

## Κεφάλαιο 5: Ηλιακή γεωμετρία και ακτινοβολία

### 5.1. Εισαγωγή

Η ηλιακή γεωμετρία περιγράφει τη σχετική κίνηση γης και ήλιου και αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που υπεισέρχεται στον ενεργειακό ισολογισμό κτηρίων. Ανάλογα με τη γεωμετρία του κτηρίου, τον προσανατολισμό του και τα δομικά υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένο, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να έχει πολύ σημαντική επίδραση στη διαμόρφωση των φορτίων αιχμής κατά την ψύξη, αλλά και στη σημαντική μείωση των θερμικών φορτίων το χειμώνα, λόγω των προσλαμβανόμενων ηλιακών κερδών. Σημαντική επίσης είναι η συμβολή της στη διαμόρφωση των συνθηκών του φυσικού φωτισμού των εσωτερικών χώρων. Τέλος, με τη βοήθεια της ηλιακής γεωμετρίας, είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός της επιφάνειας ενός παραθύρου που θα σκιάζεται από ένα πρόβολο ή ένα οποιοδήποτε φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο (π.χ. ένα δέντρο ή ένα γειτονικό κτήριο) οποιαδήποτε ώρα του έτους, συναρτήσει της γεωμετρίας του παραθύρου, του προβόλου ή του εμποδίου και της σχετικής θέσης τους. Επίσης χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της ηλιακής γεωμετρίας σε προβλήματα εκτός του αντικειμένου του κλιματισμού κτηρίων είναι ο ακριβής υπολογισμός οποιαδήποτε ώρα του έτους της επιφάνειας φωτοβολταϊκών πλαισίων ή ηλιακών συλλεκτών που σκιάζεται από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια και της συνεπαγόμενης μείωσης της παραγωγής τους ή, επίσης, ο υπολογισμός του μήκους σκιάς μιας ανεμογεννήτριας και η εκτίμηση αν τούτη επηρεάζει γειτνιάζοντες στο αιολικό πάρκο οικισμούς.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσλαμβάνεται από μία επιφάνεια εξαρτάται από τη γωνία με την οποία τούτη προσπίπτει στην επιφάνεια, τη λεγόμενη γωνία πρόσπτωσης. Συνεπώς η μελέτη του συνολικού προβλήματος θα πρέπει να ξεκινήσει με τις έννοιες και τις σχέσεις υπολογισμού που απαρτίζουν την ηλιακή γεωμετρία. Η ηλιακή γεωμετρία θα οδηγήσει στον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια, οποιαδήποτε στιγμή του έτους, εφόσον είναι γνωστά η γεωγραφική θέση της επιφάνειας, ο προσανατολισμός της και η κλίση της ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Με τη γωνία πρόσπτωσης γνωστή, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που θα προσπέσει στην επιφάνεια. Τούτο αρχικά προϋποθέτει τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα (extraterrestrial insolation). Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία που είναι διαθέσιμη στη θέση εγκατάστασης της επιφάνειας. Τούτη είναι δυνατό να προσεγγιστεί είτε με μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή ενδιαφέροντος, είτε με εμπειρικές προσεγγιστικές αριθμητικές μεθόδους, κάποιες από τις οποίες θα παρουσιαστούν στο παρόν Κεφάλαιο. Με την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα και στη θέση εγκατάστασης γνωστές, είναι στη συνέχεια δυνατός ο υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που θα προσπέσει πάνω στην επιφάνεια. Η ολική ακτινοβολία που τελικά θα δεχτεί η επιφάνεια μελέτης αποτελεί το σύνολο τριών τύπων ακτινοβολίας: της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης.

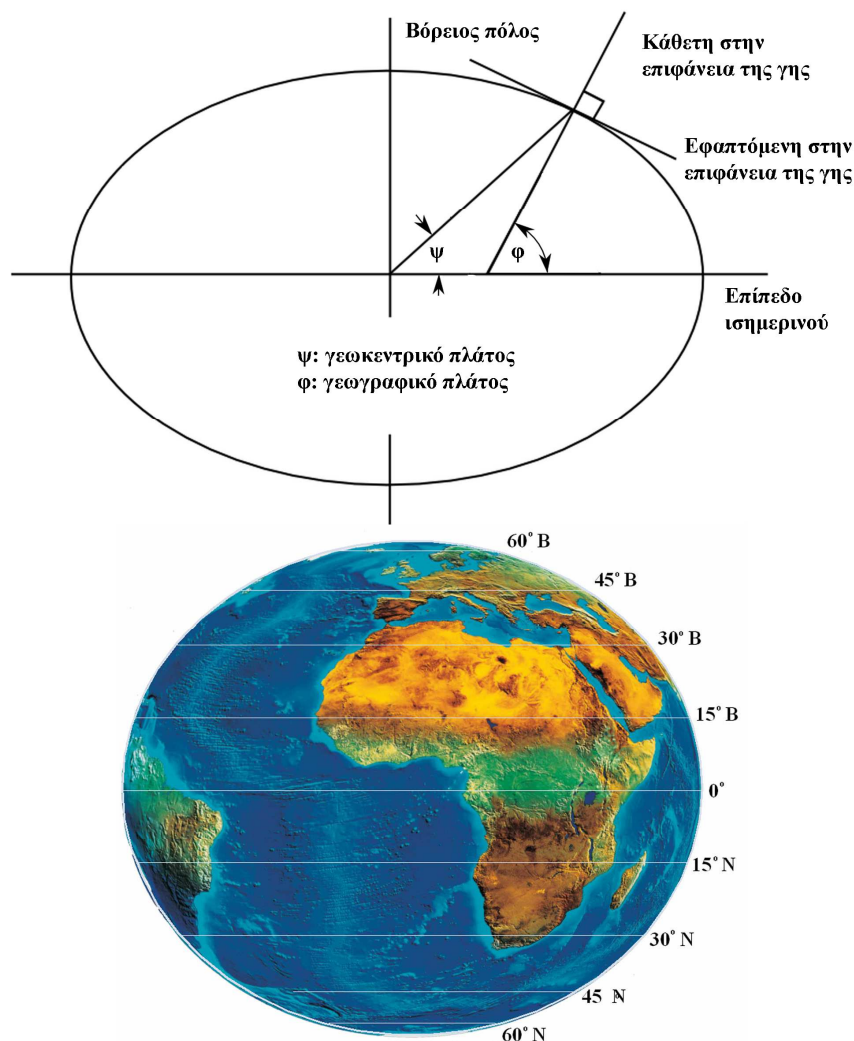
Με την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε επιφάνειες γνωστή, είναι δυνατός ο υπολογισμός των ηλιακών κερδών (solar gains) από την κάθε δομική επιφάνεια του κτηριακού κελύφους ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό των ηλιακών κερδών σε αδιαφανείς επιφάνειες είναι σκόπιμος ο ορισμός ενός νέου μεγέθους, της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα-ηλίου (sol-air temperature). Τέλος ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν τα ηλιακά κέρδη μέσω διαφανών επιφανειών (παράθυρα). Για τις διαφορετικές τεχνολογίες διαφανών επιφανειών απαιτείται ο υπολογισμός των συντελεστών θερμοπερατότητας  $U$  και των συντελεστών σκίασης ή, αντίστροφα, των συντελεστών ηλιακών κερδών.

Τα ανωτέρω θέματα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν στο παρόν Κεφάλαιο.

## 5.2. Γεωγραφικές συντεταγμένες

Με τις γεωγραφικές συντεταγμένες είναι δυνατός ο εντοπισμός ενός σημείου στην επιφάνεια της γης με τρόπο μοναδικό και απόλυτο. Όπως για τον εντοπισμό της θέσης ενός σημείου σε ένα επίπεδο απαιτούνται δύο συντεταγμένες, η τεταγμένη και η τετημένη του σημείου ως προς ένα δεδομένο σύστημα αναφοράς, έτσι και στην περίπτωση της επιφάνειας της γης απαιτούνται δύο μεγέθη για τον εντοπισμό ενός γεωγραφικού σημείου πάνω σε αυτή. Τα μεγέθη αυτά είναι το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος.

Γεωγραφικό πλάτος (latitudo) ( $\phi$ ) ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετη ευθεία στην επιφάνεια της γης από το επιφανειακό σημείο προς το επίπεδο του ισημερινού, με το επίπεδο του ισημερινού (σχήμα 5.1).



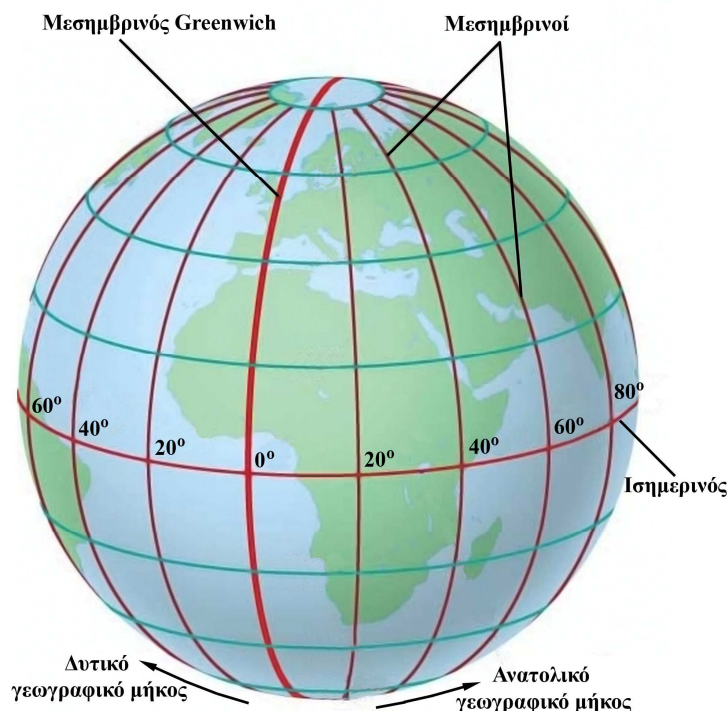
Σχήμα 5.1: Γεωγραφικό πλάτος.

Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται Βόρειο Β (North N) ή Νότιο Ν (South S), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη, σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερόνυμα πλάτη. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται σε μοίρες και υποδιαρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα λεπτά, από  $0^\circ - 90^\circ$  Β ή  $0^\circ - 90^\circ$  Ν, αρχής γενομένης της μέτρησης από τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι  $0^\circ$ .

Στο σχήμα 5.2 παρατηρείται ότι, εκτός του γεωγραφικού πλάτους, ορίζεται και το γεωκεντρικό πλάτος, ως η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία από το γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης προς το κέντρο της γης, με το επίπεδο του ισημερινού. Η διαφορά στους ορισμούς του γεωγραφικού πλάτους και του γεωκεντρικού πλάτους είναι προφανής. Στο παρόν σύγγραμμα, και γενικότερα, έχει επικρατήσει η χρήση του γεωγραφικού πλάτους.

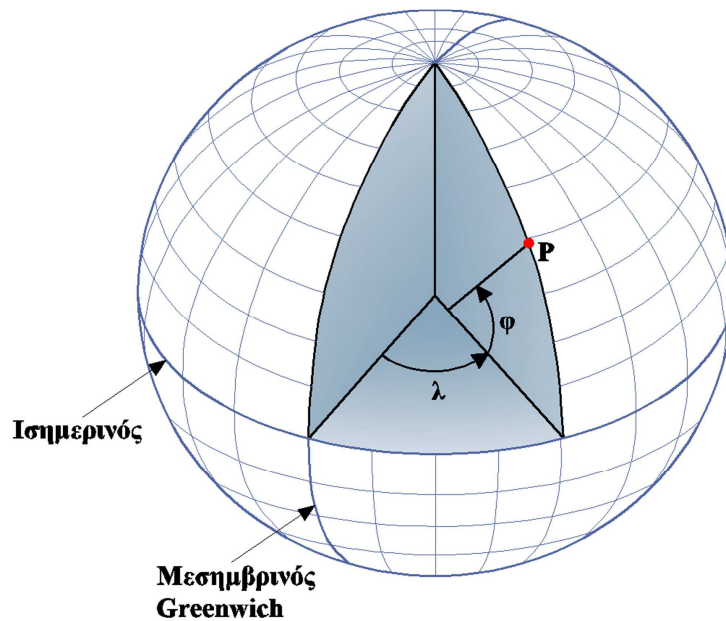
Γεωγραφικό μήκος (longitude) ( $\lambda$ ) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από  $0^\circ - 180^\circ$  Α ή  $0^\circ - 180^\circ$  Δ, αρχής γενομένης της μέτρησης από τον πρώτο μεσημβρινό με γεωγραφικό μήκος  $0^\circ$ , ο οποίος διέρχεται από το αστεροσκοπείο του Greenwich στη Μεγάλη Βρετανία.

Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται Ανατολικό Α (East E) ή Δυτικό Δ (West W), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα μήκη σε αντίθεση με τόπους διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερόνυμα μήκη.



**Σχήμα 5.2:** Γεωγραφικό μήκος.

Γεωγραφικό στίγμα (geographical position) ενός γεωγραφικού σημείου είναι η τομή του αντίστοιχου παράλληλου πλάτους ( $\varphi$ ) και του γεωγραφικού μήκους ( $\lambda$ ) αυτού του σημείου, δηλαδή οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου αυτού (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Γεωγραφικό στίγμα.

Είναι, τέλος, προφανές ότι δύο διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες ορίζουν δύο διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια της γης, τα οποία απέχουν μεταξύ τους συγκεκριμένη απόσταση. Υπάρχει σαφής εξάρτηση ανάμεσα στις γεωγραφικές συντεταγμένες των δύο σημείων και της απόστασής τους. Συγκεκριμένα, διαφορά σε γεωγραφικές συντεταγμένες μεταξύ δύο σημείων γωνίας  $1'$  της μοίρας γεωγραφικού πλάτους (ένα λεπτό της μοίρας) αντιστοιχεί σε απόσταση επί της επιφάνειας της γης μεταξύ των δύο σημείων περίπου ίσης με 1.852m (1 ναυτικό μίλι). Δεδομένου του ότι κάθε μοίρα έχει 60 πρώτα λεπτά, η απόσταση μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια της γης με γεωγραφικές συντεταγμένες που διαφέρουν κατά  $1^\circ$  γεωγραφικού πλάτους (δηλαδή που μετρείται σε μήκος τόξου μεσημβρινού) θα ισούται με  $60 \times 1.852\text{m} = 111,120\text{km}$ . Αντίστοιχα, δεδομένου του ότι κάθε πρώτο λεπτό της μοίρας έχει 60 δεύτερα λεπτά, προκύπτει ότι οι γεωγραφικές συντεταγμένες αλλάζουν κατά  $1''$  για κάθε  $1.852\text{m} / 60 = 30,87\text{m}$  γεωγραφικού πλάτους περίπου.

## 5.3. Ηλιακή γεωμετρία

### 5.3.1. Οι κινήσεις της γης

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με τις δύο κύριες κινήσεις της γης:

- Την ημερήσια περιστροφή της γύρω από τον άξονα βορρά – νότου από τα δυτικά προς τα ανατολικά, η οποία διαρκεί περίπου 24 ώρες.
- Την ετήσια κίνησή της γύρω από τον Ήλιο, που γίνεται σε ελλειπτική τροχιά με μέση ωριαία ταχύτητα περίπου 106.000km/h και διαρκεί 365 μέρες, 5 ώρες, 48' και 46''. Η περίοδος αυτή έχει οριστεί ως έτος.

Στις ανωτέρω κινήσεις αξίζει να σταθούμε ιδιαίτερα σε δύο σημεία. Το πρώτο αφορά το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρώσει η γη μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της. Ο χρόνος αυτός ισούται περίπου με 24 ώρες. Ανάλογα με την εποχή μέσα στο έτος, η διάρκεια της ηλιακής ημέρας (όπως ορίζεται παρακάτω) είναι άλλοτε μεγαλύτερη και άλλοτε μικρότερη από 24h. Περισσότερα θα αναφερθούν παρακάτω, όταν θα γίνει διάκριση μεταξύ του ηλιακού χρόνου και του πραγματικού χρόνου.

Το δεύτερο σημείο αφορά στην πραγματική διάρκεια ενός έτους, η οποία είναι περίπου κατά 6 ώρες μεγαλύτερη από τις 365 μέρες, δηλαδή το χρόνο που επίσημα έχει οριστεί ως διάρκεια ενός έτους. Τούτο συνεπάγεται ότι κάθε τέσσερα χρόνια η γη έχει συνολικά καθυστερήσει  $4 \times 6 = 24$  ώρες περίπου, για να

συμπληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον ήλιο. Για αυτό ακριβώς το λόγο, κάθε τέσσερα χρόνια προκύπτει ένα έτος, το οποίο ονομάστηκε δίσεκτο, με διάρκεια μεγαλύτερη κατά μία επιπλέον ημέρα από αυτή των 365 ημερών. Η επιπλέον αυτή ημέρα, όπως είναι γνωστό, προστίθεται στο τέλος του Φεβρουαρίου.

Και πάλι όμως, ο επιπλέον χρόνος που απαιτεί η γη για να συμπληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον ήλιο δεν είναι ακριβώς 6 ώρες. Αντιθέτως, είναι μικρότερος κατά 11' και 14'', δηλαδή κατά 11,23'. Έτσι, κάθε τέσσερα χρόνια προστίθεται επιπλέον χρόνος  $4 \times 11,23' = 44,93'$  σε σχέση με την πραγματική θέση της γης ως προς τον ήλιο. Ο επιπλέον αυτός χρόνος, διαδοχικά προστιθέμενος ανά τετραετία, θα οδηγήσει σε απόκλιση μίας ολόκληρης ημέρας της πραγματικής θέσης της γης ως προς τον ημερολογιακό χρόνο σε:

$$\Delta t = \frac{24\text{h} \cdot 60\text{min/h}}{44,93\text{min}/4\text{έτη}} \Leftrightarrow \Delta t = 120,20\text{έτη}$$

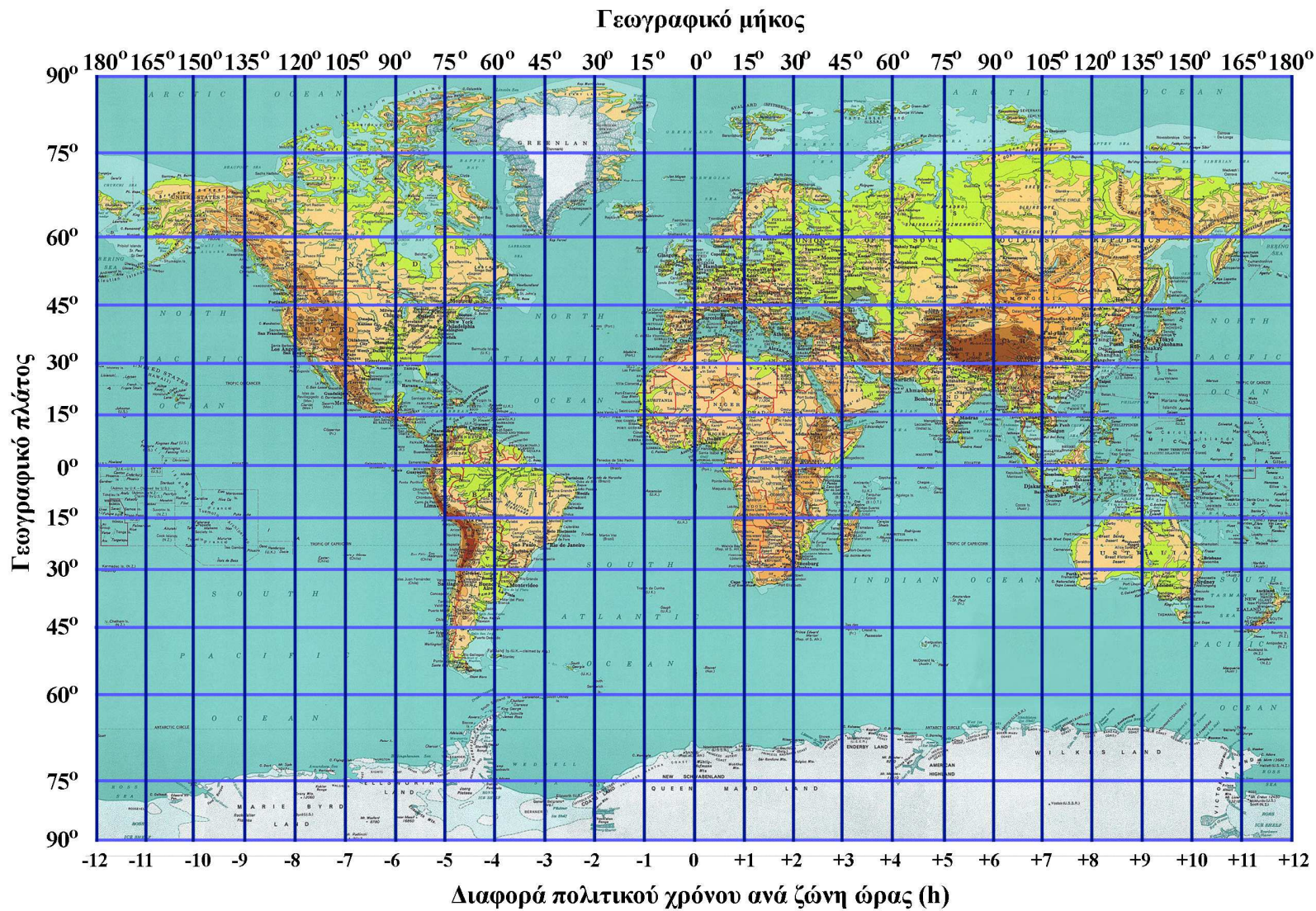
Για αυτό ακριβώς το λόγο, το 1582 θεσπίστηκε το Γρηγοριανό ημερολόγιο στη θέση του Ιουλιανού, το οποίο χρησιμοποιούνταν έως τότε. Σύμφωνα με το Γρηγοριανό ημερολόγιο, κάθε 100 – 200 χρόνια προστίθεται μία ημέρα, σε σχέση με το χρόνο του Ιουλιανού ημερολογίου. Στην τρέχουσα χρονική στιγμή (21<sup>ος</sup> αιώνας), η διαφορά του πολιτικού ημερολογίου του δυτικού κόσμου σε σχέση με το Ιουλιανό είναι 13 ημέρες. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι χρονικές διαφορές μεταξύ των δύο ημερολογίων από το 1582 έως το 2200.

<i>Πίνακας 5.1: Διαφορές μεταξύ Γρηγοριανού και Ιουλιανού ημερολογίου.</i>		
Γρηγοριανό ημερολόγιο	Ιουλιανό ημερολόγιο	Διαφορά
από 15 / 10 / 1582 μέχρι 10 / 3 / 1700	από 5 / 10 / 1582 μέχρι 28 / 2 / 1700	10 ημέρες
από 11 / 3 / 1700 μέχρι 11 / 3 / 1800	από 29 / 2 / 1700 μέχρι 28 / 2 / 1800	11 ημέρες
από 12 / 3 / 1800 μέχρι 12 / 3 / 1900	από 29 / 2 / 1800 μέχρι 28 / 2 / 1900	12 ημέρες
από 13 / 3 / 1900 μέχρι 13 / 3 / 2100	από 29 / 2 / 1900 μέχρι 28 / 2 / 2100	13 ημέρες
από 14 / 3 / 2100 μέχρι 14 / 3 / 2200	από 29 / 2 / 2100 μέχρι 28 / 2 / 2200	14 ημέρες

Για την περιγραφή των κινήσεων της γης γύρω από τον ήλιο και τον άξονά της είναι περισσότερο βολικό να χρησιμοποιηθούν συντεταγμένες με σύστημα αναφοράς επί της γης, μελετώντας δηλαδή τη σχετική κίνηση του ήλιου γύρω από τη γη. Η ηλιακή γεωμετρία στηρίζεται σε αυτή την παραδοχή.

### 5.3.2. Πολιτικός και ηλιακός χρόνος

Ο πολιτικός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράνε τα ρολόγια μας. Ο χρόνος αυτός δεν είναι σταθερός για όλες τις περιοχές της γης. Καθορίζεται για κάθε γεωγραφικό σημείο συναρτήσει της θέσης του από τον πρώτο μεσημβρινό (μεσημβρινός του Greenwich). Δεδομένου του ότι η διάρκεια μίας πλήρους περιστροφής της γης, γωνίας 360° ως προς τον άξονά της, διαρκεί, με βάση τον πολιτικό χρόνο, 24 ώρες, κάθε ώρα η γη περιστρέφεται κατά  $360^\circ / 24\text{h} = 15^\circ / \text{h}$ . Για κάθε 15° γωνία γεωγραφικού μήκους, ξεκινώντας από τον πρώτο μεσημβρινό, ορίζεται ένας επιπλέον μεσημβρινός (σχήμα 5.4). Ο πολιτικός χρόνος θεσπίζεται κοινός για όλα τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται μεταξύ δύο μεσημβρινών, σε γεωγραφική ζώνη τόξου 15°. Επιπλέον, δεδομένου του ότι η περιστροφή της γης είναι από τα δυτικά προς τα ανατολικά, οι γεωγραφικές περιοχές που βρίσκονται ανατολικά του πρώτου μεσημβρινού προηγούνται χρονικά, ενώ εκείνες που βρίσκονται δυτικά του πρώτου μεσημβρινού έπονται χρονικά. Συνεπώς τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στον πρώτο και στο δεύτερο μεσημβρινό ανατολικά από το Greenwich (0° – 15°) έχουν πολιτικό χρόνο που προηγείται κατά μία ώρα από αυτόν του Greenwich. Τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου μεσημβρινού ανατολικά από το Greenwich (15° – 30°) έχουν πολιτικό χρόνο που προηγείται κατά δύο ώρες από αυτόν του Greenwich. Τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται μεταξύ του τρίτου και του τέταρτου μεσημβρινού δυτικά από το Greenwich (30° – 45°) έχουν πολιτικό χρόνο που έπεται κατά τρεις ώρες από αυτόν του Greenwich. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η επιφάνεια της γης σε μερκατορικό ανάπτυγμα με τους μεσημβρινούς που υποδηλώνουν τις ζώνες ώρες στον πλανήτη.



Σχήμα 5.4: Γεωγραφικό μήκος και ζώνες ώρας.

Στην πραγματικότητα οι πολιτικοί χρόνοι δεν προκύπτουν αποκλειστικά από τους μεσημβρινούς και τις ζώνες ώρας που ορίζονται από αυτούς, αλλά σε συνδυασμό με τα εθνικά σύνορα των κρατών. Αν δηλαδή κάποιιο κράτος εκτείνεται σε περισσότερες από μία ζώνες ώρας, τότε ο πολιτικός χρόνος καθορίζεται ενιαίως για το σύνολο του κράτους, με βάση τη ζώνη ώρας στην οποία βρίσκεται η πρωτεύουσα. Σε κράτη με πολύ μεγάλη έκταση (Ρωσία, Η.Π.Α.), ορίζονται διαφορετικοί πολιτικοί χρόνοι ανά ζώνη ώρας. Χαρακτηριστικό και οικείο παράδειγμα αποτελούν η Ελλάδα και η Κύπρος, δύο κράτη τα οποία, παρόλο που βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες ώρας, για λόγους ευνότητος, έχουν τον ίδιο πολιτικό χρόνο.

Οι περισσότερες χώρες του κόσμου, τέλος, έχουν θεσπίσει μία αλλαγή του πολιτικού χρόνου εντός του έτους, διαχωρίζοντας έτσι το ετήσιο χρονικό διάστημα σε δύο περιόδους, την περίοδο χειμερινής και θερινής ώρας. Η αλλαγή αυτή δεν έχει να κάνει με την κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο ή τον άξονά της. Η μόνη σκοπιμότητα που εξυπηρετεί είναι να προσαρμόσει χρονικά εντός του εικοσιτετραώρου την περίοδο εκτέλεσης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων με τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, ελαχιστοποιώντας, έτσι, τις ανάγκες για φωτισμό, κλιματισμό κλπ και, κατ' επέκταση, την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.

Είναι προφανές ότι ο πολιτικός χρόνος αποτελεί μία παραδοχή, μία σύμβαση προκειμένου να προκύψει κοινή μέτρηση χρόνου. Στην πραγματικότητα, τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται σε διαφορετικά γεωγραφικά μήκη, ακόμα κι αν αυτά βρίσκονται σε κοινή ζώνη ώρας, παρουσιάζουν διαφορετικό «πραγματικό» χρόνο. Πράγματι, αν σε κάθε ώρα η γη περιστρέφεται κατά  $15^\circ$  γύρω από τον άξονά της, τότε κάθε μοίρα αντιστοιχεί σε  $60 \text{ min} / 15^\circ = 4 \text{ min} / 1^\circ$ . Συνεπώς, δύο γεωγραφικά σημεία που παρουσιάζουν διαφορά στα γεωγραφικά μήκη τους κατά  $1^\circ$  θα έχουν πραγματικούς χρόνους που θα διαφέρουν μεταξύ τους κατά 4min.

Ο χρόνος ο οποίος περιγράφει την πραγματική θέση ενός γεωγραφικού σημείου στην επιφάνεια της γης ως προς τον ήλιο ονομάζεται πραγματικός ή ηλιακός χρόνος. Από την ανωτέρω ανάλυση συνάγεται το συμπέρασμα ότι κάθε σημείο στη γη με διαφορετικό γεωγραφικό μήκος έχει διαφορετικό ηλιακό χρόνο. Ο ηλιακός χρόνος ουσιαστικά περιγράφει την πραγματική θέση που έχει πάρει ως προς τον ήλιο ένα γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης, λόγω της περιστροφής της γης ως προς τον άξονά της.

Η ανωτέρω ερμηνεία για τον ηλιακό χρόνο είναι ισοδύναμη με τη σχετική θέση του ήλιου στον ορίζοντα, ως προς ένα δεδομένο γεωγραφικό σημείο. Πράγματι, ο τρόπος με τον οποίο, ίσως ευκολότερα, αντιλαμβανόμαστε την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της, πρακτικά δηλαδή τον ηλιακό χρόνο, είναι μέσω της θέσης που κάθε χρονική στιγμή έχει ο ήλιος στον ορίζοντα. Ο ηλιακός χρόνος, πρακτικά, περιγράφει αυτό ακριβώς, δηλαδή τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα. Δύο γεωγραφικά σημεία μπορεί να ανήκουν στην ίδια χώρα και στην ίδια ζώνη ώρας αλλά να απέχουν αρκετά μεταξύ τους κατά τη διεύθυνση ανατολής – δύσης, ουσιαστικά δηλαδή να έχουν σημαντική διαφορά στα γεωγραφικά μήκη τους, και έτσι να παρουσιάζουν διαφορετικούς ηλιακούς χρόνους. Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω η Κύπρος και η Ελλάδα έχουν τον ίδιο πολιτικό χρόνο. Όμως ο ηλιακός χρόνος διαφέρει σημαντικά, λόγω της μεγάλης διαφοράς που έχουν οι δύο περιοχές ως προς τα γεωγραφικά μήκη τους. Ενώ λοιπόν την ώρα που ανατέλλει ο ήλιος στη Λάρνακα τα ρολόγια σε Ελλάδα και Κύπρο μπορεί να δείχνουν την ίδια πολιτική ώρα, ο ήλιος μπορεί να μην έχει ανατείλει ακόμα στη δυτική Ελλάδα (π.χ. στα Επτάνησα). Η διαφορά αυτή στη θέση του ήλιου στον ορίζοντα (ουσιαστικά στη σχετική θέση του γεωγραφικού σημείου και του ήλιου) αποτυπώνεται με τον ηλιακό χρόνο.

Ο ήλιος διέρχεται από τρεις χαρακτηριστικές θέσεις στον ορίζοντα κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, που ορίζουν τους αντίστοιχους ηλιακούς χρόνους:

- Τον ηλιακό χρόνο ανατολής, που περιγράφει τη χρονική στιγμή πρώτης οπτικής επαφής του ήλιου με ένα γεωγραφικό σημείο (αγνοείται η φυσική μορφολογία του εδάφους που μπορεί να περιορίζει την οπτική επαφή).
- Τον ηλιακό χρόνο δύσης, που περιγράφει τη χρονική στιγμή τελευταίας οπτικής επαφής του ήλιου με ένα γεωγραφικό σημείο (αγνοείται η φυσική μορφολογία του εδάφους που μπορεί να περιορίζει την οπτική επαφή).

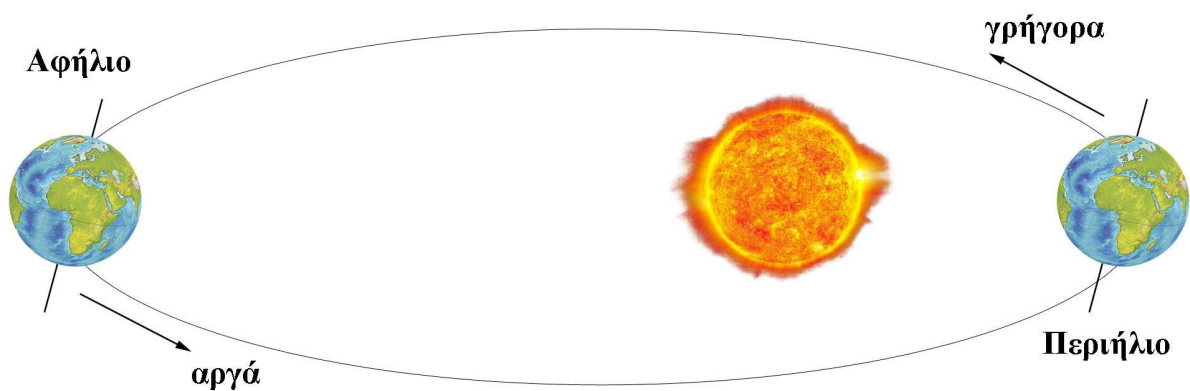
- Την ηλιακή μεσημβρία, που περιγράφει τη χρονική στιγμή κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο στον ορίζοντα.

Με τον ορισμό σε επόμενη παράγραφο του ηλιακού ύψους, ο ηλιακός χρόνος ανατολής και δύσης είναι ο χρόνος που για πρώτη και τελευταία φορά αντίστοιχα εντός του εικοσιτετραώρου το ηλιακό ύψος είναι μεγαλύτερο του μηδενός για το υπό μελέτη γεωγραφικό σημείο. Επίσης ηλιακή μεσημβρία είναι ο ηλιακός χρόνος κατά τον οποίο το ηλιακό ύψος μεγιστοποιείται εντός του εικοσιτετραώρου.

Η ηλιακή ημέρα είναι ο χρόνος μεταξύ των μεσημβρινών μεταβάσεων του ήλιου, δηλαδή δύο διαδοχικών ηλιακών μεσημβριών.

