



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Χημικών Μηχανικών  
Τομέας ΙΙ – Ανάλυσης, σχεδιασμού και ανάπτυξης  
διεργασιών και συστημάτων

**Θεωρητική ανάλυση και οπτική προσομοίωση  
συστήματος σκίασης ολικής εσωτερικής ανάκλασης**

Διπλωματική εργασία του **Εμμανουήλ Ζευγώλη**

Επιβλέπων καθηγητής  
**Ανδρέας Μπουντουβής**

Αθήνα, 2020

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ανδρέα Μπουντουβή, για την εμπιστοσύνη του και την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση της, καθώς και για τη βοήθεια του.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νίκο Στεφανάκη, για τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας. Η άρτια συνεργασία μας υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου και τους φίλους μου, για την υλική και ηθική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και της εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς και στους συμφοιτητές μου για το σύνολο της πορείας μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ .....	5
1.1. ΣΥΝΟΨΗ .....	5
1.2. ΟΙ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΗΣ .....	5
1.3. ΓΩΝΙΕΣ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ .....	8
1.4. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....	13
1.5. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	14
1.6. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ .....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ .....	21
2.1. ΣΥΝΟΨΗ .....	21
2.2. Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	21
2.3. ΤΟ ΦΩΣ ΩΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΑ.....	22
2.4. ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ .....	23
2.5. ΟΛΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ .....	26
2.6. ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ .....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ .....	30
3.1. ΣΥΝΟΨΗ .....	30
3.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ .....	30
3.3. ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	32
3.4. ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ .....	33
3.5. ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ .....	37
3.6. ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ .....	38
3.7. ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΚΙΑΣΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ.....	43
4.1. ΣΥΝΟΨΗ .....	43
4.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	43
4.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ .....	44
4.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ (RAYTRACING) .....	47
4.5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ RAYTRACING ΣΤΟ ΣΚΙΑΣΤΡΟ.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	55
5.1. ΣΥΝΟΨΗ .....	55
5.2. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ.....	55
5.3. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ .....	58
5.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ.....	60
5.5. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΔΙΠΛΟΥ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΑΞΟΝΑ Υ.....	61
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	64

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη θεωρητική μελέτη και τη διερεύνηση της λειτουργίας ενός συστήματος σκίασης ολικής εσωτερικής ανάκλασης μέσω οπτικών προσομοιώσεων.

Στο πλαίσιο της κατανόησης και παρουσίασης του επιστημονικού υποβάθρου, αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στα βασικά στοιχεία της ηλιακής μηχανικής και διατυπώνονται οι εξισώσεις υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (Κεφάλαιο 1). Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή στη φύση του φωτός με έμφαση στη γεωμετρική προσέγγιση των σχέσεων που διέπουν τη διάδοση του. Εξετάζεται λοιπόν η διάδοση του φωτός με τους μηχανισμούς της ανάκλασης και της διάθλασης, ενώ παρουσιάζεται το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης καθώς και οι βασικές διατάξεις για τη καθοδήγηση των ηλιακών ακτινών (Κεφάλαιο 2). Ακολούθως, παρουσιάζονται συνοπτικά οι έννοιες της θερμικής και οπτικής άνεσης των κτηρίων καθώς και ο ρόλος της σκίασης στην εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά. Τέλος, παρουσιάζονται τα ευρέως διαδεδομένα συστήματα σκίασης και οι διαμορφώσεις προσαρμογής τους στα κτήρια, αλλά και σχετικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά πρισματικές διατάξεις σκίασης (Κεφάλαιο 3).

Στο πλαίσιο της μεθοδολογικής προσέγγισης μελέτης και ανάλυσης του συστήματος, αρχικά παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του πρισματικού συστήματος σκίασης και ο τρόπος σχεδιασμού του σε λογισμικό CAD (Computer Aided Design). Ακολουθεί αναφορά στην τεχνική ανίχνευσης ακτινών (ray tracing) και στην εφαρμογή της για τη μελέτη και αξιολόγηση του συστήματος σκίασης (Κεφάλαιο 4).

Τέλος, με βάση τη περιγραφείσα μεθοδολογία, εξετάζονται στην πράξη διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής του συστήματος σκίασης με κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης ιχνηλάτησης ακτινών και γίνεται αποτίμηση της λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, γίνεται βηματική μεταβολή της κλίσης του συστήματος κατά τον άξονα Y και X, και στη συνέχεια υπολογίζεται η ακτινοβολία που διέρχεται από το σκίαστρο τόσο ποσοτικά (αριθμός ακτινών) όσο και ενεργειακά. Τέλος, τοποθετείται επάλληλα δεύτερο πανομοιότυπο σκίαστρο, ενώ για την νέα διαμόρφωση πραγματοποιούνται εκ νέου υπολογισμοί κατά την στρέψη του συστήματος κατά τον άξονα Y (Κεφάλαιο 5).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

## 1.1. ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των κινήσεων της γης και τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που δέχεται η γη από τον ήλιο. Το μαθηματικό μοντέλο που διατυπώνεται θα αξιοποιηθεί για τους ενεργειακούς υπολογισμούς του συστήματος σκίασης. Βασικές βιβλιογραφικές πηγές του κεφαλαίου αποτέλεσαν τα βιβλία των Duffie & Beckman [1], των Σαχσαμάνογλου & Μακρογιάννη [2], της ASHRAE [3], καθώς και η εργασία του Erbs & Συνεργατών [4].

## 1.2. ΟΙ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΓΗΣ

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με τις δύο κύριες κινήσεις της γης. Η πρώτη εξ αυτών είναι η ημερήσια περιστροφή της γύρω από τον άξονα της, που διατρέχει τη γη από τον βορρά μέχρι τον νότο. Η κίνηση αυτή διαρκεί περίπου 24 ώρες. Ταυτόχρονα, η γη ακολουθεί μία ετήσια περιστροφή γύρω από τον Ήλιο. Η κίνηση αυτή γίνεται σε ελλειπτική τροχιά με μέση ωριαία ταχύτητα 106.000 km/h και για αυτό διαρκεί περίπου 365 ημέρες. Εντοπίζονται, ωστόσο, ορισμένες λεπτομέρειες σχετικά με τις δύο αυτές κινήσεις. Το πρώτο σημείο άξιο προσοχής όσον αφορά τις κινήσεις της γης, είναι ότι η πραγματική διάρκεια ενός έτους είναι περίπου κατά 6 ώρες μεγαλύτερη από τις 365 ημέρες. Κάθε 4 χρόνια επομένως, η γη καθυστερεί περίπου 24 ώρες για την συμπλήρωση μίας πλήρους περιστροφής γύρω από τον ήλιο, αυτός είναι και ο λόγος που κάθε 4 χρόνια προστίθεται μία επιπλέον ημερολογιακή ημέρα στο έτος.

Άξιο αναφοράς είναι, επίσης, ότι η ημερήσια περιστροφή δεν διαρκεί ακριβώς 24 ώρες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αντίθετα, ανάλογα με την εποχή μέσα στο έτος, η διάρκεια της πλήρους περιστροφής της γης γύρω από τον άξονα της είναι άλλοτε μεγαλύτερη και άλλοτε μικρότερη από τις 24 ώρες. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει διάκριση μεταξύ του πολιτικού και του ηλιακού χρόνου.

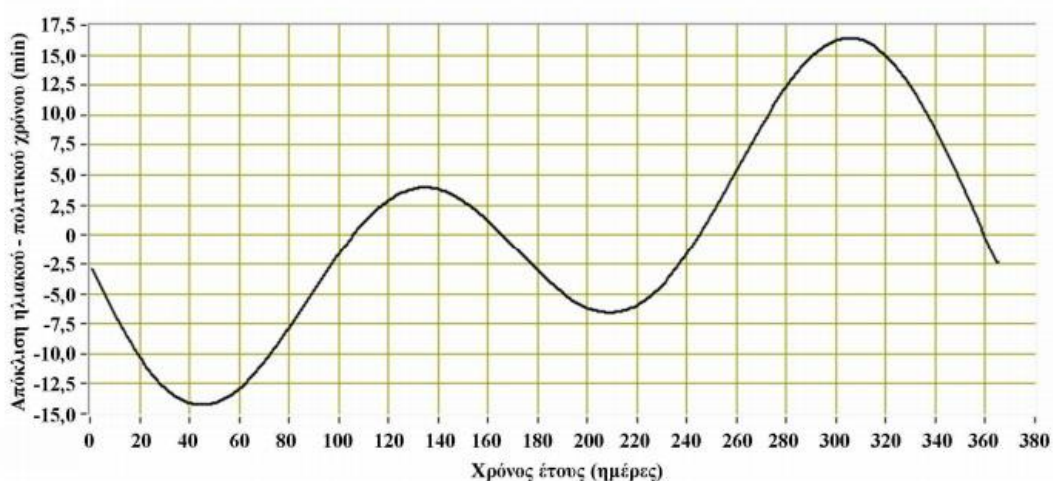
Ο πολιτικός χρόνος είναι αυτός που μετρούν τα ρολόγια μας και δεν είναι σταθερός σε όλες τις περιοχές της γης, καθώς καθορίζεται, για κάθε γεωγραφικό

σημείο, συναρτήσει της θέσης του με τον πρώτο μεσημβρινό στο Greenwich. Δεδομένου ότι η διάρκεια μίας πλήρους περιστροφής της γης ως προς τον άξονα της διαρκεί 24 ώρες, κάθε ώρα η γη περιστρέφεται κατά  $15^\circ$ . Για κάθε  $15^\circ$  γωνία γεωγραφικού μήκους, ξεκινώντας από τον πρώτο μεσημβρινό, ορίζεται ένας επιπλέον μεσημβρινός. Έτσι σχηματίζονται οι ζώνες ώρας. Ο πολιτικός χρόνος θεσπίζεται κοινός για όλα τα γεωγραφικά σημεία που βρίσκονται μεταξύ δύο μεσημβρινών, με εξαίρεση την περίπτωση που ένα κράτος εκτείνεται σε περισσότερες από μία ζώνες ώρας, οπότε και ο πολιτικός χρόνος καθορίζεται ενιαίος για όλο το κράτος, με βάση τη ζώνη ώρας στην οποία βρίσκεται η πρωτεύουσα. Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η αλλαγή, κατά μία ώρα, του πολιτικού χρόνου, που συμβαίνει 2 φορές το έτος και διαχωρίζει το ετήσιο χρονικό διάστημα σε περίοδο χειμερινής και θερινής ώρας, δεν επηρεάζεται από την κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο ή τον άξονα της, αλλά από την ανάγκη προσαρμογής των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις συνθήκες φυσικού φωτισμού που διαμορφώνονται από την κίνηση της γης, ελαχιστοποιώντας τις ανάγκες για φωτισμό, κλιματισμό και γενικότερα κατανάλωση ενέργειας.

Αντίθετα, ο ηλιακός χρόνος περιγράφει την πραγματική θέση ενός γεωγραφικού σημείου στην επιφάνεια της γης ως προς τον ήλιο, λόγω της περιστροφής της γης ως προς τον άξονά της. Κάθε σημείο με διαφορετικό γεωγραφικό μήκος στη γη, έχει διαφορετικό ηλιακό χρόνο. Η ερμηνεία του ηλιακού χρόνου είναι ισοδύναμη με τη σχετική θέση του ήλιου στον ορίζοντα, ως προς ένα δεδομένο γεωγραφικό σημείο. Δύο γεωγραφικά σημεία μπορεί να ανήκουν στην ίδια χώρα και την ίδια ζώνη ώρας, αλλά να απέχουν μεταξύ τους κατά τη διεύθυνση ανατολής-δύσης, δηλαδή να έχουν σημαντική διαφορά στα γεωγραφικά μήκη τους, επομένως να παρουσιάζουν διαφορετικούς ηλιακούς χρόνους. Ο ήλιος διέρχεται από τρεις χαρακτηριστικές θέσεις στον ορίζοντα κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, που ορίζουν τους αντίστοιχους ηλιακούς χρόνους. Αρχικά, κατά τη χρονική στιγμή της πρώτης οπτικής επαφής του ηλίου με ένα γεωγραφικό σημείο, ορίζεται ο ηλιακός χρόνος ανατολής. Κατά τη χρονική στιγμή τελευταίας οπτικής επαφής του ηλίου με ένα γεωγραφικό σημείο, αντίστοιχα, ορίζεται ο ηλιακός χρόνος δύσης. Κατά τη χρονική στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο στον ορίζοντα ορίζεται η ηλιακή μεσημβρία. Η ηλιακή ημέρα

είναι ο χρόνος μεταξύ των μεσημβρινών μεταβάσεων του ηλίου, δηλαδή δύο διαδοχικών ηλιακών μεσημβρινών.

Ο πολιτικός και ο ηλιακός χρόνος τις περισσότερες ημέρες του έτους έχουν διαφορά μερικών λεπτών μεταξύ τους. Η ηλιακή μεσημβρία μπορεί να αποκλίνει από την πολιτική ώρα 12:00 έως και 15 λεπτά. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ότι ο χρόνος μίας πλήρους ηλιακής ημέρας δεν είναι πάντα ίσος με 24 ώρες. Η διαφορά της διάρκειας ηλιακής ημέρας οφείλεται στη σχετική θέση γης και ηλίου και στις επιδράσεις των βαρυτικών πεδίων των δύο ουράνιων σωμάτων, οι οποίες προκαλούν την κίνηση της γης άλλοτε με μεγαλύτερη και άλλοτε με μικρότερη ταχύτητα ως προς τον ήλιο. Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο έχει ελλειπτική μορφή. Ο ήλιος δεν βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο της τροχιάς αυτής. Ως εκ τούτου, άλλοτε η γη βρίσκεται πιο κοντά και άλλοτε πιο μακριά σε σχέση με τον ήλιο. Όταν η γη είναι στο πιο κοντινό σημείο, που ονομάζεται περιήλιο, κινείται γρηγορότερα, δηλαδή με μεγαλύτερη γραμμική ταχύτητα περιστροφής ως προς τον ήλιο. Αντίθετα, όταν είναι στο πιο απόμακρο σημείο της τροχιάς της, ο οποίο ονομάζεται αφήλιο, η γη κινείται πιο αργά. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η απόκλιση μεταξύ ηλιακού και πολιτικού χρόνου κατά τη διάρκεια ενός έτους.



Σχήμα 1.1 Απόκλιση μεταξύ ηλιακού και πολιτικού χρόνου συναρτήσει του αριθμού ημέρας ενός έτους

### 1.3. ΓΩΝΙΕΣ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

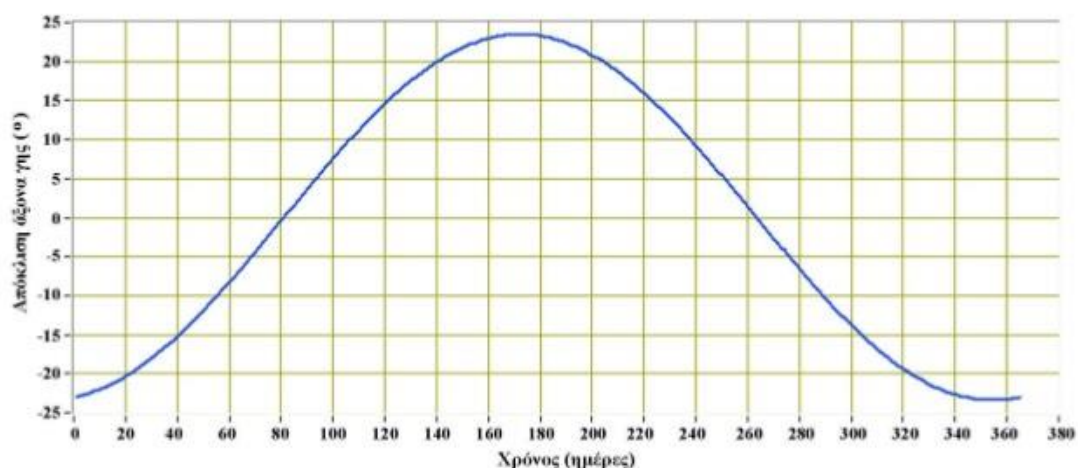
Κατά την εξέταση των κινήσεων της γης, του ηλίου, της μεταξύ τους σχέσης και γενικότερα για τη λεγόμενη ηλιακή μηχανική, είναι πολύ σημαντικός ο υπολογισμός αρκετών γωνιών.

Καταρχάς, η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ένα επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς. Ο άξονας βορρά-νότου αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο αυτό κατά μία γωνία που κυμαίνεται από  $-23,45^\circ$  έως  $+23,45^\circ$  περίπου κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία αυτή ονομάζεται απόκλιση άξονα γης (earth declination) και συμβολίζεται ως  $\delta$ . Η ετήσια διακύμανση της σε μοίρες δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \frac{360 \cdot (n+284)}{365} \quad (1.1)$$

όπου  $n$  ο τρέχων αριθμός ημέρας του έτους.

Για τη γωνία αυτή εντοπίζονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές, ανάλογα με την κίνηση της γης. Συγκεκριμένα, μηδενίζεται 2 φορές το έτος, στις 21 Μαρτίου και τις 22 Σεπτεμβρίου. Στις 21 Δεκεμβρίου παίρνει την ελάχιστη τιμή της, ίση με  $-23,45^\circ$ , ενώ στις 21 Ιουνίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ίση με  $+23,45^\circ$ .



