



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Δ. Οικονόμου



Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Δ. Οικονόμου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2016

“Η επιστημονική γνώση που στρατεύεται στην υπηρεσία του λαού,
αποτελεί κινητήρια επαναστατική δύναμη.”



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ
ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αναστάσιος Δ. Οικονόμου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Απριλίου 2016.

.....
Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π.Βασιλείου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Η. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2016

.....

Αναστάσιος Δ. Οικονόμου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Αναστάσιος Δ. Οικονόμου, 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 την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος παρακολούθησης και ανάκλασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αλγόριθμος αυτός βρίσκει εφαρμογή στην ηλιακή-θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα στα Συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος.

Τα ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα αναπτύσσονται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια και αποτελούν σημαντικό υποψήφιο για την μελλοντική παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά έχουν δοκιμασθεί κυρίως στην Ισπανία και τις ΗΠΑ αλλά έχουν μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης και στις χώρες της Μεσογείου λόγω της μεγάλης ηλιοφάνειας που επικρατεί σε αυτές τις χώρες. Στην εργασία δίνεται ένα γενικό πλαίσιο το οποίο είναι κοινό σε όλα τα είδη των συγκεντρωτικών συστημάτων δηλαδή τα στάδια που ακολουθούνται στα ηλιακά συστήματα από την απορρόφηση της ακτινοβολίας, την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική.

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος, καθώς σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή ο αλγόριθμός που παρουσιάζεται. Δίνεται η περιγραφή των εν λόγω συστημάτων, των εξαρτημάτων τους και των εμπορικών εγκαταστάσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Με βάση τη θέση του Ηλίου, αλλά και τη σχετική του κίνηση ως προς τη Γη, υπολογίζονται οι ηλιακές συντεταγμένες (αζιμούθιο και ύψος Ηλίου) μεγέθη πολύ χρήσιμα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση είτε της ηλιοθερμικής τεχνολογίας είτε της φωτοβολταϊκής. Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται με βάση συγκεκριμένο θεωρητικό μοντέλο για την κίνηση του Ήλιου, το οποίο και παρουσιάζεται. Με βάση την θέση του Ήλιου αλλά και τη θέση του Στόχου, πάνω στον οποίο θέλουμε να ανακλάται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, υπολογίζεται η πορεία που πρέπει να ακολουθεί ένας Ηλιακός Ιχνηλάτης (tracker), ώστε το κάτοπτρο

(Ηλιοστάτης) το οποίο φέρει επάνω του, να ανακλά κατάλληλα την ακτινοβολία στον Στόχο.

Ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον Ήλιο, οι ηλιακές συντεταγμένες έχουν βαρύνουσα σημασία, αφού ανάλογα με την κίνηση του Ήλιου και τη γεωγραφική θέση κάθε περιοχής μπορεί το ηλιακό-θερμικό σύστημα παραγωγής να αυξήσει ή να μειώσει κατά πολύ την ενεργειακή του απόδοση.

Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του Ηλίου αλλά και τον υπολογισμό της πορείας που πρέπει να ακολουθεί ο Ηλιακός Ιχνηλάτης χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον NI Labview, για λόγους που αναφέρονται στην εργασία.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιακή Γεωμετρία, Αζιμούθιο, Ηλιακό Ύψος, Ηλιακή Ακτινοβολία, Ηλιακή Ενέργεια, Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα, Ηλιακός Πύργος Ισχυος, Ηλιακός Ιχνηλάτης, Ηλιοστάτης

ABSTRACT

In the current diploma thesis, an algorithm of tracking and reflection of the direct solar beam is presented. The algorithm can be applied in the Solar-Thermal production of electricity and particularly in the Central Receiver Systems (Solar Tower).

The Concentrated Solar Power Systems are developing very fast in the last few years and are growing into an important candidate for the future production of electricity. These systems have been tested mostly in Spain and U.S.A, but they have also great growth potential in the Mediterranean countries, because of the great sunshine. In this study it is given a general framework which is common to all types of concentrated solar systems stages. These stages are: the solar absorber of radiation, the conversion of solar energy to thermal and then into electricity.

Special report is given for the Solar Towers, because the algorithm which is presented, can be applied in these systems. The description of these systems, its components and the commercial installations that have been used, are presented.

Based on the sun's position and its relative motion to the Earth, the solar coordinates can be calculated by using the solar equations (Solar azimuth and elevation of the Sun). This calculation is based on a specific theoretical model for the sun motion, which is presented. Based on the sun's position as well as the target's position, where the direct solar beam should be reflected, we can calculate the course that Solar Tracker should follow, so that the mirror (Heliostat) reflects properly the solar beam onto the Target.

Solar coordinates are very important for the production of solar energy, because a Thermal-Solar system can increase or greatly decrease its efficiency, depending on the Sun motion and the geographic location of each region.

For the calculation of the Solar coordinates as well as the course the Tracker should follow, it was used the programming environment NI Labview, for reasons which are referred in the study.

Key Words: Solar Geometry, Azimuth, Elevation, Solar Beam, Solar Energy, Concentrating Solar Power Systems, Solar Tower, Central Receiver Systems, Solar Tracker, Heliostat

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δέρβο Κωνσταντίνο, καθηγητή του τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας & Τεχνολογίας Υλικών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και το ενδιαφέρον του καθ'όλη την διάρκεια υλοποίησης της.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου, Δημήτρη και Κωνσταντίνα, τους οποίους ευχαριστώ εκ βάθους καρδιάς για την στήριξη και την υπομονή που έδειξαν καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

1. Εισαγωγή	17
1.1. Ήλιος και Γη	17
1.2. Σχετική κίνηση Ηλίου & Γης.....	21
1.2.1. Γεωμετρία Γης – Ηλίου	22
1.2.2. Συστήματα συντεταγμένων για την ηλιακή πρόβλεψη.....	23
1.3. Θεωρητικό μοντέλο μελέτης της κίνησης του ηλίου.....	26
1.3.1. Ηλιακή Ώρα	28
1.3.2. Ηλιακή απόκλιση δ	30
1.3.3. Ωριαία Γωνία ω	31
1.3.4. Οι Συντεταγμένες του Ήλιου	32
1.3.5. Ανατολή, δύση και ηλιοφάνεια	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2. Εισαγωγή	33
2.1. Ηλιακή ενέργεια.....	33
2.1.1. Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας	35
2.2. Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας.....	36
2.3. Πυκνότητα ισχύος και φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας	38
2.4. Βασικές έννοιες που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία	40
2.5. Κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3. Εισαγωγή	47
3.1. Γενική περιγραφή.....	47
3.2. Αρχές Λειτουργίας.....	50
3.3. Συγκέντρωση ακτινοβολίας.....	51
3.4. Απορρόφηση ακτινοβολίας.....	57
3.5. Αποθήκευση θερμότητας με υψηλή θερμοκρασία.....	57
3.6. Τεχνολογίες θερμικών ηλιακών σταθμών	60
3.7. Μηχανισμός Παρακολούθησης του Ηλίου (<i>tracking</i>)	62

3.7.1. Παρακολούθηση σε έναν άξονα.....	64
3.7.2. Παρακολούθηση σε δύο άξονες.....	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (CRS)

4. Εισαγωγή	68
4.1. Γενικά στοιχεία	68
4.2. Περιγραφή Τεχνολογίας	70
4.3. Ηλιοστάτες και Τεχνολογία Συλλέκτη.....	72
4.4. Ο Ηλιακός Δέκτης.....	76
4.5. Εμπορικά και Πειραματικά CRS	77
4.5.1. Συγκροτήματα νερού – ατμού : Σταθμοί PS10 & PS20.....	77
4.5.2. Συστήματα τηγμένου άλατος : Σταθμοί Solar Two και Gemasolar Thermosolar Plant	82
4.5.3. Ηλιακά Συστήματα Προθέρμανσης : Project SOLGATE.....	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ : ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΣΕ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΧΟ

5. Εισαγωγή	89
5.1. Περιγραφή εξισώσεων	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

6. Εισαγωγή.....	97
6.1. NI Labview	97
6.2. Εφαρμογή υπολογισμού του αζιμούθιου και του ύψους του ηλίου οποιαδήποτε στιγμή..	98
6.3. Εφαρμογή υπολογισμού του αζιμούθιου και του ύψους του διανύσματος θέσης του Ηλιοστάτη οποιαδήποτε στιγμή, με βάση τη θέση του Ήλιου	99

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

7. Εισαγωγή	103
7.1. Προσομοιώσεις για 4 ημέρες του χρόνου, μία από κάθε εποχή.....	103
7.2. Προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές αζιμούθιου του στόχου.....	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8. Επίλογος.....	113
------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

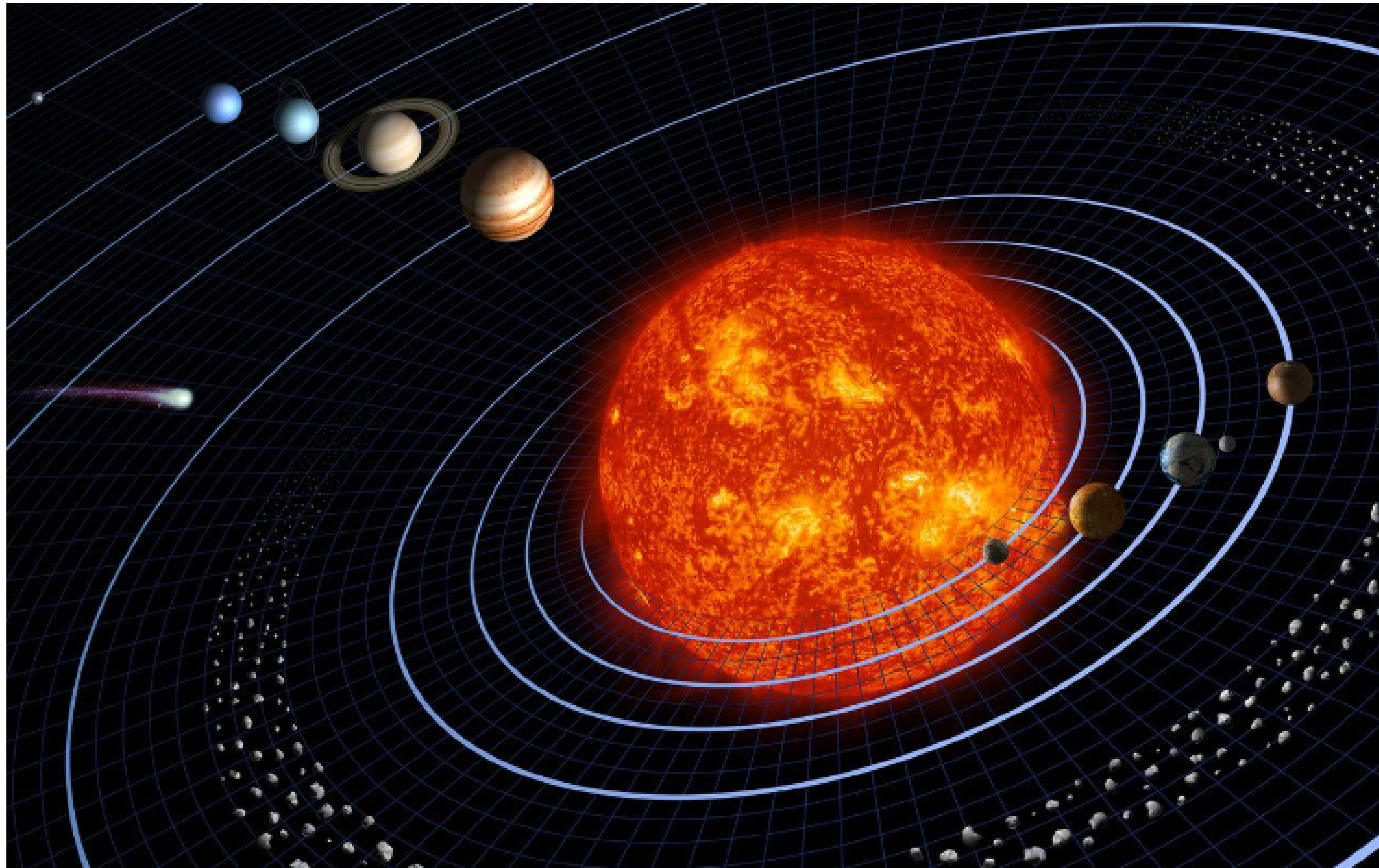
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

1. Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά της Ηλιακής Γεωμετρίας όπως επίσης και στις κινήσεις που κάνουν ο Ήλιος και η Γη. Περιγράφονται τα συστήματα συντεταγμένων και διατυπώνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του ήλιου ως προς τη γη, σύμφωνα με θεωρητικό μοντέλο το οποίο και αναλύεται.

1.1. Ήλιος και Γη

Ο Ήλιος πρόκειται για αστέρι της κύριας ακολουθίας με φασματικό τύπο G2 V. Σε σχέση με ένα μέσο άστρο έχει μεγαλύτερη μάζα και θερμοκρασία, σημαντικά όμως μικρότερες συγκριτικά με έναν μπλε γίγαντα. Ο Ήλιος ακολουθεί μια τροχιά μέσα στον Γαλαξία σε απόσταση περίπου 25.000 με 28.000 έτη φωτός από το κέντρο του, ολοκληρώνοντας μία πλήρη περιφορά σε 226 εκατομμύρια έτη περίπου. Γύρω από τον Ήλιο περιφέρονται οι οκτώ πλανήτες που σχηματίζουν το πλανητικό σύστημα, των οποίων οι τροχιές είναι σχεδόν ελλειπτικές και βρίσκονται πάνω στο επίπεδο που ορίζει η εκλειπτική. Οι τέσσερις εσώτεροι, ο Ερμής, η Αφροδίτη, η Γη και ο Άρης αποτελούν τους λεγόμενους γήινους πλανήτες και αποτελούνται κυρίως από πετρώματα και μέταλλα. Οι τέσσερις εξώτεροι πλανήτες ονομάζονται αέριοι γίγαντες. Από αυτούς, οι δύο μεγαλύτεροι, ο Δίας και ο Κρόνος αποτελούνται από υδρογόνο και ήλιο και οι άλλοι δύο, ο Ουρανός και ο Ποσειδώνας αποτελούνται από νερό, αμμωνία και μεθάνιο. Ο πλούτωνα, που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν ο 9^{ος} πλανήτης του ηλιακού μας συστήματος, ανήκει πλέον σε μια νέα κατηγορία ουράνιων σωμάτων, τους νάνους πλανήτες.

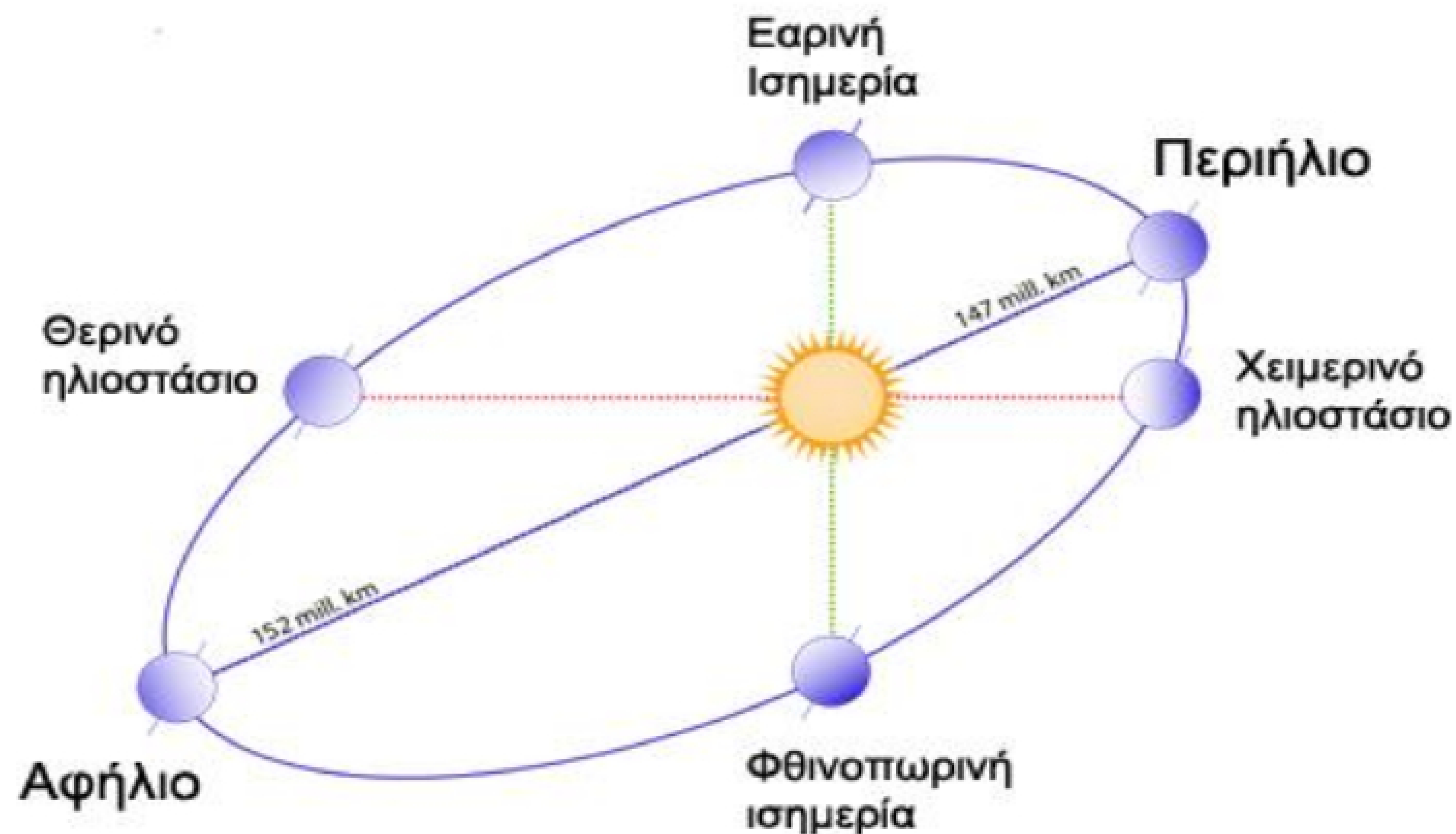


Σχ.1.1 : Το Ηλιακό σύστημα

Ο Ήλιος έχει διάμετρο περίπου ίση με $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ και εκτελεί μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά του κάθε τέσσερις βδομάδες. Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητάς του, ο ισημερινός του περιστρέφεται πλήρως μέσα σε 27 ημέρες ενώ οι πολικές περιοχές του σε 30 ημέρες. Ο πυρήνας του ήλιου βρίσκεται στο εσωτερικό του σε μια σφαίρα ακτίνας $0.23 R$, όπου R η ακτίνα του. Στον πυρήνα βρίσκεται το 40% της μάζας του και δημιουργείται το 90% της ενέργειάς του.

Συχνά συναντάται η ορολογία : "φαινόμενη διάμετρος του Ηλίου". Φαινόμενη διάμετρος του Ηλίου ονομάζουμε τη γωνία AGB με την οποία παρατηρείται ο Ήλιος από τη Γη όταν A και B είναι αντιδιαμετρικά σημεία της περιφέρειας του δίσκου του Ηλίου και G το σημείο της Γης (του παρατηρητή). Η διχοτόμος AGB εκφράζει την απόσταση Γης - Ηλίου. Η φαινόμενη διάμετρος του Ήλιου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους. Στις 3 Ιανουαρίου λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της, ίση με $32' 36'',2$ ενώ στις 4 Ιουλίου λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της ίση με $31' 32''$. Αυτή η μεταβολή της φαινόμενης διαμέτρου αποδεικνύει ότι η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική με μήκος μεγάλου άξονα $a=149,6 \times 10^6 \text{ km}$ και εκκεντρότητα $e=0,01673$. Η απόσταση μεταξύ γης και ήλιου

μεταβάλλεται περιοδικά κατά τη διάρκεια του έτους έτσι ώστε στις 4 Ιανουαρίου η απόσταση Γης - Ήλιου να είναι η ελάχιστη δυνατή (ονομάζεται **περιήλιο**), δηλαδή $147.098.074 \text{ km}$ και στις 4 Ιουλίου να είναι η μέγιστη δυνατή (ονομάζεται **αφήλιο**) δηλαδή $152.100.000 \text{ km}$. Επομένως η μέση τιμή της απόστασης Γης - Ήλιου είναι $152.097.701 \text{ km}$ και για να την διανύσει την εν λόγω απόσταση το φως απαιτούνται περίπου 8.5 min .



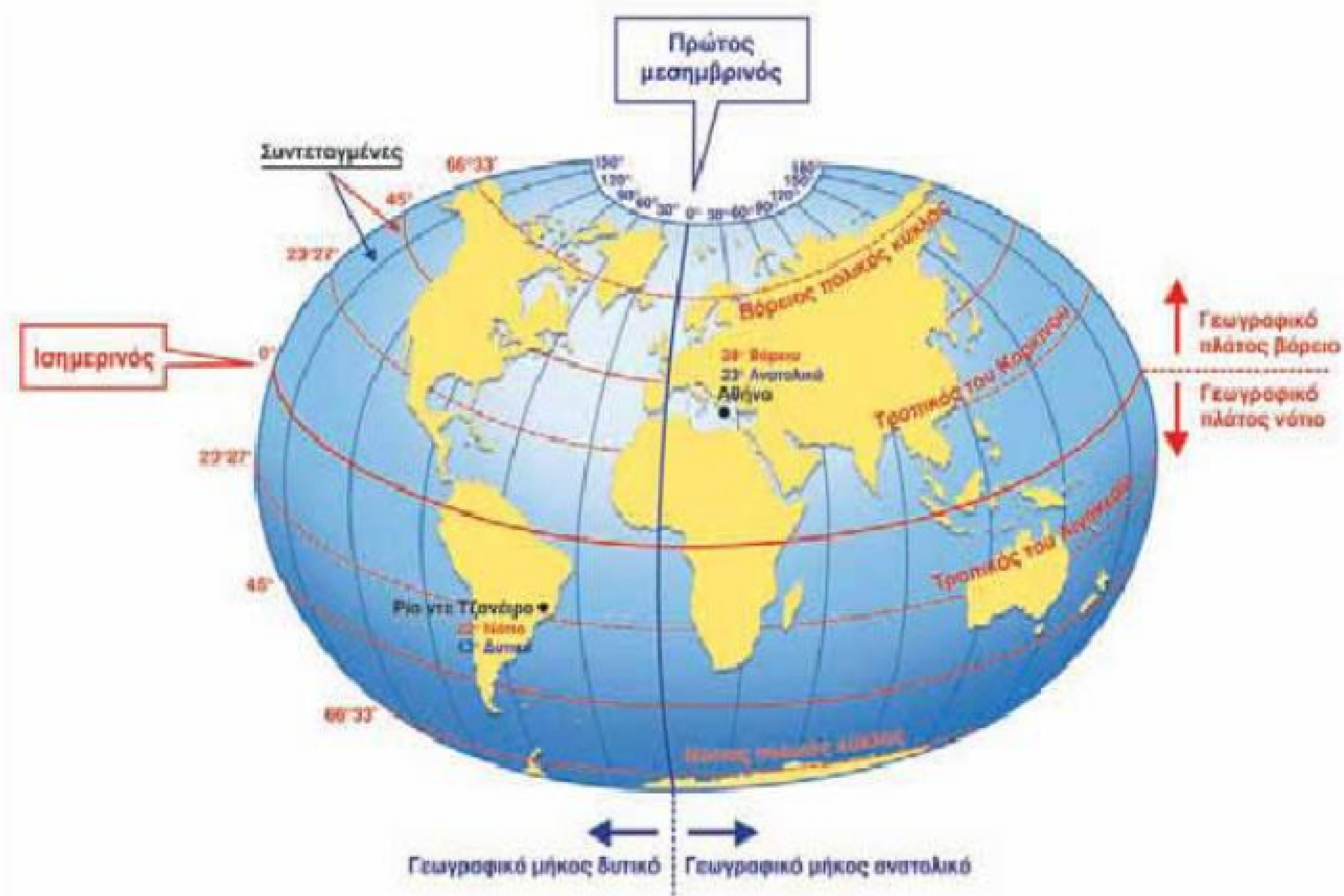
Σχ.1.2 : Η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο

Η Γη όμως ως γνωστόν δεν περιφέρεται μόνο γύρω από τον Ήλιο. Πραγματοποιεί στην πραγματικότητα 4 κινήσεις: την περιστροφή γύρω από τον άξονά της, την περιφορά γύρω από τον Ήλιο, την ηλιακή μεταβατική περιφορά που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιστροφή του Ηλιακού συστήματος και την Γαλαξιακή μεταβατική περιφορά που πραγματοποιεί ακολουθώντας την περιστροφή του Γαλαξία.

Οι σημαντικότερες κινήσεις τις οποίες και θα μελετήσουμε είναι οι δύο πρώτες. Για τη μελέτη αυτή είναι απαραίτητο να αναφέρουμε κάποια στοιχεία όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης ενός παρατηρητή στο γήινο έδαφος.

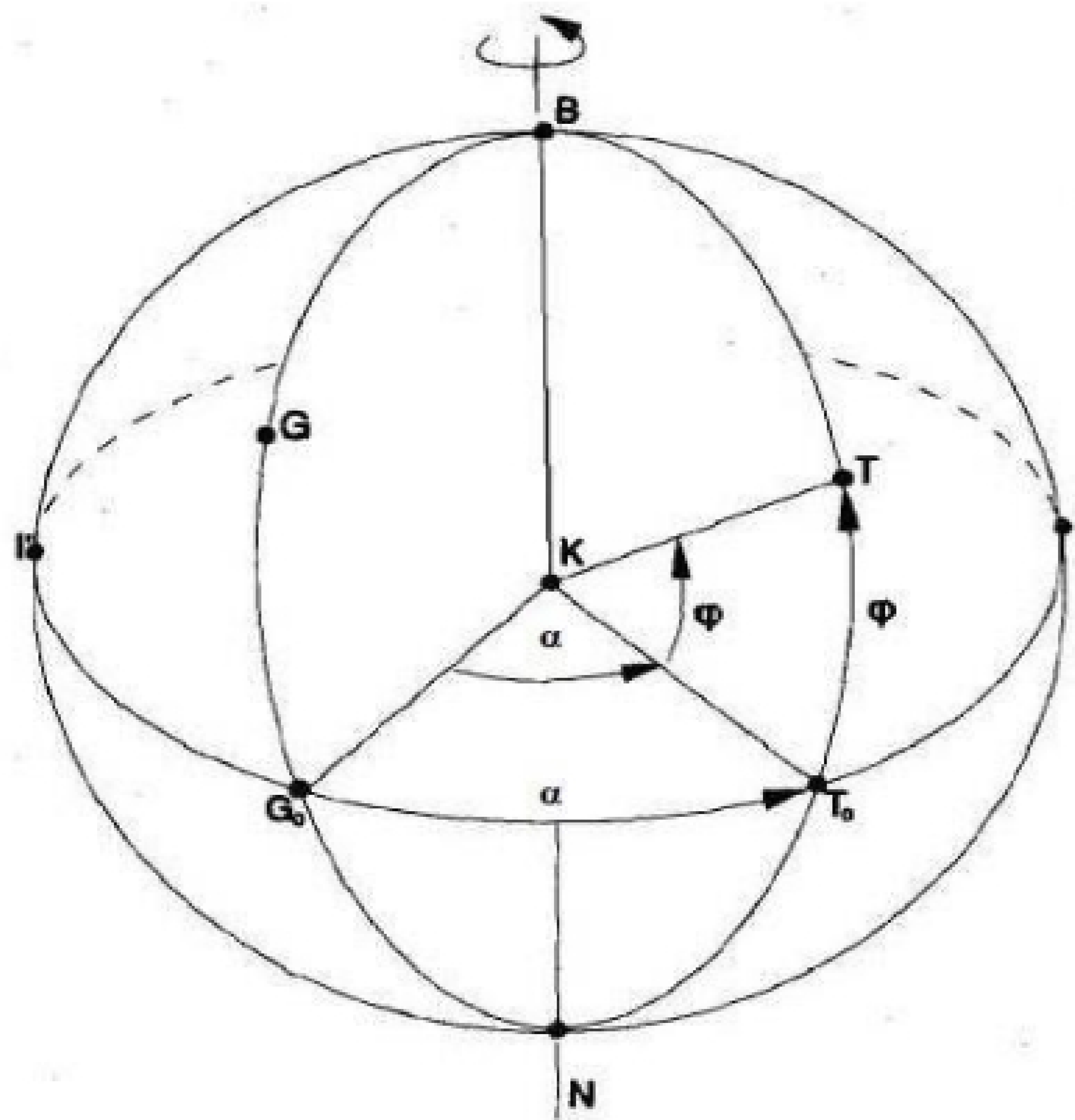
Οποιαδήποτε θέση πάνω στη Γη την προσδιορίζουμε με τη βοήθεια κάθετων ημικυκλίων που ονομάζονται μεσημβρινοί και οριζόντιων παράλληλων κύκλων που ονομάζονται παράλληλοι.

Αρχή για αυτό το σύστημα αποτελούν ο μεσημβρινός του Γκρίνουιτς (Greenwich) και ο Ισημερινός και γι' αυτό το σημείο τομής τους αποτελεί το σημείο αναφοράς στην επιφάνεια της Γης.



Σχ.1.3 : Μεσημβρινοί (μπλέ χρώμα) και Παράλληλοι κύκλοι (κόκκινο χρώμα)

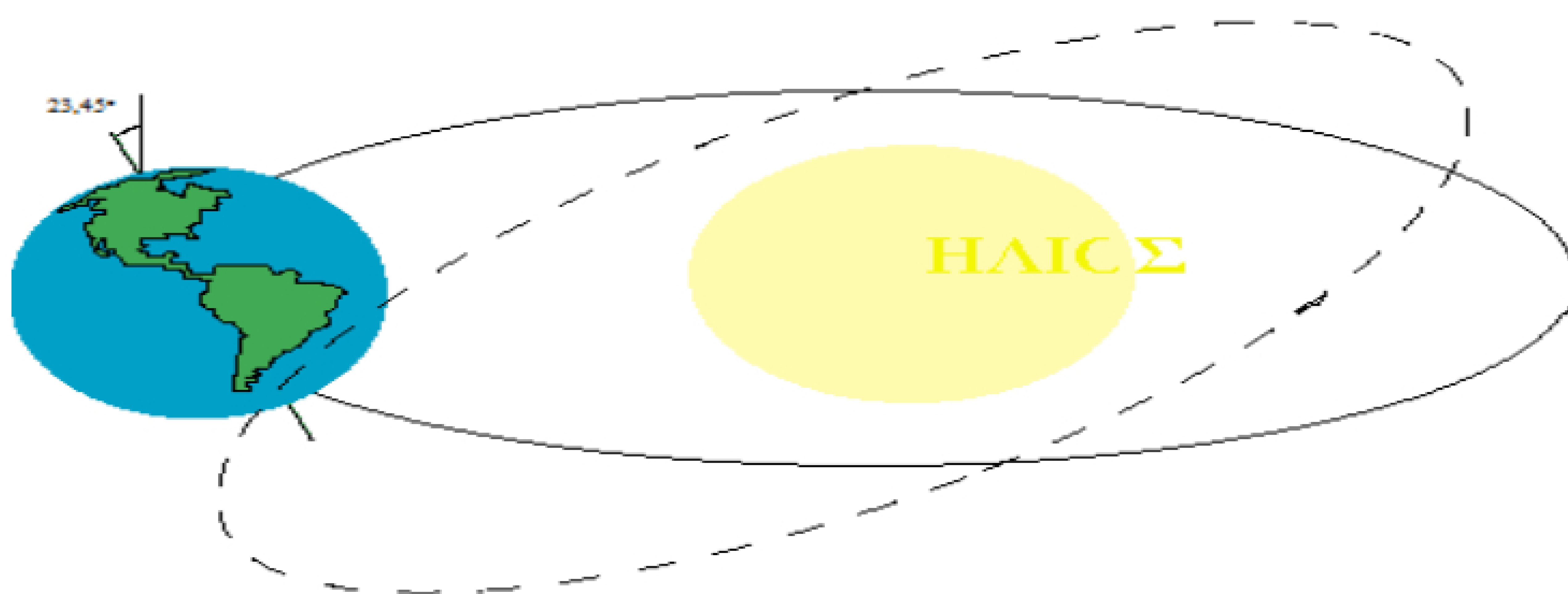
Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του Ισημερινού και μία νοητή γραμμή που ενώνει το κέντρο της Γης με την τοποθεσία που πρόκειται να προσδιοριστεί ονομάζεται γεωγραφικό πλάτος ϕ (Geographic Latitude) και παίρνει θετικές τιμές στο Βόρειο ημισφαίριο. Αντίστοιχα, η γωνία από τον πρώτο μεσημβρινό ονομάζεται γεωγραφικό μήκος α ή αλλιώς L_{local} (Geographic Longitude) και το πρόσημο της είναι διαφορετικό δυτικά και ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich. Το ζεύγος (α, ϕ) αποτελούν τις συντεταγμένες του τόπου. Για παράδειγμα στην εργασία οι συντεταγμένες για την Αθήνα έχουν ληφθεί ως $\phi=37,96^\circ$ και $\alpha= \pm 23,72^\circ$



Σχ. 1.4 : Προσδιορισμός Γεωγραφικών Συντεταγμένων

1.2. Σχετική κίνηση Ηλίου & Γης

Η Γη βρίσκεται σε μία συνεχή κίνηση γύρω από τον εαυτό της και ταυτόχρονα γύρω από τον Ήλιο. Η Γη ολοκληρώνει μία περιστροφή γύρω από τον Ήλιο σε 365,25 ημέρες και μία περιστροφή γύρω από τον πολικό της άξονα σε 23 ώρες και 56 λεπτά. Η τροχιά της Γης σχηματίζει μία έλλειψη, η οποία ορίζει το εκλειπτικό επίπεδο. Ο πολικός άξονας της Γης δεν είναι κατακόρυφος αλλά σχηματίζει γωνία $\delta=23,45^\circ$ με την κάθετη στο εκλειπτικό επίπεδο. Η γωνία δ ονομάζεται γωνιακή απόκλιση.

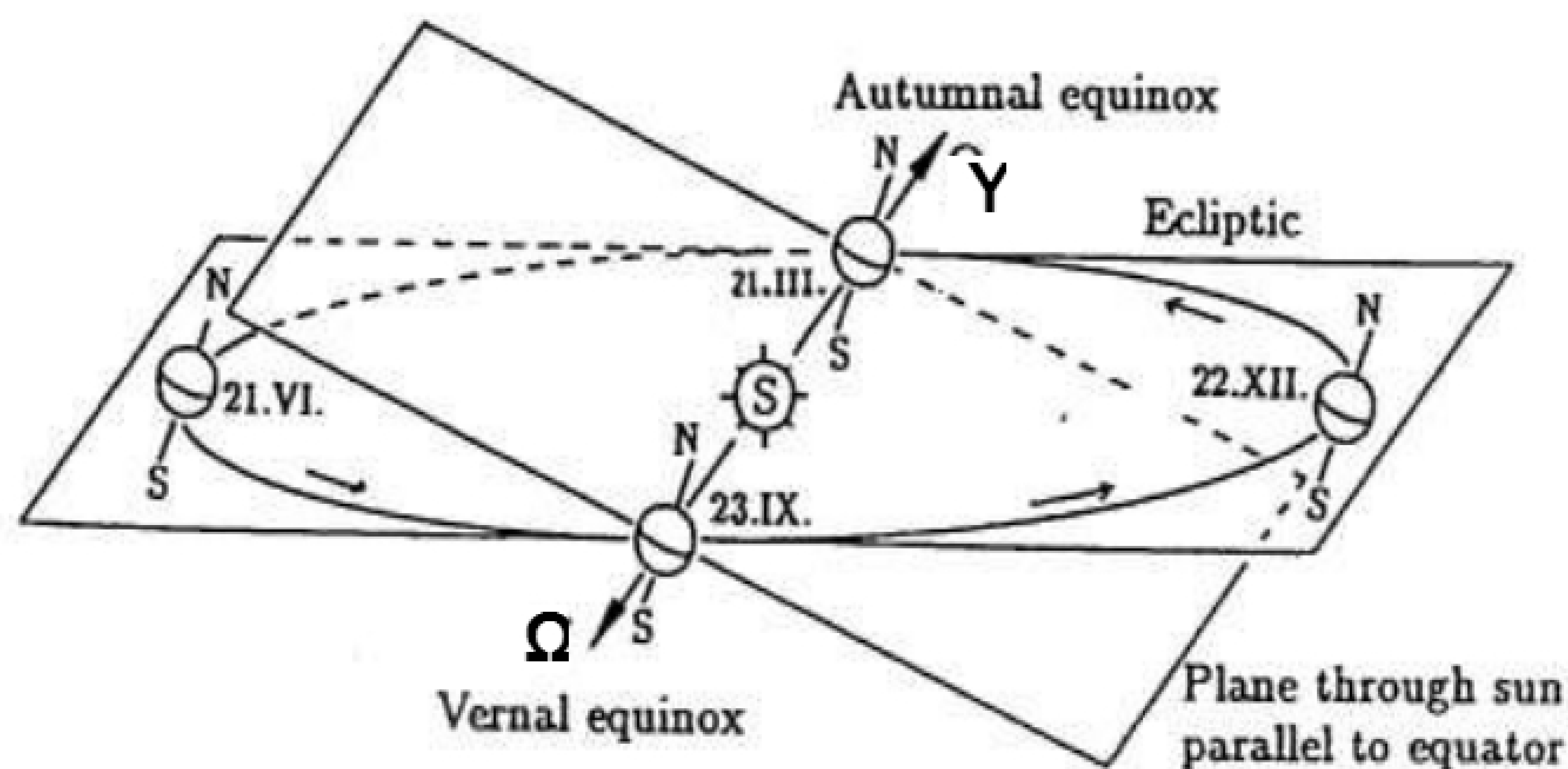


Σχ. 1.5 : Ελλειπτική τροχιά Γης- γωνιακή απόκλιση

Πριν παρουσιάσουμε το θεωρητικό μοντέλο κίνησης του Ήλιου (αλγόριθμος υπολογισμού της ηλιακής θέσης) θα περιγράψουμε τα συστήματα συντεταγμένων.

1.2.1. Γεωμετρία Γης – Ηλίου

Η προβολή του ισημερινού επιπέδου της γης (στο άπειρο) ονομάζεται ουράνιος ισημερινός. Η γραμμή της τομής του επιπέδου αυτού με την εκλειπτική τροχιά καθορίζει τις ισημερίες. Η θέση της γης στην εαρινή (Vernal) και φθινοπωρινή (Autumnal) ισημερία φαίνεται στο σχήμα 1.6. Ο ουράνιος ισημερινός παραμένει ουσιαστικά καθορισμένος στη θέση, αν και για πολύ ακριβείς εργασίες οι μεταβολές στην τροχιά της Γης και στη βαρύτητα, ως αποτέλεσμα των άλλων ουράνιων σωμάτων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν. Η γωνία μεταξύ της εκλειπτικής και των επιπέδων του ισημερινού ονομάζεται “λόξωση της εκλειπτικής”.



Σχήμα 1.6: Προσανατολισμός της εκλειπτικής και του ισημερινού

Η εαρινή ισημερία σηματοδοτεί την έναρξη της εαρινής περιόδου και η φθινοπωρινή ισημερία δείχνει ότι φθάνει ο χειμώνας. Οι ισημερίες λαμβάνουν χώρα περίπου στις 21 Σεπτέμβρη (φθινοπωρινή) και 21 Μάρτη (εαρινή) κάθε χρόνο, αν και ο ακριβής χρόνος θα διαφέρει ελαφρώς από χρόνο σε χρόνο.

Παρόλο που ως γνωστόν η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο, είναι βολικό να θεωρούμε τη Γη σταθερή στο χώρο, και όλα τα ουράνια σώματα να περιστρέφονται γύρω της. Το κέντρο της “ακίνητης” Γης, καθορίζει το κέντρο της ουράνιας σφαίρας. Ο προσανατολισμός της σφαίρας ορίζεται από τον άξονα Βορρά – Νότου της Γης (Σχήμα 1.7). Η ουράνια σφαίρα έχει μια άπειρη ακτίνα και οι θέσεις στη σφαίρα υπολογίζονται, χρησιμοποιώντας μόνο 2 γωνίες. Η τομή του άξονα Βορρά – Νότου της Γης με την ουράνια σφαίρα καθορίζει το Βόριο και Νότιο Ουράνιο Πόλο. Στο βόρειο ημισφαίριο, είναι η (κατά προσέγγιση) θέση στον ουρανό του αποκαλούμενου Πολικού (ή Βόρειου) Αστήρα.

1.2.2. Συστήματα συντεταγμένων για την ηλιακή πρόβλεψη

Χρησιμοποιούνται τρία βασικά συστήματα συντεταγμένων :

1. Γεωγραφικό μήκος/ Γεωγραφικό πλάτος για τις θέσεις στη γη,
2. Ορθή αναφορά/ Απόκλιση (Right ascension / Declination) για τις θέσεις των ουράνιων σωμάτων και
3. ο χρόνος.

1.2.2.1. Γεωγραφικό μήκος & πλάτος

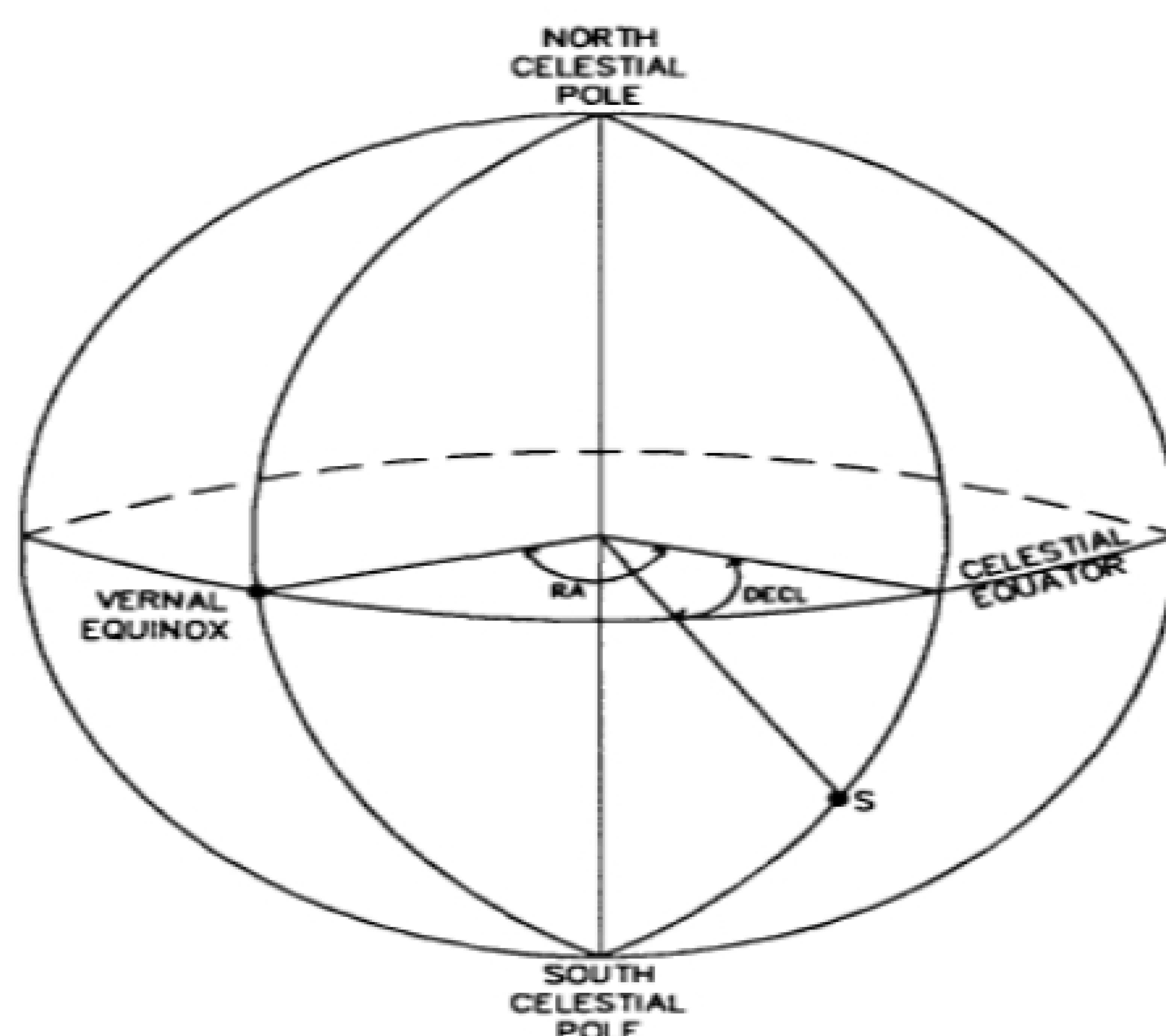
Αναφέρθηκαν νωρίτερα οι γνωστές συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται στη Γη. Είναι ένα σύστημα πολικών συντεταγμένων όπως φαίνονται στο σχήμα 1.4. Το γεωγραφικό μήκος μετρείται από το Μεσημβρινό του Greenwich και το γεωγραφικό πλάτος από τον ισημερινό.