Ο πολιτικός και ο ηλιακός χρόνος τις περισσότερες μέρες του έτους έχουν διαφορά μερικών λεπτών μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η ηλιακή μεσημβρία μπορεί να αποκλίνει από την πολιτική ώρα 12:00 έως και 15 λεπτά. Τούτο ουσιαστικά προκύπτει από και συνεπάγεται ότι ο χρόνος μιας πλήρους ηλιακής ημέρας, δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί σε ένα γεωγραφικό σημείο μεταξύ δύο διαδοχικών ηλιακών μεσημβριών, δεν είναι πάντα ίσος με 24 ώρες. Κάποιες μέρες του έτους η διάρκεια ηλιακής ημέρας είναι μικρότερη και κάποιες άλλες μεγαλύτερη από τις 24 ώρες. Τούτη η διαφορά της διάρκειας ηλιακής ημέρας οφείλεται στη σχετική θέση γης και ήλιου και στις επιδράσεις των βαρυτικών πεδίων των δύο ουρανίων σωμάτων, οι οποίες προκαλούν τη γη να κινείται άλλοτε με μεγαλύτερη και άλλοτε με μικρότερη ταχύτητα ως προς τον ήλιο.

Πράγματι η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο έχει περίπου ελλειπτική μορφή. Ο ήλιος δε βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της τροχιάς αυτής. Ως συνέπεια τούτου, η γη άλλοτε βρίσκεται κοντύτερα και άλλοτε μακρύτερα από τον ήλιο. Έτσι, όταν η Γη είναι στο πιο κοντινό σημείο της με τον ήλιο, το οποίο ονομάζεται *περιήλιο*, κινείται γρηγορότερα, δηλαδή με μεγαλύτερη γραμμική ταχύτητα περιστροφής ως προς τον ήλιο. Όταν είναι στο πιο απόμακρο σημείο της τροχιάς της από τον ήλιο, το οποίο ονομάζεται *αφήλιο*, η γη κινείται πιο αργά (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Τροχιά της γης ως προς τον ήλιο. Αφήλιο και περιήλιο.

Καθώς λοιπόν, με βάση τον πολιτικό χρόνο, η διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της γης ισούται ακριβώς με 24 ώρες, μεταξύ πολιτικού και ηλιακού χρόνου υπάρχει, συνήθως, μια διαφορά χρόνου, που μεταβάλλεται από μέρα σε μέρα κατά τη διάρκεια του έτους. Η χρονική διαφορά αυτή ονομάζεται «Εξίσωση Χρόνου» και, καθώς αναφέρεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της, έχει παγκόσμιο, καθολικό χαρακτήρα, δηλαδή είναι κοινή για όλη τη γη, ανεξάρτητα από τη θέση του κάθε γεωγραφικού σημείου της επιφάνειάς της. Η εξίσωση χρόνου εξαρτάται μόνο από τη θέση της γης ως προς τον ήλιο, πρακτικά δηλαδή, από το τρέχον εικοσιτετράωρο εντός του έτους. Δίνεται από τη σχέση:

$$E_t = 2,2918 \cdot [0,0075 + 0,1868 \cdot \cos(\Gamma) - 3,2077 \cdot \sin(\Gamma) - 1,4615 \cdot \cos(2\Gamma) - 4,089 \cdot \sin(2\Gamma)]. \quad (5.1)$$

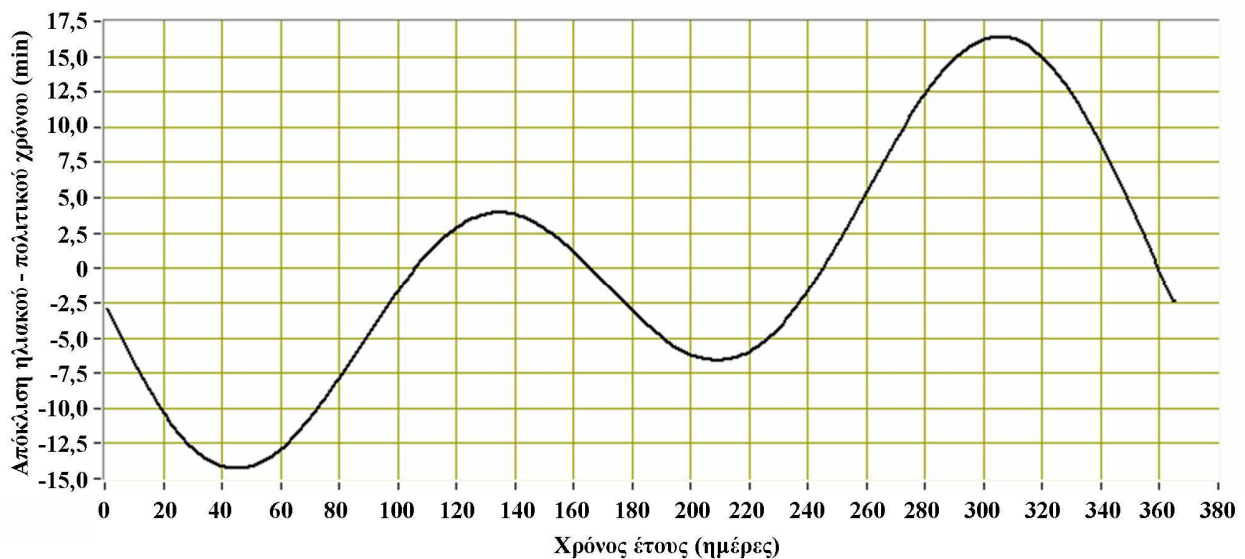


Η παράμετρος  $\Gamma$  που εμφανίζεται στην ανωτέρω σχέση ισούται με:

$$\Gamma = 360^\circ \cdot \frac{n-1}{365} \quad (5.2)$$

όπου  $n$  ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους ( $n = 1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου).

Η εξίσωση χρόνου, όπως υπολογίζεται από τις σχέσεις 5.1 και 5.2, δίνει την απόκλιση μεταξύ πολιτικού και ηλιακού χρόνου σε λεπτά. Γραφική παράσταση της εξίσωσης χρόνου συναρτήσεως του τρέχοντος αριθμού ημέρας έτους δίνεται στο σχήμα 5.6.



**Σχήμα 5.6:** Διακύμανση απόκλισης ηλιακού – πολιτικού χρόνου συναρτήσεως του τρέχοντος αριθμού ημέρας έτους.

Από το σχήμα 5.6 παρατηρείται ότι τις περισσότερες μέρες του έτους η χρονική διάρκεια της ηλιακής ημέρας είναι μεγαλύτερη από 24 ώρες. Στις 2 Νοεμβρίου η διάρκεια της ηλιακής ημέρας είναι η μέγιστη ετήσια, μεγαλύτερη κατά 16min και 23,4sec από τις 24 ώρες. Επίσης, στις 14 Φεβρουαρίου η διάρκεια της ηλιακής ημέρας είναι η ελάχιστη, μικρότερη κατά 14min και 16,2sec των 24 ωρών. Τέλος στις 2 Απριλίου, στις 15 Ιουνίου και στις 2 Σεπτεμβρίου η διάρκεια της ηλιακής ημέρας προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τις 24 ώρες (απόκλιση της τάξης των 3sec).

Με γνωστή πλέον την απόκλιση ηλιακού – πολιτικού χρόνου  $E_t$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός του ηλιακού χρόνου  $t_{sol}$  συναρτήσεως του τοπικού πολιτικού χρόνου  $t_{loc-civ}$  από τη σχέση:

$$t_{sol} = t_{loc-civ} + \frac{E_t}{60} \quad (5.3)$$

Επιπλέον, αν είναι επιθυμητό να ανεξαρτητοποιήσουμε την ανωτέρω σχέση από τον τοπικό πολιτικό χρόνο και να την εκφράσουμε συναρτήσεως της ώρας Greenwich  $t_{std}$  (local standard time), τότε προκύπτει η σχέση:

$$t_{sol} = t_{std} + \frac{\lambda_{std} - \lambda_{loc}}{15} + \frac{E_t}{60} \quad (5.4)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις εμφανίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

$t_{sol}$ :	ο ηλιακός (πραγματικός) χρόνος σε h
$t_{loc-civ}$ :	ο τοπικός πολιτικός χρόνος στη θέση μελέτης σε h
$t_{std}$ :	ο επίσημος χρόνος Greenwich της ζώνης σε h
$\lambda_{loc}$ :	το γεωγραφικό μήκος στην περιοχή μελέτης σε μοίρες
$\lambda_{std}$ :	η ζώνη ώρας στην οποία ανήκει η περιοχή μελέτης σε μοίρες (δυτικά του Greenwich θετικός αριθμός, ανατολικά αρνητικός)
$E_t$ :	η διαφορά ηλιακού – πολιτικού χρόνου σε min.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι στις ανωτέρω σχέσεις ο πολιτικός χρόνος ισούται με το χρόνο χειμερινής ώρας.

### Παράδειγμα 5.1

#### Ηλιακός και πολιτικός χρόνος:

Να βρεθεί ο πολιτικός χρόνος για τον οποίο εμφανίζεται ηλιακή μεσημβρία στο Ηράκλειο Κρήτης στις 20 Αυγούστου.

#### Λύση

Η 20<sup>η</sup> Αυγούστου είναι η υπ' αριθμό  $n = 232$  ημέρα του έτους. Για τις 20 Αυγούστου η διαφορά πολιτικού – ηλιακού χρόνου, με βάση τις σχέσεις 5.1 και 5.2 ισούται με  $-3,81\text{min}$  (διάρκεια ηλιακής ημέρας μικρότερη από 24 ώρες κατά 3min και 50,4sec).

Επίσης ένα χαρακτηριστικό γεωγραφικό μήκος στο κέντρο της πόλης του Ηρακλείου είναι  $25^{\circ} 8' 0''$  ή  $25,13^{\circ}$ . Καθώς βρισκόμαστε ανατολικά από το μεσημβρινό του Greenwich, το γεωγραφικό μήκος της περιοχής μελέτης λαμβάνεται αρνητικό, δηλαδή  $\lambda_{loc} = -25,13^{\circ}$ . Τέλος το Ηράκλειο, όπως και ολόκληρη η Ελλάδα, βρίσκεται μεταξύ 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> παράλληλου μεσημβρινού ανατολικά από το Greenwich, σε ζώνη ώρας  $\lambda_{std} = -30^{\circ}$ . Θέτοντας  $t_{sol} = 12$  και, λύνοντας τη σχέση 5.4 ως προς  $t_{std}$ , βρίσκουμε:

$$t_{sol} = t_{std} + \frac{\lambda_{std} - \lambda_{loc}}{15^{\circ}/h} + \frac{E_t}{60/h} \Leftrightarrow t_{std} = t_{sol} - \frac{\lambda_{std} - \lambda_{loc}}{15^{\circ}/h} - \frac{E_t}{60/h} \Leftrightarrow$$

$$t_{std} = 12h - \frac{-30^{\circ} + 25,13^{\circ}}{15^{\circ}/h} - \frac{-3,81\text{min}}{60\text{min}/h} \Leftrightarrow t_{std} = 12h + 0,325h + 0,063h$$

$$\Leftrightarrow t_{std} = 12,388h = 12h, 23\text{min}$$

Ο χρόνος που υπολογίστηκε ανωτέρω είναι ο επίσημος πολιτικός χρόνος Greenwich της ώρας, που θα δείχνει το ρολόι τοπικού παρατηρητή ρυθμισμένο στη χειμερινή ώρα. Λόγω του ότι στις 20 Αυγούστου ισχύει η θερινή πολιτική ώρα, ο επίσημος χρόνος στον οποίο εμφανίζεται η ηλιακή μεσημβρία ισούται με 13h, 23min.

#### Παρατήρηση:

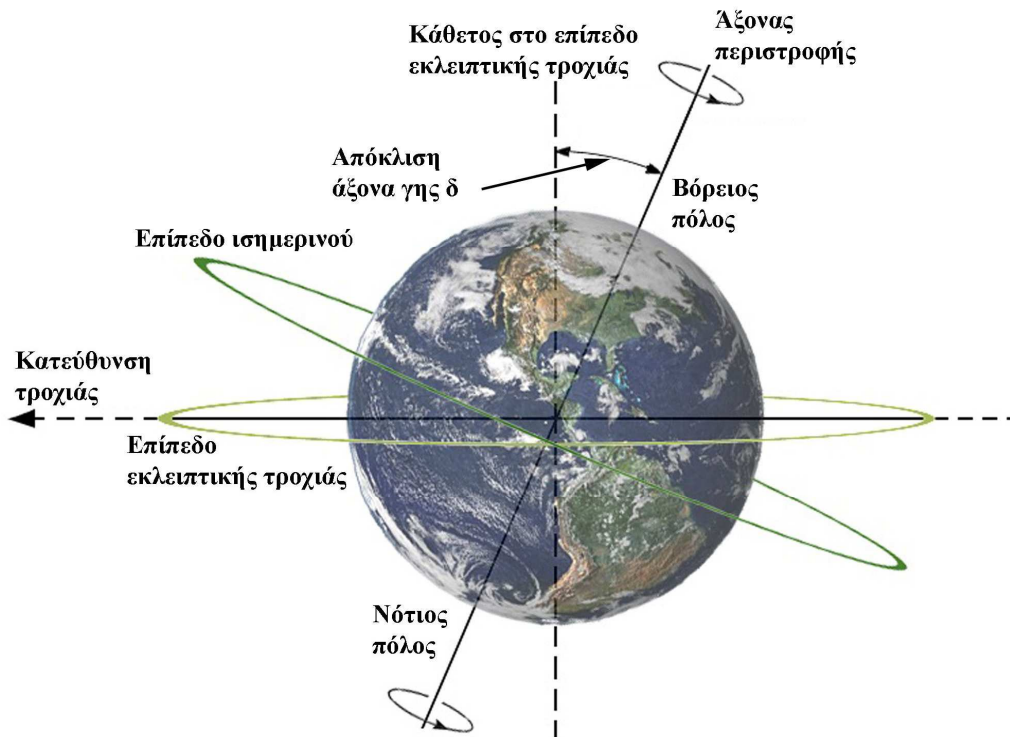
Ο τοπικός πολιτικός χρόνος, με βάση τη σχέση 5.3, υπολογίζεται ως εξής:

$$t_{sol} = t_{loc-civ} + \frac{E_t}{60} \Leftrightarrow t_{loc-civ} = t_{sol} - \frac{E_t}{60} \Leftrightarrow t_{loc-civ} = 12h - \frac{-3,81\text{min}}{60\text{min}/h} \Leftrightarrow$$

$$t_{loc-civ} = 12,06h = 12h, 3,81\text{min}$$

### 5.3.3. Απόκλιση ήλιου

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ένα επίπεδο που ονομάζεται *επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς*. Ο άξονας βορρά – νότου της γης αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς κατά μία γωνία, η οποία, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταβάλλεται από  $-23,45^\circ$  έως  $23,45^\circ$  περίπου. Η γωνία αυτή, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα βορρά – νότου και στο επίπεδο της εκλειπτικής τροχιάς της γης, ονομάζεται *απόκλιση άξονα γης* (earth declination) και παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7. Η απόκλιση του άξονα της γης έχει καθιερωθεί διεθνώς να συμβολίζεται με το ελληνικό μικρό γράμμα «δ».



Σχήμα 5.7: Απόκλιση άξονα γης ως προς το επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς.

Η ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης σε μοίρες δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (n + 284)}{365} \quad (5.5)$$

όπου  $n$  ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους ( $n = 1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου).

Με τη σχέση 5.5 η απόκλιση του άξονα της γης υπολογίζεται ανά ημερήσιο χρονικό βήμα. Είναι όμως δυνατός ο υπολογισμός της με μεγαλύτερη χρονική διακριτοποίηση. Με τη σχέση 5.6, για παράδειγμα, ο υπολογισμός της απόκλισης εκτελείται ανά ώρα:

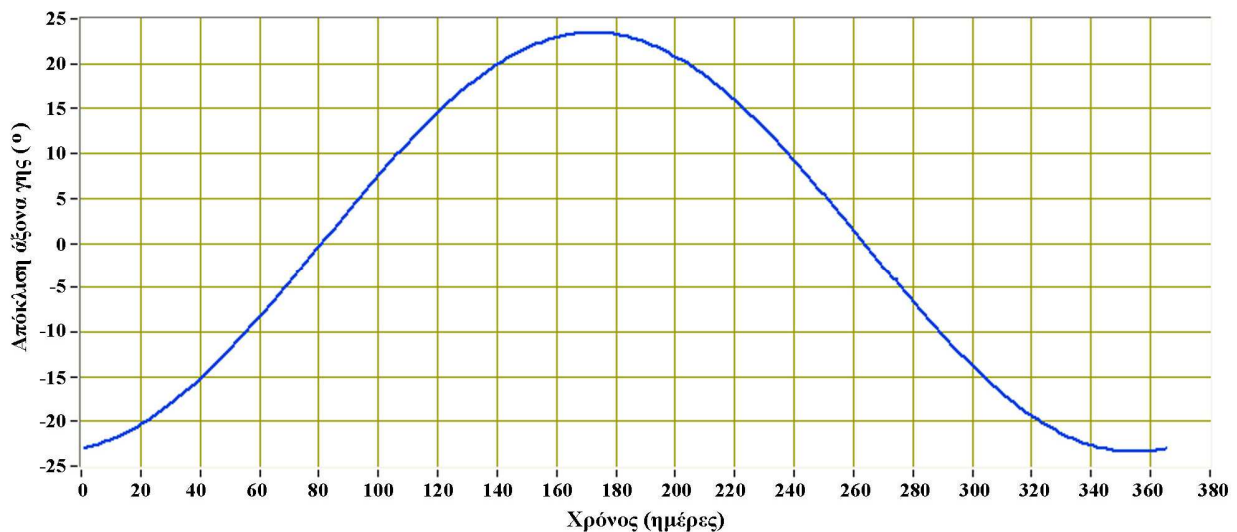
$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (m + 284 \cdot 24)}{365 \cdot 24} \quad (5.6)$$

όπου  $m$  ο τρέχων αριθμός ώρας τους έτους ( $m = 1$  για την πρώτη ώρα του έτους).

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η απόκλιση του άξονα της γης παίρνει κάποιες χαρακτηριστικές τιμές κατά τη διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα:

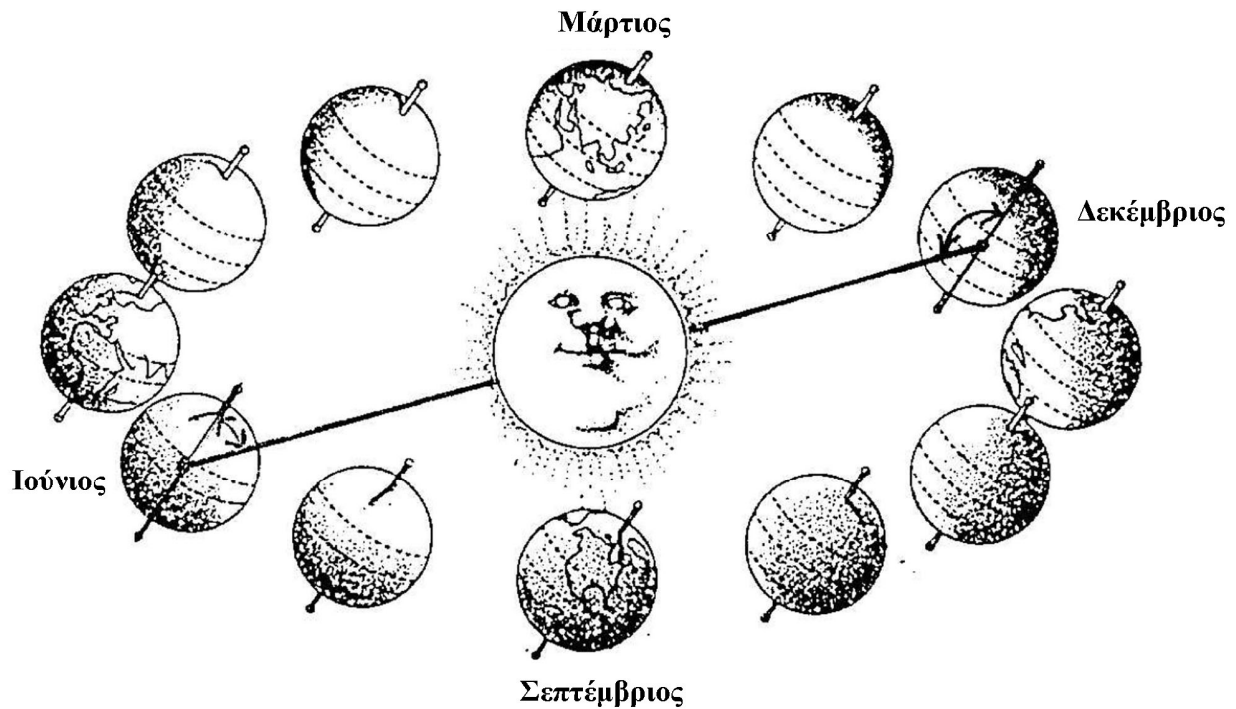
- Μηδενίζεται δύο φορές το έτος, στις 21 Μαρτίου και στις 22 Σεπτεμβρίου.
- Στις 21 Δεκεμβρίου παίρνει την ελάχιστη τιμή της, ίση με  $-23,45^\circ$ .
- Στις 21 Ιουνίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ίση με  $23,45^\circ$ .

Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι ιδιαίτερες αυτές τιμές διαμορφώνουν τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια εντός του έτους.



**Σχήμα 5.8:** Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης.

Το αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης απόκλισης του άξονα της γης είναι ότι οι ακτίνες του ήλιου προσβάλλουν τα διάφορα γεωγραφικά σημεία στην επιφάνεια της γης με διαφορετική γωνία, ανάλογα με τη σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο. Πράγματι η γωνία μεταξύ του άξονα βορρά – νότου και των ηλιακών ακτίνων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους από μία ελάχιστη τιμή ίση με  $90 - 23,45 = 66,55^\circ$ , έως μία μέγιστη τιμή ίση με  $90 + 23,45 = 113,45^\circ$ . Η γωνία αυτή, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα της γης και στη διεύθυνση πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στη γη, ονομάζεται *απόκλιση ηλίου – γης* (σχήμα 5.9).



*Σχήμα 5.9: Εκλειπτική τροχιά γης και γωνίες απόκλισης ηλίου – γης.*

Η αυξομείωση της απόκλισης ηλίου – γης μεταβάλλει την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών που εμφανίζονται στο βόρειο & νότιο ημισφαίριο κατά αντίστροφο τρόπο και τη διακύμανση των χρονικών διαστημάτων ημέρας και νύχτας εντός του έτους.

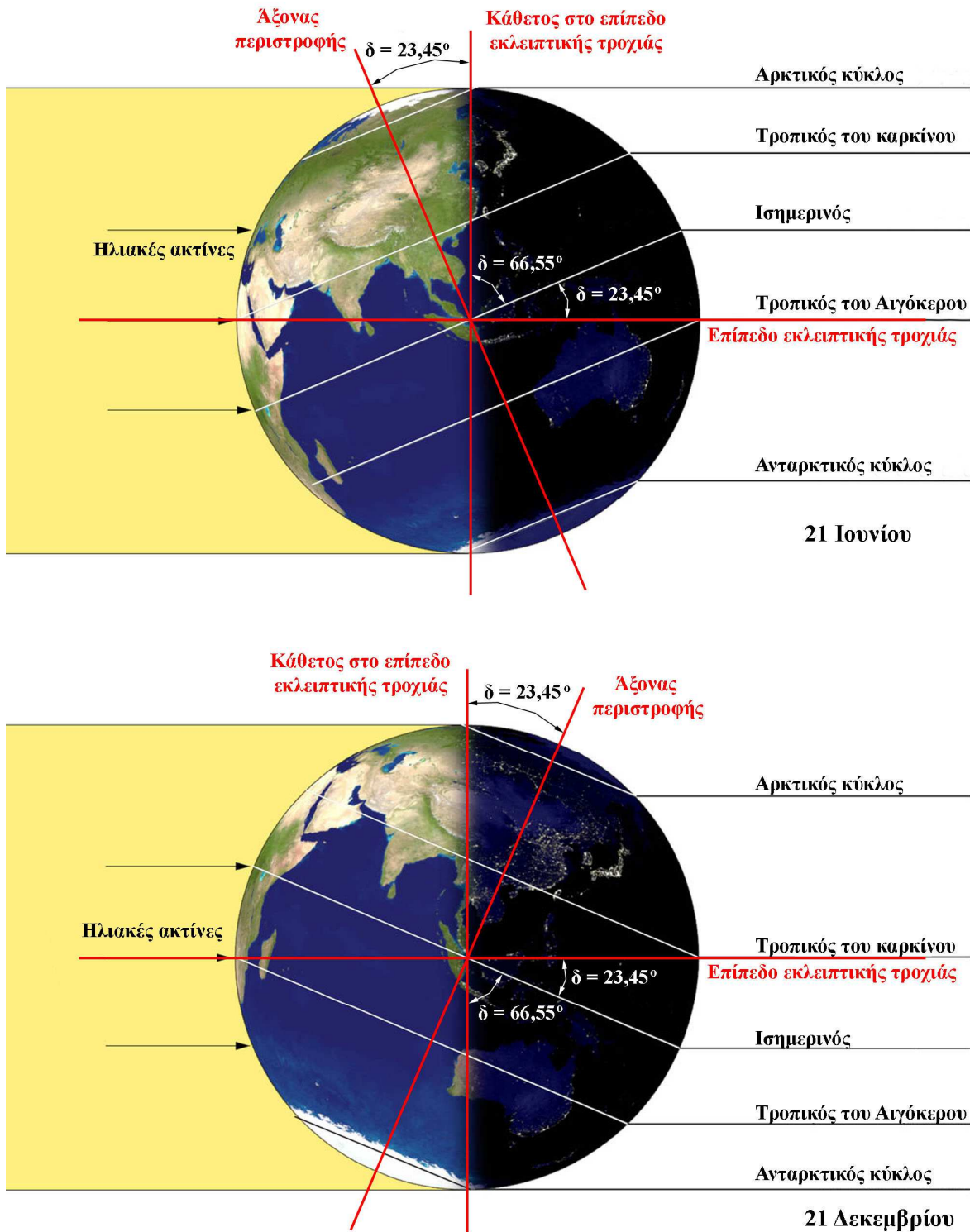
Ορισμένες ημέρες του έτους η απόκλιση ηλίου – γης έχει ειδικές τιμές, οι οποίες διαμορφώνονται με βάση τις τιμές της απόκλισης του άξονα της γης. Συγκεκριμένα, για το βόρειο ημισφαίριο:

- Στις 21 Δεκεμβρίου η απόκλιση ηλίου – γης έχει τη μέγιστη τιμή της, ίση με  $113,45^\circ$ . Την ημέρα αυτή έχουμε το χειμερινό ηλιοστάσιο. Η διάρκεια της ημέρας είναι η ελάχιστη εντός του έτους.
- Στις 21 Ιουνίου η απόκλιση ηλίου – γης έχει την ελάχιστη τιμή της, ίση με  $66,55^\circ$ . Την ημέρα αυτή έχουμε το θερινό ηλιοστάσιο. Η διάρκεια της ημέρας είναι η μέγιστη εντός του έτους.
- Στις 21 Μαρτίου και στις 22 Σεπτεμβρίου η τιμή της απόκλισης ηλίου – γης είναι ίση με  $90^\circ$ . Στις ημέρες αυτές έχουμε αντίστοιχα την εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία.

Οι ισημερίες είναι κοινές και για το νότιο ημισφαίριο. Τα δύο ηλιοστάσια για το νότιο ημισφαίριο είναι αντίθετα σε σχέση με αυτά του βόρειου ημισφαιρίου. Δηλαδή στις 21 Δεκεμβρίου, κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, η απόκλιση στο νότιο ημισφαίριο έχει την ελάχιστη τιμή της ( $66,55^\circ$ ) και η διάρκεια της ημέρας είναι η μέγιστη εντός του έτους. Αντίστοιχα, στις 21 Ιουνίου, κατά το θερινό ηλιοστάσιο, η απόκλιση στο νότιο ημισφαίριο έχει τη μέγιστη τιμή της ( $113,45^\circ$ ) και η διάρκεια της ημέρας είναι η ελάχιστη εντός του έτους.

Η απόκλιση του άξονα της γης και η απόκλιση ηλίου – γης καθορίζουν κάποιους ιδιαίτερους γεωγραφικούς παράλληλους. Οι παράλληλοι αυτοί ορίζονται με βάση τις τιμές της απόκλισης του άξονα της γης και της απόκλισης ηλίου – γης κατά τα δύο ηλιοστάσια. Συγκεκριμένα:

- Ο γεωγραφικός παράλληλος στο βόρειο ημισφαίριο που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ίσο με  $23,45^\circ$ , όση δηλαδή η απόκλιση του άξονα της γης κατά τα δύο ηλιοστάσια, ονομάζεται Τροπικός του Καρκίνου. Ο Τροπικός του Καρκίνου εφάπτεται στο εκλειπτικό επίπεδο περιστροφής της γης κατά τα δύο ηλιοστάσια.



Σχήμα 5.10: Αρκτικός και Ανταρκτικός κύκλος, τροπικοί του Αιγόκερου και του Καρκίνου.

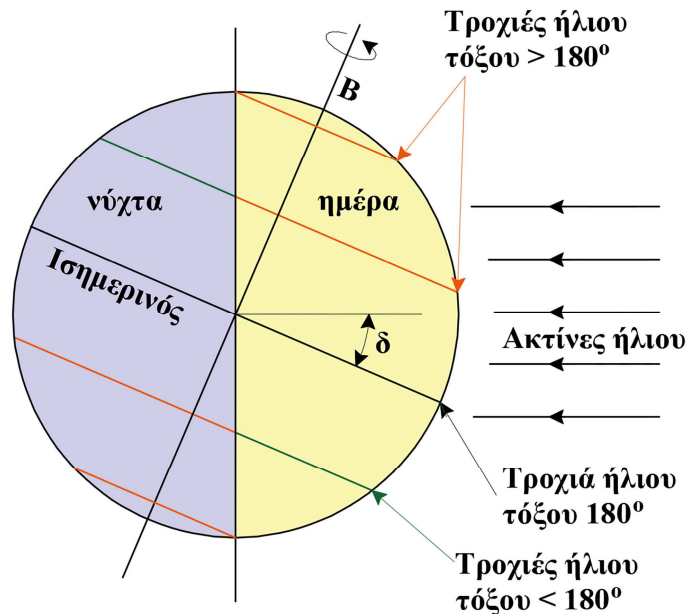
- Ο γεωγραφικός παράλληλος στο νότιο ημισφαίριο που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ίσο με  $23,45^\circ$ , όση δηλαδή η απόκλιση του άξονα της γης κατά τα δύο ηλιοστάσια, ονομάζεται Τροπικός του Αιγόκερου. Ο Τροπικός του Αιγόκερου εφάπτεται στο εκλειπτικό επίπεδο περιστροφής της γης κατά τα δύο ηλιοστάσια.
- Ο γεωγραφικός παράλληλος στο βόρειο ημισφαίριο που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ίσο με  $66,55^\circ$ , όση δηλαδή η απόκλιση ηλίου – γης στο βόρειο ημισφαίριο κατά το θερινό ηλιοστάσιο, ονομάζεται *Αρκτικός κύκλος*. Σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα από αυτό του Αρκτικού κύκλου η εναλλαγή μεταξύ ημέρας και νύχτας υφίσταται μόνο μία φορά το χρόνο, ανά έξι μήνες, κάθε εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία. Συνεπώς, από την εαρινή ισημερία μέχρι τη φθινοπωρινή ισημερία εντός του Αρκτικού κύκλου έχουμε μόνιμα ημέρα. Αντίστοιχα από τη φθινοπωρινή ισημερία μέχρι την εαρινή ισημερία εντός του Αρκτικού κύκλου έχουμε μόνιμα νύχτα.
- Ο γεωγραφικός παράλληλος στο νότιο ημισφαίριο που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ίσο με  $66,55^\circ$ , όση δηλαδή η απόκλιση ηλίου – γης στο νότιο ημισφαίριο κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο, ονομάζεται *Ανταρκτικός κύκλος*. Σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα από αυτό του Ανταρκτικού κύκλου η εναλλαγή μεταξύ ημέρας και νύχτας υφίσταται μόνο μία φορά το χρόνο, ανά έξι μήνες, κάθε εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία. Συνεπώς από την εαρινή ισημερία μέχρι τη φθινοπωρινή ισημερία εντός του Ανταρκτικού κύκλου έχουμε μόνιμα νύχτα. Αντίστοιχα, από τη φθινοπωρινή ισημερία μέχρι την εαρινή ισημερία εντός του Ανταρκτικού κύκλου έχουμε μόνιμα ημέρα.

Τα ανωτέρω παρουσιάζονται αναλυτικά στο σχήμα 5.10.