Σχήμα 1.2. Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης

Εξαιτίας της μεταβαλλόμενης απόκλισης του άξονα της γης, οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν στα διάφορα σημεία της επιφάνειας της γης με διαφορετική γωνία, ανάλογα με τη σχετική θέση της ως προς τον ήλιο. Η γωνία μεταξύ του



άξονα βορρά-νότου και των ηλιακών ακτινών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους από μία ελάχιστη τιμή που ισούται με  $90^{\circ}-23,45^{\circ}=66,55^{\circ}$ , έως μία μέγιστη τιμή που ισούται με  $90^{\circ}+23,45^{\circ}=113,45^{\circ}$ .

Η γωνία μεταξύ του άξονα της γης και της διεύθυνσης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στη γη ονομάζεται απόκλιση ηλίου-γης. Η αυξομείωση της γωνίας αυτής μεταβάλλει την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή των εποχών στο βόρειο και στο νότιο ημισφαίριο κατά αντίστροφο τρόπο και τη διακύμανση των χρονικών διαστημάτων ημέρας και νύχτας. Οι ισημερίες είναι κοινές μεταξύ βορείου και νοτίου ημισφαιρίου, ενώ αντίθετα μεταξύ τους είναι τα 2 ηλιοστάσια. Συγκεκριμένα, στις 21 Μαρτίου και στις 22 Σεπτεμβρίου η απόκλιση ηλίου-γης είναι  $90^{\circ}$  και για τα δύο ημισφαίρια. Επίσης, στις 21 Δεκεμβρίου για το βόρειο ημισφαίριο εντοπίζεται η μέγιστη τιμή της απόκλισης ηλίου-γης, ίση με  $113,45^{\circ}$ , οπότε και η ημέρα είναι η μικρότερη του χρόνου, ενώ για το νότιο ημισφαίριο η απόκλιση έχει την ελάχιστη τιμή  $66,55^{\circ}$  και η ημέρα είναι η μεγαλύτερη του χρόνου. Στις 21 Ιουνίου, για το βόρειο ημισφαίριο συναντάται η ελάχιστη τιμή της απόκλισης ηλίου-γης, ίση με  $66,55^{\circ}$ , η ημέρα αυτή επομένως είναι η μεγαλύτερη του χρόνου. Αντίθετα, για το νότιο ημισφαίριο η απόκλιση έχει τη μέγιστη τιμή της  $113,45^{\circ}$ , ως εκ τούτου η ημέρα αυτή είναι η μικρότερη του έτους.

Η σχετική κίνηση του ηλίου ως προς τη γη εκτελείται σε κυκλική τροχιά, καλύπτοντας τόξο  $360^{\circ}$ , ενώ η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της καλύπτοντας το αντίστοιχο τόξο. Η κίνηση αυτή όμως ουσιαστικά γίνεται αντιληπτή μόνο από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου για κάθε γεωγραφικό σημείο, ενώ κατά τις ισημερίες η κίνηση του ηλίου γίνεται αντιληπτή για τόξο  $180^{\circ}$ . Το τόξο της τροχιάς της σχετικής κίνησης του ηλίου ως προς τη γη, για το οποίο ο ήλιος είναι ορατός από ένα εξεταζόμενο σημείο, αντιστοιχεί σε οξεία γωνία όταν η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη από τη διάρκεια της νύχτας, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, αντιστοιχεί σε αμβλεία γωνία.

Η γωνιακή απόσταση της θέσης του ηλίου στον ορίζοντα από την ηλιακή μεσημβρία, μετρούμενη στο επίπεδο της τροχιάς του ηλίου, ονομάζεται ωριαία

γωνία του ηλίου και συμβολίζεται ως  $\omega$ . Στην ηλιακή μεσημβρία ισούται με  $0^\circ$  και παίρνει τιμές από  $0$  έως  $\pm 180^\circ$ , τα μεσάνυχτα. Καλύπτεται επομένως ένα εύρος τιμών  $360^\circ$  σε χρονικό διάστημα 24 ωρών, άρα κάθε ώρα μεταβάλλεται κατά  $15^\circ$ . Τις πρωινές ώρες η ωριαία γωνία είναι αρνητική, ενώ μετά την ηλιακή μεσημβρία είναι θετική. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο ηλιακός χρόνος που αναφέρθηκε προηγουμένως και η ωριαία γωνία του ηλίου συσχετίζονται μεταξύ τους, καθώς και τα δύο ουσιαστικά περιγράφουν τη θέση του ηλίου στον ορίζοντα. Η σχέση που αποτυπώνει τη συσχέτιση αυτή είναι η εξής:

$$\omega = \frac{(t_{sol}-12) \cdot h}{24h} \cdot 360^\circ \leftrightarrow \omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ (1.2)$$

Όπου  $t_{sol}$  ο ηλιακός χρόνος, με χαρακτηριστικό ότι για  $t_{sol}=12h$  η τιμή της ωριαίας γωνίας του ηλίου είναι  $\omega=0^\circ$ , ενώ για πεδίο τιμών από 0-24 ώρες, η τιμή της ωριαίας γωνίας κυμαίνεται από  $0$  έως  $\pm 180^\circ$ .

Για την ακριβή αποτύπωση της θέσης του ηλίου στον ορίζοντα ως προς ένα γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης, χρησιμοποιούνται κάποιες άλλες γωνίες, συγκεκριμένα το ηλιακό ύψος, η συμπληρωματική του γωνία που ονομάζεται γωνία ζενίθ και το αζιμούθιο του ηλίου.

Το ηλιακό ύψος ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εξεταζόμενο γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ηλίου στον ορίζοντα και στην προβολή της ευθείας αυτής στην επιφάνεια της γης, ενώ οι τιμές του κυμαίνονται από  $0$  έως  $90^\circ$ . Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin \beta = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta (1.3)$$

Όπου  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος του εξεταζόμενου σημείου,  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης και  $\omega$  η ωριαία γωνία του ηλίου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για χρονικές στιγμές πριν την ανατολή και μετά τη δύση του ηλίου, το ηλιακό ύψος παίρνει αρνητικές τιμές. Επίσης, οι μέγιστες τιμές της ποσότητας αυτής είναι πιο υψηλές κατά τους θερινούς μήνες.

Η γωνία ζενίθ ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εξεταζόμενο γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ηλίου στον ορίζοντα και την κατακόρυφη ως προς την επιφάνεια της γης στο συγκεκριμένο σημείο.

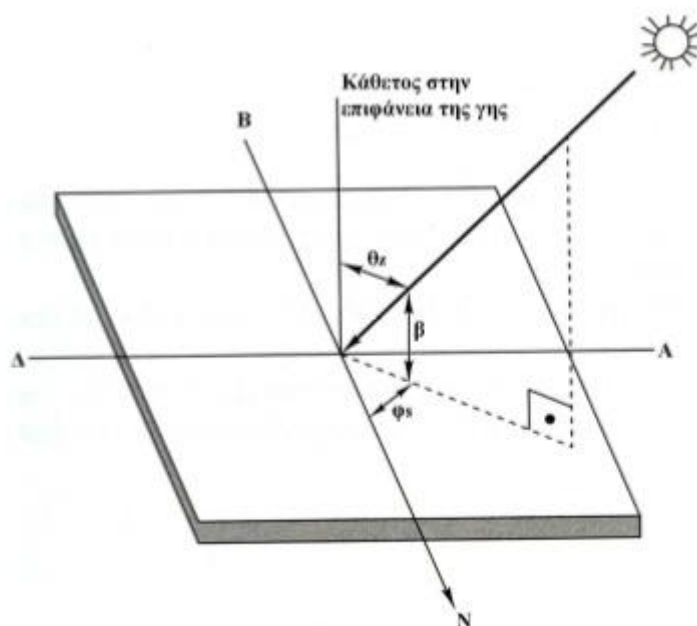
Παίρνει τιμές από 0 έως 90° και ως συμπληρωματική γωνία του ηλιακού ύψους προκύπτει ότι:

$$\beta + \theta_z = 90^\circ \quad (1.4)$$

Το αζιμούθιο του ηλίου  $\varphi_s$  ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ της προβολής της ευθείας που ενώνει το εξεταζόμενο σημείο με τη θέση του ηλίου, και τη διεύθυνση βορρά-νότου. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin \varphi_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \beta} \quad (1.5)$$

Όπου  $\delta$  η απόκλιση του άξονα της γης,  $\omega$  η ωριαία γωνία του ηλίου μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και  $\beta$  το ηλιακό ύψος. Για το αζιμούθιο του ηλίου σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ότι για νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν, ότι για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές και αντίστοιχα ότι για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές. Σε αντίθεση με το ηλιακό ύψος, το πεδίο τιμών του αζιμούθιου δεν αλλάζει μέσα στο έτος, καθώς η προβολή της εκλειπτικής τροχιάς του ηλίου στην επιφάνεια της γης καλύπτει έναν πλήρη κύκλο ανεξάρτητα από την εποχή, καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ωστόσο, ο ρυθμός μεταβολής του είναι μεγαλύτερος το καλοκαίρι από ότι τον χειμώνα, γιατί η κίνηση του ηλίου στον ορίζοντα το καλοκαίρι είναι πιο γρήγορη.



Σχήμα 1.3. Το ηλιακό ύψος, η γωνία ζενίθ και το αζιμούθιο του ηλίου

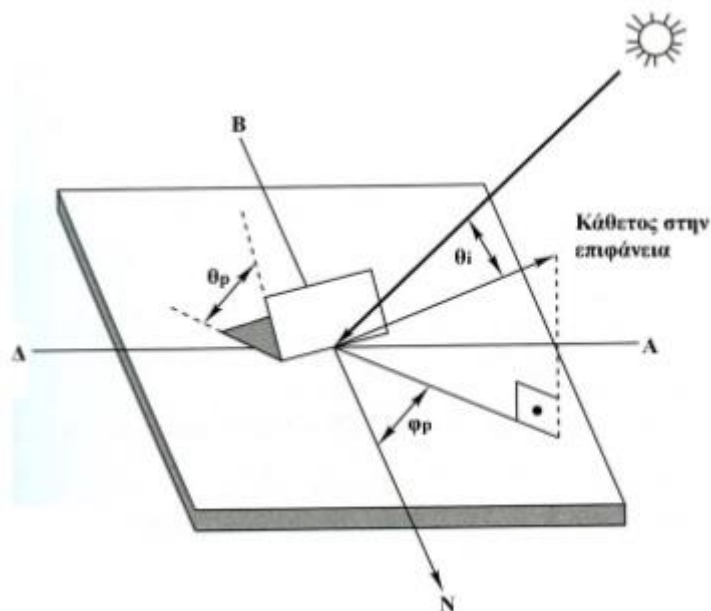
Με τη χρήση των παραπάνω γωνιών, διευκολύνεται ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια. Εάν συμβολιστεί ως  $\theta_p$  η κλίση ενός γεωγραφικού σημείου ως προς το οριζόντιο επίπεδο και ως  $\varphi_p$  το αζιμούθιο της επιφάνειας, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της κάθετης στην επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο, και της διεύθυνσης βορρά-νότου, τότε η σχέση που μας δίνει τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i$  είναι η εξής:

$$\cos \theta_i = \cos \beta \cdot \sin \theta_p \cdot \cos \gamma + \sin \beta \cdot \cos \theta_p \quad (1.6)$$

Όπου η  $\beta$  το ηλιακό ύψος και  $\gamma$  η γωνία που ισούται με τη διαφορά του αζιμούθιου του ηλίου μείον το αζιμούθιο της επιφάνειας, δηλαδή:

$$\gamma = \varphi_s - \varphi_p \quad (1.7)$$

Για το αζιμούθιο της επιφάνειας ισχύει ότι με νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν, με προσανατολισμό δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές, ενώ αντίθετα με προσανατολισμό ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.



Σχήμα 1.4. Γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια

#### **1.4. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ**

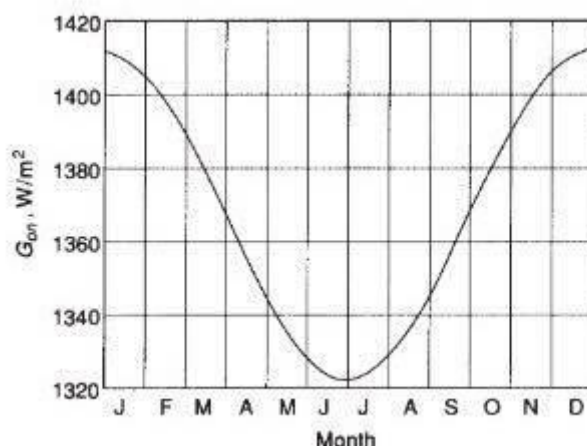
Η ιδιομορφία της τροχιάς της γης είναι τέτοια, που η απόσταση μεταξύ του ηλίου και της γης αυξομειώνεται κατά 1,7% κατά τις διάφορες θέσεις της γης. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο και η σχετική θέση του ηλίου σε σχέση με τη γη, έχουν ως αποτέλεσμα να εντοπίζεται ηλιακή ακτινοβολία συγκεκριμένης έντασης έξω από την ατμόσφαιρα της γης.

Η ηλιακή σταθερά,  $G_{sc}$ , είναι η συνολική ενέργεια της ακτινοβολίας του ηλίου ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, σε μια θεωρητική κάθετη επιφάνεια στις ακτίνες του ηλίου, στη μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Πρόκειται πράγματι για μία σταθερή ποσότητα, καθώς αυξάνεται μόλις κατά 0,2% σε κάθε 11ετή ηλιακό κύκλο. Οι ηλιακές κηλίδες εμποδίζουν το φως και περιορίζουν την ακτινοβολία κατά μερικά δέκατα του συνολικού ποσοστού, ενώ αντίθετα οι φωτεινές περιοχές που συνεισφέρουν στην ακτινοβολία είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος, αλλά και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, επομένως η φωτεινότητα τους κατά κάποιον τρόπο εξισώνεται με την παρεμπόδιση του φωτός από τις κηλίδες. Επίσης, καθώς συνεχίζεται η καύση του υδρογόνου στον ήλιο, η τιμή της ηλιακής σταθεράς αυξάνεται κατά περίπου 10% κάθε δισεκατομμύρια χρόνια.

Το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας έχει υιοθετήσει την τιμή των 1367 W ανά τετραγωνικό μέτρο, με αβεβαιότητα της τάξεως του 1% και είναι και η τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Υπάρχουν δύο πηγές μεταβολών στην ποσότητα της ακτινοβολίας που καταφτάνει στη γη. Η πρώτη είναι η μεταβολή στην ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος. Έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες που εντοπίζουν περιοδικές μεταβολές στην εσωτερική ηλιακή ακτινοβολία, συγκεκριμένα μεταβολές μικρότερες του  $\pm 1,5\%$  που οφείλονται στις ηλιακές κηλίδες. Ο Wilson και οι συνεργάτες του, το 1981, ανέφεραν μεταβολές της τάξεως του 0,2%, σχετιζόμενες με τη δραστηριότητα των κηλίδων. Οι μετρήσεις από τους δορυφόρους Nimbus και Mariner κατά την περίοδο αρκετών μηνών έδειξαν πράγματι μεταβολές  $\pm 0,2\%$ , κατά το διάστημα που η δραστηριότητα των κηλίδων ήταν πολύ χαμηλή. Η μεταβολή της απόστασης μεταξύ γης και του

ηλίου έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά  $\pm 3,3\%$ , σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.5. Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τους μήνες του έτους

Η ακτινοβολία την κάθε ημέρα του χρόνου δίνεται από τον τύπο του Iqbal:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot (1,000110 + 0,034221 \cdot \cos B + 0,001280 \cdot \sin B + 0,000719 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sin 2B) \quad (1.8)$$

όπου  $G_{sc}$  είναι η ηλιακή σταθερά και  $B$  μία ποσότητα που υπολογίζεται ως

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (1.9)$$

όπου  $n$  η ημέρα του χρόνου σε αριθμό.

## 1.5. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Εκτός από την προαναφερθείσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχει και ένα άλλο μέγεθος σχετικό με αυτήν. Η ενεργειακή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας, δίνει τη συνολική ενέργεια λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, που προσβάλει τη μονάδα της επιφάνειας, σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να φτάσει σε μία επιφάνεια με τρεις συνιστώσες, την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη.

Η άμεση (direct) ηλιακή ακτινοβολία φτάνει απευθείας από τον ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να έχει υποστεί αλλαγή κατεύθυνσης, σκέδαση δηλαδή, κατά τη διαδρομή της στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση

μεταξύ της γης και του ηλίου, καθώς και από το ηλιακό ύψος τη ζητούμενη χρονική στιγμή. Ακόμη, εξαρτάται από την απόκλιση του άξονα της γης, το γεωγραφικό πλάτος, το απόλυτο υψόμετρο της θέσης μελέτης, την κλίση της εξεταζόμενης επιφάνειας, αλλά και την πιθανή διάχυση ή απορρόφηση που έχει υποστεί στην ατμόσφαιρα. Για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται το σύμβολο  $I_{dir}$ .

Η διάχυτη (diffuse) ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Αυτό το είδος ακτινοβολίας εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο της εξεταζόμενης θέσης, τα νέφη που εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα και το είδος τους, αλλά και από την ύπαρξη κέντρων σκεδάσεως, όπως αερολύματα, στην ατμόσφαιρα. Για να συμβολιστεί η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται το σύμβολο  $I_{dif}$ .