Έτσι οποιαδήποτε θέση στην επιφάνεια της γης μπορεί να ορίζεται μονοσήμαντα από το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος. Για βασικές εφαρμογές αρκεί να εξεταστεί η Γη ως τέλεια σφαίρα. Ωστόσο για ακριβείς εφαρμογές η Γη μοντελοποιείται ως ελλειψοειδής.

1.2.2.2. Οι συντεταγμένες Ορθή αναφορά / Απόκλιση

Το εν λόγω σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε τη θέση των ουράνιων αντικειμένων και είναι παρόμοιο σε σύλληψη με το σύστημα Γεωγραφικό μήκος / Γεωγραφικό πλάτος. Η ορθή αναφορά είναι υπολογίσιμη δεξιόστροφα από την εαρινή ισημερία και η απόκλιση υπολογίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από τον ουράνιο ισημερινό με το ουράνιο αντικείμενο (θετικό πρόσημο η βόρεια) που τέμνεται στο κέντρο της ουράνιας σφαίρας. Οι δυο αυτές συντεταγμένες φαίνονται στο σχήμα 1.7.

Επειδή η Γη κινείται στο χώρο πραγματικά η ορθή αναφορά θα ποικίλει ανάλογα με την τροχιακή θέση της Γης. Ωστόσο, για τα αστέρια, η απόσταση από αυτά είναι τόσο μεγάλη σε σύγκριση με την απόσταση της Γης από τον ήλιο, έτσι ώστε εισάγεται ως αμελητέο σφάλμα για όλες, εκτός από τις πάρα πολύ ακριβείς, εφαρμογές. Αυτή δεν είναι η περίπτωση για τον ήλιο, αφού η απόσταση είναι μικρή (πεπερασμένη) σε σχέση με τα αστέρια. Έτσι η Ορθή αναφορά / απόκλιση θα ποικίλει σε καθημερινή βάση.



Σχήμα 1.7 Ορθή Αναφορά / απόκλιση (RA/DECL)

1.2.2.3. Ο χρόνος

Ο χρόνος είναι το τρίτο μεγάλο σύστημα συντεταγμένων πρωταρχικής σημασίας για την αστρονομία. Σε έναν παρατηρητή στη Γη, η γραμμή μέσω του ζενίθ του παρατηρητή προς το βόρειο πόλο ονομάζεται μεσημβρινός του παρατηρητή. Αυτός είναι ένας μεγάλος κύκλος που ακολουθεί έναν κύκλο γεωγραφικού μήκους.

Δυο συστήματα χρόνου χρησιμοποιούνται συνήθως : η ηλιακή ώρα και η τοπική ώρα. Μεσημέρι ως προς την ηλιακή ώρα είναι η στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο μεσημβρινό του παρατηρητή. Προφανώς κάθε γραμμή του γεωγραφικού μήκους θα έχει τη δική της μοναδική ηλιακή ώρα. Λόγω της ανάγκης για τυποποίηση του χρόνου για πολιτικούς σκοπούς, εισήχθησαν οι ζώνες ώρας (τοπική – πολιτική ώρα). Στην Ελλάδα έχουμε π.χ ζώνη ώρας 2 ώρες ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich. Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελαφρώς ελλειπτική, έτσι ώστε η διάρκεια μιας ηλιακής μέρας δεν είναι σταθερή στη διάρκεια του έτους. Λόγω των πολιτικών απαιτήσεων που αναφέρθηκαν και παραπάνω, έχει εφευρεθεί ο πλασματικός ή μέσος ήλιος.

Η διάρκεια της μέσης μέρας έχει σχεδιαστεί για να είναι ο μέσος όρος όλων των ημερών του έτους. Η διαφορά μεταξύ του αληθινού ήλιου και του πλασματικού ήλιου ονομάζεται Εξίσωση του χρόνου. Κυμαίνεται μεταξύ -16 και 16 λεπτά (του χρόνου) σε όλη τη χρονιά.

Η Παγκόσμια ώρα (UT) είναι μια διεθνώς συμφωνημένη μέθοδος όπου ο χρόνος υπολογίζεται από τον πλασματικό μέσο ήλιο και έχει αναφορά στο μεσημβρινό του Greenwich.

Ο χρόνος εκφράζεται συνήθως με ένα ρολόι 24 ωρών. Για τριγωνομετρικούς υπολογισμούς, ο χρόνος πρέπει να εκφράζεται ως γωνία. Επειδή 24 ώρες είναι μια πλήρης περιστροφή της γης και αυτή ισούται με 360 μοίρες τόξου, τότε η σχέση γίνεται : $\Omega_{\text{ρα}}(\text{τόξο}) = \Omega_{\text{ρα}}(\text{hours}) \times 15$

Έτσι για θέσεις ανατολικά του μεσημβρινού αναφοράς ο ήλιος θα είναι στο ηλιακό μεσημέρι πριν τα ρολόγια μας δείξουν 12 ώρες και το αντίστροφο

θα ισχύει για θέσεις δυτικά του μεσημβρινού. Κατά τη διάρκεια των περιόδων που έχουμε θερινή ώρα προστίθεται μια ώρα στη ζώνη ώρας για να πάρουμε την παγκόσμια ώρα.

1.3. Θεωρητικό μοντέλο μελέτης της κίνησης του ηλίου

Η βιβλιογραφία περιέχει πολλές μελέτες που αφορούν τον υπολογισμό της ηλιακής θέσης. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα παρουσιαστεί και θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος υπολογισμού της ηλιακής θέσης που υπάρχει στο βιβλίο “ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, από τη Θεωρία στην Πράξη”.

Επειδή παρατηρούμε τον ήλιο από τη Γη, το να μελετήσουμε τη γεωμετρία του γίνεται πολύ δύσκολο, δεδομένου του ότι ο παρατηρητής κινείται.



Σχ. 1.8 : Μοντέλο σχετικής κίνησης Ήλιου-Γης

Τέτοιου είδους περίπλοκες θεωρήσεις και υπολογισμοί μπορούν να απλοποιηθούν θεωρώντας τη Γη σαν κέντρο ελλειπτικής τροχιάς στην οποία κινείται αυτή τη φορά, ο ήλιος. Στο απλοποιημένο αυτό μοντέλο ο άξονας της γης γίνεται κατακόρυφος ενώ το επίπεδο στο οποίο ορίζεται η ελλειπτική τροχιά του ήλιου σχηματίζει γωνία με το επίπεδο που ορίζεται από τον ισημερινό της Γης (ουράνιος ισημερινός) ίση με την ηλιακή απόκλιση.

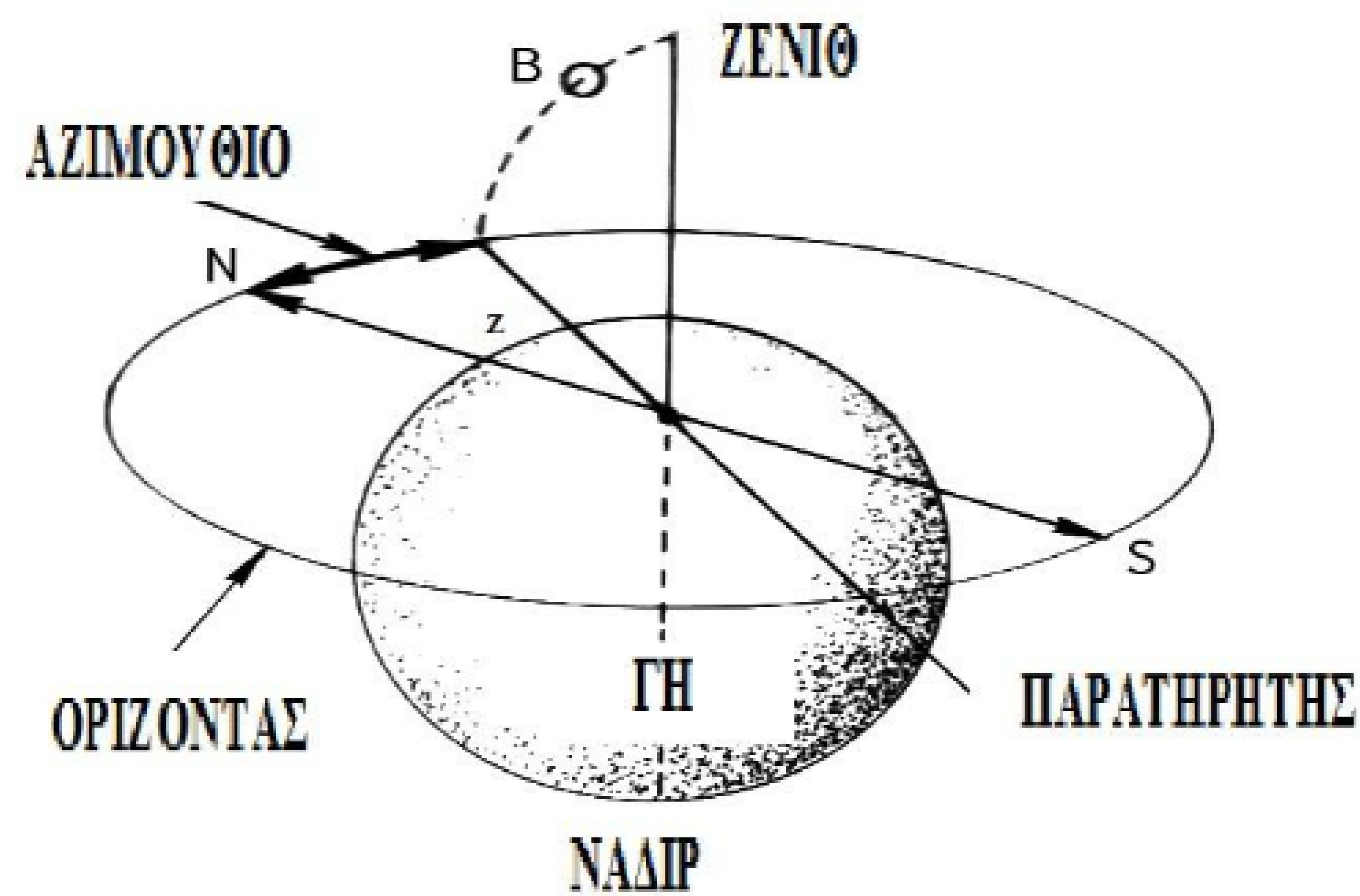
Το μοντέλο αυτό αντιστοιχίζεται πλήρως στην πραγματική κίνηση των ουράνιων σωμάτων τοποθετώντας τον παρατηρητή πάνω στη Γη και όχι έξω από το σύστημα.

Το μοντέλο αυτό, το οποίο περιγράφει πλέον την κίνηση “του Ήλιου ως προς τη Γη”, επιτρέπει σε παρατηρητή ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο της Γης να εντοπίζει τον ήλιο σε γωνία δ από τον ουράνιο ισημερινό. Και αυτής όμως η θέση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αφού δεν είναι δυνατόν ο παρατηρητής να βρίσκεται στο κέντρο της Γης. Γι' αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί η πραγματική θέση του παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της Γης. Αυτό προϋποθέτει τη μεταφορά του συστήματος συντεταγμένων στο εκάστοτε ζητούμενο σημείο συνυπολογίζοντας τις συντεταγμένες του τόπου.

Μετά τη μεταφορά των συντεταγμένων όλοι οι υπολογισμοί γίνονται στο “φυσικό” σύστημα συντεταγμένων για κάθε παρατηρητή που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της Γης. Το σύστημα αυτό αναφέρεται σε επίπεδο εφαπτόμενο σε συγκεκριμένη θέση και τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ορίζοντα. Αυτή η θεώρηση είναι ιδιαίτερα λειτουργική αφού θεωρούμε ότι ο ήλιος κινείται πάνω στην ουράνια σφαίρα. Σημαντικό για το μοντέλο είναι το σημείο ζενίθ που αποτελεί σημείο τομής της κάθετης στο οριζόντιο επίπεδο και της ουράνιας σφαίρας

Για να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τη θέση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα μας χρειάζονται δύο γωνίες οι οποίες αποτελούν και τις συντεταγμένες του. Η πρώτη ονομάζεται **ύψος ηλίου**. Είναι η **γωνία β** που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της νοητής γραμμής που ενώνει τον παρατηρητή και τον ήλιο. Η δεύτερη ονομάζεται **αζιμούθιο** και πρόκειται για την **γωνία Z** που σχηματίζεται μεταξύ μιας ορισμένης κατεύθυνσης που θα αναφέρεται στο νότο και της προβολής του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία β μπορεί να πάρει τιμές από 0° έως 90° . Η τιμή 0° αναφέρεται στη δύση ή την ανατολή, ενώ οι 90° αποτελούν το ανώτερο ύψος ηλίου που μπορεί να προσεγγιστεί μόνο για συγκεκριμένα γεωγραφικά πλάτη και για συγκεκριμένες ημέρες του χρόνου. Το αζιμούθιο Z μπορεί να πάρει τιμές από -180° έως 180° . Η τιμή 0°

αντιστοιχεί στο νότο ενώ όσο κινούμαστε προς τη δύση έχουμε θετικές τιμές. Το ζεύγος (β, Z) αρκεί για τον πλήρη προσδιορισμό της θέσης του ηλίου στην ουράνια σφαίρα. Βοηθητικά χρησιμοποιείται η γωνία ϕ_z η οποία σχηματίζεται μεταξύ του ζενίθ και της νοητής ευθείας που ενώνει τον παρατηρητή με τον ήλιο και είναι συμπληρωματική της β .



Σχ.1.9: Τροχιά και συντεταγμένες Ηλίου στον ουράνιο θόλο.

1.3.1. Ηλιακή Ώρα

Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στη μελέτη της κίνησης του ήλιου είναι η **ηλιακή ώρα**. Η ηλιακή ώρα T_{solar} διαφέρει από την ώρα του εκάστοτε τόπου καθώς η τοπική ώρα T_{local} εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κάθε τόπου όπως επίσης και από την ημέρα του έτους στην οποία αναφέρεται ο υπολογισμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται διορθώσεις στην τοπική ώρα ώστε να προσεγγίσουμε την T_{solar} .

1.3.1.1. Μεσημβρινός αναφοράς

Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της θέσης του ζητούμενου τόπου προσαρμόζουμε χρονικά το συγκεκριμένο γεωγραφικό του μήκος στην αντίστοιχη ζώνη ώρας. Ο συλλογισμός αυτός βασίζεται στο ότι η Γη στρέφεται κατά 15° ανά μία ώρα και είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη

ζώνη ώρας του τόπου ΔT_{GMT} δηλαδή τη διαφορά ώρας με την ώρα GMT (Greenwich mean time). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τις μοίρες του μεσημβρινού αναφοράς L_{st} με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$L_{st} = \frac{15^\circ}{h \cdot \Delta T_{GMT}}$$

Για παράδειγμα ο μεσημβρινός αναφοράς της Ελλάδας από τον τύπο προκύπτει ότι είναι $L_{st} = \frac{15^\circ}{h \cdot (-2)h} = -30^\circ$ (δεδομένου ότι η ζώνη ώρας για την Ελλάδα είναι -2 h)

1.3.1.2. Μήκος τόπου

Αφού βρήκαμε τον μεσημβρινό αναφοράς είναι απαραίτητο να διορθώσουμε την ώρα για το συγκεκριμένο γεωγραφικό μήκος του τόπου. Δεδομένου του ότι η Γη στρέφεται κατά 1° ανά 4min η διόρθωση αντιστοιχεί στον παρακάτω τύπο:

$$4 \text{ min}/^\circ \cdot (L_{st} - L_{local})$$

1.3.1.3. Εξίσωση χρόνου

Το πρόβλημα που προκύπτει από χρονικές παρεκκλίσεις λόγω τις συγκεκριμένης ημέρας του έτους που μελετάμε επιλύεται μέσα από τη χρήση μίας εμπειρικής εξίσωσης χρόνου E η οποία συνυπολογίζει την χρονική διάρκεια που χρειάζεται ο ήλιος για να ολοκληρώσει την τροχιά του στην ουράνια σφαίρα. Οι αποκλίσεις στη διάρκεια αυτή οφείλονται τόσο στην κάλυψη άνισων αποστάσεων κατά την περιστροφή της Γης γύρω από τον ήλιο, όσο και στην κλίση του άξονα της Γης ως προς το επίπεδο περιστροφής.

Δύο από τις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού της εξίσωσης χρόνου E είναι οι εξής:

$$\text{A) } E = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot B) - 0.04089 \cdot \sin(2 \cdot B))$$

Όπου $B = \frac{(DoY-1) \cdot 360^\circ}{364}$, η γωνία ημέρας που εξαρτάται από την ημέρα του έτους Day of Year και σχετίζεται με την πρώτη μέρα του έτους.

$$\text{B) } E = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot B) - 7.35 \cos B - 1.5 \sin B$$

Όπου $B = \frac{(DoY-81) \cdot 360^\circ}{364}$, η γωνία ημέρας που εξαρτάται από την ημέρα του έτους Day of Year και σχετίζεται με την εαρινή ισημερία στην 21^η Μαρτίου.

Όπως είναι φανερό η δεύτερη εξίσωση είναι πολύ πιο εύχρηστη από την πρώτη αφού είναι αρκετά πιο απλή και εύκολα αποδεικνύεται ότι δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την πρώτη, επομένως μπορούμε να χρησιμοποιούμε την δεύτερη εξίσωση για τους υπολογισμούς μας.

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραμέτρους που αναφέραμε, καταλήγουμε στον παρακάτω συνοπτικό τύπο για τον υπολογισμό της T_{solar} για δεδομένη T_{local} .

$$T_{solar} = T_{local} + E + 4 \text{ min}/^\circ \cdot (L_{st} - L_{local})$$

Να σημειωθεί ότι για την T_{local} λαμβάνεται υπόψη μόνο η χειμερινή ώρα και όχι η θερινή αφού αυτή θεωρείται απλά σύμβαση.

1.3.2. Ηλιακή απόκλιση δ

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα είναι η ηλιακή **απόκλιση δ** , η γωνία δηλαδή μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου ισημερινού και της νοητής ευθείας μεταξύ Γης και ήλιου. Όπως ήδη ειπώθηκε η γωνία δ θα είναι $23,45^\circ$ στο θερινό ηλιοστάσιο και $-23,45^\circ$ στο χειμερινό ηλιοστάσιο ενώ θα μηδενίζεται στις δύο ισημερίες. Υπάρχουν δύο τύποι που συνυπολογίζουν την επίδραση της ημέρας του έτους στη γωνία δ . Αυτοί είναι:

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

και

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \cdot \sin \left[\left(\frac{360^{\circ}}{365} \right) \cdot (DoY - 81) \right]$$

Και οι δύο τύποι βασίζονται στο γεγονός ότι κατά την εαρινή ισημερία (DoY=81) η γωνία δ μεγιστοποιείται και γι' αυτό το λόγω ο πρώτος χρησιμοποιεί τον όρο 284 δηλαδή όσες μέρες έχουν περάσει από την εαρινή ισημερία μέχρι την πρώτη Γενάρη, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί τον όρο 81 δηλαδή όσες μέρες έχουν περάσει από την πρώτη Γενάρη μέχρι την εαρινή ισημερία. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ των τύπων.

1.3.3. Ωριαία Γωνία ω

Η τελευταία σημαντική γωνία την οποία θα χρησιμοποιήσουμε ώστε να προσδιορίσουμε πλήρως την τροχιά του ηλίου στην ουράνια σφαίρα είναι η **ηλιακή γωνία ώρας ω** . Η ω ορίζεται ως η γωνία εκείνη ανάμεσα στη νοητή γραμμή που ενώνει την εκάστοτε θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα με τον παρατηρητή και τη νοητή γραμμή που ενώνει τον παρατηρητή με το ζενίθ του ηλίου για τον κάθε τόπο.

Η ηλιακή γωνία ώρας θεωρείται μηδενική στην περίπτωση που ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της τροχιάς του (ηλιακό μεσημέρι). Οι γωνίες ω που δημιουργούνται ανατολικότερα του ηλιακού μεσημεριού θεωρούνται αρνητικές, ενώ εκείνες που δημιουργούνται δυτικά του ζενίθ μετά το ηλιακό μεσημέρι θεωρούνται θετικές.

Επειδή η Γη κινείται με $15^{\circ}/h$, υπολογίζουμε την εκάστοτε γωνία ω μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται μέχρι το ηλιακό μεσημέρι ή που έχει περάσει από το ηλιακό μεσημέρι με τη βοήθεια της ηλιακής ώρας και καταλήγουμε στον παρακάτω απλό τύπο:

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

Με βάση αυτή τη θεώρηση το ηλιακό μεσημέρι αποτελεί τον “άξονα συμμετρίας” της τροχιάς που διαγράφει ο Ήλιος στον ουράνιο θόλο. Δηλαδή η ελλειπτική τροχιά του στην ουράνια σφαίρα από την ανατολή μέχρι το ηλιακό μεσημέρι όπου $\omega = 0^\circ$, επαναλαμβάνεται συμμετρικά ως τη δύση, με άξονα συμμετρίας μία κάθετη στο επίπεδο νοητή ευθεία που ξεκινά από το ζενίθ. Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα το ύψος ηλίου β θα είναι το ίδιο μία ώρα πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι.

1.3.4. Οι Συντεταγμένες του Ήλιου

Με βάση όλα όσα προαναφέρθηκαν μπορούμε πλέον να καταλήξουμε στις εξισώσεις που θα προσδιορίζουν τις συντεταγμένες (β, Z) της θέσης του Ήλιου: $\sin \beta = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega$

και για το αζιμούθιο Z ισχύει:
$$\cos Z = \frac{\sin \beta \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \beta \cdot \cos \varphi}$$

1.3.5. Ανατολή, δύση και ηλιοφάνεια

Απαραίτητες για τον υπολογισμό των συντεταγμένων (β, Z) θεωρούνται και οι ώρες ανατολής, δύσης και ηλιοφάνειας για τον κάθε τόπο. Οι ώρες αυτές διαφέρουν τόσο ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες όσο και με την συγκεκριμένη ημέρα του χρόνου για την οποία έγινε η μελέτη. Η χρησιμότητά τους σε ένα διάγραμμα β - Z είναι αυτονόητη αφού προσδιορίζουν την έναρξη και τη λήξη των υπολογισμών μας όπως επίσης και το πλήθος τους.

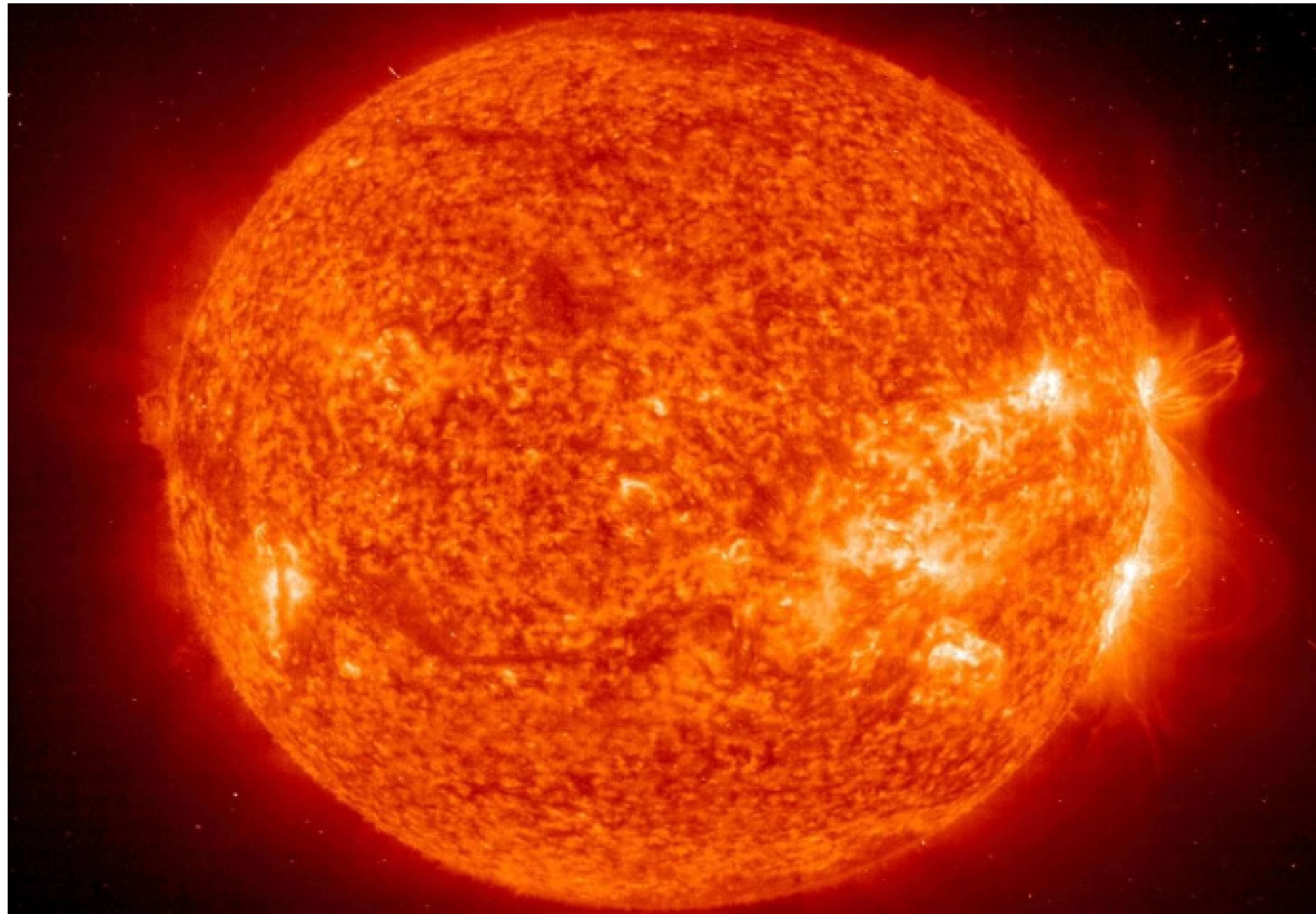
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ : ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2. Εισαγωγή

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά της γης, η οποία αποτελεί τεράστια πηγή ενέργειας, και περιγράφονται βασικές έννοιες που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία. Γίνεται επίσης αναφορά στην ηλιακή ενέργεια και τα πλεονέκτηματά της.

2.1. Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος είναι ένα αστέρι μάζας $2 \times 10^{30} \text{ Kg}$, ακτίνας 700.000 Km , ηλικίας 5×10^9 χρόνια και προοπτική ζωής άλλων 5 περίπου δισεκατομμυρίων χρόνων. Η επιφανειακή του θερμοκρασία είναι περίπου 5.800 K και η εσωτερική $\sim 150.000.000 \text{ K}$. Ο ήλιος συνίσταται σε ένα μείγμα αερίων με κύριο συστατικό το Υδρογόνο. Μέσα από μια πληθώρα αυτοσυντηρούμενων θερμοπυρηνικών αντιδράσεων μετατροπής του υδρογόνου σε ήλιο (He) στο εσωτερικό του ουράνιου αυτού σώματος, η μάζα μετατρέπεται σε ενέργεια και εκπέμπεται στο σύμπαν κυρίως μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αλλά και δευτερευόντως με σωματιδιακή μορφή. Το συγκεκριμένο ουράνιο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατώνται από βαρυτικές δυνάμεις. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο εκλύεται ενέργεια ίση με $1.67 \times 10^5 \text{ Kwh}$.



Σχ. 2.1 : Ο Ήλιος

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διατήρηση της ζωής στο ηλιακό μας σύστημα. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στη γη είναι μόλις το 1 προς 1 δισεκατομμύριο της συνολικής ενέργειας που παράγει ο ήλιος και ισούται κατά προσέγγιση με 420 τρισεκατομμύρια κιλοβατώρες. Είναι γεγονός ότι ο ήλιος είναι η πιο πλούσια και ανεξάντλητη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, το πλειοψηφικό ποσοστό της οποίας παραμένει ανεκμετάλλευτο.

Εκτιμάται ότι :

- Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης σε μια μέρα είναι 10 – 15 χιλιάδες φορές περισσότερο από την συνολική παγκόσμια ημερήσια κατανάλωση.
- Μέσα σε μια ώρα η γη λαμβάνει αρκετή ηλιακή ενέργεια ώστε να καλύψει όλες τις ενεργειακές της ανάγκες για περίπου ένα έτος.
- Η ηλιακή ενέργεια που πέφτει πάνω σε ένα τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο ισοδυναμεί ενεργειακά με ένα βαρέλι πετρέλαιο.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για :

A) την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας , τότε χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και στην συνέχεια μηχανικής ενέργειας, μέσω ατμοστρόβιλων. Η μηχανική ενέργεια μπορεί έπειτα να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω της ηλιακής ενέργειας.

B) την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με 2 τρόπους : με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει την συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα, κυρίως για την θέρμανση νερού και την μετατροπή του σε ατμό, ώστε να κινήσει ατμοστρόβιλους. Αντιθέτως, στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές, τα συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών.

2.1.1. Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας

- Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη. Είναι ανανεώσιμη πηγή που δεν πρόκειται να εξαντληθεί για τα επόμενα 5 δισεκατομμύρια χρόνια
- Με την χρήση της ηλιακής ενέργειας περιορίζεται η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η ηλιακή ενέργεια συμβάλλει στην μείωση της παραγωγής των αερίων του θερμοκηπίου
- Η ηλιακή ενέργεια είναι αποθηκεύσιμη
- Η τοποθέτηση ενός ηλιακού συστήματος παραγωγής ενέργειας (ιδιαίτερα φωτοβολταϊκής εφαρμογής) είναι αρκετά απλή, με μικρή συντήρηση να απαιτείται και με δυνατότητα 25 και άνω ετών ζωής.
-

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μηχανήματα μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι σε γενικές γραμμές αθόρυβα
- Το κόστος παραγωγής δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ηλιακή τεχνολογία είναι εδώ και χρόνια ώριμη, δοκιμασμένη και αξιόπιστη.

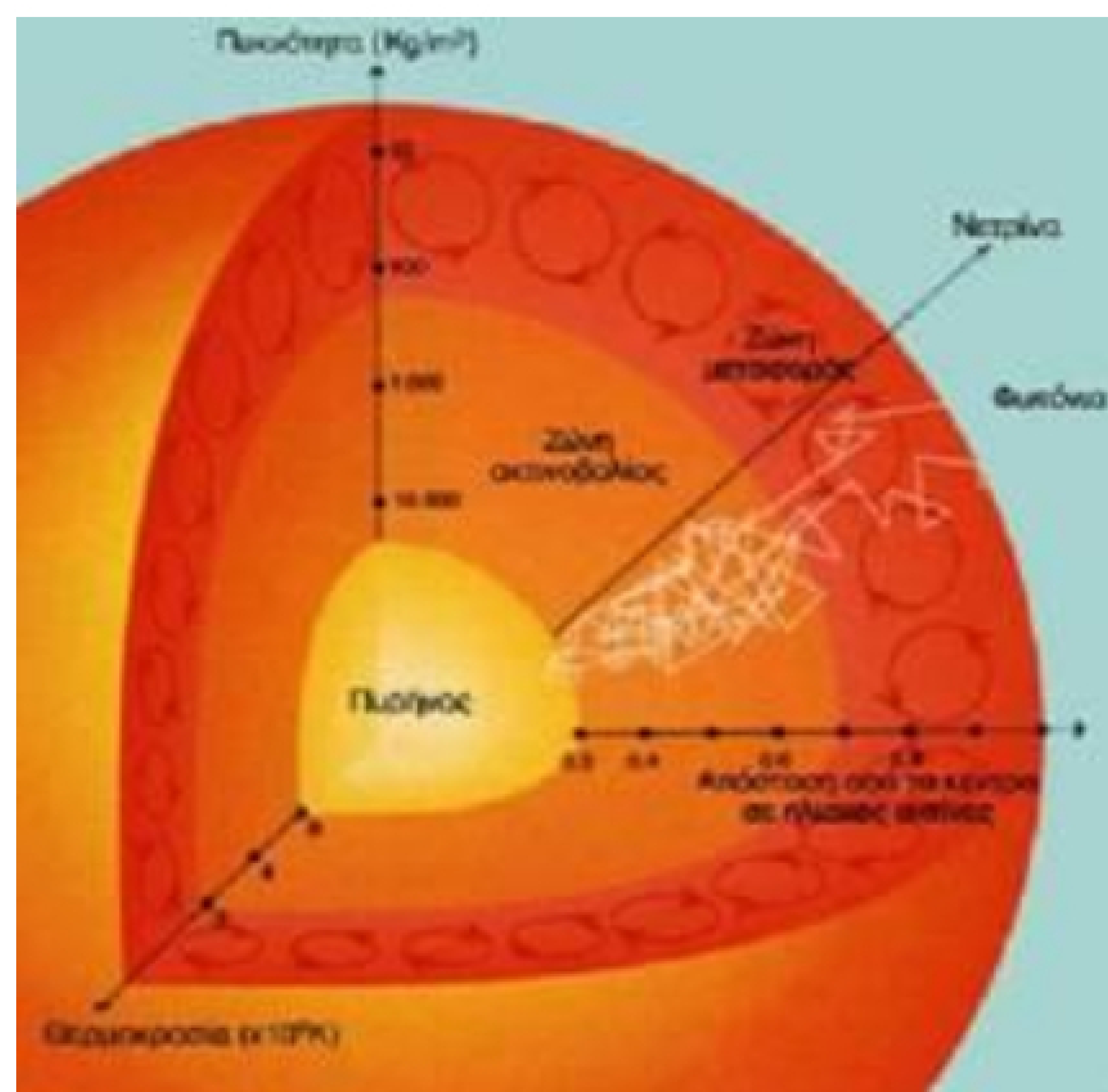
2.2. Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας

Ο Ήλιος, αποτελείται από μία τεράστια μάζα θερμής αέριας ύλης. Η μάζα του Ήλιου, η οποία είναι πολλές χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή της Γης, δεν είναι στάσιμη αλλά στον πυρήνα του Ήλιου γίνονται συνεχώς χημικές αντιδράσεις, πιο σημαντική από τις οποίες είναι η διαρκής πυρηνική σύντηξη. Ο πυρήνας του καταλαμβάνει μια έκταση από το κέντρο του Ήλιου μέχρι περίπου το ένα τέταρτο της ακτίνας του αστεριού. Στο επίκεντρο, η βαρύτητα τραβά όλη τη μάζα του Ήλιου προς τα μέσα και δημιουργεί πολύ έντονη πίεση. Αυτή η πίεση είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει τη σύντηξη των ατομικών μαζών. Οι θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται γι' αυτό το λόγο στον Ήλιο είναι τεράστιες.

Η ακριβής διαδικασία που συμβαίνει στο εσωτερικό του Ηλίου είναι μία αλυσιδωτή αντίδραση σύντηξης πρωτονίων που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ατόμων ηλίου (He) και ταυτόχρονα την έκλυση τεράστιων ποσών ενέργειας υπό τη μορφή ακτίνων Χ, ακτίνων γ και νετρίνων.

Οι ακτίνες αυτές μεταφέρονται στην επιφάνεια του Ηλίου είτε με τη μορφή ακτινοβολίας, είτε μέσω θερμού υλικού συναγωγικά. Στην πρώτη περίπτωση κάθε φωτόνιο που δημιουργείται ταξιδεύει περίπου ένα μικρόμετρο πριν απορροφηθεί από κάποιο παρακείμενο μόριο φυσικού αερίου. Αυτή η απορρόφηση προκαλεί τη θέρμανση των γειτονικών

ατόμων και εκ νέου εκπέμπει ένα νέο φωτόνιο που ταξιδεύει και πάλι σε μικρή απόσταση πριν απορροφηθεί από κάποιο άλλο άτομο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαρκώς, πολλές φορές πριν το φωτόνιο να μπορέσει τελικά να εκπεμφθεί στην επιφάνεια του ήλιου. Σε ένα φωτόνιο είναι δυνατόν να χρειαστούν 100.000 χρόνια ή 10^{25} απορροφήσεις και εκ νέου εκπομπές για να κάνει το ταξίδι από τον πυρήνα του ήλιου στην επιφάνειά του. Το ταξίδι από την επιφάνεια του ήλιου στη Γη διαρκεί περίπου 8 λεπτά. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το μήκος κύματός της ακτινοβολίας το οποίο είναι αρχικά πολύ μικρό, αυξάνεται, μειώνοντας έτσι την ενέργεια που μεταφέρεται μέσω αυτής. Στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνει χώρα ο “κύκλος συναγωγής” ο οποίος περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμού υλικού στην επιφάνεια του Ήλιου μέσω θερμών διαύλων. Το θερμό υλικό ψύχεται μεταφέροντας τη θερμότητα στην επιφάνεια και στη συνέχεια επιστρέφει πίσω στον πυρήνα ώστε να επαναθερμανθεί. Μέσα από όλη αυτή τη διαδικασία ο Ήλιος παράγει τα τεράστια ποσά ενέργειας, μέρος των οποίων φτάνουν στη Γη.



Σχ. 2.2 : Τα στρώματα του Ηλίου

2.3. Πυκνότητα ισχύος και φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας

Η μέση ετήσια πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας της γης έχει μέση τιμή 1367 W/m^2 και ορίζεται ως ηλιακή σταθερά.

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

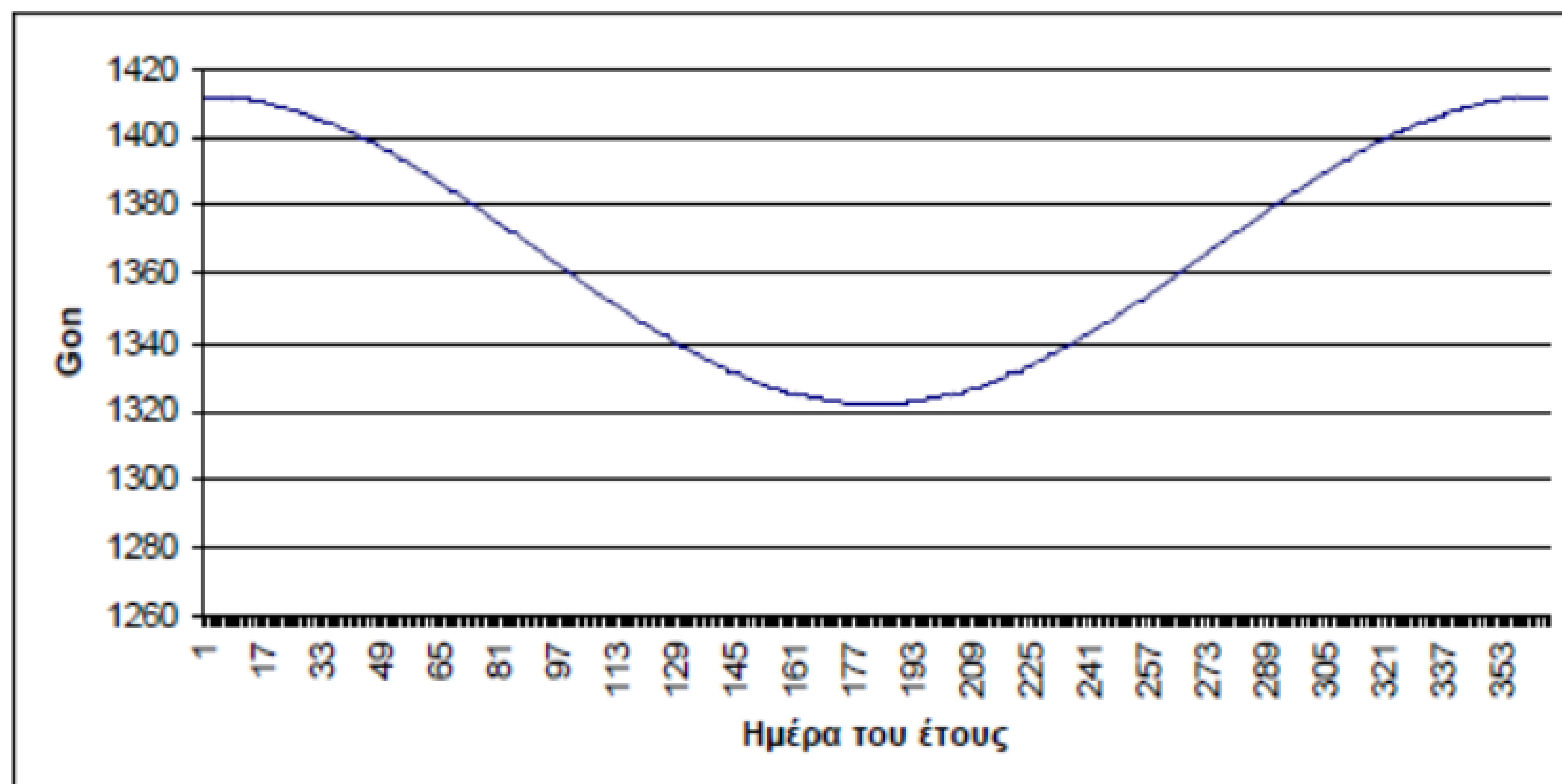
Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της ετήσιας μεταβολής της ηλιακής σταθεράς:

$$G_{om} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot DOY}{365} \right]$$

Όπου: DOY οι ημέρες του έτους $DOY = 1, 2, 3, \dots, 365$

G_{on} : η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας, κάθετο στις ακτίνες του ήλιου

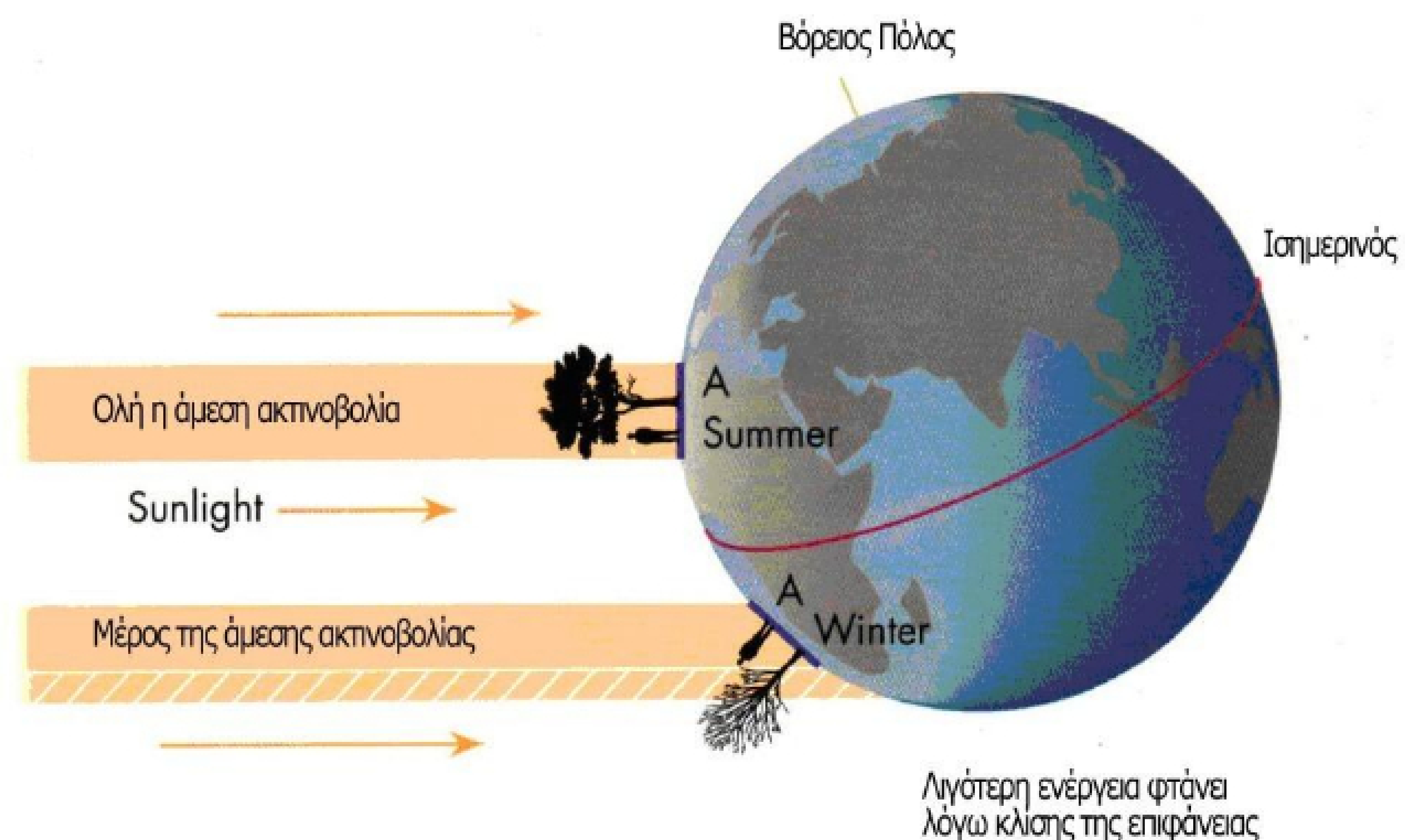
Υπολογίζουμε την τιμή του G_{on} σε ένα φύλλο excel για κάθε ημέρα του έτους και παραθέτουμε το παρακάτω διάγραμμα το οποίο δείχνει την μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους.