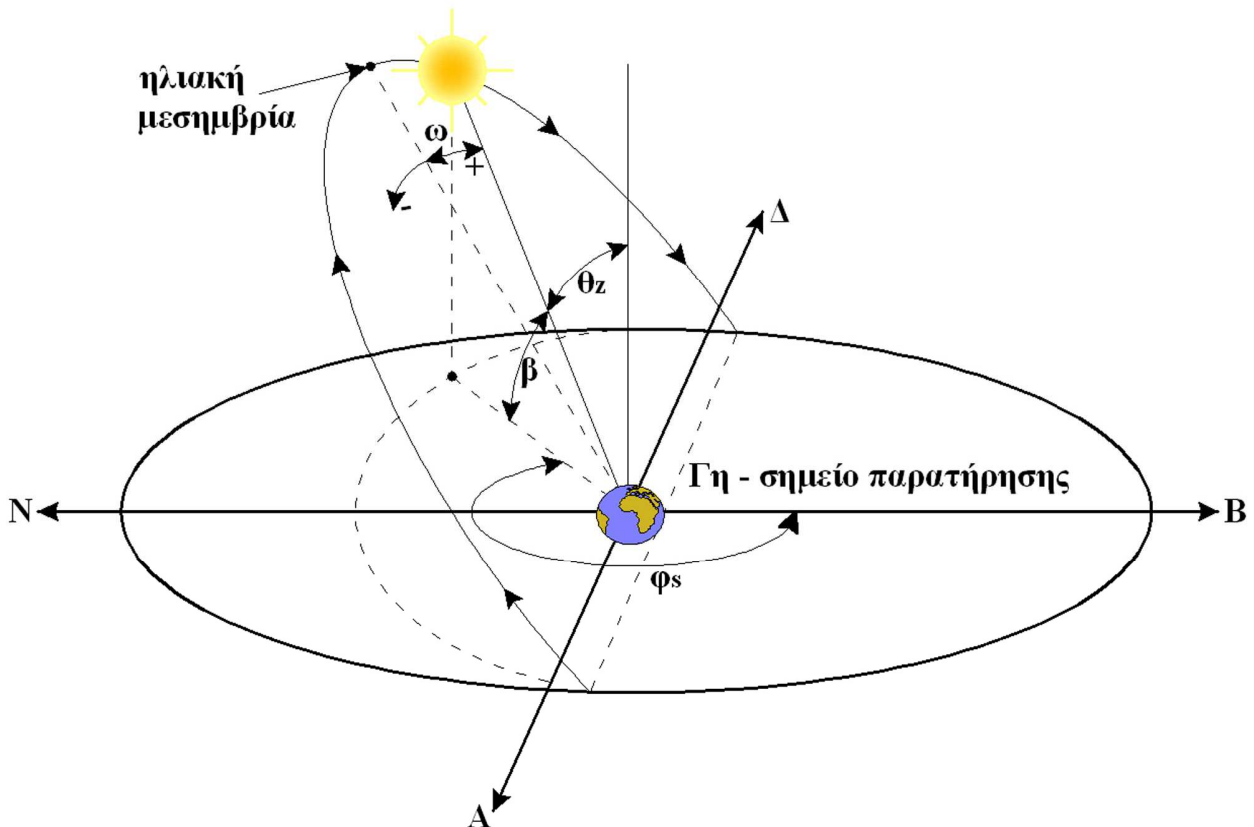
### 5.3.4. Ωριαία γωνία ήλιου

Η περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της γίνεται αντιληπτή από παρατηρητή που βρίσκεται σε κάποιο γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης με βάση τη σχετική κίνηση που διαγράφει ο ήλιος στον ορίζοντα της γης. Καθώς η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της καλύπτοντας τόξο  $360^\circ$ , η σχετική κίνηση του ήλιου ως προς τη γη εκτελείται σε κυκλική τροχιά, καλύπτοντας αντίστοιχα τόξο  $360^\circ$ . Η σχετική κίνηση του ήλιου γύρω από τη γη γίνεται βέβαια αντιληπτή από κάθε γεωγραφικό σημείο μόνο από την ανατολή έως τη δύση του, δηλαδή μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τις ισημερίες, ο ήλιος γίνεται αντιληπτός από ένα γεωγραφικό σημείο για τόξο  $180^\circ$ . Όσο η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη από τη διάρκεια της νύχτας σε ένα γεωγραφικό σημείο, το τόξο της τροχιάς της σχετικής κίνησης του ήλιου ως προς τη γη για το οποίο ο ήλιος θα είναι ορατός από το εν λόγω σημείο θα αντιστοιχεί σε οξεία γωνία. Αντίστοιχα, όσο η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια της νύχτας σε ένα γεωγραφικό σημείο, τόσο το τόξο της τροχιάς της σχετικής κίνησης του ήλιου ως προς τη γη για το οποίο ο ήλιος θα είναι ορατός από το εν λόγω σημείο θα αντιστοιχεί σε αμβλεία γωνία. Για γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται πάνω στον ισημερινό, στα οποία υπάρχει πάντα ισημερία, η κίνηση του ήλιου στον ορίζοντα γίνεται πάντα αντιληπτή για τόξο  $180^\circ$ . Τα ανωτέρω παρουσιάζονται στο σχήμα 5.11α.

Η ωριαία γωνία του ήλιου ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα από την ηλιακή μεσημβρία, μετρούμενη πάνω στο επίπεδο της τροχιάς του ήλιου. Για την ωριαία γωνία του ήλιου έχει καθιερωθεί διεθνώς ο συμβολισμός της με το ελληνικό γράμμα «ω». Στην ηλιακή μεσημβρία η ωριαία γωνία του ήλιου ισούται με μηδέν:  $\omega=0^\circ$ . Δεδομένου του ότι η ωριαία γωνία παίρνει τιμές από  $0^\circ$  (ηλιακή μεσημβρία) έως  $\pm 180^\circ$  (μεσάνυχτα), δηλαδή καλύπτει ένα εύρος τιμών  $360^\circ$  σε χρονικό διάστημα 24 ωρών, κάθε ώρα η ωριαία γωνία μεταβάλλεται κατά  $15^\circ$ . Τις πρωινές ώρες, δηλαδή πριν την ηλιακή μεσημβρία, η ωριαία γωνία είναι αρνητική και κατά τις απογευματινές, δηλαδή μετά την ηλιακή μεσημβρία, γίνεται θετική. Στο σχήμα 5.11β παρουσιάζεται ο ορισμός της ωριαίας γωνίας του ήλιου. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται επίσης το ηλιακό ύψος  $\beta$  και η γωνία ζενίθ  $\theta_z$  του ήλιου, τις οποίες γωνίες θα ορίσουμε στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 5.11α: Τροχιές ήλιου στον ορίζοντα συναρτήσει της διάρκειας της ημέρας.



Σχήμα 5.11β: Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας  $\omega$  του ήλιου.

Από τον ορισμό της συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ωριαία γωνία του ήλιου περιγράφει τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα. Την ίδια όμως ακριβώς πληροφορία δίνει και ο ηλιακός χρόνος. Άρα θα πρέπει να περιμένουμε η ωριαία γωνία του ήλιου και ο ηλιακός χρόνος να συσχετίζονται αναλυτικά μεταξύ τους. Πράγματι η ακόλουθη



σχέση υπολογισμού της ωριαίας γωνίας προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής ανάμεσα στην ωριαία γωνία του ήλιου και τον πραγματικό ηλιακό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη ότι για  $t_{sol} = 12h$  θα πρέπει να είναι  $\omega = 0^\circ$  και ότι για πεδίο τιμών  $t_{sol} = 0 - 24h$  η ωριαία γωνία θα πρέπει να παίρνει τιμές από 0 έως  $\pm 180^\circ$ :

$$\omega = \frac{(t_{sol} - 12) \cdot h}{24h} \cdot 360^\circ \Leftrightarrow \omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ. \quad (5.7)$$

Αποδεικνύεται ότι η ωριαία γωνία κατά την ανατολή του ηλίου  $\omega_{sr}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_{sr} = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (5.8)$$

όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής μελέτης και  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης.

Η ωριαία γωνία του ήλιου κατά τη δύση  $\omega_{ss}$  υπολογίζεται ως η αντίθετη της ωριαίας γωνίας κατά την ανατολή, δηλαδή:

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} = -\cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)]. \quad (5.9)$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις παρατηρούμε ότι οι ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και από την απόκλιση του άξονα της γης, πρακτικά δηλαδή από το τρέχον εικοσιτετράωρο εντός του έτους.

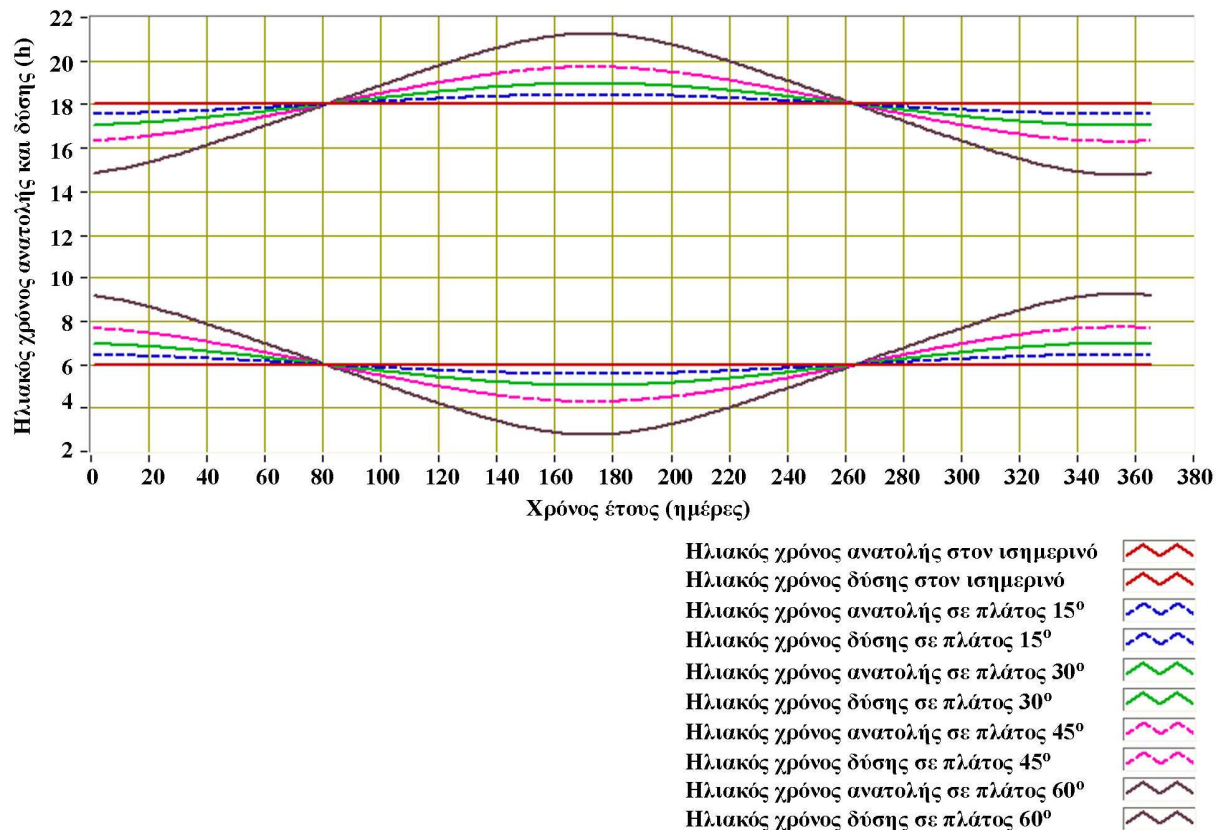
Οι ηλιακοί χρόνοι ανατολής και δύσης υπολογίζονται συναρτήσει της ωριαίας γωνίας του ήλιου από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$t_{sr} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{sr} \quad (5.10)$$

$$t_{ss} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{ss}. \quad (5.11)$$

Με βάση τις τελευταίες σχέσεις, η εξάρτηση της ωριαίας γωνίας αποκλειστικά από το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής και το τρέχον εικοσιτετράωρο του έτους ισχύει και για τους χρόνους ανατολής και δύσης. Σημεία με διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη έχουν διαφορετικούς χρόνους ανατολής και δύσης. Η διακύμανση του χρόνου ανατολής και δύσης εντός του έτους είναι περισσότερο έντονη όσο το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής αυξάνει. Τούτο συνεπάγεται ότι, όσο κατευθυνόμαστε προς τους πόλους, η διακύμανση της διάρκειας της ημέρας μέσα στο έτος γίνεται εντονότερη. Στον ισημερινό η διάρκεια της ημέρας είναι σταθερή και ίση με τη διάρκεια της νύχτας όλο το έτος (ισημερία). Το ακριβώς αντίθετο, όπως ήδη αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, συμβαίνει στους πόλους. Τα ανωτέρω παρουσιάζονται παραστατικά στο σχήμα 5.12, όπου απεικονίζεται η ετήσια διακύμανση του χρόνου ανατολής και δύσης για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη.

Το σχήμα 5.12 κατασκευάζεται υπολογίζοντας αρχικά την απόκλιση του άξονα της γης από τη σχέση 5.5 με ημερήσιο χρονικό βήμα, τις ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης ηλίου από τις σχέσεις 5.8 και 5.9 και, τέλος, τους ηλιακούς χρόνους ανατολής και δύσης από τις σχέσεις 5.10 και 5.11.



**Σχήμα 5.12:** Ετήσια διακύμανση ηλιακών χρόνων ανατολής και δύσης σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη.

Από το σχήμα 5.12 επιβεβαιώνονται τα εξής:

- Η εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία εμφανίζονται τις ίδιες ημερομηνίες, ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος.
- Στον ισημερινό η διάρκεια ημέρας και νύχτας είναι μεταξύ τους ίσες και σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Σε γεωγραφικό πλάτος 60° η μέγιστη διάρκεια ημέρας κατά το θερινό ηλιοστάσιο ισούται με 18,5 ώρες (ποσοστό 77% επί του εικοσιτετραώρου), ενώ η ελάχιστη διάρκεια ημέρας κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο ισούται με 5,5 ώρες (ποσοστό 23% επί του εικοσιτετραώρου).

Σε γεωγραφικό πλάτος 35,37° (όσο της πόλης του Ηρακλείου) η μέγιστη διάρκεια ημέρας κατά το θερινό ηλιοστάσιο ισούται με 14,4 ώρες (ποσοστό 60% επί του εικοσιτετραώρου), ενώ η ελάχιστη διάρκεια ημέρας κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο ισούται με 9,6 ώρες (ποσοστό 40% επί του εικοσιτετραώρου).

### 5.3.5. Βασικές γωνίες της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου

Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα ως προς ένα γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης προσδιορίζεται απόλυτα με τη βοήθεια δύο γωνιών, του ηλιακού ύψους, ή της συμπληρωματικής του που ονομάζεται γωνία ζενίθ, και του αζιμουθίου του ήλιου. Με τη βοήθεια του σχήματος 5.13 δίνονται στη συνέχεια οι ορισμοί για τις γωνίες αυτές.

- Ηλιακό ύψος.

Το ηλιακό ύψος  $\beta$  του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης.

Το ηλιακό ύψος θεωρητικά παίρνει τιμές από 0 έως 90°.

- Γωνία ζενίθ.

Η γωνία ζενίθ  $\theta_z$  του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην κατακόρυφη ως προς την επιφάνεια της γης από το εν λόγω σημείο.

Η γωνία ζενίθ και το ηλιακό ύψος είναι συμπληρωματικές γωνίες, δηλαδή:

$$\beta + \theta_z = 90^\circ. \quad (5.12)$$

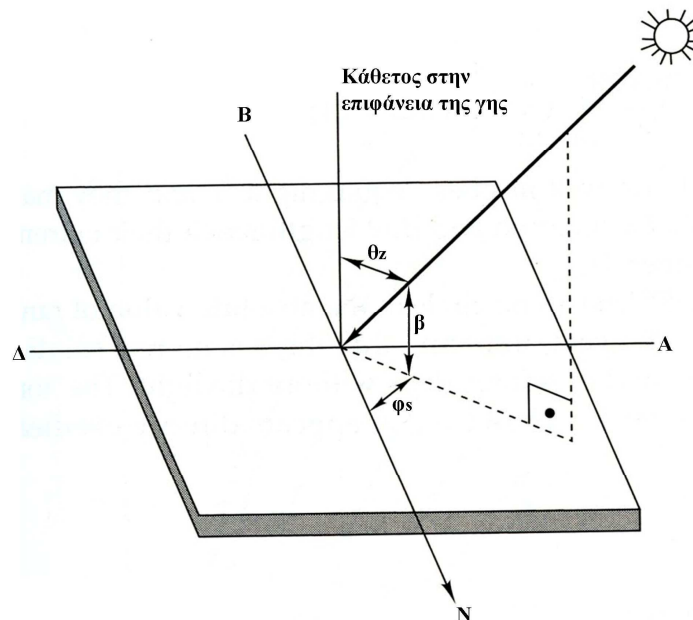
Η γωνία ζενίθ θεωρητικά παίρνει τιμές από 0 έως 90°.

- Αζιμούθιο του ήλιου.

Το αζιμούθιο  $\varphi_s$  του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που ενώνει το εν λόγω σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στη διεύθυνση βορρά - νότου.

Το αζιμούθιο του ήλιου:

- για νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν:  $\varphi_s = 0$ ,
- για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές,
- για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.



Σχήμα 5.13: Ηλιακό ύψος, γωνία ζενίθ και αζιμούθιο του ήλιου.

### 5.3.5.a. Ηλιακό ύψος

Το ηλιακό ύψος  $\beta$  σε δεδομένη χρονική στιγμή και σε δεδομένο γεωγραφικό σημείο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin(\beta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (5.13)$$

όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος του υπό μελέτη γεωγραφικού σημείου,  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης και  $\omega$  η ωριαία γωνία του ήλιου τη χρονική στιγμή μελέτης.

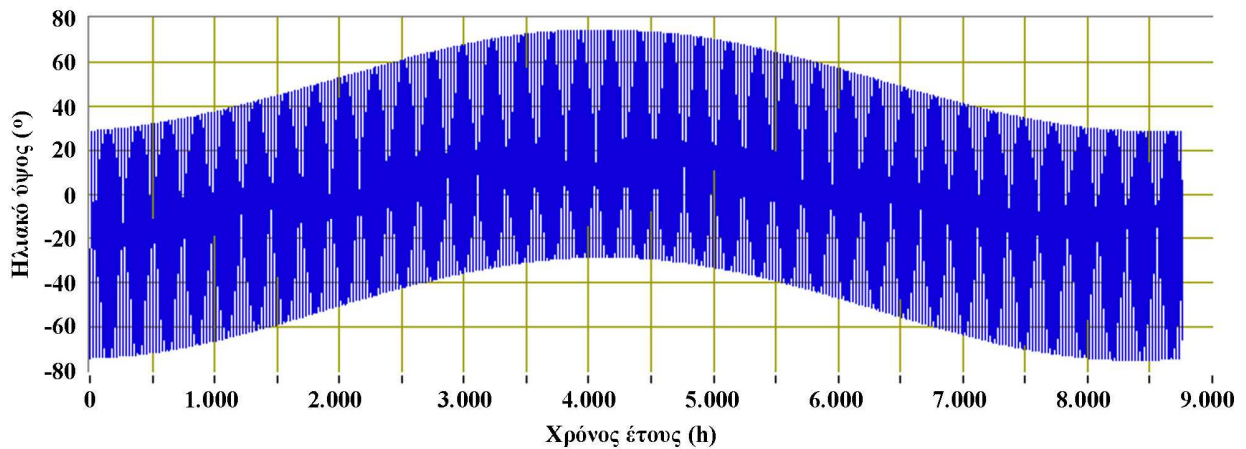
Η διαδικασία υπολογισμού του ηλιακού ύψους σε ένα γεωγραφικό σημείο συναρτήσει της τρέχουσας χρονικής στιγμής του έτους έχει ως εξής:

- Αρχικά υπολογίζεται η απόκλιση του άξονα της γης  $\delta$  για κάθε ώρα του έτους από τη σχέση 5.6.
- Στη συνέχεια, από τις σχέσεις 5.1 και 5.2, υπολογίζεται η διαφορά ηλιακού και πολιτικού χρόνου  $E_t$ .
- Με τη σχέση 5.3 υπολογίζεται για κάθε ώρα του έτους ο ηλιακός χρόνος, εισάγοντας επιπλέον το γεωγραφικό μήκος του υπό μελέτη γεωγραφικού σημείου.
- Έχοντας υπολογίσει τον ηλιακό χρόνο, από τη σχέση 5.7 υπολογίζεται η ωριαία γωνία του ήλιου για κάθε ώρα του έτους.
- Τέλος, εισάγοντας και το γεωγραφικό πλάτος του γεωγραφικού σημείου, με τη βοήθεια της σχέσης 5.13 υπολογίζεται το ημίτονο του ηλιακού ύψους για κάθε ώρα του έτους. Ο υπολογισμός του ηλιακού ύψους εκτελείται με τη αντίστροφη συνάρτηση ημιτόνου.

Στην ανωτέρω διαδικασία επιλέχτηκε ωριαίο χρονικό βήμα υπολογισμού. Η διακριτοποίηση αυτή τις περισσότερες φορές αρκεί για να δώσει ακριβή αποτελέσματα σχετικά με την εξέλιξη ενός φαινομένου ηλιακής γεωμετρίας, χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά ο υπολογιστικός όγκος.

Με τη σχέση 5.13 και τη χρήση της αντίστροφης συνάρτησης ημιτόνου υπολογίζονται τελικά ηλιακά ύψη που θεωρητικά μπορούν να πάρουν τιμές από  $-90^\circ$  έως  $90^\circ$ . Σε γεωγραφικά σημεία που προσεγγίζουν περισσότερο τον ισημερινό, δηλαδή σε μικρά γεωγραφικά πλάτη, οι μέγιστες τιμές που δύναται να πάρει το ηλιακό ύψος μεγαλώνουν. Για παράδειγμα, στον ισημερινό η μέγιστη τιμή του ηλιακού ύψους εμφανίζεται κατά τη φθινοπωρινή ισημερία και ισούται με  $86,52^\circ$ . Αντίστοιχα, στο Ηράκλειο Κρήτης, η μέγιστη τιμή του ηλιακού ύψους εμφανίζεται κατά το θερινό ηλιοστάσιο και ισούται με  $77,13^\circ$ .

Οι αρνητικές τιμές του ηλιακού ύψους σε ένα γεωγραφικό σημείο εμφανίζονται σε χρονικές στιγμές πριν την ανατολή και μετά τη δύση του ηλίου, δηλαδή όσο ακόμα επικρατεί νύχτα. Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση του ηλιακού ύψους στην Αίγινα (γεωγραφικό πλάτος  $37,44^\circ$ ). Το σχήμα αυτό έχει βασιστεί σε υπολογισμούς του ηλιακού ύψους με ωριαίο χρονικό βήμα.

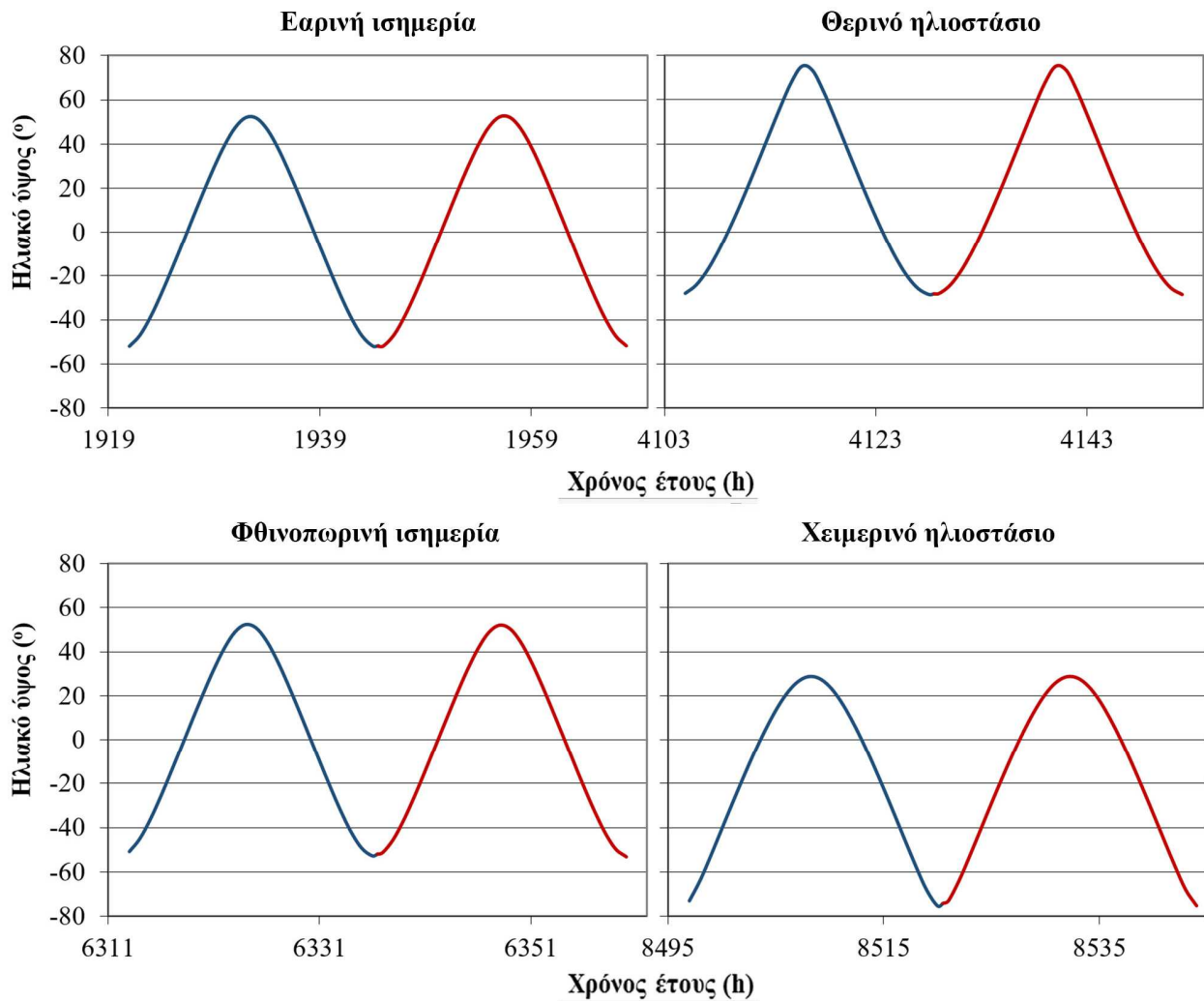


**Σχήμα 5.14:** Ετήσια διακύμανση ηλιακού ύψους στην Αίγινα.

Από το σχήμα 5.14 παρατηρείται ότι το ηλιακό ύψος ανέρχεται κατά μέγιστο (ηλιακή μεσημβρία) έως περίπου τις  $30^\circ$  στις ημέρες κοντά στο χειμερινό ηλιοστάσιο, ενώ στις ημέρες κοντά στο θερινό ηλιοστάσιο, το ηλιακό ύψος φτάνει σχεδόν τις  $75^\circ$ . Επίσης κατά την ενδιάμεση χρονική περίοδο από το χειμερινό έως το θερινό ηλιοστάσιο, το ηλιακό ύψος αυξάνει, καθώς αυξάνει και η διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά την περίοδο από το θερινό έως το χειμερινό ηλιοστάσιο το ηλιακό ύψος μειώνεται, ακολουθώντας επίσης τη συρρίκνωση της διάρκειας της ημέρας.

Λόγω της πυκνότητας της γραφικής παράστασης στο ανωτέρω διάγραμμα ετήσιας διακύμανσης του ηλιακού ύψους, στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται επίσης η διακύμανση του ηλιακού ύψους στην ίδια γεωγραφική θέση σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους, δηλαδή κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία και κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο. Τα ανωτέρω συμπεράσματα είναι περισσότερα εμφανή στο σχήμα αυτό. Οι εναλλαγές στο χρωματισμό των γραφικών παραστάσεων αντιστοιχούν σε διαφορετικά διαδοχικά εικοσιτετράωρα.

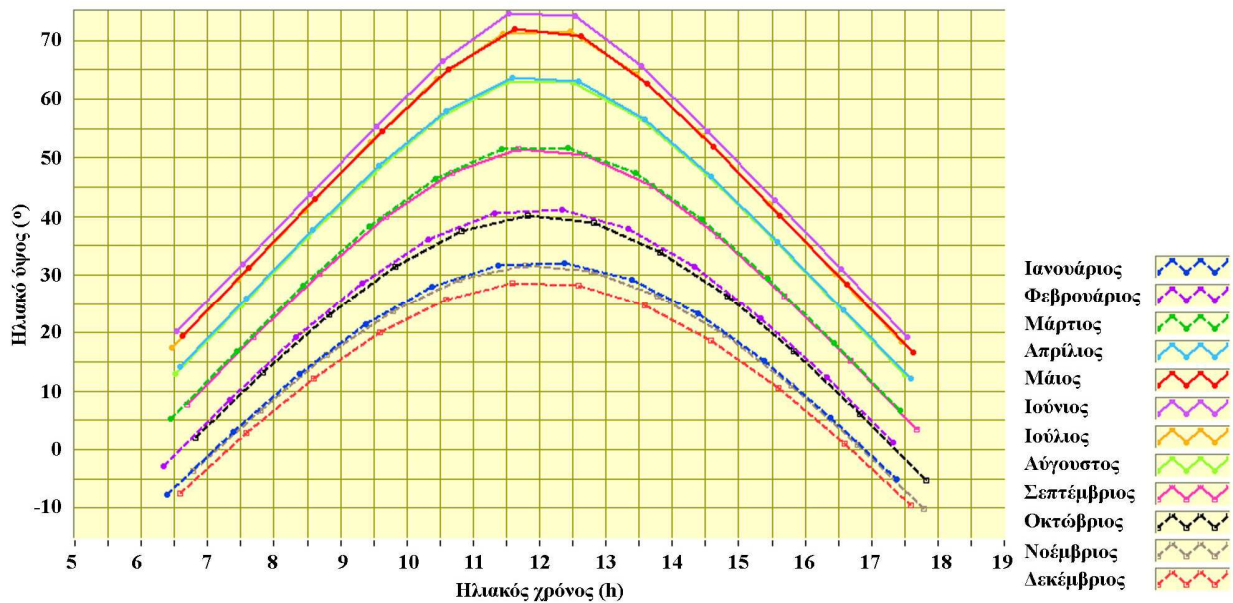
Στα διαγράμματα 5.14 – 5.15 οι αρνητικές τιμές του ηλιακού ύψους αντιστοιχούν σε χρονικές στιγμές εντός του εικοσιτετράωρου πριν την ανατολή και μετά τη δύση, δηλαδή εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της νύχτας.



**Σχήμα 5.15:** Διακύμανση ηλιακού ύψους στην Αίγινα σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους.

Τέλος, στο σχήμα 5.16, παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση του ηλιακού ύψους στην Αίγινα ανά μήνα, συναρτήσει του ηλιακού χρόνου. Για λόγους καλύτερης εποπτείας, το διάγραμμα αυτό έχει περιοριστεί μόνο στις θετικές τιμές του ηλιακού ύψους, δηλαδή από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου. Η αύξηση του ηλιακού ύψους από το Δεκέμβριο ως τον Ιούνιο και η μείωσή του από τον Ιούνιο έως το Δεκέμβριο είναι εμφανής. Επίσης παρατηρείται ότι το μέγιστο ηλιακό ύψος εμφανίζεται πάντα κατά την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή όταν  $t_{sol} = 12h$ .

Το ηλιακό ύψος ουσιαστικά περιγράφει το πόσο ψηλά είναι ο ήλιος στον ορίζοντα. Η πληροφορία αυτή είναι πολύ σημαντική για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων, όπως, για παράδειγμα για τη μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενός ηλιακού συλλέκτη, στη διαφανή επιφάνεια ενός ηλιακού θερμοκηπίου, καθώς και για τον υπολογισμό των κατάλληλων διαστάσεων ενός προβόλου, ώστε να αποφευχθεί ο ηλιασμός ενός παραθύρου κατά το καλοκαίρι, χωρίς όμως να αποτρέπεται η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας το χειμώνα. Τα προβλήματα αυτά θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 5.16: Μέση ημερήσια διακύμανση ηλιακού ύψους στην Αίγινα από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου ανά μήνα.

### 5.3.5.β. Αζιμούθιο ήλιου

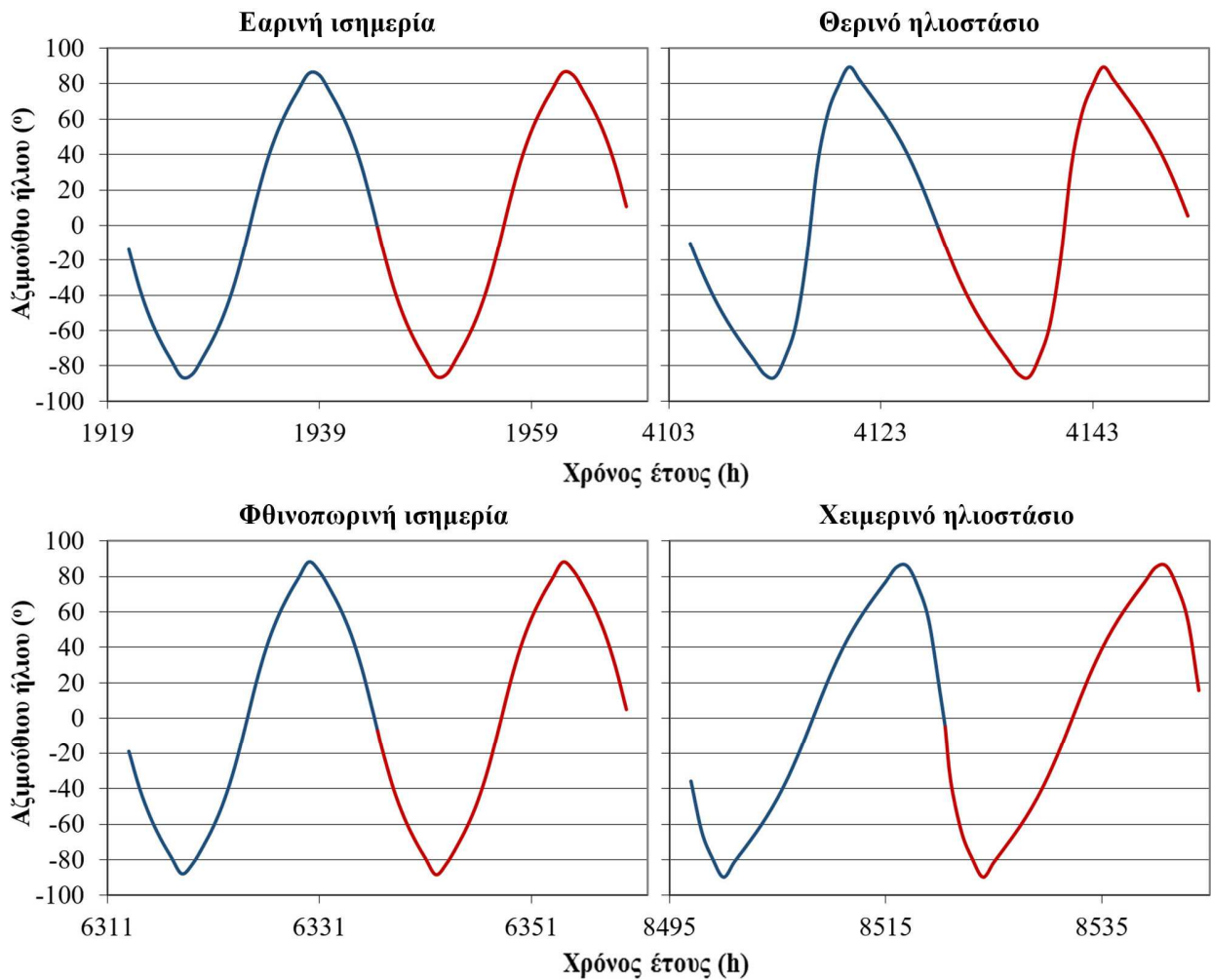
Το αζιμούθιο του ήλιου  $\varphi_s$  σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από την ακόλουθη σχέση, συναρτήσει της απόκλισης του άξονα της γης  $\delta$ , της ωριαίας γωνίας  $\omega$  και του ηλιακού ύψους  $\beta$ :

$$\sin(\varphi_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\beta)}. \quad (5.14)$$

Ο υπολογισμός του αζιμουθίου του ήλιου ακολουθεί εκείνον του ηλιακού ύψους. Η διαδικασία που εφαρμόζεται είναι ακριβώς η ίδια που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα για τον υπολογισμό του ηλιακού ύψους, προσαυξημένη κατά το βήμα υπολογισμού του αζιμουθίου.

Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η διακύμανση του αζιμουθίου του ήλιου στην Αίγινα σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους, δηλαδή κατά τις δύο ισημερίες και τα δύο ηλιοστάσια. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει ακολουθώντας την ανωτέρω περιγραφόμενη μεθοδολογία και για ωριαίο χρονικό βήμα. Όπως ήταν αναμενόμενο, το πεδίο τιμών του αζιμουθίου του ήλιου δεν αλλάζει μέσα στο έτος, όπως συμβαίνει με το ηλιακό ύψος. Και τούτο, διότι η προβολή της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου στην επιφάνεια της γης καλύπτει πάντα έναν πλήρη κυκλικό τομέα. Εκείνο όμως που αλλάζει είναι η κλίση της διακύμανσης του αζιμουθίου, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής του συναρτήσει του χρόνου. Η κλίση αυτή εμφανίζεται περισσότερο έντονη το καλοκαίρι και πιο ήπια το χειμώνα. Τούτο συνεπάγεται ότι το καλοκαίρι η κίνηση του ήλιου στον ορίζοντα είναι περισσότερο γρήγορη, από ότι το χειμώνα.

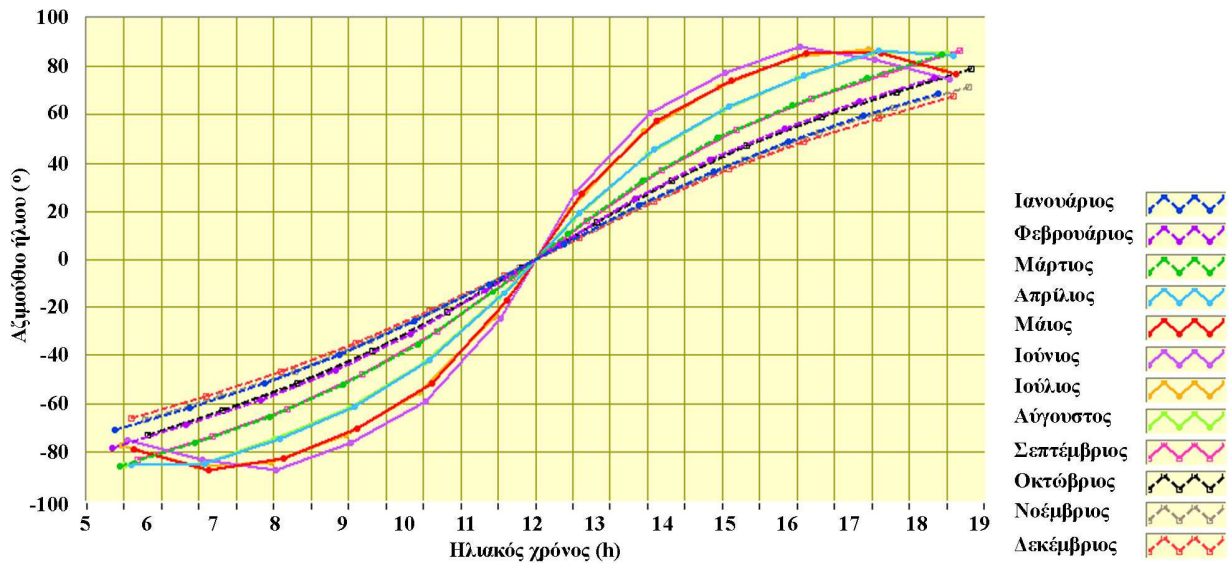
Επίσης, σε αντίθεση με το διάγραμμα διακύμανσης του ηλιακού ύψους, από τα διαγράμματα διακύμανσης του αζιμουθίου του ήλιου δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για τις χρονικές στιγμές ανατολής και δύσης του ήλιου.



**Σχήμα 5.17:** Διακύμανση αζιμουθίου ήλιου στην Αίγινα σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους.

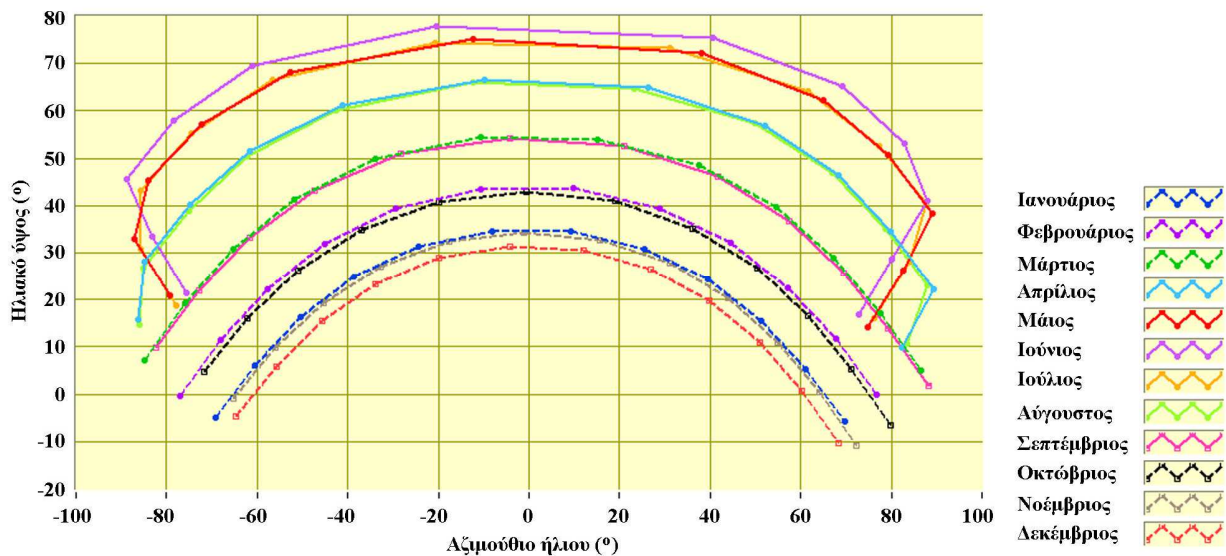
Τέλος, στο σχήμα 5.18, παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση του αζιμουθίου του ήλιου στην Αίγινα ανά μήνα, συναρτήσει του ηλιακού χρόνου. Για λόγους καλύτερης εποπτείας, το διάγραμμα αυτό έχει περιοριστεί μόνο στις τιμές του αζιμουθίου του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή από την ανατολή έως τη δύση του ήλιου. Η μεγαλύτερη κλίση μεταβολής του αζιμουθίου, όσο προσεγγίζουμε τη θερινή περίοδο, είναι εμφανής. Επίσης παρατηρείται ότι ο ήλιος διέρχεται από τη διεύθυνση του νότου (αζιμούθιο  $\phi_s = 0^\circ$ ) πάντα κατά την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή όταν  $t_{sol} = 12h$ .



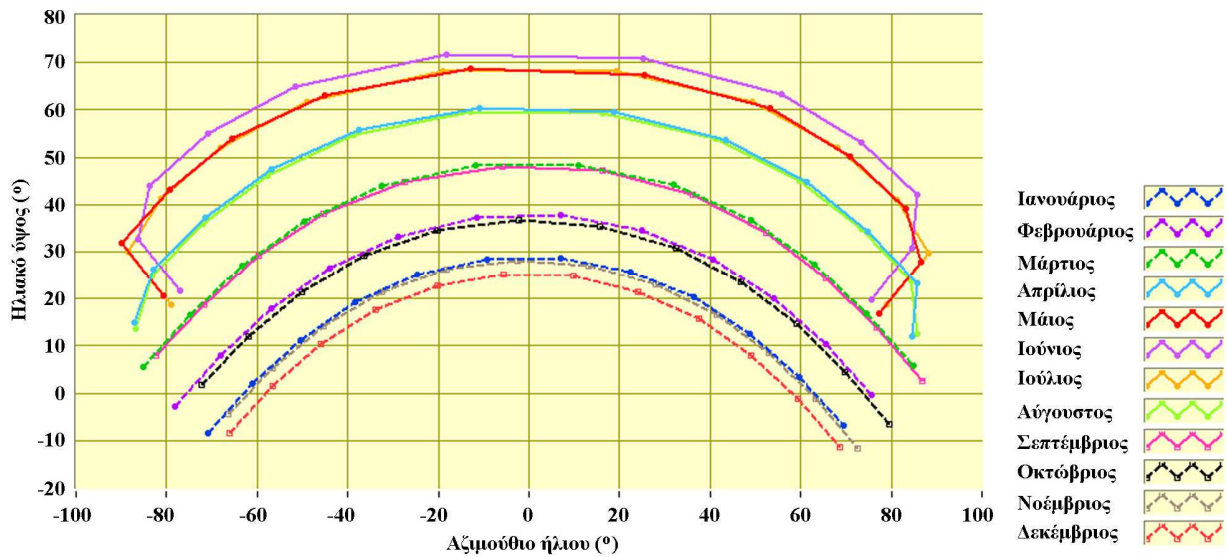


Σχήμα 5.18: Μέση ημερήσια διακύμανση αζιμουθίου ήλιου στην Αίγινα από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου ανά μήνα.

Για την εποπτική γραφική απεικόνιση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα, ιδιαίτερα χρήσιμα είναι τα διαγράμματα που προκύπτουν από τις γραφικές παραστάσεις της μεταβολής ανά εικοσιτετράωρο του ηλιακού ύψους συναρτήσει του αζιμουθίου του ήλιου. Τα διαγράμματα αυτά, καθώς παριστάνουν τη μεταβολή του ηλιακού ύψους κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου συναρτήσει του αζιμουθίου του ήλιου, ουσιαστικά απεικονίζουν τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα. Δύο τέτοια διαγράμματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.19 και 5.20, για την περιοχή της Ιεράπετρας (γεωγραφικό πλάτος  $35^{\circ} 0'$ ) και της Δράμας (γεωγραφικό πλάτος  $41^{\circ} 9'$ ).



Σχήμα 5.19: Γραφική απεικόνιση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα μέσω της μεταβολής του ηλιακού ύψους συναρτήσει του αζιμουθίου για την περιοχή της Ιεράπετρας.



Σχήμα 5.20: Γραφική απεικόνιση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα μέσω της μεταβολής του ηλιακού ύψους συναρτήσει του αζιμουθίου για την περιοχή της Δράμας.

### 5.3.5.γ. Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια

Το ενδιαφέρον που απορρέει από τη μελέτη της ηλιακής γεωμετρίας για εφαρμογές κλιματισμού κτηρίων έγκειται στη δυνατότητα υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια, οποιαδήποτε στιγμή του έτους.

Έστω λοιπόν επιφάνεια η οποία είναι τοποθετημένη σε ένα γεωγραφικό σημείο με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $\theta_p$  (σχήμα 5.21). Ονομάζουμε αζιμούθιο της επιφάνειας τη γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της κάθετης στην επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο και τη διεύθυνση βορρά – νότου. Το αζιμούθιο επιφάνειας συμβολίζεται με  $\varphi_p$  και ουσιαστικά περιγράφει τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Οι τιμές του αζιμουθίου επιφάνειας είναι αντίστοιχες με αυτές του αζιμουθίου του ήλιου, δηλαδή το αζιμούθιο επιφάνειας:

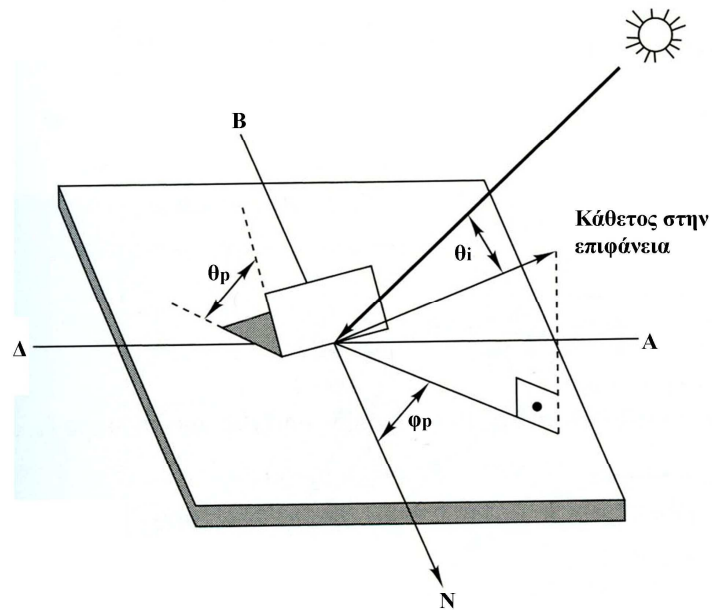
- Με νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν:  $\varphi_p = 0$ .
- Με προσανατολισμό προς τα δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
- Με προσανατολισμό προς τα ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

Αποδεικνύεται ότι το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_i$  της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\beta) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta_p) \quad (5.15)$$

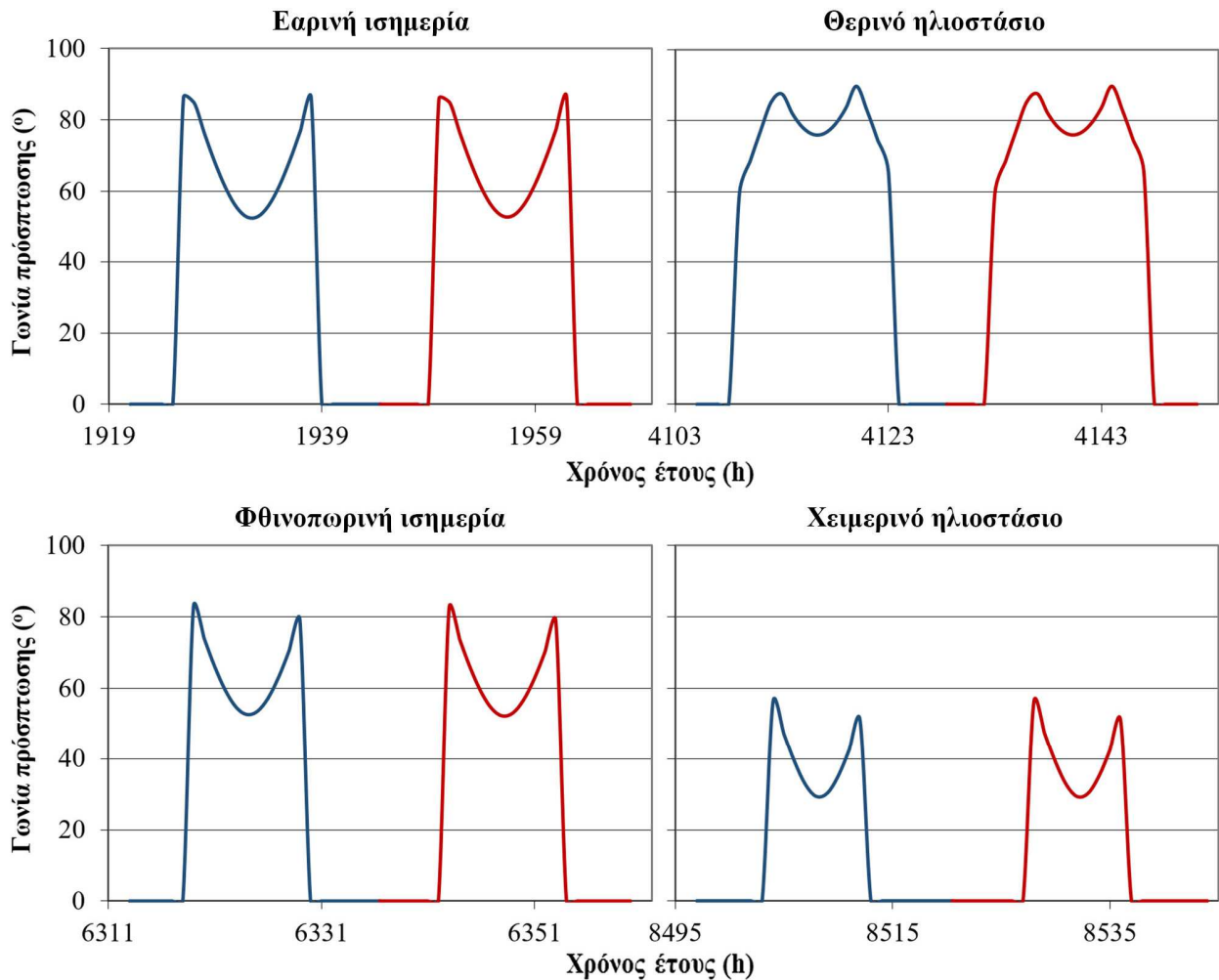
όπου η γωνία  $\gamma$  ονομάζεται «αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας» και ισούται με τη διαφορά του αζιμουθίου του ήλιου μείον το αζιμούθιο της επιφάνειας:

$$\gamma = \varphi_s - \varphi_p \quad (5.16)$$



**Σχήμα 5.21:** Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια.

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η διακύμανση της γωνίας πρόσπτωσης σε επιφάνεια κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο (γωνία κλίσης  $\theta_p = 90^\circ$ ), με νότιο προσανατολισμό, σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους, εγκατεστημένη στην Αίγινα. Παρατηρείται η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης όσο η εκλειπτική τροχιά προσεγγίζει την ηλιακή μεσημβρία.



**Σχήμα 5.22:** Διακύμανση γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο με νότιο προσανατολισμό, εγκατεστημένη στην Αίγινα, σε χαρακτηριστικές περιόδους του έτους.

### Παράδειγμα 5.2

#### Γωνίες εκλειπτικής τροχιάς

Να βρεθεί η γωνία ζενίθ και το αζιμούθιο του ήλιου στις 17 Αυγούστου, ώρα 14:30, στο Ηράκλειο Κρήτης.

#### Λύση

Η 17<sup>η</sup> Αυγούστου είναι η 229<sup>η</sup> ημέρα του έτους. Η διαφορά πολιτικού – ηλιακού χρόνου, με βάση τις σχέσεις 5.1 και 5.2 ισούται με  $-4,485\text{min}$  (διάρκεια ηλιακής ημέρας μικρότερη από 24 ώρες).

Επίσης ένα χαρακτηριστικό γεωγραφικό μήκος στο κέντρο της πόλης του Ηρακλείου είναι  $25^{\circ} 8' 0''$  ή  $25,13^{\circ}$ . Τέλος το Ηράκλειο, όπως και ολόκληρη η Ελλάδα, βρίσκεται μεταξύ 2<sup>ου</sup> και 3<sup>ου</sup> παράλληλου μεσημβρινού ανατολικά από το Greenwich, σε ζώνη ώρας 30°. Το γεωγραφικό μήκος της θέσης λαμβάνεται αρνητικό, καθώς βρισκόμαστε ανατολικά από το μεσημβρινό του Greenwich, δηλαδή  $\lambda_{loc} = -25,13^{\circ}$ .

Ο πολιτικός χρόνος δίνεται 14:30, δηλαδή 14,5h. Όμως επειδή είναι θερινή περίοδος, ο πολιτικός αυτός χρόνος είναι κατά μία ώρα μπροστά, συνεπώς, ο πολιτικός χρόνος, με βάση τη χειμερινή ώρα, είναι 13,5h. Θέτοντας τα δεδομένα αυτά στη σχέση 5.4 υπολογίζουμε τον ηλιακό χρόνο:

$$t_{\text{sol}} = t_{\text{std}} + \frac{\lambda_{\text{std}} - \lambda_{\text{loc}}}{15^\circ/\text{h}} + \frac{E_t}{60/\text{h}} \Leftrightarrow t_{\text{sol}} = 13,5\text{h} + \frac{-30^\circ + 25,13^\circ}{15^\circ/\text{h}} + \frac{-4,485\text{min}}{60\text{min}/\text{h}} \Leftrightarrow t_{\text{sol}} = 13,1\text{h}.$$

Η ωριαία γωνία του ήλιου δίνεται από τη σχέση 5.7:

$$\omega = (t_{\text{sol}} - 12) \cdot 15^\circ \Leftrightarrow \omega = (13,1 - 12)\text{h} \cdot 15^\circ/\text{h} \Leftrightarrow \omega = 16,5^\circ.$$

Για τις 17 Αυγούστου, η απόκλιση του άξονα της γης  $\delta$  υπολογίζεται από τη σχέση 5.6, θέτοντας όπου  $m$  τη 13<sup>η</sup> ώρα της 17<sup>ης</sup> Αυγούστου, δηλαδή τη ώρα με αύξοντα αριθμό  $m = 5.485$ :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (5.485 + 284 \cdot 24)}{365 \cdot 24} \Leftrightarrow \delta = 13,27^\circ.$$

Για να υπολογίσουμε τη γωνία ζενίθ, θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε το ηλιακό ύψος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τη σχέση 5.13. Ένα χαρακτηριστικό γεωγραφικό πλάτος για το κέντρο της πόλης του Ηρακλείου είναι το  $\varphi = 35^\circ 20' 25'' = 35,34^\circ$ .

$$\begin{aligned} \sin(\beta) &= \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \Leftrightarrow \\ \sin(\beta) &= \cos(35,34) \cdot \cos(13,27) \cdot \cos(16,5) + \sin(35,34) \cdot \sin(13,27) \Leftrightarrow \\ \sin(\beta) &= 0,8940 \Leftrightarrow \beta = \arcsin(\beta) = 63,4^\circ \end{aligned}$$

Η γωνία ζενίθ, ως συμπληρωματική του ηλιακού ύψους, υπολογίζεται από τη σχέση 5.12:

$$\beta + \theta_z = 90^\circ \Leftrightarrow \theta_z = 90^\circ - \beta \Leftrightarrow \theta_z = 26,6^\circ.$$

Τέλος, το αζιμούθιο του ήλιου υπολογίζεται από τη σχέση 5.14:

$$\begin{aligned} \sin(\varphi_s) &= \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\beta)} \Leftrightarrow \sin(\varphi_s) = \frac{\cos(13,27^\circ) \cdot \sin(16,5^\circ)}{\cos(63,4^\circ)} \Leftrightarrow \sin(\varphi_s) = 0,6170 \\ \Leftrightarrow \varphi_s &= \arcsin(\varphi_s) \Leftrightarrow \varphi_s = 38,1^\circ \end{aligned}$$

### **Παράδειγμα 5.3**

Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας:

Να βρεθεί η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στις 14:30 στο Ηράκλειο Κρήτης και στις 17 Αυγούστου για δύο επιφάνειες με γωνία κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $45^\circ$  και  $90^\circ$  και προσανατολισμό εναλλακτικά ανατολικό, νότιο και δυτικό.

### Λύση

Το παράδειγμα αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου. Συνεπώς ισχύουν τα αποτελέσματα από το προηγούμενο παράδειγμα αναφορικά με το ηλιακό ύψος, το αζιμούθιο, την ωριαία γωνία και τον ηλιακό χρόνο. Η

γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i$  της ηλιακής ακτινοβολίας ως προς την κάθετη στην επιφάνεια (σχήμα 5.23) δίνεται από τη σχέση 5.15:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\beta) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta_p)$$

Σύμφωνα με τα δεδομένα, ζητείται η γωνία πρόσπτωσης σε δύο επιφάνειες με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $\theta_p = 45^\circ$  και  $\theta_p = 90^\circ$ .

Το αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας  $\gamma$  δίνεται από τη σχέση 5.16:

$$\gamma = \varphi_s - \varphi_p$$

Το αζιμούθιο των δύο επιφανειών  $\varphi_p$  ζητείται να ληφθεί διαδοχικά ίσο με  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  και  $90^\circ$  για προσανατολισμό επιφάνειας ανατολικό, νότιο και δυτικό αντίστοιχα. Συνεπώς, συνολικά για κάθε μία από τις δύο κλίσεις ως προς το οριζόντιο επίπεδο ζητείται να υπολογιστούν τρεις γωνίες πρόσπτωσης για τους ανωτέρω προσανατολισμούς.

Από το προηγούμενο παράδειγμα το αζιμούθιο του ήλιου και το ηλιακό ύψος έχουν υπολογιστεί αντίστοιχα ίσα με  $\varphi_s = 38,1^\circ$  και  $\beta = 63,4^\circ$ .

Το αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας για τους τρεις προσανατολισμούς παίρνει διαδοχικά τις τιμές:

- ανατολικός προσανατολισμός επιφάνειας:

$$\gamma_a = \varphi_s - \varphi_p \Leftrightarrow \gamma_a = 38,1^\circ - (-90^\circ) \Leftrightarrow \gamma_a = 128,1^\circ$$

- νότιος προσανατολισμός επιφάνειας:

$$\gamma_v = \varphi_s - \varphi_p \Leftrightarrow \gamma_v = 38,1^\circ - (0^\circ) \Leftrightarrow \gamma_v = 38,1^\circ$$

- δυτικός προσανατολισμός επιφάνειας:

$$\gamma_\delta = \varphi_s - \varphi_p \Leftrightarrow \gamma_\delta = 38,1^\circ - 90^\circ \Leftrightarrow \gamma_\delta = -51,9^\circ$$

Με διαδοχική χρήση της σχέσης 5.15 για τις ανωτέρω τρεις τιμές του αζιμουθίου ήλιου – επιφάνειας και για τις δύο εναλλακτικές κλίσεις της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, υπολογίζονται τελικά οι ακόλουθες γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια:

<b>Πίνακας 5.2:</b> Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας.			
Κλίση επιφάνειας ως προς οριζόντιο επίπεδο	Προσανατολισμός επιφάνειας		
	Ανατολικός $\varphi_p = -90^\circ$	Νότιος $\varphi_p = 0^\circ$	Δυτικός $\varphi_p = 90^\circ$
	Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας ( $^\circ$ )		
$\theta_p = 45^\circ$	64,1	28,2	34,1
$\theta_p = 90^\circ$	106,0	69,4	74,0

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα, δεδομένου του ότι η χρονική στιγμή που μελετάται είναι λίγο πριν την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή η θέση του ήλιου στον ορίζοντα είναι προς την ανατολή:

- Η επιφάνεια με κλίση  $45^\circ$  έχει μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης, καθώς είναι προσανατολισμένη περισσότερο προς τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα.

- Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια κλίσης  $45^\circ$  πάντα, ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό της, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια με ανατολικό προσανατολισμό, λόγω του ότι τούτη αποκλίνει περισσότερο από τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα (λίγο μετά την ηλιακή μεσημβρία).
- Όταν η επιφάνεια κλίσης  $90^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο έχει ανατολικό προσανατολισμό, η γωνία πρόσπτωσης εμφανίζεται αμβλεία, κάτι που συνεπάγεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η επιφάνεια σκιάζεται, συμπέρασμα απολύτως λογικό, βάσει του προσανατολισμού και της κλίσης της, καθώς και της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα.

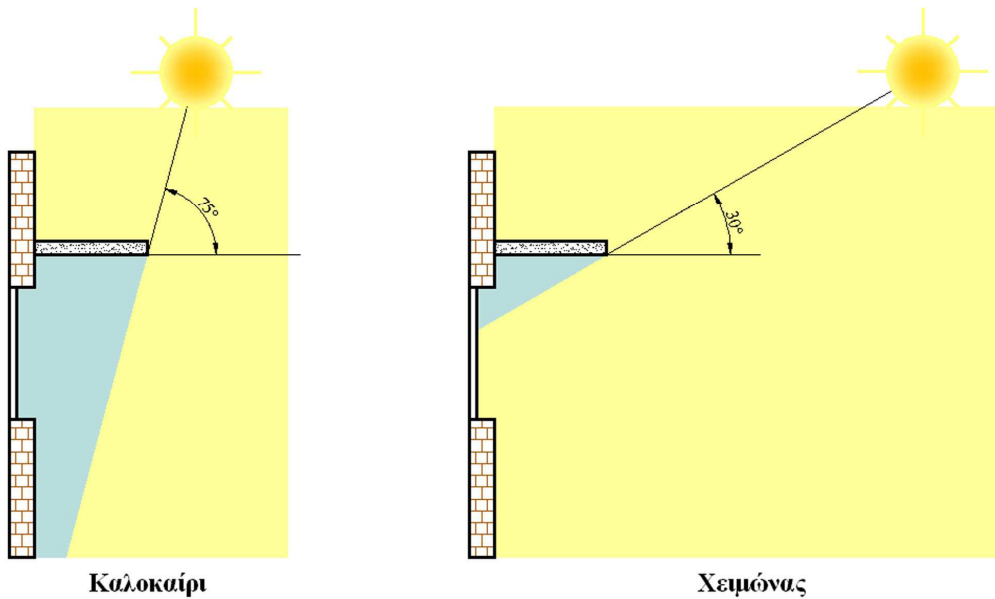
Γίνεται κατανοητό από όσα προηγήθηκαν στο παρόν Κεφάλαιο ότι κάθε χρονική στιγμή η σχετική θέση του ήλιου στον ορίζοντα ως προς οποιοδήποτε γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης είναι δεδομένη και μπορεί να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια. Τούτο συνεπάγεται ότι είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός της διεύθυνσης με την οποία οι ηλιακές ακτίνες θα φθάσουν στο εν λόγω γεωγραφικό σημείο και, κατ' επέκταση, της γωνίας με την οποία θα προσπέσουν σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε επιφάνεια αρκούν τα εξής δεδομένα:

- οι γεωγραφικές συντεταγμένες της επιφάνειας,
- ο προσανατολισμός της επιφάνειας,
- η κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο,
- η χρονική στιγμή για την οποία απαιτείται να εκτελεστεί ο υπολογισμός.

Η δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης σε οποιαδήποτε επιφάνεια, οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε οποιοδήποτε γεωγραφικό σημείο στον πλανήτη έχει τεράστια σημασία στον κλιματισμό κτηρίων, τόσο όσον αφορά στη μεγιστοποίηση της απολαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από ενεργητικά ή παθητικά ηλιακά συστήματα, όσο και αναφορικά με την αποφυγή ηλιασμού κλιματιζόμενων χώρων κατά τους θερινούς μήνες. Τα ανωτέρω θα τεκμηριωθούν στις επόμενες παραγράφους.

### 5.3.6. Σκίαση επιφανειών

Μία από τις βασικότερες εφαρμογές της ηλιακής γεωμετρίας είναι ο υπολογισμός των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία θα σκιαστεί μία επιφάνεια από γειτνιάζοντα εμπόδια, φυσικά ή τεχνητά. Τέτοια μπορεί να είναι γειτονικά κτήρια, δέντρα, κάθε είδους κατασκευές και, κυρίως, οριζόντιοι ή κάθετοι πρόβολοι, που έχουν κατασκευαστεί, συνήθως, πάνω ή δίπλα αντίστοιχα σε διαφανείς επιφάνειες (παράθυρα, πόρτες), προκειμένου να αποτρέψουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας εντός του κλιματιζόμενου χώρου κατά τους θερινούς μήνες. Ειδικά στις περιπτώσεις προβόλων, είναι επιθυμητό να μην παρεμποδίζεται η ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει εντός του κτηρίου κατά τους χειμερινούς μήνες. Αυτή η δυνατότητα είναι εφικτή δεδομένου του ότι τα ηλιακά ύψη το χειμώνα είναι χαμηλά, ενώ το καλοκαίρι είναι υψηλά (σχήμα 5.23). Συνεπώς με την κατάλληλη τοποθέτηση και διαστασιολόγηση του προβόλου, είναι δυνατό να επιτευχθούν και οι δύο στόχοι, δηλαδή ο ηλιασμός των εσωτερικών χώρων του κτηρίου το χειμώνα και η σκιάσή τους το καλοκαίρι.

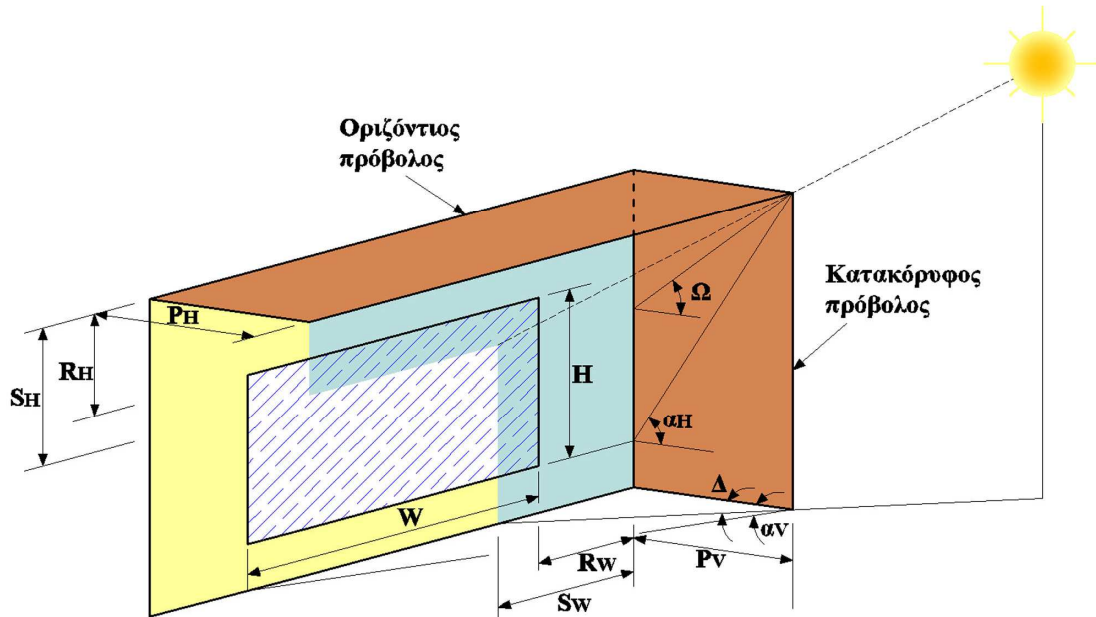


**Σχήμα 5.23:** Σκίαση και ηλιασμός διαφανών επιφανειών κτηριακού κελύφους με τη σωστή διαστασιολόγηση και χωροθέτηση πρόβολου.