Η ανακλώμενη (reflected) ηλιακή ακτινοβολία, το τρίτο είδος δηλαδή, είναι αυτή που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανακλώμενο από το έδαφος και τις περιβάλλουσες σε αυτή επιφάνειες. Εξαρτάται από το είδος των επιφανειών που περιβάλλουν την εξεταζόμενη θέση, κυρίως μάλιστα από την λευκαύγειά τους και το υλικό τους. Λευκαύγεια ενός αντικειμένου ή μιας επιφάνειας είναι ο λόγος της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας προς την προσπίπτουσα. Είναι αδιάστατο μέγεθος, με τιμές από 0 έως 1 και είναι ενδεικτική της διάχυτης ανακλαστικότητας του αντικειμένου ή της επιφάνειας. Εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη διεύθυνση πρόσπτωσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν το συντελεστή ανακλαστικότητας. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία συμβολίζεται ως  $I_{ref}$ .

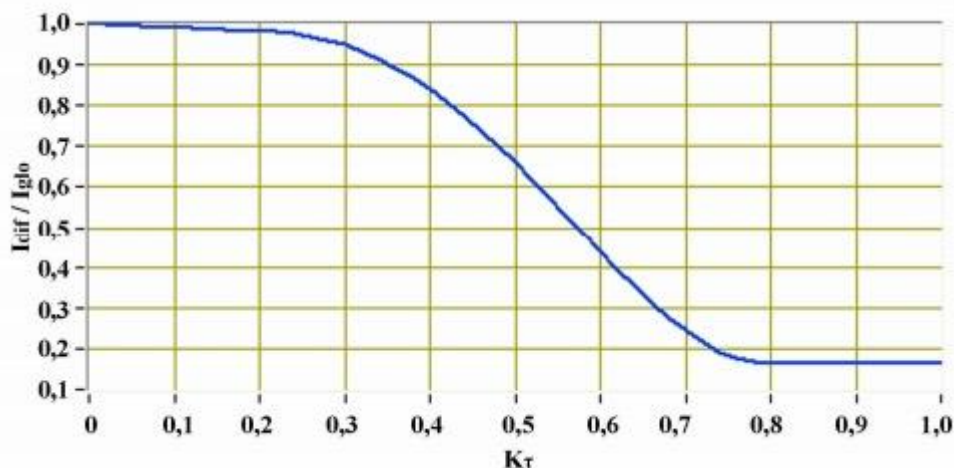
Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας, ονομάζεται ολική ηλιακή ακτινοβολία και συμβολίζεται  $I_{glo}$ . Η ολική ηλιακή ακτινοβολία βοηθά στην εκτίμηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μία εξεταζόμενη επιφάνεια. Ο υπολογισμός της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 1 - 0,09 \cdot K_{\tau} , \text{ για } 0 \leq K_{\tau} \leq 0,22 \\ \frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 0,9511 - 0,1604 \cdot K_{\tau} + 4,388 \cdot K_{\tau}^2 \\ -16,638 \cdot K_{\tau}^3 + 12,336 \cdot K_{\tau}^4 , \text{ για } 0,22 \leq K_{\tau} \leq 0,8 \\ \frac{I_{dif}}{I_{glo}} = 0,165 , \text{ για } K_{\tau} > 0,8 \end{array} \right. \quad (1.10)$$

Η παράμετρος  $K_{\tau}$  ονομάζεται δείκτης ωριαίας καθαρότητας και ισούται με:

$$K_{\tau} = \frac{I_{glo}}{G_{SC} \cdot \cos \theta_z} \quad (1.11)$$

Όπου  $I_{glo}$  η ολική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους,  $G_{SC}$  η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα και  $\theta_z$  η γωνία ζενίθ του ηλίου.



Σχήμα 1.6. Μεταβολή του λόγου  $I_{dif}/I_{glo}$  συναρτήσει της παραμέτρου  $K_{\tau}$

Σε ημέρες με πυκνές νεφώσεις και υψηλές τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας αντιστοιχούν χαμηλές τιμές της  $K_{\tau}$ . Όσο αυξάνεται η παράμετρος αυτή, τόσο μειώνεται η τιμή του λόγου της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική, όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, μέχρι την ελάχιστη τιμή 0,165.

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στον κλιματισμό ενός χώρου δεν εξαρτάται μόνο από την έντασή της, αλλά και από τη φασματική κατανομή της, η οποία εξαρτάται κυρίως από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες στην εξεταζόμενη περιοχή. Περίπου η μισή ποσότητα της ηλιακής ενέργειας μεταφέρεται μέσω της ορατής ακτινοβολίας, με μήκος κύματος από 0,4 έως 0,7



μm. Το μεγαλύτερο ποσοστό της υπόλοιπης ηλιακής ενέργειας μεταφέρεται στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, με μήκος κύματος έως και τα 2 μm.

## 1.6. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Από τον υπολογισμό όλων των παραπάνω μεγεθών προκύπτει η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Η συνολική ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια υπό τυχαία κλίση  $\theta_p$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο αποτελεί το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό του κάθε επιμέρους είδους ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται ορισμένοι συντελεστές.

Η άμεση ακτινοβολία που δέχεται η επιφάνεια υπό κλίση υπολογίζεται ως το γινόμενο της άμεσης ακτινοβολίας  $I_{dir}$  επί το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης σε αυτήν. Η διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια υπολογίζεται ως το γινόμενο της διαθέσιμης διάχυτης ακτινοβολίας,  $I_{dif}$  επί τον συντελεστή  $F_{sky} = \frac{1+\cos\theta_p}{2}$  (1.12), θεωρώντας την κατανομή της ομοιόμορφη. Η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία υπολογίζεται ως το γινόμενο της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο,  $I_{glo,hor}$  επί τον συντελεστή ανακλαστικότητας του εδάφους  $\rho_g$  και επί τον συντελεστή  $F_{grd} = \frac{1-\cos\theta_p}{2}$  (1.13), θεωρώντας και αυτή την κατανομή ομοιόμορφη. Η συνολική ακτινοβολία, επομένως υπολογίζεται ως:

$$I_{glo,p} = I_{dir} \cdot \cos\theta_i + I_{dif} \cdot F_{sky} + I_{glo,hor} \cdot \rho_g \cdot F_{grd} \quad (1.14)$$

όπου η διαθέσιμη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση:

$$I_{glo,hor} = I_{dir} \cdot \cos\theta_z + I_{dif} \quad (1.15)$$

όπου  $\theta_z$  η γωνία ζενίθ του ηλίου. Εάν η επιφάνεια που εξετάζεται είναι κάθετη, επειδή  $\theta_p=90^\circ$ , η συνολική ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει από τη νέα σχέση:

$$I_{glo,p} = I_{dir} \cdot \cos\theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{I_{glo,hor} \cdot \rho_g}{2} \quad (1.16)$$

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους  $\rho_g$  εξαρτάται από το υλικό, αλλά και το χρώμα του εδάφους. Ανοιχτόχρωμες επιφάνειες εμφανίζουν υψηλότερο συντελεστή ανακλαστικότητας σε σχέση με

τις σκουρόχρωμες. Πολλές φορές γύρω από ένα εξεταζόμενο σημείο εντοπίζονται διαφορετικές επιφάνειες, άρα και διαφορετικοί συντελεστές ανακλαστικότητας, ανάλογα και με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για αυτό συνήθως ο συντελεστής ανακλαστικότητας  $\rho_g$  λαμβάνεται ίσος με 0,20 για μία μίξη επιφανειών γύρω από το εξεταζόμενο σημείο. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, σχετικών με τους παραπάνω συντελεστές και σχέσεις, μειώνεται όσο αυξάνεται η σκίαση της εξεταζόμενης επιφάνειας.

Για να αξιοποιηθούν οι παραπάνω σχέσεις πρέπει να είναι γνωστή η ολική διαθέσιμη ακτινοβολία  $I_{glo}$  στο εξεταζόμενο σημείο. Αυτό γίνεται, είτε με τη λήψη πραγματικών δεδομένων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς, είτε με χρήση εμπειρικών μεθόδων και σχέσεων. Υπάρχουν δύο αρκετά χρήσιμες μέθοδοι για την εξαγωγή συμπερασμάτων, σχετικών με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, η μέθοδος Σαχσαμάνογλου-Μακρογιάννη και η μέθοδος ASHRAE.

Η μέθοδος Σαχσαμάνογλου-Μακρογιάννη στηρίζεται στην κατανομή της ολικής μηνιαίας ενεργειακής πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες ημέρες του μήνα, χρησιμοποιώντας ως παράμετρο το μέσο ηλιακό ύψος,  $\beta$ , ανά ημέρα. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του εδάφους, λοιπόν, υπολογίζεται ως:

$$I_{glo} = A \cdot \sin \beta + B \quad (1.17)$$

όπου οι παράμετροι A και B λαμβάνονται σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, για συνθήκες υψηλής, μέσης και χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, υπολογίζονται την 21<sup>η</sup> ημέρα κάθε μήνα και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1. Συντελεστές μεθόδου Σαχσαμάνογλου-Μακρογιάννη

<b><u>Μήνας</u></b>	<b><u>A<sub>low</sub></u></b>	<b><u>B<sub>low</sub></u></b>	<b><u>A<sub>mean</sub></u></b>	<b><u>B<sub>mean</sub></u></b>	<b><u>A<sub>high</sub></u></b>	<b><u>B<sub>high</sub></u></b>
<b><u>Ιανουάριος</u></b>	995	-48	1102	-47	1156	-12
<b><u>Φεβρουάριος</u></b>	913	-37	1061	-43	1177	-15
<b><u>Μάρτιος</u></b>	880	-41	1050	-39	1184	-11
<b><u>Απρίλιος</u></b>	872	-41	1045	-37	1158	-10
<b><u>Μάιος</u></b>	875	-43	1051	-35	1170	-15

<b><u>Ιούνιος</u></b>	878	-42	1056	-34	1171	-13
<b><u>Ιούλιος</u></b>	878	-42	1062	-36	1144	-12
<b><u>Αύγουστος</u></b>	871	-38	1064	-35	1180	-15
<b><u>Σεπτέμβριος</u></b>	906	-45	1083	-42	1194	-19
<b><u>Οκτώβριος</u></b>	983	-44	1106	-40	1256	-14
<b><u>Νοέμβριος</u></b>	932	-47	1163	-42	1244	-15
<b><u>Δεκέμβριος</u></b>	886	-50	1094	-46	1253	-16

Η εναλλακτική μέθοδος, από την ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers), επίσης βασίζεται στη χρήση ορισμένων συντελεστών και του μέσου ηλιακού ύψους,  $\beta$ . Η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{dir} = A \cdot e^{-\frac{B}{\sin \beta}} \quad (1.18)$$

όπου ως συντελεστής  $A$  θεωρείται η φαινόμενη ηλιακή σταθερά και ως συντελεστής  $B$  ο συντελεστής απουσίας ατμόσφαιρας. Οι ποσότητες αυτές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας της σκόνης και των υδρατμών στην ατμόσφαιρα ανά τους μήνες, αλλά και εξαιτίας της αυξομείωσης της απόστασης μεταξύ ήλιου και γης. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι σε συνθήκες πολύ διαυγούς ατμόσφαιρας, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να πάρει τιμές ακόμα και 15% υψηλότερες από τις τιμές που έχουν προκύψει με χρήση των συντελεστών  $A$  και  $B$ .

Η διάχυτη ακτινοβολία στη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογίζεται ως:

$$\begin{cases} I_{dif} = C \cdot Y \cdot I_{dir} & \text{για κάθετες επιφάνειες} \\ I_{dif} = C \cdot I_{dir} \cdot \frac{1 + \cos \theta_p}{2} & \text{για επιφάνειες με διαφορετική κλίση} \end{cases} \quad (1.19)$$

Η παράμετρος  $Y$  προκύπτει από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} Y = 0,55 + 0,437 \cdot \cos \theta_i + 0,313 \cdot \cos^2 \theta_i & \text{για } \cos \theta_i > -0,2 \\ Y = 0,45 & \text{για } \cos \theta_i \leq -0,2 \end{cases} \quad (1.20)$$

Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{ref} = I_{dir} \cdot (C + \sin \beta) \cdot \rho_g \cdot \frac{1 - \cos \theta_p}{2} \quad (1.21)$$

όπου  $\rho_g$  ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους. Οι συντελεστές A, B και C δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.2. Συντελεστές μεθόδου ASHRAE

<b><u>Μήνας</u></b>	<b><u>A</u></b>	<b><u>B</u></b>	<b><u>C</u></b>
<b><u>Ιανουάριος</u></b>	1202	0,141	0,103
<b><u>Φεβρουάριος</u></b>	1187	0,142	0,104
<b><u>Μάρτιος</u></b>	1164	0,149	0,109
<b><u>Απρίλιος</u></b>	1130	0,164	0,120
<b><u>Μάιος</u></b>	1106	0,177	0,130
<b><u>Ιούνιος</u></b>	1092	0,185	0,137
<b><u>Ιούλιος</u></b>	1093	0,186	0,138
<b><u>Αύγουστος</u></b>	1107	0,182	0,134
<b><u>Σεπτέμβριος</u></b>	1136	0,165	0,121
<b><u>Οκτώβριος</u></b>	1166	0,152	0,111
<b><u>Νοέμβριος</u></b>	1190	0,144	0,106
<b><u>Δεκέμβριος</u></b>	1204	0,141	0,103

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΩΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## 2.1. ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή στη φύση του φωτός με έμφαση στη γεωμετρική προσέγγιση των σχέσεων που διέπουν τη διάδοση του. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η διάδοση του φωτός με τους μηχανισμούς της ανάκλασης και της διάθλασης, παρουσιάζεται το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης καθώς και οι βασικές διατάξεις για τη καθοδήγηση των ηλιακών ακτινών. Βασικές βιβλιογραφικές πηγές του κεφαλαίου αποτέλεσαν τα βιβλία των Young & Freedman [5] και του Hecht [6].

## 2.2. Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ως φως αποκαλούμε το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που προκαλούν οπτικές αισθήσεις στον αμφιβληστροειδή του ματιού και των οποίων το μήκος κύματος περιλαμβάνεται μεταξύ περίπου 0,4 και 0,7 μικρομέτρων. Το λευκό φως διαχωρίζεται στις μονοχρωματικές συνιστώσες του και καθεμία από αυτές αντιπροσωπεύει μία ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος, που προκαλεί στον άνθρωπο την αίσθηση ενός συγκεκριμένου χρώματος. Το πρόβλημα της φύσης του φωτός απασχόλησε από τους αρχαίους χρόνους τους ερευνητές και βρήκε τη λύση του περίπου στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Κατά το πρώτο μισό του 17<sup>ου</sup> αιώνα, ο Ολλανδός φυσικός Σνέλιους και ο Γάλλος φιλόσοφος και μαθηματικός Ρενέ Ντακάρ (Καρτέσιος) προσδιόρισαν για πρώτη φορά με ακρίβεια τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης. Τον ίδιο αιώνα, ο Γάλλος Μαθηματικός Πιερ ντε Φερμά διατύπωσε το αξίωμα, σύμφωνα με το οποίο η πορεία μιας φωτεινής ακτίνας μεταξύ δύο ορισμένων σημείων είναι η συντομότερη χρονικά διαδρομή. Ο Νεύτων ανακάλυψε, μεταξύ άλλων, τα φαινόμενα της συμβολής των φωτεινών ακτινών, που παρατηρούνται με τη χρήση λεπτών ελασμάτων. Οι τελευταίες αυτές ανακαλύψεις δεν ήταν ωστόσο δυνατόν να ερμηνευτούν σύμφωνα με τη θεωρία που δέχεται το φως ως ροή σωματιδίων. Την ίδια χρονική περίοδο, ο Ολλανδός φυσικός Κρίστιαν Χόιχενς

διατύπωσε μια εντελώς καινοφανή θεωρία, με την οποία ήταν δυνατόν να ερμηνευτούν τα έως τότε γνωστά φαινόμενα με πολύ απλούστερο τρόπο. Ο Χόιχενς υπέθεσε ότι κάθε σημείο του μετώπου του κύματος παίζει τον ρόλο πηγής δευτερευόντων κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Έως τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα δεν έγιναν σημαντικές πρόοδοι στον τομέα της οπτικής, ώσπου ο Γάλλος Ογκιστέν Φρενέλ τελειοποίησε τη θεωρία του Χόιχενς και την εφάρμοσε με επιτυχία στα φαινόμενα της περίθλασης και της συμβολής. Ένας αποφασιστικός σταθμός στην ανάπτυξη της κυματικής θεωρίας του φωτός, και της βαθύτερης φυσικής σημασίας του, συνδέεται με τον Βρετανό φυσικομαθηματικό Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ. Το 1865 ο Μάξγουελ απέδειξε ότι μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μεταδίδεται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός. Η αξία της σύλληψης του Μάξγουελ συνίσταται στο ότι υπέθεσε θεωρητικά την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα κλασικά πειράματα του Χάινριχ Ρούντολφ Χερτς, που απέδειξαν με αναμφισβήτητο τρόπο την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαφορετικών από εκείνα του φωτός, επέτρεψαν τη διαπίστωση ότι η ταχύτητα μετάδοσης τους συμπίπτει με την ταχύτητα του φωτός και επιβεβαίωσαν την ερμηνεία του Μάξγουελ για τη φύση του φωτός.