Σχ. 2.3: Διακύμανση πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους

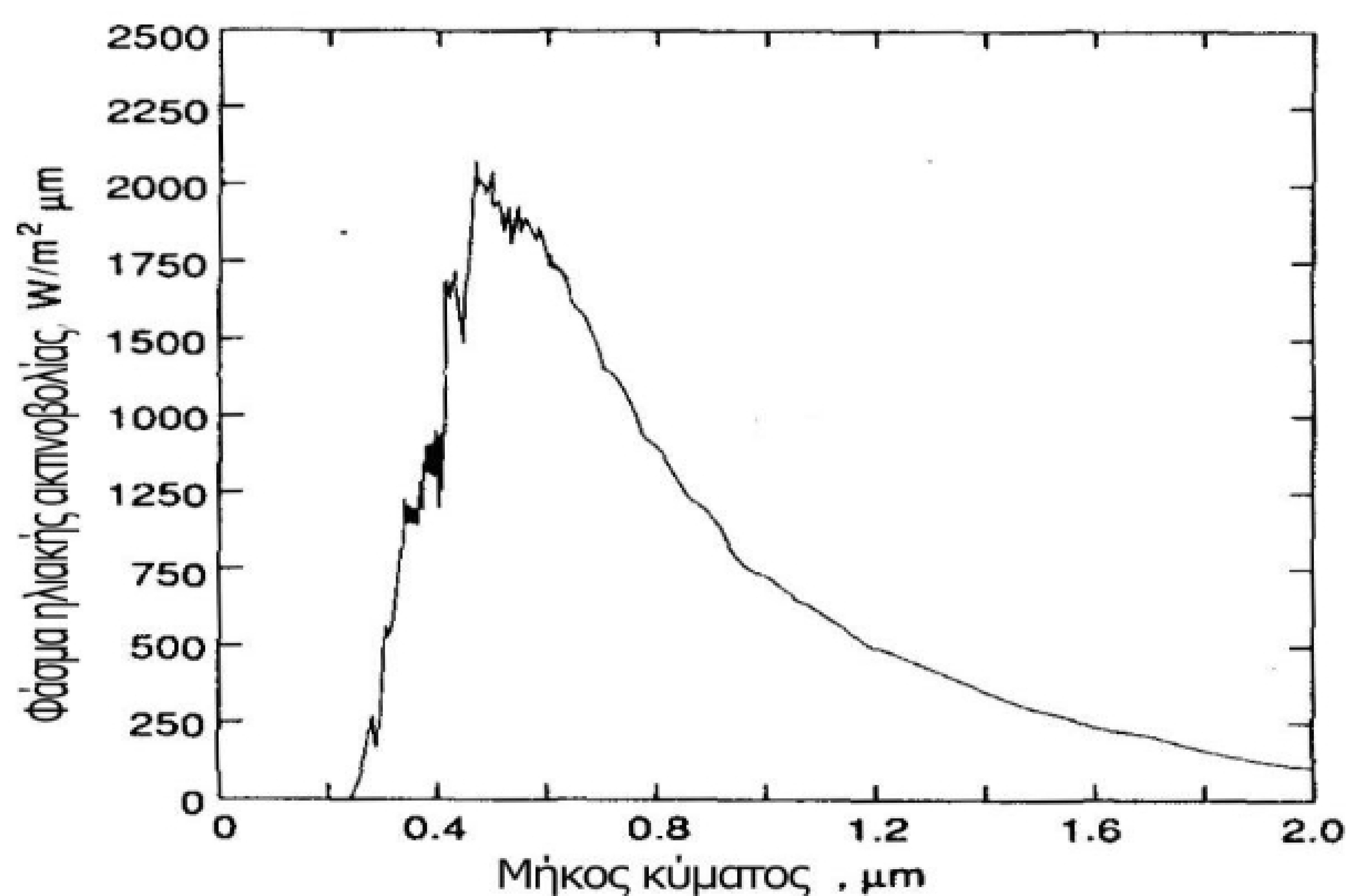
Φαίνεται από το διάγραμμα ότι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της την 1^η Ιανουαρίου. Αυτό συμβαίνει διότι τότε η απόσταση ήλιου-γης είναι η μικρότερη από όλη τη διάρκεια του έτους. Όμως, για μία οριζόντια επιφάνεια τοποθετημένη στο βόρειο ημισφαίριο η ακτινοβολία που προσπίπτει είναι μικρότερη το χειμώνα και αυτό οφείλεται στην κλίση της γης

Η κλίση της γης έχει ως αποτέλεσμα η μεγαλύτερη ενέργεια από τον ήλιο να φτάνει όταν οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα στην περιοχή την οποία εξετάζουμε. Για το βόρειο ημισφαίριο αυτό συμβαίνει τους καλοκαιρινούς μήνες.



Σχ. 2.4 Μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με την εποχή.

Εκτός από την ηλιακή σταθερά είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε και τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα. Το σχήμα 2.5 μας δίνει την πληροφορία αυτή στο μέσο της απόστασης ηλίου-γης.



Σχ. 2.5 : Κατανομή φάσματος ακτινοβολίας στο μέσο της απόστασης ηλίου-γης

Η ακτινοβολία του ήλιου που καταλήγει στην επιφάνεια της γης μπορεί να φθάσει τα $1.200 \text{ W} / \text{m}^2$ (εξαρτάται από την περιοχή στην οποία αναφερόμαστε), όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ, και καλύπτει το φάσμα $0,3 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$ με αιχμή (peak) στα $0,5 \mu\text{m}$. Η ακτινοβολία αυτή χαρακτηρίζεται ως μικρού μήκους κύματος και συμπεριλαμβάνει το ορατό φάσμα ($0,4 - 0,7 \mu\text{m}$), συγκεκριμένα δε κατανέμεται ως εξής:

- (i) υπεριώδης ακτινοβολία ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$) με ποσοστό εμφάνισης 9%.
- (ii) ορατό φως ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$) με ποσοστό 45%.
- (iii) υπέρυθρη ακτινοβολία ($\lambda > 0,7 \mu\text{m}$) με ποσοστό 46%.

2.4. Βασικές έννοιες που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε ορισμούς και βασικές έννοιες που είναι χρήσιμοι στην μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας.

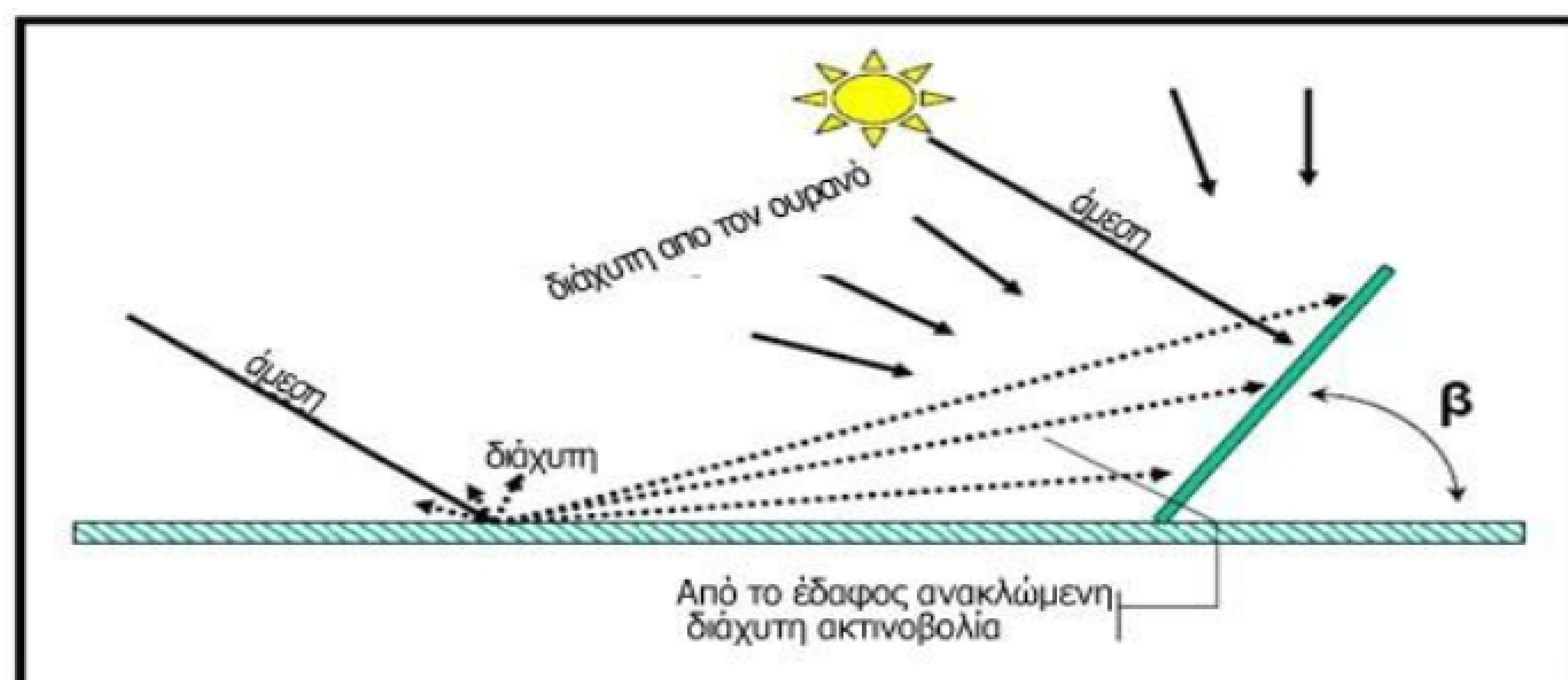
Αέριος μάζα : Το ποσοστό που αναλογεί από το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας το οποίο διασχίζει η δέσμη της άμεσης ακτινοβολίας ως

προς το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας που θα περνούσε εάν ο ήλιος ήταν στο ζενίθ του (δηλ., άμεσα από πάνω). Κατά συνέπεια στη στάθμη της θάλασσας, $\mu = 1$ όταν είναι ο ήλιος στο ζενίθ, και οι $\mu = 2$ για μια γωνία ζενίθ 60° . Για γωνίες ζενίθ από 0 έως 70° στη στάθμη της θάλασσας, η αέριος μάζα είναι κατά προσέγγιση :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

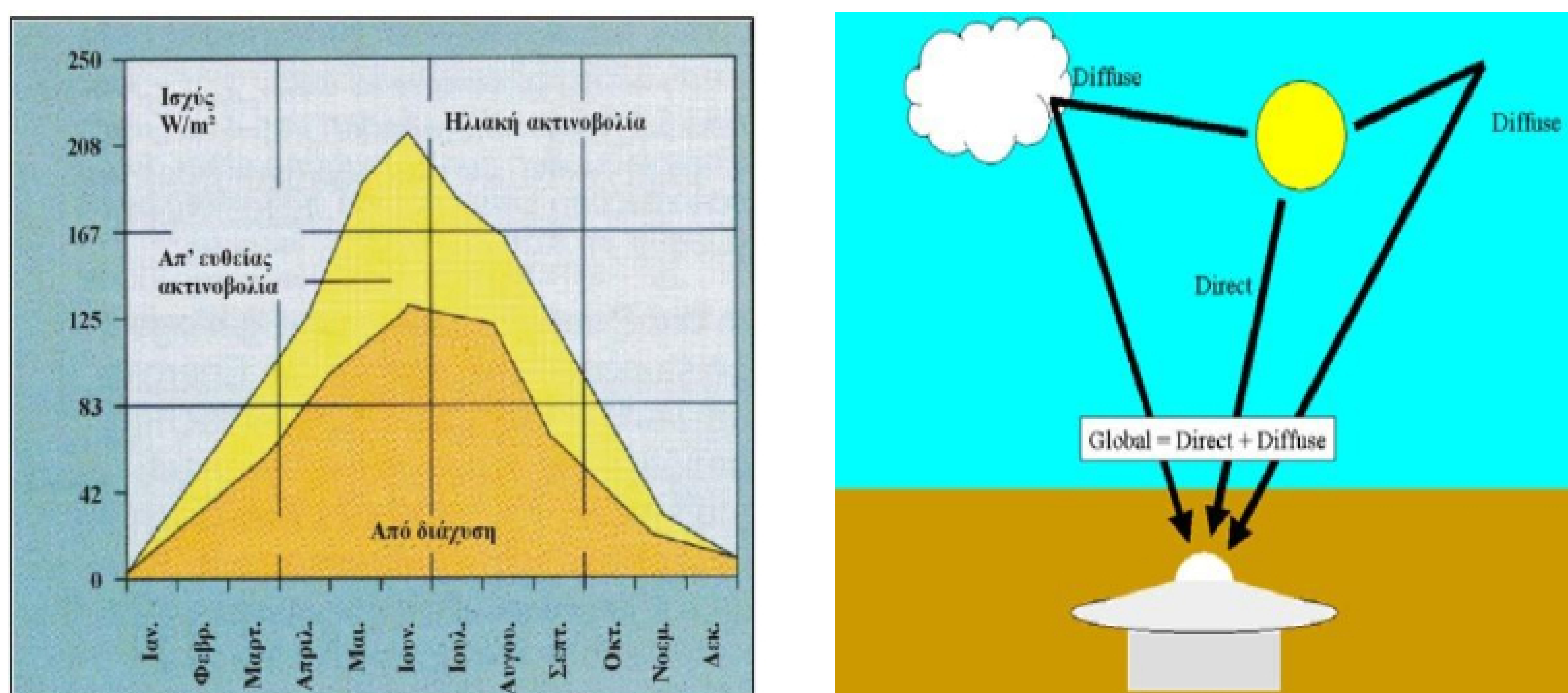
Άμεση ακτινοβολία: η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απ' ευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα. (Η άμεση ακτινοβολία αναφέρεται συχνά ως direct ή beam ακτινοβολία)

Διάχυτη ακτινοβολία: η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα (η σύμβαση που χρησιμοποιούμε διακρίνει τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία από την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα, αναφέρεται και ως diffuse ακτινοβολία.)



Σχ. 2.6 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία.

Συνολική Ακτινοβολία: (total solar radiation) Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια.



Σχ. 2.7: Αριστερά η κατανομή της μέσης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο αναλυμένη σε άμεση και διάχυτη ακτινοβολία. Δεξιά μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα υπόκειται απορρόφηση και σκέδαση (οι κυριότεροι απορροφητές είναι: τα νέφη, οι υδρατμοί, το όζον και το διοξείδιο του άνθρακα). Η ακτινοβολία που σκεδάζεται είναι η διάχυτη και ένα μέρος της επιστρέφει στο διάστημα. Η ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος χωρίς σκέδαση είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας G: Μονάδα W/m^2 ή mW/cm^2 , είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Το σύμβολο G χρησιμοποιείται για να εκφράσει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακή ακτινοβολία, με τους κατάλληλους δείκτες για την άμεση, τη διάχυτη ή τη συνολική ακτινοβολία.

Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας: μονάδα J/m^2 η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου χρόνου, συνήθως μια ώρα ή μια ημέρα.

Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας όρος που ισχύει συγκεκριμένα για την ακτινοβολία ηλιακής ενέργειας. Το σύμβολο X χρησιμοποιείται για την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία για μια ημέρα. Το σύμβολο I χρησιμοποιείται για την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία για μια ώρα (ή άλλη περίοδο, εάν καθορίζεται). Τα σύμβολα X και I μπορούν να αντιπροσωπεύσουν την άμεση, τη διάχυτη ή τη συνολική ακτινοβολία. και μπορούν να υπολογιστούν σε επιφάνειες οποιουδήποτε προσανατολισμού.

Χρησιμοποιούμε δείκτες στα I στο G και το X για να καθορίσουμε σε ποιο μέγεθος αναφέρονται. Συγκεκριμένα:

o : αναφέρεται στην ακτινοβολία έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα

b : αναφέρεται στην άμεση ακτινοβολία

d : αναφέρεται στη διάχυτη ακτινοβολία

T : αναφέρεται στην ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια

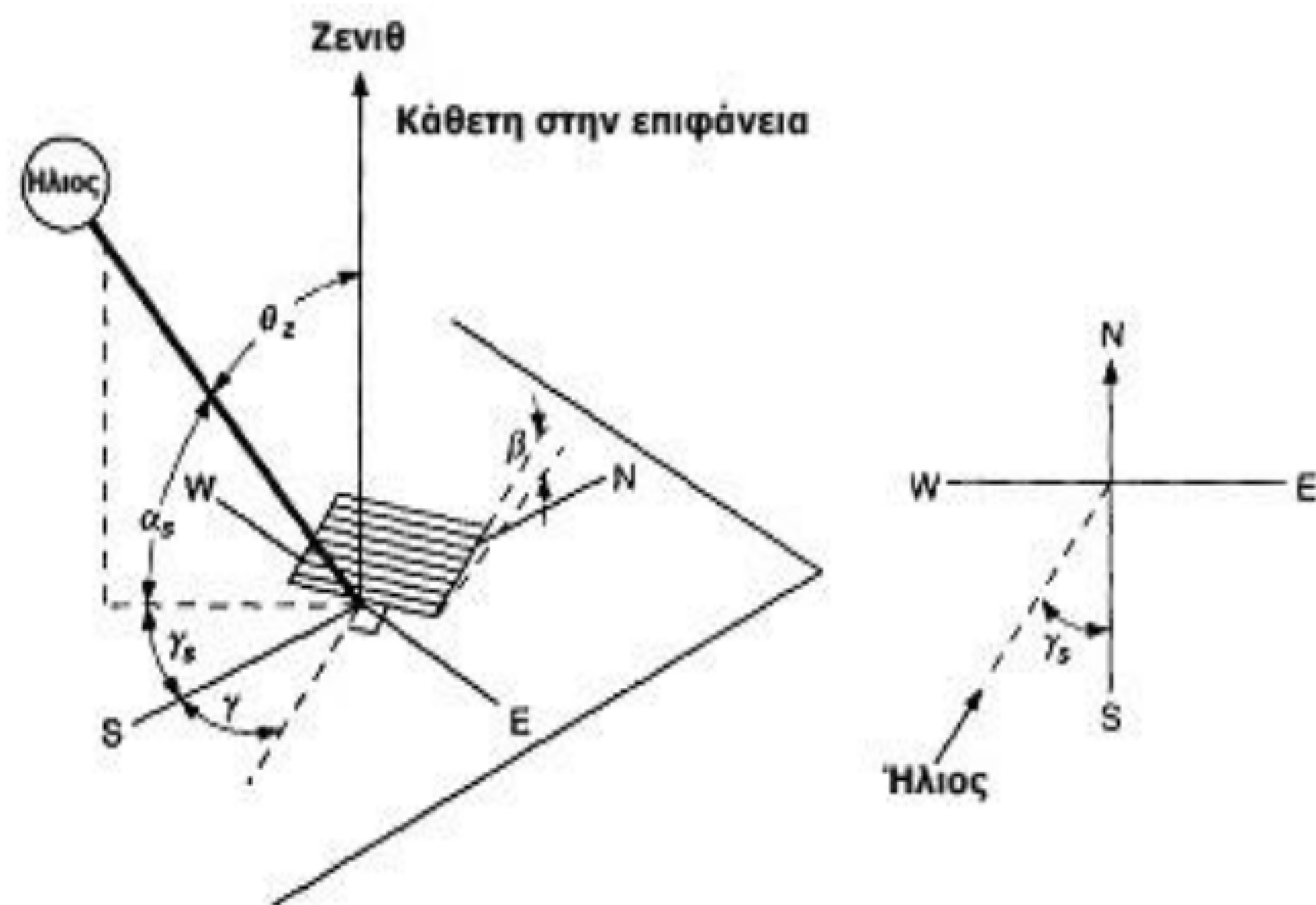
n : σε μια επιφάνεια κάθετη στην κατεύθυνση της διάδοσης

Εάν ούτε το T ούτε το n εμφανίζονται, η ακτινοβολία αναφέρεται σε οριζόντιο επίπεδο.

Ηλιακή ώρα (solar time): η ηλιακή ώρα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό όλων των γωνιών που αναφέρονται στον ήλιο και διαφέρει από την τοπική ώρα λόγω της κλίσης του άξονα της γης και της εκλειπτικής τροχιάς της γύρω από τον ήλιο.

2.5. Κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας

Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ μίας επιφάνειας οποιουδήποτε προσανατολισμού σχετικά με τη γη, οποιαδήποτε στιγμή (είτε η επιφάνεια είναι σταθερή είτε κινούμενη σε σχέση με τη γη) και η εισερχόμενη άμεση ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η θέση του ήλιου σχετικά με την επιφάνεια, μπορεί να περιγραφεί από διάφορες γωνίες [Benford και Bock (1939)]. Μερικές από τις γωνίες υποδεικνύονται στο σχήμα 2.8



Σχήμα 2.8 Γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ μίας επιφάνειας και του ηλίου.

Ο υπολογισμός της κατεύθυνσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο και απαιτείται όταν επιθυμούμε να υπολογίσουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε μία επιφάνεια στη γη. Αν γνωρίζουμε τη σχετική θέση του ηλίου και της επιφάνειας που μελετάμε τότε μπορούμε να υπολογίσουμε και την ακτινοβολία που δέχεται η επιφάνεια μας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι σημαντικότερες, για την παρούσα εργασία, γωνίες που περιγράφουν τη θέση ηλίου- γης στη διάρκεια μίας ημέρας καθώς και το πώς αυτές υπολογίζονται.

Χρησιμοποιούμε πολικό σύστημα συντεταγμένων με τη θέση του ηλίου να προσδιορίζεται πλήρως από την απόσταση του από τη γη και τις γωνίες γ_s και θ_z (σχήμα 2.8) όπως αυτές ορίζονται παρακάτω. (Ως απόσταση του ηλίου θεωρούμε τη μέση απόσταση από τη γη σε ένα έτος και εκφράζεται στις εξισώσεις μέσω της ηλιακής σταθεράς G_{sc}).

γ_s : η γωνιακή απόκλιση της άμεσης ακτινοβολίας από το νότο σε οριζόντιο επίπεδο, ανατολικά έχει αρνητικές τιμές ενώ δυτικά θετικές.

θ_z : γωνία ζενίθ η γωνία που σχηματίζει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία με την κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο.

Η θέση της επιφάνειας χαρακτηρίζεται από τις γωνίες:

ϕ : γεωγραφικό πλάτος, γωνιακή θέση νότια ή βόρεια του ισημερινού, βόρεια θετική

λ_{loc} : γεωγραφικό μήκος, η γωνιακή θέση ανατολικά ή δυτικά του μεσημβρινού αναφοράς.

γ : η οριζόντια γωνία που σχηματίζει η προβολή της καθέτου της επιφάνειας, στο οριζόντιο επίπεδο, με τον τοπικό μεσημβρινό (δηλαδή τον νότο), ανατολικά έχει αρνητικές τιμές ενώ δυτικά θετικές. ($-180 < \gamma < 180$). (σχήμα 2.8).

β : η γωνία που σχηματίζει η επιφάνειά μας με το οριζόντιο επίπεδο.

Για τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια απαιτείται ο υπολογισμός των γωνιών:

θ : γωνία πτώσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια, σε σχέση με την κάθετο στην επιφάνεια (για οριζόντια επιφάνεια ισούται με θ_z)

δ : η γωνιακή απόκλιση του ηλίου το ηλιακό μεσημέρι (δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στον τοπικό μεσημβρινό) με αναφορά στον ισημερινό, βόρεια θετική.

Ω : η ωριαία γωνία του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης στον άξονά του.

Υπάρχει ένα σύνολο εξισώσεων που συνδέει όλες τις παραπάνω γωνίες.

Η σχέση που συνδέει τη γωνία πτώσης της άμεση ακτινοβολίας, θ , σε μία επιφάνεια σε σχέση με τις υπόλοιπες γωνίες είναι:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \\ &+ \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned}$$

και

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Στην περίπτωση της οριζόντιας επιφάνειας η γωνία θ είναι ίση με τη γωνία ζενίθ του ηλίου και η τιμή της πρέπει να είναι μεταξύ 0 και 90 όταν ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα. Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$\beta = 0 \text{ και } \theta = \theta_z$$

Οι παραπάνω σχέσεις θα γίνουν :

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

και

$$\theta = \theta_z$$

Όμως για $\beta = 0$ (οριζόντια επιφάνεια) και $\theta_z = 90$ (δηλαδή η ώρα του ηλιοβασιλέματος) η σχέση γίνεται:

$$\cos \omega_s = - \frac{\sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = - \tan \varphi \cdot \tan \delta$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ : ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

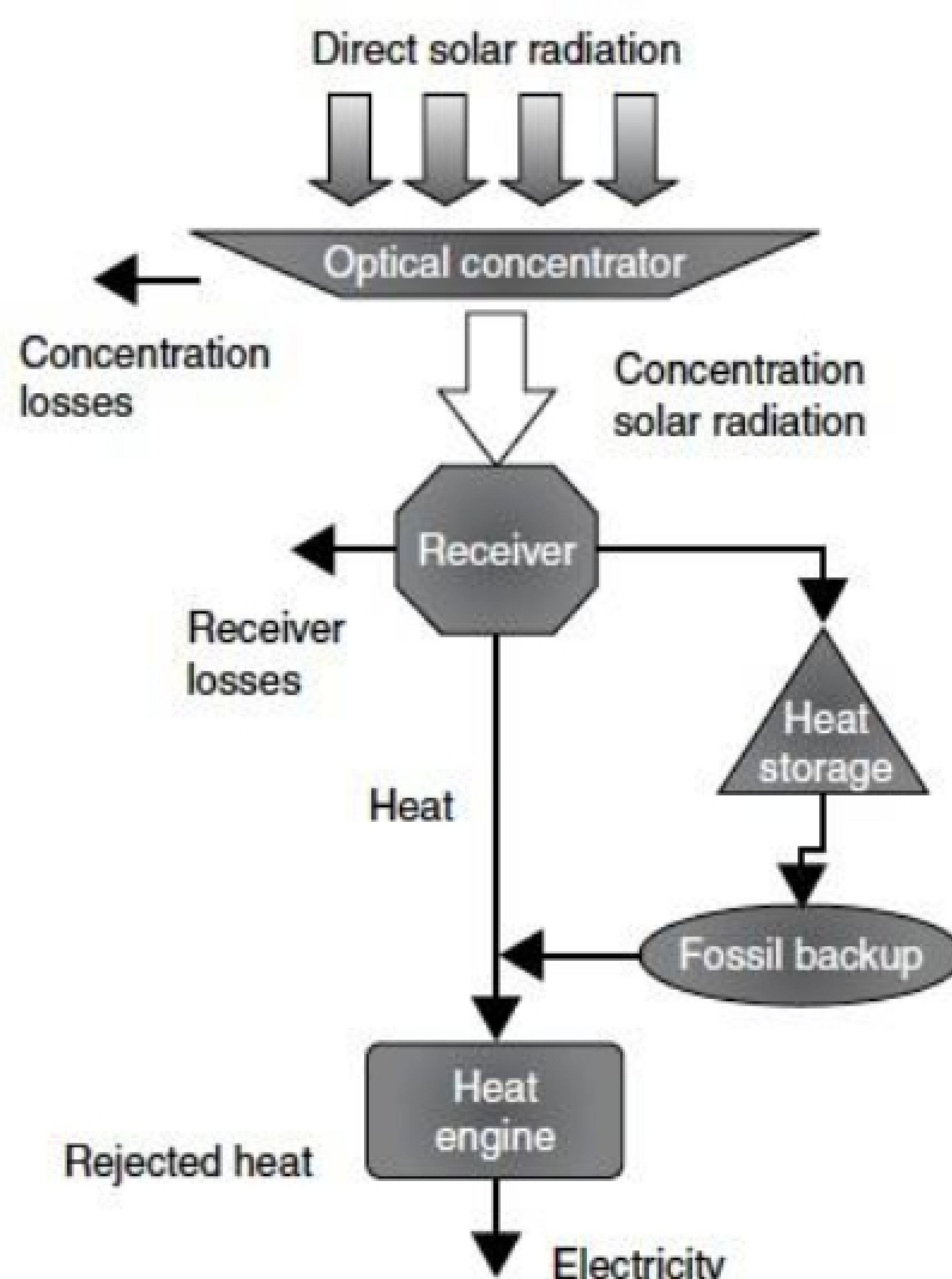
3. Εισαγωγή

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα. Γίνεται αναφορά στις βασικές τους αρχές λειτουργίας όπως επίσης και στις τέσσερις τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες σήμερα χρησιμοποιούνται. Τέλος, περιγράφονται οι μηχανισμοί παρακολούθησης του Ήλιου, οι οποίοι μας επιτρέπουν να μεγιστοποιούμε την συγκέντρωση της Ηλιακής Ακτινοβολίας στη διάρκεια μίας ημέρας.

3.1. Γενική περιγραφή

Η ηλιακή ακτινοβολία, όπως αναλύθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, αποτελεί μια εξαιρετική πηγή ενέργειας, υψηλής θερμοκρασίας και εξέργειας, στο σημείο παραγωγής της (τον Ήλιο). Παρόλα αυτά η ροή της μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό μέχρι να φτάσει στη Γη. Συγκεκριμένα, από τον Ήλιο εκπέμπεται ενέργεια με ρυθμό $3.8 \cdot 10^{23}$ kW από τα οποία μόνο περίπου $1.8 \cdot 10^{14}$ kW κατακρατούνται από τον πλανήτη μας. Από αυτά, περίπου το 60% καταλήγει στην επιφάνεια της Γης, δηλαδή περίπου $1.08 \cdot 10^{14}$ kW. Το υπόλοιπο ανακλάται πίσω στο διάστημα και απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Με βάση την ενέργεια που εκπέμπεται ανά m^2 , ο Ήλιος εκπέμπει $63 \text{ MW} / m^2$ ενώ η διαθέσιμη ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης είναι μόλις $1 \text{ MW} / m^2$. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να απαλειφθεί σε συνθήκες υψηλής ηλιακής ροής με την χρήση συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική, με απαραίτητη προϋπόθεση για τις ηλιακές θερμοηλεκτρικές μονάδες υψηλής θερμοκρασίας να κάνουν χρήση οπτικών συσκευών. Ένα

απλοποιημένο μοντέλο της συγκεντρωτικής ηλιακής θερμικής ενέργειας (Concentrated Solar Power (CSP)) απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχ.3.1 : Διάγραμμα ροής για τυπικό ηλιακό σταθμό

Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός CSP συνδυάζει την μεγάλη οπτική επιφάνεια, την συγκομιδή της ακτινοβολίας και την συγκέντρωσή της σε έναν ηλιακό δέκτη. Ο ηλιακός δέκτης έχει υψηλή διαπερατότητα και μιμείται όσο το δυνατόν περισσότερο τις επιδόσεις ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος. Στην περίπτωση της ηλιακής θερμικής μονάδας παραγωγής ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται σε ένα θερμικό ρευστό σε θερμοκρασία αρκετά υψηλή ώστε να τροφοδοτήσει μια θερμική μηχανή ή μια τουρμπίνα που παράγει ηλεκτρισμό.

Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα για κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία των $800 - 900 \text{ W/m}^2$ ενώ η ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία ποικίλλει από $1600 - 2800 \text{ kWh/m}^2$ ανάλογα με τον συγκεκριμένο χώρο. Το ποσοστό αυτό προϋποθέτει $2 - 3,5$ χιλιάδες ετήσιες ώρες

πλήρους φορτίου. Στην συνέχεια η ενέργεια μετρέπεται σε θερμική και από εκεί σε ηλεκτρική όπου αποθηκεύεται με διάφορους μηχανισμούς σε ειδικές αποθήκες.

Επιπλέον πλεονεκτήματα των CSP είναι:

- Έχουν αποδεδειγμένες δυνατότητες, για παράδειγμα οι 354 MW εγκαταστάσεις κοίλων στην Καλιφόρνια από το 1985 έχουν αποδείξει εξαιρετική απόδοση, διαθεσιμότητα, καθώς και σημαντική μείωση κόστους λειτουργίας.
- Είναι αρθρωτά, και συνεπώς κατάλληλα για μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις 100 MW.
- Μπορεί να αναπτυχθούν γρήγορα χρησιμοποιώντας εξ ολοκλήρου εγχώριους πόρους και την υπάρχουσα υποδομή.
- Είναι κατάλληλα για ανεξάρτητη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Έχουν αποδεδειγμένο δυναμικό για περαιτέρω μείωση του κόστους, συμπεριλαμβανομένου εκείνου που προκύπτει από τις οικονομίες κλίμακας, δηλαδή από τη μαζική παραγωγή του γυαλιού, χάλυβα, κλπ.

Τα CSP ξεχωρίζουν από τις άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική ή τα φωτοβολταϊκά, όσον αφορά το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και την ποιότητα της προμήθειας ενέργειας λόγω της προσαρμοστικότητας και διαθεσιμότητάς τους σχετικά με τη ζήτηση ενέργειας. Ακόμη και αν ο ήλιος είναι μια πηγή ενέργειας με διακοπές, τα CSP συστήματα προσφέρουν το πλεονέκτημα να είναι σε θέση λειτουργούν συνεχώς σε ένα προκαθορισμένο φορτίο. Τα θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν και συλλέγουν το περίσσειμα θερμότητας.

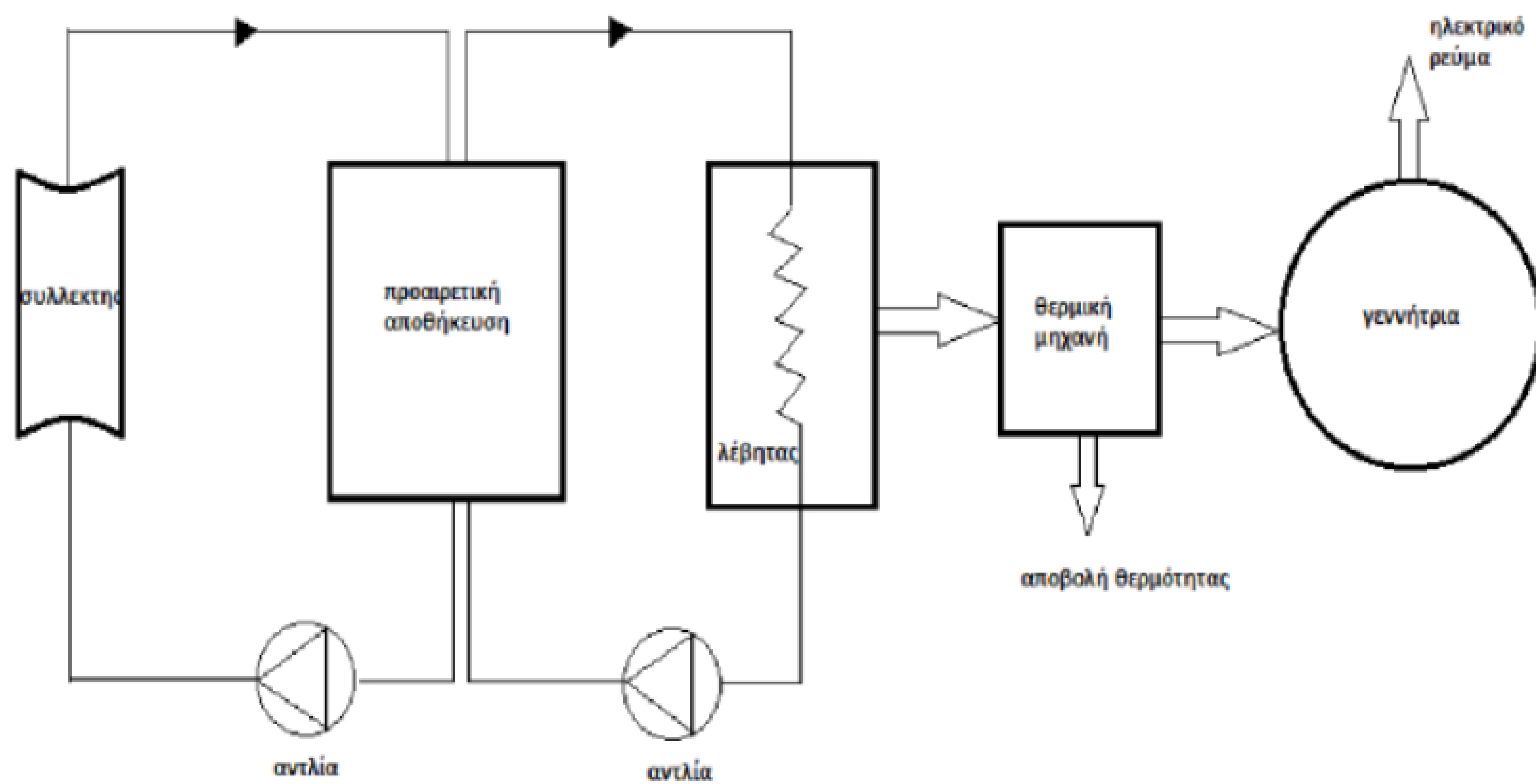
Το σύστημα θερμικής αποθήκευσης προμηθεύει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που απαιτείται από την τουρμπίνα μετά το ηλιοβασίλεμα ενώ η λειτουργία νύχτας εξασφαλίζεται από ορυκτά εφεδρικά καύσιμα.

Αυτή η δυνατότητα αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας θερμικής ενέργειας οδηγεί σε οικονομικά ανταγωνιστικές επιλογές σχεδιασμού, δεδομένου ότι μόνο το ηλιακό μέρος πρέπει να είναι μεγάλου μεγέθους. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα του συστήματος αποθήκευσης είναι πάνω από 95%.

3.2. Αρχές Λειτουργίας

Η διαδικασία της θερμικής ηλεκτροπαραγωγής πραγματοποιείται με τα παρακάτω βήματα:

- Συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλέκτη.
- Αύξηση, εφόσον γίνεται, της πυκνότητας ροής ακτινοβολίας (δηλαδή της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα δέκτη)
- Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή μετατροπή της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια μέσα στο δέκτη).
- Μεταφορά της θερμικής ενέργειας σε μια μονάδα μετατροπής της ενέργειας.
- Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική χρησιμοποιώντας μια θερμική μηχανή(π.χ. ατμοστρόβιλος).
- Μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει τη γενική αλυσίδα της ενεργειακής μετατροπής των ηλιακών θερμικών σταθμών παραγωγής.



Σχ.3.2 : Αλυσίδα μετατροπής ενέργειας της ηλιακής θερμικής ενέργειας

3.3. Συγκέντρωση ακτινοβολίας

Η συγκέντρωση της ακτινοβολίας είναι απαραίτητη, αν απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες από εκείνες που δημιουργούνται από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας περιγράφεται από τον δείκτη συγκέντρωσης ο οποίος ορίζεται με 2 τρόπους :

A) Ο λόγος συγκέντρωσης C προσδιορίζεται αποκλειστικά γεωμετρικά (C_{geom}), και περιγράφει την αναλογία της ηλιακής επιφάνειας ανοίγματος A_{ap} στην επιφάνεια απορρόφησης A_{abs} (εξ. 1).

Επομένως, ο λόγος συγκέντρωσης για έναν παραβολικό κούλο συλλέκτη με άνοιγμα πλάτους 5,8 m και ένα σωλήνα απορρόφησης διαμέτρου 70 mm είναι περίπου 26.

$$C = C_{geom} = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} \quad (1)$$

B) Ο βαθμός συγκέντρωσης C ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας ροής ακτινοβολίας στο επίπεδο διάφραγμα προς τις αντίστοιχες τιμές G_{abs} του απορροφητήρα (C_{flux} , Εξίσωση (2)).

$$C = C_{flux} = \frac{G_{ap}}{G_{abs}} \quad (2)$$

Με βάση το δεύτερο θεμελιώδες θεώρημα της θερμοδυναμικής τα μέγιστα δυνατά ποσοστά συγκέντρωσης δύο διαστάσεων (παραβολικά κοίλου τύπου) και τριών διαστάσεων (π.χ. paraboloids) συγκεντρωτών μπορεί να προκυψουν με την χρήση μιας "γωνίας αποδοχής" $2 \cdot \theta_a$ που απαιτείται. Η γωνία αυτή καλύπτει ολόκληρη τη γωνιακή κλίση του πεδίου των ηλιακών ακτινών ώστε να επικεντρωθούν στον συλλέκτη, χωρίς να χρειάζεται να μετακινηθεί ο συλλέκτης ή μέρος αυτού.

