ηλεκτρισμού με δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας επαρκή ώστε να συνεχίσει να λειτουργεί ο στρόβιλος σε πλήρη ισχύ λειτουργίας για τρεις ώρες μετά τη δύση του Ήλιου. Ο επόμενος στόχος θα ήταν η απόδειξη της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας του συστήματος.

Κατά τη λειτουργία του Solar Two, 2000 ηλιοστάτες ανακλούσαν την άμεση ηλιακή δέσμη σε έναν δέκτη που ήταν τοποθετημένος στην κορυφή ενός πύργου που είχε ύψος 90 μέτρα. Ένα ψηφιακό σύστημα ελέγχου εξασφάλιζε ότι οι ηλιοστάτες θα στοχεύουν με ακρίβεια το δέκτη και η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρωνόταν είχε πυκνότητα έως και 800 φορές μεγαλύτερη της κανονικής.



Εικόνα 5.1: Φωτογραφία από τους ηλιοστάτες που χρησιμοποιούσε ο Solar Two

Η μετάβαση του Solar One σε Solar Two απαιτούσε ένα νέο σύστημα μεταφοράς θερμότητας με τη χρήση τηγμένων αλάτων (το οποίο περιλάμβανε το δέκτη, τη θερμική αποθήκευση, το δίκτυο σωληνώσεων και τη γεννήτρια ατμού) και ένα νέο σύστημα ελέγχου. Το πεδίο ηλιοστατών του Solar One, ο πύργος και η στροβιλογεννήτρια χρειάζονταν ελάχιστες τροποποιήσεις, γεγονός που συντέλεσε και στον περιορισμό των εξόδων ανακατασκευής. Ο δέκτης του Solar Two περιλάμβανε μια σειρά από πάνελ – καθένα από τα οποία αποτελούταν από 32 ανοξείδωτους, ατσάλινους σωλήνες με λεπτά τοιχώματα – μέσω των οποίων έρεαν τα τηγμένα άλατα μέσα από ένα ελικοειδές «μονοπάτι». Τα πάνελ σχημάτιζαν ένα κυλινδρικό περίβλημα που περιέβαλε τις σωληνώσεις, τις υποστηρικτικές δομές και τον εξοπλισμό ελέγχου. Η εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων ήταν καλυμμένη με ισχυρή μαύρη μπογιά που ήταν ανθεκτική στις υψηλές θερμοκρασίες και στη ροή θερμότητας και απορροφούσε το 95% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο σχεδιασμός του δέκτη βελτιστοποιήθηκε ώστε να απορροφά τη μέγιστη ποσότητα ηλιακής ενέργειας, ενώ παράλληλα περιορίζε τις θερμικές απώλειες εξαιτίας της αγωγής και της ακτινοβολίας.

Τα τηγμένα άλατα έρεαν στους κατακόρυφους σωλήνες – αγγίζοντας θερμοκρασίες μέχρι και 565°C – και έφταναν στη βάση του πύργου, όπου αποθηκεύονταν στη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας. Όταν απαιτούταν παραγωγή ισχύος από το σταθμό, το θερμό μίγμα των τηγμένων αλάτων αντλούταν από τη δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας για να παράγει ατμό και ο ηλεκτρισμός παραγόταν από έναν συμβατικό ατμοστρόβιλο. Αφού τα τηγμένα άλατα είχαν ψυχθεί για να φτάσουν σε θερμοκρασία περίπου 285°C παράγοντας ατμό, αντλούνταν ξανά στην κορυφή του πύργου, όπου θερμαίνονταν ξανά και ο κύκλος συνέχιζε.

Ο σχεδιασμός του δέκτη, ο οποίος περιλάμβανε συγκόλληση με laser, λεπτές συνδέσεις σωλήνα-στομίου, ειδική πρόβλεψη για δυνατότητα επέκτασης ή σύντμησης των σωλήνων και εξαρτήματα μέτρησης της ακτινοβολίας χωρίς επαφή, επέτρεπε να αλλάζει θερμοκρασία άμεσα, χωρίς να προκαλείται βλάβη. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια παρόδου ενός νέφους, ο δέκτης μπορούσε να μεταβάλλει με ασφάλεια τη θερμοκρασία από τους 285°C στους 565°C σε λιγότερο από ένα λεπτό.