### **2.3. ΤΟ ΦΩΣ ΩΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΚΤΙΝΑ**

Τα φαινόμενα στα οποία εμπλέκεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεσαίων συχνοτήτων, κοντά στο ορατό μέρος του φάσματος, δεν εμφανίζουν συνήθως ούτε την κυματική ούτε τη σωματιδιακή φύση του φωτός. Για τα φαινόμενα αυτά, τα οποία είναι η ανάκλαση και η διάθλαση, το φως θεωρείται ως μία γεωμετρική ακτίνα που διαδίδεται ευθύγραμμα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η φύση του φωτός και η συμπεριφορά των φωτονίων. Ο κλάδος αυτός της φυσικής, που ασχολείται με το φως ως γεωμετρική ακτίνα, ονομάζεται γεωμετρική οπτική.

Η οπτική ακτίνα στην περίπτωση αυτή, ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στα οποία βρίσκεται διαδοχικά το φως στην πορεία του, μια νοητή τροχιά κατά μήκος της οποίας μεταβιβάζεται η ενέργεια του φωτός. Στη γεωμετρική οπτική θεωρείται ότι το φως ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία σε ένα

οπτικά ομογενές μέσο. Η πορεία θεωρείται ότι παραμένει ευθύγραμμη ακόμη και εάν παρεμβάλλονται στη φωτεινή ακτίνα εμπόδια με διαστάσεις μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του φωτός. Με εξαίρεση μία μικρή απόσταση μετά το εμπόδιο, όπου εμφανίζονται κυματικά φαινόμενα συμβολής του φωτός, στη συνέχεια θεωρείται ότι και πάλι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα.

Κατά τη διάδοση του το φως κρατά πάντα σταθερή τη συχνότητά του. Ως εκ τούτου, το μήκος κύματος είναι αυτό που αλλάζει κάθε φορά, κατά τη μετάβαση του φωτός από ένα οπτικό μέσο, σε ένα άλλο με διαφορετική ταχύτητα, ώστε να ικανοποιείται η βασική κυματική εξίσωση:

$$u = \lambda \cdot \nu \quad (2.1)$$

όπου  $u$  η ταχύτητα του φωτός στο μέσο,  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $\nu$  η συχνότητα.

Τόσο το υλικό μέσο, όσο και το μήκος κύματος του φωτός σε αυτό, επηρεάζουν τον δείκτη διάθλασης. Ακόμα και για το ίδιο μέσο, επομένως, παρατηρείται ότι κάθε συχνότητα του φωτός διαθλάται διαφορετικά. Ο Pierre de Fermat διατύπωσε τη βασική αρχή για την πορεία του φωτός ως γεωμετρική ακτίνα, τονίζοντας ότι «από όλες τις δυνατές διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει το φως για να φτάσει από ένα σημείο σε ένα άλλο, ακολουθεί εκείνη τη διαδρομή που απαιτεί τον ελάχιστο δυνατό χρόνο». Η θεωρία του αυτή είναι γνωστή ως αρχή του ελάχιστου οπτικού δρόμου. Από την αρχή αυτή εξάγεται το συμπέρασμα ότι όταν το φως διαδίδεται σε ένα οπτικά ομογενές μέσο, οι διαδρομές διάδοσης είναι ευθύγραμμες.

## **2.4. ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ**

Όταν ένα φωτεινό κύμα προσκρούει σε μία ομαλή επιφάνεια που διαχωρίζει δύο διαφανή υλικά, εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται, διαδίδεται δηλαδή, στο δεύτερο υλικό. Εάν η διαχωριστική επιφάνεια δεν είναι ομαλή, τόσο το μεταδιδόμενο, όσο και το ανακλώμενο φως σκεδάζονται προς διάφορες κατευθύνσεις και δεν υπάρχει μόνο μία γωνία διάθλασης ή ανάκλασης. Η ανάκλαση υπό συγκεκριμένη γωνία από μία εντελώς λεία επιφάνεια ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση, ενώ η ανάκλαση λόγω σκέδασης από μία ανώμαλη επιφάνεια ορίζεται ως διάχυτη ανάκλαση. Και οι δύο τύποι ανάκλασης μπορούν

να εντοπιστούν και σε διαφανή και σε αδιαφανή υλικά, τα οποία είναι τα υλικά που δεν μεταδίδουν το φως. Τα περισσότερα αντικείμενα είναι ορατά, επειδή ανακλούν το φως με διάχυτο τρόπο από την επιφάνειά τους.

Στη γεωμετρική οπτική κάθε υλικό μέσο χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα του φωτός σε αυτό, καθώς και από τον δείκτη διάθλασης, συντελεστής ο οποίος δίνει τη σχέση της ταχύτητας του φωτός στο υλικό μέσο ως προς την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

$$n = \frac{\text{ταχύτητα φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα φωτός στο υλικό μέσο}} = \frac{c}{u} \quad (2.2)$$

Η ταχύτητα του φωτός σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητα του στο κενό, επομένως ο δείκτης διάθλασης είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας. Όταν το μέσο που εξετάζεται είναι το κενό, ισχύει ότι  $n=1$ . Ο δείκτης διάθλασης είναι ένας καθαρός αριθμός χωρίς μονάδες, καθώς πρόκειται για τον λόγο των μέτρων δύο ταχυτήτων.

Πίνακας 2.1. Δείκτης διάθλασης διαφόρων υλικών.

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1,0003
Νερό	1,33
Γλυκερίνη	1,47
Λάδι	1,515
Γυαλί	1,52
Διαμάντι	2,42
Μόλυβδος	3,91

Πηγή: <http://light.physics.auth.gr/enc/refraction.html>

Οι μελέτες για τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης έχουν οδηγήσει σε ορισμένα συμπεράσματα:

Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα, καθώς και η κάθετος προς την επιφάνεια, κείνται όλες στο ίδιο επίπεδο. Το επίπεδο των ακτινών αυτών είναι κάθετο προς το επίπεδο της επιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών.



Η γωνία ανάκλασης  $\theta_r$  είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$ , για οποιοδήποτε μήκος κύματος και για οποιαδήποτε υλικά. Η ισότητα αυτή, συνδυαζόμενη με το ότι η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετος προς την επιφάνεια κείνται στο ίδιο επίπεδο, δίνει το νόμο της ανάκλασης.

Για μονοχρωματικό φως και για ένα δεδομένο ζεύγος υλικών  $\alpha$  και  $\beta$ , ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών  $\theta_a$  και  $\theta_b$ , όταν οι γωνίες μετρούνται από την κάθετο προς την επιφάνεια, ισούται με το αντίστροφο του λόγου των δύο δεικτών διάθλασης, δηλαδή:

$$\frac{\sin a}{\sin b} = \frac{n_\alpha}{n_\beta} \quad (2.3)$$

Η ανωτέρω ισότητα, συνδυαζόμενη με το ότι η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα και η κάθετος προς την επιφάνεια κείνται στο ίδιο επίπεδο, δίνει το νόμο της διάθλασης, ή αλλιώς νόμο του Snell.

Όταν μία ακτίνα διέρχεται από ένα υλικό  $\alpha$  σε ένα άλλο υλικό  $\beta$ , με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, η γωνία που σχηματίζει με την κάθετο στο δεύτερο υλικό είναι μικρότερη από τη γωνία που σχηματίζεται με την κάθετο στο πρώτο υλικό. Οπτικά, επομένως, η ακτίνα κάμπτεται και πλησιάζει προς την κάθετο. Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει όταν το δεύτερο υλικό έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης, με την ακτίνα να σχηματίζει σε αυτό μεγαλύτερη γωνία με την κάθετο, από ότι στο πρώτο υλικό. Άρα η ακτίνα φαίνεται να απομακρύνεται από την κάθετο.

Μία ειδική περίπτωση είναι όταν η διάθλαση εντοπίζεται σε διεπιφάνεια μεταξύ του κενού, με δείκτη διάθλασης ίσο με τη μονάδα, και ενός υλικού. Όταν η ακτίνα διέρχεται από το κενό στο υλικό, η ακτίνα πάντα κάμπτεται προς την κάθετο, ενώ αντίθετα, όταν η ακτίνα διέρχεται από το υλικό στο κενό, η ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο. Μία άλλη ειδική περίπτωση είναι η κάθετη πρόσπτωση, κατά την οποία, ανεξάρτητα από τα υλικά που βρίσκονται εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, η ακτίνα δεν κάμπτεται καθόλου. Από τη στιγμή που η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετη στην επιφάνεια, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ακτίνας και της κάθετης είναι 0, άρα και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετη προς την διεπιφάνεια.

Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης ισχύουν, ανεξάρτητα από ποια πλευρά της διεπιφάνειας προέρχονται οι ακτίνες. Η διαθλώμενη ακτίνα έχει αντιστρεπτή πορεία, επομένως η διαδρομή της από το υλικό α στο υλικό β είναι ίδια με την αντίστροφη πορεία από το υλικό β στο υλικό α. Αφού η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν την ίδια γωνία με την κάθετο, η πορεία που ακολουθεί μία ανακλώμενη ακτίνα είναι επίσης αντιστρεπτή.

Η ένταση της ανακλώμενης και της διαθλώμενης ακτίνας εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, από τους δείκτες διάθλασης των δύο υλικών και από την πόλωση, δηλαδή τη διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου, της προσπίπτουσας ακτίνας. Ο δείκτης διάθλασης δεν εξαρτάται μόνο από τη φύση του υλικού, αλλά και από το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός. Η εξάρτηση αυτή από το μήκος κύματος ονομάζεται διασκεδασμός. Ακόμη, παρατηρείται ότι ο δείκτης διάθλασης ενός αερίου αυξάνεται, όταν αυξάνεται και η πυκνότητα του και ότι οι περισσότερες ύλοι που χρησιμοποιούνται στα οπτικά όργανα έχουν δείκτες διάθλασης με τιμές μεταξύ 1,5 και 2.

Πίνακας 2.2. Τιμές δείκτη διάθλασης σε 3 διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας

Υλικό	Μπλε (486,1nm)	Κίτρινο (589.3nm)	Κόκκινο (656.3 nm)
Γυαλί	1,524	1,517	1,515
Νερό	1,337	1,333	1,331
Λάδι	1,530	1,520	1,516
Άνθρακας	1,652	1,628	1,618

Πηγή: <http://light.physics.auth.gr/enc/refraction.html>

## 2.5. ΟΛΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Για μία φωτεινή ακτίνα που διαδίδεται από ένα μέσο οπτικά αραιότερο σε ένα οπτικά πυκνότερο, η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης. Για παράδειγμα αυτό συμβαίνει όταν η ακτίνα διαδίδεται από τον αέρα με δείκτη διάθλασης  $n=1$  σε γυαλί με δείκτη διάθλασης με  $n=1,5$ . Αντίθετα, για φωτεινή ακτίνα που διαδίδεται από ένα μέσο οπτικά πυκνότερο σε ένα οπτικά αραιότερο, όπως στην αντίθετη περίπτωση από το παραπάνω παράδειγμα, η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης, Σε

αυτήν την περίπτωση, επίσης, εντοπίζεται μία οριακή γωνία πρόσπτωσης για την οποία η γωνία διάθλασης παίρνει τη μέγιστη δυνατή τιμή, ίση με 90°. Για την οριακή γωνία ισχύει:

$$\sin \theta_{ορ.} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

Μία φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια με οπτικά αραιότερο μέσο, με την οριακή γωνία διάθλασης, εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται. Η ακτίνα διάθλασης που προκύπτει είναι παράλληλη με τη διαχωριστική επιφάνεια. Εάν η πρόσπτωση γίνει με γωνία μεγαλύτερη της οριακής, η ακτίνα δεν διαθλάται καθόλου και έχουμε το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

## 2.6. ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ

### Φακοί

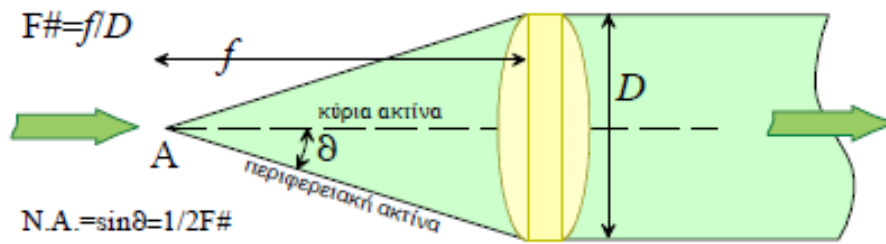
Ένας φακός διαμέτρου D συλλέγει, από όλες τις ακτίνες που εκπέμπονται από μια σημειακή πηγή, μια στερεά γωνία που καθορίζεται από την εστιακή απόσταση  $f$  και τη διάμετρο  $D$ . Η αδιάστατη ποσότητα του εστιακού λόγου :

$$F\# = \frac{f}{D} \quad (2.5)$$

λέγεται αριθμός  $F$  ( $F\#$ ,  $F$ -number) του φακού και καθορίζει τη γωνία 'συλλογής' του φακού. Αυτή είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κύρια και την περιφερειακή ακτίνα, και σχετίζεται με το αριθμητικό άνοιγμα (Numerical Aperture) με τη σχέση :

$$N.A. = \sin \theta = \frac{1}{2 \cdot (F\#)} \quad \text{ή} \quad N.A. = n_0 \cdot \sin \theta = \frac{1}{2 \cdot (F\#)} \quad (2.6)$$

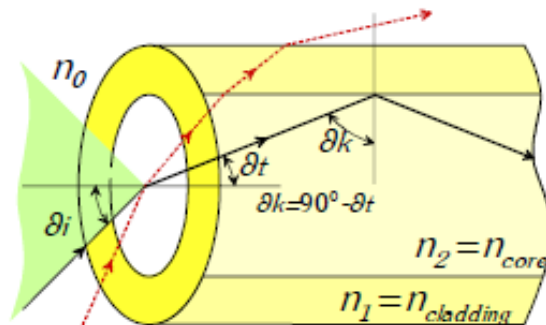
όπου στη δεύτερη έκφραση συμπεριλαμβάνεται και ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος χώρου. Όσο πιο μικρός είναι ο λόγος  $f/D$  τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία συλλογής του φακού, και κατά συνέπεια, το αριθμητικό άνοιγμα του. Ο αριθμός  $F$  ενός φακού σχετίζεται με το μικρότερο εύρος του εστιακού του σημείου.



Σχήμα 2.1. Αριθμός F και αριθμητικό διάφραγμα φακού

### Οπτικές Ύνες

Η έννοια του αριθμητικού διαφράγματος ως χαρακτηριστικό της συλλεκτικής ικανότητας ενός οπτικού συστήματος επεκτείνεται και σε άλλα συστήματα, όπως για παράδειγμα στις οπτικές ίνες. Η οπτική ίνα αποτελείται από ένα 'νήμα' από μεγάλης καθαρότητας γυαλί - άμμος της θάλασσας, δηλαδή διοξείδιο του πυριτίου,  $\text{SiO}_2$ , που λέγεται πυρήνας (core) με δείκτη διάθλασης  $n_2$ , μέσα στο οποίο πρέπει να περιοριστεί το οπτικό πεδίο. Ο πυρήνας περιβάλλεται από το μανδύα ή περίβλημα (cladding), επίσης από γυαλί με δείκτη διάθλασης  $n_1 < n_2$ . Η ίνα συνήθως περιβάλλεται από ένα προστατευτικό περίβλημα (jacket). Θεωρούμε ότι η ίνα βρίσκεται σε ένα περιβάλλον (αέρας), που στη γενική περίπτωση έχει δείκτη διάθλασης  $n_0$ .



Σχήμα 2.2. Γωνία συλλογής οπτικής ίνας

Για μια ακτίνα που προσπίπτει στην ίνα από τον εξωτερικό χώρο με γωνία  $\theta_i$  ισχύει ο νόμος της διάθλασης (Εξίσωση 2.3). Η ακτίνα αυτή θα διαδοθεί με γωνία  $\theta_t$  ως προς τον άξονα της ίνας μέσα στον πυρήνα μέχρι να συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα- περιβλήματος με γωνία πρόσπτωσης  $\theta_k = 90^\circ - \theta_t$ . Επειδή το υλικό του περιβλήματος είναι οπτικά αραιότερο από το υλικό του πυρήνα, θα υπάρξει ολική εσωτερική ανάκλαση μέσα στον πυρήνα.