Για μονοαξονικούς συγκεντρωτές (όπως τα παραβολικά κοίλα) για παράδειγμα, η μέγιστη συγκέντρωση $C_{ideal,2D}$ για μια δεδομένη αποδεκτή ημιγωνία θ_a υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3):

$$C_{ideal,2D} = \frac{1}{\sin \theta_a} \quad (3)$$

Για διαξονικό συλλέκτη ο μέγιστος λόγος συγκέντρωσης $C_{ideal,3D}$ υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4):

$$C_{ideal,3D} = \frac{1}{(\sin \theta_a)^2} \quad (4)$$

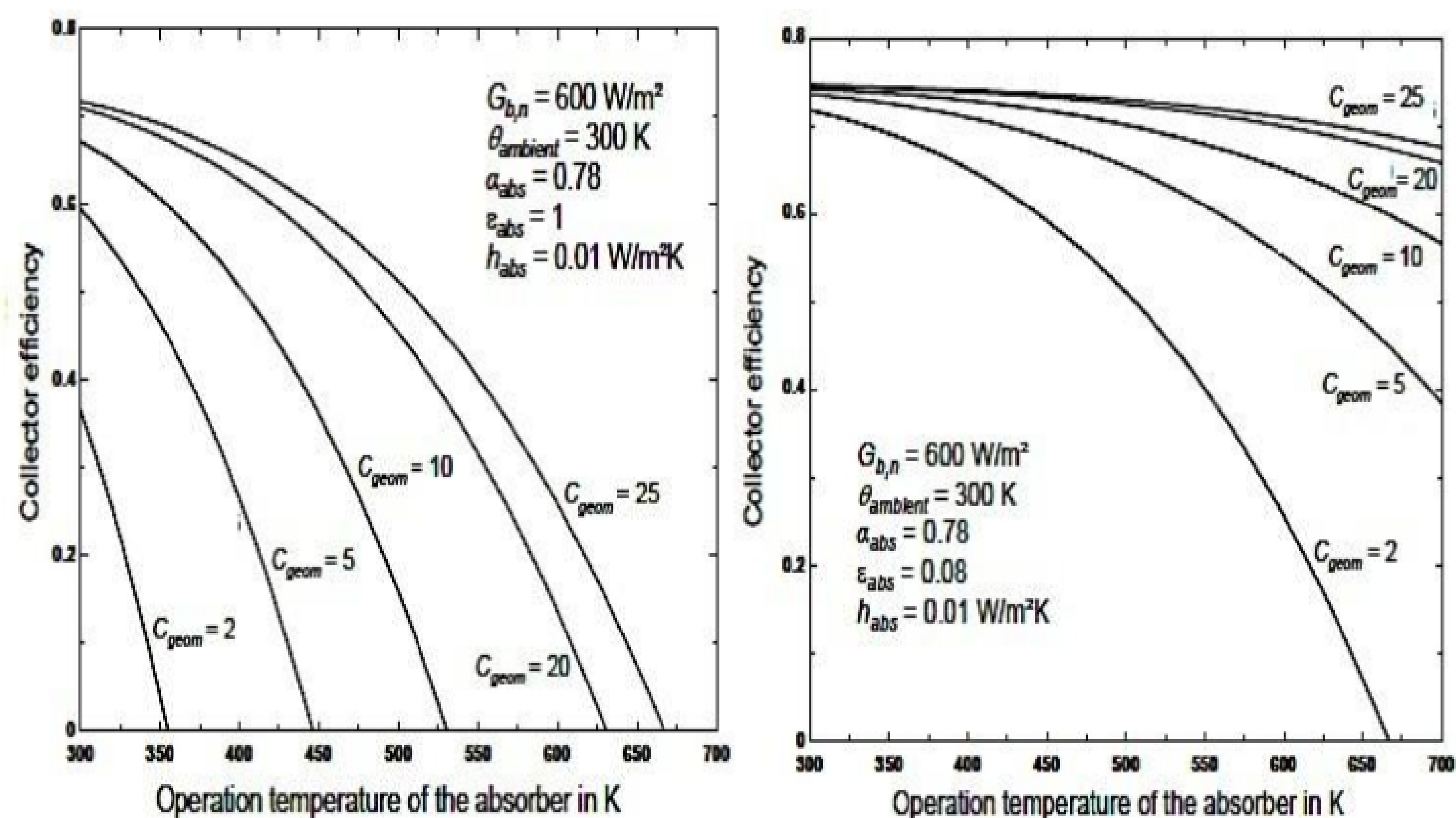
Επειδή στην επιφάνεια της γης, η αποδεκτή γωνία $2 \cdot \theta_a$ για τον ήλιο είναι μεταξύ $0,53^\circ$ ή $9,3 \text{ mrad}$, οι μέγιστοι ιδανικοί παράγοντες συγκέντρωσης που καθορίζονται για δισδιάστατες γεωμετρίες είναι 213 (γραμμή εστίασης παραβολικών κοίλων) και 45.300 για τριδιάστατες (σημείο εστίασης) γεωμετρίες.

Πρακτικά όμως, η γωνία αποδοχής του συμπυκνωτή πρέπει να αυξηθεί έτσι ώστε να επιτευχθεί η σημαντική μείωση της πραγματικής αναλογίας

συγκέντρωσης. Αυτό οφείλεται στα εξής:

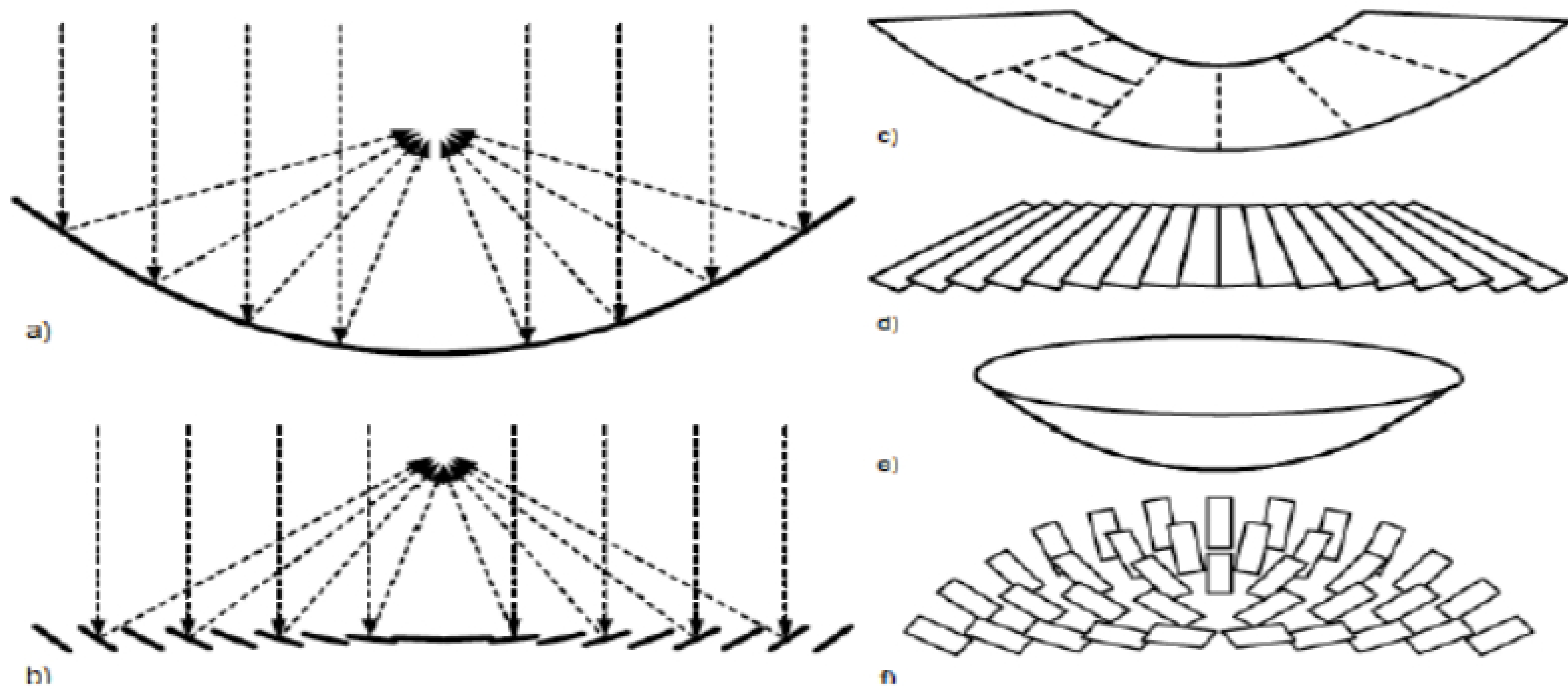
- Σφάλματα παρακολούθησης, γεωμετρικές αντανάκλασεις καθώς και ατελή προσανατολισμό της γωνίας αποδοχής του δέκτη που είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την γωνία άνοιγματος του ήλιου.
- Τα κατοπτρα που τοποθετούνται είναι ατελή και επεκτείνουν την ανακλώμενη δέσμη.
- Η ατμοσφαιρική σκέδαση επεκτείνει την αποτελεσματική γωνία ανοίγματος του ήλιου πέρα από την ιδανική γεωμετρική ημιγωνία αποδοχής που είναι περίπου 4,7 mrad.

Η συγκέντρωση της ακτινοβολίας στοχεύει στην αύξηση της θερμοκρασίας του απορροφητήρα και κατά συνέπεια της εξέργειας της συμπυκνωμένης θερμότητας. Επιπλέον, οι επιφάνειες απορροφητήρα μπορεί να είναι μικρότερες λόγω της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι επομένως ευκολότερο να μειωθούν οι αναπόφευκτες θερμικές απώλειες λόγω της ακτινοβολίας, της μεταφοράς και της θερμότητας της αγωγιμότητας. Στην περίπτωση της απορρόφησης των παραβολικών συλλεκτών, αυτό επιτυγχάνεται εκκενώνοντας τους σωλήνες επένδυσης και επικαλύπτοντας τον απορροφητήρα με υλικό χαμηλού συντελεστή εκπομπής στο σχετικό μήκος του. Το Σχήμα 3.3 δείχνει τον αντίκτυπο που έχει ο βαθμός συγκέντρωσης στην απόδοση του συλλέκτη η_{Coll} σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία του απορροφητήρα θ_{abs} για δύο διαφορετικούς συντελεστές εκπομπών ϵ του απορροφητήρα (αριστερό $\epsilon_{\text{abs}} = 1$, δεξί $\epsilon_{\text{abs}} = 0,08$).



Σχ.3.3: Συσχέτιση της απόδοσης του συλλέκτη (ηcoll) και της θερμοκρασίας λειτουργίας του απορροφητήρα (θabs) καθώς και του γεωμετρικού C_{geom} συντελεστή συγκέντρωσης (αριστερά για έναν απορροφητήρα με $\epsilon_{abs} = 1$ (μαύρο σώμα'), αριστερά για $\epsilon_{abs} = 0,08$, μια πρακτικά εφικτή τιμή. Για λόγους απλότητας ένας σταθερός συντελεστή τομής (δηλαδή η αναλογία της προσπίπτουσας με την ανακλώμενη ακτινοβολία) του 0,96 έχει θεωρηθεί. Το $G_{b,n}$ περιγράφει την άμεση ακτινοβολία, το α_{abs} είναι ο συντελεστής απορρόφησης του απορροφητήρα, και H_{abs} είναι ο συντελεστής θερμικής απώλειας του απορροφητήρα)

Δεδομένου ότι η άμεση συγκέντρωση με περίθλαση ή διάθλαση μπορεί να γίνει μόνο από άκαμπτο, διαφανές υλικό (π.χ. φακούς από γυαλί), που χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος, αυτή η επιλογή δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα για οικονομικούς λόγους. Οι αντανακλώμενες επιφάνειες αποδείχθηκαν πιο αποδοτικές από άποψη κόστους, δεδομένου ότι αντανακλούν την σχεδόν παράλληλη προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω από ένα ορισμένο σημείο ή γραμμή. Τα προφίλ των παραβολών παρουσιάζουν αυτές τις ιδιότητες (Σχήμα 3.4a). Για να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός συγκέντρωσης, δηλαδή ο λόγος επιφάνειας του ανακλαστήρα στην επιφάνεια απορρόφησης να είναι πολύ υψηλός για οικονομικούς λόγους, τα προφίλ έχουν σχεδιαστεί ως στερεά περιστροφής (Σχήμα 3.4e). Ως εναλλακτική λύση, το προφίλ αντανάκλασης μπορεί επίσης να εξωθηθεί, έτσι ώστε το επίκεντρο δεν θα είναι σημείο αλλά γραμμή. Οι δυνατότητες αυτές περιγράφονται στο σχήμα. 3.4c.



Σχ. 3.4: προφίλ παραβολών για τη συγκέντρωση ακτινοβολίας

- a) το προφίλ με παραβολή της διαδρομής των ακτίνων,
- b) προφίλ παραβολής (Fresnel) με διαδρομή των ακτίνων κατά διαστήματα
- c) και d) προφίλ διέλασης από τα προφίλ a) και b)
- e) και f) προφίλ στερεάς περιστροφής των a) και b)

Όσο πιο επίπεδη η παραβολή, τόσο πιο μακρινό είναι το κεντρικό σημείο από την κορυφή της παραβολής. Σε σύγκριση με το απότομο προφίλ της παραβολής, τα επίπεδα παράβολα χαρακτηρίζονται από το χαμηλό ποσοστό της επιφάνειας ανακλαστήρα προς το άνοιγμα της επιφάνειας (δηλαδή της επιφάνειας συλλέκτη). Έτσι η κατανάλωση του ειδικού υλικού μειώνεται. Ως εναλλακτική λύση, τμηματικά παραβολικά προφίλ που εφαρμόζονται αναφέρονται επίσης ως προφίλ Fresnel. Τα προφίλ της παραβολής υποδιαιρούνται σε μικρότερα τμήματα ίδιας κλίσης στο ίδιο σημείο με το προφίλ, ενώ βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Λόγω της δέσμευσης της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτινοβολίας η αποτελεσματικότητα της αντανάκλασης (δηλαδή η αναλογία της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του ανοίγματος και της συμπυκνωμένης ακτινοβολίας) είναι γενικά χαμηλότερη από ό, τι για τα προφίλ παραβολής. Το Σχήμα 3.4d δείχνει σχηματικές παραστάσεις, όπως τα τμήματα προφίλ διέλασης προφίλ το σχήμα 3.4f περιέχει μια σχηματική παράσταση της περιστροφής στερεών.

Η περιστροφή των προφίλ παρουσιάζει το πλεονέκτημα των υψηλότερων συντελεστών συγκέντρωσης και ως εκ τούτου υψηλότερων

θερμοκρασιών λειτουργίας. Ωστόσο, οι συγκεντρωτές δύο αξόνων παρακολούθησης του ηλίου απαιτούν μεγαλύτερες τεχνικές προσπάθειες. Τα συστήματα γραμμικής εστίασης που απαιτούν μόνο ένα άξονα παρακολούθησης οδηγούνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και αποδόσεις λειτουργίας.

Επίσης, τα συγκροτήματα είναι εξοπλισμένα με περιστροφικά παραβολικά συστήματα που αναφέρονται ως δίσκοι-μηχανές ή παραβολικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις με τμήματα συστημάτων περιστροφής όπως οι πύργοι ηλιακής ενέργειας (λόγω της εστίασης που γίνεται σε πύργο). Στην περίπτωση της γραμμικής εστίασης μονάδων διέλασης εξοπλισμένων με παραβολικά συστήματα είναι οι κυλινδροπαραβολικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής ή οι γραμμικοί σταθμοί συλλέκτη Fresnel.

Πέρα από τις οπτικές ιδιότητες του υλικού που εφαρμόζεται για τον ανακλαστήρα, η βελτίωση της αποτελεσματικότητας σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τη γεωμετρία των ανακλαστήρων και την ακρίβεια του συστήματος παρακολούθησης του ηλίου. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται κυρίως οπτικές μέθοδοι μέτρησης για την αξιολόγηση της ποιότητας συγκεντρωτή και την απόδοσης.

Τυπικοί παράγοντες συγκέντρωσης και παράμετροι των ηλιακών τεχνολογιών που εφαρμόζονται στους συλλέκτες συγκέντρωσης συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

	Solar tower	Dish/Stirling	Parabolic trough	Fresnel reflector	Solar pond	Solar up-draft tower
Typical capacity in MW	30 – 200	0.01 – 1 ^a	10 – 200 ^c	10 – 200 ^c	0.2 – 5	30 – 200 ^c
Real capacity in MW	10	0.025	80	0.3 ^d	5	0.05
Concentration factor	600 – 1,000	up to 3,000	50 – 90	25 – 50	1	1
Efficiency ^b in %	10 – 28	15 – 25	10 – 23	9 – 17 ^d	1	0.7 – 1.2
Operation mode	grid	grid/island	grid	grid	grid	grid
Development status ^e	+	+	++	0	+	+

^a by interconnection of many individual plants within a farm; ^b conversion of radiation energy into electrical energy, annual average is site-specific; ^c assuming a solar multiple of 1.0; ^d incorporated into a conventional power station; ^e 0 successful operation of demonstration plants, + successful continuous operation of demonstration plants, ++ commercial plants in operation.

Πίνακας 3.α : Συγκεντρωτικοί παράγοντες και τεχνικές παράμετροι των επιλεγμένων τεχνολογιών παραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας.

3.4. Απορρόφηση ακτινοβολίας

Όλα τα υλικά απορροφούν ένα μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία απορροφάται και λόγω αυτής τα άτομα του υλικού δονούνται και έτσι παράγουν θερμότητα.

Αυτή η θερμότητα, είτε μεταφέρεται στο απορροφητικό υλικό με θερμική αγωγιμότητα και απελευθερώνεται σε θερμική ακτινοβολία είτε επιστρέφει πίσω στην ατμόσφαιρα.

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελείται από το ορατό φως, δηλαδή το μέρος της ακτινοβολίας με τα βραχέα κύματα είναι κυρίαρχο. Η κατανομή της φωτεινότητας των διαφορετικών μηκών κύματος αντιστοιχεί περίπου σε εκείνο του μέλανος σώματος με θερμοκρασία περίπου 5.700K. Αντιθέτως, όσον αφορά τις θερμοκρασίες που σχετίζονται με ηλιακές θερμικές μονάδες (περίπου 100 έως 1.000 °C) τα όργανα εκπέμπουν κυρίως μεσαίου και μικρού κύματος ακτινοβολία (Νόμος του Wien).

Όταν παρατηρούμε μόνο μια μικρή περιοχή του φάσματος, οι συντελεστές απορρόφησης και της εκπομπής είναι πανομοιότυποι (νόμος του Kirchhoff). Ωστόσο, κατάλληλες "επιλεκτικές" επιστρώσεις εξασφαλίζουν ότι τα βραχέα κύματα φωτός του ήλιου απορροφούνται καλά, ενώ η (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολία θερμότητας αναστέλλεται. Τέτοια υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλούς συντελεστές απορρόφησης σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και από χαμηλούς συντελεστές εκπομπής ϵ_{abs} σε σχέση με την μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία της θερμότητας

3.5. Αποθήκευση θερμότητας με υψηλή θερμοκρασία

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια πηγή ενέργειας της οποίας η ένταση ποικίλλει λόγω της περιστροφής της γης (ημέρα/νύχτα) και των πραγματικών μετεωρολογικών επιρροών (σύνεφα, αερολύματα, κλπ.). Για την αντιστάθμιση αυτών των διακυμάνσεων χρησιμοποιούνται

συστήματα θερμικής αποθήκευσης. Τα μέσα αποθήκευσης διακρίνονται:

➤ Σε περίπτωση αποθήκευσης του μέσου μεταφοράς θερμότητας, αποθηκεύεται ενδιάμεσα σε θερμομονωτικά δοχεία. Αυτό σημαίνει ότι το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι ανέξοδα διαθέσιμο και έχει μεγάλο όγκο-ειδική θερμότητα για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Μέχρι σήμερα δοχεία με θερμικό έλαιο και λιωμένο αλάτι έχουν εφαρμοστεί, ωστόσο έχουν προγραμματιστεί συσσωρευτές νερού/ατμού.

Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου αποθήκευσης είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου μεταφοράς, η οποία μειώνεται μόνο από τις απώλειες θερμότητας της δεξαμενής αποθήκευσης (και έτσι είναι συνάρτηση της περιόδου αποθεματοποίησης, της επιφάνειας των εμπορευματοκιβωτίων και της μόνωσης).

➤ Σε περίπτωση μαζικής αποθήκευσης, το μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιεί ένα δεύτερο θερμικό υλικό υψηλής θερμοχωρητικότητας. Για το σκοπό αυτό μια καλή μεταφορά της θερμότητας (δηλαδή μεγάλες επιφάνειες και υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας) πρέπει να παρέχεται μεταξύ του θερμικού μέσου μεταφοράς και του υλικού αποθήκευσης, για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη θερμοκρασιακή διαφορά οδήγησης και να μειωθεί η επακόλουθη απώλεια εξέργειακής θερμότητας.

Οι μαζικές αποθήκες εφαρμόζονται εάν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πάρα πολύ ακριβό (Π.χ. συνθετικό λάδι μεταφοράς θερμότητας) ή είναι δύσκολο να αποθηκευτεί (π.χ. αέρας υποπίεσης).

Για μαζικές αποθήκες εφαρμόζονται οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

- Θερμικό έλαιο/σκυρόδεμα
- Θερμικό έλαιο/λιωμένο αλάτι
- ατμός/λάδι-άμμος
- αέρας/κεραμικά τούβλα.

Αυτα τα συστήματα έχουν το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού κόστους υλικού αποθήκευσης. Ωστόσο, παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι εκτός από την κοινή απώλεια θερμότητας από την δεξαμενή αποθήκευσης μια απώλεια εξέργειας συμβαίνει κατά τη διάρκεια της διπλής μεταφοράς θερμότητας. κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση το υλικού αποθήκευσης.

➤ Μέσα σε δεξαμενές αποθήκευσης με υλικό αλλαγής φάσης, όπου ατμός συμπυκνώνεται ισόθερμα, έτσι ώστε ένα υλικό αποθήκευσης (π.χ. άλατα, όπως NaCl, NaNO₃, KOH) να είναι στερεοποιημένο/ισόθερμα λιωμένο. Και στην περίπτωση αυτή μία απώλεια εξέργειας συμβαίνει λόγω διπλής μετάδοσης της θερμότητας. Επιπλέον μια τέτοια αλλαγή φάσης υλικών εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή.

Ο πίνακας 2 δείχνει τα θερμοδυναμικά δεδομένα των επιλεγμένων μέσων αποθήκευσης. Μια χαρακτηριστική παράμετρος είναι ο συντελεστής θερμικής διείσδυσης a_{th} . Σύμφωνα με την εξίσωση(5) το a_{th} ορίζεται ως η ρίζα του γινομένου της θερμικής αγωγιμότητας λ , της πυκνότητα ρ_{SM} του μέσου αποθήκευσης και της ειδικής θερμοχωρητικότητας c_p :

$$a_{th} = \sqrt{\lambda \cdot \rho_{sm} \cdot c_p} \quad (5)$$

	Maximum temperature in °C	Thermal conductivity in W/(m K)	Density in kg/m ³	Specific heat capacity in J/(kg K)	Thermal penetration coefficient in Ws ^{1/2} /Km ²
Silicone oil	400	0.1	970 ^a	2,100	450
Mineral oil	300	0.12	900 ^a	2,600	530
Molten sodium chloride	450	0.57	927 ^b	1,500	890
Insulating bricks	700	0.9 ^c	Approx. 1,000 ^d	950	925
Reinf. concrete	400	1.5	2,500	850	1785
Construction steel	700	40	7,900	430	11,700

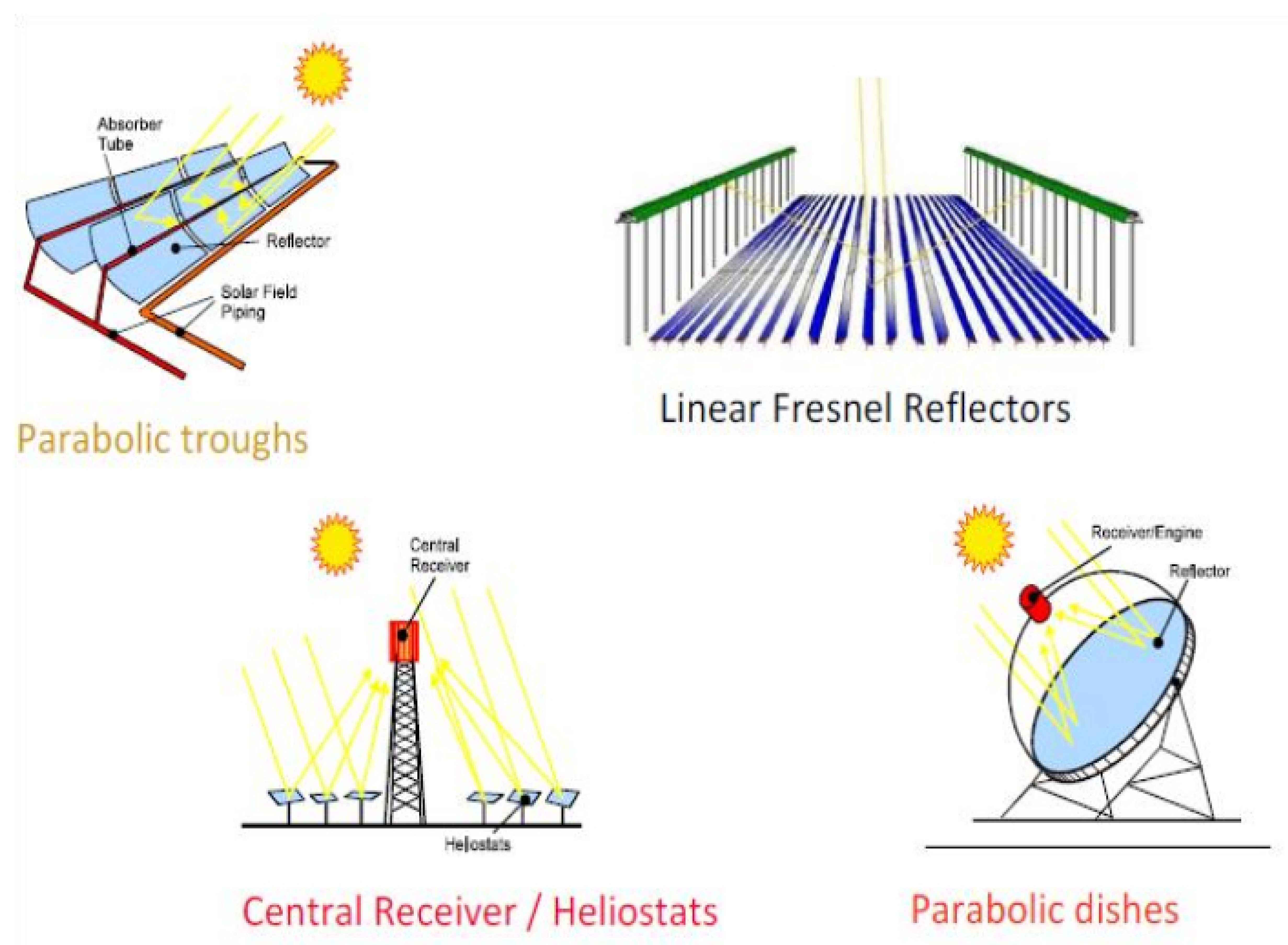
Spec. Specific; Reinf. Reinforced; Approx. approximately; ^a at 20 °C; ^b at melting point; ^c 0.18 to 1.6 W/(mK); ^d between approximately 800 to 1,200 kg/m³.

Πίνακας 3.β : Παράμετροι από διαφορετικά υλικά αποθήκευσης(πρότυπες τιμές)

3.6. Τεχνολογίες θερμικών ηλιακών σταθμών

Οι θερμικές ηλιακές μονάδες με τεχνολογίες οπτικής συγκέντρωσης είναι σημαντικά υποψηφίες για την μαζική παραγωγή του ηλιακού ηλεκτρικού ρεύματος που χρειάζεται μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Τέσσερις τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα χρησιμοποιούνται σε πιλοτικό και επίπεδο επίδειξης:

- Τα παραβολικά κοίλα (Parabolic Trough Collector, *PTC*)
- Οι ηλιακοί πύργοι ισχύος (Central Receiver Systems, *CRS*)
- Τα συστήματα (παραβολικού)δίσκου/μηχανής (Dish Engine, *DE*)
- Γραμμικοί Ανακλαστές Fresnel (Linear Fresnel Reflectors, *LFRs*)



Σχ. 3.5 : Τέσσερις τεχνολογίες ηλιακών συγκεντρωτών.

Τα παραβολικά κοίλα και οι Γραμμικοί Ανακλαστές Fresnel είναι δισδιάστατα συστήματα συγκέντρωσης στα οποία η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε μια εστιακή γραμμή από ένα μονοαξονικό κάτοπτρο. Είναι σε θέση να συγκεντρώνουν την ηλιακή ροή ακτινοβολίας 30 - 80 φορές και να θερμαίνουν το θερμικό υγρό

έως 393°C. Οι μονάδες μετατροπής της ενέργειας είναι γεννητριες που χρησιμοποιούν κύκλους Rankine με ισχύ 30 – 80 W.

Τα συστήματα πύργου είναι πιο περίπλοκα, δεδομένου ότι ο ηλιακός δέκτης ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου συγκεντρώνει το ηλιακό φως μέσω ενός μεγάλου παραβολοειδούς που διακριτοποιείται σε ένα πεδίο από ηλιοστάτες. Αυτός ο τρισδιάστατος συγκεντρωτής έχει άξονα ανεξάρτητου βαθμού ελευθερίας και απαιτεί ηλιοστάτες δισδιάστατης παρακολούθησης. Οι συντελεστές συγκέντρωσης είναι μεταξύ 200 και 1000 και τα μεγέθη της μονάδας είναι μεταξύ 10 και 200 MW. Ως εκ τούτου είναι κατάλληλοι για τις αγορές και την ενσωμάτωση στους προηγμένους θερμοδυναμικούς κύκλους. Μια μεγάλη ποικιλία των θερμικών ρευστών, όπως ο κορεσμένος ατμός, ο υπέρθερμος ατμός, τα τετηγμένα άλατα, ο ατμοσφαιρικός αέρας ή ο πεπιεσμένος αέρας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενώ οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 300°C και 1000°C.

Τέλος, τα συστήματα δίσκου/μηχανής είναι μικρές αρθρωτές μονάδες με αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανές Stirling ή Brayton που είναι στο επίκεντρο τους. Τα συστήματα αυτά είναι παραβολικοί τρισδιάστατοι συγκεντρωτές με υψηλές αναλογίες συγκέντρωσης(1000-4000) και μεγέθη μονάδων 5-25 kW. Χρησιμοποιούνται ως συνδεδεμένα συστήματα στο κεντρικό δίκτυο ή ως ανεξάρτητα συστήματα για παραγωγή ενέργειας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια σύγκριση των 4 αυτών συστημάτων, όπως δημοσιεύτηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency – IEA) το 2010.

τεχνο- λογία	οπτική απόδοση	ετήσια ηλιακή σε ηλεκτρική απόδοση	εδαφική κατοχή	ψύξη νερού(L/ MWh)	δυνατότητα αποθήκευσης	δυνατότητα υβριδοποίησης	ηλιακά καύσιμα	προοπτικές βελτίωσης
PTC _s	**	15%	μεγάλη	3 000 ή ξηρό	ναι αλλά όχι με DSG ακόμη	ναι	όχι	περιορισμένη
LFR	*	8-10%	μέτρια	3 000 ή ξηρό	ναι αλλά όχι με DSG ακόμη	ναι	όχι	σημαντική
Power towers	**	20-35%	μέτρια	2 000 ή ξηρό	εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού	ναι	ναι	πολυ σημαντι- κή
D/E	***	25-30%	μικρή	καθόλου	εξαρτάται από το σχεδιασμό του σταθμού	ναι σε λίγες περιπτώσεις	ναι	μέσω μαζικής παραγωγής

Πίνακας 3.γ : Σύγκριση CSP συστημάτων

*Ως οπτική απόδοση ορίζεται η ενέργεια που απορροφάται από τον δέκτη προς την ενέργεια που δέχεται ολόκληρη η συσκευή.

Οι ετήσιοι συντελεστές απόδοσης προκύπτουν μεταξύ τιμών κοντά στο 20% για συστήματα χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας και γύρω στο 70% για συστήματα με μεγάλες μονάδες αποθήκευσης. Με τα δεδομένα επενδυτικά κόστη, όλες οι CSP τεχνολογίες φαίνεται να χρειάζονται στρατηγική δημόσιας οικονομικής στήριξης για την ανάπτυξη της αγοράς. Σήμερα, το κόστος ενός CSP σταθμού παραγωγής υπολογίζεται δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό ενός συμβατικού σταθμού παραγωγής με ορυκτά καύσιμα, όμως βιομηχανικά roadmaps εκτιμούν ότι το κόστος θα μειωθεί κατά 60% πριν το 2025.

3.7. Μηχανισμός Παρακολούθησης του Ηλίου (tracking)

Στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας συνήθως χρησιμοποιείται κάποια κατάλληλη μορφή μηχανισμού παρακολούθησης, που προσανατολίζει τους συλλέκτες με βάση τη θέση του Ήλιου. Οι συλλέκτες στους συγκεντρωτικούς ηλιακούς σταθμούς παραγωγής δέχονται την άμεσα συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και επομένως πρέπει να είναι προσανατολισμένοι κατάλληλα για να συλλέγουν την βέλτιστη ποσότητα ενέργειας.

Όπως αναλύθηκε και στο 2^ο Κεφάλαιο, η ηλιακή ακτινοβολία έχει δύο συνιστώσες : την άμεση και την διάχυτη, με την πρώτη να περιέχει περίπου το 90% της ηλιακής ενέργειας και την δεύτερη το υπόλοιπο. Καθώς η μεγαλύτερη ποσότητα της ενέργειας, μεταφέρεται μέσω της άμεσης ακτινοβολίας, για να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα που συγκεντρώνεται/συλλέγεται απαιτείται να είναι άμεσα ορατός ο ήλιος στους συλλέκτες, για όσο το δυνατόν περισσότερη ώρα. Η ενέργεια που συνεισφέρει η άμεση ακτινοβολία, μειώνεται με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ του εισερχόμενου φωτός και του συλλέκτη. Επιπλέον, η ανάκλαση είναι περίπου σταθερή για γωνίες πρόσπτωσης ως 50°. Για παράδειγμα, οι μηχανισμοί παρακολούθησης που έχουν ακρίβεια της τάξης των $\pm 5^\circ$, μπορούν να συνεισφέρουν περισσότερο από το 99,6% της ενέργειας που παρέχεται από την άμεση συνιστώσα συν το 100% της ενέργειας που παρέχεται από τη διάχυτη συνιστώσα.

Ο ήλιος ταξιδεύει κατά 360° καθημερινά από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Κοιτώντας όμως από οποιαδήποτε σταθερή θέση, το ορατό τμήμα είναι 180° κατά την διάρκεια μια μέσης περιόδου μισής ημέρας. Ένας ηλιακός συλλέκτης με ένα σταθερό προσανατολισμό μεταξύ της ανατολής και της δύσης, θα “βλέπει” μία κίνηση 75° προς κάθε πλευρά και επομένως θα χάσει το 75% της ενέργειας το πρωί και το βράδυ. Ο ήλιος κινείται επίσης κατά 46° από τον βορρά και τον νότο κατά την διάρκεια ενός έτους. Το σύνολο των συλλεκτών που είναι τοποθετημένοι μεταξύ αυτών των ακραίων σημείων θα “βλέπει” τον ήλιο να κινείται κατά 23° και στις δύο πλευρές, προκαλώντας απώλειες 8,3%.

Ο βαθμος ακρίβειας και οι τρόποι παρακολούθησης διαφέρουν ανάλογα με το είδος του μηχανισμού. Τα συστήματα παρακολούθησης χαρακτηρίζονται ανάλογα με τον τρόπο κίνησής τους, η οποία μπορεί να γίνεται σε έναν ή δύο άξονες.

3.7.1. Παρακολούθηση σε έναν άξονα

Ο άξονας περιστροφής, των μηχανισμών παρακολούθησης σε έναν άξονα, είναι τυπικά ευθυγραμμισμένος κατά μήκος ενός πραγματικού βόρειου μεσημβρινού, ενώ είναι δυνατόν να ευθυγραμμιστεί με οποιαδήποτε θεμελιώδη κατεύθυνση με τη χρήση αλγόριθμων παρακολούθησης. Τα συνήθη συστήματα παρακολούθησης σε έναν άξονα είναι τα παρακάτω :

➤ Συστήματα με οριζόντιο άξονα (Horizontal single axis tracker, HSAT) :

Ο άξονας περιστροφής στα εν λόγω συστήματα είναι οριζόντιος σε σχέση με το έδαφος. Οι θέσεις σε κάθε άκρο του άξονα περιστροφής μπορούν να μοιραστούν για την μείωση του κόστους εγκατάστασης. Η δομή του πεδίου είναι αρκετά ευέλικτη. Με κατάλληλη απόσταση μπορούμε να μεγιστοποιήσουμε την αναλογία της παραγωγής ενέργειας με το κόστος, το οποίο εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες, το έδαφος και την σκίαση, και την αξία της παραγόμενης ενέργειας ανά μέρα. Τα συστήματα οριζόντιας παρακολούθησης έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής, σαρώνοντας έναν κύλινδρο που περιστρέφεται συμμετρικά γύρω από τον άξονα περιστροφής. Διαθέτουν ένα μακρύ οριζόντιο σωλήνα που στηρίζεται σε ρουλεμάν, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω σε πυλώνες ή πλαίσια, με τον άξονα του σωλήνα να είναι παράλληλος σε μια νοητή γραμμή βορρά – νότου.

➤ Συστήματα με κατακόρυφο άξονα (Vertical single axis tracker, VSAT):

Ο άξονας περιστροφής για αυτά τα συστήματα είναι κατακόρυφος ως προς το έδαφος. Περιστρέφονται από την Ανατολή ως τη Δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας και είναι αποτελεσματικότερα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη συγκριτικά με τα συστήματα HSAT. Στην μελέτη για την δομή του πεδίου, πρέπει να εξεταστεί η σκίαση ώστε να αποφευχθούν οι περιττές απώλειες ενέργειας και να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση της γής. Τα συστήματα κατακόρυφης παρακολούθησης έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη με βάση

μία γωνία ως προς τον άξονα περιστροφής. Η μονάδα αυτή σαρώνει ένα κώνο που είναι περιστροφικά συμμετρικός γύρω από τον άξονα περιστροφής.

➤ Συστήματα με κεκλιμένο άξονα (Tilted single axis tracker, TSAT):

Είναι όλα τα συστήματα με άξονες περιστροφής μεταξύ οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Οι γωνίες κλίσης συχνά περιορίζονται με σκοπό τη μείωση του ανέμου και του αυξημένου ύψους των άκρων. Στην μελέτη για την δομή του πεδίου, πρέπει να εξεταστεί η σκίαση ώστε να αποφευχθούν οι περιττές απώλειες ενέργειας και να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση της γής. Μπορούν να στοιβάζονται χωρίς σκίαση κάθετα προς τον άξονα περιστροφής τους σε οποιαδήποτε πυκνότητα, ωστόσο η στοίβαξη παράλληλα στους άξονες περιστροφής τους περιορίζεται από τη γωνία κλίσης και το γεωγραφικό πλάτος. Τα συστήματα TSAT έχουν συνήθως την πρόσοψη της μονάδας προσανατολισμένη παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής, σαρώνοντας έναν κύλινδρο που περιστρέφεται συμμετρικά γύρω από τον άξονα περιστροφής.

➤ Συστήματα με πολικά ευθυγραμμισμένο άξονα (Polar aligned single axis trackers, PASAT):

Αυτή η μέθοδος είναι επιστημονικά γνωστή ως η πρότυπη μέθοδος στερέωσης ενός τηλεσκοπίου σε μια δομή υποστήριξης. Η κλίση του άξονα περιστροφής ευθυγραμμίζεται με αυτή του πολικού αστέρα. Τα συστήματα PASAT αποτελούν μια συγκεκριμένη εφαρμογή των TSAT. Η γωνία κλίσης είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αυτό ευθυγραμμίζει τον άξονα περιστροφής του συστήματος παρακολούθησης με τον άξονα περιστροφής της Γης.



Σχ. 3.6 : Τρία συστήματα παρακολούθησης με έναν άξονα περιστροφής.

3.7.2. Παρακολούθηση σε δύο άξονες

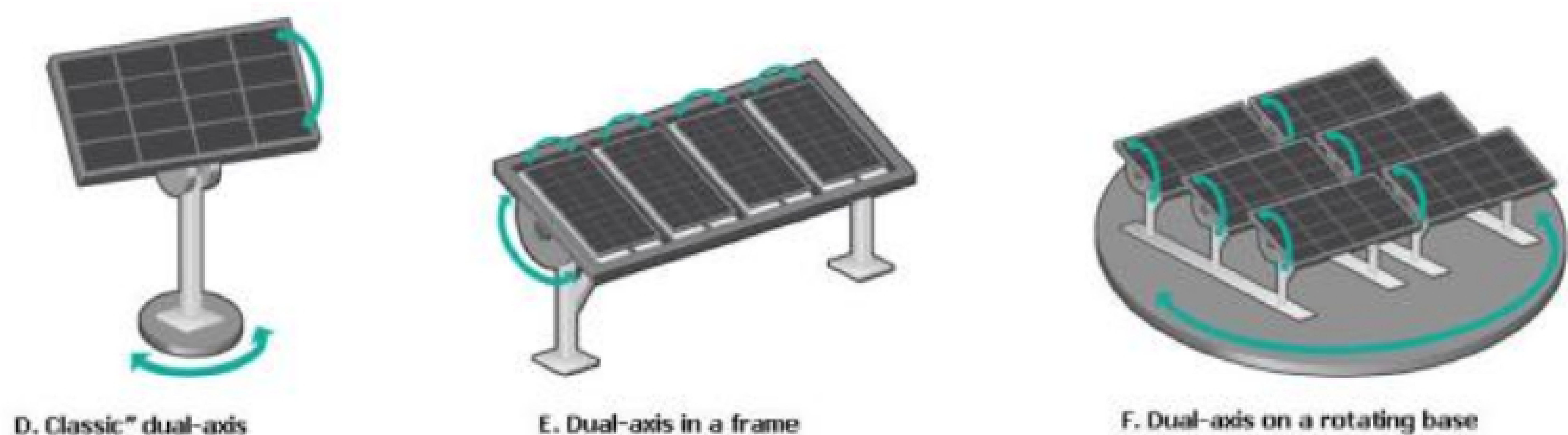
Σε αυτόν τον τύπο παρακολούθησης υπάρχει περιστροφή ως προς δύο άξονες. Ο πρωτεύον άξονας είναι σταθερός ως προς το έδαφος ενώ ο δευτερεύων έχει ως αναφορά τον πρωτεύοντα άξονα. Τα συστήματα παρακολούθησης σε δύο άξονες έχουν συνήθως τις μονάδες τους προσανατολισμένες παράλληλα προς τον δευτερεύοντα άξονα περιστροφής. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν βέλτιστα επίπεδα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας, γεγονός που οφείλεται στην ικανότητά τους να ακολουθούν τον ήλιο τόσο στον κάθετο όσο και στον οριζόντιο άξονα. Ανεξάρτητα από την θέση στην οποία βρίσκεται ο ήλιος στον ουρανό, τα συστήματα διπλής παρακολούθησης έχουν την δυνατότητα να στρίψουν τον εαυτό τους ώστε να είναι σε άμεση επαφή με τον ήλιο. Η ταξινόμησή τους γίνεται με κριτήριο τον προσανατολισμό των πρωτεύοντων αξόνων τους σε σχέση με το έδαφος στους εξής τύπους:

➤ Συστήματα με άξονα κεκλιμένου άκρου (Tip-tilt dual axis tracker, TTDAT) : Ονομάζονται έτσι επειδή ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός στύλου. Κανονικά η κίνηση ως προς τον άξονα Ανατολή-Δύση οδηγείται με περιστροφή της συστοιχίας γύρω από την κορυφή του στύλου. Στην κορυφή του περιστρεφόμενου ρουλεμάν είναι ένας μηχανισμός σχήματος T ή H, που επιτρέπει την κάθετη περιστροφή του συλλέκτη και παρέχει τα κύρια σημεία στερέωσης.