Η σκίαση ενός ανοίγματος συναρτίζεται της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.24. Στο σχήμα αυτό εμφανίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- $W$ ,  $H$  είναι το πλάτος και το ύψος του ανοίγματος αντίστοιχα.
- $P_H$ ,  $P_V$  είναι τα πλάτη του οριζώντιου και του κατακόρυφου πρόβολου αντίστοιχα.
- $L_H$ ,  $L_V$  είναι το μήκος του οριζώντιου και το ύψος του κατακόρυφου αντίστοιχα πρόβολου.
- $R_H$ ,  $R_w$  είναι οι αποστάσεις του οριζώντιου και του κάθετου πρόβολου αντίστοιχα από τις πλησιέστερες πλευρές του ανοίγματος.
- $S_H$ ,  $S_w$  είναι τα πλάτη της σκίασης που προκαλούνται από τον οριζόντιο και τον κάθετο πρόβολο αντίστοιχα.
- Η γωνία  $\Omega$  ονομάζεται κατακόρυφη γωνία σκίασης (vertical shadow angle) και είναι η γωνία που σχηματίζει ένα (κεκλιμένο) επίπεδο που διέρχεται από τον ήλιο και την ακραία ακμή του οριζώντιου πρόβολου με το οριζόντιο επίπεδο. Μετριέται προβαλλόμενη σε κατακόρυφο επίπεδο, και καθορίζει τη σκίαση που προξενείται από τον οριζόντιο πρόβολο.
- Η γωνία  $\Delta$  ονομάζεται οριζόντια γωνία σκίασης (horizontal shadow angle) και είναι η γωνία που σχηματίζεται από το (κατακόρυφο) επίπεδο που διέρχεται από τον ήλιο και την ακραία ακμή του κατακόρυφου πρόβολου με το κάθετο στο άνοιγμα επίπεδο. Μετριέται προβαλλόμενη σε οριζόντιο επίπεδο, και καθορίζει τη σκίαση που προξενείται από τον κατακόρυφο πρόβολο.
- Η γωνία  $\alpha_H$ , η οποία προκύπτει ως η ελάχιστη γωνία  $\Omega$ , με την οποία επιτυγχάνεται πλήρης σκίαση του ανοίγματος από οριζόντιο πρόβολο.
- Η γωνία  $\alpha_V$ , η οποία προκύπτει ως η ελάχιστη γωνία  $\Delta$ , με την οποία επιτυγχάνεται πλήρης σκίαση του ανοίγματος από κατακόρυφο πρόβολο.





Σχήμα 5.24: Σκίαση ανοίγματος από οριζόντιο και κατακόρυφο πρόβολο.

Για τα ανωτέρω μεγέθη ισχύουν οι σχέσεις (για κατακόρυφη σκιαζόμενη επιφάνεια):

$$\tan(\Omega) = \frac{\tan(\beta)}{\cos(\gamma)} \quad (\text{για } |\gamma| < 90^\circ \text{ ή } |\gamma| > 270^\circ) \quad (5.17)$$

$$S_w = P_v \cdot |\tan(\Delta)| \quad (5.18)$$

$$S_H = P_H \cdot \tan(\Omega) \quad (5.19)$$

$$\tan(\Delta) = \frac{S_w}{P_v} = \frac{P_v \cdot |\tan(\gamma)|}{P_v} = |\tan(\gamma)|, \text{ δηλαδή } \Delta = \gamma, \text{ για } |\gamma| < 90^\circ \text{ ή } |\gamma| > 270^\circ \quad (5.20)$$

$$\tan(\alpha_H) = \frac{H + R_H}{P_H} \quad (5.21)$$

$$\tan(\alpha_V) = \frac{W + R_w}{P_v} \quad (5.22)$$

Με βάση το σχήμα 5.24, προκειμένου να επιτυγχάνεται πλήρης σκίαση στο άνοιγμα από οριζόντιο πρόβολο θα πρέπει να ισχύει:

$$\tan(\alpha_H) \leq \tan(\Omega) \Rightarrow \alpha_H \leq \Omega \quad (5.23)$$

Αντίστοιχα, προκειμένου να επιτυγχάνεται πλήρης σκίαση στο άνοιγμα από κατακόρυφο πρόβολο θα πρέπει να ισχύει:

$$\tan(\alpha_V) \leq \tan(\Delta) \Rightarrow \alpha_V \leq \Delta \quad (5.24)$$

Με τις ανωτέρω σχέσεις είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός της σκίασης ανοιγμάτων από οριζόντιους ή κάθετους προβόλους ή και ο υπολογισμός των απαιτούμενων διαστάσεων ενός προβόλου, ώστε να σκιάζεται ένα άνοιγμα για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η περίοδος αυτή συνήθως τοποθετείται από τέλη άνοιξης έως αρχές

φθινοπώρου. Η χρήση οριζόντιων ή κάθετων προβόλων μπορεί να εξασφαλίσει επαρκή σκίαση για επιφάνειες με νότιο, ανατολικό ή δυτικό προσανατολισμό κατά τη θερινή περίοδο του έτους.

Τα ανωτέρω θα καταδειχθούν με τα παρακάτω παραδείγματα.

#### **Παράδειγμα 5.4**

##### Σκίαση ανοιγμάτων μέσω προβόλου

Να υπολογιστούν οι διαστάσεις  $L_H$  και  $R_H$  οριζόντιου προβόλου, συναρτήσει του ύψους τοποθέτησής του  $R_H$  πάνω από παράθυρο διαστάσεων  $H \times W$ , το οποίο είναι τοποθετημένο σε κάθετη τοιχοποιία και με νότιο προσανατολισμό σε κτήριο εντός της πόλης της Θεσσαλονίκης, προκειμένου να επιτυγχάνεται ηλιοπροστασία του παραθύρου από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία εντελώς από τις 20 Μαΐου έως τις 10 Σεπτεμβρίου και από τις 10:00 έως τις 17:00 (πολιτικός χρόνος).

##### Λύση

Για να σκιάζεται το παράθυρο, θα πρέπει η γωνία του ανοίγματος  $\Omega$  κατά το χρονικό διάστημα από 20 Μαΐου έως 10 Σεπτεμβρίου και από τις 10:00 έως τις 17:00 να μην είναι μικρότερη από τη γωνία  $\alpha_H$ .

Το πρόβλημα λοιπόν χωρίζεται σε δύο μέρη:

- Τον υπολογισμό της ελάχιστης γωνίας προφίλ του ανοίγματος κατά το χρονικό διάστημα που αναφέρεται.
- Την επίλυση του γεωμετρικού προβλήματος για τον υπολογισμό των διαστάσεων του προβόλου.

Είναι γνωστό, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί στις ενότητες που προηγήθηκαν, ότι για το βόρειο ημισφαίριο το ηλιακό ύψος αυξάνει από το χειμερινό προς το θερινό ηλιοστάσιο και αντίθετα. Συνεπώς το ελάχιστο ηλιακό ύψος θα εμφανίζεται σίγουρα είτε στις 20 Μαΐου, είτε στις 10 Σεπτεμβρίου και είτε στις 10:00, είτε στις 17:00. Καθώς η 20<sup>η</sup> Μαΐου είναι χρονικά πιο κοντά στο θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου), λογικά, το ελάχιστο ηλιακό ύψος θα πρέπει να εμφανίζεται στις 10:00 ή 17:00 της 10<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου.

Αντίστοιχα θα πρέπει να μεταβάλλεται και η γωνία  $\Omega$ , η οποία είναι ανάλογη του ηλιακού ύψους. Επιπλέον όμως η γωνία  $\Omega$  θα ελαχιστοποιείται, με βάση τη σχέση 5.17, όταν μεγιστοποιείται ο παρονομαστής, δηλαδή όταν  $\cos(\gamma) = 1$ . Τούτο όμως συμβαίνει κατά την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή όταν ο ηλιακός χρόνος  $t_{sol} = 12:00$ , δεδομένου του ότι η εξεταζόμενη επιφάνεια έχει νότιο προσανατολισμό. Συνεπώς, η ελαχιστοποίηση της γωνίας  $\Omega$  είναι συνδυασμός της ελαχιστοποίησης του ηλιακού ύψους και της μεγιστοποίησης του  $\cos\gamma$ . Τα ανωτέρω θα εξακριβωθούν αναλυτικά με τον ακριβή υπολογισμό του ηλιακού ύψους και της γωνίας  $\Omega$  για τις ανωτέρω ημερομηνίες ανά ώρα, ειδικότερα δε και για την ηλιακή μεσημβρία.

Καταρχήν επιλέγεται ένα σημείο στο κέντρο της Θεσσαλονίκης με συντεταγμένες:

- γεωγραφικό πλάτος  $\varphi = 40^\circ 37' 50'' = 40,63^\circ$ ,
- γεωγραφικό μήκος  $\lambda = 22^\circ 57' 00'' = 22,95^\circ$ .

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον ηλιακό χρόνο από τις 10:00 έως τις 17:00 στις 20 Μαΐου και στις 10 Σεπτεμβρίου, βρίσκοντας πρώτα την εξίσωση χρόνου με βάση τις σχέσεις 5.1 και 5.2.

- για τις 20 Μαΐου (τρέχων αριθμός ημέρας από την αρχή του έτους  $n = 140$ ):  $E_t = 3,80\text{min}$ ,
- για τις 10 Σεπτεμβρίου (τρέχων αριθμός ημέρας από την αρχή του έτους  $n = 253$ ):  $E_t = 2,78\text{min}$ .

Και τις δύο ημερομηνίες (20 Μαΐου και 10 Σεπτεμβρίου) ο πολιτικός χρόνος έχει ρυθμιστεί στη θερινή ώρα, συνεπώς, καθώς οι ανωτέρω ώρες θα πρέπει να ληφθούν σύμφωνα με τη χειμερινή ώρα, τούτες θα είναι ίσες με 9:00 και 16:00 αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του ηλιακού χρόνου ακολουθεί τη διαδικασία που παρουσιάστηκε αναλυτικά σε προηγούμενα παραδείγματα.

Η ωριαία γωνία του ήλιου υπολογίζεται για τους ανωτέρω ηλιακούς χρόνους με βάση τη σχέση 5.7:

$$\omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ .$$

Η απόκλιση του άξονα της γης υπολογίζεται για τις ανωτέρω ώρες του έτους με βάση τη σχέση 5.6.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (m + 284 \cdot 24)}{365 \cdot 24}.$$

Η τρέχουσα ώρα του έτους για τις χρονικές στιγμές που εξετάζονται είναι:

- για τις 20 Μαΐου, ώρα 9:00:  $m = 139 \cdot 24 + 9 = 3.345\text{h}$ ,
- για τις 10 Σεπτεμβρίου, ώρα 9:00:  $m = 252 \cdot 24 + 9 = 6.057\text{h}$ .

Έχοντας υπολογίσει την απόκλιση του άξονα της γης και την ωριαία γωνία του ήλιου, είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός του ηλιακού ύψους στο γεωγραφικό σημείο και κατά τις χρονικές στιγμές που μας ενδιαφέρουν από τη σχέση 5.13:

$$\sin(\beta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta).$$

Στη συνέχεια, το αζιμούθιο του ήλιου υπολογίζεται από τη σχέση 5.14:

$$\sin(\varphi_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\beta)}.$$

Το αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας  $\gamma$  δίνεται από τη σχέση 5.16, στην οποία για επιφάνεια νότιου προσανατολισμού είναι  $\varphi_p = 0^\circ$ :

$$\gamma = \varphi_s - \varphi_p.$$

Τέλος η γωνία προφίλ του ανοίγματος για τις ανωτέρω ημερομηνίες προκύπτει από τη σχέση:

$$\tan(\Omega) = \frac{\tan(\beta)}{\cos(\gamma)}$$

Τα αποτελέσματα υπολογισμού για τις δύο εξεταζόμενες ημερομηνίες παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3.

Θερμική ώρα (h)	Πολιτικός χρόνος (h)	Ηλιακός χρόνος (h)	Ωριαία γωνία ( $^\circ$ )	Απόκλιση άξονα γης ( $^\circ$ )	Ηλιακό ύψος ( $^\circ$ )	Αζιμούθιο ήλιου - επιφάνειας ( $^\circ$ )	$\tan(\Omega)$	Γωνία $\Omega$ ( $^\circ$ )
10,00	9,00	8,59	-51,10	19,79	41,98	-80,10	5,24	79,19
11,00	10,00	9,59	-36,10	19,80	52,90	-66,77	3,35	73,39
12,00	11,00	10,59	-21,10	19,81	62,48	-47,14	2,82	70,48
13,00	12,00	11,59	-6,10	19,82	68,55	-15,86	2,65	69,30
14,00	13,00	12,59	8,90	19,83	67,85	22,71	2,66	69,42
13,41	12,41	12,00	0,00	19,84	69,21	0,00	2,63	69,21
15,00	14,00	13,59	23,90	19,85	60,89	51,58	2,89	70,92
16,00	15,00	14,59	38,90	19,86	50,96	69,67	3,55	74,26
17,00	16,00	15,59	53,90	19,87	39,93	82,29	6,24	80,89

**Πίνακας 5.3β:** Υπολογισμός της γωνίας  $\Omega$  για τις 10 Σεπτεμβρίου.

Θερινή ώρα (h)	Πολιτικός χρόνος (h)	Ηλιακός χρόνος (h)	Ωριαία γωνία (°)	Απόκλιση άξονα γης (°)	Ηλιακό ύψος (°)	Αζιμούθιο ηλίου - επιφάνειας (°)	$\tan(\Omega)$	Γωνία $\Omega$ (°)
10,00	9,00	8,58	-51,36	4,46	31,55	-66,02	1,51	56,50
11,00	10,00	9,58	-36,36	4,45	41,29	-51,86	1,42	54,89
12,00	11,00	10,58	-21,36	4,43	49,03	-33,62	1,38	54,13
13,00	12,00	11,58	-6,36	4,41	53,34	-10,65	1,37	53,81
14,00	13,00	12,58	8,64	4,40	52,94	14,40	1,37	53,82
13,42	12,42	12,00	0,00	4,38	53,75	0,00	1,36	53,75
15,00	14,00	13,58	23,65	4,36	47,97	36,67	1,38	54,13
16,00	15,00	14,58	38,65	4,35	39,82	54,17	1,42	54,93
17,00	16,00	15,58	53,65	4,33	29,85	67,81	1,52	56,65

Όπως αναμενόταν, η ελάχιστη γωνία  $\Omega$  εμφανίζεται στις 10 Σεπτεμβρίου κατά την ηλιακή μεσημβρία, δηλαδή σε ηλιακό χρόνο 12:00, η οποία εμφανίζεται στις 13,42 ( $\approx 13:25$ ) τοπική θερινή ώρα. Η γωνία  $\Omega$  κατά αυτή τη χρονική στιγμή υπολογίζεται  $53,75^\circ$ , με  $\tan\Omega = 1,36$ .

Για να επιτυγχάνεται πλήρης σκίαση στο άνοιγμα από τον οριζόντιο πρόβολο θα πρέπει να ισχύει:

$$\tan(\alpha_H) \leq \tan(\Omega) \Leftrightarrow \frac{H + R_H}{P_H} \leq \tan(\Omega) \Leftrightarrow P_H \geq \frac{H + R_H}{\tan(\Omega)}$$

Αν υποθέσουμε, προκειμένου να έχουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα, το ύψος του παραθύρου είναι  $H = 1\text{m}$  και το ύψος τοποθέτησης του οριζόντιου προβόλου πάνω από το παράθυρο ισούται με  $R_H = 0,3\text{m}$ , τότε από την ανωτέρω σχέση υπολογίζεται το ελάχιστο πλάτος του προβόλου  $P_{H\min} = 0,96\text{m}$ .

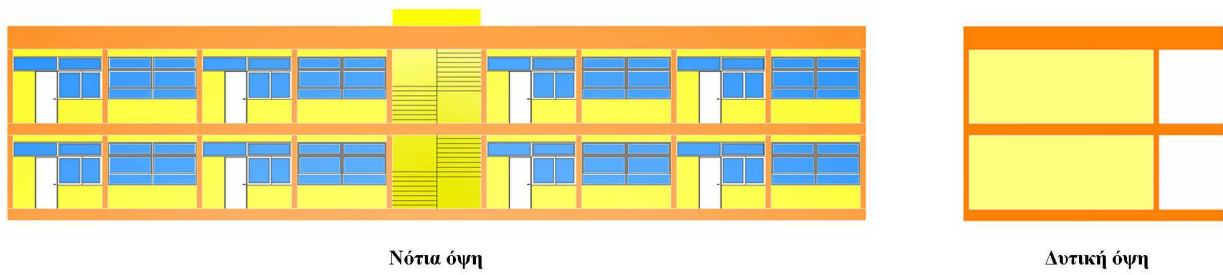
Με το ανωτέρω παράδειγμα έγινε προφανής η χρήση της ηλιακής γεωμετρίας για τον υπολογισμό των απαιτούμενων διαστάσεων οριζόντιων προβόλων για τη σκίαση διαφανών επιφανειών ή την ακριβή πρόβλεψη των περιόδων ηλιασμού τους. Αντίστοιχη είναι η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί στην περίπτωση που πρέπει να υπολογιστούν οι διαστάσεις κάθετων προβόλων.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής ηλιακής γεωμετρίας για τον υπολογισμό σκίασης εξωτερικών εμποδίων σε μία επιφάνεια ενδιαφέροντος.

### Παράδειγμα 5.5

#### Σκίαση ανοιγμάτων από φυσικά εμπόδια

Στο σχήμα 5.25 παρουσιάζονται η πρόσοψη και η πλάγια όψη εκ δυτικών ενός σχολικού κτηρίου. Να υπολογιστούν οι χρονικές περίοδοι εντός του έτους κατά τις οποίες θα υφίσταται σκίαση η νότια όψη του σχολικού κτηρίου από συστάδα δέντρων που υπάρχουν νότια αυτής. Στα σχήματα 5.26 δίνονται οι σχετικές θέσεις των δέντρων και της θέσης του κτηρίου. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ νότιας όψης και δέντρων να ληφθεί ίση με  $\delta L = 40\text{m}$  και το ύψος των δέντρων να ληφθεί ίσο με  $H = 20\text{m}$ . Οι αποστάσεις στη διεύθυνση ανατολή – δύση από τα ακραία δέντρα έως τις άκρες του κτηρίου να ληφθούν ίσες με  $L_1 = 10\text{m}$  και  $L_2 = 30\text{m}$ . Το συνολικό μήκος της νότιας όψης ισούται με  $L = 80\text{m}$ . Οι συντεταγμένες της θέσης εγκατάστασης του κτηρίου είναι  $\varphi = 35^\circ 01'$  και  $\lambda = 25^\circ 07'$ .



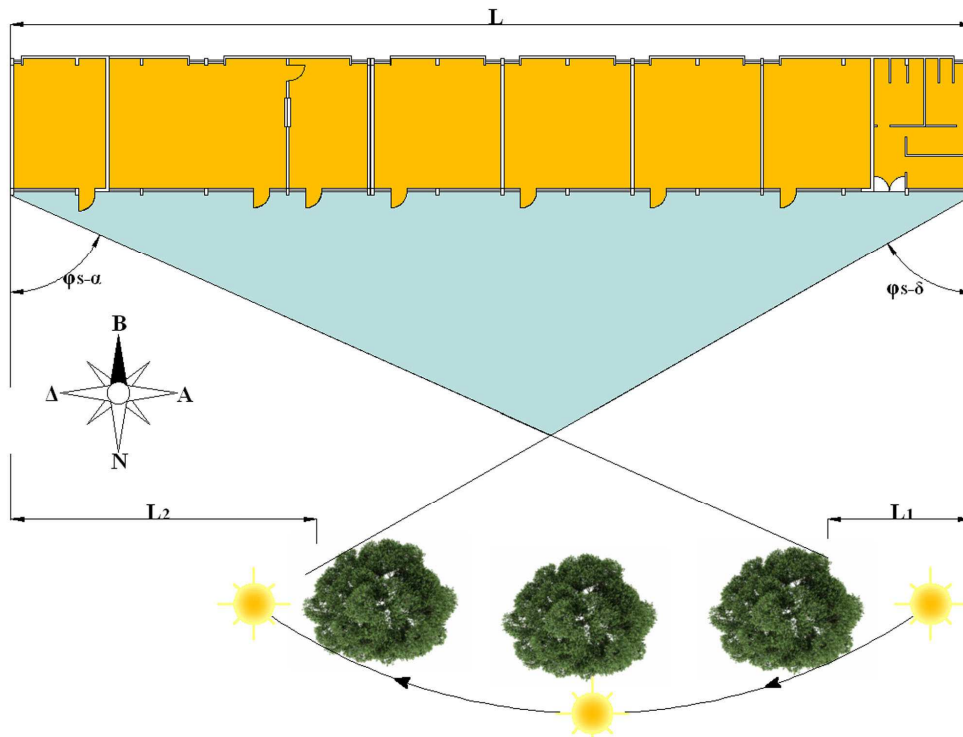
Σχήμα 5.25: Νότια και πλάγια όψη σχολικού κτηρίου.

Λύση

Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με τη βοήθεια των σχημάτων 5.26. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο προκαλείται σκίαση από τα δέντρα στη νότια όψη του κτηρίου προκύπτει όταν ο ήλιος, ακολουθώντας την εκλειπτική τροχιά του, βρεθεί πίσω από τα δέντρα. Η συστάδα των δέντρων στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ακριβώς αντίστροφα σε σχέση με τον οριζόντιο ή κατακόρυφο πρόβολο που παρουσιάστηκαν ανωτέρω, αναφορικά με τη σκίαση στην παρακείμενη νότια όψη.

Για την ακρίβεια, σκίαση προκύπτει όταν η γωνία  $\Delta = \gamma$  είναι μικρότερη κατ' απόλυτη τιμή από τις γωνίες  $\varphi_{s-\alpha}$  και  $\varphi_{s-\delta}$ , οι οποίες ορίζονται με βάση το σχήμα 5.26α. Στη συγκεκριμένη όμως περίπτωση, καθώς ο προσανατολισμός της όψης του κτηρίου είναι νότιος, το αζιμούθιο της επιφάνειας είναι μηδέν ( $\varphi_p = 0$ ), οπότε:

$$\Delta = \gamma = \varphi_s - \varphi_p \Rightarrow \Delta = \varphi_s .$$



Σχήμα 5.26α: Σκίαση νότιας όψης σχολικού κτηρίου από δέντρα: κάτοψη.

Συνεπώς η συνθήκη σκίασης του κτηρίου από τη συστάδα δέντρων μεταπίπτει στο ότι το αζιμούθιο του ήλιου πρέπει να είναι μικρότερο κατ' απόλυτη τιμή από  $\varphi_{s-\alpha}$  και  $\varphi_{s-\delta}$ . Με βάση τις διαστάσεις  $L$ ,  $L_1$  και  $L_2$ , οι γωνίες αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$\tan(\varphi_{s-\alpha}) = \frac{L - L_1}{\delta L} \Leftrightarrow \tan(\varphi_{s-\alpha}) = \frac{(80 - 10)\text{m}}{40\text{m}} \Leftrightarrow \tan(\varphi_{s-\alpha}) = 1,75 \Rightarrow \varphi_{s-\alpha} = 60,26^\circ$$

$$\tan(\varphi_{s-\delta}) = \frac{L - L_2}{\delta L} \Leftrightarrow \tan(\varphi_{s-\delta}) = \frac{(80 - 30)\text{m}}{40\text{m}} \Leftrightarrow \tan(\varphi_{s-\delta}) = 1,25 \Rightarrow \varphi_{s-\delta} = 51,34^\circ$$

Δεδομένου του ότι το αζιμούθιο του ήλιου είναι αρνητικό πριν την ηλιακή μεσημβρία και θετικό μετά από αυτήν, σκίαση του κτηρίου θα προκύπτει ότι το αζιμούθιο του ήλιου  $\varphi_s$  είναι μεγαλύτερο από  $-60,26^\circ$  και μικρότερο από  $51,34^\circ$ .

Η ανωτέρω συνθήκη όμως δεν αρκεί για να προκύψει σκίαση στο κτήριο από τα δέντρα. Σύμφωνα με το σχήμα 5.26β, θα πρέπει ταυτόχρονα η γωνία  $\Omega$  να είναι μικρότερη από τη γωνία  $x$ . Με βάση τις διαστάσεις  $H$  και  $\delta L$ , η γωνία  $x$  υπολογίζεται ως:

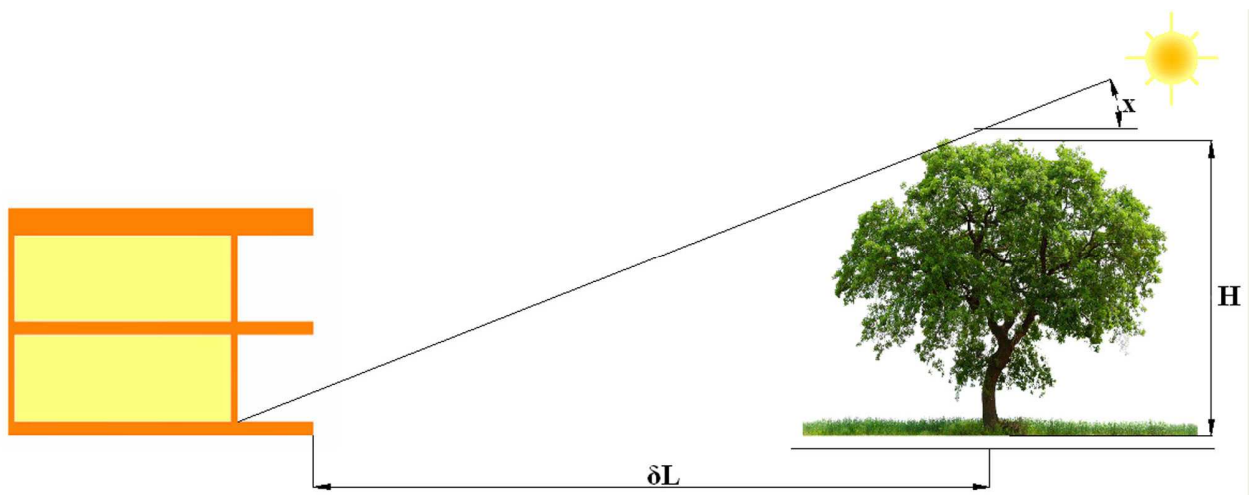
$$\tan(x) = \frac{H}{\delta L} \Leftrightarrow \tan(x) = \frac{20\text{m}}{40\text{m}} \Leftrightarrow \tan(x) = 0,5 \Rightarrow x = 25,57^\circ.$$

Συνεπώς η αναγκαία και ικανή συνθήκη για να προκύψει σκίαση στη νότια όψη του σχολικού κτηρίου από τη συστάδα των δέντρων είναι:

$$-60,26^\circ < \varphi_s < 51,34^\circ \text{ και } \Omega < 25,57^\circ.$$

Η επίλυση του προβλήματος προϋποθέτει τον υπολογισμό των ηλιακών γωνιών, δηλαδή του ηλιακού αζιμουθίου και της γωνίας  $\Omega$ , καθ' όλη τη διάρκεια ενός έτους ανά χρονικό βήμα τουλάχιστον ωριαίο, και για τη θέση εγκατάσταση του σχολικού κτηρίου, για την οποία οι γεωγραφικές συντεταγμένες δίνονται:

$$\varphi = 35^\circ 01' = 35,02^\circ \text{ και } \lambda = 25^\circ 07' = 25,12^\circ.$$



**Σχήμα 5.26β:** Σκίαση νότιας όψης σχολικού κτηρίου από δέντρα: πλάγια όψη εκ δυτικών.

Είναι προφανές ότι η επίλυση του προβλήματος μπορεί να προσεγγιστεί μόνο υπολογιστικά, με τη βοήθεια ενός απλού αλγόριθμου υλοποίησης της διαδικασίας υπολογισμού των ηλιακών γωνιών που έχει παρουσιαστεί στα προηγούμενα παραδείγματα του παρόντος Κεφαλαίου. Αφού υπολογιστούν τα ηλιακά ύψη και τα αζιμούθια του

ήλιου για κάθε ωριαίο χρονικό βήμα, στη συνέχεια θα πρέπει να εκτελεστεί ο ανωτέρω έλεγχος. Αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής:

- Υπολογίζονται ο ηλιακός χρόνος και η ωριαία γωνία για κάθε ώρα του έτους.
- Υπολογίζεται η απόκλιση του άξονα της γης για κάθε ώρα του έτους.
- Υπολογίζονται το ηλιακό ύψος και το αζιμούθιο του ήλιου για κάθε ώρα του έτους.
- Υπολογίζεται η γωνία  $\Omega$ .
- Ελέγχεται για κάθε ώρα του έτους αν πληρούνται οι συνθήκες σκίασης της επιφάνειας, δηλαδή αν η τιμή της γωνίας  $\Omega$  είναι μικρότερη των  $25,57^\circ$  και αν το αζιμούθιο του ήλιου είναι μεταξύ  $-60,26^\circ$  και  $51,34^\circ$ .
- Οι ώρες για τις οποίες ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι ανωτέρω συνθήκες συνυπολογίζονται σε ώρες σκίασης.

Με την εκτέλεση της ανωτέρω διαδικασίας υπολογίζεται ότι προκύπτει σκίαση της όψης του κτηρίου αποκλειστικά τη χειμερινή περίοδο, δηλαδή από τέλη Οκτωβρίου (περίπου από την 7.200<sup>h</sup> ώρα του έτους) έως τέλη Ιανουαρίου (περίπου έως την 630<sup>h</sup> ώρα του έτους). Η σκίαση προκύπτει περίπου για 2-3 ώρες ημερησίως πριν και μετά την ηλιακή μεσημβρία. Κοντά στην ηλιακή μεσημβρία δεν προκύπτει σκίαση της επιφάνειας, λόγω του μεγαλύτερου ηλιακού ύψους στις συγκεκριμένες περιόδους.

Ο συνολικός αριθμός ωρών ετησίως κατά τις οποίες σκιάζεται η νότια του κτηρίου υπολογίζεται σε 206. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ανωτέρω ώρες σκίασης υπολογίζονται εφόσον σκιάζεται έστω και ένα μικρό μέρος της όψης. Γίνεται κατανοητό ότι η επίδραση της συστοιχίας δέντρων ως προς τον κλιματισμό του σχολικού κτηρίου στο ανωτέρω παράδειγμα είναι αρνητική, αφού η όποια σκίαση προκύπτει κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν δηλαδή είναι επιθυμητός ο ηλιασμός του κτηρίου, ενώ, αντιθέτως, το καλοκαίρι δεν παρέχεται καμία ηλιοπροστασία από τη συστάδα των δέντρων. Στις περιπτώσεις στις οποίες επιθυμείται η σωστή σκίαση από δέντρα σε διαφανείς επιφάνειες κτηρίων, τούτα θα πρέπει να φυτεύονται σε μικρές αποστάσεις από το κτήριο, για παράδειγμα της τάξης των 5m, ώστε να αντιμετωπίζονται ικανοποιητικά τα μεγάλα ηλιακά ύψη το καλοκαίρι. Ταυτόχρονα, προκειμένου να αποφεύγεται η σκίαση του κτηρίου το χειμώνα, θα πρέπει να επιλέγονται φυλλοβόλα δέντρα.

Γενικότερα είναι αρκετά δύσκολο να ικανοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις σκίασης και ηλιασμού όψεων ή διαφανών επιφανειών κτηρίων με εξωτερικά εμπόδια ή προβόλους. Οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια καθορίζονται από την απόκλιση του άξονα της γης και το ηλιακό ύψος γίνεται μέγιστο στο θερινό ηλιοστάσιο και ελάχιστο στο χειμερινό ηλιοστάσιο. Όμως τα φορτία ψύξης και θέρμανσης ενός κτηρίου δεν ταυτίζονται χρονικά με τα δύο ηλιοστάσια. Αντίθετα τα μέγιστα φορτία ψύξης και θέρμανσης εμφανίζονται συνήθως ένα με δύο μήνες μετά το εαρινό και χειμερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα. Όσο προχωρούμε από τα ηλιοστάσια προς τις ισημερίες, το πρόβλημα γίνεται ολοένα και δυσκολότερο στη διαχείρισή του, οδηγώντας, ενίοτε, σε υψηλά ψυκτικά φορτία, λόγω ελλιπούς σκίασης, κατά τη φθινοπωρινή ισημερία και σε υψηλά θερμικά φορτία, λόγω ελλιπούς ηλιασμού, κατά την εαρινή ισημερία. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν όλες οι πιθανές καταστάσεις, οδηγούμαστε σε εγκατάσταση συστημάτων σκίασης με δυσανάλογα μεγάλες διαστάσεις, σε σχέση με την προστατευόμενη επιφάνεια.

Όσο προχωράμε προς τον ισημερινό το πρόβλημα της σωστής σχεδίασης συστημάτων σκίασης γίνεται περισσότερο εύκολο στην επίλυσή του. Και τούτο, γιατί, αφενός, η απαίτηση για ηλιασμό των εσωτερικών χώρων κατά τη χειμερινή περίοδο μειώνεται, λόγω των γενικότερα υψηλότερων θερμοκρασιών, και, αφετέρου, εξαιτίας των υψηλών τιμών που έχει το ηλιακό ύψος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, γεγονός που επιτρέπει την αποτελεσματική ηλιοπροστασία με χρήση οριζόντιων προβόλων με λογικές διαστάσεις, εγκατεστημένων σε νότιες ή βόρειες όψεις κτηρίων, αναλόγως του αν βρισκόμαστε αντίστοιχα στο βόρειο ή στο νότιο ημισφαίριο.

Σαφέστατα μία περισσότερο αποδοτική λύση για την επιτυχή σκίαση διαφανών επιφανειών αποτελούν τα κινητά – ρυθμιζόμενα σκιάστρα, με τίμημα, φυσικά, το υψηλότερο κόστος κτήσης και εγκατάστασης, καθώς και την απαιτούμενη συντήρηση. Η τοποθέτηση εσωτερικών σκιάστρων (κουρτίνες, περσίδες κλπ) αφενός επιτρέπει ένα μέρος από την ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει εντός του κλιματιζόμενου χώρου και, αφετέρου, περιορίζει σημαντικά το φυσικό φωτισμό του χώρου.

### 5.3.7. Μεγιστοποίηση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνειες

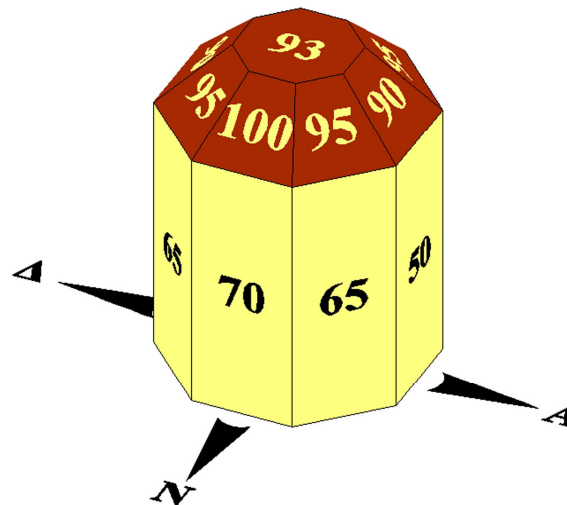
Εκτός από τις περιπτώσεις υπολογισμού σκίασης και διαστασιολόγησης προβόλων, που είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, πολύ σημαντικές επίσης είναι οι εφαρμογές των κανόνων και των μεθόδων της ηλιακής ακτινοβολίας για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποια επιφάνεια ενδιαφέροντος. Με δεδομένο το ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μία επιφάνεια μεγιστοποιείται, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $90^\circ$ , το ζητούμενο σε τέτοιου είδους προβλήματα είναι η εξεύρεση της βέλτιστης κλίσης της επιφάνειας. Παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι η κλίση και ο προσανατολισμός εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών ή φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και διαφανών επιφανειών που ενσωματώνονται στο κέλυφος κτηρίων ως παθητικά ηλιακά συστήματα ,π.χ. ηλιακό θερμοκήπιο.