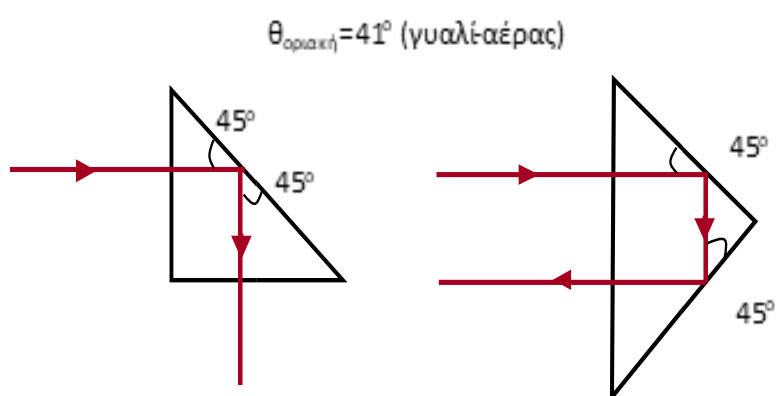
Όταν η κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης ικανοποιεί τη συνθήκη της οριακής γωνίας (Εξίσωση 2.4), όλες οι ακτίνες θα ανακλαστούν ολικά μέσα στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Αντίθετα, αν μια ακτίνα προσπέσει με μεγαλύτερη γωνία από την κρίσιμη τότε θα 'διαφύγει'. Ορίζουμε λοιπόν, για μια οπτική ίνα, το αριθμητικό της άνοιγμα (Numerical Aperture), σε αναλογία με τους φακούς ως

$$N.A. = n_0 \cdot \sin \theta_{NA} = n_2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (2.7)$$

## Πρίσματα

Όπως οι οπτικές ίνες έτσι και τα πρίσματα που αλλάζουν την πορεία του φωτός, αποτελούν βασικές εφαρμογές του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

Τα πρίσματα είναι διατάξεις από διαφανές υλικό, πυκνότερο από τον αέρα, που παρεμβάλλονται στην πορεία της ακτίνας του φωτός, ώστε το φως να προσπίπτει κάθετα στο πρίσμα και να εισέρχεται χωρίς εκτροπή της πορείας του σε αυτό. Στη συνέχεια προσπίπτει στην επιφάνεια εξόδου με μεγαλύτερη γωνία σε σχέση με την οριακή, έτσι το φως υφίσταται ολική ανάκλαση και εξέρχεται κάθετα από την επόμενη επιφάνεια εξόδου για να μην εκτραπεί. Το φαινόμενο αυτό εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα και θα αξιοποιηθεί στο υπό μελέτη σύστημα σκίασης.



Σχήμα 2.3. Εκτροπή φωτός που διαδίδεται στον αέρα από γυάλινο ισοσκελές-ορθογώνιο πρίσμα κατά  $90^\circ$  και  $180^\circ$  αντίστοιχα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

## 3.1. ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική εισαγωγή στη θερμική και οπτική άνεση των κτηρίων καθώς και στο ρόλο της σκίασης στην εξοικονόμηση ενέργειας αυτών. Ακολουθώς παρουσιάζονται τα ευρέως διαδεδομένα συστήματα σκίασης και οι διαμορφώσεις προσαρμογής τους στα κτήρια. Τέλος παρουσιάζονται σχετικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά πρισματικές διατάξεις σκίασης. Για τα εισαγωγικά στοιχεία οι πληροφορίες αντλήθηκαν κυρίως από τα συγγράμματα της ASHRAE [7] και του Olgay [8].

## 3.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

Η προστασία των κτηρίων από τον ήλιο είναι πολύ σημαντική και για τις θερμικές αλλά και για τις οπτικές απαιτήσεις των ανθρώπων. Η πρόσβαση στον ήλιο, συνήθως αποτελεί σημαντική ανθρώπινη επιθυμία, ωστόσο η υπερβολική έκθεση, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, μπορεί να προκαλέσει δυσφορία ή και σημαντικά προβλήματα. Για αυτό, κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη ηλιοπροστασίας στα κτήρια, δεδομένου ότι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι προβλεπόμενης κατεύθυνσης και μπορεί να εμποδιστεί αποτελεσματικά.

Όσον αφορά τις θερμοκρασιακές απαιτήσεις, στόχος είναι η αίσθηση ικανοποίησης των ανθρώπων με τη θερμοκρασία στον χώρο που βρίσκονται, καθώς δυσφορία προκαλείται όταν εντοπίζεται σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά. Η διαφορά αυτή μπορεί να αφορά τόσο ψυχρότερες περιοχές όσο και θερμότερες. Παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση αυτή, είναι η υγρασία, η ταχύτητα του αέρα, ανεπιθύμητα ρεύματα αέρα ή ακόμα και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των χαμηλότερων και των υψηλότερων περιοχών του σώματος. Παρόλα αυτά, σε γενικές γραμμές το σώμα προσαρμόζεται στις θερμικές αλλαγές του περιβάλλοντος, αφού το ανθρώπινο θερμικό σύστημα προσπαθεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του σώματος στους 37°C. Η θερμική ουδετερότητα, δηλαδή η κατάσταση κατά την οποία το άτομο δεν προτιμά ούτε θερμότερο, ούτε ψυχρότερο περιβάλλον, αποτελεί αναγκαία συνθήκη της θερμικής άνεσης. Το θερμικό ισοζύγιο μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος ορίζεται ως:

$$M - W = H + E_C + C_{res} + E_{res} \quad (3.1)$$

Τα μεγέθη που συνθέτουν την παραπάνω σχέση είναι:

- $M$ , ο ρυθμός μετατροπής της χημικής ενέργειας σε θερμότητα και μηχανικό έργο, μέσω αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών μέσα στο σώμα
- $W$ , το ωφέλιμο μηχανικό έργο
- $H$ , οι απώλειες ενέργειας υπό τη μορφή θερμότητας από την επιφάνεια του σώματος μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας
- $E_C$ , το ποσό θερμότητας που απάγεται λόγω εξάτμισης σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας
- $C_{res}$ , το ποσό της θερμότητας που απάγεται με αγωγή κατά την αναπνοή
- $E_{res}$ , το ποσό της θερμότητας που απάγεται λόγω εξάτμισης κατά την αναπνοή.

Ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση στην οποία ο άνθρωπος είναι ευχαριστημένος με το θερμικό του περιβάλλον. Ο ανθρώπινος οργανισμός ρυθμίζει μέχρι ένα σημείο μόνος του τη θερμοκρασία. Πέρα από αυτό, θα πρέπει να γίνεται τεχνητά η ρύθμιση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η τεχνητή ρύθμιση αποβλέπει στην δημιουργία αισθήματος «άνεσης» (ευεξίας). Οι παράγοντες που πρέπει να ρυθμισθούν ώστε να επιτευχθεί είναι:

- Η θερμοκρασία του αέρα του χώρου
- Η θερμοκρασία των επιφανειών που περιβάλλουν τον χώρο
- Η σχετική υγρασία του αέρα
- Η ταχύτητα κίνησης του αέρα

Όσον αφορά τις συνθήκες οπτικής άνεσης, το ζητούμενο μέγεθος εξαρτάται από τη χρήση που προορίζουμε τον χώρο. Γενικότερα, για απλές οπτικές λειτουργίες χρειαζόμαστε 200 – 500 lx, ενώ για μέτρια 300 – 750 lx.

Τα συστήματα σκίασης μπορούν να ανακλούν και να ανακατανέμουν το φως στον εσωτερικό χώρο του κτηρίου και να συμβάλλουν στην ομοιομορφία των επιπέδων φωτισμού, καθώς υπάρχει η δυνατότητα να μειωθούν τα μεγάλα

επίπεδα φωτισμού κοντά στο παράθυρο μέσω της εκτροπής του φωτός προς το υπόλοιπο τμήμα του δωματίου.

Με την καλή σκίαση μειώνονται τα επίπεδα φυσικού φωτισμού, το οποίο δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς οι άνθρωποι προσαρμόζονται στα χαμηλά αυτά επίπεδα. Δυσφορία προκαλείται όταν εντοπίζονται σημαντικές αντιθέσεις στον ίδιο χώρο, κάτι που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση τεχνητού φωτισμού, εάν δεν υπάρχει ομοιόμορφη διανομή του φυσικού φωτός. Ο ανθρώπινος οργανισμός έχει αποδειχθεί ότι αντέχει μεγαλύτερη ένταση φυσικού φωτισμού σε σχέση με τον τεχνητό, ενώ επίσης σημαντικό είναι ότι το φυσικό φως παρέχει την καλύτερη δυνατή απόδοση χρώματος. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη κατάλληλου συστήματος σκίασης που επιτρέπει την σωστή αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού, ενώ ταυτόχρονα περιορίζει τις αρνητικές συνέπειες του.

### **3.3. ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Τα συστήματα σκίασης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας των κτηρίων. Προστατεύουν ένα μεγάλο τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας του κτηρίου από την έκθεση στον ήλιο, συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της ηχορύπανσης και βελτιώνουν τον εξαερισμό των εσωτερικών χώρων. Επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο του εισερχόμενου φωτός καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και διασφαλίζουν παρόμοια επίπεδα φωτός και θερμοκρασίας σε όλους τους χώρους του κτηρίου. Ακόμη, συμβάλλουν στη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και εργασίας, χωρίς να επιβαρύνουν τον οργανισμό των ενοίκων και των εργαζομένων, χωρίς να βαραίνουν την ατμόσφαιρα και να ζημιώνουν το περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν στη μείωση των εξόδων από τη μειωμένη χρήση των κλιματιστικών.

Ειδικότερα, εντοπίζονται διαφορετικά πλεονεκτήματα της χρήσης των σκιάστρων, ανάλογα με την εποχή που χρησιμοποιούνται. Το χειμώνα τα σκιάστρα συνήθως βρίσκονται σε κλειστή θέση και λόγω της συμπληρωματικής θερμικής αντίστασης που προσφέρουν στο κτήριο, μειώνουν την ζήτηση για θέρμανση, επιτρέποντας σε μεγαλύτερο τμήμα ακτινοβολίας να εισέλθει στο



κτηρίο. Αντίθετα, το καλοκαίρι ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία και προφυλάσσεται το κτήριο από την ακτινοβολία και τη θερμική ενέργεια.

Τα συστήματα σκίασης τοποθετούνται σε κάθε περίπτωση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κτηρίου. Σημαντικό ρόλο παίζουν η όψη, ο γεωγραφικός προσανατολισμός και το αρχιτεκτονικό προφίλ του κτηρίου. Σύμφωνα με μελέτες, η θερμοκρασία στο εσωτερικό κτηρίων που προστατεύονται από συστήματα σκίασης, μπορεί να μειωθεί από 5 έως 15 βαθμούς Κελσίου. Η κλίση των συστημάτων σκίασης συνήθως καθορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, ωστόσο σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούνται αισθητήρες που ρυθμίζουν το σύστημα ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την εποχή του χρόνου, αλλά και της απαιτήσεις που ο χρήστης έχει καθορίσει, όσον αφορά το ποσό της ακτινοβολίας και της θερμικής ενέργειας που περνά στο εσωτερικό του κτηρίου.

### **3.4. ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ**

Τα εξωτερικά συστήματα σκίασης είναι αυτά που θεωρούνται ότι παρεμποδίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη μεταφορά της ηλιακής θερμότητας στο εσωτερικό των κτηρίων, αλλά ταυτόχρονα επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την εμφάνιση του κτηρίου, ενώ είναι και ακριβότερα. Οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν, όταν έχει εφαρμοστεί σωστά το σύστημα, είναι ο περιορισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ο έλεγχος της διάχυσης, η παρεμπόδιση του έντονου φωτός, καθώς επίσης και η λειτουργία τεχνητού φωτισμού και αερισμού, όταν κριθεί απαραίτητο. Χωρίζονται σε σταθερά, κινητά και εποχιακά.

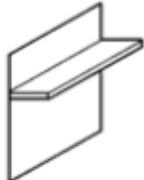

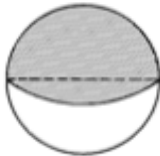
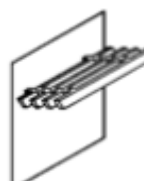
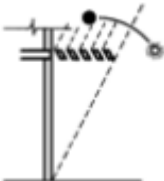
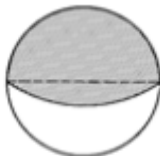
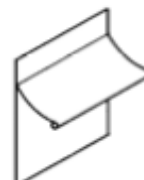
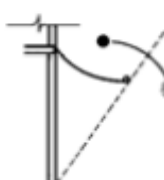
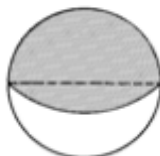
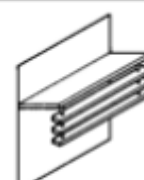
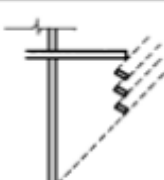
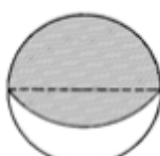
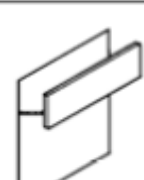
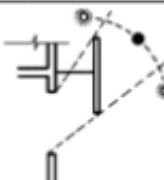

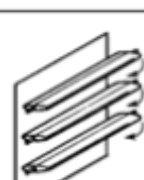
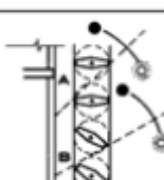
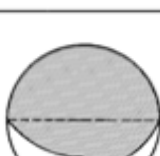
Τα σταθερά εξωτερικά συστήματα σκίασης χαρακτηρίζονται από την απλότητα τους, το χαμηλότερο κόστος κατασκευής και από την λιγότερο συχνή ανάγκη για συντήρησή τους. Παρεμποδίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό το άμεσο ηλιακό φως, αλλά υστερούν όσον αφορά το διάχυτο φωτισμό και τις ανακλάσεις. Συνήθως η μορφή τους είναι οριζόντιες ή κάθετες προεξοχές, που ονομάζονται πρόβολοι, μόνιμες περσίδες ή παραθυρόφυλλα, ή ακόμα και παράθυρα διπλών υαλοπινάκων. Η συνηθέστερη και απλούστερη μορφή είναι η οριζόντια προεξοχή. Σε κάθε περίπτωση είναι τοποθετημένη στην κατάλληλη πρόσοψη του κτηρίου και με τον κατάλληλο γεωγραφικό προσανατολισμό, ενώ επιτρέπει στον αέρα να εισέλθει στο εσωτερικό του κτηρίου, ώστε να επιτευχθεί φυσικός

αερισμός του χώρου. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό, επιτυγχάνεται η σωστή σκίαση τους καλοκαιρινούς μήνες, αλλά αντίθετα τους χειμερινούς μήνες επιτρέπεται η διείσδυση των ηλιακών ακτινών.

Τα κινητά εξωτερικά συστήματα σκίασης μπορούν να προσαρμοστούν πιο εύκολα σε σχέση με τα σταθερά, καθώς αποτελούνται από κινητές περσίδες. Ανταποκρίνονται και ακολουθούν τις κινήσεις του ηλίου, επιτρέποντας τον καλύτερο έλεγχο τόσο της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και του απευθείας έντονου φωτός. Χρησιμεύουν, έτσι, σε μεγάλο βαθμό στην διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου φυσικού φωτισμού στον εσωτερικό χώρο. Σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν τα κινητά εξωτερικά συστήματα είναι η αντοχή στον άνεμο. Επίσης είναι περισσότερο δαπανηρά, αλλά και πιο αποτελεσματικά από τα σταθερά εξωτερικά συστήματα σκίασης, ειδικότερα εάν χρησιμοποιηθούν μηχανισμοί αυτοματοποίησης. Η συντήρησή τους είναι αρκετά δύσκολη και επικίνδυνη διαδικασία, αλλά και ακριβή. Ανεξάρτητα από τη λειτουργία ή όχι του συστήματος εξαερισμού, παρέχεται ο απαραίτητος φυσικός αερισμός, ενώ το φως μπορεί να εισέλθει στον εσωτερικό χώρο, ακόμα και υπό συνθήκες συννεφιάς. Σημαντικό είναι εκτός από τον αυτοματοποιημένο μηχανισμό πάντως να υπάρχει και χειροκίνητος, για την περίπτωση διακοπής ρεύματος.

Τα εποχιακά εξωτερικά συστήματα σκίασης κυρίως περιλαμβάνουν πέργκολες ή φυσικά συστήματα σκίασης και συγκεκριμένα δέντρα ή φυτά. Με σωστή εφαρμογή των συστημάτων αυτών, τροποποιείται το μικροκλίμα του χώρου και μειώνεται η ανάγκη για εσωτερική και εξωτερική σκίαση. Ο τρόπος αυτός έχει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως ότι παρέχεται η σκίαση μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες που απαιτείται, λόγω της ιδιαιτερότητας των φυλλοβόλων δέντρων, ενώ μειώνονται οι ανακλάσεις του έντονου φωτός και των ανεπιθύμητων ρευμάτων αέρα. Ωστόσο αυτή η μέθοδος σκίασης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος των φυτών, την απόσταση των δέντρων και της πέργκολας από τα παράθυρα, την πιθανότητα μείωσης της ανανέωσης του αέρα και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, καθώς και την επιθυμητή κατανάλωση ενέργειας για τον δροσισμό του κτηρίου.

Βάσει του προσανατολισμού τους τα εξωτερικά συστήματα σκίασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) τα οριζόντια, (β) τα κάθετα και (γ) τα μεικτά. Τα οριζόντια χρησιμοποιούνται σε ανοίγματα που κοιτάζουν στο νότο λόγω του μεγάλου ηλιακού ύψους το καλοκαίρι. Οι συνηθέστερες διαμορφώσεις παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα.