Ορισμένα TTDAT έχουν ως πρωτεύοντα άξονα, έναν οριζόντιο άξονα και ως δευτερεύοντα έναν ορθογώνιο άξονα. Ο κατακόρυφος άξονας (αξιμουθιακός) είναι σταθερός. Αυτό επιτρέπει μεγάλη ευελιξία της σύνδεσης του ωφέλιμου φορτίου στον εξοπλισμό που είναι τοποθετημένος στο έδαφος επειδή δεν υπάρχει καμία συστροφή της καλωδίωσης γύρω από τον πόλο. Κανονικά οι μηχανισμοί παρακολούθησης θα πρέπει να τοποθετούνται με αρκετά μικρή πυκνότητα, προκειμένου να αποφευχθεί η σκίαση μεταξύ τους, όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ουρανό. Οι άξονες περιστροφής των TTDAT

ευθυγραμμίζονται συνήθως είτε κατά μήκος ενός πραγματικού βόρειου μεσημβρινού είτε ανατολικά-δυτικά της γραμμής του γεωγραφικού πλάτους.

➤ Συστήματα με άξονα ανύψωσης-αζιμουθίου (Azimuth-altitude dual axis tracker, AADAT): Τα συστήματα αυτά έχουν ως προτεύοντα έναν άξονα κάθετο στο έδαφος (άξονας αζιμουθίου) και ως δευτερεύοντα τον άξονα ανύψωσης. Είναι παρόμοια σε λειτουργία με τα συστήματα TTDAT, αλλά διαφέρουν ως προς τον τρόπο περιστροφής στην καθημερινή παρακολούθηση. Αντί της περιστροφής της διάταξης γύρω από την κορυφή του στύλου, τα συστήματα AADAT μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα μεγάλο δακτύλιο τοποθετημένο στο έδαφος με τους συλλέκτες τοποθετημένους σε μια σειρά κυλίνδρους. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι το βάρος των συλλεκτών διανέμεται επί ενός τμήματος του δακτυλίου, σε αντίθεση με το ενιαίο σημείο φόρτωσης του πόλου στα TTDAT. Αυτό επιτρέπει σε ένα σύστημα AADAT να υποστηρίξει πολύ μεγαλύτερες σειρές.



Σχ. 3.7 : Συστήματα παρακολούθησης με δύο άξονες περιστροφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ (CRS)

4. Εισαγωγή

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική αναφορά στα συστήματα Ηλιακού Πύργου Ισχύος, τα οποία κατά την περιγραφή τους θα ονομάζονται *CRS* (Central Receiver Systems). Γίνεται χωριστή και εκτενής αναφορά στα εν λόγω συστήματα, καθώς ο αλγόριθμος που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια, για παρακολούθηση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, βρίσκει εφαρμογή στα *CRS*.

4.1. Γενικά στοιχεία

Οι *CRS* χρησιμοποιούν χιλιάδες μεμονωμένα κάτοπτρα, τα οποία ονομάζονται Ηλιοστάτες (*heliostats*), για να ανακλούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε έναν δέκτη ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου. Ο ηλιακός δέκτης συλλέγει την θερμότητα η οποία μεταφέρεται σε ένα υγρό μεταφοράς θερμότητας (*HTF*), το οποίο ρέει μέσα στον δέκτη. Από εκεί διοχετεύεται προαιρετικά για αποθήκευση και τελικά σε ένα σύστημα μετατροπής ισχύος που μετατρέπει την θερμική ενέργεια σε ηλεκτρισμό και την προμηθεύει στο δίκτυο. Ουσιαστικά, μετά τη συλλογή ενέργειας από το ηλιακό σύστημα, η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό είναι αρκετά παρόμοια με τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ορυκών καυσίμων.

Οι ηλιακοί πύργοι με μεγάλα πεδία ηλιοστατών και ηλιακούς δέκτες που βρίσκονται στην κορυφή ενός πύργου είναι πλέον σε θέση για την ανάπτυξη της πρώτης γενιάς στο εμπόριο. Η δύναμη των εργοστασίων *CRS* μπορεί να θεωρηθεί ως αρκούντως ώριμη μετά την πρωτοποριακή εμπειρία πολλών 0,5 – 10 MW πιλοτικών μονάδων στις αρχές του 1980, καθώς και η επακόλουθη βελτίωση των βασικών συστατικών όπως οι ηλιοστάτες και οι ηλιακοί δέκτες σε πολλά μεταγενέστερα έργα κατά

τα τελευταία 20 χρόνια. Οι ηλιακές μόνο εγκαταστάσεις , όπως η Solar Tres και Planta Solar 10(PS10) και οι υβριδικές διαμορφώσεις όπως η Solgas, η ConSolar και η SOLGATE παρείχαν εναλλακτικές λύσεις που οδήγησαν στις πρώτες ενισχυμένες μονάδες για την περίοδο 2005 - 2010.

Το CRS έχει μεγάλες δυνατότητες για την μείωση του κόστους της ενδιάμεσης παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας αφού υπάρχουν πολλά ενδιάμεσα βήματα από την ένταξή τους σε ένα συμβατικό οργανικό κύκλο Rankine έως τους υψηλότερους κύκλους εξέργεια χρησιμοποιώντας τουρμπίνες αερίου, σε θερμοκρασίες πάνω από 1300 °C, οδηγώντας σε υψηλότερες αποδόσεις. Ο οπτικός συντελεστής συγκέντρωσης κυμαίνεται από 200 έως 1000. Η υψηλή διερχόμενη ηλιακή ροή στο δέκτη (κατά μέσο όρο μεταξύ 300 και 1000 kWm⁻²) καθίσα την λειτουργία σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες έως και 1000°C και ενσωματώνει την θερμική ενέργεια πιο αποτελεσματικά. Το CRS μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε υβριδικές μονάδες σε μια ευρεία ποικιλία επιλογών και έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλή ετήσια ικανότητα καθώς χρησιμοποιούνται θερμικές αποθήκες. Με τις αποθήκες τα CRS μπορούν να λειτουργούν πάνω από 4500 ώρες ετησίως σε ονομαστική ισχύ .Τα κύρια χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται παρακάτω πίνακα

Typical size	10–200 MW ^a
Operating temperature	
Rankine	565°C
Brayton	800°C
Annual capacity factor	20–77% ^a
Peak efficiency	16–23% ^a
Annual net efficiency	12–20% ^a
Commercial status	Scale-up demonstration (10–30 MW)
Technology development risk	Medium
Storage available	Nitrate salt for molten salt receivers Ceramic bed for air receivers
Hybrid designs	Yes
Investment cost	
$\$ \cdot W^{-1}$	4.4–2.5 ^a
$\$ \cdot W_p^{-1b}$	2.4–0.9 ^a

^a Figure indicate expected progress from present to 2030.

^b $\$/W_p$ removes the effect of energy storage or solar multiple, as in PV.

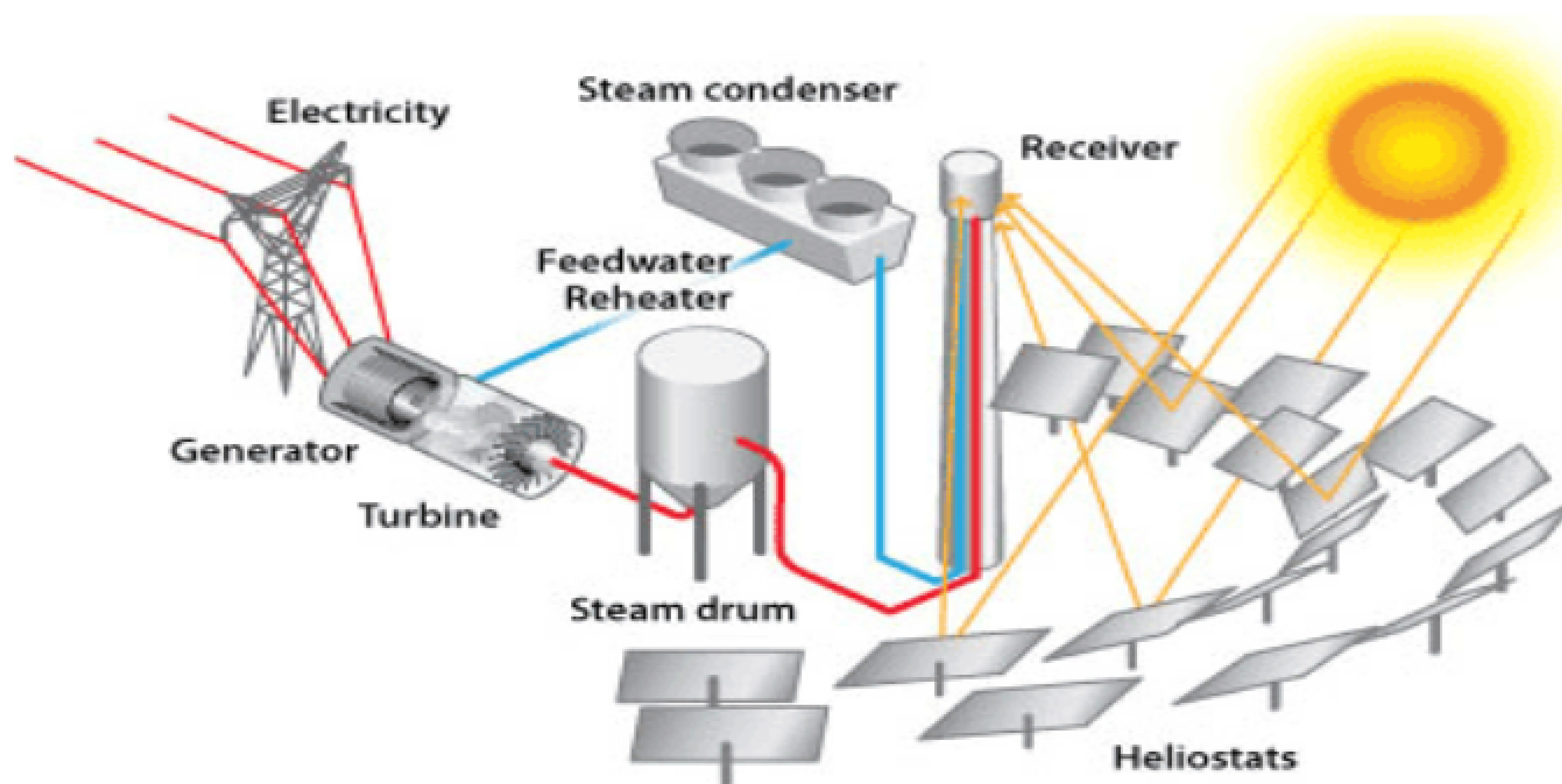
Source: Adapted From DeMeo, E. A. and Galdo, J. E. 1997. TR-109496 Topical Report. U.S. Department of Energy, Washington, DC.

Πίνακας 4.α : Κύρια χαρακτηριστικά CRS

4.2. Περιγραφή Τεχνολογίας

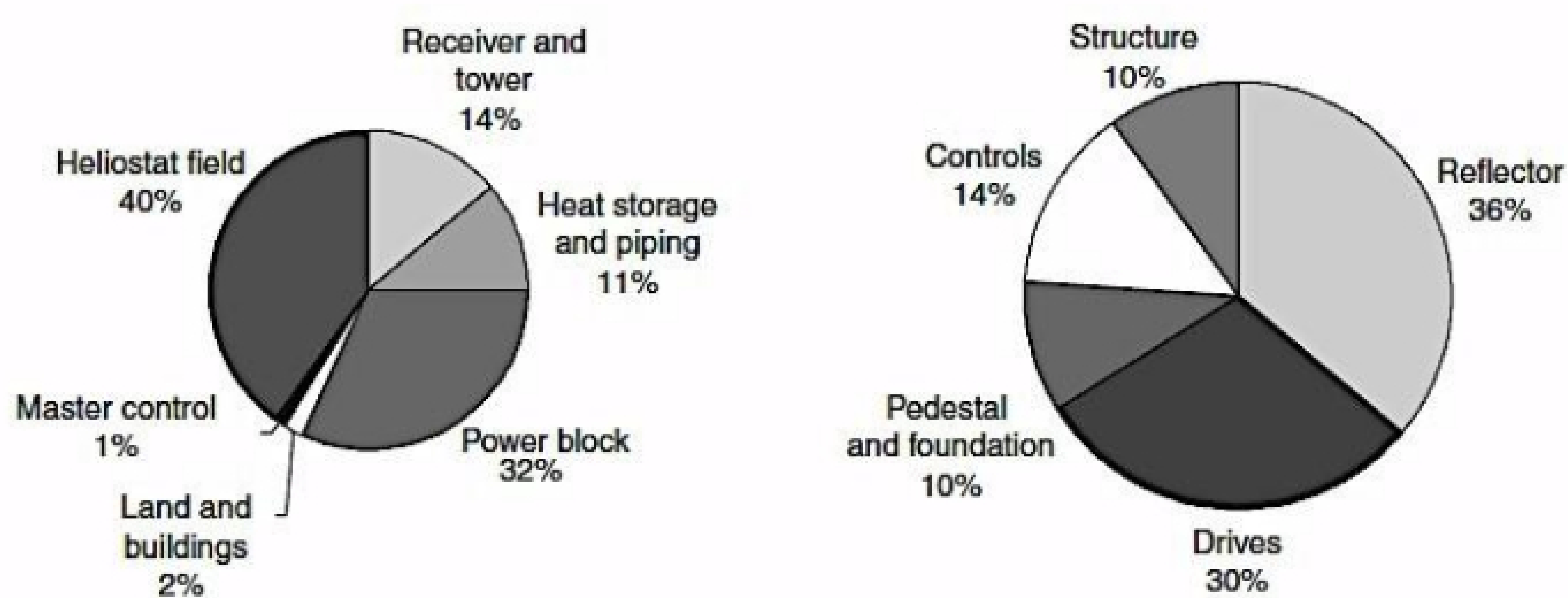
Ένας ηλιακός πύργος ισχύος αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Το σύστημα συλλεκτών, ή ηλιοστατών που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διαξονικών μονάδων παρακολούθησης ταξινομημένων σε σειρές
- Τον ηλιακό δέκτη, όπου απορροφάται η συμπυκνωμένη ροή. Είναι το βασικό στοιχείο των εγκαταστάσεων και χρησιμεύει ως διεπαφή μεταξύ του ηλιακού τμήματος του συστήματος και του μπλοκ ισχύος
- Το σύστημα εναλλάκτη θερμότητας, όπου ένα ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από τον δέκτη στο στρόβιλο.
- Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, με το οποίο εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα κατά τη διάρκεια διέλευσης συννέφων και έτσι προσαρμόζεται στις καμπύλες ζήτησης.
- Το ορυκτό εφεδρικό καύσιμο για υβριδικά συστήματα για μια πιο σταθερή απόδοση.
- Το μπλοκ τροφοδοσίας, συμπεριλαμβανομένης της γεννήτριας ατμού και του εναλλάκτη στρόβιλου.
- Τον κεντρικό έλεγχο, το UPS και τα συστήματα αποβολής θερμότητας.



Σχ. 4.1 : Απλοποιημένο σχέδιο τυπικού CRS σταθμού

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τους, τα CRS είναι σε θέση να κάνουν χρήση μιας ποικιλίας γεωθερμικών ρευστών, όπως αέρας, το νερό/ατμό, λιωμένο νιτρικό αλάτι, νάτριο και υγρά. Σε γενικές γραμμές, τα στοιχεία που επηρεάζουν περισσότερο στο κόστος της επένδυσης είναι ο τομέας του ηλιοστάτη, ο πύργος-δέκτης του συστήματος και το μπλοκ ισχύος. Το πεδίο του ηλιοστάτη είναι ο μοναδικός παράγοντας με τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στις επενδύσεις εγκαταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Ο συλλέκτης και το μπλοκ ισχύος από κοινού αντιπροσωπεύουν περίπου το 72% των επενδύσεων του τυπικού ηλιακού εργοστασίου, εκ των οποίων οι ηλιοστάτες αντιπροσωπεύουν το 60% του ηλιακών μερισμάτων. Ακόμα κι αν ο ηλιακός δέκτης επηρεάζει την επένδυση κεφαλαίου πολύ λιγότερο (περίπου 14%), θεωρείται το πιο κρίσιμο υποσύστημα όσον αφορά τις επιδόσεις, αφού συγκεντρώνει το σύνολο της ροής της ενέργειας ανταλλαγής. Η μεγαλύτερη επένδυση ηλιοστάτη είναι ο μηχανισμός κίνησης και η επιφάνεια ανάκλασης, τα οποία από μόνα τους αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 70% του συνόλου.



Σχ. 4.2 (Αριστερά): Κατανομή επενδυτικών δαπανών για ηλιακό-CRS. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί ο τομέας του ηλιοστάτη και του μπλοκ ισχύος επηρεάζουν περισσότερο τις επενδύσεις. (Δεξιά)Ανάλυση του κόστους παραγωγής για έναν ηλιοστάτη που κατανέμεται μεταξύ των κύριων συνιστωσών του. Ο ανακλαστήρας και ο μηχανισμός παρακολούθησης είναι σε αυτή την περίπτωση συστατικά που απαιτούν το μεγαλύτερο κεφάλαιο.

4.3. Ηλιοστάτες και Τεχνολογία Συλλέκτη

Το πεδίο συλλέκτη αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κατόπτρων παρακολούθησης, τα οποία όπως αναφέρθηκε ήδη ονομάζονται ηλιοστάτες, και ένα σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου για να εστιάζει συνεχώς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή ανοίγματος του δέκτη. Κατά τη διάρκεια διάβασης συννέφου το σύστημα ελέγχου πρέπει να αποκλίνει το πεδίο ώστε να προληφθούν ζημιές στον δέκτη και στον πύργο.

Οι επιδόσεις του ηλιοστάτη περιγράφονται από την οπτική απόδοση, η οποία είναι ίση με την αναλογία της καθαρής ισχύος που συλλαμβάνεται από το δέκτη με το προϊόν της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από το συνολικό εμβαδόν κατόπτρου.

Η οπτική απόδοση περιλαμβάνει την επίπτωση του συνημιτόνου, την σκίαση, το μπλοκάρισμα, την ανακλαστικότητα κατόπτρου, την ατμοσφαιρική εξασθένηση και την διαρροή του δέκτη.

Λόγω της μεγάλης περιοχής της γης που απαιτείται, χρησιμοποιήθηκαν πολύπλοκοι αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση της ετήσιας ενέργειας που παράγεται από την μονάδα της γης που έδειξαν ότι οι ηλιοστάτες πρέπει να είναι συσκευασμένοι όσο το δυνατόν έτσι ώστε ο δέκτης να είναι μικρός και η συγκέντρωση υψηλή. Ωστόσο, οι ηλιοστάτες είναι αντανακλαστικά Fresnel τμήματα παρακολούθησης που υπόκεινται σε πολύπλοκους παράγοντες απόδοσης, τα οποία πρέπει να βελτιστοποιηθούν κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας, με την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του συνημιτόνου, της σκίασης, του μπλοκαρίσματος και της διαρροής του δέκτη. Επειδή η ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη δεν είναι καθετη στις προσπίπτουσες ακτίνες, η αποτελεσματική περιοχή της μειώνεται κατά το συνημίτονο της γωνίας της πρόσπτωσης γ .

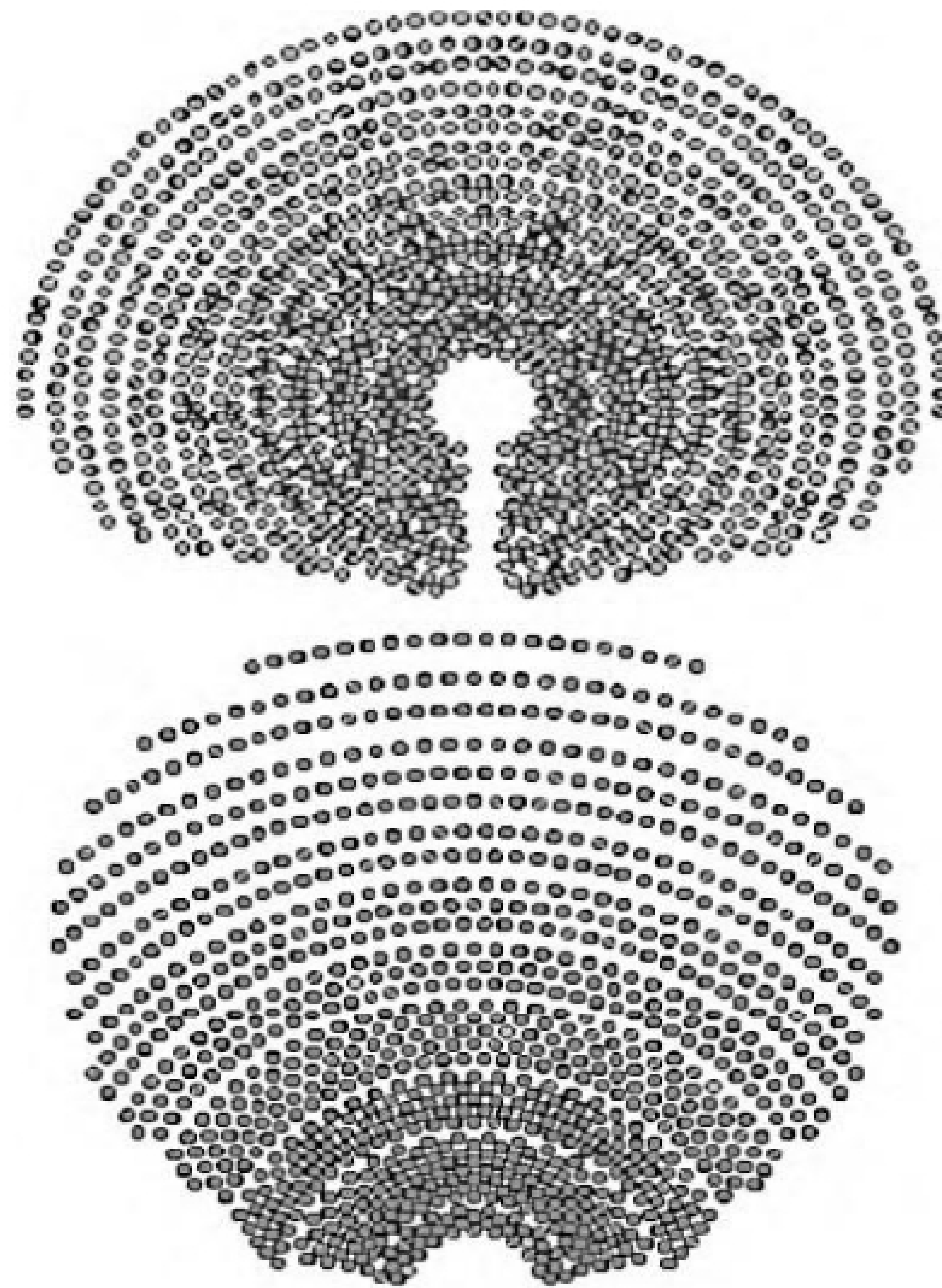
Το μέσο ετήσιο $\cos \gamma$ ποικίλλει από 0,9 περίπου για ηλιοστάτες που είναι διατεταγμένοι βόρεια του πύργου σε 0,7 περίπου για ηλιοστάτες νότια του πύργου (οι ηλιοστάτες θεωρούνται σε απόσταση διπλάσια από το ύψος του πύργου). Φυσικά, ο μέσος όρος του συνημιτόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Συνεπώς, σε μέρη κοντά στον ισημερινό ένα πεδίο που περιβάλλει τον πύργο θα ήταν η καλύτερη επιλογή. Όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος στο βόρειο ημισφαίριο τόσο περισσότερο βελτιώνεται η απόδοση με την τοποθέτηση των ηλιοστατών στη βόρεια πλευρά του πύργου (αντίστοιχα στη νότια πλευρά στο νότιο ημισφαίριο). Οι αντιπροσωπευτικές διατάξεις του πεδίου του συλλέκτη (περιβάλλουσα και βόρεια διάταξη) απεικονίζονται στο σχήμα 29.

Το μπλοκάρισμα των ανακλώμενων ακτίνων είναι επίσης ένας σημαντικός περιορισμός για την διάταξη των ηλιοστατών. Δηλαδή οι γειτονικοί ηλιοστάτες μπλοκάρουν και παρεμποδίζουν την ομαλή ροή των ανακλώμενων ακτίνων προς το δέκτη. Για να αποφευχθούν οι απώλειες μπλοκαρίσματος, η απόσταση Δx μεταξύ των σειρών των ηλιοστατών πρέπει να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta x = x \frac{Z_s}{Z_T}$$

Η σκίαση που παράγεται από γειτονικούς ηλιοστάτες πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε χαμηλές γωνίες ήλιου και στο κέντρο του πεδίου, όπου οι συνθήκες μπλοκαρίσματος επιτρέπουν την στενή απόσταση. Οι σκιές κινούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, όπως άλλωστε και ο προσανατολισμός ηλιοστάτη και έτσι δεν υπάρχει ένας απλός κανόνας.

Η ηλιακή ακτινοβολία που αντικατοπτρίζεται από τους ηλιοστάτες δεν φτάνει ολόκληρη στην περιοχή του δέκτη. Μέρος της ενέργειας διασκορπίζεται και απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως ατμοσφαιρική εξασθένηση και αυξάνεται όταν η υγρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλή.



Σχ. 4.3: Βελτιστοποιημένα πεδία για γεωγραφικό πλάτος ίσο με 36° με διαμορφώσεις «περιβάλλοντος πεδίου» (πάνω) και «βόρειου πεδίου» (κάτω)

Η ατμοσφαιρική εξασθένηση εκφράζεται συνήθως ως συνάρτηση ή πειραματική συσχέτιση ανάλογα με το εύρος της κλίσης ηλιοστάτη. Το μέγεθος της εικόνας που σχηματίζεται από κάθε ηλιοστάτη εξαρτάται από την εστίαση του κατόπτρου, από το μέγεθος του ηλιοστάτη καθώς και από τα σφάλματα δηλ από την ποιότητα της δέσμης. Εξαιτίας αυτού, υπάρχει ένα κοινός παράγοντας για σε μια συγκεκριμένη περιοχή του δέκτη.

Ένα μέρος της ενέργειας διαρρέει γύρω από τον δέκτη και παρόλο που η διαρροή μπορεί να εξαλειφθεί από την αύξηση του μεγέθους του δέκτη, σε κάποιο σημείο, η αύξηση του μεγέθους γίνεται αντιπαραγωγική λόγω των αυξημένων ζημιών που προκύπτουν στον δέκτη.

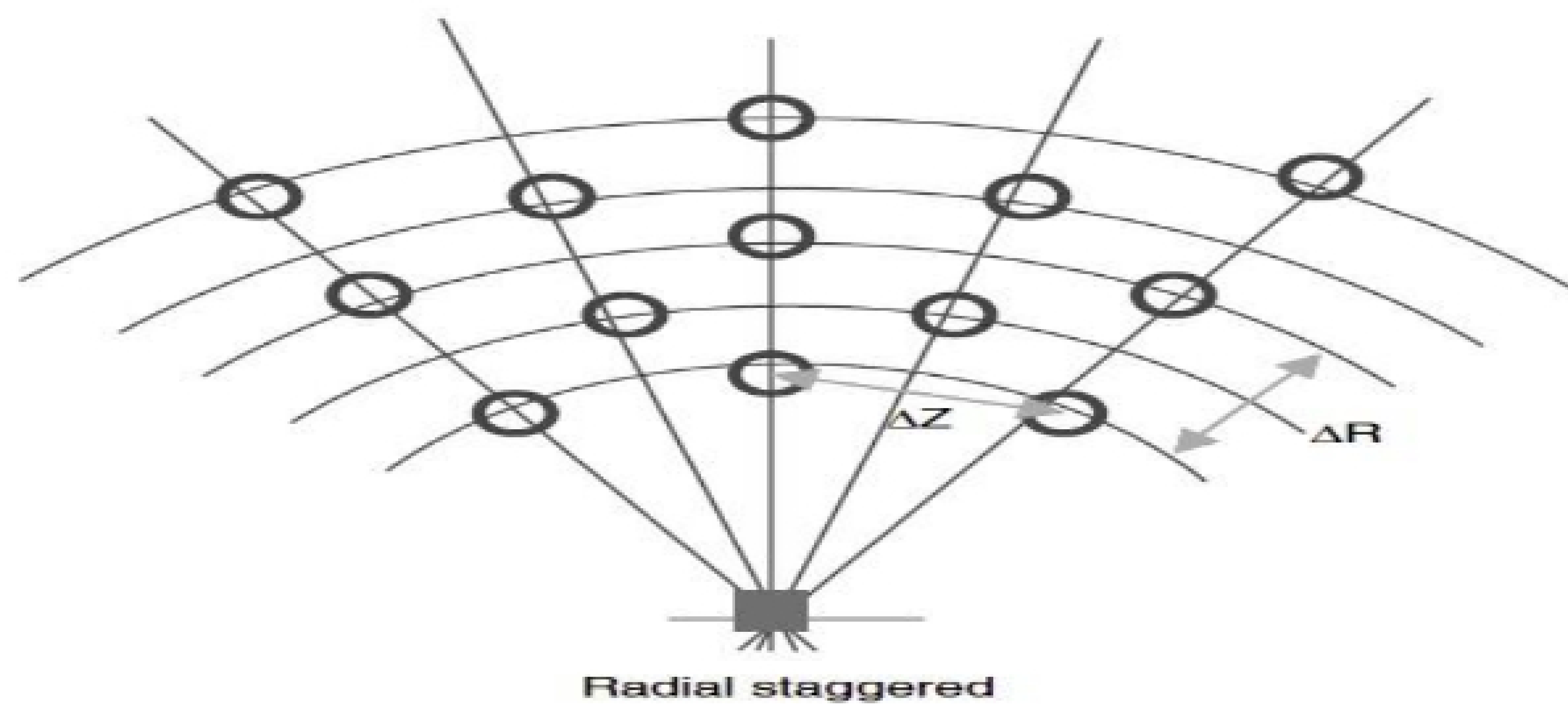
Ο συνδυασμός όλων των προαναφερθέντων παραγόντων που επηρεάζουν τις επιδόσεις του ηλιοστάτη πρέπει να βελτιστοποιηθούν ώστε να προσδιοριστεί μια αποτελεσματική διάταξη. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για την βελτιστοποίηση ώστε να καθοριστεί η ακτινική και

η αζιμουθιακή απόσταση των ηλιοστατών . Ένα από τα πιο κλασικά και αποτελεσματικά είναι το ακτινωτό κλιμακωτό μοντέλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4, που είχε προταθεί αρχικά από το Πανεπιστήμιο του Χιούστον το 1970 . Ένα τυπικό πεδίο ακτινικής εναλλαγής σε γεωγραφικό πλάτος 35 που χρησιμοποιεί τετράγωνους ηλιοστάτες δίνεται από :

$$\Delta R = \frac{1,009}{\Theta} - 0,063 + 0,4803\Theta$$

$$\Delta Z = 2,170 - 0,6589\Theta + 1,247\Theta^2 \quad (\text{το } \Theta \text{ είναι σε rad)}$$

$$\Theta = \arctan \left[\frac{Z_T - \frac{Z_s}{2}}{x} \right]$$



Σχ. 4.4: Ακτινωτή διάταξη τομέα, όπου το ΔZ εκπροσωπεί την αζιμουθιακή απόσταση και το ΔR αντιπροσωπεύει την ακτινική απόσταση.

Ο μηχανισμός κίνησης είναι υπεύθυνος για την ανεξάρτητη αζιμουθιακή και ανυψωτική κίνηση έτσι ώστε η κατοπτρική επιφάνεια να ακολουθεί τη θέση του ήλιου και να αντικατοπτρίζει τη δέσμη πάνω στο εστιακό σημείο. Η αναλογία μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας οδηγεί σε διπλασιασμό των γωνιακών σφαλμάτων. Επομένως είναι ζωτικής σημασίας για ένα σύστημα παρακολούθησης να είναι ιδιαίτερα ακριβής.

Οι δίσκοι ηλιοστάτη θα πρέπει να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Να είναι αρκετά ισχυροί για να υποστηρίξουν το βάρος τους, τη κινητή δομή τους και τα φορτία ανέμου και να είναι άκαμπτοι, ώστε να

αποφευχθούν οι δονήσεις χαμηλής συχνότητας

- Να είναι σε θέση να παράγουν εξαιρετικά αργή κίνηση, με υψηλά ποσοστά μείωσης (έως 40.000:1)
- Να έχουν πολύ ακριβή τοποθέτηση (χρήση κωδικοποιητών) και όχι ελεύθερη κυκλοφορία
- Να είναι σε θέση να εξασφαλίσουν σχετικά γρήγορη επιστροφή στην θέση τους σε περίπτωση ισχυρών ανέμων ή άλλων επικίνδυνων καιρικών συνθηκών, και άλλων εκδηλώσεων
- Να έχουν αντοχή σε εξωτερική έκθεση
- Να έχουν εύκολη συντήρηση
- Να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας

Η πιο κοινή διαμόρφωση του μηχανισμού κίνησης είναι τα κιβώτια τύπου worm (κοχλία) για τα συστήματα ανύψωσης και τους άξονες αζιμούθιου. Και τα δύο γρανάζια είναι ανάλογα σε σχέση με το σχήμα των δοντιών και τον λόγο της μείωσης. Το εργαλείο worm παρέχει υψηλά ποσοστά μείωσης σε οριακές περιπτώσεις αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικό λόγω της υψηλής πίεσης τριβής.

4.4. Ο Ηλιακός Δέκτης

Σε μια ηλιακή μονάδα πύργου ισχύος, ο δέκτης είναι ο εναλλάκτης θερμότητας όπου το συμπυκνωμένο φως του ήλιου συλλέγεται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια χρήσιμη σε θερμοδυναμικούς κύκλους. Η ροή της ακτινοβολίας και η θερμοκρασία είναι σημαντικά υψηλές και επομένως χρειάζεται υψηλή τεχνολογία. Ο ηλιακός δέκτης θα πρέπει να μιμείται ένα μέλαν σώμα ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες από την ακτινοβολία. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούνται κοιλότητες, βαμμένα μαύρα πάνελ σωλήνα ή πορώδεις απορροφητές ώστε να παγιδεύσουν τα φωτόνια. Στα περισσότερα σχέδια, ο ηλιακός δέκτης είναι μια ενιαία μονάδα που συγκεντρώνει όλη την ενέργεια που συλλέγεται από τον μεγάλο πεδίο των κατόπτρων, και ως εκ τούτου

είναι αναγκαία η μεγάλη διαθεσιμότητα και αντοχή. Ακριβώς όπως η μείωση του κόστους είναι η προτεραιότητα για περαιτέρω ανάπτυξη στον τομέα της συλλογής έτσι και στους ηλιακούς δέκτες, οι προτεραιότητες είναι η θερμική απόδοση και αντοχή. Τυπικά δέκτες θερμοκρασίες λειτουργίας απορροφηση του δέκτη είναι μεταξύ 500°C και 1200°C και η προσπίπτουσα ροή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα μεταξύ 300 και πάνω από 1000 kW/m².



Εικ. 4.5: Πλευρική άποψη του τσιμεντένιου πύργου 80m της CESA-1 στην Plataforma Solar de Almeria στην Ισπανία.

4.5. Εμπορικά και Πειραματικά CRS

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά σε κάποια βασικά εμπορικά CRS που έχουν λειτουργήσει μέχρι τώρα ανά τον κόσμο, με αναφορά στις τεχνολογίες που αυτά έχουν υιοθετήσει.

4.5.1. Συγκροτήματα νερού – ατμού : Σταθμοί PS10 & PS20

Ο εμπορικός σταθμός Planta Solar 10 (PS10) ξεκίνησε την λειτουργία το 2007 και είναι το πρώτο εμπορικό CRS παγκοσμίως. Βρίσκεται στο ακίνητο Casa Quemada (37,2° γεωγραφικό πλάτος), 15 χλμ. δυτικά της Σεβίλλης, στην Ισπανία. Για το εν λόγω έργο υιοθετήθηκε το συντηρητικό σχήμα της χρήσης κορεσμένου ατμού στον δέκτη, ώστε να περιοριστούν οι τεχνολογικοί κίνδυνοι, όπως κρίσιμα προβλήματα που σχετίζονται με το τον έλεγχο των ζωνών με

ανόμοιους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, όπως λέβητες και υπερθερμαντήρες.



Εικ 4.6 : Ηλιακός Θερμικός Σταθμός Παραγωγής Ενέργεια PS10

Η μονάδα 11 MW σχεδιάστηκε για να επιτύχει ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 23 GWh, με κόστος επένδυσης μικρότερο των 3500 €/KW. Το έργο έκανε χρήση των διαθέσιμων, καλά δοκιμασμένων τεχνολογιών, όπως οι μεταλλικοί-γυαλινοί ηλιοστάτες που αναπτύχθηκαν από την Ισπανική INABENSA και ο δέκτης κορεσμένου ατμού που αναπτύχθηκε από την TECNICAL για την παραγωγή ατμού σε 40 bar και 250°C .

Χαρακτηριστικά στοιχεία:

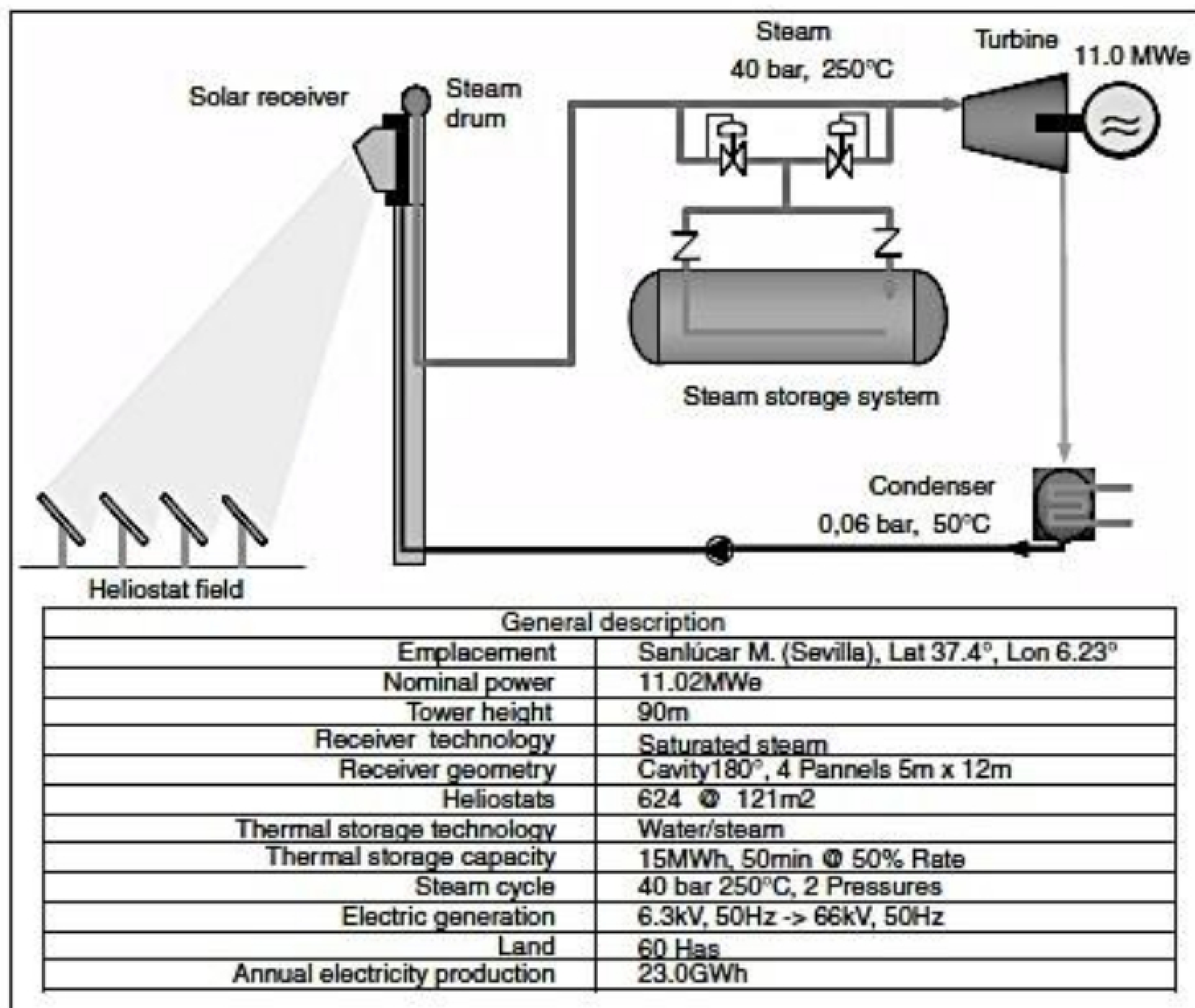


■ Μέγιστη Ηλεκτρική Ισχύς:	10 MW _e
■ Ηλιοστατικό πεδίο	74.880 m ²
■ Ύψος πύργου	100 m
■ Αποθήκευση θερμότητας	50 min
■ Εξοικονόμηση	16.000 τόνοι CO ₂
■ Παραγωγή ενέργειας	20 GWh/a
■ Έκταση γης	55 ha

Πίνακας 4.β : Χαρακτηριστικά στοιχεία του PS10

Ο σταθμός είναι ένα σκέτο ηλιακό σύστημα με αποθήκευση θερμότητας κορεσμένου ατμού ικανή να παρέχει 50 λεπτά λειτουργίας σε φορτίο 50%. Το σύστημα κάνει χρήση 624121 m² ηλιοστατών, οι οποίοι διανέμονται σε ένα πεδίο βόρειας διαμόρφωσης, με 90 τ.μ. υψηλό πύργο, θερμικού συστήματος αποθήκευσης 15 MWh και με δέκτη κοιλότητας με τέσσερα 4,8 X 12 m² σωληνοειδή πάνελ.

Το βασικό διάγραμμα ροής του PS10 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 4.7 : Βασικό σύστημα ηλιακού θερμικού σταθμού PS10 με κορεσμένο ατμό ως θερμικό ρευστό

Αν και το σύστημα κάνει χρήση ενός κορεσμένου ατμοστρόβιλου που εργάζεται σε εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία, η ονομαστική απόδοση του 30,7% είναι σχετικά καλή. Αυτή η απόδοση είναι το αποτέλεσμα της βελτιστοποιημένης διαχείρισης της θερμότητας που εκλύεται στον θερμοδυναμικό κύκλο. Στην έξοδο της γεννήτριας, ο ατμός αποστέλλεται σε ένα συμπυκνωτή υδρόψυκτο, που εργάζεται στα 0,06 bar. Η έξοδος συμπυκνωτή προθερμαίνεται με 0,8 και 16 bar ατμού από την τουρμπίνα. Η έξοδος του πρώτου προθερμαντήρα αποστέλλεται για εξαερισμό, το σύστημα του οποίου τροφοδοτείται με ατμό που προέρχεται και πάλι από την τουρμπίνα. Για να αυξηθεί η ποιότητα ατμού στα τελευταία στάδια της επέκτασης έχει τοποθετηθεί διαχωριστής υγρασίας μεταξύ του τμήματος της ανεμογεννήτριας υψηλής και χαμηλής πίεσης

Ένας τρίτος και τελευταίος προθερμαντήρας τροφοδοτούμενος με ατμό από το δέκτη αυξάνει την θερμοκρασία του νερού στους 245°C. Όταν αναμιγνύεται με νερό που επιστρέφει από το τύμπανο, επιτυγχάνεται

υδροδότηση του δέκτη στους 247°C. Ο συνδυασμός των οπτικών, του δέκτη, και των αποδόσεων του μπλοκ ισχύος οδηγεί σε μια συνολική ονομαστική απόδοση στο σημείο σχεδιασμού 21,7%. Η συνολική ετήσια απόδοση μειώνεται στο 15,4%, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργικών ζημιών και διακοπών.