Το μέσο αποθήκευσης ήταν ένα αλατούχο μίγμα, που αποτελούταν κατά 60% από νιτρικά άλατα και κατά 40% από καλιούχα άλατα. Το σημείο τήξης του μίγματος ήταν στους 220°C και διατηρούταν σε κατάσταση πλήρους τήξης στους 290°C στη δεξαμενή αποθήκευσης χαμηλής θερμοκρασίας. Μια ανησυχία τότε για την εφαρμογή της τεχνολογίας τηγμένων αλάτων ήταν ότι τα τηγμένα άλατα είναι δύσκολα διαχειρίσιμα εξαιτίας του χαμηλού ιξώδους (όπως και το νερό) και του γεγονότος ότι οξειδώνουν τις μεταλλικές επιφάνειες σε μεγάλο βαθμό. Η πρόκληση λοιπόν αφορούσε κυρίως τη δυνατότητα διατήρησης και μεταφοράς τους. Η επιτυχής εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας οφειλόταν στην ταυτότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τους σωλήνες, τις βαλβίδες κ.λπ.

Το σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης του Solar Two αποτελούνταν από δύο αποθηκευτικές δεξαμενές των 875.000 λίτρων. Οι δεξαμενές ήταν εξωτερικά μονωμένες και κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ατσάλι και ανθρακικό ατσάλι για τις δεξαμενές υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας αντίστοιχα. Η θερμική χωρητικότητα του συστήματος ήταν 110MWh_t. Ένα σύστημα ψύξης χρησιμοποιούταν στη βάση κάθε δεξαμενής για να ελαχιστοποιεί την υπερθέρμανση και την εκτεταμένη αφυδάτωση του εδάφους κάτω από τις δεξαμενές.



Εικόνα 5.2: Φωτογραφία των δύο δεξαμενών αποθήκευσης του Solar Two

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του σταθμού Solar Two διήρκεσε από το 1992 έως το 1995, ενώ συνδέθηκε στο δίκτυο πρώτη φορά στις αρχές του 1996 και λειτούργησε μέχρι το 1999, αφού είχε ήδη εκπληρώσει τους στόχους που είχαν τεθεί με τη δημιουργία του.

Ο σταθμός Solar Two αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα κορυφαίο τεχνολογικό επίτευγμα, ορόσημο για την ηλιακή τεχνολογία και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γενικότερα. Δεδομένης της δυνατότητας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ο Solar Two εκπροσωπούσε μια νέα γενιά ηλιακής τεχνολογίας που μπορούσε να λειτουργεί, όχι μόνο κατά τη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, αλλά και μετά τη δύση του Ήλιου ή κατά περιόδους με νεφώσεις. Αυτό σήμαινε πως, για πρώτη φορά στα χρονικά, ένας σταθμός που βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια μπορούσε να παράγει ηλεκτρισμό σε μεγάλη κλίμακα και παράλληλα να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις ζήτησης του δικτύου, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των καταναλωτών.

Πέρα από το γεγονός ότι η λειτουργία του σταθμού επικύρωσε τα πλεονεκτήματα της χρήσης τηγμένων αλάτων και τη δυνατότητα χρήσης φτηνού και αξιόπιστου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, ο Solar Two συνέβαλε καθοριστικά στην προώθηση του εμπορικού ενδιαφέροντος όσον αφορά τους ηλιακούς πύργους ισχύος. Σε αυτό συνετέλεσε σε μεγάλο βαθμό, εκτός από την αξιόπιστη λειτουργία του, το γεγονός ότι συγκεντρώθηκε μεγάλος όγκος δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος και το κεφάλαιο που απαιτείται για τη λειτουργία και τη συντήρηση του σταθμού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αμβλύθηκε η αβεβαιότητα των επενδυτών για τους οικονομικούς κινδύνους που

συνεπάγονται τα αχαρτογράφητα νερά μιας νέας, αναδυόμενης τεχνολογίας και μάλιστα εντάσεως κεφαλαίου.

Εκτός των παραπάνω, πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά τη διάρκεια της τριχρόνης λειτουργίας του, ο Solar Two κατέγραψε αρκετά εντυπωσιακές επιδόσεις, ακόμα και πέραν του αναμενόμενου. Ενδεικτικά, παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα δεδομένα που κατεγράφησαν:

- Με το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας κατάφερε να τροφοδοτεί το δίκτυο με ηλεκτρισμό για 153 συνεχόμενες ώρες (περίπου μία ολόκληρη εβδομάδα), χρησιμοποιώντας μόνο καθαρή, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή
- Καθώς η λειτουργία του σταθμού βελτιστοποιήθηκε, η παραγωγή ισχύος αυξανόταν σταθερά, φτάνοντας να έχει έξοδο στο δίκτυο μέχρι και 105MWh σε καθημερινή βάση.
- Μέσα σε μία περίοδο 30 ημερών παρήγαγε 1633MWh, επεκτείνοντας τον στόχο που είχε τεθεί για τροφοδότηση του δικτύου με ενέργεια 1500MWh σε μηνιαία βάση
- Σημείωσε επίσης ένα ρεκόρ στην έξοδο ισχύος από στρόβιλο, που έφτασε μέχρι και τα 11,6MW
- Κατά την περίοδο υπερφόρτισης του αμερικάνικου ηλεκτρικού δικτύου το καλοκαίρι του 1998, ο σταθμός λειτούργησε τις 32 από τις 39 ημέρες (τέσσερις μέρες δεν λειτούργησε λόγω καιρού, μία μέρα εξαιτίας απώλειας της εφεδρικής ισχύος (loss of offsite power) και μόνο δύο μέρες για συντήρηση και αποκατάσταση)
- Το ηλεκτρικό «παρασιτικό» φορτίο που χρησιμοποιούταν – δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούνταν για να είναι σε λειτουργία η εγκατάσταση, συμπεριλαμβανομένων της ισχύος για την άντληση των τηγμένων αλάτων και τη θέρμανση που απέτρεπε την ψύξη των αλάτων στους σωλήνες – μειώθηκε σε σημαντικό βαθμό και η τιμή του ήταν σταθερά εντός αρχικών στόχων
- Η απόδοση του δέκτη μετρήθηκε στο 88% σε συνθήκες άπνοιας ή χαμηλού ανέμου και 86% σε συνθήκες ανέμου που επέτρεπαν τη λειτουργία, ικανοποιώντας απόλυτα τις προσδοκίες των μηχανικών κατά το σχεδιασμό του συστήματος
- Η απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας έφτασε πάνω από 97%, γεγονός που επίσης ικανοποίησε απόλυτα τις κατασκευαστικές προσδοκίες

Παρά τις μεγάλες του επιτυχίες, η λειτουργία του Solar Two φυσικά δεν ήταν χωρίς προβλήματα. Τα προβλήματα αφορούσαν κυρίως θέματα εκκίνησης διαφόρων μερών της εγκατάστασης, όπως οι σωληνώσεις και η γεννήτρια ατμού και είχαν ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της ομαλής καθημερινής λειτουργίας του σταθμού για πάνω από ένα χρόνο. Στο τέλος, όλα τα προβλήματα επιλύθηκαν, κυρίως με ένα συνδυασμό επανασχεδιασμού και επαναλειτουργίας και βελτιωμένες διαδικασίες λειτουργίας ή υπολογιστικές προσομοιώσεις, που ακόμα κι αν δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν απόλυτα στον Solar Two ελήφθησαν υπόψη στα μετέπειτα συστήματα.

Μάλιστα, ο Solar Two έπαιξε τόσο καθοριστικό ρόλο για την τεχνολογία ηλιακών πύργων ισχύος και την εξέλιξη της, ώστε η ανάλυση και η αξιολόγηση των δεδομένων που παρήγαγε συνεχίστηκαν για αρκετά χρόνια και μετά το τέλος της λειτουργίας του.



Εικόνα 5.3: Φωτογραφία του σταθμού Solar Two

5.2 Εμπορικές εφαρμογές ηλιακών πύργων

Παρακάτω εξετάζονται κάποιες εμπορικές εφαρμογές ηλιακών πύργων ισχύος.

5.2.1 Planta Solar 10 (PS10)

Ο PS10 ήταν ο πρώτος σταθμός τεχνολογίας ηλιακού πύργου που παρήγαγε ηλεκτρισμό διασυνδεδεμένο με το δίκτυο σε καθεστώς αμιγώς εμπορικό. Το σύστημα έχει έξοδο ισχύος 11MW και βρίσκεται στο Sunlucar la Mayor, στη Σεβίλλη της Ισπανίας.

Το πεδίο του περιλαμβάνει 624 ηλιοστάτες επιφάνειας $120m^2$, οι οποίοι συνολικά καλύπτουν επιφάνεια $75.000 m^2$.



Εικόνα 5.4 : Αεροφωτογραφία από την κατασκευή του σταθμού PS10 τον Ιούνιο του 2005

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στον PS10 – μεταξύ των οποίων ηλιοστάτες μετάλλου-γυαλιού, σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με συμπιεσμένο νερό και δέκτης με στρόβιλο συμπιεσμένου ατμού –

ελέγχθηκαν πρώτα στις εγκαταστάσεις Plataforma Solar de Almeria, όπου αποδείχτηκε ότι πληρούν τις απαιτούμενες προϋποθέσεις. Αυτός ο έλεγχος βοήθησε να αποφευχθούν τεχνικές αβεβαιότητες και επέτρεψε στους μηχανικούς να επικεντρωθούν στη βελτίωση της τεχνολογίας του συστήματος, στην πιθανή ενσωμάτωση υποσυστημάτων, στην ευελιξία του στη ζήτηση του δικτύου και στη μελέτη για μείωση του κόστους.

Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης του σταθμού έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί το δίκτυο για 50 λεπτά στο 50% του φορτίου ή για 30 λεπτά σε συνθήκες πλήρους φορτίου, ώστε να μπορεί να λειτουργεί σε περίπτωση πρόσκαιρων νεφώσεων.



Εικόνα 5.5: Φωτογραφία της τουρμπίνας ατμού που χρησιμοποιεί ο PS10

Ο πύργος του σταθμού, ο οποίος περιλαμβάνει δέκτη τεχνολογίας κοιλότητας (cavity) και έχει ύψος 115m, σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζει κατά το δυνατόν το οπτικό αποτέλεσμα. Έτσι, το σχετικά στενό κυρίως σώμα του περιβάλλεται από μεγάλο ανοιχτό χώρο, για να δίνει αίσθηση φωτεινότητας.



Εικόνα 5.6 : Ο πύργος του PS10

Ο PS10 παράγει αρκετό ηλεκτρισμό για να καλύψει τη ζήτηση φορτίου από περίπου 5500 νοικοκυριά, δηλαδή όσος είναι ο πληθυσμός της Sanlucar la Mayor. Επιπλέον, με τη λειτουργία του αποτρέπει την απελευθέρωση 6000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα το χρόνο, όσο δηλαδή θα ήταν το αποτέλεσμα από την αντίστοιχη παραγωγή ηλεκτρισμού από ορυκτά καύσιμα.

5.2.2 Planta Solar 20 (PS20)

Ο PS20 είναι ο δεύτερος εμπορικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποίησε τεχνολογία ηλιακού πύργου. Έχει ισχύ εξόδου 20 MW και κατασκευάστηκε δίπλα στον PS10. Συνδέθηκε στο δίκτυο το 2009.

Ο PS20 διαθέτει ένα πεδίο 150.000 m^2 , το οποίο αποτελείται από 1255 ηλιοστάτες, επιφάνειας 120 m^2 ο καθένας. Κάθε ηλιοστάτης ανακλά την άμεση ηλιακή δέσμη σε ένα δέκτη τεχνολογίας κοιλότητας που βρίσκεται στη κορυφή ενός πύργου ύψους 165m. Επίσης, χρησιμοποιεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας το νερό και έχει δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης για κάλυψη του πλήρους φορτίου για μία ώρα.

Η τεχνολογία του PS20 βασίζεται σε αυτή του «προγόνου» του PS10, αλλά με αρκετές βελτιώσεις στο δέκτη, στο σύστημα ελέγχου, στα λειτουργικά συστήματα και στο σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Για παράδειγμα, διαθέτει ένα δέκτη φυσικής κυκλοφορίας (natural circulation receiver), που όταν αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνει την έξοδο της ενέργειας στο δίκτυο κατά 10%.

Ο σχεδιασμός του δέκτη του συστήματος, όπως και στον PS10, έγινε με κριτήριο τη μείωση του οπτικού αποτελέσματος.

Ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να παράγει περισσότερες από 40 GWh ενέργειας κάθε χρόνο, ποσό ικανό για να καλύψει τη ζήτηση ενέργειας από 10.000 νοικοκυριά. Παράλληλα, αποτρέπει σε ετήσια βάση την εκπομπή περίπου 12.000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 5.7: Ο PS10 (αριστερά) και ο PS20

5.2.3 Ivanpah Solar Electric Generating System (ISEGS)

Ο σταθμός ISEGS βρίσκεται στην έρημο Mojave στη Νότια Καλιφόρνια, τέθηκε σε λειτουργία το 2014 και αποτελεί μέχρι σήμερα το μεγαλύτερο σταθμό ηλιακού πύργου στον κόσμο. Αποτελείται από τρεις χωριστές μονάδες: τον Ivanpah 1 με συνολική ισχύ 126 MW, τον Ivanpah 2 με συνολική ισχύ 133 MW και τον Ivanpah 3 με ισχύ επίσης 133 MW.