			<p><b>ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΠΡΟΒΟΛΟΣ</b></p>
			<p><b>ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ ΚΑΘΕΤΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ</b></p>
			<p><b>ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΤΕΝΤΑ</b></p>
			<p><b>ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ</b></p>
			<p><b>ΠΑΝΕΛΟ ΣΚΙΑΣΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ</b></p>
			<p><b>ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ</b></p>

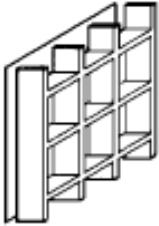
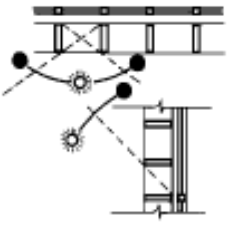
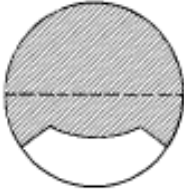
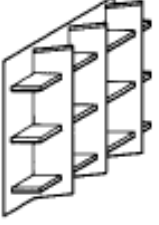
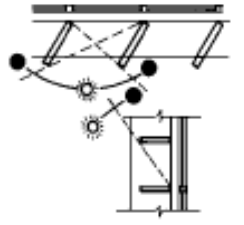
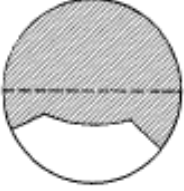

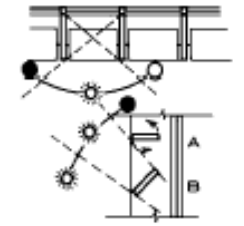
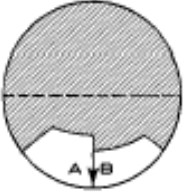
Σχήμα 3.1. Οριζόντιες διαμορφώσεις σκιάστρων

Τα κατακόρυφα σκίαστρα χρησιμοποιούνται σε ανατολικούς και δυτικούς προσανατολισμούς, όπου τα θερμικά κέρδη λόγω της άμεσα προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορούν να προκαλέσουν έντονη δυσφορία, τόσο θερμική όσο και οπτική. Τα συνηθέστερα από τα κατακόρυφα σκίαστρα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα, διακρίνονται για την κατακόρυφη τομή τους και τις μάσκες σκιασμού τους.

			<p><b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΟΡΙΑΚΑ ΣΥΜΠΑΓΟΙ ΠΑΝΕΛΑ</b></p>
			<p><b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ</b></p>
			<p><b>ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ</b></p>

Σχήμα 3.2. Κάθετες διαμορφώσεις σκιάστρων

Τέλος, οι μικτές διατάξεις αποτελούν συνδυασμό των κατακόρυφων και οριζόντιων σκιάστρων και προσφέρουν τη μέγιστη σκίαση, αναγκαία στα ιδιαίτερα θερμά κλίματα. Ο κατάλληλος προσανατολισμός για την τοποθέτησή τους είναι ο νοτιοδυτικός και ο νοτιοανατολικός. Η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη, καθώς ελαττώνουν αρκετά την πρόσοδο ηλιακού φωτός, μειώνοντας αισθητά τον φωτισμό αλλά και το οπτικό πεδίο στο εσωτερικό του δωματίου. Τα συνηθέστερα από τα μεικτά σκίαστρα παρουσιάζονται παρακάτω με τις κατακόρυφες και οριζόντιες τομές τους και τις μάσκες σκιασμού τους.

			<p><b>ΜΙΚΤΟ ΟΡΘΟΚΑΝΟΝΙΚΟ ΣΚΙΑΣΤΡΟ</b></p>
			<p><b>ΜΙΚΤΟ ΣΚΙΑΣΤΡΟ ΜΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΤΙΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ</b></p>
			<p><b>ΜΙΚΤΟ ΣΚΙΑΣΤΡΟ ΜΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΕΣ ΤΙΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΠΕΡΣΙΔΕΣ</b></p>

Σχήμα 3.3. Μεικτές διαμορφώσεις σκιάστρων

### 3.5. ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ

Τα εσωτερικά συστήματα σκίασης χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευκολία στη ρύθμιση και τη συντήρηση, από χαμηλότερη τιμή και από την ικανοποιητική αποτελεσματικότητα στον έλεγχο της ακτινοβολίας και των ανακλάσεων. Μπορούν να λειτουργήσουν και με χειροκίνητο έλεγχο, αλλά και με μηχανισμούς αυτοματοποίησης. Επιτρέπουν την διέλευση του φυσικού φωτισμού, άρα και της θερμότητας στον εσωτερικό χώρο, σε κάθε περίπτωση ανάλογα με τα επιθυμητά ηλιακά κέρδη. Χωρίζονται σε προσαρμοσμένα, σε κινητά συστήματα και σε ανακλινόμενα.

Τα προσαρμοσμένα και κινητά συστήματα σκίασης τοποθετούνται εσωτερικά ή μεταξύ των υαλοπινάκων ενός παραθύρου. Ο χειρισμός είναι ευκολότερος στα συστήματα που βρίσκονται στο εσωτερικό, τα οποία είναι και λιγότερο δαπανηρά. Τα προσαρμοσμένα συστήματα μπορούν να αποκλείσουν το φως ή να επιτρέψουν ανάκλαση του με ιδιαίτερα αποτελεσματικό τρόπο, ειδικότερα τους χειμερινούς μήνες. Πολλές φορές χρησιμοποιούνται για να είναι αρκετά υψηλή η ένταση του φωτισμού στον εσωτερικό χώρο. Σημαντικό ρόλο παίζει ο

σωστός τρόπος χρήσης και η ανθεκτική κατασκευή, για αυτό και προτιμάται συχνά η χρήση μηχανισμού αυτοματοποίησης για τον έλεγχο τους. Η αυτοματοποίηση των συστημάτων αυτών εξαρτάται από το κλίμα. Η πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία μπορεί να μειώσει το ηλιακό κέρδος μέσω των παραθύρων κατά 10%. Η διάρκεια της λειτουργίας των συστημάτων αυτών ωστόσο εγείρει ανησυχία, για αυτό και απαιτείται συχνά συντήρηση και επισκευές.

Τα ανακλινόμενα εσωτερικά συστήματα σκίασης περιλαμβάνουν τα βενετικά στόρια και τις κουρτίνες. Μπορούν να μετακινηθούν, ώστε να επιτρέπεται η άμεση οπτική επαφή από τον εσωτερικό χώρο στο εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα, μπορούν να αποτρέψουν και τελείως την διέλευση του φωτός στο εσωτερικό, εάν χρειαστεί. Το εύρος της λειτουργίας τους, επομένως, είναι πολύ μεγάλο, από συνθήκες απόλυτης σκίασης μέχρι και σε συνθήκες πολύ μεγάλου φωτισμού. Ταυτόχρονα με το φως, παρόμοια είναι η λειτουργία τους όσον αφορά τις απαιτήσεις εξαερισμού του εσωτερικού χώρου.

### **3.6. ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΚΙΑΣΗΣ**

Με την πρόοδο της τεχνολογίας εφευρίσκονται συνεχώς νέα είδη συστημάτων, με σκοπό την μόνωση και την σκίαση, αλλά ακόμα και την ενίσχυση του φυσικού φωτισμού στον εσωτερικό χώρο. Η λειτουργία των καινοτόμων συστημάτων σκίασης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή ανάκλασης, την απορροφητικότητα, τη διαπερατότητα και την εκπομπή. Παίζουν σημαντικό ρόλο στη μετάβαση τόσο του φωτός, όσο και της θερμότητας μέσω του γυαλιού. Πλέον εντοπίζονται εφαρμογές πολλών καινοτόμων συστημάτων σκίασης.

Ένα καινοτόμο σύστημα σκίασης είναι η χρήση επιχρωματισμένου γυαλιού. Ήταν η πρώτη μορφή υαλοπινάκων που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της σκίασης. Μειώνει σε ικανοποιητικό βαθμό τα ηλιακά κέρδη, αλλά και τον φυσικό φωτισμό. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι προκαλείται χρωματική αλλοίωση, όταν ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

Άλλο ένα καινοτόμο σύστημα σκίασης είναι οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες. Εμποδίζουν με μεγάλη αποτελεσματικότητα τα ηλιακά κέρδη καθ' όλη τη

διάρκεια του χρόνου, ενώ παράλληλα μειώνουν τη διαπερατότητα του ορατού φωτός. Οι υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (low-E) έχουν διαπερατότητα ακόμα έως και 80% του φωτός. Ακόμα, συγκρατούν την υπέρυθη ακτινοβολία και δεν της επιτρέπουν να διαφύγει.

Τα «έξυπνα» παράθυρα (responsive glasses) εμφανίζονται σε τρεις διαφορετικές μορφές. Είναι τα φωτοχρωμικά, που ανταποκρίνονται στις αλλαγές του φωτός και χρησιμοποιούνται στον ηλιακό έλεγχο, τα θερμοχρωμικά, που ανταποκρίνονται στις θερμοκρασιακές αλλαγές και αντιδρούν στην ηλιακή ακτινοβολία στο ορατό μέρος του φάσματος και τα ηλεκτροχρωμικά που ανταποκρίνονται σε ηλεκτρικά σήματα.

Άλλο ένα είδος καινοτόμου συστήματος σκίασης είναι τα ολογραφικά υμένια, τα οποία τοποθετούνται σε υαλοπίνακες που διαθλούν την ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο, ώστε να δημιουργηθεί καλύτερη κατανομή του φωτισμού. Αυτοί οι τύποι υαλοπινάκων επιτρέπουν την διέλευση των ηλιακών ακτινών υπό συγκεκριμένες γωνίες πρόσπτωσης και απομακρύνουν τις υπόλοιπες. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η εμφάνιση χρωματικού φάσματος.

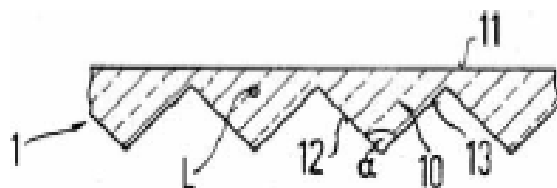
Επιπλέον μία ακόμα μέθοδος είναι η χρήση αεροτζέλ που τοποθετείται μεταξύ δύο υαλοπινάκων και έχει την ιδιότητα να αλλάζει από διαφανές σε ημιδιαφανές κατά τη θέρμανση του. Αποτέλεσμα αυτού, βέβαια, είναι να εμποδίζεται η θέαση του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Τέλος, άλλο ένα καινοτόμο σύστημα σκίασης είναι οι διαφανείς πρισματικοί υαλοπίνακες. Είναι διαφανείς και έχουν τη δυνατότητα και να διαθλάσουν και να ανακλάσουν το φως και για αυτό χρησιμοποιούνται τόσο για φυσικό φωτισμό, όσο και για σκίαση. Η κύρια λειτουργία τους είναι η ανάκλαση του εισερχόμενου φωτός προς το πίσω τμήμα του δωματίου, με την ταυτόχρονη μείωση του έντονου άμεσου φωτός. Συχνά τοποθετούνται μεταξύ διπλών υαλοπινάκων στα παράθυρα, ενώ είναι το καταλληλότερο σύστημα για υαλοπίνακες υψηλού επιπέδου ανακλαστικότητας.

### 3.7. ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΙΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Καθώς οι πρισματικές διατάξεις ηλιοπροστασίας αποτελούν βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας ακολουθεί μια συνοπτική βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικών τεχνολογιών. Διάφορες διαφανείς συσκευές σκίασης έχουν σχεδιαστεί και μελετηθεί με σκοπό να επιτρέπουν την επιθυμητή ποσότητα του ηλιακού φωτός να εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο των κτηρίων, ενώ ταυτόχρονα προστατεύουν από την αντηλιά και την υπερθέρμανση [9], [10], [11], [12], [13]. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται ορισμένες τυπικές προτεινόμενες διατάξεις.

Το σύστημα σκίασης που έχει προταθεί από τον Bartenbach αποτελείται από ράβδους κατασκευασμένες από ελαφρύ, διαπερατό υλικό. Οι πλάκες αυτές φέρουν στην εξωτερική πλευρά επίπεδη επιφάνεια που δεν αντανακλά τον ήλιο, ενώ στην εσωτερική τους πλευρά αποτελούνται από πρισματικές διατάξεις, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



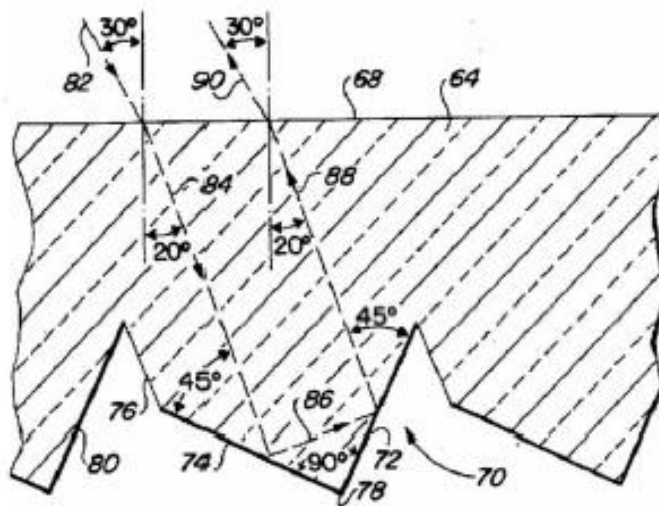
Σχήμα 3.4. Πρισματικό σύστημα σκίασης με παράλληλες πλάκες

Οι πρισματικές ράβδοι είναι παράλληλες στον άξονα του γεωγραφικού μήκους και διαθέτουν άλλες 2 πλευρές που λειτουργούν μόνο με ολική εσωτερική ανάκλαση. Αυτό το σύστημα σκίασης βελτιώνει τη διάδοση του φωτός και παρέχει αποτελεσματική προστασία από το άμεσο φως του ηλίου. Για νότια διεύθυνση, το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται αλλαγή της κλίσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ ακόμα και κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου χρειάζεται μικρές ρυθμίσεις της κλίσης.

Μία άλλη χαρακτηριστική πρισματική διαφανής διάταξη είναι αυτή που έχει προταθεί από τους Murphy και Campbell, η οποία εμποδίζει τις ακτίνες του ηλίου από το να εισέλθουν άμεσα στον εσωτερικό χώρο, ενώ αντίθετα επιτρέπει τη διέλευση των ανακλώμενων ακτινών, αλλά και την θέα από το εσωτερικό στο εξωτερικό του κτηρίου. Η συσκευή αυτή, που έχει τη μορφή περσίδων, όπως



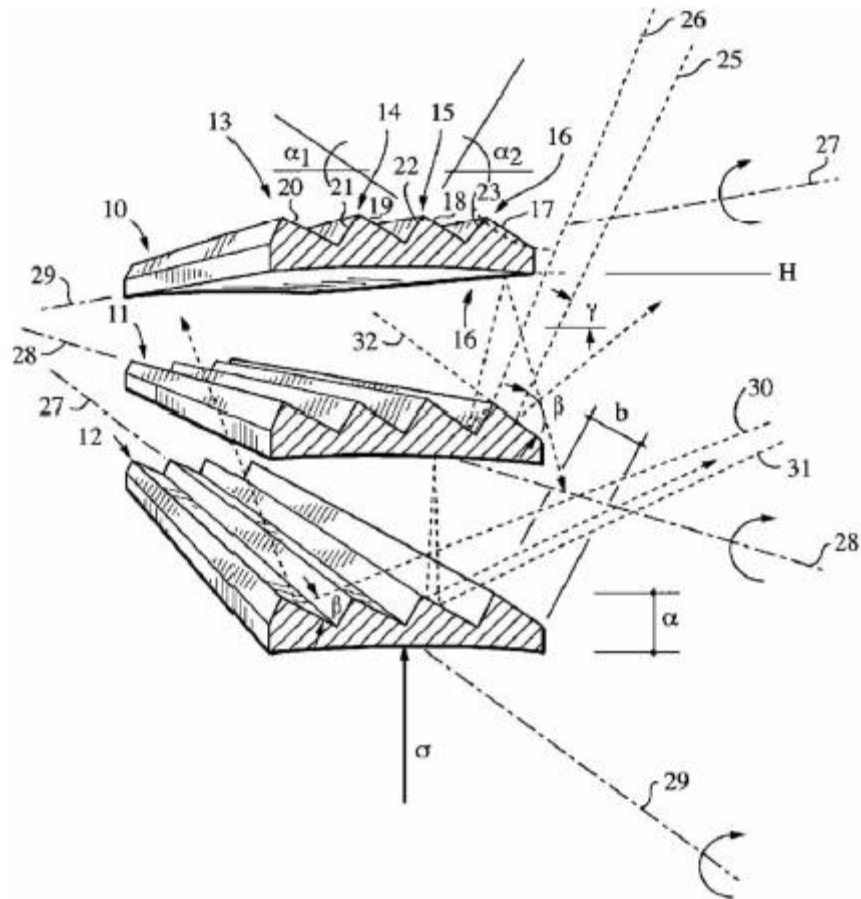
φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.5, αποτελείται από πρισματικές, ανακλαστικές ράβδους, που στρέφονται και προσαρμόζονται ανάλογα με την κίνηση του ηλίου.



Σχήμα 3.5. Πρισματικό σύστημα σκίασης περσίδων

Οι ράβδοι είναι φτιαγμένες από ελαφρύ υλικό, διαπερατό από το φως, με δείκτη διάθλασης περίπου 1,5. Υλικά από τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν τέτοιες διατάξεις είναι το γυαλί, το ακρυλικό και το πολυκαρβονικό πλαστικό. Οι ράβδοι αποτελούνται από δύο πλευρές, την εμπρόσθια (προς τη μεριά του ηλίου) στην οποία προσπίπτουν οι ακτίνες του ήλιου και την οπίσθια στην οποία βρίσκονται τα ανακλαστικά πρίσματα. Τα πρίσματα προκαλούν ολική εσωτερική ανάκλαση στις προσπίπτουσες ακτίνες, σε γωνία  $30^\circ$  σε σχέση με την μπροστινή πλευρά.