Ο εμπορικός σταθμός Planta Solar 20 (PS20) κατασκευάστηκε στον ίδιο χώρο με τον PS10 και ξεκίνησε να παράγει το 2009 με χρήση της ίδιας τεχνολογίας, αλλά με κάποιες βελτιώσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο δέκτης με μεγαλύτερη απόδοση, διάφορες βελτιώσεις στα συστήματα ελέγχου και λειτουργίας, όπως επίσης και καλύτερο σύστημα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας.

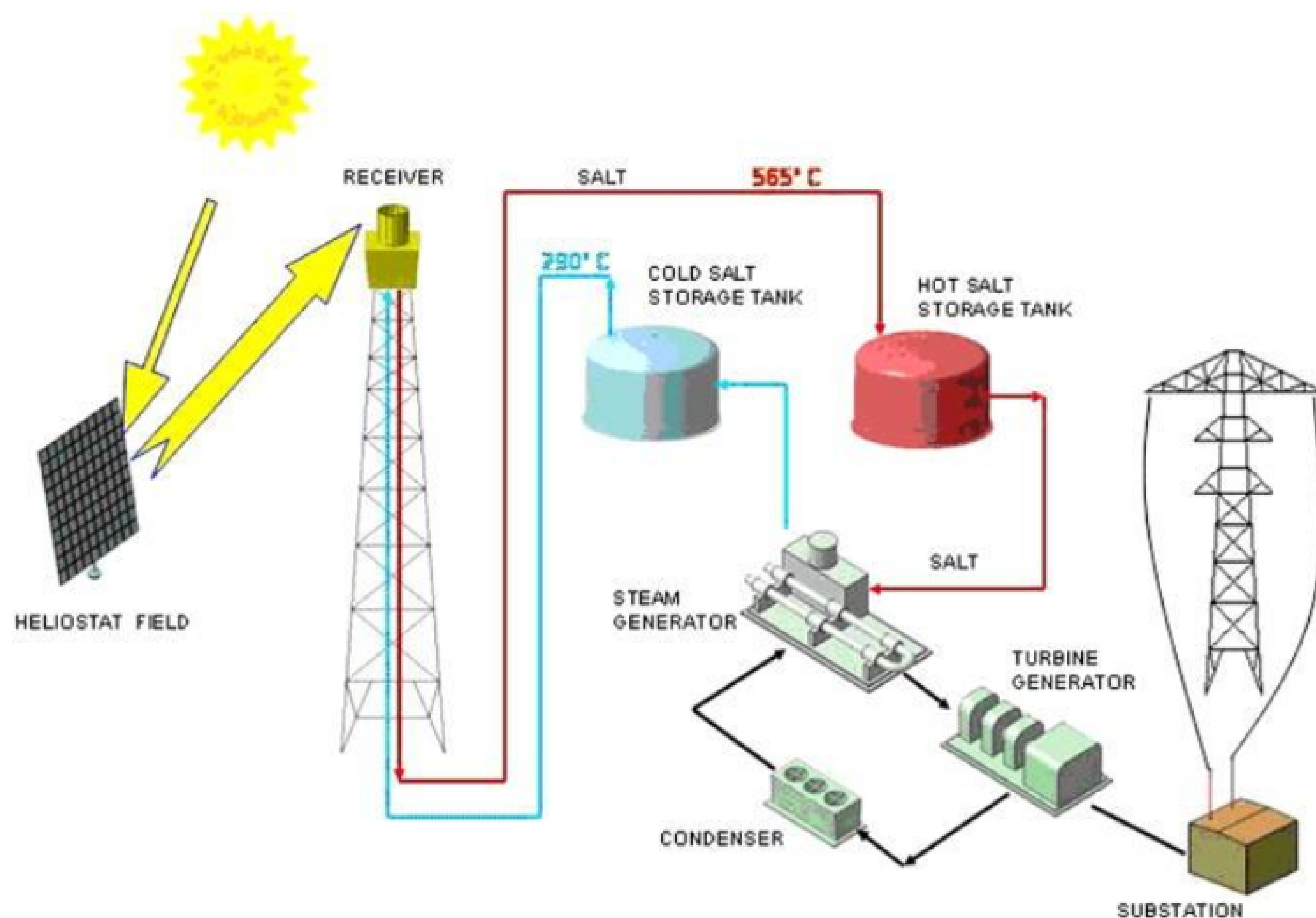
Οι εγκαταστάσεις των 2 σταθμών αποτελούν κομμάτι του Solucar Complex, του συγκροτήματος που περιλαμβάνει και σταθμούς με παραβολικά κοίλα.



Εικ 4.8 : Φωτογραφία των PS10 και PS20

4.5.2. Συστήματα τηγμένου άλατος : Σταθμοί Solar Two και Gemasolar Thermosolar Plant

Για υψηλούς ετήσιους παράγοντες ικανότητας, οι ηλιακοί σταθμοί πρέπει να έχουν ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα θερμικής αποθήκευσης. Ένα τέτοιο σύστημα θερμικής αποθήκευσης χρησιμοποιεί τηγμένο νιτρικό άλας. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το τηγμένο νιτρικό άλας (μείγμα νιτρικού νατρίου και νιτρικού καλίου) θα πρέπει να έχει εύρος λειτουργίας τέτοιο που να συμβαδίζει με τις θερμοκρασίες λειτουργίας των σύγχρονων ανεμογεννητριών του κύκλου Rankine. Σε ένα σταθμό πύργου τηγμένου άλατος, το ψυχρό αλάτι (θερμοκρασίας 290°C) αντλείται από μια δεξαμενή στο επίπεδο του εδάφους με τον δέκτη τοποθετημένο στην κορυφή ενός πύργου όπου θερμαίνεται από την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία στους 565 °C. Στη συνέχεια το αλάτι ρέει πίσω στο επίπεδο του εδάφους σε μια άλλη δεξαμενή. Για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το ζεστό αλάτι αντλείται από τη αντίστοιχη δεξαμενή μέσω μιας γεννήτριας ατμού για να παράξει υπέρθερμο ατμό. Ο υπέρθερμος ατμός κινεί μια τουρμπίνα κύκλου Rankine.



Σχ. 4.9 : Διάγραμμα Πύργου Ισχύος τηγμένου άλατος

Το πεδίο των συλλεκτών, υπάρχει δυνατότητα να πάρει κατάλληλο μέγεθος ώστε να συγκεντρώνει περισσότερη δύναμη από όσο απαιτείται από το σύστημα γεννήτριας ατμού. Έτσι το αλάτι που θα περισσεύει συσσωρεύεται στην θερμή δεξαμενή αποθήκευσης. Με αυτόν τον τρόπο της αποθήκευσης οι πύργοι κατασκευάζονται με ετήσια ικανότητα μεγαλύτερη του 70% καθώς το λιωμένο αλάτι έχει μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά όγκο ($500-700 \text{ kWh/m}^3$), και έτσι είναι ιδανικό για τα συστήματα ηλιακής - θερμικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη χωρητικότητα. Ακόμα κι αν τα νιτρικά άλατα έχουν χαμηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα κατά όγκο από τα ανθρακικά άλατα, αποθηκεύουν 250 kWh/m^3 . Η μέση θερμική αγωγιμότητα των νιτρικών αλάτων είναι $0,52 \text{ W/mK}$ και η θερμική ισχύς τους είναι περίπου $1,6 \text{ kJ/kgK}$. Τα νιτρικά άλατα είναι μια φθηνή λύση για την αποθήκευση μεγάλων συστημάτων.

Ο μεγαλύτερος πύργος ισχύος τηγμένου αλάτος που έχει λειτουργήσει ως τώρα ήταν το Solar Two, ένας πύργος 10 MW που βρίσκεται κοντά στο Barstow, Καλιφόρνια.



Εικ. 4.10 : Εναέρια φωτογραφία του Solar Two στο Barstow της Καλιφόρνια.

Ο Solar Two πρόκειται για μη-εμπορικό σταθμό, ισχύος 10MWe και δημιουργήθηκε για να επιβεβαιώσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δέκτη τηγμένου άλατος, την αποθήκευση θερμότητας και τις τεχνολογίες της γεννήτριας ατμού, όπως επίσης και να βελτιώσει την ακρίβεια των οικονομικών προβλέψεων για τα εμπορικά έργα.

Το Solar Two εργοστάσιο χτίστηκε στο ίδιο σημείο με την πιλοτική μονάδα SolarOne και επαναχρησιμοποίησε ένα μεγάλο μέρος του υλικού του.

Ο σταθμός άρχισε να λειτουργεί το 1996 και απέδειξε με επιτυχία τη δυνατότητα της τεχνολογίας νιτρικού άλατος. Ορισμένα από τα βασικά αποτελέσματα ήταν:

- η απόδοση δέκτη μετρήθηκε στο 88%,
- το σύστημα θερμικής αποθήκευσης είχε απόδοση άνω του 97%,
- η αποδοτικότητα της τουρμπίνας του κύκλου Rankine ήταν 34%,

Τα παραπάνω ταίριαζαν στις προβλέψεις της απόδοσης του.

Ταυτόχρονα όμως, η απόδοση του πεδίου συλλέκτη ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη, κυρίως λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας των ηλιοστατών (85-95% έναντι 98% αναμενόμενης) και της υποβάθμισης του επιφάνειας του κατόπτρου,. Τα περισσότερα προβλήματα του ηλιοστάτη αποδόθηκαν στο γεγονός ότι το πεδίο ηλιοστάτη ήταν σε αδράνεια και ασυντήρητο για έξι χρόνια μετά το κλείσιμο του Solar One.

Ο σταθμός απόδειξε επιτυχώς την ικανότητά του να παραγει ηλεκτρική ενέργεια ανεξάρτητα από την ηλιακή συλλογή.

Επειδή το Solar Two ήταν ένα έργο επίδειξης και ήταν αρκετά μικρή συμβατική εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας, δεν θα μπορούσε να ανταγωνιστεί οικονομικά με την ηλεκτροπαραγωγή καύσης ορυκτών μονάδων χωρίς ειδικές επιδοτήσεις.

Ο πρώτος εμπορικός σταθμός ο οποίος χρησιμοποιεί τηγμένα άλατα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας και μέσο αποθήκευσης, είναι ο Gemasolar Thermosolar Plant. Ο σταθμός βρίσκεται στο Fuentes de Andalucía (περίχωρα Σεβίλλης), είναι ισχύος 17MW και συνδέθηκε στο δίκτυο το 2011. Έχει σχεδιαστεί για να παράγει 17GWh/έτος, δηλαδή με συντελεστή χρησιμοποίησης 74%.

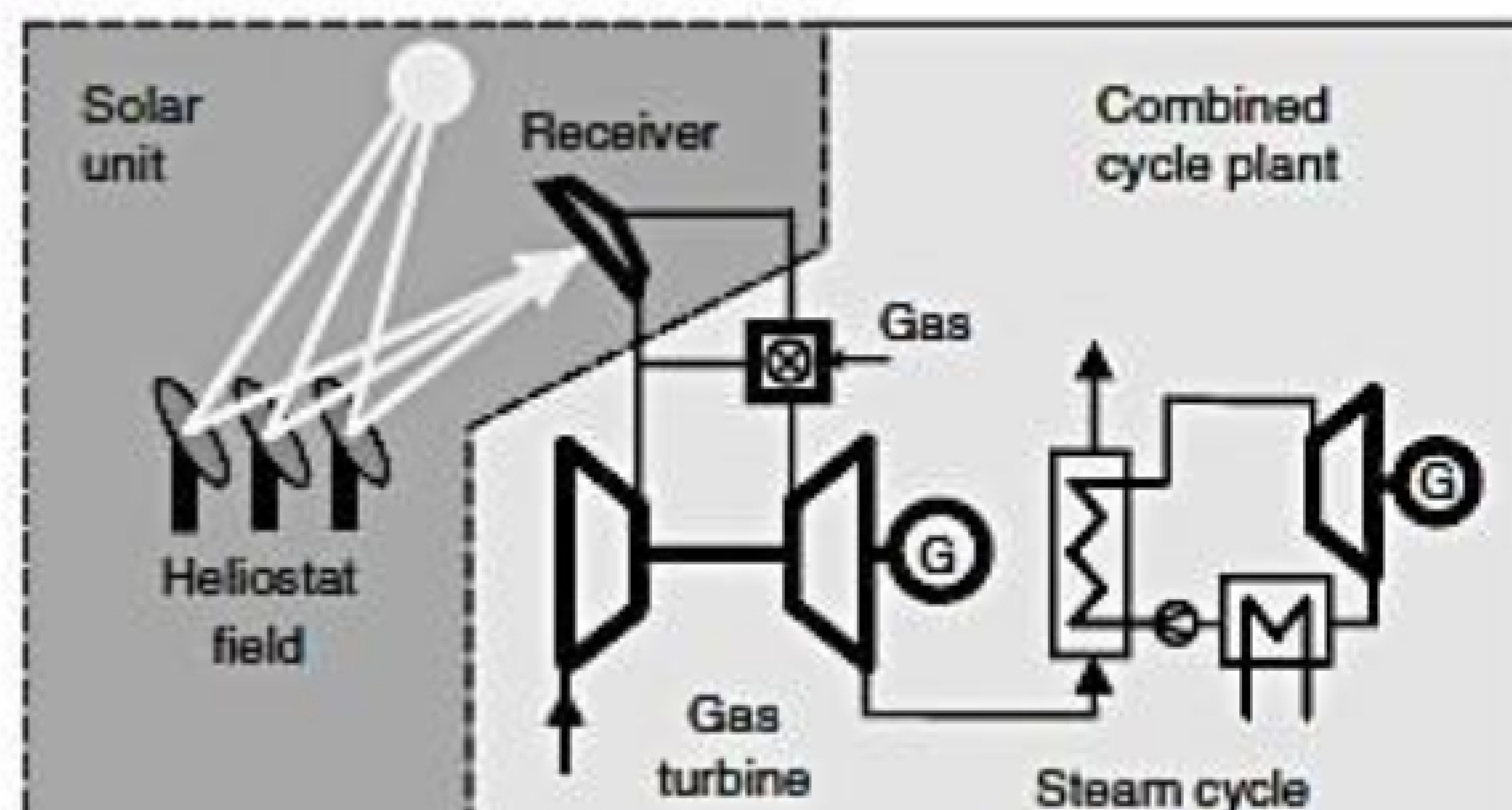
Το πεδίο των ηλιοστατών καταλαμβάνει επιφάνεια 304.750 m². Το ιδιαίτερα μεγάλο αυτό πεδίο δίνει την δυνατότητα τροφοδότησης του συστήματος θερμικής αποθήκευσης, ικανής να διατηρήσει την θερμότητα για 15 ώρες. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας κατά την διάρκεια της νύχτας ή κατά την διάρκεια μιας συννεφιασμένης ημέρας. Αυτή η αποθηκευτική ικανότητα κάνει την ηλιακή ενέργεια διαχειρίσιμη ώστε να προμηθεύεται βάσει της ζήτησης. Έτσι, ο σταθμός είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί ολόκληρη την ημέρα κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, με αποτέλεσμα ο συντελεστής ισχύος να φτάνει το 75%.



Εικ. 4.11 : Φωτογραφία του Gemasolar Thermosolar Plant

4.5.3. Ηλιακά Συστήματα Προθέρμανσης : Project SOLGATE

Διοχετευοντας την ηλιακή ενέργεια σε αεριοστροβίλους συνδυασμένου κύκλου έχουμε σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους υβριδικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Ένας ωραίος τρόπος για να το κάνουμε αυτό είναι η ηλιακή προθέρμανση του αεροσυμπιεστή απαλλαγής πριν από την είσοδο του στον καυστήρα αεριοστροβίλων.



Σχ. 4.12 : Ηλιακή προθέρμανση αέρα για το σύστημα αεριοστροβίλων

Η ηλιακή προθέρμανση του αέρα προσφέρει ανώτερες επιδόσεις, καθώς η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το θερμό αέρα μετατρέπεται άμεσα με υψηλή απόδοση σε σταθμό συνδυασμένου κύκλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους του πεδίου ηλιοστατών και συνεπώς χαμηλότερο συνολικό κόστος επένδυσης για το ηλιακό μέρος σε σύγκριση με την ηλιακή παραγωγή ατμού. Η ηλιακή προθέρμανση του αέρα έχει μεγάλες δυνατότητες για μείωση του κόστους της ηλιακής θερμικής ενέργειας.

Ο αέρας μπορεί να προθερμαίνεται από ηλιακούς δέκτες λιωμένου αλατιού (έως 560 °C) ή από δέκτες ογκομετρικής πίεσης στους οποίους, λόγω του περιορισμένου μεγέθους του παραθύρου από χαλαζία, μια σειρά από ενότητες δεκτών τοποθετούνται πάνω στον πύργο. Κάθε ενότητα αποτελείται από ένα δέκτη πίεσης με έναν δεύτερο συγκεντρωτή μπροστά. Ο δευτεροβάθμιος συγκεντρωτής με ένα

εξαγωγικό διάφραγμα (το οποίο βρίσκεται στο εστιακό επίπεδο του τομέα του ηλιοστάτη) ανασυγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο άνοιγμα του δοχείου πίεσης. Αφού περασει μέσα από το παράθυρο, η ακτινοβολία απορροφάται από τον ογκομετρικό απορροφητήρα, που μεταφέρει τη θερμότητα στο ρεύμα αέρα που ρέει μέσα από αυτό. Η ισχύς αναβαθμίζεται με την εγκατάσταση πολλών μονάδων σε κυψελωτό σχηματισμό για να καλύψει ολόκληρο το εστιακό σημείο. Στη συνέχεια οι ενότητες αλληλοσυνδέονται παράλληλα σε μια σειριακή σύνδεση.

Αυτή ήταν η διαμόρφωση που δοκιμάστηκε το 2001 σε ένα ευρωπαϊκό σχέδιο για την ενσωμάτωση των δεκτών με φυσικό αέριο στροβίλου σε ένα πλήρες ηλιακό υβριδικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής περίπου 250 kW_e. Το project (με την ονομασία SOLGATE) περιλάμβανε περαιτέρω αναπτυγμένη τεχνολογία δέκτη, κυρίως για να αυξήσει την θερμοκρασία στους 1000 °C και να μειώσει το κόστος . Το σύστημα εγκαταστάθηκε στην ηλιακή εγκατάσταση δοκιμών του πύργου CESA-1 στο PSA, της Ισπανίας, σε επίπεδο 60 m. Η διάταξη δοκιμής αποτελούταν από τρεις ενότητες δέκτη συνδεδεμένες σε σειρά με καυστήρα και γεννήτρια. Στο σύμπλεγμα του δέκτη, ο αέρας από τον συμπιεστή στροβίλου θερμαίνονταν από τους 290°C στους 1000 °C με ηλιακή ενέργεια . Μια παράκαμψη μείωνε την θερμοκρασία στους 800°C στην είσοδο του καυστήρα, λόγω των περιορισμών του σχεδιασμού του καυστήρα. Ο καυστήρας θα μπορούσε επίσης να τροφοδοτηθεί με φυσικό αέριο.

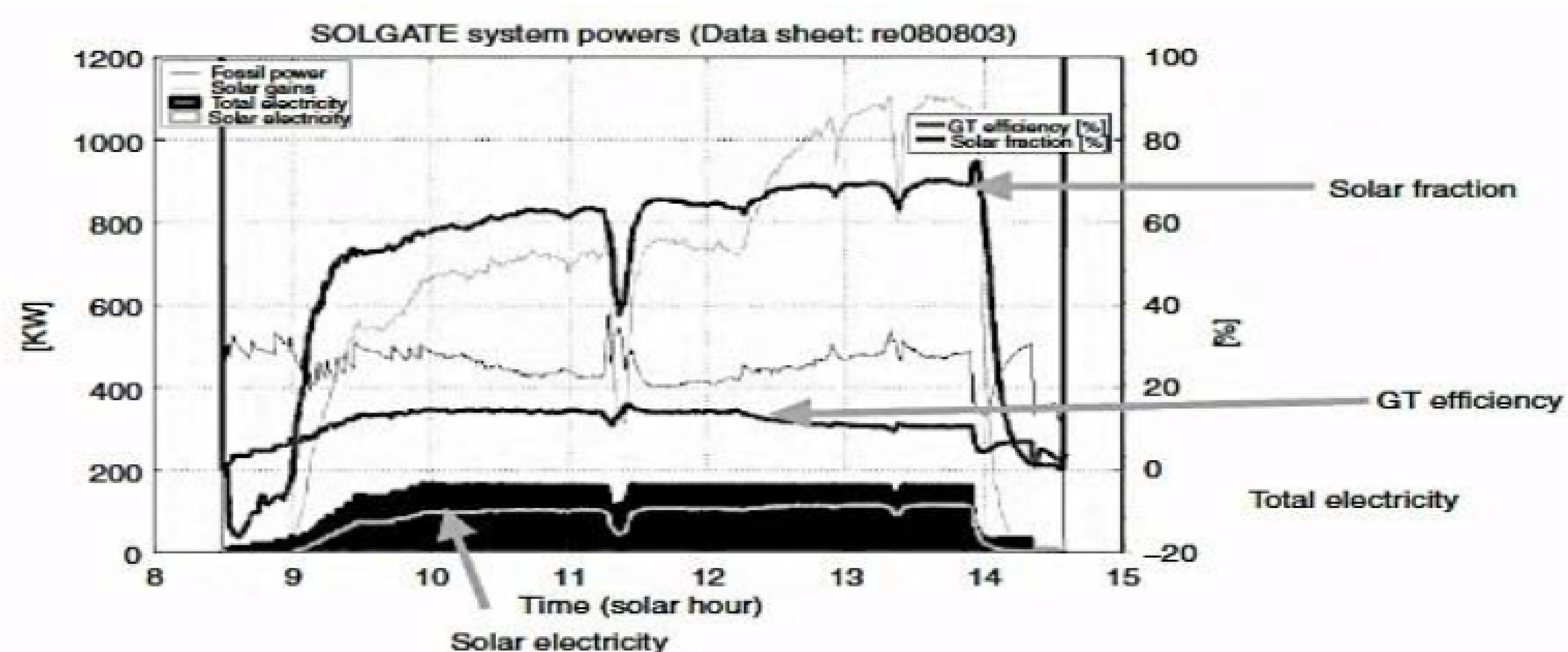
Για να αντιμετωπιστούν οι υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιήθηκε ένα εξαιρετικά πορώδες κεραμικό SiC απορροφητήρα με μέγεθος πόρων 20 μm. Για τον λέβητα χαμηλής θερμοκρασίας ο στόχος ήταν να επιτευχθεί μια συνολική μείωση του κόστους στο χαμηλής θερμοκρασίας στάδιο λειτουργίας με τη χρησιμοποίηση σχετικά απλών, λιγότερο δαπανηρών μονάδων. Η επιλογή ήταν ένα πηνίο που συνδέεται με τον εξαγωγικό δευτεροβάθμιο συγκεντρωτή, στον οποίο ο αέρας θερμαίνεται, καθώς ρέει μέσα από τους σωλήνες. Οι περιτυλιγμένοι σωλήνες του

πηνίου ήταν πολύ ευέλικτοι και έτσι μειώνονταν οι μηχανικές καταπονήσεις θερμικής διαστολής του υλικού σωλήνα. Η τελική διάταξη αποτελούνταν από 16 σωλήνες μήκους 2,3 m και διαμέτρου 28 mm που συνδέονταν παράλληλα. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς σχεδιασμού, οι αποροφητήρες θα έπρεπε να είχαν μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 200 K και μια σχετική πτώση πίεσης 100 mbar.

Μετά τον νέο κεραμικό απορροφητήρα, την εγκατάσταση του συστήματος ψύξης και το παράθυρο του σαρωτή IR, το σύστημα ξανάρχισε τη λειτουργία του τον Ιούνιο του 2003. Η μέγιστη θερμοκρασία του δέκτη 960°C επιτεύχθηκε. Από τα πειραματικά δεδομένα η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μονάδας του δέκτη είχαν προκύψει με βάση τις μετρήσεις της προσπίπτουσας ροής.

Η αποτελεσματικότητα κυμαίνονταν μεταξύ 68% και 79%. Η πτώση πίεσης, μέσω του συμπλέγματος του δέκτη ήταν περίπου 120 mbar. Τα ηλιακά κλάσματα έφθασαν το 70%, και το υπόλοιπο συνεισφοράς ήταν από τα καύσιμα. Η ηλιακή απόδοση του αεριοστροβίλου SOLGATE, στην ονομαστική λειτουργία των 230 kWe ήταν περίπου 20%.

Η παραγωγή ενέργειας σε 960°C ήταν περίπου 190 kWe (130 kWe εκ των οποίων ήταν από την ηλιακή συνεισφορά). Η συνολική θερμική αποδοτικότητα του συμπλέγματος του δέκτη εκτιμάται ότι ήταν 77% σε 800°C και 70% σε 950°C.



Σχ. 4.12 : Ηλιακή προθέρμανση αέρα για το σύστημα αεριοστροβίλων

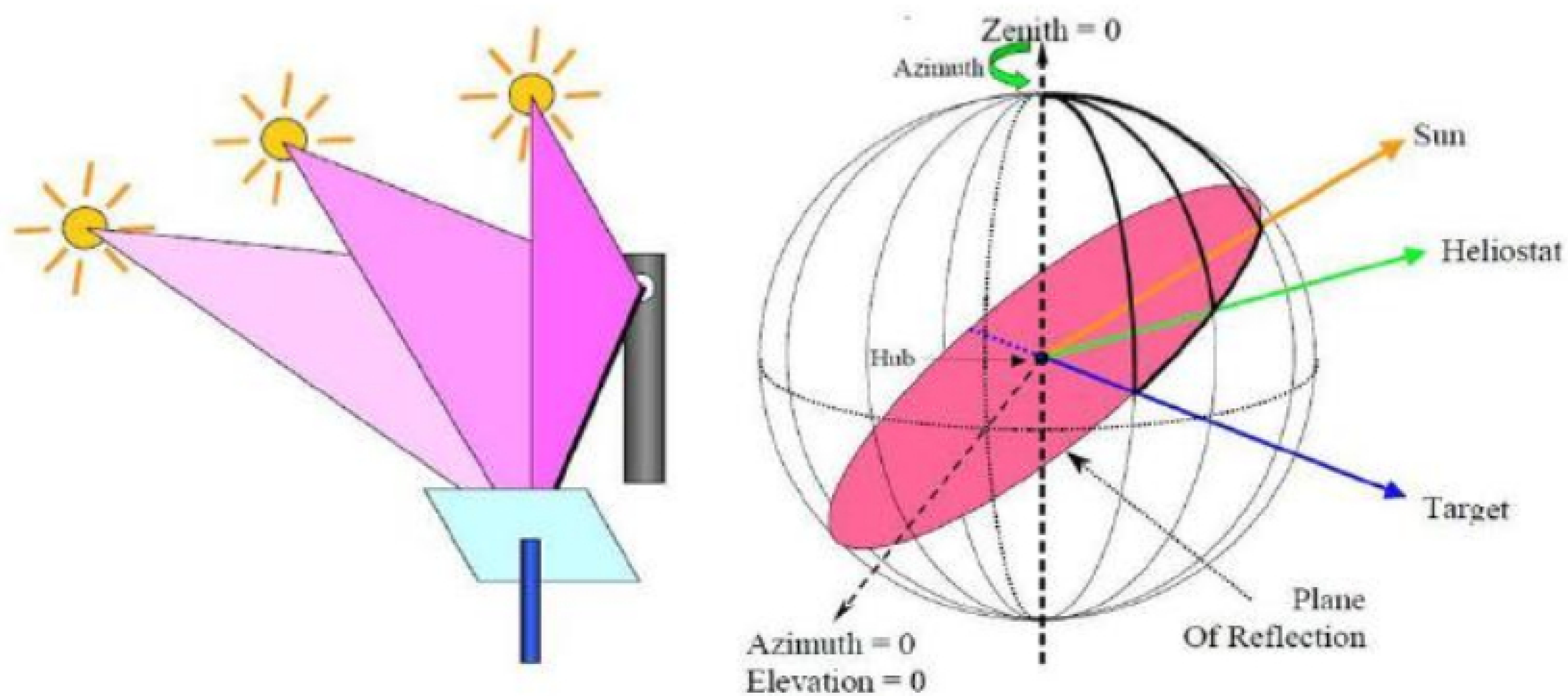
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ : ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΣΕ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΧΟ

5. Εισαγωγή

Στο πέμπτο Κεφάλαιο περιγράφεται αλγόριθμος μέσω του οποίου δίνεται ο κατάλληλος προσανατολισμός που πρέπει να έχει ένας ηλιοστάτης (**Heliostat**) έτσι ώστε να ανακλά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία του Ηλίου (**Sun**) στο σημείο που θέλουμε να στοχεύσουμε (**Target**) για κάθε χρονική στιγμή μέσα στο έτος. Ο προσανατολισμός του ηλιοστάτη ώστε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να ανακλάται σε αυτόν και να στοχεύει τον στόχο μας, γίνεται από τους μηχανισμούς παρακολούθησης που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.7.

5.1. Περιγραφή εξισώσεων

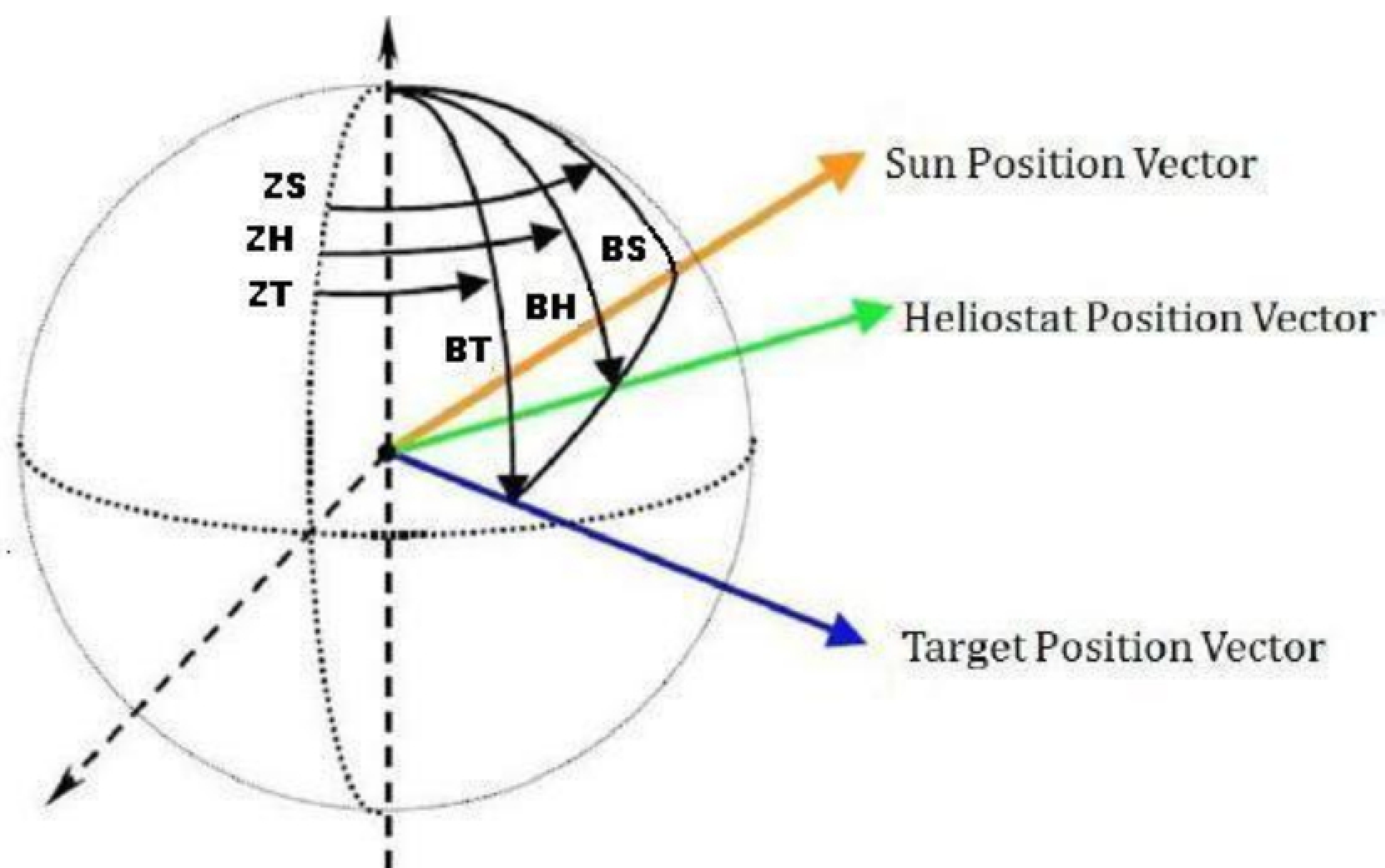
Το επίπεδο ανάκλασης για έναν ηλιοστάτη καθορίζεται από τα κέντρα του ηλιοστάτη, του ήλιου και του στόχου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Το κέντρο του ηλιοστάτη όπως επίσης και του στόχου βρίσκονται σε σταθερές τοποθεσίες για οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Το κέντρο του ήλιου όμως, στο άκρο του επιπέδου ανάκλασης, αλλάζει θέση καθώς η Γη περιστρέφεται. Για να ανακλά σωστά ο ηλιοστάτης την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον στόχο, θα πρέπει το διάνυσμα θέσης του ηλιοστάτη να βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ του ήλιου και του στόχου στο επίπεδο ανάκλασης.



Σχ. 5.1 : Επίπεδο ανάκλασης για ηλιοστάτες

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ότι το επίπεδο ανάκλασης περιστρέφεται γύρω από το διάνυσμα του στόχου και είναι προσανατολισμένο με βάση τη θέση του ήλιου στο ουρανό.

Για να καθορίσουμε το διάνυσμα θέσης του ηλιοστάτη, χρειαζόμαστε τον νόμο των ημιτόνων και τον νόμο των συνημιτόνων και γι'αυτό θα χρησιμοποιήσουμε μια διαδικασία γνωστή ως **τριγωνισμός**, εφαρμόζοντας τα γνωστά διανύσματα θέσης του ήλιου και του στόχου για οποιοσδήποτε δοσμένες χρονικές στιγμές. Στο σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων, τα διανύσματα θέσης του ηλιοστάτη, του ήλιου και του στόχου καθορίζονται από τις αντίστοιχες γωνίες ύψους (η γωνία β , η οποία ονομάζεται και γωνία ζενίθ) και αζιμούθιου (γωνία Z). Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία στο σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων.

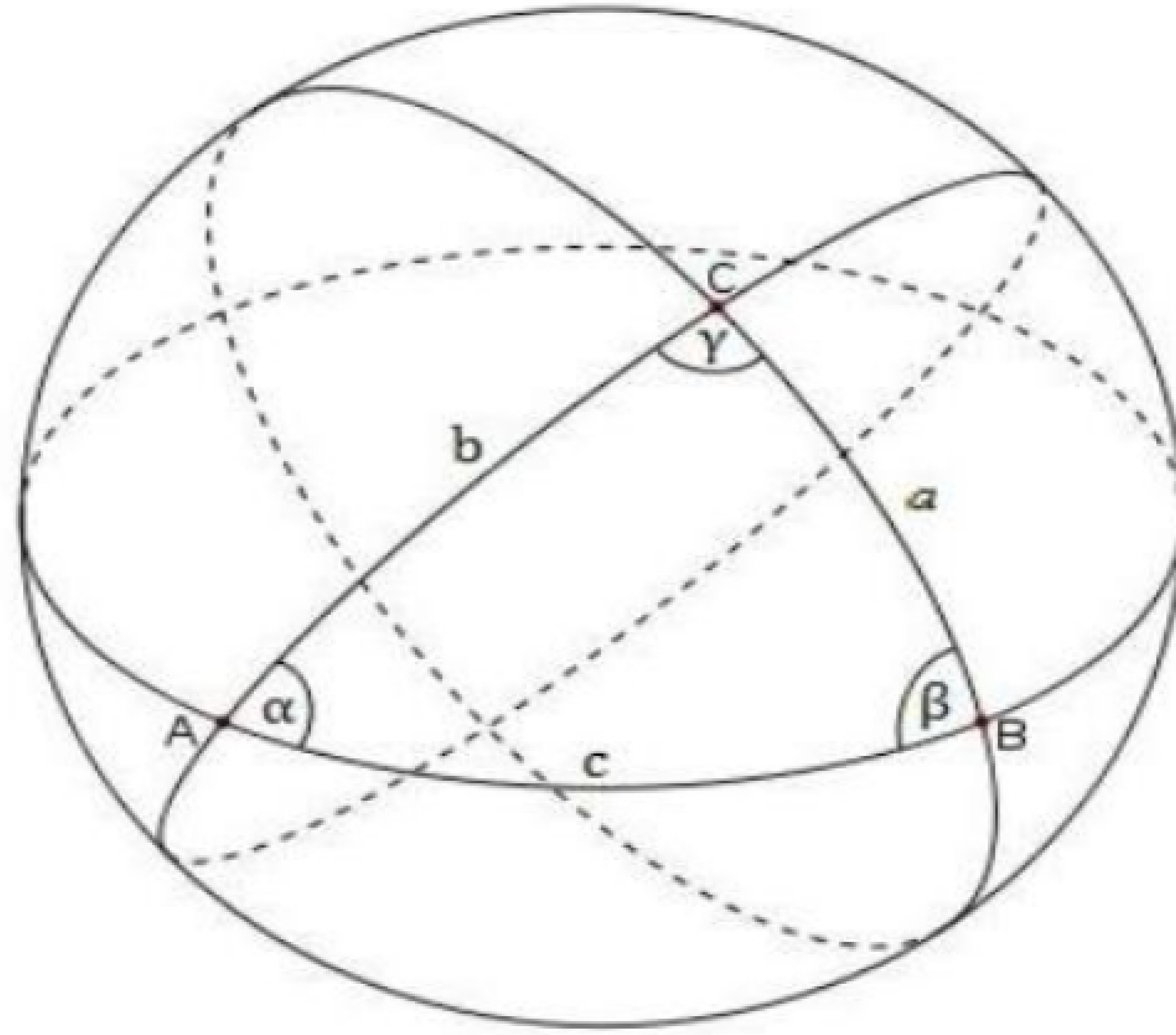


Σχ. 5.2 : Γεωμετρία των διανυσμάτων θέσης για τον ηλιοστάτη, τον ήλιο και τον στόχο

- BS : Ηλιακό Ύψος (γωνία ζενίθ)
- ZS : Ηλιακό Αζιμούθιο
- BH : Ύψος Ηλιοστάτη
- ZH : Αζιμούθιο Ηλιοστάτη
- BT : Ύψους Στόχου
- ZT : Αζιμούθιο Στόχου

Όπως γνωρίζουμε, ο νόμος των ημιτόνων μας λέει ότι οι πλευρές κάθε τριγώνου είναι ανάλογες προς τα ημίτονα των απέναντι γωνιών του ενώ με το νόμο των συνημιτόνων, αν σε ένα τρίγωνο γνωρίζουμε τις τρεις πλευρές του ή δύο πλευρές και την περιεχόμενη γωνία τους, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τα υπόλοιπα πρωτεύοντα στοιχεία του.

Στο σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων ο νόμος των ημιτόνων και ο νόμος των συνημιτόνων προσαρμόζονται έτσι ώστε να συσχετίζουν τις πλευρές και τις γωνίες των σφαιρικών τριγώνων. Παίρνοντας υπόψιν το σφαιρικό τρίγωνο που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3



Σχ. 5.3 : Τρίγωνο σε σφαιρικές συντεταγμένες

ο νόμος των ημιτόνων σε σφαιρικές συντεταγμένες μας δίνει :

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

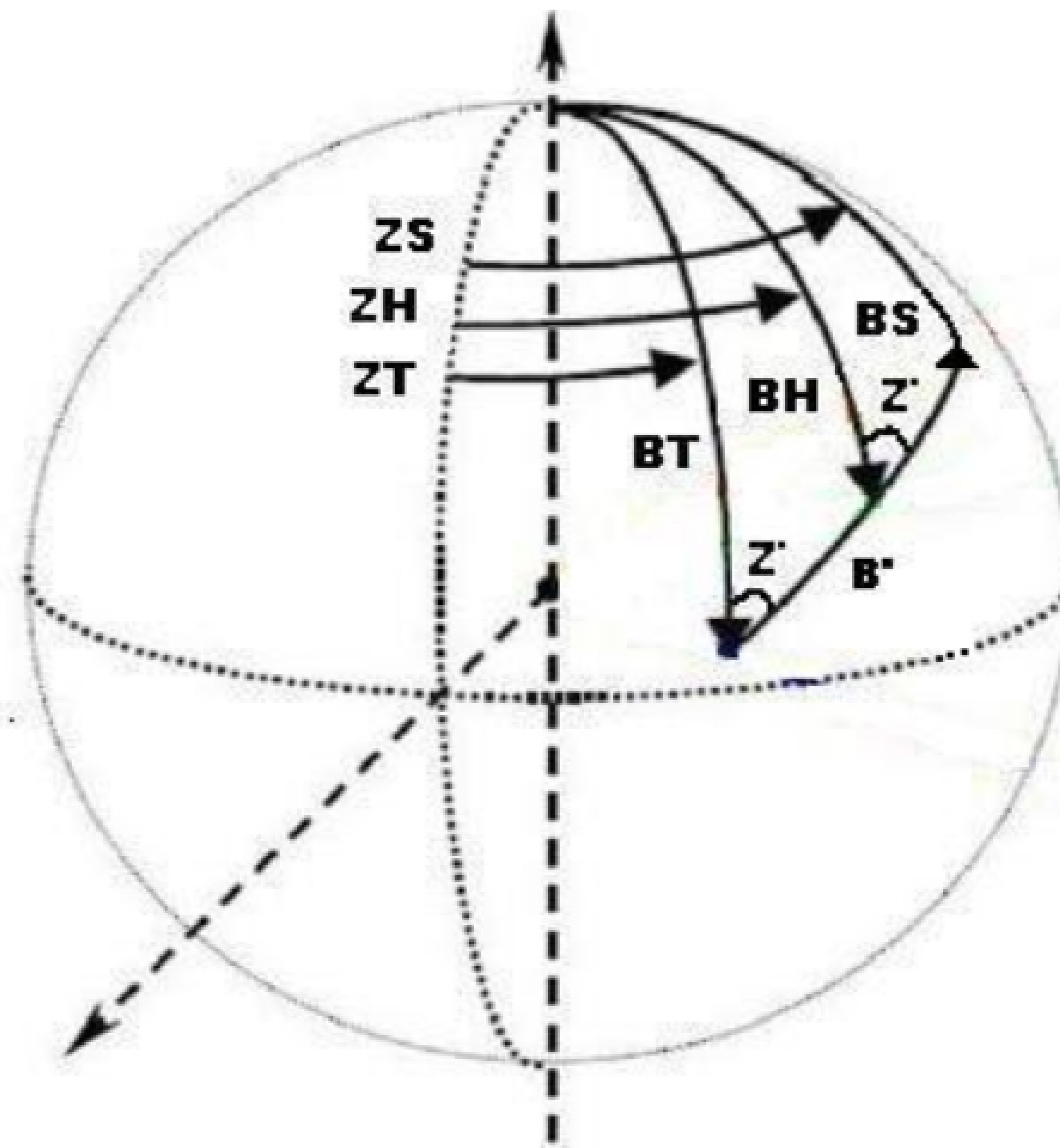
Αντίστοιχα, ο νόμος των συνημιτόνων για σφαιρικές συντεταγμένες μας δίνει ότι οι γωνίες ενός σφαιρικού τριγώνου είναι ίσες με :

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= -\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma \cos a \\ \cos \beta &= -\cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \cos b \\ \cos \gamma &= -\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \cos c \end{aligned}$$

Ο νόμος των συνημιτόνων στις σφαιρικές συντεταγμένες μας δίνει επίσης ότι το μήκος των πλευρών του σφαιρικού τριγώνου είναι :

$$\begin{aligned} \cos a &= \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \alpha \\ \cos b &= \cos c \cos \alpha + \sin c \sin \alpha \cos \beta \\ \cos c &= \cos \alpha \cos b + \sin \alpha \sin b \cos \gamma \end{aligned}$$

Η γεωμετρία των διανυσμάτων θέσης του ηλιοστάτη, του ήλιου και του σημείου στόχευσης δημιουργούν 2 σφαιρικά τρίγωνα στον τρισδιάστατο χώρο. Το σχήμα 5.4 καθορίζει αυτά τα 2 σφαιρικά τρίγωνα.