Το πεδίο του περιλαμβάνει 173.500 ηλιοστάτες. Επίσης, το σύστημα έχει ενσωματωμένο λογισμικό για το χειρισμό και τον έλεγχο του ηλιακού πεδίου και χρησιμοποιεί γεννήτριες ατμού στο δέκτη. Η διάταξη του ηλιακού πεδίου έγινε με γνώμονα τη φυσική μορφολογία του εδάφους. Ακόμα, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην επηρεαστούν περιοχές με ευαίσθητη βλάστηση. Τέλος, το σύστημα χρησιμοποιεί συμπυκνωτές αέρα για να μετατρέψει τον ατμό του στροβίλου ξανά σε νερό, προκειμένου να μην επιβαρύνει τους ελάχιστους υδάτινους πόρους της περιοχής.

Ο ISEGS παράγει αρκετή καθαρή ενέργεια για να τροφοδοτεί 140.000 νοικοκυριά.



Εικόνα 5.8: Αεροφωτογραφία του σταθμού ISEGS όπου φαίνονται και οι τρεις μονάδες του

5.2.4 Gemasolar

Ο σταθμός Gemasolar έχει ισχύ 19,9MW και βρίσκεται στη Σεβίλλη, στην Ισπανία. Το αξιοσημείωτο είναι ότι αποτελεί τον πρώτο εμπορικό σταθμό τεχνολογίας ηλιακού πύργου που έχει σύστημα αποθήκευσης τηγμένων αλάτων.

Ο Gemasolar διαθέτει 2650 ηλιοστάτες και μπορεί να τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο με 1100 GWh ενέργειας το χρόνο. Το σύστημα αποθήκευσης τηγμένων αλάτων επιτρέπει την ανεξάρτητη ηλεκτρική παραγωγή μέχρι και για 15 ώρες, χωρίς καμία ηλιακή τροφοδότηση. Το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργήσει τόσες ώρες ακόμα και με την πλήρη απουσία ηλιακής ακτινοβολίας δίνει στον Gemasolar προβάδισμα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες που δίνουν ως έξοδο την ίδια ισχύ. Μάλιστα, κατά τη λειτουργία του, επιτεύχθηκε αξιοσημείωτη αύξηση στην απόδοση ισχύος, εξασφαλίζοντας ηλεκτρική παραγωγή για 6500 ώρες το χρόνο, δηλαδή 1,5 με 3 φορές περισσότερο απ' ότι άλλες τεχνολογίες

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός έχει τη δυνατότητα να καλύπτει τις ανάγκες φορτίου 25.000 νοικοκυριών. Επίσης, η λειτουργία του μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα περισσότερο από 30.000 τόνους το χρόνο.



Εικόνα 5.9: Ο σταθμός Gemasolar

Βιβλιογραφία

- [1] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, ‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη’, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. (2013)
- [2] Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, ‘Labview για Μηχανικούς, Συστήματα Συλλογής Δεδομένων’, Εκδόσεις Τζιόλα, 3^η Έκδοση (2014)
- [3] Αλέξανδρος Σ. Αλεξιάκης, ‘Ηλιακή Ενέργεια’, Εκδόσεις Μιχάλη Σιδέρη
- [4] Ι. Ι. Γελεγενης και Π.Ι. Αξιόπουλος, ‘Πηγές Ενέργειας: Συμβατικές και Ανανεώσιμες’, Εκδόσεις Σύγχρονη Εκδοτική
- [5] Κωνσταντίνος Α. Μπαλάρας, Αθανάσιος Α. Αργυρίου και Φώτης Ε. Καραγιάννης, ‘Συμβατικές και Ήπιες Μορφές Ενέργειας’, Εκδόσεις Τεκδοτική
- [6] ‘Technology Roadmap Solar Thermal Electricity’, International Energy Agency, www.iea.org (2014 edition)
- [7] ‘Renewable Energy Technologies: Solar Energy Perspectives’, International Energy Agency, www.iea.org (2011)
- [8] Rainer Aringhoff and Georg Brakmann, ‘Solar Thermal Power 2020: Exploiting the Heat of the Sun to Combat Climate Change’, European Solar Thermal Power Industry Association (ESTIA) and Greenpeace International, www.greenpeace.org
- [9] Timothy M. Leonard, ‘The SolarTrak Controller System: Pro-active Sun Tracking and Peripheral System Control’, Enhancement Electronics Inc., U.S.A, www.tapthesun.com (2003)
- [10] ‘Solar Two Demonstrates Clean Energy for the Future’, U.S. Department of Energy (DOE), Sandia National Laboratories and National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov (2000)
- [11] ‘Concentrating Solar Power Projects’, International Energy Agency and National Renewable Energy Laboratory, www.nrel.gov