Ένα ακόμα διαφανές σύστημα σκίασης προτάθηκε από τον Koster. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ανακλαστικές μεμβράνες που περιορίζουν την αντηλιά. Ωστόσο, δεν γίνονται πολλές ανακλάσεις του φωτός, για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των μεμβρανών και ως εκ τούτου του εσωτερικού χώρου. Οι μεμβράνες στη συγκεκριμένη συσκευή δεν μετακινούνται, ενώ κάθε ξεχωριστή ράβδος έχει 2 πλευρές, μία εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία και μία σκιασμένη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η πλευρά που βρίσκεται προς τον ήλιο λειτουργεί ανακλαστικά, ενώ η σκιασμένη πλευρά, η οποία είναι ορατή από το εσωτερικό του κτηρίου είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να εξασθενεί τις ακτίνες του ηλίου.



Σχήμα 3.6. Πρισματικό σύστημα σκίασης με ακίνητες ανακλαστικές μεμβράνες  
 Τέλος, βρέθηκαν στην βιβλιογραφία αρκετές ενδιαφέρουσες ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται την ανάλυση διάφανων πρισματικών διατάξεων.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΚΙΑΣΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ**

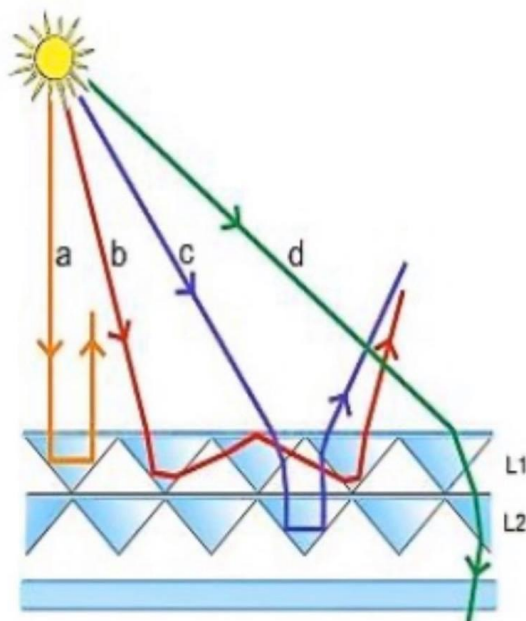
## **4.1. ΣΥΝΟΨΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του πρισματικού συστήματος σκίασης και παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται το στερεό μοντέλο σε πρόγραμμα CAD. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην τεχνική ανίχνευσης ακτινών (ray tracing) και στο τρόπο εφαρμογής της στην μελέτη του συστήματος με σκοπό να ακολουθήσει η θεωρητική αξιολόγηση και η περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας του συστήματος.

## **4.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Το υπό μελέτη σύστημα ολικής εσωτερικής ανάκλασης αποτελείται από διαφανή οπτικά πρίσματα. Τα πρίσματα αυτά αξιοποιούν τη δυνατότητα της δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας να ανακλάται εξ ολοκλήρου υπό κατάλληλες γεωμετρικές προϋποθέσεις κατά τη μετάβασή της από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο μέσο.

Συγκεκριμένα, για να γίνει ανάκλαση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια, πρέπει να επιτευχθεί γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από την οριακή γωνία. Ενώ η οριακή γωνία περιορίζεται σε ένα μικρό εύρος, η επίτευξη ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να πραγματοποιηθεί για μεγάλο εύρος γωνιών πρόσπτωσης μέσω της κατάλληλης σχεδιαστικής διαμόρφωσης του συστήματος ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Ανάλογα, λοιπόν, με τη διαμόρφωση και τον προσανατολισμό, το σύστημα μπορεί να αξιοποιηθεί ως ηλιακό σκίαστρο, ρυθμίζοντας τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.1. Αναπαράσταση της διαδρομής ηλιακών ακτινών υπό διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης σε σύστημα σκίασης ολικής εσωτερικής ανάκλασης

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός και η ανάλυση του συστήματος, καθώς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο η περιοχή όσο και τα χαρακτηριστικά του κτηρίου που θα τοποθετηθεί το σύστημα σκίασης. Όπως έχει αναφερθεί, το μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης συστημάτων σκίασης είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, εξαιτίας της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας για την επίτευξη επιθυμητών συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης. Η οπτική προσομοίωση των συστημάτων σκίασης μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία προηγμένων διατάξεων με βελτιστοποιημένα χαρακτηριστικά.

### 4.3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ

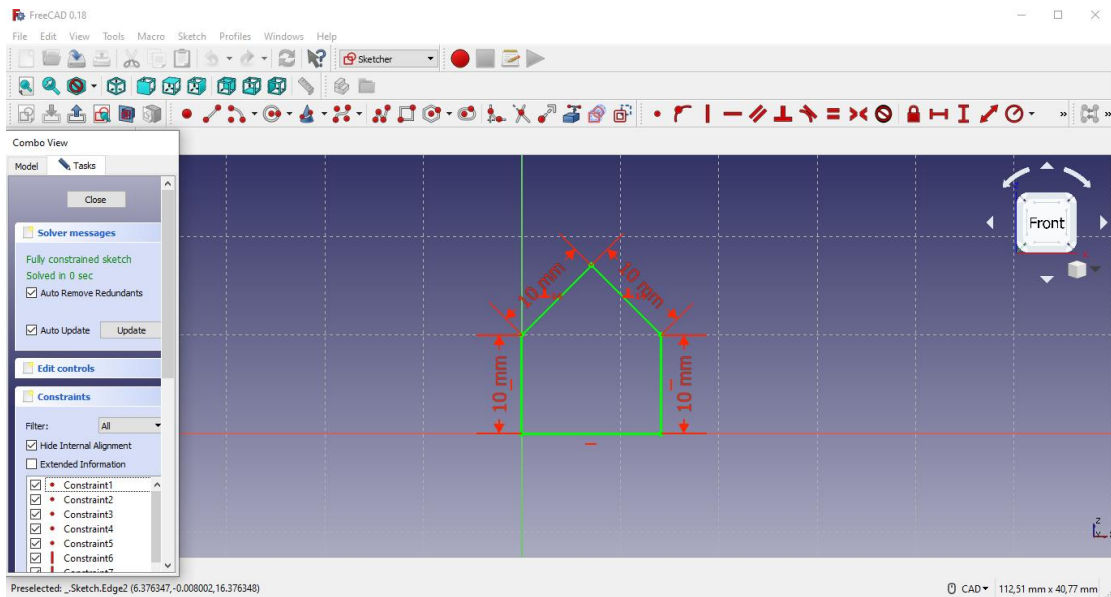
Τα στοιχεία του συστήματος σκίασης σχεδιάστηκαν σε πρόγραμμα CAD παραμετρικής στερεάς μοντελοποίησης (parametric solid modeling). Στην στερεά μοντελοποίηση (solid modeling) πραγματοποιείται αναπαράσταση των αντικειμένων με κλειστούς όγκους, οπότε και σχεδιάζονται τα στερεά μοντέλα που παρέχουν πλήρη και έγκυρη αναπαράσταση των επιθυμητών αντικειμένων. Κατά τη στερεά μοντελοποίηση γίνεται η καταχώρηση τόσο των γεωμετρικών στοιχείων όσο και των πληροφοριών τοπολογίας. Τα γεωμετρικά στοιχεία είναι τα ίδια όπως και στα συστήματα σχεδίασης επιφανειών, ενώ για τα στοιχεία

τοπολογίας (κορυφές, ακμές, έδρες, κελύφη, κτλ) καταχωρούνται όλες οι πληροφορίες που αφορούν τις σχέσεις σύνδεσης των στοιχείων αυτών.

Βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων συστημάτων στερεάς μοντελοποίησης είναι η σχεδίαση με μορφολογικά χαρακτηριστικά (features), τα οποία αντιπροσωπεύουν μια ανωτέρου επιπέδου απεικόνιση ομάδας γεωμετρικών στοιχείων και ιδιοτήτων του στερεού. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν περιορίζουν την πληροφόρηση που καταχωρούν στα γεωμετρικά στοιχεία μόνο, αλλά περιλαμβάνουν και πρόσθετη πληροφόρηση που είναι απαραίτητη για την εκάστοτε εφαρμογή. Κάθε γεωμετρικό στοιχείο που προστίθεται στο μοντέλο ορίζεται ως ένα νέο μορφολογικό χαρακτηριστικό.

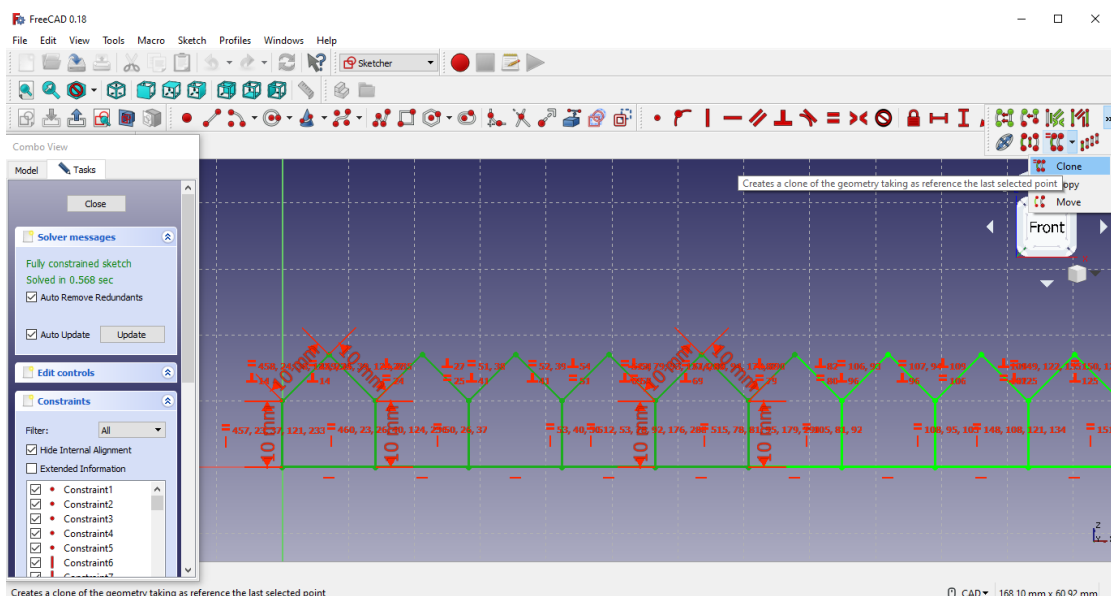
Στην παραμετρική μοντελοποίηση οι διαστάσεις αποτελούν τις παραμέτρους του μοντέλου. Σε κάθε διάσταση που απαιτείται για τον ορισμό του μοντέλου αντιστοιχεί και μια πραγματική τιμή η οποία, όταν αλλάξει, μεταβάλλεται και η γεωμετρία του μοντέλου. Κατά την παραμετρική μοντελοποίηση ορίζεται αρχικά η τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου και ακολούθως το σύστημα υποθέτει ή ζητάει από το χρήστη να οριστούν οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για να ελέγξει το μέγεθος, τον προσανατολισμό και την θέση κάθε μορφολογικού χαρακτηριστικού, καθώς επίσης και τις λογικές σχέσεις μεταξύ των διαστάσεων των μορφολογικών χαρακτηριστικών. Αν ο χρήστης ορίσει νέες τιμές στις διάφορες διαστάσεις, τότε το σύστημα αναδημιουργεί τη νέα μορφή του αντικειμένου. Το σύστημα ελέγχει εσωτερικά τις νέες τιμές των διαστάσεων για να επαληθεύσει εάν οι τιμές είναι συμβατές με την αρχική τοπολογία και στη συνέχεια να αναδημιουργήσει το μοντέλο.

Ο σχεδιασμός του συστήματος σκίασης έγινε με τη χρήση του λογισμικού FreeCad ([www.freecadweb.org](http://www.freecadweb.org)). Αρχικά σχεδιάστηκε ένα δόντι του συστήματος, στη λειτουργία sketcher του λογισμικού, ως ένα πεντάγωνο με 4 πλευρές μήκους 1cm, εκ των οποίων οι 2 σχηματίζουν ορθή γωνία, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Σχήμα 4.2. Δόντι του συστήματος σκίασης

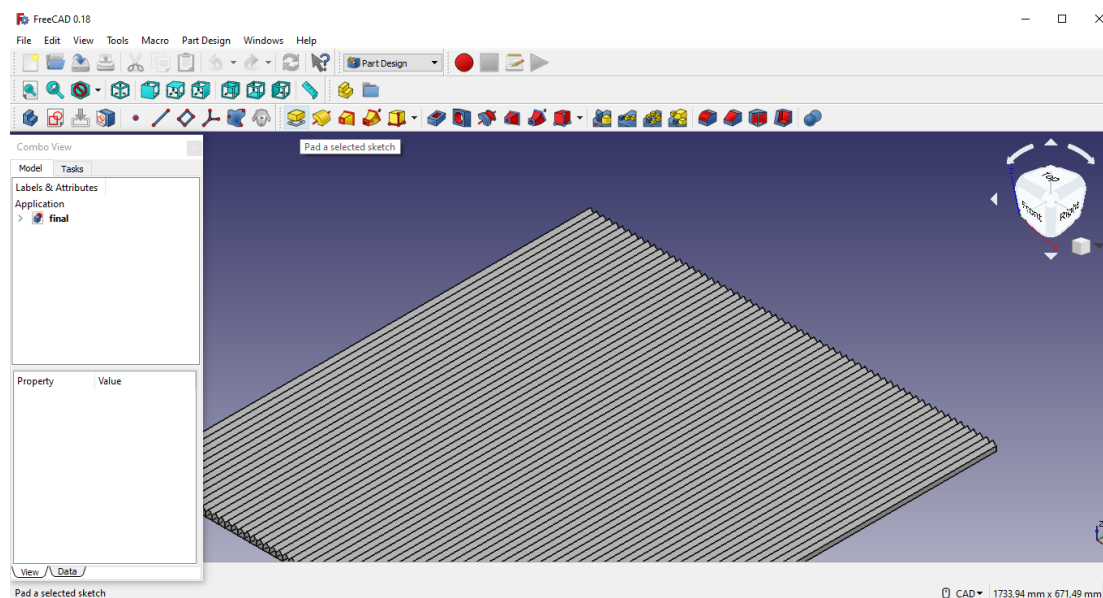
Στη συνέχεια, με τη λειτουργία clone, πολλαπλασιάζεται το δόντι, ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό αντικείμενο, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Συνολικά τοποθετούνται 64 δόντια και το συνολικό πλάτος είναι 90,51 cm.



Σχήμα 4.3. Δισδιάστατη γεωμετρία του συστήματος σκίασης

Το επόμενο βήμα στο λογισμικό FreeCad, είναι η μετατροπή του σχήματος από δισδιάστατη σε τρισδιάστατη γεωμετρία. Αυτό γίνεται με τη λειτουργία rad στην υποκατηγορία part design. Με τη λειτουργία αυτή δίνεται και το επιθυμητό

μήκος στο σύστημα μας, συγκεκριμένα 1 μέτρο, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 4.4. Τρισδιάστατη γεωμετρία του συστήματος σκίασης

#### 4.4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ (RAYTRACING)

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του στερεού μοντέλου του σκιάστρου εφαρμόστηκε η τεχνική ανίχνευσης ακτίνας (ray tracing) [18]. Σκοπός του ray tracing είναι η ελαχιστοποίηση των οπτικών αποκλίσεων. Τα υπολογιστικά προγράμματα που στηρίζονται στην προκαθορισμένη ακολουθία της ακτίνας, καλούνται προγράμματα διαδοχικού ray tracing. Κατά την προσέγγιση του διαδοχικού ray tracing δεν λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα διάχυσης του φωτός που προκύπτουν από τις εσωτερικές ανακλάσεις και την τραχύτητα των εσωτερικών επιφανειών. Τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν την απόδοση των οπτικών συστημάτων και για την ανάλυση τους έχει αναπτυχτεί μια νέα γενιά προγραμμάτων ray tracing, που ονομάζονται προγράμματα μη διαδοχικού ray tracing (non-sequential ray tracing). Τα προγράμματα αυτά λαμβάνουν υπόψη την φωτεινή ροή κάθε ακτίνας και είναι σε θέση να προσομοιώσουν τη μη-διαδοχική διάδοση του φωτός δια μέσω ενός οπτικού συστήματος.

Βασικός σκοπός των προγραμμάτων μη διαδοχικού ray tracing είναι ο υπολογισμός της χωρικής ή της κατευθυντικής κατανομής της φωτεινής ισχύος. Οι τιμές ενδιαφέροντος είναι συνήθως: η φωτεινή ροή  $\Phi$  (flux), η ακτινοβολία  $E$  (irradiance), και η ροή της ακτινοβολίας  $L$  (radiance). Η ανάλυση περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ισχύος σε μια ή και περισσότερες επιφάνειες ανίχνευσης. Οι επιφάνειες αυτές μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα πλήθος επιμέρους επιφανειών. Σε ορισμένες οπτικές διατάξεις εκτός από την εκτίμηση της ισχύος, είναι σημαντική και η εκτίμηση της πόλωσης του φωτός.