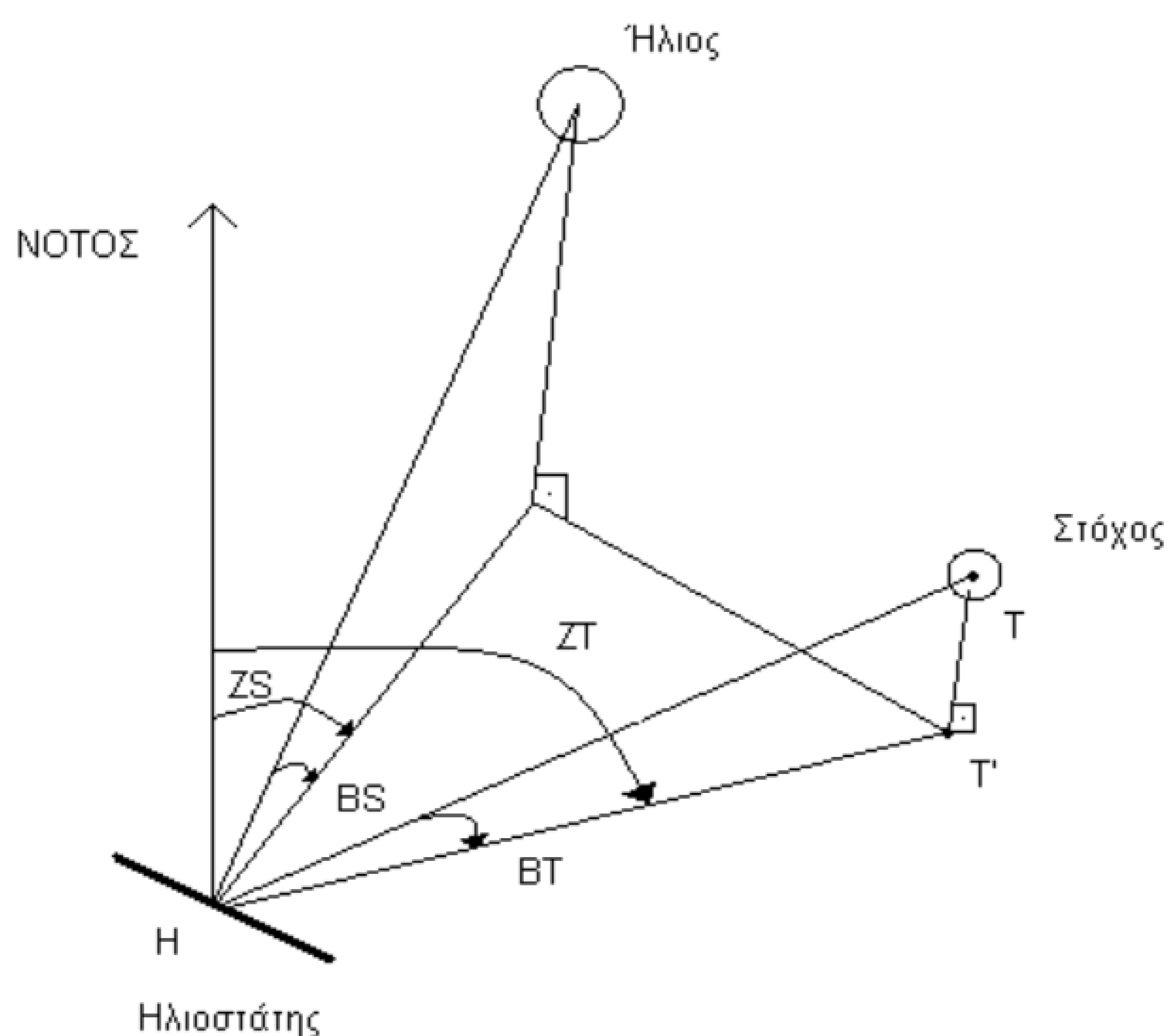
Σχ. 5.4 : Τα σφαιρικά τρίγωνα που δημιουργούνται από τα διανύσματα θέσης του ηλιοστάτη, του ήλιου και του σημείου στόχευσης

Το ηλιακό αζιμούθιο (γωνία ZS) και το ηλιακό ύψος (γωνία βS) είναι γνωστά για κάθε χρονική στιγμή με βάση το θεωρητικό μοντέλο που περιγράψαμε νωρίτερα. Το αζιμούθιο (γωνία ZT) και η γωνία ύψους (γωνία βT) του στόχου μπορούν να υπολογιστούν εύκολα, βάσει της τοποθεσίας του στόχου και της τοποθεσίας του ηλιοστάτη ως εξής :

Για την γωνία ZT (αζιμούθιο Στόχου) : Αφού ορίσω το σημείο στόχευσης, φέρνω κάθετη ευθεία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους και ορίζω έτσι την προβολή του σημείου στόχευσης στο επίπεδο του εδάφους. Από το σημείο του Ηλιοστάτη (του κέντρου του) μέχρι την προβολή του σημείου στόχευσης στο οριζόντιο έδαφος ορίζεται το ευθύγραμμο τμήμα HT' . Το HT' σχηματίζει γωνία ZT με την ημιευθεία που έχει ως αρχή το κέντρο του Ηλιοστάτη και κατεύθυνση προς τον Νότο. Το Αζιμούθιο του Στόχου (ZT) θα παίρνει θετικές τιμές όταν το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το κέντρο του Ηλιοστάτη με τον Ήλιο βρίσκεται δεξιά, όπως κοιτάει ο Ηλιοστάτης τον Νότο (Δυτικά δηλαδή) και αρνητικές τιμές όταν βρίσκεται αριστερά όπως κοιτάει ο Ηλιοστάτης τον Νότο (Ανατολικά δηλαδή).

Για την γωνία βT (ύψος Στόχου) : Πρόκειται για την γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα HT' με το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το κέντρο του Ηλιοστάτη με το κέντρο του στόχου (HT). Το ύψος του Στόχου (βT) θα είναι πάντα θετικό.

Τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ. 5.5 : Οι γωνίες βT και ZT όπως σχηματίζονται από τον Στόχο, το κέντρο του Ηλιοστάτη και τον Νότο

Επομένως, ο νόμος των ημιτόνων και ο νόμος των συνημιτόνων μπορεί να εφαρμοστεί σε σφαιρικές συντεταγμένες για την εύρεση του αζιμούθιου (ZH) και του ύψους (βH) του ηλιοστάτη. Οι δύο αυτές γωνίες υπολογίζονται σε 2 βήματα. Το 1^ο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ του σημείου στόχευσης και του ήλιου (την ονομάζουμε β'), έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το μεσοδιάστημα

το οποίο θα πρέπει να δείχνει το διάνυσμα θέσης του ηλιοστάτη. Εφαρμόζοντας τον νόμο των συνημιτόνων για να υπολογίσουμε την γωνία β' έχουμε :

$$\beta' = \cos^{-1}(\cos(\beta_S) \cdot \cos(\beta_T) + \sin(\beta_S) \cdot \sin(\beta_T) \cdot \cos(Z_S - Z_T))$$

Ενώ ο νόμος των ημιτόνων μας δίνει την παρακάτω σχέση :

$$\frac{\sin(Z_S - Z_T)}{\sin(\beta')} = \frac{\sin(Z')}{\sin(\beta_S)}$$

Λύνοντας τις 2 παραπάνω εξίσωσεις ως προς την ενδιαμέση γωνία Z' προκύπτει :

$$Z' = \sin^{-1}\left(\sin(\beta_S) \frac{\sin(Z_S - Z_T)}{\sin(\beta')}\right)$$

Στο 2^ο βήμα, έχοντας υπολογίσει τις ενδιαμέσες γωνίες (β' , Z') μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τις επιθυμητές γωνίες Z_H (αζιμούθιο του ηλιοστάτη) και B_H (ύψος του ηλιοστάτη). Χρησιμοποιώντας και πάλι τον νόμο των συνημιτόνων βρίσκουμε για την B_H :

$$\beta_H = \cos^{-1}\left(\cos(\beta_T) \cos\left(\frac{\beta'}{2}\right) + \sin \beta_T \sin\left(\frac{\beta'}{2}\right) \cos(Z')\right)$$

Στη συνέχεια, ο νόμος των ημιτόνων μας δίνει την σχέση :

$$\frac{\sin(Z_H - Z_T)}{\sin\left(\frac{\beta'}{2}\right)} = \frac{\sin(Z')}{\sin(\beta_H)}$$

Τελικά, το αζιμούθιο του ηλιοστάτη (Z_H) προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση :

$$Z_H = \sin^{-1}\left(\sin\left(\frac{\beta'}{2}\right) \frac{\sin(Z')}{\sin(\beta_H)}\right) + Z_T$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

6. Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία αλγορίθμου, ο οποίος με δεδομένα την ημερομηνία, την ώρα, την ζώνη της ώρας, τις γεωγραφικές συντεταγμένες του Ηλιοστάτη (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) και του Στόχου (γωνία ύψους και αζιμούθια γωνία) θα δίνει ως έξοδο τις κατάλληλες τιμές για τις γωνίες βΗ (ύψος Ηλιοστάτη) και ΖΗ (αζιμούθιο Ηλιοστάτη) που πρέπει να έχει το διάνυσμα θέσης του Ηλιοστάτη, ώστε να βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ του ήλιου και του σημείου στόχευσης στο επίπεδο ανάκλασης, και επομένως να ανακλά σωστά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον στόχο όπως αναφέρθηκε και στο πέμπτο κεφάλαιο.

Για τον προγραμματισμό του αλγόριθμου επιλέχθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον Labview, της National Instruments. Στο εργαστήριο υπήρχε κατασκευασμένη εφαρμογή σε περιβάλλον Labview βασισμένη στο θεωρητικό μοντέλο Κίνησης του Ηλίου που παρουσιάστηκε στο Πρώτο Κεφάλαιο, με την οποία αν συνδέσουμε ηλιακό ιχνηλάτη, τότε εκείνος εντοπίζει σε κάθε χρονική στιγμή της ημέρας την θέση του Ήλιου. Με κατάλληλη τροποποίηση της υπάρχουσας εφαρμογής, επιτεύχθηκε το ζητούμενο της εργασίας.

6.1. NI Labview

Το Labview είναι ένα προγραμματιστικό περιβάλλον, κατασκευασμένο για την επικοινωνία οργάνων μέτρησης με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι εφαρμογές πραγματοποιούνται με γραφικό προγραμματισμό στην block diagram επιφάνεια ενώ η πρόσοψή του, την οποία και χρησιμοποιεί ο χρήστης, θυμίζει περιβάλλον ψηφιακού εργαστηρίου και ονομάζεται front panel.

Επιλέχθηκε η χρήση του καθώς με το Labview αφενός μπορεί να δημιουργηθεί ένα φιλικό για τον χρήστη περιβάλλον, αφετέρου γιατί έχει την δυνατότητα να συνδεθεί κατάλληλα με τον ηλιακό ιχνηλάτη (tracker) που διαθέτει το εργαστήριο, σε περίπτωση που γινόταν πειραματική εφαρμογή του αλγορίθμου παρακολούθησης και ανάκλασης.

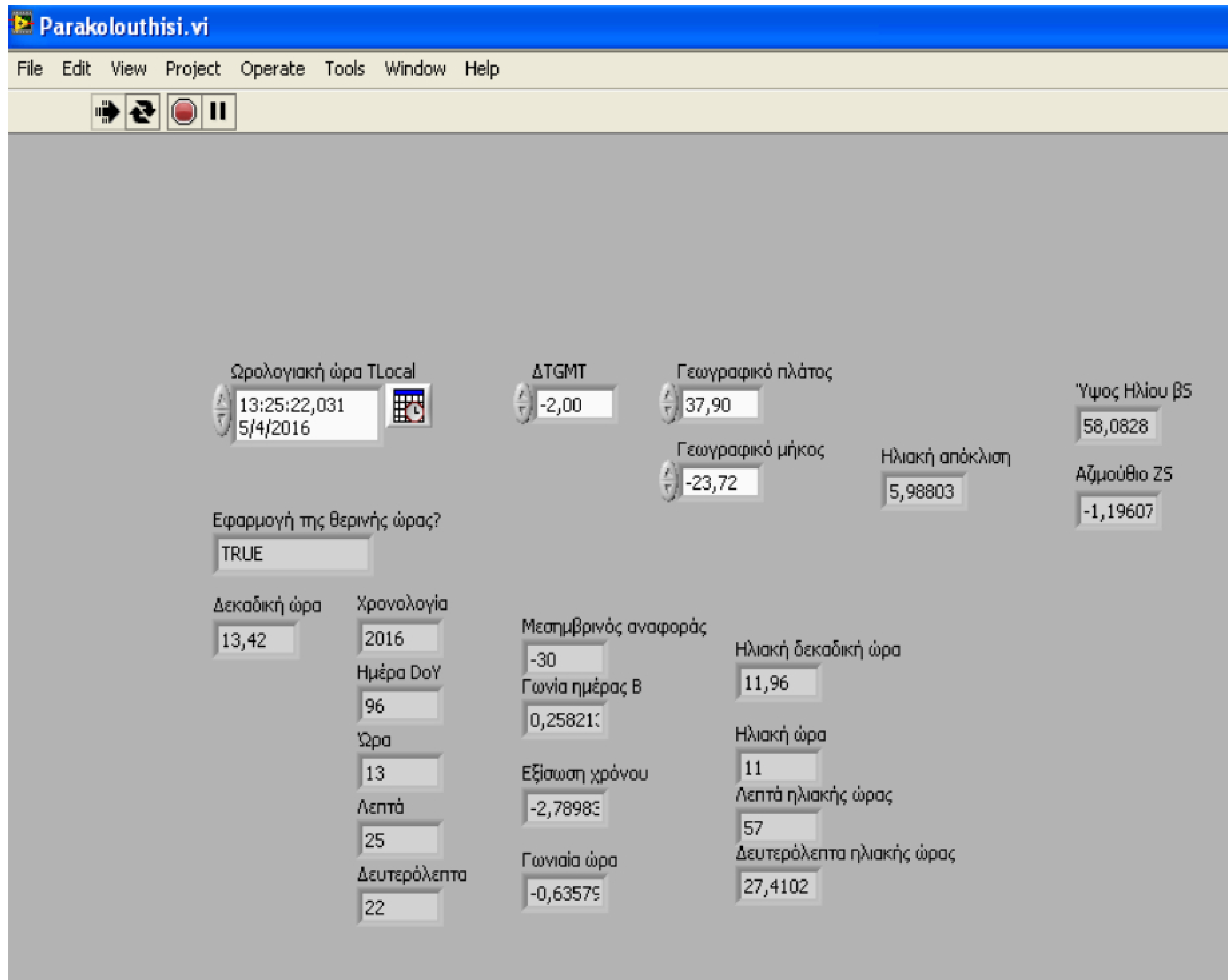
6.2. Εφαρμογή υπολογισμού του αζιμούθιου και του ύψους του ηλίου οποιαδήποτε στιγμή.

Για την παρακολούθηση της Ηλιακής Τροχιάς χρησιμοποιήθηκε εφαρμογή η οποία δέχεται ως εισόδους την ημερομηνία, την ώρα, τη ζώνη της ώρας και τις γεωγραφικές συντεταγμένες και υπολογίζει για κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου (ύψος – αζιμούθιο) καθώς και τα υπόλοιπα ηλιακά μεγέθη.

Επειδή έχει νόημα ο εντοπισμός της θέσης του ηλίου για τις ώρες της ηλιοφάνειας η οριακή κατώτερη στιγμή του ύψους γίνεται η μηδενική τιμή και ανώτερη η 90° γιατί στην Ελλάδα δεν ξεπερνιέται, ενώ το αζιμούθιο περιορίζεται σε μια κίνηση από -120° έως 120° .

Γίνεται πρόβλεψη και για την περίπτωση της θερινής ώρας ούτως ώστε να αφαιρείται αυτή όταν ισχύει από τους υπολογισμούς.

Όταν ο χρήστης “τρέξει” στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Labview την εφαρμογή που περιγράφηκε, βλέπει στην οθόνη του την παρακάτω εικόνα.



Εικ. 6.1 : Εκτελώντας την εφαρμογή για εύρεση του Ηλιακού Ύψους και Αζιμουθίου με δεδομένα την ημερομηνία, την ώρα, την ζώνη της ώρας και των γεωγραφικών συντεταγμένων.

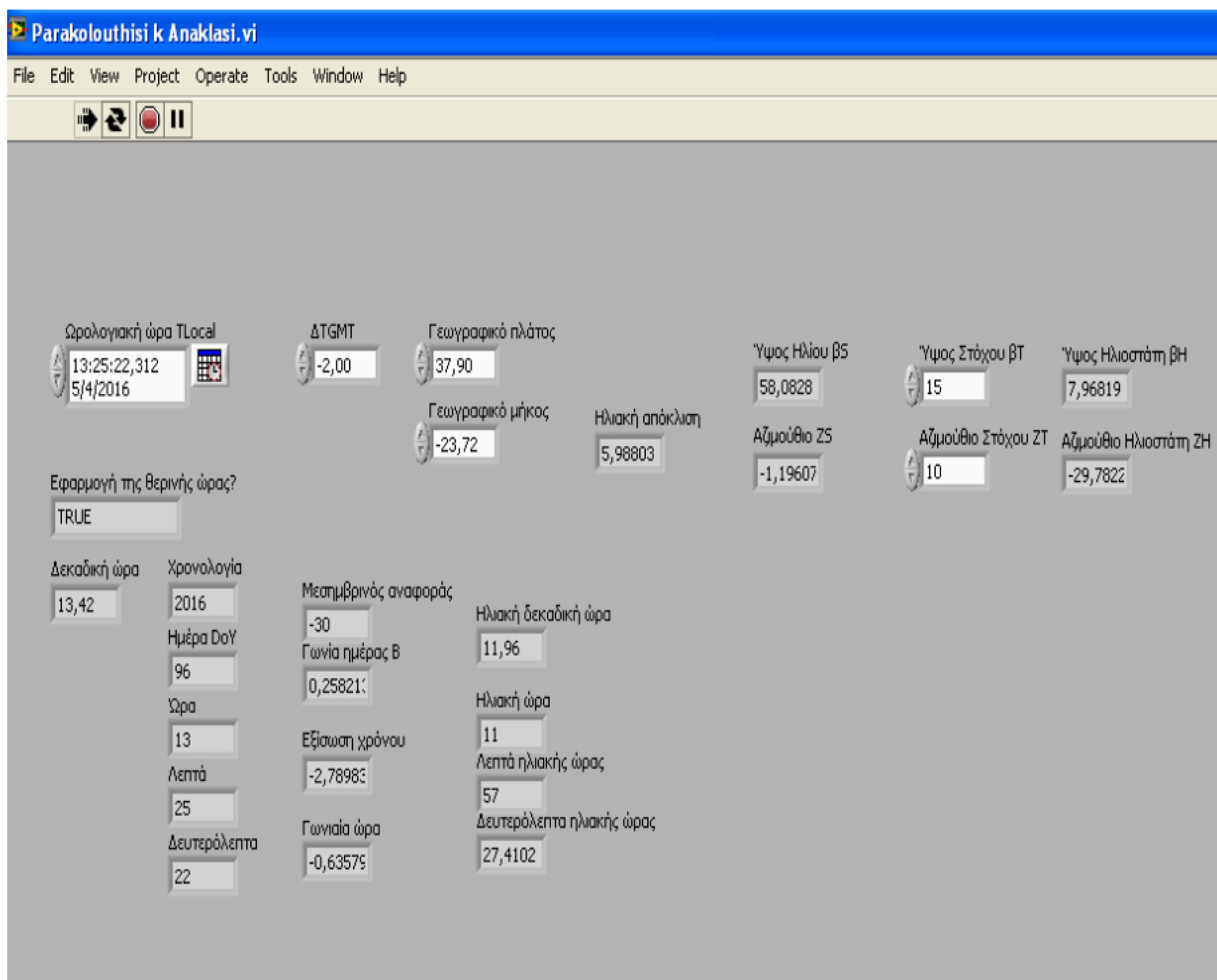
Στο παράδειγμα που φαίνεται στην εικόνα 6.1 τοποθετήσαμε ως εισόδους ημερομηνία και ώρα, την ζώνη της ώρας και το γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας. Το πρόγραμμα, αφού υπολόγισε τα ηλιακά χαρακτηριστικά, μας δίνει ως έξοδο το Ηλιακό Ύψος βS και το Ηλιακό Αζιμούθιο ZS.

6.3. Εφαρμογή υπολογισμού του αζιμούθιου και του ύψους του διανύσματος θέσης του Ηλιοστάτη οποιαδήποτε στιγμή, με βάση τη θέση του Ήλιου

Στην εφαρμογή που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.1, τροποποιήσαμε τον κώδικα του προγράμματος ως εξής: εκτός από τις υπάρχουσες εισόδους (ημερομηνία, ώρα, ζώνη ώρας, συντεταγμένες) τοποθετήσαμε και 2 νέες.

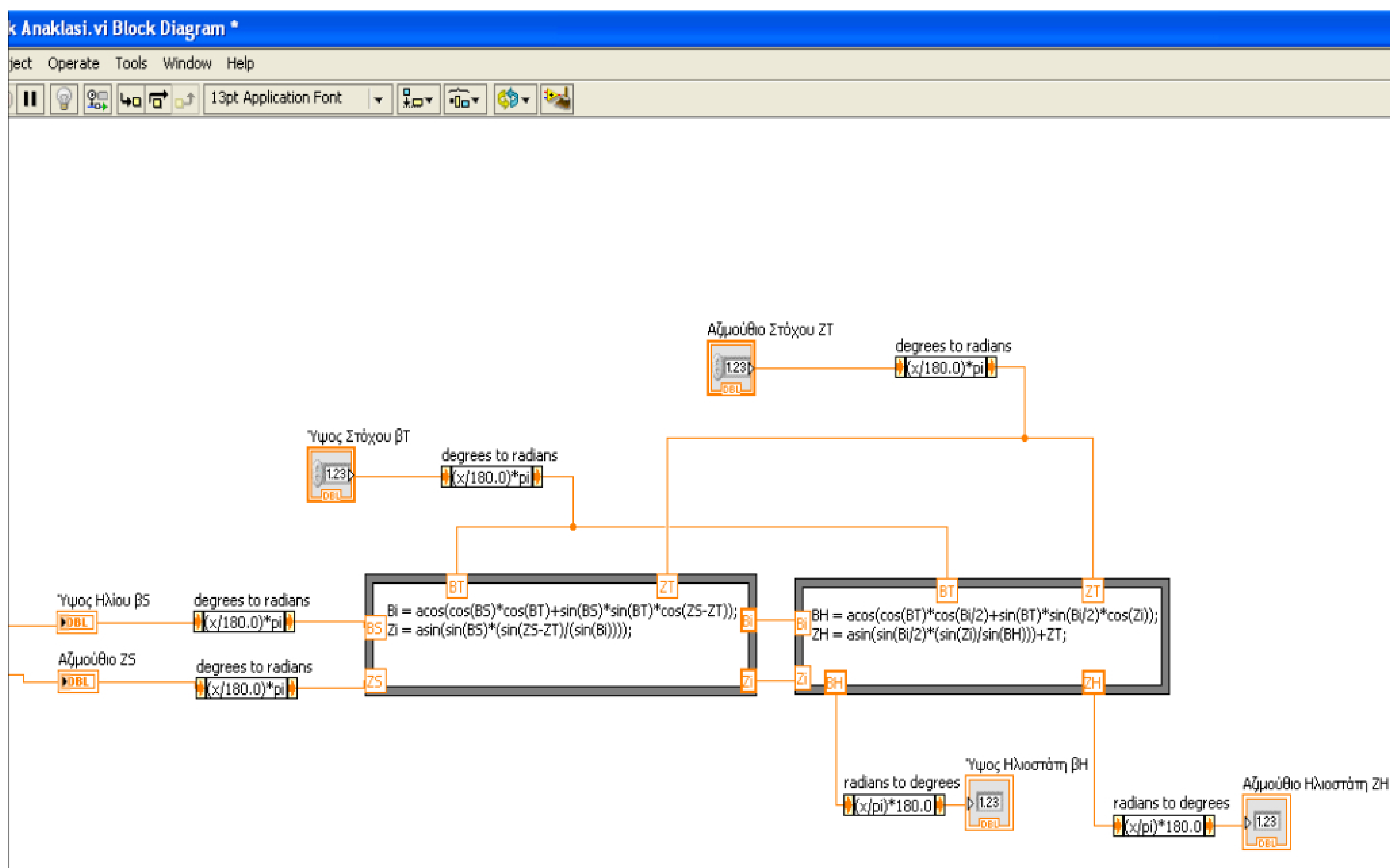
Το ύψος (β_T) και το αζιμούθιο (Z_T) του στόχου μας. Στη συνέχεια, με δεδομένες τις 4 γωνίες του Ήλιου και του Στόχου ($\beta_s, Z_s, \beta_T, Z_T$) εφαρμόζοντας τις εξισώσεις που αναλύθηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο, το πρόγραμμα μας δίνει για κάθε χρονική στιγμή που θέλουμε να εξετάσουμε, το ύψος (β_H) και το αζιμούθιο (Z_H) που πρέπει να έχει ο ηλιακός ιχνηλάτης, ώστε το κάτοπτρο να ανακλά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον στόχο μας.

Στην εικόνα 6.2 παρουσιάζεται το περιβάλλον στο οποίο καλείται ο χρήστης να δώσει τις εισόδους για να “τρέξει” το πρόγραμμα, ενώ στην εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η δομή του αλγορίθμου.



Εικ. 6.2 : Εκτελώντας την εφαρμογή για εύρεση των γωνιών ύψους και αζιμούθιου του Ηλιοστάτη, με δεδομένα την ημερομηνία, την ώρα, την ζώνη της ώρας, τις γεωγραφικές συντεταγμένες, τις γωνίες ύψους και αζιμουθίου του στόχου.

Στο παράδειγμα που φαίνεται στην εικόνα 6.2 τοποθετήσαμε ως εισόδους: ημερομηνία και ώρα, την ζώνη της ώρας, το γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας, όπως επίσης και το ύψος και το αζιμούθιο του στόχου. Το πρόγραμμα, αφού υπολόγισε τα ηλιακά χαρακτηριστικά, υπολογίζει το Ηλιακό Ύψος β_S και το Ηλιακό Αζιμούθιο Z_S και στη συνέχεια μας δίνει ως έξοδο το ύψος (β_H) και το αζιμούθιο (Z_H) του διανύσματος θέσης του Ηλιοστάτη, έτσι ώστε αυτό να βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ του ήλιου και του σημείου στόχευσης στο επίπεδο ανάκλασης, όπως περιγράφηκε στο πέμπτο κεφάλαιο.



Εικ. 6.3 : Το γραφικό περιβάλλον (block diagram) του προγράμματος που υλοποιεί τον υπολογισμό των β_H και Z_H . Όπως μπορεί να παρατηρήσει κάποιος, χρησιμοποιούνται εντολές για κατάλληλες μετατροπές από μοίρες σε rad και το αντίστροφο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

7. Εισαγωγή

Στο Έβδομο Κεφάλαιο παρουσιάζονται διαγράμματα που προέκυψαν από προσομοιώσεις του Αλγορίθμου στο Labview, μαζί με τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές

7.1. Προσομοιώσεις για 4 ημέρες του χρόνου, μία από κάθε εποχή

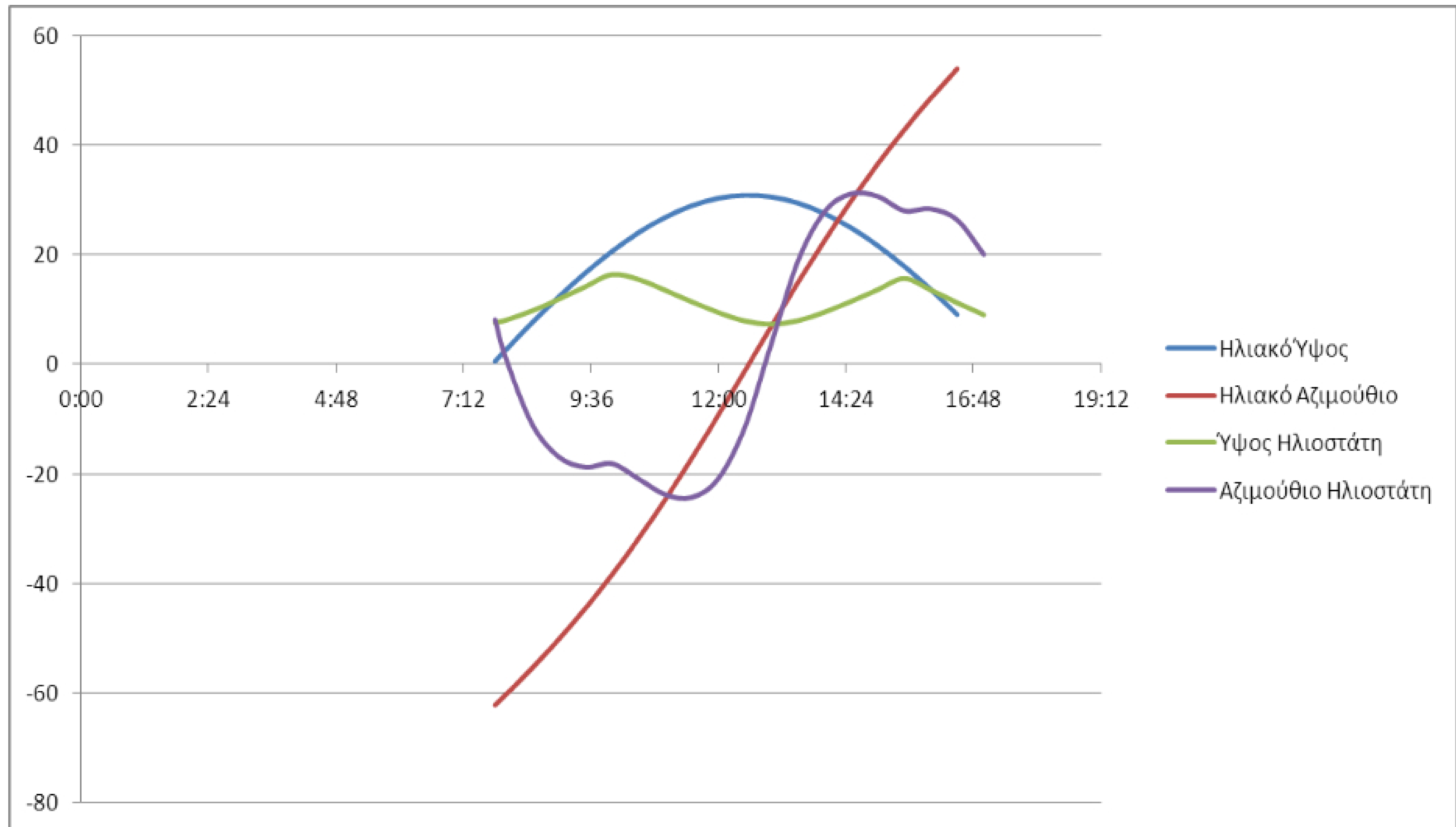
Από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις ημέρες :

- 15 Ιανουαρίου
- 15 Απριλίου
- 15 Ιουλίου
- 15 Οκτωβρίου

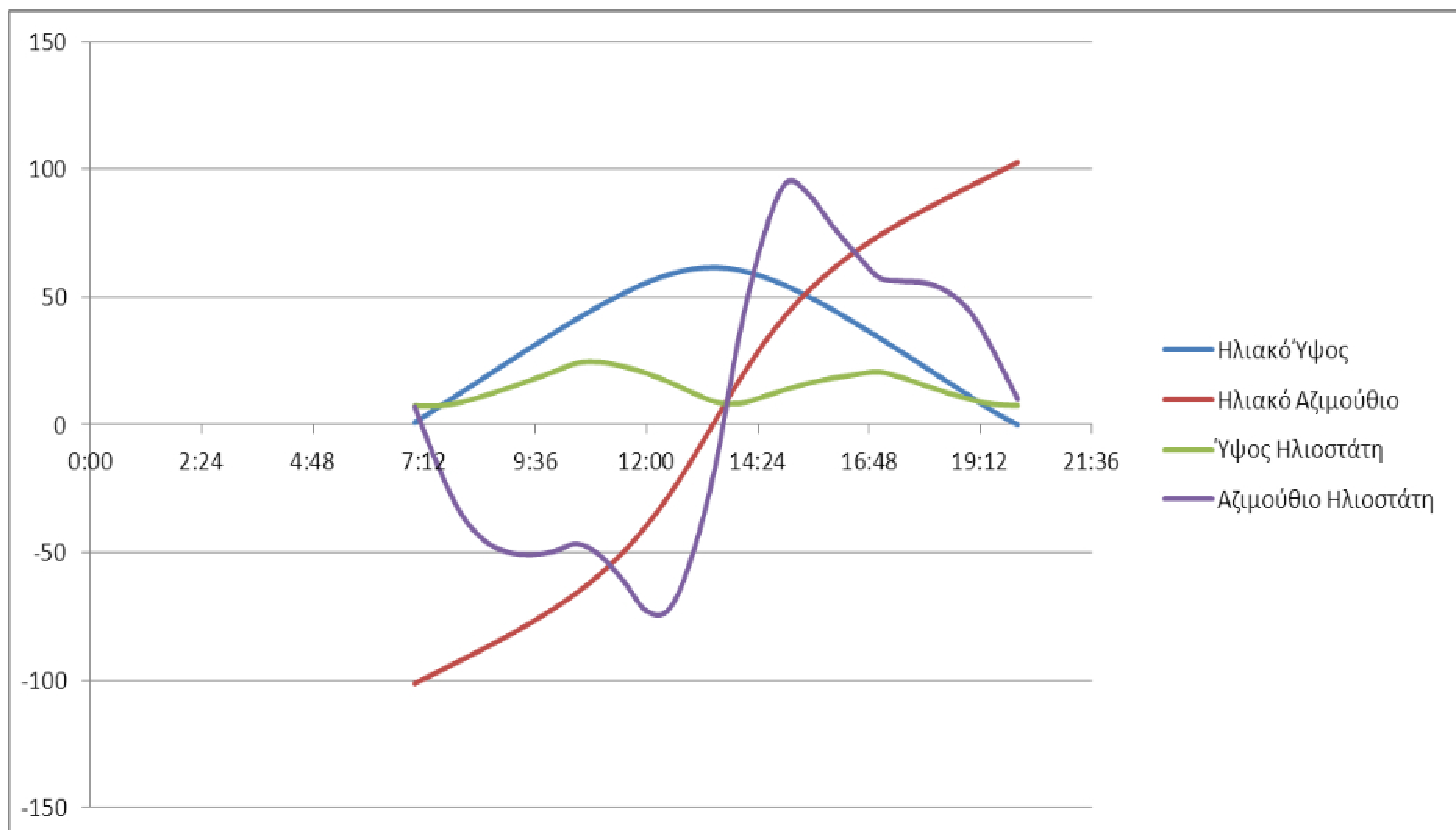
προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια. Τα διαγράμματα περιλαμβάνουν το ηλιακό αζιμούθιο και ύψος, όπως επίσης και τα επιθυμητά αζιμούθιο και ύψος του Ηλιοστάτη ανάλογα με την θέση του Ηλίου. Όλα αυτά σε σχέση με την διάρκεια μίας ημέρας, από την ανατολή του Ηλίου μέχρι την δύση του. Για τις εν λόγω προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα, εκτός από τις ημερομηνίες που αναφέρονται παραπάνω, τα εξής :

- Η ζώνη της ώρας, η οποία για την Ελλάδα είναι – 2 h.
- Το γεωγραφικό μήκος & γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας ($37,90^\circ$ γεωγραφικό πλάτος και $-23,72^\circ$ γεωγραφικό μήκος)
- Για τα στοιχεία του στόχου, δόθηκαν οι εξής τιμές, οι οποίες θεωρούνται ρεαλιστικές : Ύψος στόχου (β_T) = 15° και Αζιμούθιο στόχου (Z_T) = 10°

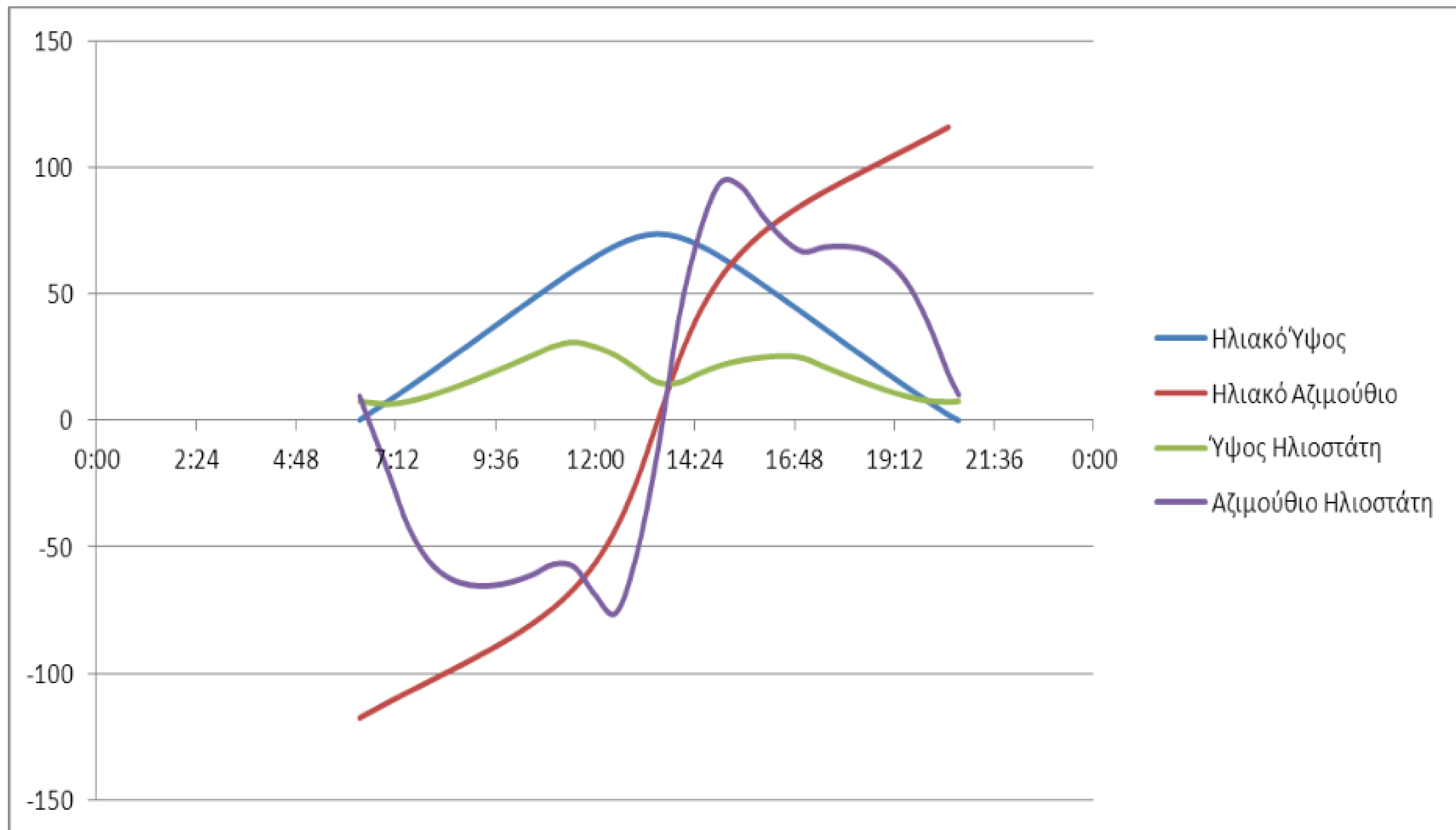
Διάγραμμα Προσομοίωσης για την 15η Ιανουαρίου 2016



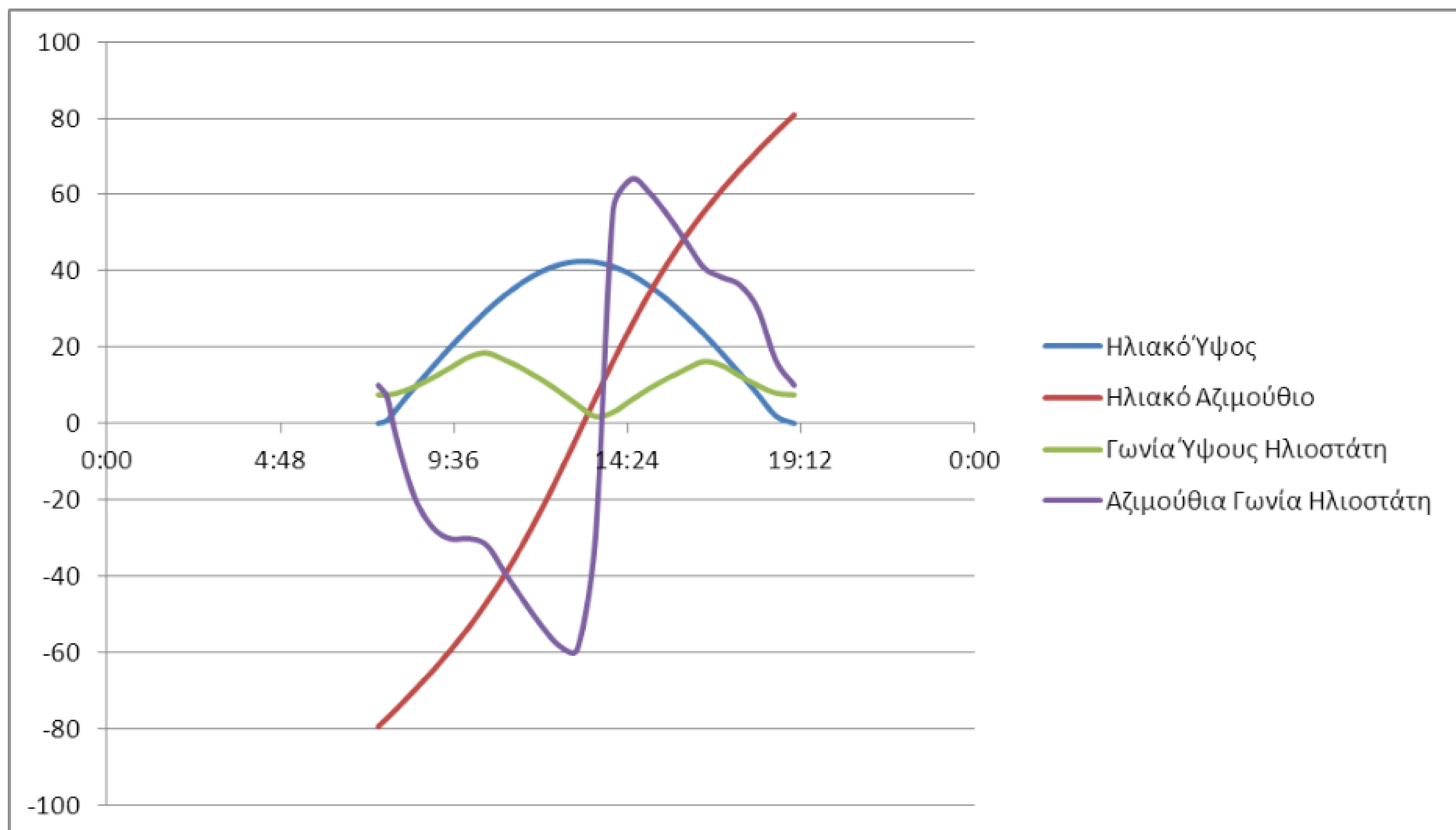
Διάγραμμα Προσομοίωσης για την 15η Απριλίου 2016