Το πρόβλημα εξεύρεσης της βέλτιστης κλίσης και του βέλτιστου προσανατολισμού εγκατάστασης πρακτικά δεν υφίσταται, όταν υπάρχει η δυνατότητα κίνησης της επιφάνειας σε δύο άξονες, έναν οριζόντιο, για την παρακολούθηση του ηλιακού ύψους, και έναν κάθετο, για την παρακολούθηση του αζιμουθίου του ήλιου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής αποτελούν οι κινητές βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων (trackers). Η τροχιά κίνησης μιας κινητής βάσης εγκατάστασης μέσα στο έτος είναι εκ των προτέρων ρυθμισμένη σύμφωνα με την εκλειπτική τροχιά του ήλιου, η οποία είναι δεδομένη και γνωστή για την εκάστοτε θέση εγκατάστασης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η επιφάνεια που θα εγκατασταθεί στην κινητή βάση στήριξης δύο άξονων να δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία πάντα στην κάθετη σε αυτή διεύθυνση.

Τα πράγματα όμως δεν είναι το ίδιο απλά στην περίπτωση επιφανειών στις οποίες είτε δε συμφέρει οικονομικά, είτε, εκ των πραγμάτων, δεν είναι δυνατή η εγκατάστασή τους σε κινητές βάσεις στήριξης, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και τα παθητικά ηλιακά συστήματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει εκ των προτέρων να αποφασιστεί η κλίση και ο προσανατολισμός της επιφάνειας που θα δώσει το μέγιστο ενεργειακό αποτέλεσμα, συναρτήσει, προφανώς, της χρήσης και του σκοπού της εγκατάστασης. Αυτά θα αναλυθούν και θα γίνουν κατανοητά στη συνέχεια.

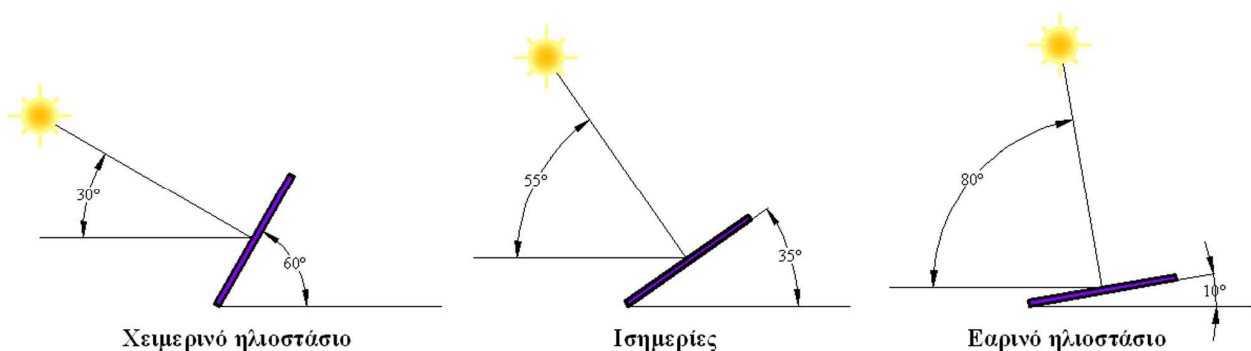
Καταρχήν, όσον αφορά τον προσανατολισμό, οι επιλογές είναι σαφείς, ανεξάρτητα από την εφαρμογή και το σκοπό της. Ο βέλτιστος πάντα προσανατολισμός είναι ο νότιος, για το βόρειο ημισφαίριο, δηλαδή το αζιμουθίο της επιφάνειας  $\varphi_p$  θα πρέπει να είναι μηδέν. Αντίστοιχα, για το νότιο ημισφαίριο, ο βέλτιστος προσανατολισμός επιφανειών συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο βόρειος. Οποιοσδήποτε άλλος προσανατολισμός εγκατάστασης επιφάνειας συνεπάγεται μείωση της προσλαμβανόμενης από αυτήν ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία αυξάνει όσο ο προσανατολισμός της επιφάνειας αποκλίνει από το νότιο (ή το βόρειο) προς τα ανατολικά ή τα δυτικά. Ενδεικτικά στο σχήμα 5.27 παρουσιάζονται τα ποσοστά της συνολικής ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνειες διαφορετικών προσανατολισμών και κλίσεων (κατακόρυφη – βέλτιστη κλίση προς νότο – οριζόντια), ως προς τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια με το βέλτιστο προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση (ποσοστό 100%).





**Σχήμα 5.27:** Διακύμανση ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της κλίσης και του προσανατολισμού της επιφάνειας.

Αναφορικά με την κλίση εγκατάστασης ως προς το οριζόντιο επίπεδο μίας επιφάνειας συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας, οι επιλογές δεν είναι εκ των προτέρων προφανείς και δεδομένες. Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο εξαρτάται από τη χρήση της επιφάνειας, η οποία, συνήθως, συνεπάγεται την ανάγκη για τη μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας συγκεκριμένες περιόδους του έτους. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών για παραγωγή ζεστού νερού σε ένα ξενοδοχείο, το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά τη θερινή περίοδο, συνεπάγεται ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί, όταν τα ηλιακά ύψη είναι υψηλά. Δεδομένου του ότι η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται, όταν προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια, για υψηλά ηλιακά ύψη (της τάξης των  $70 - 80^\circ$ ), η κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να προσεγγίζει το οριζόντιο επίπεδο. Αντίθετα, η εγκατάσταση ενός πεδίου ηλιακών συλλεκτών με σκοπό τη θέρμανση ενός κτηρίου κατά τη διάρκεια του χειμώνα, συνεπάγεται ανάγκη για μεγιστοποίηση της προσλαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν τα ηλιακά ύψη είναι χαμηλά (της τάξης των  $30 - 40^\circ$ ). Συνεπώς, για να προσεγγιστεί η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους χειμερινούς μήνες στους ηλιακούς συλλέκτες, η κλίση εγκατάστασής τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο θα πρέπει να αυξηθεί αρκετά. Τα ανωτέρω απεικονίζονται στο σχήμα 5.28.



**Σχήμα 5.28:** Βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας συναρτήσει του ηλιακού ύψους για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται μετρήσεις παραγωγής τελικής θερμικής ενέργειας ανά μονάδα εγκατεστημένης επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών στην περιοχή της Αττικής, συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασής τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

**Πίνακας 5.4:** Παραγωγή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών συναρτήσει της κλίσης εγκατάστασής τους στην περιοχή της Αττικής.

Χρονικό διάστημα	Κλίση ηλιακών συλλεκτών (°)																
	0	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
	Παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας ηλιακών συλλεκτών (kWh/m <sup>2</sup> )																
Ιανουάριος	66	80	91	96	100	104	107	109	111	112	113	112	111	109	107	104	100
Φεβρουάριος	75	84	91	93	96	97	99	99	99	99	98	96	94	91	88	84	80
Μάρτιος	104	112	116	118	119	119	119	118	116	114	111	108	104	99	94	89	83
Απρίλιος	146	151	152	152	151	149	147	143	139	134	129	123	116	108	101	92	84
Μάιος	182	183	181	178	175	170	165	159	153	145	137	128	119	109	100	90	79
Ιούνιος	200	200	195	191	185	180	173	166	158	149	139	128	118	108	96	85	75
Ιούλιος	213	214	210	205	199	194	187	180	171	162	151	139	128	117	105	91	80
Αύγουστος	200	206	206	204	202	199	194	188	182	174	165	155	144	132	121	109	96
Σεπτέμβριος	156	168	176	179	180	181	180	178	175	171	166	161	154	146	138	128	118
Οκτώβριος	106	120	130	134	138	140	142	143	142	142	140	137	134	130	125	119	113
Νοέμβριος	66	77	86	90	94	96	99	100	101	102	102	101	99	97	95	92	88
Δεκέμβριος	53	63	72	76	79	82	85	87	88	89	89	89	88	87	85	83	90
<b>Ετήσια παραγωγή</b>	<b>1.567</b>	<b>1.658</b>	<b>1.706</b>	<b>1.716</b>	<b>1.718</b>	<b>1.711</b>	<b>1.697</b>	<b>1.670</b>	<b>1.635</b>	<b>1.593</b>	<b>1.540</b>	<b>1.477</b>	<b>1.409</b>	<b>1.333</b>	<b>1.255</b>	<b>1.166</b>	<b>1.086</b>
Παραγωγή από Απρίλιο έως Οκτώβριο	1.203	1.242	1.250	1.243	1.230	1.213	1.188	1.157	1.120	1.077	1.027	971	913	850	786	714	645
Παραγωγή από Νοέμβριο έως Μάρτιο	364	416	456	473	488	498	509	513	515	516	513	506	496	483	469	452	441
Παραγωγή από Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο	194	227	254	265	275	283	291	295	298	300	300	297	293	287	280	271	270
Παραγωγή από Ιούνιο έως Αύγουστο	613	620	611	600	586	573	554	534	511	485	455	422	390	357	322	285	251

Από τον πίνακα 5.4 παρατηρούνται τα εξής:

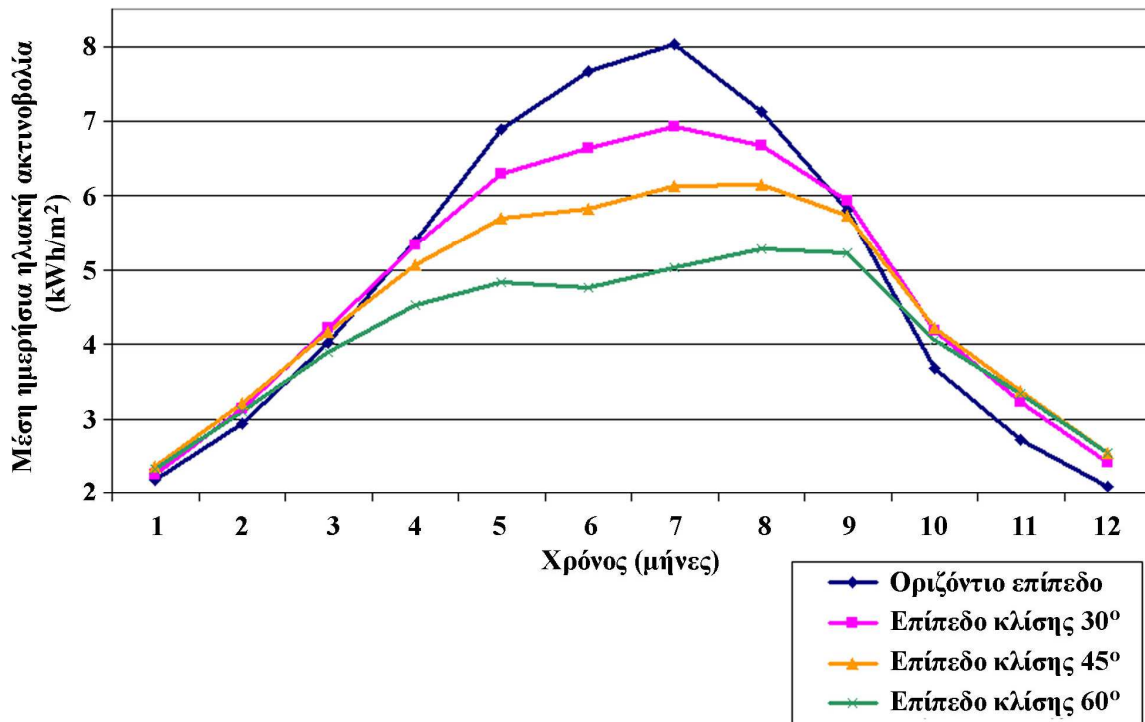
- Η ετήσια παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών  $30^\circ$ .
- Η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας κατά την περίοδο από Απρίλιο έως Οκτώβριο μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών  $20^\circ$ .
- Η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας κατά την περίοδο από Νοέμβριο έως Μάρτιο μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών  $50-55^\circ$ .
- Ειδικά τους θερινούς μήνες, δηλαδή από Ιούνιο έως Αύγουστο, η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών  $10^\circ$ .
- Ειδικά τους χειμερινούς μήνες, δηλαδή από Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο, η παραγωγή τελικής θερμικής ενέργειας μεγιστοποιείται με κλίση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών  $55-60^\circ$ .

Οι μετρήσεις του πίνακα 5.4 καταδεικνύουν τη βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία σε διαφορετικές περιόδους του έτους. Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης των ηλιακών συλλεκτών ως προς το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να διαφέρει από  $10^\circ$  έως  $60^\circ$ , αναλόγως αν στόχος είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής τελικής θερμικής ενέργειας το καλοκαίρι ή το χειμώνα.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές αυτές ισχύουν για την περιοχή της Αττικής, με γεωγραφικό πλάτος  $37 - 38^\circ$ . Τα αποτελέσματα του πίνακα 5.4 επιβεβαιώνουν τους ακόλουθους εμπειρικούς κανόνες:

- Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης επιφάνειας, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συλλογή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν σε ετήσια βάση, θα πρέπει να είναι περίπου ίση ή λίγο μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης.
- Αν προτεραιότητα έχει η μεγιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να είναι περίπου  $10-15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης.
- Αν προτεραιότητα έχει η μεγιστοποίηση της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας θα πρέπει να είναι περίπου  $10-15^\circ$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης. Αν η περιοχή εγκατάστασης περιβάλλεται από επιφάνειες με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης, π.χ. χιόνι, απαιτείται μεγαλύτερη κλίση εγκατάστασης της επιφάνειας, προκειμένου να συλλεχθεί μεγαλύτερο ποσοστό από την υψηλή ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Τέλος στο σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της συνολικής μηνιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδα με τέσσερις διαφορετικές κλίσεις,  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  και  $60^\circ$  στο Ηράκλειο Κρήτης. Παρατηρείται η αύξηση της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους χειμερινούς μήνες, όσο αυξάνει η κλίση του επιπέδου, ενώ, αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες, η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται σε επίπεδα μικρής κλίσης.



Σχήμα 5.29: Ετήσια διακύμανση της συνολικής μηνιαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδα με κλίσεις, 0°, 30°, 45° και 60°.

Αναφέρθηκαν ανωτέρω οι έννοιες της άμεσης και της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι έννοιες αυτές θα οριστούν και θα επεξηγηθούν στην επόμενη ενότητα.

## 5.4. Ηλιακή ακτινοβολία

### 5.4.1. Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα

Η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ή πυκνότητα ισχύος (solar irradiance), έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και σε επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, ονομάζεται «ηλιακή σταθερά» (solar constant) και ισούται με  $1.367 \text{ W/m}^2$ . Λόγω της εκλειπτικής τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο, στην πραγματικότητα η τιμή αυτή δεν είναι σταθερή όλο το έτος, αντιθέτως μεταβάλλεται κατά ένα ποσοστό  $\pm 3,3\%$ , σύμφωνα με τη σχέση:

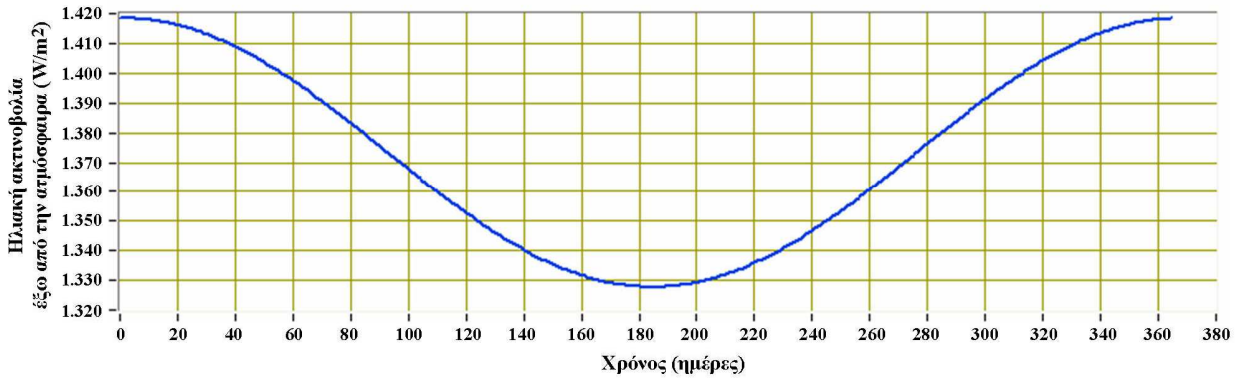
$$I_0 = \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360^\circ \cdot (n - 3)}{365} \right) \cdot 1.373 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.25)$$

όπου  $n$  ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους ( $n = 1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου). Συναρτήσε της τρέχουσας ώρας του έτους, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα δίνεται από τη σχέση:

$$I_0 = \left( 1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360^\circ \cdot (m - 3 \cdot 24)}{365 \cdot 24} \right) \cdot 1.373 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (5.26)$$

όπου  $m$  η τρέχουσα ώρα του έτους ( $m = 1$  για την πρώτη ώρα του έτους).

Η μεταβολή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα συναρτήσει του χρόνου για ένα έτος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.30. Παρατηρείται ότι η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται το χειμώνα.

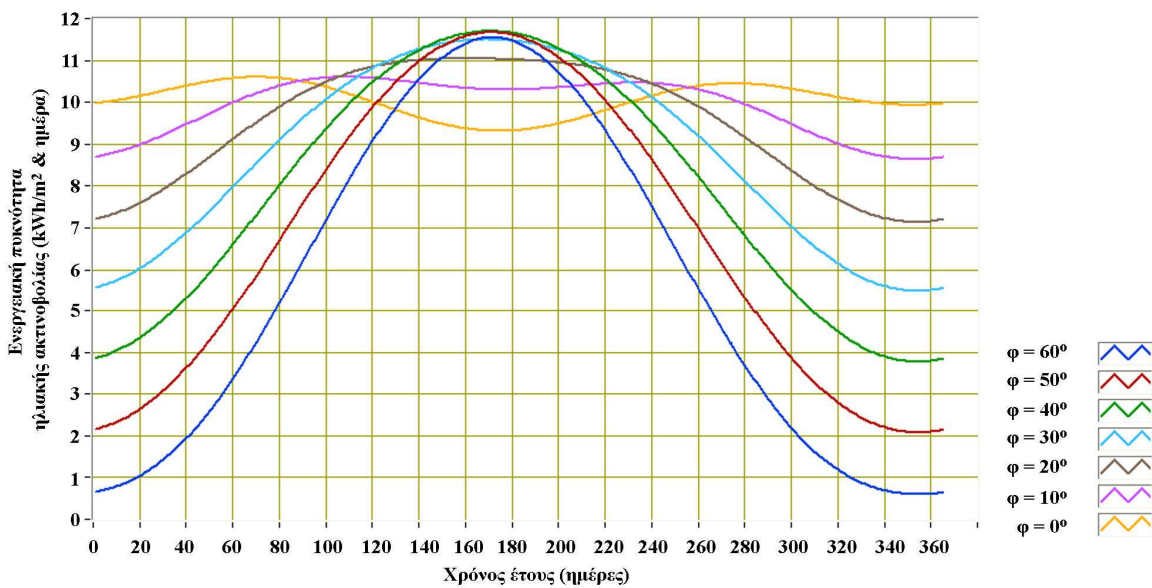


Σχήμα 5.30: Ετήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα.

Η συνολική ενέργεια λόγω ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας οριζόντια τοποθετημένης έξω από την ατμόσφαιρα, η οποία προσπίπτει κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου, ονομαζόμενη ως «ενεργειακή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας» (solar irradiation), προκύπτει με ολοκλήρωση από την ωριαία γωνία ανατολής έως την ωριαία γωνία δύσης του συνημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια (σχέση 5.15), πολλαπλασιαζόμενη με τη σχέση 5.25. Η μορφή στην οποία τελικά καταλήγουμε είναι:

$$H_o = \frac{\tau_{day}}{\pi} I_o \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \left[ \sin(\omega_{ss}) - \frac{\pi \cdot \omega_{ss}}{180^\circ} \cdot \cos(\omega_{ss}) \right] \frac{Wh}{m^2} \quad (5.27)$$

όπου  $\tau_{day} = 24h$ ,  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος της θέσης μελέτης,  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης και  $\omega_{ss}$  η ωριαία γωνία δύσης. Στο σχήμα 5.31 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της συνολικής ενεργειακής πυκνότητας ακτινοβολίας ανά εικοσιτετράωρο σε οριζόντια επιφάνεια, για διάφορα γεωγραφικά πλάτη.



Σχήμα 5.31: Ετήσια διακύμανση ημερήσιας ενεργειακής πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια.

### 5.4.2. Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Ήδη στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν δύο διαφορετικά μεγέθη σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία:

- Η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ή πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiance), η οποία δίνει την τρέχουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας. Στο διεθνές σύστημα μονάδων μετριέται σε  $W/m^2$ .
- Η ενεργειακή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiation), η οποία δίνει τη συνολική ενέργεια λόγω ηλιακής ακτινοβολίας που προσβάλλει τη μονάδα της επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, με συνήθη μονάδα μέτρησης την  $kWh/m^2$ .

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να φτάσει σε μία επιφάνεια με τρεις συνιστώσες, την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη.

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία (direct solar radiation) είναι αυτή η οποία φτάνει απευθείας από τον ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση ήλιου – γης, την απόκλιση  $\delta$  του άξονα της γης, το ηλιακό ύψος  $\beta$ , το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$ , το απόλυτο υψόμετρο της θέσης μελέτης, την κλίση της επιφάνειας επί της οποίας προσπίπτει  $\theta_p$ , καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση, την οποία υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα. Για το συμβολισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $I_{dir}$  (σε  $W/m^2$ ).

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (diffuse solar radiation) είναι το ποσό της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή τη σκέδασή του μέσα στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος  $\beta$ , το υψόμετρο της θέσης μελέτης, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, υδροσταγόνων κλπ) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Για το συμβολισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $I_{dif}$  (σε  $W/m^2$ ).

Ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (reflected solar radiation) είναι το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανακλώμενο από το έδαφος και τις περιβάλλουσες σε αυτήν επιφάνειες. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται βασικά από το είδος των επιφανειών που περιβάλλουν τη θέση μελέτης, ειδικότερα δε από τη λευκαυγεία τους και το υλικό από το οποίο απαρτίζονται, παράμετροι που καθορίζουν το λεγόμενο συντελεστή ανακλαστικότητας. Για το συμβολισμό της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας θα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $I_{ref}$ .

Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας ισούται με τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Ονομάζεται ολική ηλιακή ακτινοβολία (global solar radiation) και θα συμβολίζεται με το σύμβολο  $I_{glo}$ .

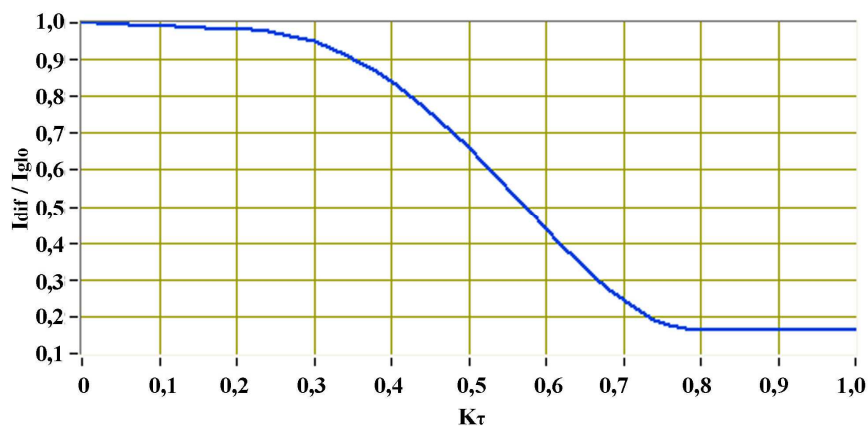
Για την εκτίμηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια θα πρέπει να είναι γνωστή η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε αυτή  $I_{glo}$ . Η πληροφορία αυτή μπορεί να προκύψει είτε μέσω μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή ενδιαφέροντος είτε μέσω προσεγγιστικών εμπειρικών μεθόδων, κάποιες από τις οποίες θα δούμε σε επόμενη ενότητα. Αν η ολική ηλιακή ακτινοβολία, με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, είναι γνωστή σε κάποια θέση, τότε ο υπολογισμός της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τις σχέσεις [1] (Erbs et Al., 1982):

$$\begin{aligned} \frac{I_{dif}}{I_{glo}} &= 1,00 - 0,09 \cdot K_t && \text{για } 0 \leq K_t \leq 0,22 \\ \frac{I_{dif}}{I_{glo}} &= 0,9511 - 0,1604 \cdot K_t + 4,388 \cdot K_t^2 - 16,638 \cdot K_t^3 + 12,336 \cdot K_t^4 && \text{για } 0,22 < K_t \leq 0,80 \\ \frac{I_{dif}}{I_{glo}} &= 0,165 && \text{για } K_t > 0,80. \end{aligned} \quad (5.28)$$

όπου η παράμετρος  $K_\tau$  ονομάζεται «δείκτης ωριαίας καθαρότητας» και ισούται με το λόγο της ολικής έντασης ηλιακής ακτινοβολίας  $I_{glo}$  στην επιφάνεια του εδάφους προς την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα  $I_o$  επί το συνημίτονο της γωνίας ζενίθ του ήλιου  $\theta_z$ :

$$K_\tau = \frac{I_{glo}}{I_o \cdot \cos(\theta_z)} \quad (5.29)$$

Η διακύμανση του λόγου  $I_{dif}/I_{glo}$  συναρτήσει της παραμέτρου  $K_\tau$  παρουσιάζεται στο σχήμα 5.32.



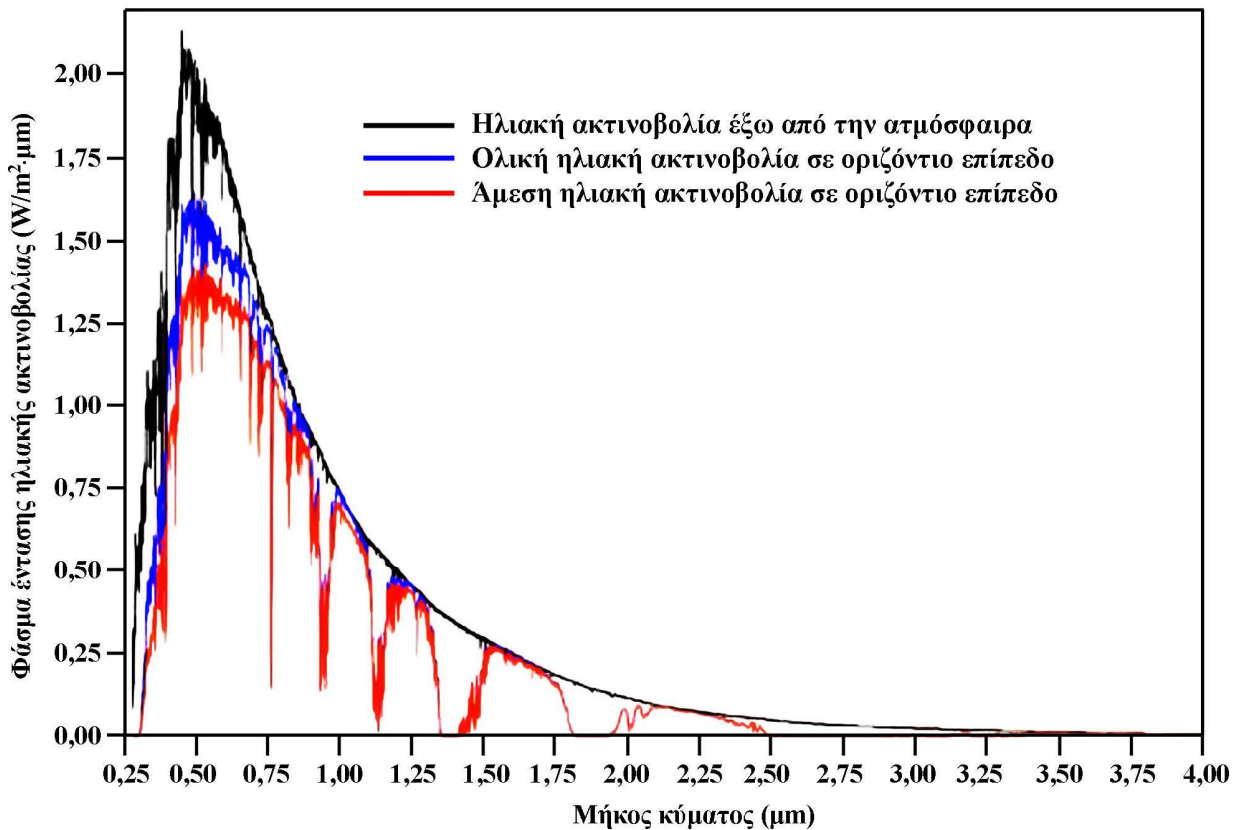
Σχήμα 5.32: Μεταβολή του λόγου  $I_{dif}/I_{glo}$  συναρτήσει της παραμέτρου  $K_\tau$ .

Χαμηλές τιμές της  $K_\tau$  αντιστοιχούν σε ημέρες με πυκνές νεφώσεις και υψηλές τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας. Όσο η παράμετρος  $K_\tau$  αυξάνει, τόσο οι τιμές του λόγου της διάχυτης προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία μειώνονται, έως την ελάχιστη τιμή 0,165. Η ακριβής μορφή της σχέσης ανάμεσα στη διάχυτη και στην ολική ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται και από το χρονικό βήμα διακριτοποίησης με το οποίο εκτελείται ο υπολογισμός. Στο σχήμα 5.33 τούτο έχει ληφθεί ωριαίο.

Με τη διάχυτη συνιστώσα  $I_{dif}$  της ηλιακής ακτινοβολίας γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί η άμεση συνιστώσα  $I_{dir}$  από τη σχέση:

$$I_{dir} = I_{glo} - I_{dif} \quad (5.30)$$

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον κλιματισμό ενός χώρου δεν εξαρτάται μόνο από την έντασή της, η οποία προσεγγίστηκε από τις ανωτέρω σχέσεις, αλλά και από τη φασματική κατανομή της, η οποία εξαρτάται από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή η κατανομή της έντασής της συναρτήσει του μήκους κύματος, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.33 για την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα, την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Σχεδόν η μισή από την ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω της ορατής ακτινοβολίας, με μήκη κύματος από 0,4 έως 0,7 $\mu\text{m}$ . Η περισσότερη από την υπόλοιπη ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, με μήκη κύματος έως 2,0 $\mu\text{m}$ .



Σχήμα 5.33: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας.

Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ιδιαίτερη σημασία στον κλιματισμό κτηρίων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η διακύμανση της διαπερατότητας υαλοπινάκων και διαφανών επιφανειών συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Εφαρμογή αποτελούν υαλοπίνακες επιλεκτικής διαπερατότητας σε χαμηλά μήκη κύματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο φυσικός φωτισμός των εσωτερικών χώρων, εμποδίζοντας όμως ταυτόχρονα την υπέρυθη ακτινοβολία να διεισδύσει εντός των χώρων, περιορίζοντας έτσι τα ψυκτικά φορτία.

#### 5.4.3. Συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια υπό κλίση

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια υπό τυχαία κλίση  $\theta_p$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο αποτελεί το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας (βλέπε σχήμα 5.21). Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχτεί τελικά η επιφάνεια υπό κλίση προκύπτει από το γινόμενο της άμεσης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια επί το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης σε αυτήν.

Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας στον ουράνιο θόλο (ισοτροπικό μοντέλο διάχυσης), η διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια υπολογίζεται ως το γινόμενο της διαθέσιμης διάχυτης ακτινοβολίας στη θέση της επιφάνειας επί ένα συντελεστή:

$$F_{\text{sky}} = \frac{1 + \cos(\theta_p)}{2}. \quad (5.31)$$



Αντίστοιχα, με την υπόθεση της ομοιόμορφης διάχυσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία ισούται με το γινόμενο της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο  $I_{\text{glo,hor}}$  επί το συντελεστή ανακλαστικότητας  $\rho_g$  του εδάφους και επί ένα συντελεστή:

$$F_{\text{grd}} = \frac{1 - \cos(\theta_p)}{2}. \quad (5.32)$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα ανισοτροπικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τις ανομοιομορφίες που παρουσιάζει η διάχυτη ακτινοβολία διερχόμενη μέσα από την ατμόσφαιρα και δίνουν περισσότερο ακριβή αποτελέσματα. Ωστόσο για τις περιπτώσεις μελέτης ηλιακού κλιματισμού, τα αποτελέσματα που εξάγονται με την υπόθεση της ομοιόμορφης διάχυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα είναι αρκούντως ακριβή.

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία  $I_{\text{glo,p}}$  προκύπτει ως το άθροισμα των ανωτέρω αναφερομένων συνιστωσών:

$$I_{\text{glo,p}} = I_{\text{dir}} \cdot \cos(\theta_1) + I_{\text{dif}} \cdot F_{\text{sky}} + I_{\text{glo,hor}} \cdot \rho_g \cdot F_{\text{grd}}. \quad (5.33)$$

Η ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση:

$$I_{\text{glo,hor}} = I_{\text{dir}} \cdot \cos(\theta_z) + I_{\text{dif}} \quad (5.34)$$

όπου  $\theta_z$  η γωνία ζενίθ του ήλιου. Στην περίπτωση κάθετων επιφανειών (κλίση  $\theta_p = 90^\circ$ ), η σχέση 5.33 γίνεται:

$$I_{\text{glo,p}} = I_{\text{dir}} \cdot \cos(\theta_1) + \frac{I_{\text{dif}}}{2} + \frac{I_{\text{glo,hor}} \cdot \rho_g}{2}. \quad (5.35)$$

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους εξαρτάται από το υλικό και το χρώμα του εδάφους. Επιφάνειες με ανοιχτά χρώματα εμφανίζουν υψηλούς συντελεστές ανακλαστικότητας και αντίστροφα. Επίσης η επιφάνεια πιθανώς να παρουσιάζει ελαφρώς διαφορετικούς συντελεστές ανακλαστικότητας για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν. Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται ενδεικτικοί συντελεστές ανακλαστικότητας για διάφορες φυσικές και τεχνητές επιφάνειες. Συνήθως ο συντελεστής ανακλαστικότητας λαμβάνεται ίσος με 0,20 για ένα τυπικό μίγμα επιφανειών πέριξ του εξεταζόμενου κτηρίου.