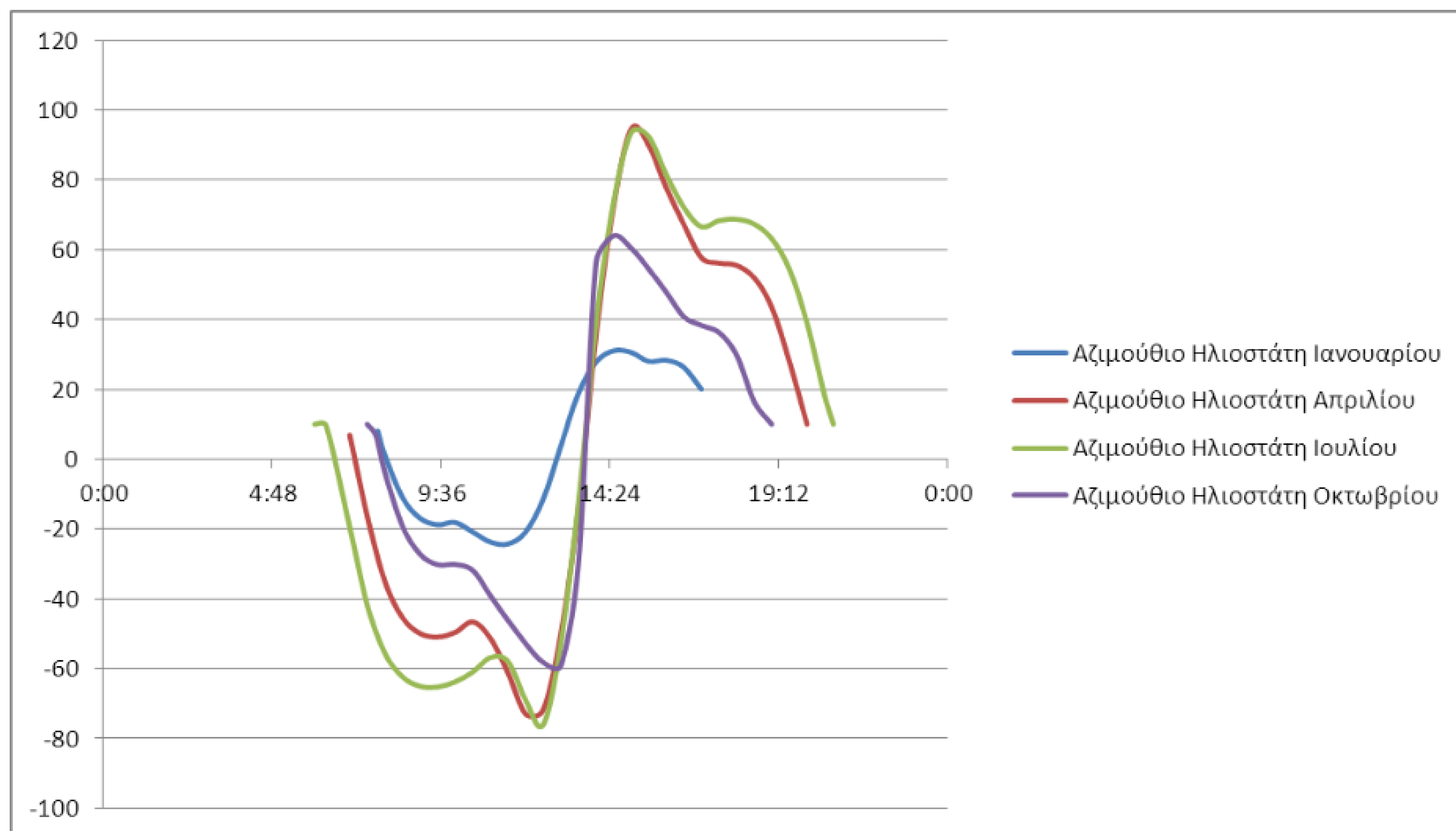
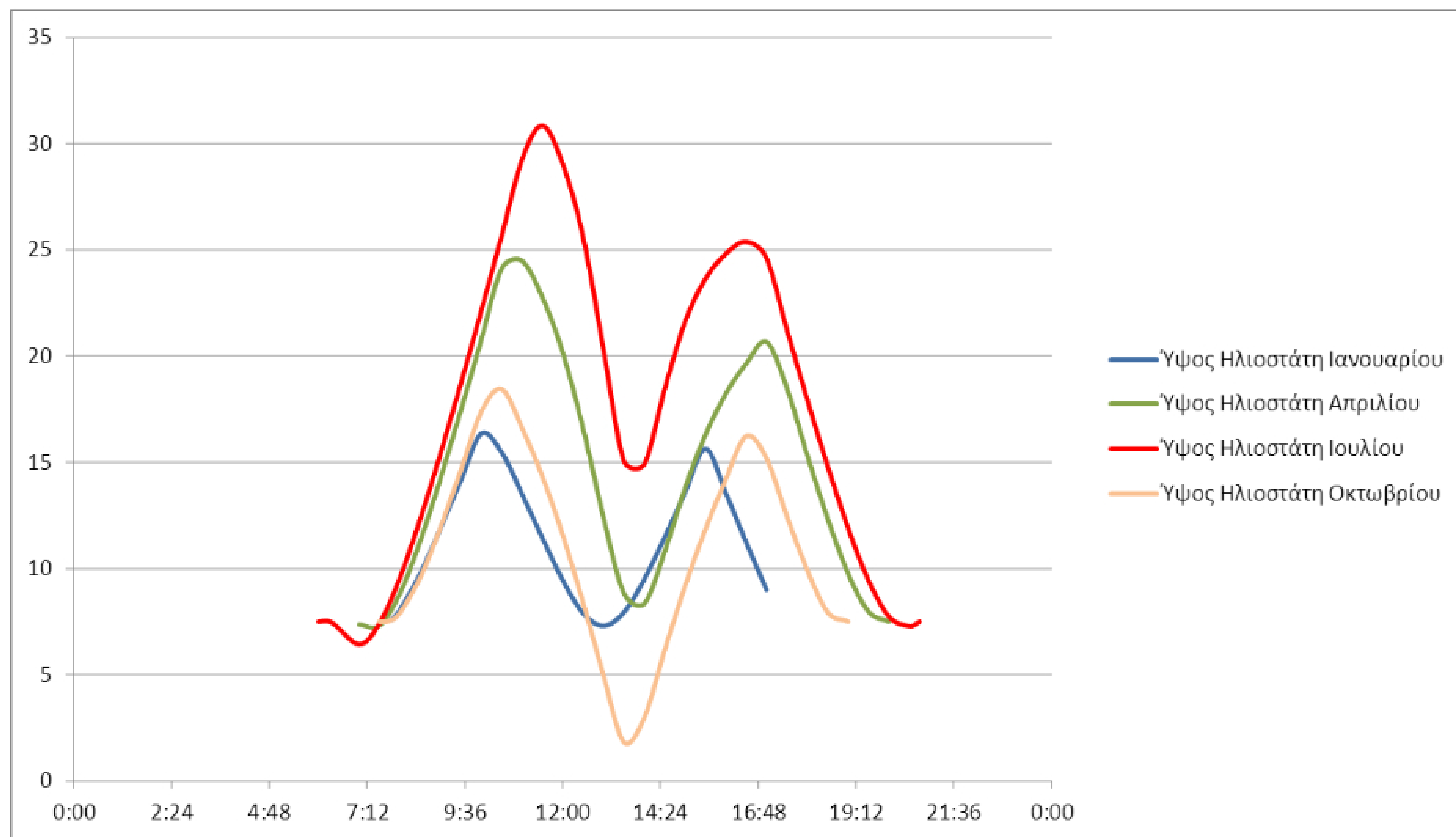
Διάγραμμα Προσομοίωσης για την 15η Ιουλίου 2016



Διάγραμμα Προσομοίωσης για την 15η Οκτωβρίου 2016



Στα επόμενα 2 διαγράμματα, φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές που παίρνει το ύψος και το αζιμούθιο του Ηλιοστάτη κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 4 προαναφερθείσες ημερομηνίες.



Συμπέρασμα 1 : Όπως ήταν ανεμενόμενο, οι διαφορές που παρατηρούνται στις τιμές που λαμβάνουν το ύψος και το αζιμούθιο του Ηλιοστάτη, κατά τη διάρκεια της ημέρας, στις 4 ημερομηνίες, ακολουθούν τις διαφορές που έχει η κίνηση του Ήλιου αντίστοιχα.

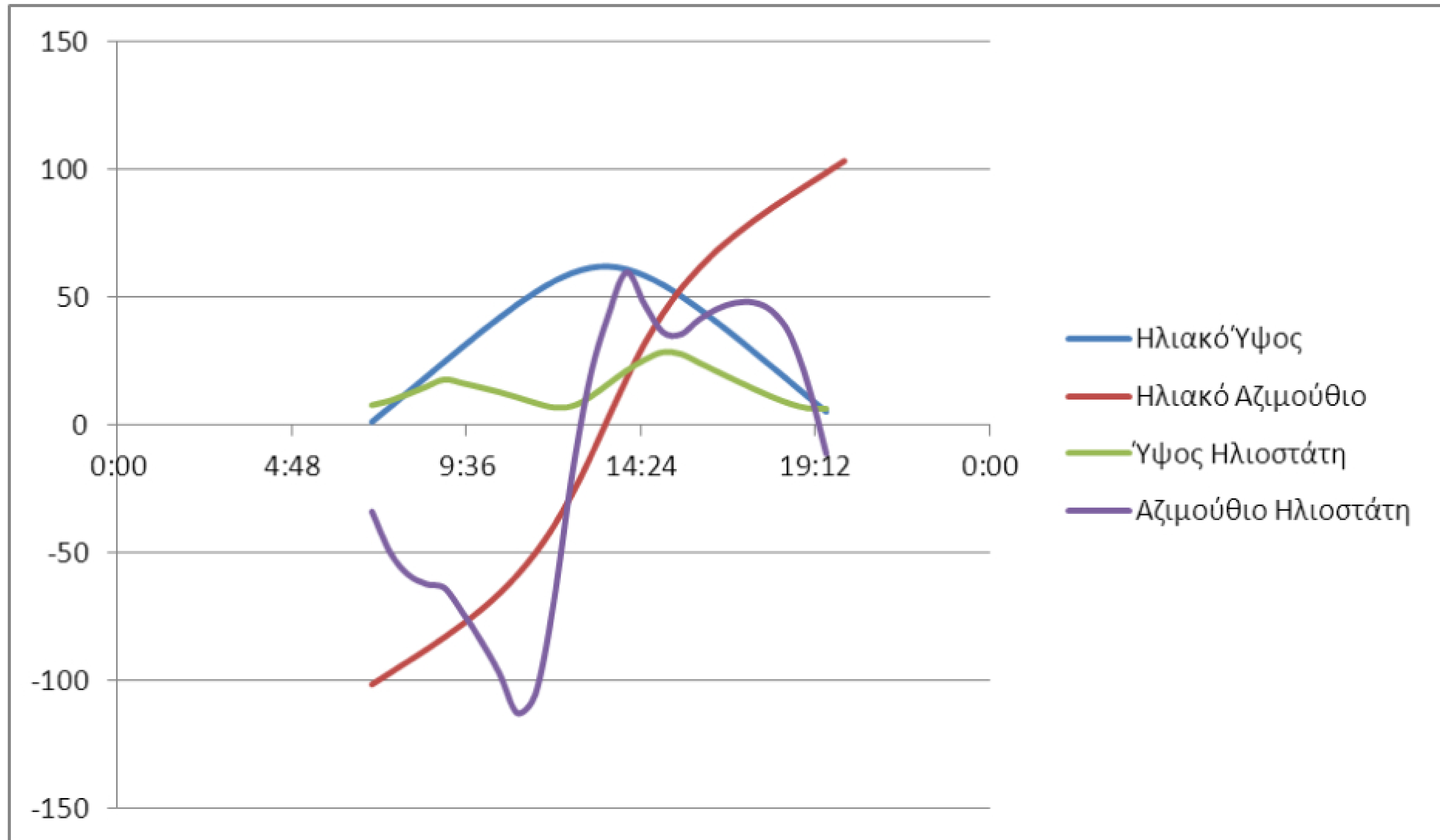
7.2. Προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές αζιμούθιου του στόχου

Προσομοιώνοντας τον αλγόριθμο κατά την διάρκεια μιας ημέρας, από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου για μία συγκεκριμένη ημερομηνία, κρατάμε σταθερά όλα τα δεδομένα (ημερομηνία, ζώνη ώρας, γεωγραφικό μήκος & πλάτος του τόπου, ύψος του στόχου) και αλλάζουμε μόνο το αζιμούθιο του στόχου. Ελέγχουμε δηλαδή τις αλλαγές επιφέρει στην πορεία που ακολουθεί ο Ηλιοστάτης μέσω του ηλιακού ιχνηλάτη, το που θα είναι τοποθετημένος ο στόχος ως προς τον Νότο. Για αζιμούθιο στόχου ίσο με 0° , ο στόχος είναι ακριβώς πάνω στον Νότο, για θετικό αζιμούθιο ο στόχος είναι δεξιά του Νότου (Δυτικά ως προς τον Ηλιοστάτη δηλαδή) και για αρνητικό αζιμούθιο, ο στόχος βρίσκεται αριστερά του Νότου (Ανατολικά ως πρὸν τον Ηλιοστάτη).

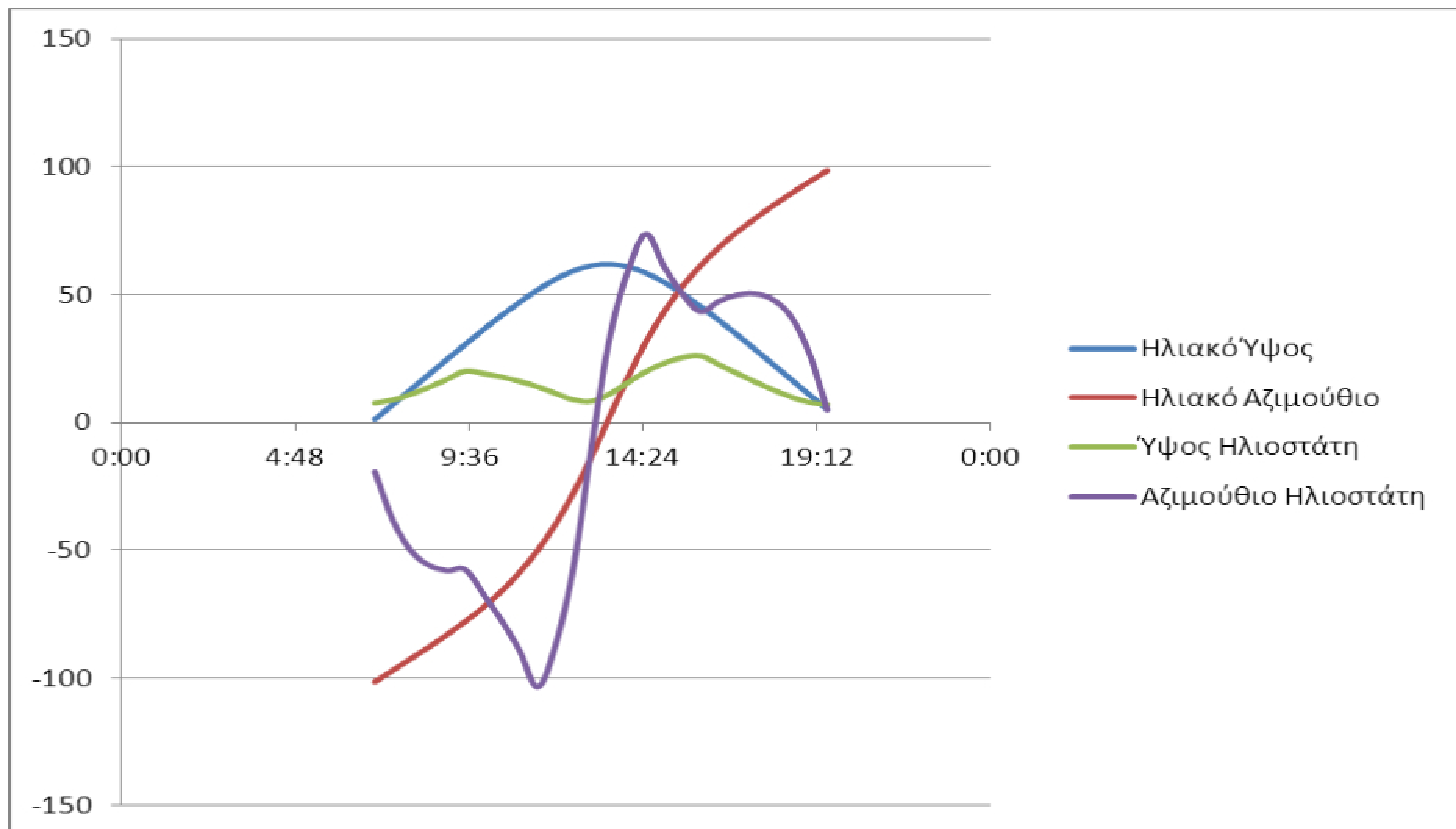
Ως δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν η ημερομηνία 15 Απριλίου, η ζώνη ώρας της Ελλάδος -2h, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της Αθήνας και για ύψος του Στόχου οι 15° . Οι τιμές που δόθηκαν κατά σειρά για αζιμούθιο στόχου είναι : -30° , -15° , 0° , 15° και 30° .

Τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, είναι τα ακόλουθα :

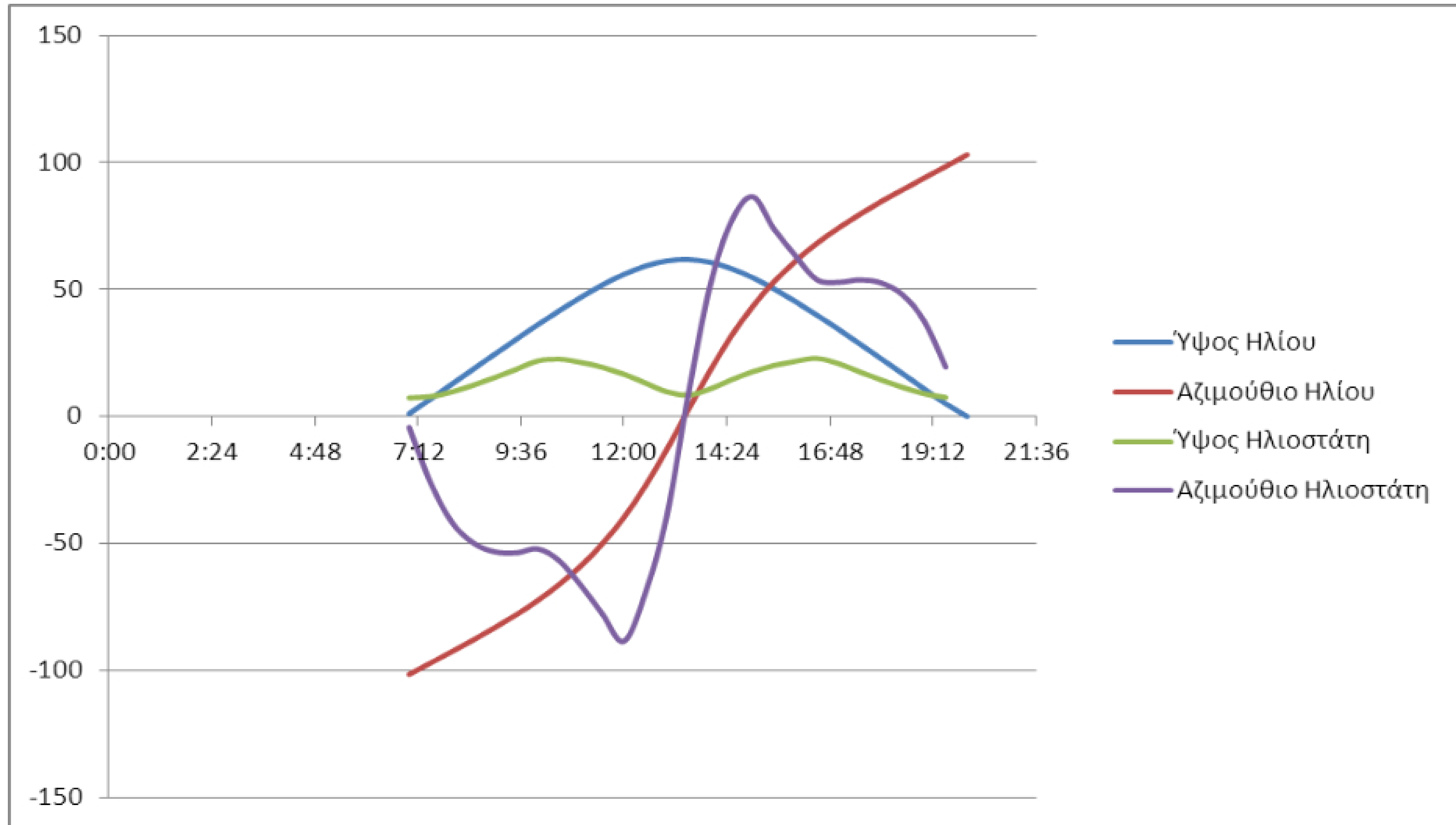
Διάγραμμα Προσομοίωσης για Αζιμούθιο Στόχου $Z_T = -30$



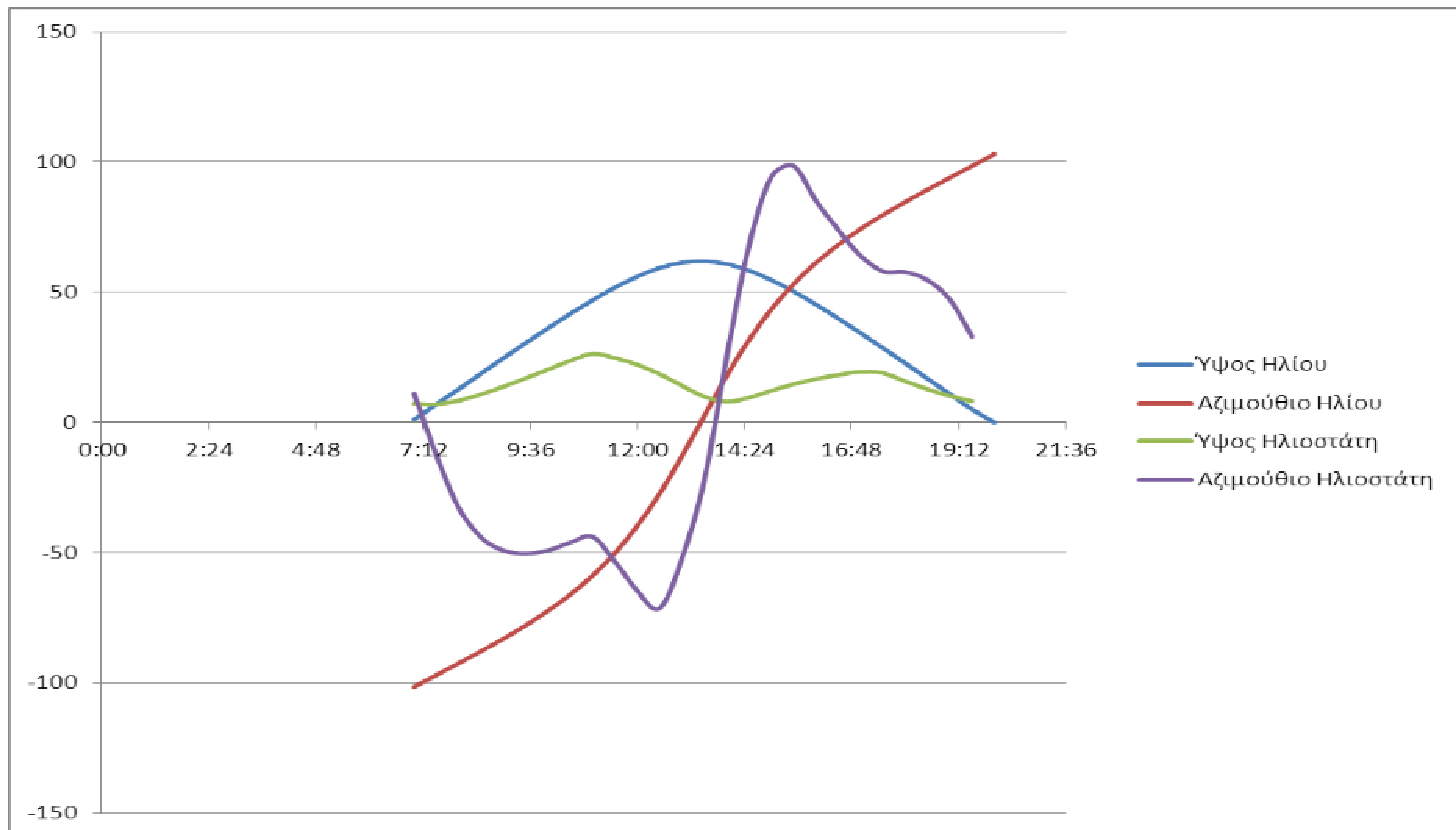
Διάγραμμα Προσομοίωσης για Αζιμούθιο Στόχου $Z_T = -15^\circ$



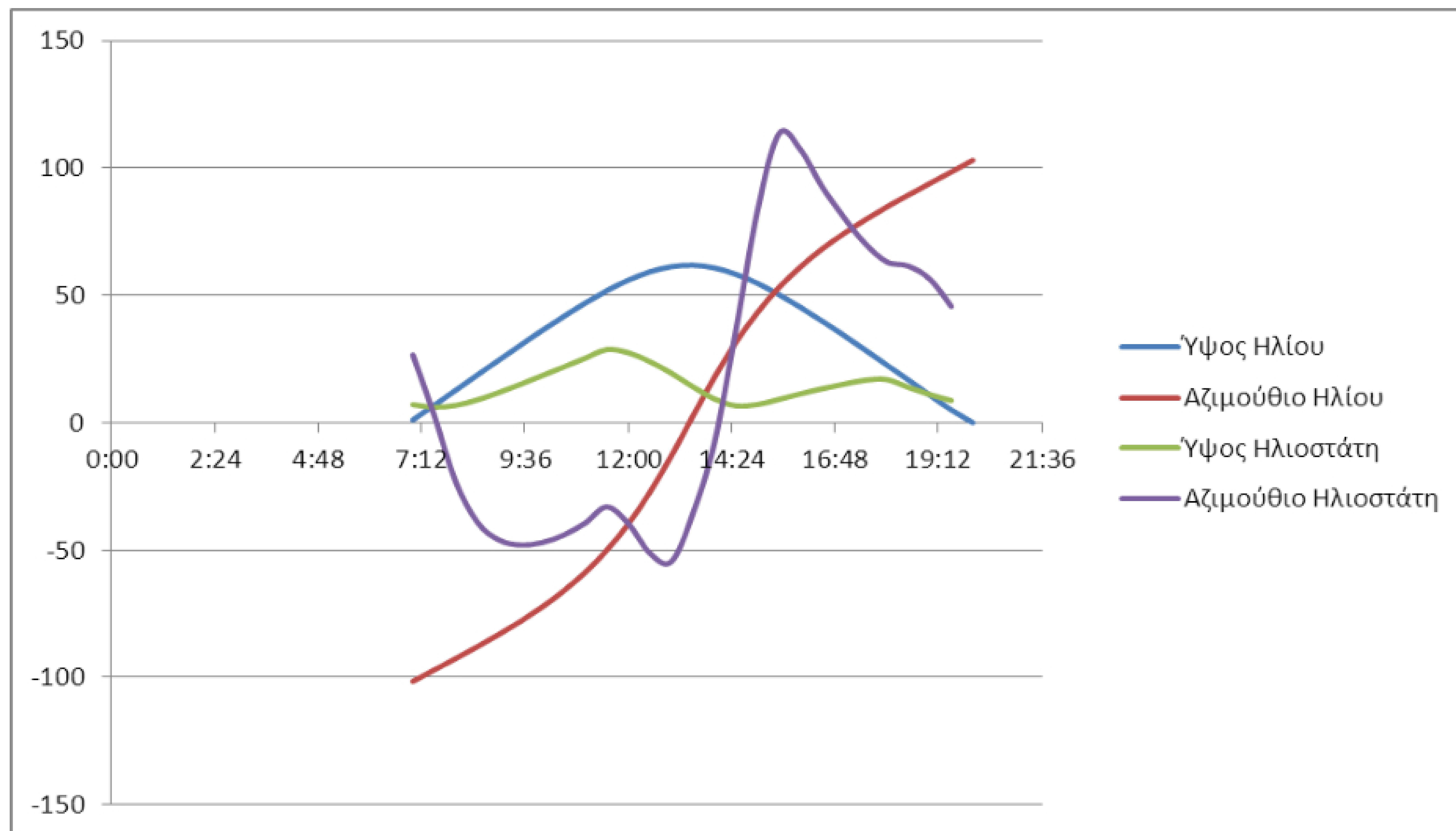
Διάγραμμα Προσομοίωσης για Αζιμούθιο Στόχου $Z_T = 0^\circ$



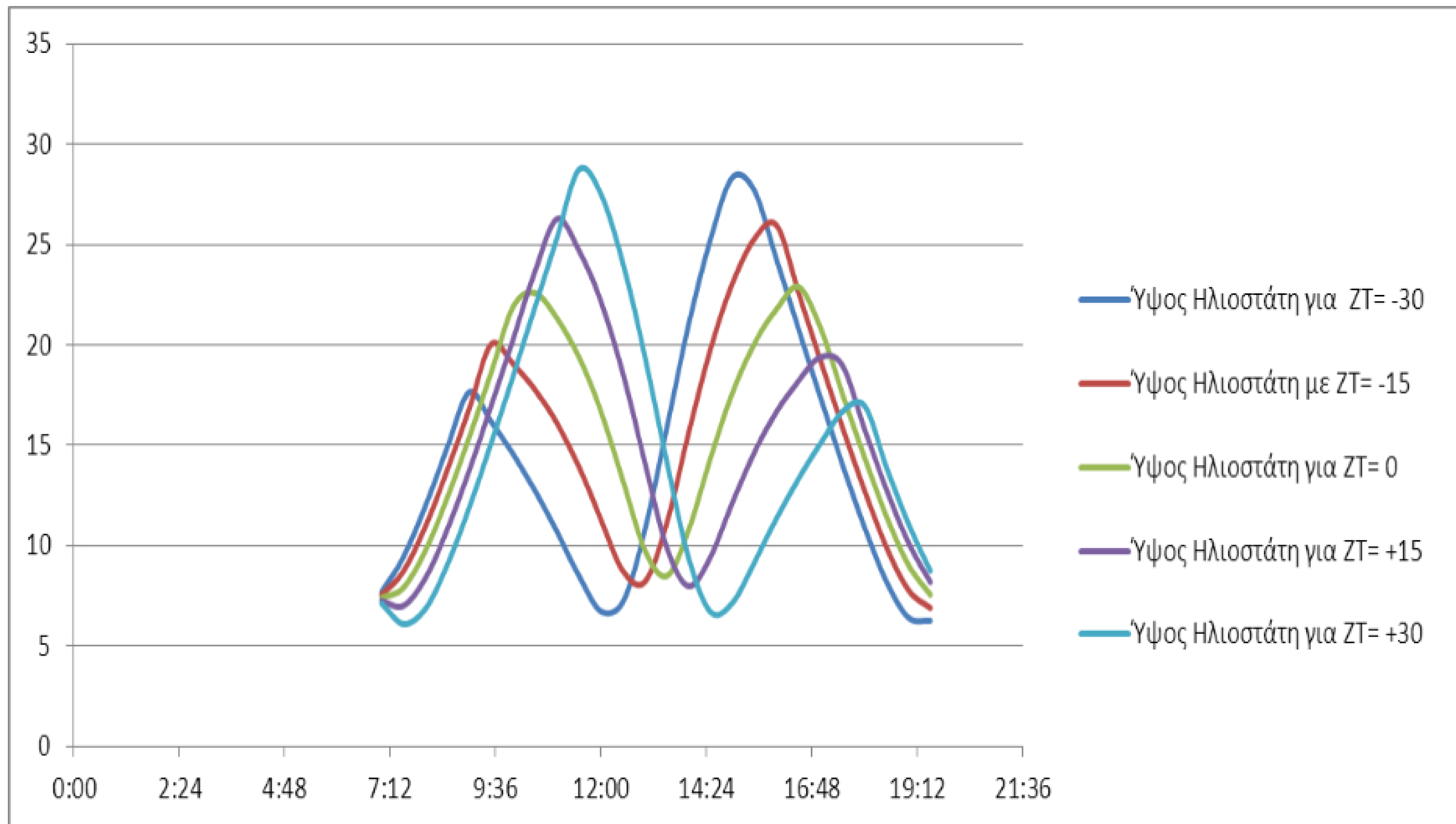
Διάγραμμα Προσομοίωσης για Αζιμούθιο Στόχου $Z_T = 15^\circ$



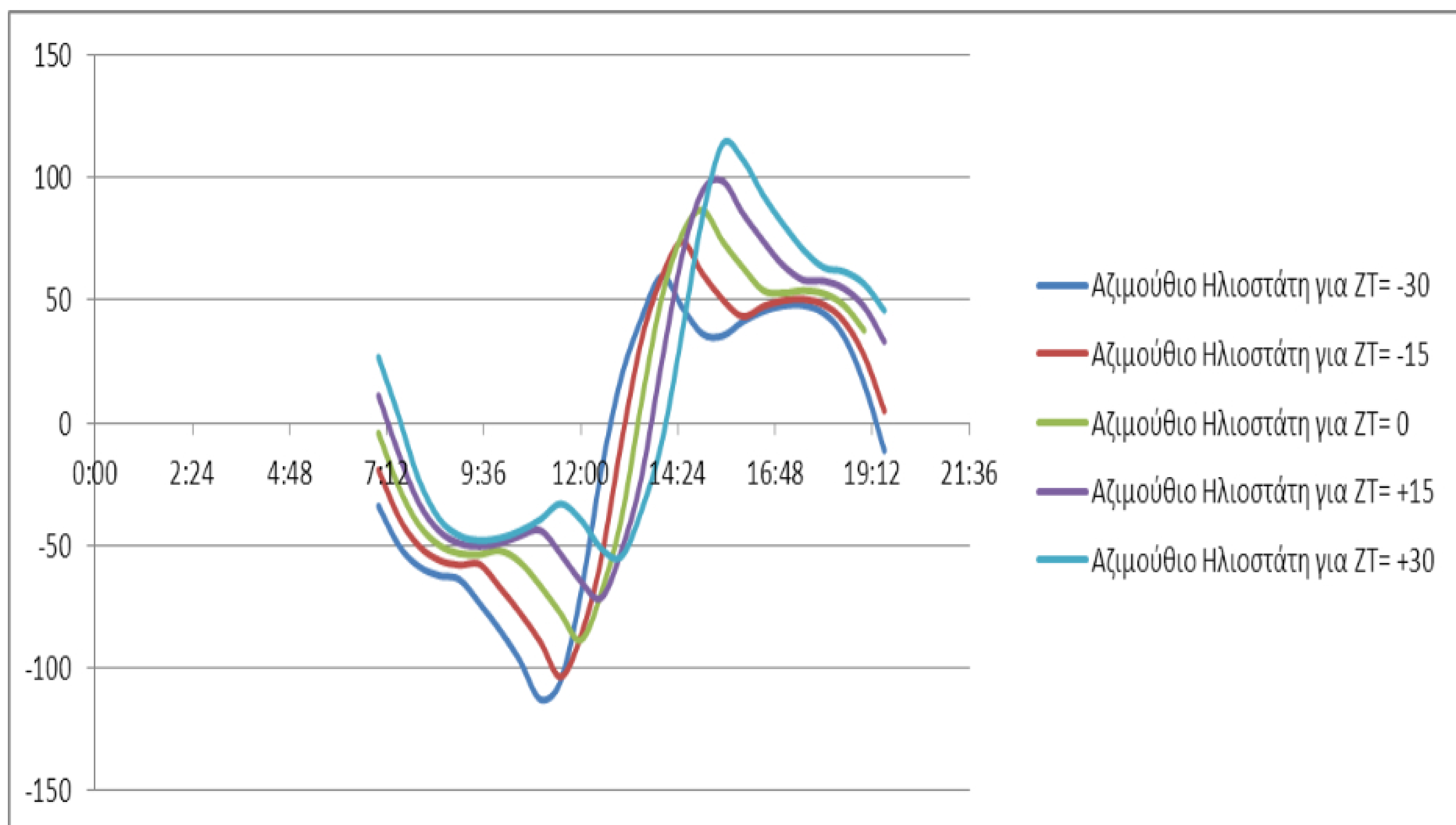
Διάγραμμα Προσομοίωσης για Αζιμούθιο Στόχου $ZT = 30^\circ$



Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των τιμών του Ύψους και του Αζιμούθιου του Ηλιοστάτη (β_H και Z_H) για τις 5 διαφορετικές τιμές του Αζιμούθιου Στόχου (ZT), έτσι ώστε να μπορέσουμε ευκολότερα να βγάλουμε συμπέρασμα για την επίδραση της επιλογής θέσης του Στόχου σε σχέση με την θέση του Ηλιοστάτη.



Συγκριτικό διάγραμμα τιμών του Ύψους Ηλιοστάτη (βΗ) κατά την διάρκεια ηλιοφάνειας για την 16η Απριλίου 2016, με σταθερό το Ύψος Στόχου (βΤ) και μεταβαλλόμενο το Αζιμούθιο Στόχου (ΖΤ)



Συγκριτικό διάγραμμα τιμών του Αζιμούθιου Ηλιοστάτη (ΖΗ) κατά την διάρκεια ηλιοφάνειας για την 16η Απριλίου 2016, με σταθερό το Ύψος Στόχου (βΤ) και μεταβαλλόμενο το Αζιμούθιο Στόχου (ΖΤ)

Συμπέρασμα 2 : Από τα συγκριτικά διαγράμματα παρατηρούμε τα εξής :

A) Όσον αφορά τις τιμές που παίρνει το ύψος του Ηλιοστάτη (β_H) κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας, στην ημέρα που αναφέρεται η προσομοίωση, παρατηρούμε ότι όσο πιο δεξιά του Νότου (όπως “κοιτάει” τον Νότο ο Ηλιοστάτης, δηλαδή όσο πιο δυτικά από την θέση του Ηλιοστάτη) τοποθετηθεί ο Στόχος τόσο πιο υψηλές τιμές λαμβάνει το Ύψος του Ηλιοστάτη κατά τις πρωινές ώρες και τόσο πιο χαμηλές τιμές κατά τις μεταμεσημβρινές ώρες, για να μπορεί να παρακολουθήσει την πορεία του Ήλιου και να ανακλά σωστά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον Στόχο.

Αντιθέτως, όσο πιο αριστερά του Νότου (όπως “κοιτάει” τον Νότο ο Ηλιοστάτης, δηλαδή όσο πιο ανατολικά από την θέση του Ηλιοστάτη) τοποθετηθεί ο Στόχος τόσο πιο χαμηλές τιμές λαμβάνει το Ύψος του Ηλιοστάτη κατά τις πρωινές ώρες και τόσο πιο υψηλές τιμές κατά τις μεταμεσημβρινές ώρες.

Παρατηρούμε μάλιστα, ότι υπάρχει συμμετρία για αντίστοιχα θετικά και αρνητικά ZT (για παράδειγμα για $ZT = -30^\circ$ και για $ZT = 30^\circ$) ως προς την ευθεία $x = 13:24$. Υπάρχει δηλαδή συμμετρία ως προς την ώρα 13:24.

B) Όσον αφορά τις τιμές που παίρνει το αζιμούθιο του Ηλιοστάτη (Z_H) κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας, στην ημέρα που αναφέρεται η προσομοίωση, παρατηρούμε ότι όσο πιο δεξιά του Νότου (όπως “κοιτάει” τον Νότο ο Ηλιοστάτης, δηλαδή όσο πιο δυτικά από την θέση του Ηλιοστάτη) τοποθετηθεί ο Στόχος τόσο πιο υψηλές τιμές λαμβάνει το αζιμούθιο του Ηλιοστάτη για να μπορεί να παρακολουθήσει την πορεία του Ήλιου και να ανακλά σωστά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον Στόχο. Αντιθέτως, όσο πιο αριστερά του Νότου (όπως “κοιτάει” τον Νότο ο Ηλιοστάτης, δηλαδή όσο πιο ανατολικά από την θέση του Ηλιοστάτη) τοποθετηθεί ο Στόχος τόσο πιο χαμηλές τιμές λαμβάνει το αζιμούθιο του Ηλιοστάτη για την ίδια διαδικασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

8. Επίλογος

Από τα στοιχεία που παρατίθενται στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται αντιληπτό ότι τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα γενικότερα και οι Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος ειδικότερα, έχουν αρχίσει πλέον να μπαίνουν στην ημερήσια διάταξη του σχεδιασμού ενεργειακής πολιτικής των κρατών.

Όσον αφορά τους Ηλιακούς Πύργους, γίνεται ξεκάθαρο ότι απαραίτητο στοιχείο αυτών των σταθμών, αποτελούν οι μηχανισμοί κίνησης σε 2 άξονες, έτσι ώστε με βάση την θέση του Ήλιου ο Ηλιοστάτης να ανακλά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον δέκτη. Οι μηχανισμοί αυτοί (Ηλιακος Ιχνηλάτης) θα πρέπει να προγραμματίζονται κατάλληλα για τον σκοπό αυτό.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος παρακολούθησης και ανάκλασης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, που θεωρητικά και μέσω των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, καταφέρνει να αποδώσει σε ικανοποιητικό βαθμό το ζητούμενο.

Η επόμενη φάση και φυσική συνέχεια της παρούσας εργασίας, θα είναι να πραγματοποιηθεί πειραματική διάταξη, κατά την οποία ο Ηλιακός Ιχνηλάτης (tracker), τον οποίο διαθέτει το εργαστήριο, να συνδεθεί κατάλληλα με ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την κατάλληλη κατασκευή (να εφαρμοστεί πάνω στον ιχνηλάτη ένα κάτοπτρο) να επαληθευτεί και πρακτικά η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ.Θ.Δέρβος “ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, από την θεωρία στην πράξη”, Αθήνα 2013
- [2] National Renewable Energy Laboratory. (<http://www.nrel.gov>)
- [3] Wikipedia : “List of solar thermal power stations”
- [4] John A. Duffie “SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES”, second edition, Wiley-Interscience Publication, 1985
- [5] Keith Lovegrove, Wes Stein “CONCENTRATING SOLAR POWER TECHNOLOGY : Principles, Developments, and Applications”, 2012
- [6] “Renewable Energy Technology Characterizations” Topical Report J.F. Galdo Electric Power Research Institute United States Department of Energy, 1997
- [7] “CLFR Molten Salt Storage for Reliable, Dispatchable CSP Generation”, Arena Solar, 2012, www.arena.com
- [8] “Nevada Solar One powering America”, 2013, www.nevadasolarone.net
- [9] Gemasolar Power Plant, Torresol Energy, www.torresolenergy.com

- [10] Μπούρδαλης Ιωάννης, Διπλωματική Εργασία: "ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΙΧΝΗΛΑΤΗ ΓΙΑ ΤΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ (ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ – ΥΨΟΣ) ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΜΕΣΗΣ–ΔΙΑΧΥΤΗΣ-ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012
- [11] Ryan j. Hoffmann, Thesis: "Modeling of a novel solar down beam test facility utilizing Newtonian optics", University of Nevada, 2011
- [12] Leonard Timothy M., "Heliostat Reflection Equations", New Mexico : Enhancement Electronics, Inc, 2003
- [13] Weisstein Eric W., "Spherical Trigonometry", Wolfram Research, Inc, 2011