Οι ανωτέρω σχέσεις και συντελεστές ισχύουν με την προϋπόθεση ότι οι επιφάνειες του εδάφους μπροστά από την επιφάνεια δε σκιάζονται. Αν δεν ισχύει κάτι τέτοιο, όπως για παράδειγμα η σκίαση που προκύπτει κατά την ανατολή του ήλιου μπροστά από μία τοιχοποιία με δυτικό προσανατολισμό, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μειώνεται. Ωστόσο ο ακριβής υπολογισμός συνεπάγεται την ανάπτυξη τόσο πολύπλοκων μοντέλων, ώστε τελικά η επιπλέον ακρίβεια να μην αξίζει τον κόπο.

<b>Πίνακας 5.5: Συντελεστές ανακλαστικότητας.</b>	
<b>Φυσικές επιφάνειες χωρίς βλάστηση</b>	
Φρέσκο χιόνι	0,75
Χώμα χωρίς βλάστηση	0,14
Νερό	0,07
<b>Τεχνητές επιφάνειες</b>	
Άσφαλτος, αμμοχάλικο	0,13
Παλιά άσφαλτος	0,10
Σκουρόχρωμες τοιχοποιίες	0,27
Ανοιχτόχρωμες τοιχοποιίες	0,60
Καινούργιο σκυρόδεμα	0,35
Παλιό σκυρόδεμα	0,25
Βραχώδεις επιφάνειες	0,20
Χωματόδρομοι	0,04
<b>Επιφάνειες με βλάστηση</b>	
Κωνοφόρα δέντρα (χειμώννας)	0,07
Ξερά φύλλα	0,30
Δάση το φθινόπωρο, ώριμες καλλιέργειες	0,26
Ξερό γρασίδι	0,20
Πράσινο γρασίδι	0,26

#### 5.4.4. Διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία

Οι σχέσεις υπολογισμού της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση, οι οποίες αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προϋποθέτουν τη γνώση της ολικής διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας  $I_{glo}$  στην περιοχή μελέτης. Τούτη μπορεί να προσεγγιστεί με δύο τρόπους:

- τη λήψη μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας από μετεωρολογικούς σταθμούς,
- την εκτίμησή της με εμπειρικές μεθόδους.

Η λήψη μετρήσεων προϋποθέτει την εγκατάσταση ενός πυρανόμετρου και την αποθήκευση των μέσων τιμών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα ,π.χ. δεκάλεπτα. Το ελάχιστο χρονικό διάστημα λήψης μετρήσεων για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ολική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μία θέση θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ετήσιο. Η ετήσια χρονική διάρκεια μετρήσεων μπορεί να είναι επαρκής, υπό την προϋπόθεση ότι το έτος μετρήσεων θα αντιστοιχεί σε ένα μέσο μετεωρολογικό έτος της ευρύτερης περιοχής, δηλαδή οι ετήσιες τιμές των ενδεικτικών μετεωρολογικών χαρακτηριστικών ,π.χ. ύψος βροχόπτωσης, ημέρες ηλιοφάνειας και νεφώσεων κλπ, να μην αποκλίνουν σημαντικά από τις μέσες τιμές των μεγεθών αυτών για τις τελευταίες δεκαετίες.

Είναι προφανές ότι η εγκατάσταση μετρητικού εξοπλισμού και η λήψη μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζουν κόστος και απαιτούν χρόνο. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ικανοποιητική ακρίβεια σχετικά με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του εδάφους έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται σε στατιστικά μετεωρολογικά δεδομένα. Η χρησιμότητα των μεθόδων είναι σημαντική σε περιπτώσεις στις οποίες επιδιώκεται μία πρώτη προσέγγιση στην επίλυση ενός θέματος σχετικού με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σε μία γεωγραφική θέση. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέθοδοι αυτές είναι αρκούντως ακριβείς. Δύο από αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### 5.4.4.a. Μέθοδος Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη

Η εν λόγω μέθοδος εκτίμησης της ολικής διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους είναι απλή και βασίζεται στην κατανομή της ολικής μηνιαίας ενεργειακής πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{kWh/m}^2$  και μήνα) στις ημέρες του μήνα, με παραμέτρο το μέσο ηλιακό ύψος ανά ημέρα [2]. Με βάση τη μέθοδο αυτή, η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του εδάφους  $I_{\text{glo}}$  δίνεται από τη σχέση:

$$I_{\text{glo}} = A \cdot \sin(\beta) + B \quad (5.36)$$

Οι παράμετροι A και B δίνονται στον πίνακα 5.6. για την 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα και για τρεις εναλλακτικές κλιματικές συνθήκες:

- συνθήκες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας (συντελεστές με το δείκτη «high»),
- συνθήκες μέσης ηλιακής ακτινοβολίας (συντελεστές με το δείκτη «mean»),
- συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας (συντελεστές με το δείκτη «low»).

**Πίνακας 5.6:** Συντελεστές μεθόδου Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη.

Μήνας	$A_{\text{low}}$	$B_{\text{low}}$	$A_{\text{mean}}$	$B_{\text{mean}}$	$A_{\text{high}}$	$B_{\text{high}}$
Ιανουάριος	995	-48	1.102	-47	1.156	-12
Φεβρουάριος	913	-37	1.061	-43	1.177	-15
Μάρτιος	880	-41	1.050	-39	1.184	-11
Απρίλιος	872	-41	1.045	-37	1.158	-10
Μάιος	875	-43	1.051	-35	1.170	-15
Ιούνιος	878	-42	1.056	-34	1.171	-13
Ιούλιος	878	-42	1.062	-36	1.144	-12
Αύγουστος	871	-38	1.064	-35	1.180	-15
Σεπτέμβριος	906	-45	1.083	-42	1.194	-19
Οκτώβριος	983	-44	1.106	-40	1.256	-14
Νοέμβριος	932	-47	1.163	-42	1.244	-15
Δεκέμβριος	886	-50	1.094	-46	1.253	-16

Αναπαράγοντας τις τιμές των παραμέτρων A και B για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού με γραμμική παρεμβολή, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ακτινοβολίας  $I_{\text{glo}}$  και στη συνέχεια, με βάση τις σχέσεις 5.28, 5.30 και 5.33, ο υπολογισμός των συνιστωσών και της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση.

#### 5.4.4.β. Μέθοδος ASHRAE

Παρόμοια είναι και η προσέγγιση υπολογισμού της ολικής διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας σε μία γεωγραφική θέση από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) [3]. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη προσέγγιση, σε μία καθαρή ημέρα η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης δίνεται από τη σχέση:

$$I_{\text{dir}} = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin(\beta)}} \quad (\text{για } \beta > 0) \quad (5.37)$$

όπου:

- A : η φαινόμενη ηλιακή σταθερή (σε  $\text{W/m}^2$ )  
 B : συντελεστής απουσίας ατμόσφαιρας (atmospheric extinction coefficient)

Οι τιμές των A και B μεταβάλλονται μέσα στο έτος, λόγω του ότι μεταβάλλονται οι περιεκτικότητες στην ατμόσφαιρα σκόνης και υδρατμών, καθώς και η απόσταση μεταξύ ήλιου και γης. Οι τιμές των A και B δίνονται

στον πίνακα 5.7 για την 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα. Για τις υπόλοιπες ημέρες του μήνα οι τιμές των A και B μπορούν να υπολογιστούν με γραμμική παρεμβολή.

**Πίνακας 5.7: Συντελεστές μεθόδου ASHRAE.**

Μήνας	A	B	C
Ιανουάριος	1.202	0,141	0,103
Φεβρουάριος	1.187	0,142	0,104
Μάρτιος	1.164	0,149	0,109
Απρίλιος	1.130	0,164	0,120
Μάιος	1.106	0,177	0,130
Ιούνιος	1.092	0,185	0,137
Ιούλιος	1.093	0,186	0,138
Αύγουστος	1.107	0,182	0,134
Σεπτέμβριος	1.136	0,165	0,121
Οκτώβριος	1.166	0,152	0,111
Νοέμβριος	1.190	0,144	0,106
Δεκέμβριος	1.204	0,141	0,103

Η σχέση 5.37 δίνει χαρακτηριστικές τιμές της άμεσης διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για καθαρό ουρανό και σχετικά ξηρή ατμόσφαιρα. Σε περιπτώσεις εξαιρετικά διαυγούς ατμόσφαιρας, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να πάρει τιμές έως και κατά 15% μεγαλύτερες από τις υπολογιζόμενες με βάση τις τιμές των A και B από τον πίνακα 5.7.

Για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{dif}} &= C \cdot Y \cdot I_{\text{dir}}, && \text{για κάθετες επιφάνειες} \\
 I_{\text{dif}} &= C \cdot I_{\text{dir}} \cdot \frac{1 + \cos(\theta_p)}{2} && \text{για επιφάνειες με διαφορετική κλίση.}
 \end{aligned}
 \tag{5.38}$$

Η παράμετρος Y δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 Y &= 0,55 + 0,437 \cdot \cos(\theta_i) + 0,313 \cdot \cos^2(\theta_i) && \text{για } \cos(\theta_i) > -0,2 \\
 Y &= 0,45 && \text{για } \cos(\theta_i) \leq -0,2.
 \end{aligned}
 \tag{5.39}$$

Τέλος η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{\text{ref}} = I_{\text{dir}} \cdot [C + \sin(\beta)] \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos(\theta_p)}{2}
 \tag{5.40}$$

όπου  $\rho_g$  ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους, οι τιμές του οποίου παρουσιάστηκαν για χαρακτηριστικές επιφάνειες στον πίνακα 5.5. Η παράμετρος C δίνεται επίσης στον πίνακα 5.7 για την 21<sup>η</sup> ημέρα του κάθε μήνα.

Στην επόμενη ενότητα παρέχονται διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων υπολογισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση από τις δύο ανωτέρω εμπειρικές μεθόδους.

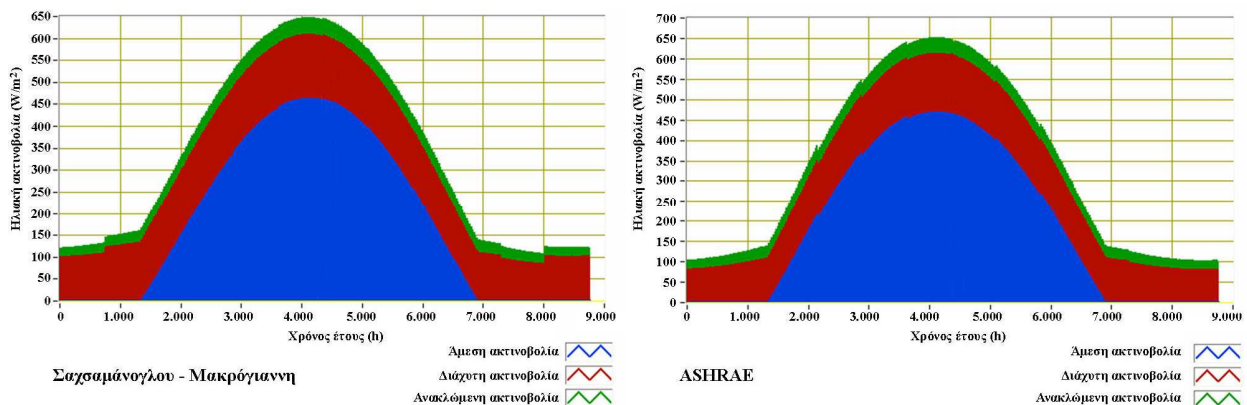
#### 5.4.4.γ. Σύγκριση μεθόδων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα σχετικά με τη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κλίσης  $30^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο, με νότιο προσανατολισμό, εγκατεστημένη στο Ηράκλειο Κρήτης. Συγκεκριμένα η σύγκριση αρχικά εκτελείται ανάμεσα στις εμπειρικές μεθόδους Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη και της ASHRAE. Για την εφαρμογή της μεθόδου Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη χρησιμοποιούνται οι μέσοι συντελεστές A και B της μεθόδου (δείκτης «mean»). Αρχικά υπολογίζεται η ολική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του εδάφους  $I_{glo}$ , με ωριαίο χρονικό βήμα για ένα έτος. Στη συνέχεια, με δεδομένη πλέον τη  $I_{glo}$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός της άμεσης, της διάχυτης και της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια, με το ίδιο χρονικό βήμα υπολογισμού και για την ίδια συνολική χρονική περίοδο, με βάση τις σχέσεις 5.28, 5.30 και 5.33.

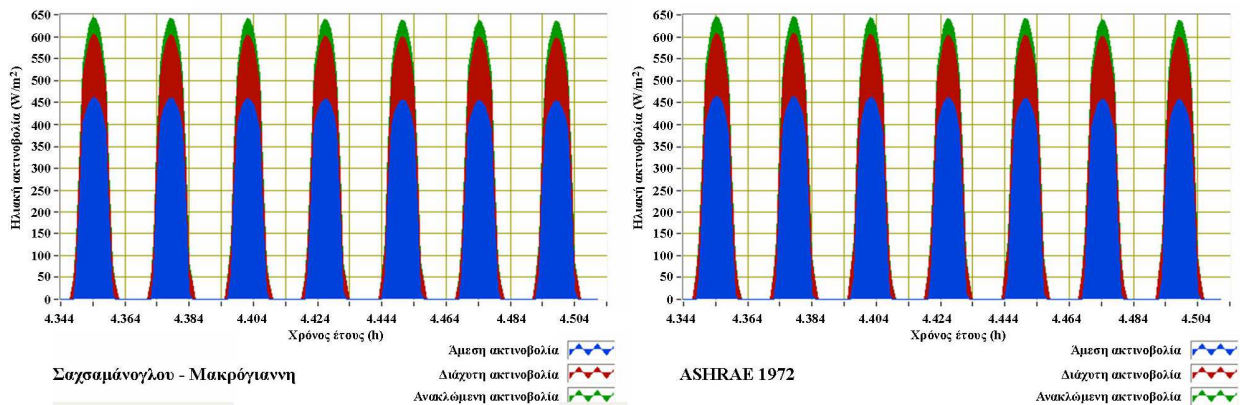
Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται οι σχέσεις 5.37 έως 5.40 για τον υπολογισμό απευθείας της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας με βάση τη μέθοδο ASHRAE.

Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται το ετήσιο διάγραμμα διακύμανσης της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια υπό κλίση, με τις δύο εναλλακτικές εμπειρικές μεθόδους. Αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.35, αυτή τη φορά όμως για την πρώτη εβδομάδα του Ιουλίου. Παρατηρείται η υψηλή σύγκλιση για την προβλεπόμενη ηλιακή ακτινοβολία ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Επίσης παρατηρείται ότι αυτές οι εμπειρικές μέθοδοι δίνουν ομοιόμορφη ημερήσια διακύμανση για την ηλιακή ακτινοβολία, με χρονική συμμετρία ως προς την ηλιακή μεσημβρία.

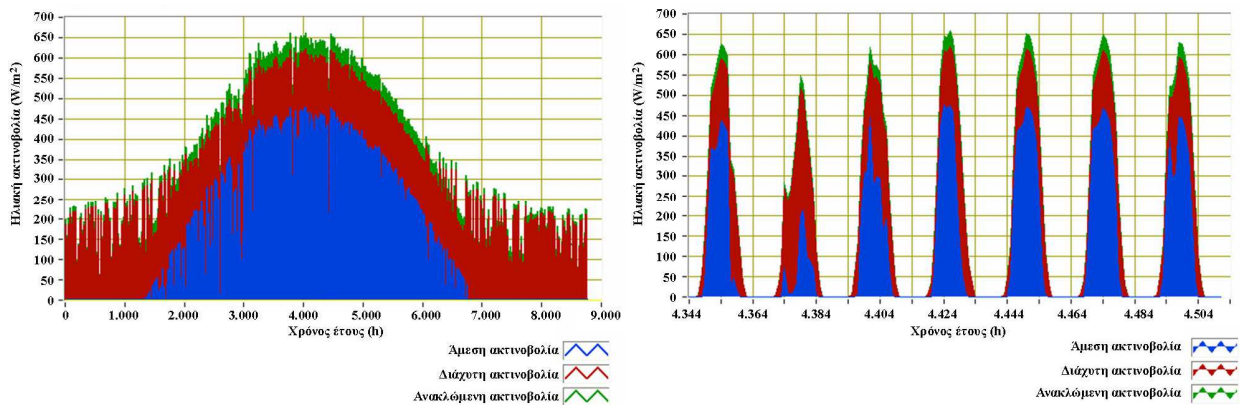
Στην πραγματικότητα, βέβαια, η ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να παρουσιάζει τη συμμετρία και την ομοιομορφία που δίνουν οι εμπειρικές μέθοδοι. Τούτο είναι πασιφανές στο σχήμα 5.36, το οποίο παρουσιάζει την ίδια πληροφορία με τα προηγούμενα σχήματα, αυτή τη φορά όμως υπολογισμένα με βάση πραγματικές μετρήσεις ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο Νομό Λασιθίου Κρήτης. Παρατηρείται η έντονη μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, ακόμα και τους θερινούς μήνες, σε περίοδο δηλαδή με χαμηλή ή και ανύπαρκτη νέφωση. Η μεταβλητότητα της διαθέσιμης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας προφανώς συνεπάγεται αντίστοιχη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια υπό κλίση. Σε περιόδους με υψηλές νεφώσεις, η μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ακόμα εντονότερη.



**Σχήμα 5.34:** Ετήσια διακύμανση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια υπό κλίση με τις μεθόδους Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη και ASHRAE.



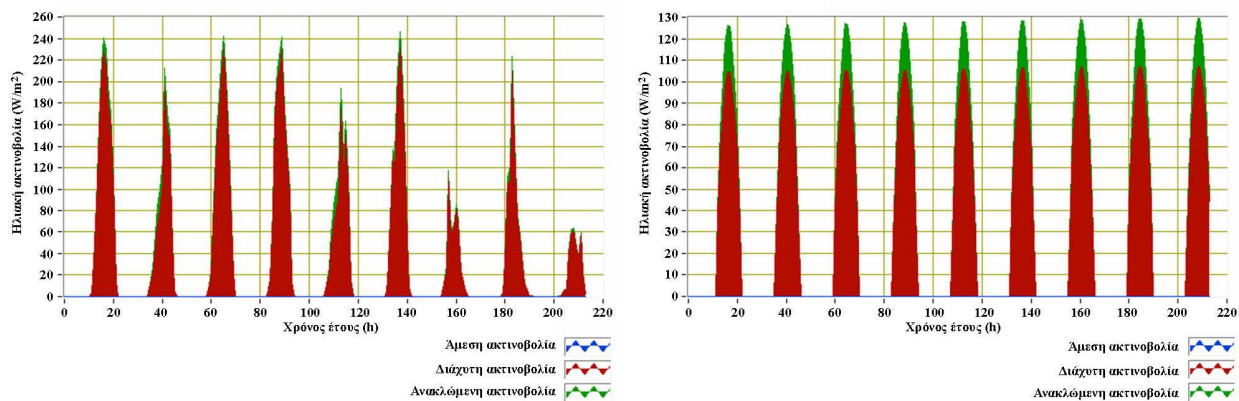
Σχήμα 5.35: Διακύμανση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από 1 έως 7 Ιουλίου σε επιφάνεια υπό κλίση με τις μεθόδους Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη και ASHRAE.



Σχήμα 5.36: Διακύμανση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ετήσια περίοδο και από 1 έως 7 Ιουλίου σε επιφάνεια υπό κλίση, υπολογισμένη με βάση πραγματικές μετρήσεις.

Ενδιαφέροντα είναι τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από το σχήμα 5.37, στο οποίο παρουσιάζεται η διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από 1 έως 9 Ιανουαρίου σε επιφάνεια υπό κλίση, υπολογισμένη με βάση πραγματικές μετρήσεις και τη μέθοδο Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη. Η περίοδος στην οποία αναφέρονται τα διαγράμματα είναι χειμερινή. Παρατηρείται η έντονη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας με βάση τις πραγματικές μετρήσεις. Η ημερήσια αιχμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 60 έως 240W/m<sup>2</sup>. Αντίθετα, η εμπειρική μέθοδος Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη ισοκατανέμει τη συνολική ενεργειακή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας στο χρονικό διάστημα, δίνοντας έτσι ομοιόμορφη κατανομή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας ανά εικοσιτετράωρο. Η συνολική ενεργειακή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας (σε kWh/m<sup>2</sup>) πιθανότατα να μην παρουσιάζει μεγάλες διαφορές, όπως προκύπτει από τις δύο διαφορετικές μεθόδους. Αντίθετα η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (σε W/m<sup>2</sup>) δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την εμπειρική μέθοδο. Συνεπώς η εμπειρική μέθοδος αδυνατεί να αποτυπώσει τις διακυμάνσεις στην πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας. Η αδυναμία αυτή μπορεί να είναι σημαντική σε περιπτώσεις διαστασιολόγησης ενεργητικών ηλιακών συστημάτων, στα οποία η διακύμανση στην ένταση ηλιακής ακτινοβολίας καθορίζει τη δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας ,π.χ. συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης χώρων με ηλιακού συλλέκτες, θερμοδοχεία και καυστήρες.

Τέλος, ανεξάρτητα από τον τρόπο εκτίμησης της ολικής διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας  $I_{glo}$  στο επίπεδο του εδάφους (πραγματικές μετρήσεις ή εμπειρική μέθοδος), η μεθοδολογία εκτίμησης της διάχυτης και της άμεσης ακτινοβολίας που παρουσιάστηκε παραπάνω δίνει για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο του σχήματος 5.37 αποκλειστικά διάχυτη ακτινοβολία. Η άμεση ακτινοβολία απουσιάζει και από τις δύο προσεγγίσεις.



**Σχήμα 5.37:** Διακύμανση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από 1 έως 9 Ιανουαρίου σε επιφάνεια υπό κλίση, υπολογισμένη με βάση πραγματικές μετρήσεις και τη μέθοδο Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη.

### Παράδειγμα 5.6

#### Ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια υπό κλίση:

Να βρεθεί η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στις 14:30 στο Ηράκλειο Κρήτης και στις 17 Αυγούστου για επιφάνεια με γωνία κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο  $45^\circ$  και προσανατολισμό νότιο. Να θεωρηθεί συντελεστής ανακλαστικότητας  $\rho_g = 0,20$ .

#### Λύση

Στο παράδειγμα 5.3 υπολογίστηκε η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας για την περίπτωση της συγκεκριμένης επιφάνειας και για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή ίση με  $\theta_i = 28,2^\circ$ . Επίσης στο παράδειγμα 5.2 υπολογίστηκε το ηλιακό ύψος για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση ίσο με  $\beta = 63,4^\circ$ . Συνεπώς η γωνία ζενίθ του ήλιου θα ισούται με  $\theta_z = 26,6^\circ$ .

Επιλέγοντας για το μήνα Αύγουστο τους μέσους συντελεστές της μεθόδου Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη για τον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας  $I_{glo}$  στο επίπεδο του εδάφους  $A = 1.064$  και  $B = -35$  έχουμε:

$$I_{glo} = A \cdot \sin(\beta) + B \Leftrightarrow I_{glo} = 1.064 \cdot \sin(63,4) - 35 \Leftrightarrow I_{glo} = 916,4 \text{ W/m}^2 .$$

Στη συνέχεια από τη σχέση 5.25 υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα για τις 17 Αυγούστου ίση με  $I_o = 1.339,8 \text{ W/m}^2$  (τρέχων αριθμός ημέρας  $n = 229$ ).

Για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας υπολογίζεται πρώτα η παράμετρος  $K_\tau$  από τη σχέση 5.29:

$$K_\tau = \frac{I_{glo}}{I_o \cdot \cos(\theta_z)} \Leftrightarrow K_\tau = \frac{916,4 \text{ W/m}^2}{1.339,8 \text{ W/m}^2 \cdot \cos(26,6)} \Leftrightarrow K_\tau = 0,765 .$$

Δεδομένου του ότι  $0,22 < K_\tau = 0,765 \leq 0,80$ , η διάχυτη ακτινοβολία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{I_{\text{dif}}}{I_{\text{glo}}} = 0,9511 - 0,1604 \cdot K_{\tau} + 4,388 \cdot K_{\tau}^2 - 16,638 \cdot K_{\tau}^3 + 12,336 \cdot K_{\tau}^4 \Leftrightarrow \frac{I_{\text{dif}}}{I_{\text{glo}}} = 0,172$$

$$\Leftrightarrow I_{\text{dif}} = 0,172 \cdot I_{\text{glo}} \Leftrightarrow I_{\text{dif}} = 0,172 \cdot 916,4 \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow I_{\text{dif}} = 157,6 \text{ W/m}^2$$

Η άμεση ακτινοβολία υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη:

$$I_{\text{dir}} = I_{\text{glo}} - I_{\text{dif}} \Leftrightarrow I_{\text{dir}} = 916,4 - 157,6 \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow I_{\text{dir}} = 758,8 \text{ W/m}^2$$

Αντίστοιχα οι συντελεστές της μεθόδου ASHRAE για τον Αύγουστο δίνονται  $A = 1,105$ ,  $B = 0,182$  και  $C = 0,134$ . Ο υπολογισμός της άμεσης, διάχυτης και ανακλώμενης ακτινοβολίας ακολουθεί τις σχέσεις 5.37 έως 5.40. Αρχικά υπολογίζεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία:

$$I_{\text{dir}} = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin(\beta)}} \Leftrightarrow I_{\text{dir}} = 1,105 \cdot e^{-\frac{0,182}{\sin(63,4)}} \Leftrightarrow I_{\text{dir}} = 901,5 \text{ W/m}^2$$

Με γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i = 28,2^\circ$ , υπολογίζεται  $\cos(\theta_i) = 0,881 > -0,2$ . Συνεπώς:

$$Y = 0,55 + 0,437 \cdot \cos(\theta_i) + 0,313 \cdot \cos^2(\theta_i) \Leftrightarrow Y = 0,55 + 0,437 \cdot 0,881 + 0,313 \cdot 0,881^2 \Leftrightarrow Y = 1,178.$$

Για επιφάνεια με κλίση  $45^\circ$  η διάχυτη ακτινοβολία υπολογίζεται ως:

$$I_{\text{dif}} = C \cdot I_{\text{dir}} \cdot \frac{1 + \cos(\theta_p)}{2} \Leftrightarrow I_{\text{dif}} = 0,134 \cdot 901,5 \cdot \frac{1 + \cos(45^\circ)}{2} \Leftrightarrow I_{\text{dif}} = 103,1 \text{ W/m}^2$$

Τέλος η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{\text{ref}} = I_{\text{dir}} \cdot [C + \sin(\beta)] \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos(\theta_p)}{2} \Leftrightarrow I_{\text{ref}} = 901,5 \cdot (0,134 + \sin(63,4)) \cdot 0,20 \cdot \frac{1 - \cos(45^\circ)}{2}$$

$$\Leftrightarrow I_{\text{ref}} = 27,1 \text{ W/m}^2$$

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια, υπολογίζονται αρχικά οι παράμετροι  $F_{\text{sky}}$  και  $F_{\text{grd}}$  από τις σχέσεις 5.31 και 5.32 αντίστοιχα ( $\theta_p = 45^\circ$  η κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο):

$$F_{\text{sky}} = \frac{1 + \cos(\theta_p)}{2} \Leftrightarrow F_{\text{sky}} = \frac{1 + \cos(45)}{2} \Leftrightarrow F_{\text{sky}} = 0,8535$$

$$F_{\text{grd}} = \frac{1 - \cos(\theta_p)}{2} \Leftrightarrow F_{\text{grd}} = \frac{1 - \cos(45)}{2} \Leftrightarrow F_{\text{grd}} = 0,1464.$$

Η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία  $I_{\text{glo,p}}$  στην επιφάνεια υπό κλίση προκύπτει από τη σχέση 5.33. Με βάση τη μέθοδο Σαχσαμάνογλου – Μακρογιάννη έχουμε:



$$\begin{aligned}
 I_{\text{glo,p}} &= I_{\text{dir}} \cdot \cos(\theta_i) + I_{\text{dif}} \cdot F_{\text{sky}} + I_{\text{glo,hor}} \cdot \rho_g \cdot F_{\text{grd}} \Leftrightarrow \\
 I_{\text{glo,p}} &= 758,8 \cdot \cos(28,2) + 157,6 \cdot 0,8535 + 916,4 \cdot 0,20 \cdot 0,1464 \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow \\
 I_{\text{glo,p}} &= 668,73 + 134,51 + 26,83 \text{ W/m}^2 \\
 I_{\text{glo,p}} &= I_{\text{glo,p}} = 836,1 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

Με βάση τη μέθοδο ASHRAE έχουμε:

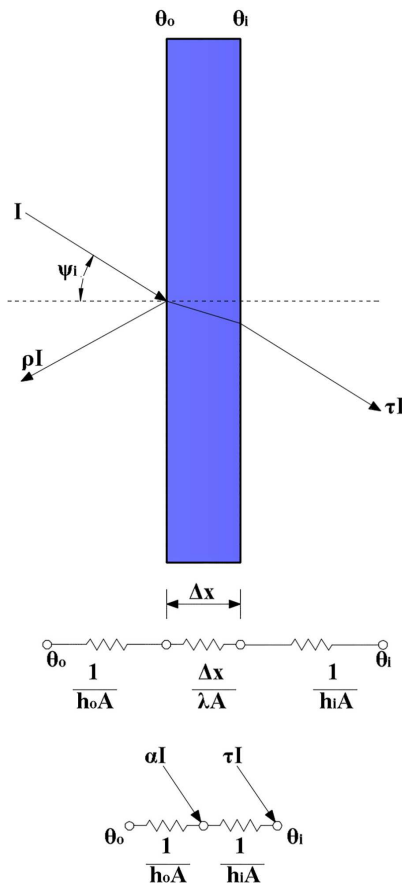
$$\begin{aligned}
 I_{\text{glo,p}} &= I_{\text{dir}} \cdot \cos(\theta_i) + I_{\text{dif}} + I_{\text{ref}} \Leftrightarrow \\
 I_{\text{glo,p}} &= 901,5 \cdot \cos(28,2) + 103,1 + 27,1 \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow I_{\text{glo,p}} = 794,5 + 103,1 + 27,1 \text{ W/m}^2 \\
 I_{\text{glo,p}} &= 924,7 \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

Παρατηρείται ότι η απόκλιση στον υπολογισμό της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανάμεσα στις δύο μεθόδους, η οποία είναι της τάξης του 10%, προκύπτει κυρίως λόγω της απόκλισης στον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία παρουσιάζεται αυξημένη με τη μέθοδο της ASHRAE.

## 5.5. Ηλιακά κέρδη μέσω διαφανών επιφανειών

Οι διαφανείς επιφάνειες (παράθυρα, πόρτες κλπ) αποτελούν μία κατηγορία δομικών στοιχείων με ιδιαίτερη σημασία, αναφορικά με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτηρίων, ενδεχομένως την πιο σημαντική. Και τούτο, γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό φορτίων κλιματισμού, θέρμανσης ή ψύξης, σε ένα κτήριο, πολύ συχνά προκύπτει μέσω των διαφανών επιφανειών. Το ποσοστό των ετήσιων φορτίων κλιματισμού που οφείλεται στις διαφανείς επιφάνειες ενός κτηριακού κελύφους μπορεί να ανέλθει έως και το 1/3 των συνολικών ετήσιων φορτίων. Τα υψηλά φορτία κλιματισμού μέσω διαφανών επιφανειών οφείλονται για τα μεν φορτία θέρμανσης στους υψηλούς συντελεστές θερμοπερατότητας που παρουσιάζουν, για τα δε φορτία ψύξης, πέραν των υψηλών συντελεστών θερμοπερατότητας, επιπλέον και στα ηλιακά κέρδη, λόγω της απευθείας διείσδυσης ηλιακής ακτινοβολίας εντός του κτηρίου μέσω των διαφανών επιφανειών. Από την άλλη μεριά, η διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας το χειμώνα μέσω των διαφανών επιφανειών συμβάλει στη μείωση των θερμικών φορτίων, ενώ η σωστή τοποθέτηση των διαφανών επιφανειών στο κτηριακό κέλυφος εξασφαλίζει φυσικό φωτισμό. Συνεπώς οι διαφανείς επιφάνειες ταυτόχρονα με την υψηλή ροή θερμικής ισχύος που εμφανίζουν όλο το έτος, αυξάνοντας έτσι τα φορτία κλιματισμού, συμβάλουν ταυτόχρονα στην εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω των ηλιακών κερδών το χειμώνα και της εξασφάλισης φυσικού φωτισμού.

### 5.5.1. Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας παραθύρων



**Σχήμα 5.38:** Μεταφορά θερμότητας μέσω διαφανούς επιφάνειας και ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα.

Τα παράθυρα αποτελούν το είδος διαφανών επιφανειών που συναντώνται συχνότερα σε ένα κτήριο. Ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή θερμοπερατότητας ενός παραθύρου εμπεριέχει μία σχετική δυσκολία, καθώς σε ένα παράθυρο συνδυάζονται ταυτόχρονα η διαφανής επιφάνεια και το πλαίσió του (κάσα), δύο δηλαδή διαφορετικά κατασκευαστικά στοιχεία. Το ισοζύγιο ενέργειας σε ένα παράθυρο με μονό υαλοπίνακα, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.38, αναλύεται σε δύο επιμέρους βήματα:

- τη ροή θερμικής ισχύος από τον εσωτερικό κλιματιζόμενο χώρο προς το περιβάλλον κατά τη χειμερινή περίοδο, ή αντίστροφα κατά τη θερινή περίοδο,
- τα κέρδη λόγω ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία  $I$  προσπίπτει στη διαφανή επιφάνεια με γωνία  $\theta_i$ . Ανάλογα με το υλικό και τις επιστρώσεις της επιφάνειας, ένα μέρος  $\tau \cdot I$  από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά την επιφάνεια και αποδίδεται εντός του κλιματιζόμενου χώρου. Ο συντελεστής  $\tau$  που καθορίζει το ποσοστό από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που θα διαπεράσει τη διαφανή επιφάνεια ονομάζεται συντελεστής διαπερατότητας τζαμιού. Ένα άλλο ποσοστό  $\rho \cdot I$  από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται προς το περιβάλλον. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από το συντελεστή ανακλαστικότητας  $\rho$  του τζαμιού. Τέλος, ένα ποσοστό  $\alpha \cdot I$  απορροφάται από το τζάμι, ανάλογα με το συντελεστή απορροφητικότητας  $\alpha$ .

Η ροή θερμότητας από το εσωτερικό του κλιματιζόμενου χώρου προς το περιβάλλον (χειμερινή περίοδος) διέρχεται μέσω τριών θερμικών αντιστάσεων: την αντίσταση θερμικής μετάβασης προς την εσωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα, την αντίσταση του υλικού του υαλοπίνακα και την αντίσταση θερμικής μετάβασης από την εξωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα. Συνεπώς, η συνολική θερμική αντίσταση  $R_{th}$  της μεταφοράς θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον διαμέσου του υαλοπίνακα αποτελεί το άθροισμα των ανωτέρω τριών θερμικών αντιστάσεων (βλέπε Κεφάλαιο 2) και ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα  $U$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{R_{th}} = U \cdot A \Leftrightarrow \frac{1}{U} = R_{th} \cdot A \Leftrightarrow \frac{1}{U} = \left( \frac{1}{h_i \cdot A} + \frac{\Delta x}{k \cdot A} + \frac{1}{h_o \cdot A} \right) \cdot A \quad (5.41)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{\lambda} + \frac{1}{h_o}$$

όπου:

$h_i$ : συντελεστής θερμικής μετάβασης εσωτερικού χώρου (εκφράζει μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία)

- $h_o$  : συντελεστής θερμικής μετάβασης εξωτερικού χώρου (εκφράζει μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία)  
 $\Delta x$  : πάχος υαλοπίνακα  
 $\lambda$  : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας υαλοπίνακα.

Οι συντελεστές θερμικής μετάβασης μεταβάλλονται συναρτήσει των συνθηκών του περιβάλλοντος. Ενδεικτικές τιμές για τους συντελεστές θερμικής μετάβασης παρέχονται στον πίνακα 5.8. Η επίδραση των συντελεστών θερμικής μετάβασης στην τιμή της θερμικής διαπερατότητας του παραθύρου είναι μεγαλύτερη για παράθυρα με μονό υαλοπίνακα. Γενικότερα, όσο περισσότερο μονωμένο είναι το παράθυρο, τόσο μικρότερη η επίδραση των συντελεστών θερμικής μετάβασης στη συνολική θερμική διαπερατότητά του. Τούτο ισχύει για οποιοδήποτε δομικό στοιχείο.

**Πίνακας 5.8:** Χαρακτηριστικοί συντελεστές θερμικής μετάβασης.

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Συντελεστής θερμικής μετάβασης στην εξωτερική επιφάνεια τοιχωμάτων $h_o$ ( $W/m^2 \cdot K$ )	Συντελεστής θερμικής μετάβασης στην εσωτερική επιφάνεια τοιχωμάτων $h_i$ ( $W/m^2 \cdot K$ )		
		Κατεύθυνση θερμοροής		
		Προς τα πάνω	Οριζόντια	Προς τα κάτω
1	12,5	10	7,7	5,9
2	16,5			
3	20			
4	25			
5	27,5			
7	36			
10	50			

Για υπολογισμούς σύμφωνα με τον Κ.ΕΝ.Α.Κ. λαμβάνεται η τιμή  $h_o = 25/(m^2 \cdot K)$ .

Αν θεωρήσουμε ένα τυπικό πάχος υαλοπίνακα 5mm και μία τυπική θερμική αγωγιμότητα για το υλικό ίση με  $1W/(m \cdot K)$ , τότε η θερμική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας διαμέσου του υαλοπίνακα υπολογίζεται  $0,005m^2 \cdot K/W$ . Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τις αντιστάσεις θερμικής μετάβασης στις επιφάνειες του υαλοπίνακα. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε  $h_i = 10W/m^2 \cdot K$  και  $h_o = 25W/m^2 \cdot K$ , τότε οι θερμικές αντιστάσεις υπολογίζονται:

$$R_{thi} = \frac{1}{h_i} = 0,10 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{tho} = \frac{1}{h_o} = 0,04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Δηλαδή οι θερμικές αντιστάσεις στις επιφάνειες του υαλοπίνακα υπολογίζονται 20 και 8 φορές αντίστοιχα μεγαλύτερες από τη θερμική αντίσταση λόγω αγωγής διαμέσου της μάζας του. Συνεπώς, στην περίπτωση μονού υαλοπίνακα, ο όρος  $\Delta x/k$  μπορεί να παραληφθεί.

Η θερμική αντίσταση παραθύρων μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας υαλοπίνακες. Η ολική θερμική αντίσταση ενός διπλού υαλοπίνακα, παραλείποντας τη θερμική αντίσταση αγωγής, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_\delta + \frac{1}{h_o} \quad (5.42)$$

όπου  $R_s$  η θερμική αντίσταση του κάθε διακένου ανάμεσα στους υαλοπίνακες, που δίνεται από πίνακες. Κάθε επιπρόσθετος υαλοπίνακας αυξάνει τη συνολική θερμική αντίσταση του παραθύρου, προσθέτοντας νέους όρους  $R_s$  στην ανωτέρω σχέση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το πάχος  $d$  του διάκενου μεταξύ των υαλοπινάκων, καθώς αύξηση του πάχους συνεπάγεται και αύξηση του κόστους του παραθύρου. Όταν το πάχος μεταξύ των υαλοπινάκων είναι μικρότερο περίπου των 8mm, τότε πρακτικά στο διάκενο δεν υπάρχει συναγωγή θερμότητας. Η θερμότητα διαμέσου του διακένου μεταφέρεται μόνο με αγωγή και ακτινοβολία. Αύξηση της απόστασης των υαλοπινάκων πάνω από περίπου 12mm πρακτικά δεν επιφέρει καμία περαιτέρω μείωση της θερμικής διαπερατότητας, συνεπώς δεν έχει κάποια σκοπιμότητα.

Σε όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω δε λήφθηκε υπόψη πουθενά η συμμετοχή του πλαισίου του παραθύρου στη μεταφορά θερμότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αγωγή θερμότητας μέσω του πλαισίου του παραθύρου είναι αρκετά διαφορετική από αυτή του υαλοπίνακα για να μπορεί να αγνοηθεί. Προκειμένου να εξαχθεί μία συνολική τιμή για το συντελεστή θερμοπερατότητας ενός παραθύρου, προτείνεται από την ASHRAE ο υπολογισμός ενός συνολικού συντελεστή  $U_w$  συναρτήσει της επιφάνειας του κάθε διαφορετικού κατασκευαστικού στοιχείου του παραθύρου που εμφανίζει διαφορετικό συντελεστή θερμοπερατότητας  $U$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + I_g \cdot \Psi_g}{A_g + A_f} \quad (5.43)$$

όπου οι δείκτες  $g$  και  $f$  αναφέρονται στον υαλοπίνακα (glass) και στο πλαίσιο του παραθύρου (frame). Με  $I_g$  συμβολίζεται η περίμετρος του υαλοπίνακα και με  $\Psi_g$  ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος σε  $W/(m \cdot K)$ .

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_g$  του υαλοπίνακα λαμβάνεται από τον πίνακα 5.9. Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_f$  του πλαισίου λαμβάνεται από τον πίνακα 5.10. Τέλος η τιμή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi_g$  λαμβάνεται από τον πίνακα 5.11.

**Πίνακας 5.9:** Τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας υαλοπινάκων [4].

Υάλωση			Συντελεστής θερμοπερατότητας $U_g$ για διαφορετικούς τύπους αερίων στο διάκενο των υαλοπινάκων ( $W/m^2 \cdot K$ )			
Τύπος	Υαλοπίνακας	Συντελεστής εκπομπής	Διαστάσεις	Αέρας	Αργό	Κρυπτό
Διπλή	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8
			4-8-4	3,1	2,9	2,7
			4-12-4	2,8	2,7	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ενός φύλλου	$\leq 0,1$	4-6-4	2,6	2,2	1,7
			4-8-4	2,2	1,9	1,4
			4-12-4	1,8	1,5	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3
			4-20-4	1,6	1,4	1,4
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ενός φύλλου	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5
			4-8-4	2,1	1,7	1,3
4-12-4			1,7	1,3	1,1	
4-16-4			1,4	1,2	1,2	
4-20-4			1,5	1,2	1,2	
Τριπλή	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής δύο φύλλων	$\leq 0,1$	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής δύο φύλλων	$\leq 0,05$	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5

**Πίνακας 5.10:** Τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας πλαισίου [4].

Υλικό πλαισίου	Χαρακτηριστικό πλαισίου	Συντελεστής θερμοπερατότητας $U_f$ πλαισίου ( $W/m^2 \cdot K$ )
Μεταλλικό πλάισιο	Χωρίς θερμοδιακοπή	7,0
	Με θερμοδιακοπή	1,0 – 4,0
Συνθετικό πλάισιο	Πολυουρεθάνη	2,8
	PVC με δύο θαλάμους	2,2
	PVC με τρεις θαλάμους	2,0
	PVC πολυθαλαμικό	1,0 – 2,0
Ξύλινο πλάισιο	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους ξυλείας – κάσας 5cm	2,4
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους ξυλείας – κάσας 5cm	2,0
	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους ξυλείας – κάσας 10cm	1,7
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους ξυλείας – κάσας 10cm	1,5

**Πίνακας 5.11:** Τυπικές τιμές γραμμικής θερμοπερατότητας στη συναρμογή πλαισίου – υαλοπίνακα [4].

Τύπος πλαισίου	Γραμμική θερμοπερατότητα $\Psi_g$ για διάφορους τύπους υαλοπινάκων (W/m <sup>2</sup> ·K)	
	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής
Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή	0,02	0,05
Μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή	0,08	0,11
Συνθετικό πλαίσιο	0,06	0,08
Ξύλινο πλαίσιο	0,06	0,08

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_g$  του υαλοπίνακα μπορεί επίσης να υπολογιστεί αναλυτικά από τη σχέση:

$$U_g = \frac{1}{R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n-1} R_{\delta} + R_a} \quad (5.44)$$

όπου:

- n : το πλήθος των φύλλων του υαλοπίνακα (n = 1, 2, 3 αντίστοιχα για μονό, διπλό, τριπλό υαλοπίνακα)
- d : το πάχος του κάθε φύλλου του υαλοπίνακα σε m
- λ : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού σε W/(m·K)
- R<sub>δ</sub> : η θερμική αντίσταση του εγκλωβισμένου στρώματος αέρα στο διάκενο ανάμεσα στα φύλλα του υαλοπίνακα σε W/(m<sup>2</sup>·K), η οποία λαμβάνεται από τον πίνακα 12.

**Πίνακας 5.12:** Θερμική αντίσταση του αέρα του διακένου του υαλοπίνακα [4].

Πάχος διακένου (mm)	Θερμική αντίσταση διακένου υαλοπινάκων R <sub>δ</sub> (m <sup>2</sup> ·K/W)		
	Χωρίς επίστρωση	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ίσης με:	
		0,20	0,10
6	0,127	0,191	0,211
9	0,154	0,259	0,299
12	0,173	0,316	0,377
15	0,186	0,364	0,447
50	0,179	0,336	0,406

Τέλος, στον πίνακα 5.13, παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για το συντελεστή θερμοπερατότητας για πλαίσια παραθύρων από αλουμίνιο και ξύλο.

**Πίνακας 5.13:** Ενδεικτικές τιμές για το συντελεστή θερμικής διαπερατότητας πλαισίων παραθύρων.

Υλικό	Συντελεστής θερμικής διαπερατότητας (W/m <sup>2</sup> ·K)
Αλουμίνιο χωρίς θερμοδιακοπή	10,8
Αλουμίνιο με θερμοδιακοπή	5,68
Ξύλο ή βινύλλιο	2,27

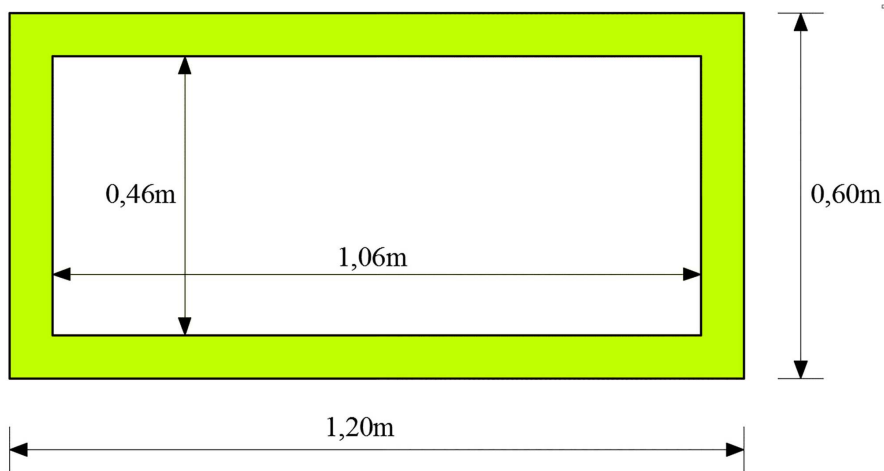
**Παράδειγμα 5.7**

Συντελεστής θερμοπερατότητας παραθύρου:

Να υπολογιστεί ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας παραθύρου με διπλό υαλοπίνακα με διάκενο πάχους 12mm, χωρίς επίστρωση, συνολικών διαστάσεων (μαζί με το πλαίσιο) 1,2 x 0,6m, με πλαίσιο αλουμινίου με θερμοδιακοπή. Το πάχος του πλαισίου (κάσα) του παραθύρου δίνεται 0,07m.

Λύση

Με βάση την περιγραφή της γεωμετρίας του παραθύρου σχεδιάζεται η όψη του στο σχήμα 5.39:



*Σχήμα 5.39: Γεωμετρία παραθύρου παραδείγματος.*

Με τη βοήθεια του σχήματος 5.40 υπολογίζονται τα εμβαδά κάθε διαφορετικού τμήματος του παραθύρου:

- εμβαδό υαλοπίνακα:  $A_{cg} = 1,06 \times 0,46\text{m} = 0,4876\text{m}^2$
- εμβαδό πλαίσιο:  $A_f = 1,20 \times 0,60\text{m} - 0,4876\text{m}^2 = 0,2324\text{m}^2$
- συνολικό εμβαδό παραθύρου:  $A_{tot} = 1,20 \times 0,60\text{m} = 0,72\text{m}^2$
- μήκος περιμέτρου υαλοπίνακα:  $l_g = 2 \times (1,06 + 0,46) = 3,04\text{m}$ .

Με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του παραθύρου, από τους πίνακες 5.9 – 5.11 επιλέγουμε:

- από τον πίνακα 5.9, για διπλό υαλοπίνακα, χωρίς επίστρωση, με διάκενο αέρα 12mm:  $U_g = 2,8\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- από τον πίνακα 5.10, για πλαίσιο αλουμινίου, με θερμοδιακοπή:  $U_f = 2,5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- από τον πίνακα 5.11, για μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή, χωρίς επίστρωση:  $\Psi_g = 0,08\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του παραθύρου υπολογίζεται από τη σχέση 5.43:

$$U_w = \frac{U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + l_g \cdot \Psi_g}{A_g + A_f} \Leftrightarrow U_w = \frac{2,8 \cdot 0,4876 + 2,5 \cdot 0,2324 + 3,04 \cdot 0,08}{0,72} \Leftrightarrow U_w = 2,72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

### 5.5.2. Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας υαλοπίνακα

Μία ακόμα παράμετρος ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας υαλοπινάκων, καθώς επηρεάζει άμεσα τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, η οποία αποτελεί βασική παράμετρο θερμικής άνεσης. Στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθεί η αναλυτική σχέση υπολογισμού της. Έστω λοιπόν  $R'$  η θερμική αντίσταση του υαλοπίνακα χωρίς τη συνιστώσα της θερμικής αντίστασης της εσωτερικής επιφάνειας του παραθύρου, δηλαδή χωρίς την  $1/h_i \cdot A$ . Η συνολική θερμική αντίσταση  $R$  του παραθύρου θα δίνεται από τη σχέση:

$$R = R' + \frac{1}{h_i \cdot A}$$

καθώς οι αντιστάσεις  $R'$  και  $1/h_i \cdot A$  είναι συνδεδεμένες εν σειρά. Επιπλέον, καθώς είναι  $R = 1/U \cdot A$ , η ανωτέρω σχέση γράφεται:

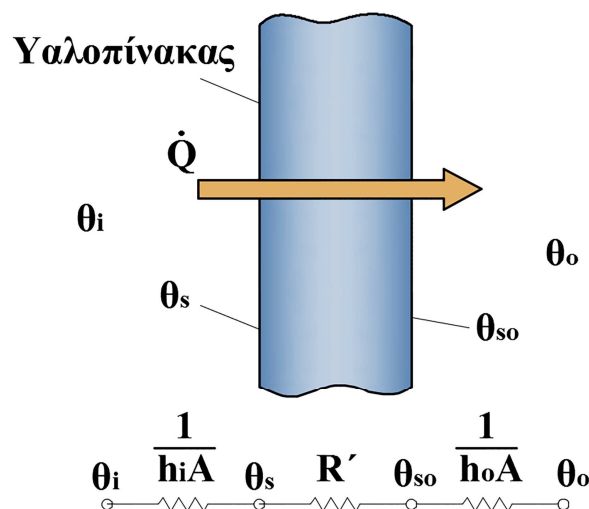
$$\frac{1}{U \cdot A} = R' + \frac{1}{h_i \cdot A} \Leftrightarrow R' = \frac{1}{U \cdot A} - \frac{1}{h_i \cdot A}.$$

Η θερμική ισχύς από έναν εσωτερικά θερμαινόμενο χώρο προς την εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου θα ισούται με (σχήμα 5.40):

$$\dot{Q} = h_i \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_s)$$

όπου  $\theta_i$  η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και  $\theta_s$  η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου. Αυτή η θερμική ισχύς θα πρέπει να ισούται και με τη θερμική ισχύ που από το παράθυρο εξέρχεται προς το περιβάλλον, δηλαδή:

$$\dot{Q} = h_i \cdot A \cdot (\theta_i - \theta_s) = \frac{\theta_s - \theta_o}{R'}.$$



Σχήμα 5.40: Μεταφορά θερμικής ισχύος διαμέσου υαλοπίνακα και ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα.

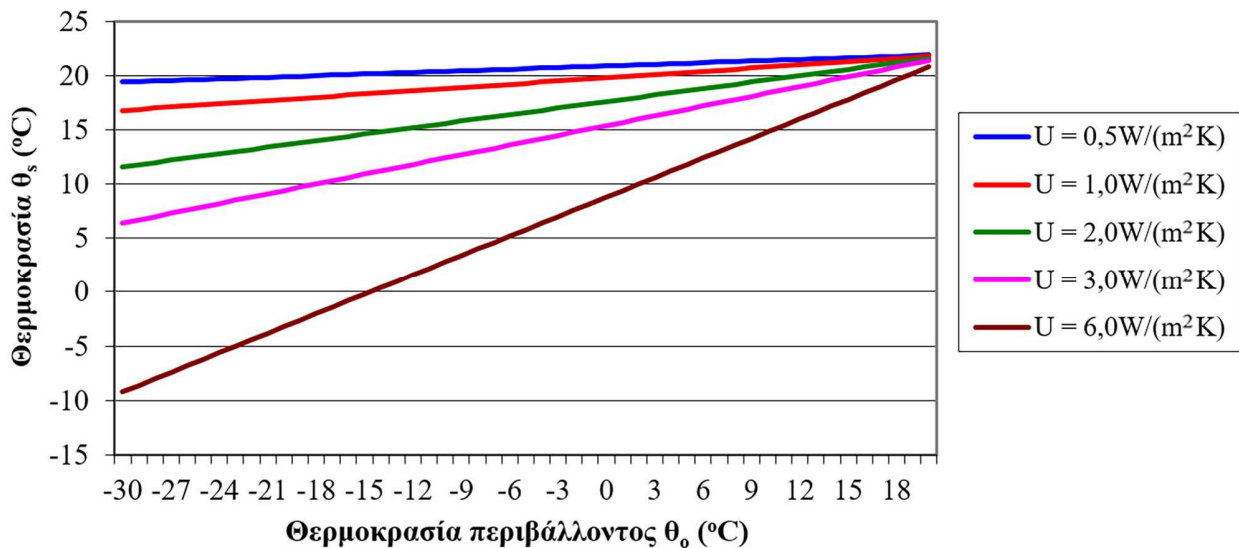


Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω σχέση  $R' = \frac{1}{U \cdot A} - \frac{1}{h_i \cdot A}$  και λύνοντας ως προς  $\theta_s$ , καταλήγουμε τελικά:

$$\theta_s = \left(1 - \frac{U}{h_i}\right) \cdot \theta_i + \frac{U}{h_i} \cdot \theta_o \quad (5.45)$$

Με βάση τη σχέση 5.46, όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας  $U$ , τόσο η θερμοκρασία  $\theta_s$  προσεγγίζει τη θερμοκρασία  $\theta_i$ .

Στο σχήμα 5.41 παρουσιάζεται γραφική παράσταση της διακύμανσης της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας παραθύρου  $\theta_s$ , όπως υπολογίζεται από την ανωτέρω σχέση, συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $\theta_o$ , για διάφορους συντελεστές θερμικής διαπερατότητας παραθύρου, για επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου  $\theta_i = 22^\circ\text{C}$  και για συντελεστή θερμικής μετάβασης  $h_i = 10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ .



**Σχήμα 5.41:** Διακύμανση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας παραθύρου  $T_s$  συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $T_o$ , για διάφορους συντελεστές θερμοπερατότητας παραθύρου, για επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου  $T_i = 22^\circ\text{C}$  και για συντελεστή θερμικής μετάβασης  $h_i = 10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ .

### 5.5.3. Συντελεστής σκίασης διαφανών επιφανειών

Είδαμε σε προηγούμενη ενότητα ότι κατά την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφανή επιφάνεια, ένα μέρος αυτής ανακλάται, ένα μέρος απορροφάται από τον υαλοπίνακα και ένα μέρος διαπερνά την επιφάνεια και εισέρχεται εντός του κλιματιζόμενου χώρου, ανάλογα με τους συντελεστές ανακλαστικότητας  $\rho$ , απορροφητικότητας  $\alpha$  και διαπερατότητας  $\tau$  αντίστοιχα. Το άθροισμα των τριών συντελεστών θα ισούται με μονάδα:

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (5.46)$$

Η ακτινοβολία που εισέρχεται εντός του κλιματιζόμενου χώρου θεωρείται ότι απορροφάται εξ' ολοκλήρου από τα αντικείμενα που βρίσκονται εντός αυτού, λόγω του μεγάλου αριθμού διαδοχικών ανακλάσεων που τούτη υφίσταται στα αντικείμενα εντός του χώρου. Η ακτινοβολία που απορροφάται από τον υαλοπίνακα συμβάλει στην

αύξηση της θερμοκρασίας του και, συνεπώς, και στην αλλαγή της ροής θερμικής ισχύος, αν η θερμοκρασία που θα αναπτύξει είναι μεγαλύτερη του περιβάλλοντος, κατά τη θερινή περίοδο, ή μεγαλύτερη του εσωτερικού θερμαινόμενου χώρου, κατά τη χειμερινή περίοδο.

Με βάση το σχήμα 5.39, αν αγνοήσουμε την ύπαρξη της ηλιακής ακτινοβολίας, η ροή θερμικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το περιβάλλον θα ισούται με:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot (\theta_o - \theta_i)$$

υποθέτοντας θετική ροή θερμικής ισχύος όταν αυτή προκύπτει από το περιβάλλον προς τον εσωτερικό χώρο. Αν τώρα λάβουμε υπόψη και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, τότε η ροή θερμικής ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας συναλλαγής προκύπτει:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot (\theta_o - \theta_i) + \tau \cdot I + h_i \cdot (\theta_s - \theta_i)$$

όπου ο τελευταίος όρος στην ανωτέρω σχέση αντιστοιχεί στη μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας από τον υαλοπίνακα προς τον εσωτερικό χώρο, βάσει ενός συνδυασμένου συντελεστή συναγωγής  $h_i$  και της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του υαλοπίνακα  $\theta_s$ , η οποία έχει διαμορφωθεί λόγω της απορρόφησης από αυτόν ηλιακής ακτινοβολίας  $\alpha \cdot I$ . Αποδεικνύεται τελικά ότι η συνολική θερμική ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ισούται με:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot (\theta_o - \theta_i) + \tau \cdot I + \frac{\alpha \cdot I \cdot h_i}{h_i + h_o} \quad (5.47)$$

Οι δύο τελευταίοι όροι στο δεξιό μέρος της ανωτέρω σχέσης αποτελούν το συνολικό θερμικό κέρδος του εσωτερικού χώρου λόγω της διαφανούς επιφάνειας:

$$\frac{\dot{Q}_{sol}}{A} = \tau \cdot I + \frac{\alpha \cdot I \cdot h_i}{h_i + h_o} = \left( \tau + \frac{\alpha \cdot h_i}{h_i + h_o} \right) \cdot I = F \cdot I \quad (5.48)$$

Ο συντελεστής  $F$  ονομάζεται συντελεστής ηλιακών κερδών. Θέτοντας το συντελεστή διαπερατότητας του τζαμιού  $U$  ίσο με (αγνοώντας τη θερμική αντίσταση αγωγής):

$$U = \frac{h_i \cdot h_o}{h_i + h_o} \quad (5.49)$$

ο συντελεστής ηλιακών κερδών  $F$  μπορεί να γραφεί ως:

$$F = \tau + \frac{\alpha \cdot h_i}{h_i + h_o} = \tau + \alpha \cdot \frac{U}{h_o} \quad (5.50)$$

Στην περίπτωση παραθύρου με διπλό υαλοπίνακα, ο συντελεστής  $F$  γράφεται:

$$F = \tau + \alpha_o \cdot \frac{U}{h_o} + \alpha_1 \cdot U \cdot \left( R_\delta + \frac{1}{h_o} \right) \quad (5.51)$$

όπου  $R_\delta$  η θερμική αντίσταση του διακένου μεταξύ των υαλοπινάκων και  $\alpha_o, \alpha_i$  οι συντελεστές απορροφητικότητας του εξωτερικού και του εσωτερικού υαλοπίνακα. Ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας στην περίπτωση διπλού υαλοπίνακα υπενθυμίζεται ότι ισούται με:

$$U = \frac{1}{h_i} + R_\delta + \frac{1}{h_o}.$$

Ο συντελεστής ηλιακών κερδών  $F$ , εκτός από το υλικό και τις ιδιότητες του τζαμιού, εξαρτάται επίσης από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο τζάμι και από τους συντελεστές θερμικής μετάβασης των επιφανειών του υαλοπίνακα. Η κατηγοριοποίηση όλων των δυνατών ιδιοτήτων που διαμορφώνουν το συντελεστή ηλιακών κερδών ενός υαλοπίνακα θα οδηγούσε σε μακροσκελείς και δύσχρηστους πίνακες. Με σκοπό την απλοποίηση της διαδικασίας εκτίμησης των ηλιακών κερδών μέσω μιας διαφανούς επιφάνειας, ορίζεται ένας συντελεστής ηλιακών κερδών αναφοράς, ο οποίος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τύπο υαλοπίνακα. Ο συντελεστής ηλιακών κερδών αναφοράς προκύπτει ίσος με 0,87. Ορίζεται τώρα ο ονομαζόμενος συντελεστής σκίασης  $SC$  μιας διαφανούς επιφάνειας ως ο λόγος του συντελεστή ηλιακών κερδών της επιφάνειας προς το συντελεστή ηλιακών κερδών αναφοράς, δηλαδή:

$$SC = \frac{F}{0,87} = 1,15 \cdot F. \quad (5.52)$$

Στον πίνακα 5.14 παρουσιάζονται διάφορες τιμές του συντελεστή σκίασης. Ο όρος «συντελεστής σκίασης» ίσως να ξενίζει κάπως, καθώς μεγαλύτερες τιμές του αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα ηλιακά κέρδη. Παρόλα αυτά η ορολογία αυτή έχει καθιερωθεί. Ο Έλληνας αναγνώστης θα πρέπει να τον ερμηνεύσει ως «συντελεστή ηλιασμού».

**Πίνακας 5.14:** Συντελεστές σκίασης για διάφορους τύπους υαλοπίνακα.

Τύπος υαλοπίνακα	Πάχος (mm)	Συντελεστής απορροφητικότητας $\tau$	Συντελεστής σκίασης $SC$	
			Χειμώνας	Καλοκαίρι
Μονός υαλοπίνακας				
Απλός	3	0,86	1	1
	6	0,78	0,94	0,95
	10	0,72	0,90	0,92
	13	0,67	0,87	0,88
Απορροφητικός	3	0,64	0,83	0,85
	6	0,46	0,69	0,73
	10	0,33	0,60	0,64
	13	0,24	0,53	0,58
Διπλός υαλοπίνακας				
Απλοί και οι δύο	3	0,71	0,88	0,88
	6	0,61	0,81	0,82
Απορροφητικός έξω, καθαρός μέσα	6	0,36	0,55	0,58

### 5.5.5. Τεχνολογίες υαλοπινάκων

Το μεγάλο εύρος εφαρμογών υαλοπινάκων, οι διαφορετικές καιρικές συνθήκες σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και οι καιρικές διακυμάνσεις εντός ενός έτους έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τύπων υαλοπινάκων, με απώτερο στόχο πάντα την ελαχιστοποίηση των φορτίων κλιματισμού του κτηρίου, στο κέλυφος του οποίου εγκαθίστανται, σε συνδυασμό με καλές συνθήκες ως προς την εξασφάλιση φυσικού φωτισμού.

Ένας ιδανικός υαλοπίνακας θα διέθετε μεταβαλλόμενη διαπερατότητα το χειμώνα και το καλοκαίρι στην ορατή και στην υπέρυθη ηλιακή ακτινοβολία, ώστε να επιτυγχάνεται πάντα η μέγιστη δυνατή φωτεινότητα, επιτρέποντας στην υπέρυθη ακτινοβολία να διεισδύσει το χειμώνα και εμποδίζοντάς την το καλοκαίρι, προς ελαχιστοποίηση θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται η σύγχρονη τεχνολογία των έξυπνων παραθύρων. Τα έξυπνα παράθυρα για να λειτουργήσουν χρειάζονται ενέργεια. Είναι εξοπλισμένα με έναν λεπτό αγωγό ιόντων και ένα στρώμα ηλεκτροδίων. Όταν η επιστροφή ιόντων ενεργοποιείται από ηλεκτρικό ρεύμα, τα ιόντα μετατοπίζονται στο στρώμα ηλεκτροδίων, αλλάζοντας την απόχρωση του γυαλιού. Έτσι το καλοκαίρι, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι υψηλές, το έξυπνο παράθυρο αποκτά σκούρο χρώμα, για να μειώσει την ποσότητα του εισερχόμενου φωτός, μειώνοντας ταυτόχρονα το συντελεστή διαπερατότητας και τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα, κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, το έξυπνο παράθυρο γίνεται ανοιχτόχρωμο για να εκμεταλλευτεί τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία. Η τεχνολογία αυτή είναι νέα και αναμένεται να διεισδύσει στην αγορά και στις κατασκευές τα επόμενα χρόνια.

Μια άλλη κατηγορία παραθύρων με παρόμοιες ιδιότητες, αλλά χωρίς χρήση εξωτερικής ενέργειας, είναι τα «θερμοχρωμικά» παράθυρα. Στα παράθυρα αυτά επιτυγχάνεται με χρήση διαφόρων τεχνολογιών (επίστρωση φιλμ, τζελ κλπ) η μεταβολή του χρώματος του τζαμιού ανάλογα με τη θερμοκρασία που αποκτά. Έτσι, όταν, για παράδειγμα, υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται η θερμοκρασία του, τότε το τζάμι σκουραίνει, περιορίζοντας τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τον εσωτερικό χώρο.

Πέρα από την τεχνολογία αυτή, οι έως σήμερα συμβατικές τεχνολογίες υαλοπινάκων αντιμετωπίζουν την απαίτηση για αύξηση της θερμικής αντίστασής τους με επιπλέον υαλοπίνακες (έως τρεις), την επικάλυψη των επιφανειών τους με λεπτά στρώματα υλικών χαμηλού συντελεστή εκπομπής (low-e) ή την αφαίρεση του αέρα του διακένου μεταξύ των υαλοπινάκων, είτε για τη δημιουργία κενού αέρος, είτε για την αντικατάστασή του με κάποιο αέριο με χαμηλότερο συντελεστή θερμικής μετάβασης και αγωγιμότητας, συνήθως αργό ή κρυπτό.

Για την αποτροπή της αύξησης των ψυκτικών φορτίων το καλοκαίρι διατίθενται υαλοπίνακες με υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας. Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, ελαχιστοποιούνται τα ηλιακά κέρδη και το χειμώνα. Υπό περιπτώσεις, τούτο μπορεί να μην είναι σημαντικό ,π.χ. περιοχές με τροπικό κλίμα. Η καλύτερη επιλογή για την αποφυγή υψηλών ηλιακών κερδών το καλοκαίρι, χωρίς να περιορίζονται τα ηλιακά κέρδη το χειμώνα, είναι η σκίαση των παραθύρων με εξωτερικά σκίαστρα.

Στον πίνακα 5.15 παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί συντελεστές σχετικοί με τη διείσδυση ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου διαφανών επιφανειών.

**Πίνακας 5.15:** Συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για διάφορους τύπους υαλοπινάκων.

Τύπος υαλοπίνακα	Θερμική αντίσταση 1/U (m <sup>2</sup> ·K/W)	Συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας ε	Συντελεστής σκίασης SC	Συντελεστής διαπερατότητας τ
Ανακλαστικός διπλός υαλοπίνακας	0,44	0,40	0,20	0,10
Σκούρος διπλός υαλοπίνακας	0,35		0,57	0,47
Απλός διπλός υαλοπίνακας	0,35		0,82	0,80
Διπλός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής (low-e), μπρούτζινο χρώμα	0,53	0,15	0,42	0,41
Διπλός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής (low-e), απλός	0,53		0,66	0,72
Σκούρος διπλός υαλοπίνακας, πράσινο χρώμα	0,35		0,56	0,67
Μονός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής (low-e), πράσινο χρώμα	0,16	0,35	0,53	0,65
Τριπλός υαλοπίνακας, χαμηλής εκπομπής (low-e), πράσινο χρώμα	0,63	0,15	0,47	0,58
Διπλός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής (low-e), πράσινο χρώμα	0,53		0,41	0,61

## Αναφορές

- [1] D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, Volume 28, Issue 4, 1982, Pages 293-302.
- [2] Σαχσαμάνογλου Χ., Μακρογιάννης Τ., Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας. Αθήνα: Εκδόσεις Art of Text, 2004.
- [3] ASHRAE (2009). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [4] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed. New York: Wiley; 2013.