Η ανάλυση μη-διαδοχικού ray tracing ξεκινάει συνήθως με τον καθορισμό του οπτικού συστήματος. Για τη γεωμετρία του τελευταίου, χρησιμοποιούνται συνήθως τα κλασσικά εργαλεία σχεδίασης τρισδιάστατων στερεών μοντέλων. Για το λόγο αυτό, τα σύγχρονα προγράμματα μη διαδοχικού ray tracing παρέχουν τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων από αρχεία προγραμμάτων CAD. Σε αντίθεση με το διαδοχικό ray tracing, όπου η συνάρτηση του οπτικού συστήματος καθορίζεται αποκλειστικά από τον τύπο του οπτικού στοιχείου, στο μη διαδοχικό ray tracing είναι απαραίτητο να καθοριστούν προσεκτικά όλα τα συστατικά στοιχεία του συστήματος, καθώς αυτά συμβάλουν στην οπτική λειτουργία και στην απόδοση της διάταξης.

Επόμενο βήμα της ανάλυσης αποτελεί ο καθορισμός των οπτικών ιδιοτήτων των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν το οπτικό σύστημα. Οι ιδιότητες κάθε στοιχείου καθορίζονται από το δείκτη διάθλασης και το συντελεστή απορρόφησης. Επιπλέον, κάθε επιφάνεια έχει τις δικές της οπτικές ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται από τον συντελεστή τραχύτητας, την πολυστρωματική επικάλυψη και την περιθλαστική μικροδομή. Οι οπτικές ιδιότητες των επιφανειών μπορούν επίσης να καθοριστούν από την αμφίδρομη συνάρτηση κατανομής (bidirectional distribution function - BSDF). Σε κάθε περίπτωση, πριν από την εφαρμογή της προσομοίωσης ray tracing, πρέπει να είναι γνωστές οι ακριβείς οπτικές ιδιότητες κάθε στοιχείου.

Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται ο καθορισμός των επιπέδων ανίχνευσης. Τα επίπεδα αυτά αντιστοιχούν σε δεδομένα στοιχεία του συστήματος, μπορεί όμως να είναι και τυχαία επίπεδα ανίχνευσης, τα οποία εξυπηρετούν την



ανάλυση ray tracing σε μια συγκεκριμένη θέση στον χώρο. Η επιλογή του μεγέθους της ανάλυσης της ανίχνευσης (μέγεθος pixel) εξαρτάται από το είδος του οπτικού συστήματος και καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό των ακτινών ανίχνευσης.

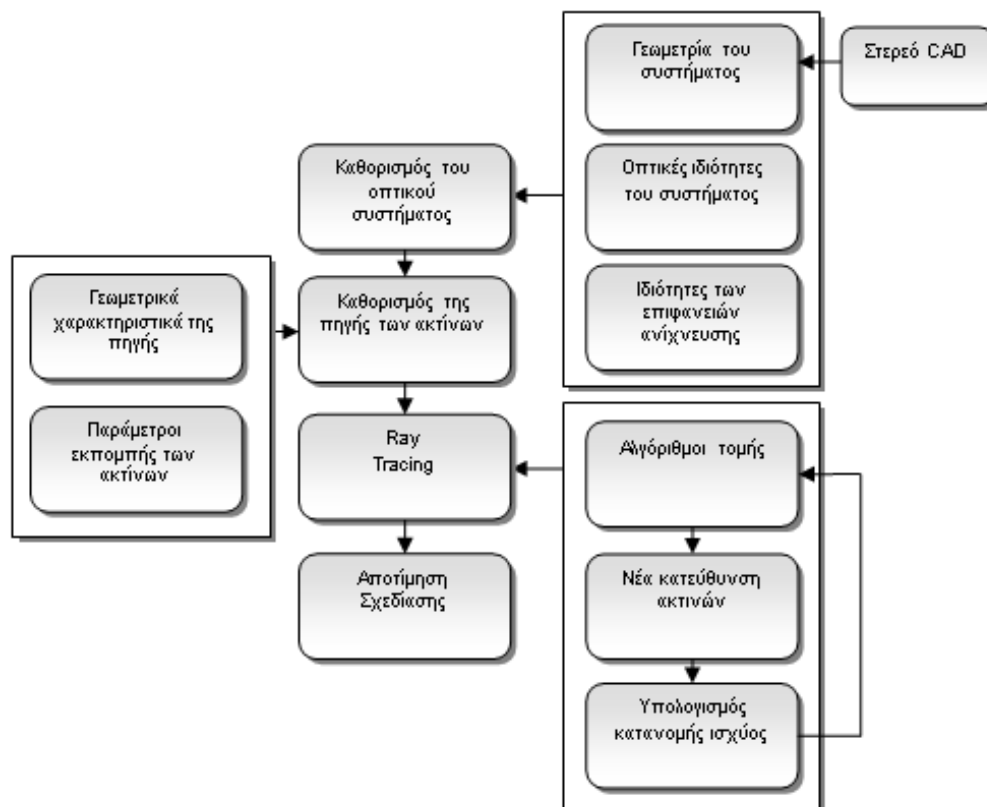
Για την επιτυχημένη προσομοίωση ray tracing ενός οπτικού συστήματος είναι απαραίτητος ο σωστός καθορισμός της πηγής των ακτινών. Η προσομοίωση της πηγής τους περιλαμβάνει την μοντελοποίηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια του σώματος εκπομπής. Για την προσομοίωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας συνήθως παράγονται ακτίνες σε τυχαίες κατευθύνσεις και λαμβάνεται η φωτεινή τους ροή σε συμφωνία με την ακτινοβολία στην κατεύθυνση διάδοσης. Μία άλλη προσέγγιση συνίσταται στον καθορισμό της κατεύθυνσης των ακτινών στατιστικά σε αντιστοιχία με την κατανομή της ακτινοβολίας, ενώ η φωτεινή ροή των ακτινών παραμένει σταθερή. Αυτές οι τεχνικές ray tracing αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία ως τεχνικές στοχαστικού ray tracing.

Κατά τη διαδικασία ray tracing παράγεται από την πηγή ένας πεπερασμένος αριθμός ακτινών. Ο αριθμός των παραγόμενων ακτινών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο της ανάλυσης. Εάν ο αριθμός των ακτινών είναι πάρα πολύ μικρός, η ακρίβεια της προσομοίωσης θα είναι μικρή. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο αριθμός παραγόμενων ακτινών είναι αρκετά μεγάλος, ο χρόνος υπολογισμού μπορεί να γίνει απαγορευτικός. Ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος, ο ιδανικός αριθμός παραγόμενων ακτινών μπορεί να ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια. Μία σωστή στρατηγική συνίσταται στην έναρξη της ανάλυσης με μικρό αριθμό ακτινών και στη σταδιακή αύξηση του αριθμού τους, έως ότου η κατανομή ισχύος στον αποδέκτη να συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή.

Οι ακτίνες που εκπέμπονται από την πηγή διαδίδονται ευθύγραμμα έως ότου συναντήσουν την πρώτη ανακλαστική ή διαθλαστική επιφάνεια. Η εύρεση της τομής ακτίνας-επιφάνειας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αναλυτικές είτε με αριθμητικές μεθόδους.

Τέλος, τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ray tracing χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της σχεδίασης του οπτικού συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές ενδιαφέροντος είναι: η κατεύθυνση των ακτίνων, η ένταση και η κατανομή του φωτός στον αποδέκτη και, σε μερικές εφαρμογές, η πόλωση των ακτίνων. Τα μεγέθη αυτά απεικονίζονται σε κατάλληλους χάρτες και διαγράμματα, με πιο χαρακτηριστικούς τους χάρτες ακτινοβολίας (irradiance maps) και τα πολικά διάγραμμα κατανομής φωτεινής έντασης (polar candela distribution plot).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης μη διαδοχικού ray tracing.



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης μη-διαδοχικού ray tracing

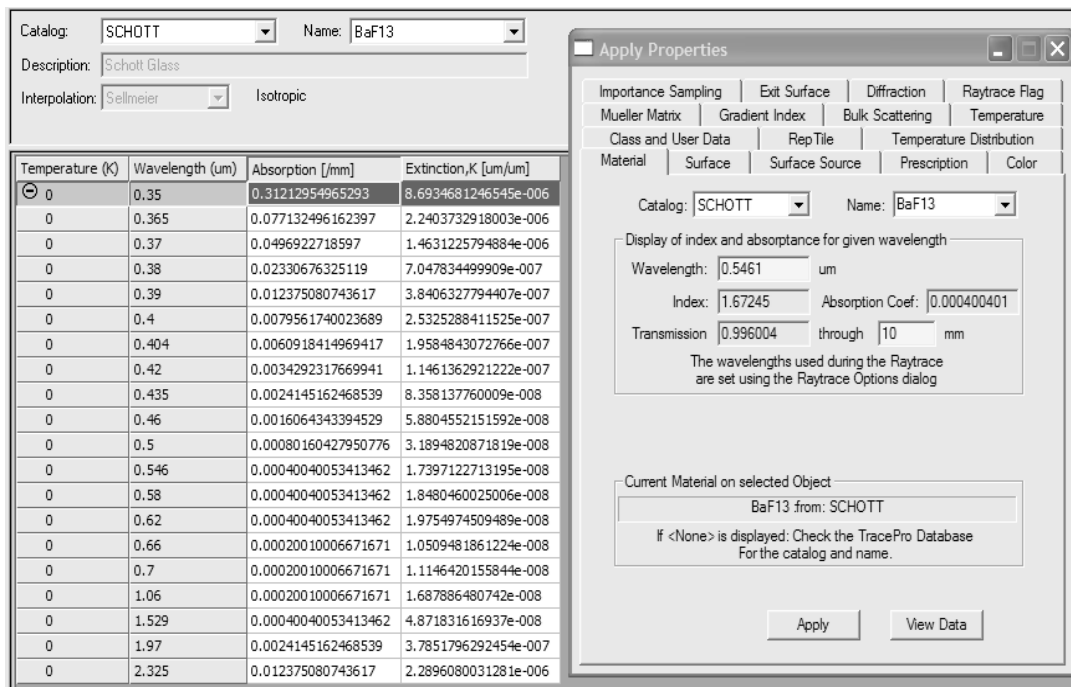
Για την εξέταση και την αξιολόγηση του κατόπτρου ολικής ανάκλασης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα TracePro της εταιρίας Lambda Research ([www.lambdare.com](http://www.lambdare.com)). Το TracePro αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης μη-διαδοχικού ray tracing, που χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία Monte Carlo και

τεχνικές βελτιστοποίησης (variance reduction techniques) με σκοπό την επιτάχυνση της εκτέλεσης των υπολογισμών. Το πρόγραμμα ενσωματώνει τον πυρήνα ανάπτυξης ACIS για την επεξεργασία στερεών μοντέλων και επιφανειών, ενώ διαθέτει και μεγάλο αριθμό βιβλιοθηκών για την απόδοση οπτικών χαρακτηριστικών στα εξεταζόμενα συστήματα.

#### **4.5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ RAYTRACING ΣΤΟ ΣΚΙΑΣΤΡΟ**

Η γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου του συστήματος εξάγεται σε αρχείο συμβατό με τον πυρήνα ανάπτυξης ACIS (αρχεία SAT), το οποίο εισάγεται στο πρόγραμμα οπτικής προσομοίωσης TracePro. Μέσα από το πρόγραμμα σχεδιάζεται κατάλληλη επιφάνεια αποδοχής στην πίσω πλευρά του σκιάστρου, στην οποία και θα αποτιμηθεί η σχεδίαση. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα περιστροφής του συστήματος ώστε να εξεταστούν διάφοροι προσανατολισμοί του.

Μετά από την εισαγωγή του συστήματος σκίασης ακολουθεί ο καθορισμός του δομικού υλικού, με σκοπό την απόδοση οπτικών ιδιοτήτων στο μοντέλο. Το πρόγραμμα TracePro διαθέτει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών από την οποία μπορεί να γίνει η επιλογή του κατάλληλου υλικού. Για την περίπτωση των πρισματικών σκιάστρων, τα υλικά άμεσου ενδιαφέροντος είναι το γυαλί και το ακρυλικό πλαστικό. Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται το τυπικό παράθυρο διαλόγου για την επιλογή του υλικού καθώς και οι λεπτομέρειες της επιλογής.



Σχήμα 4.6. Επιλογή υλικού του σκιάστρου και καθορισμός των οπτικών ιδιοτήτων του

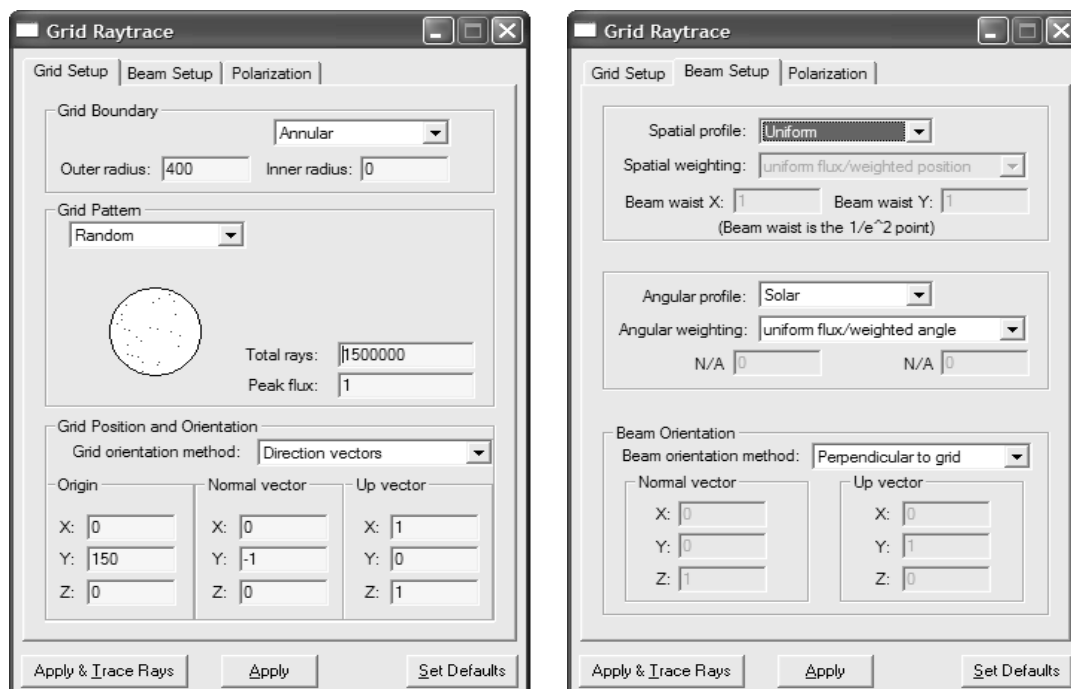
Στην συνέχεια, έχει σειρά ο καθορισμός της πηγής των ακτινών που προσομοιώνουν την ηλιακή ακτινοβολία για διάφορες θέσης της ηλιακής τροχιάς. Σύμφωνα με το μαθηματικό πρότυπο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1, υπολογίζονται η ζενίθια γωνία και η αζιμούθια γωνία.

Πίνακας 4.1. Γωνίες ζενίθ και αζιμούθιου

$\Theta_z(^{\circ})$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	163	159	149	138	126	114	103	92	81	72	65	60	59
Φ	155	152	143	133	121	110	98	86	76	66	58	53	51
M	145	142	135	126	115	103	91	80	68	58	49	43	40
A	133	131	125	117	107	96	84	72	61	49	39	32	28
M	123	122	117	109	100	90	79	67	55	43	32	23	19
I	119	117	113	106	97	87	76	65	53	41	30	20	15
I	121	119	115	107	98	88	77	66	54	42	31	21	17
A	129	127	121	114	104	93	82	70	58	47	36	28	24
Σ	140	138	131	122	112	100	89	77	65	54	45	38	36
O	152	149	141	131	119	108	96	84	73	63	55	50	47
N	161	157	148	137	125	113	101	90	80	71	63	59	57
Δ	165	160	150	139	127	115	104	93	83	74	67	63	61

$\gamma_s$ (°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	-180	-138	-115	-101	-90	-82	-73	-65	-55	-44	-31	-16	0
Φ	-180	-148	-125	-110	-98	-89	-80	-71	-61	-49	-35	-18	0
M	-180	-155	-135	-120	-108	-97	-88	-79	-69	-57	-41	-22	0
A	-180	-160	-143	-129	-117	-107	-97	-88	-78	-67	-51	-29	0
M	-180	-163	-148	-135	-124	-114	-105	-96	-87	-77	-62	-39	0
I	-180	-164	-150	-137	-127	-117	-109	-100	-92	-82	-69	-45	0
I	-180	-164	-149	-136	-125	-116	-107	-99	-90	-80	-66	-42	0
A	-180	-162	-145	-131	-120	-110	-101	-92	-82	-71	-56	-33	0
Σ	-180	-157	-138	-123	-111	-101	-92	-82	-72	-60	-45	-25	0
O	-180	-151	-129	-113	-101	-92	-82	-73	-63	-51	-37	-20	0
N	-180	-141	-118	-103	-92	-83	-75	-66	-56	-45	-32	-17	0
Δ	-180	-135	-111	-98	-88	-80	-71	-63	-53	-43	-30	-16	0

Επιπλέον, επιλέγεται γεωμετρική κατανομή πρόσπτωσης καθώς και κατανομή πραγματικού ηλιακού ειδώλου, στην οποία λαμβάνεται υπόψη η φαινόμενη γωνία του ηλιακού δίσκου. Τέλος, για τον περιορισμό του στατιστικού σφάλματος, επιλέγεται σχετικά μεγάλος αριθμός προσπιπτουσών ακτίνων (1,5 εκατομμύριο ακτίνες). Στο παρακάτω σχήμα εικονίζονται τυπικές επιλογές καθορισμού των στοιχείων της πηγής μέσα από το πρόγραμμα TracePro.

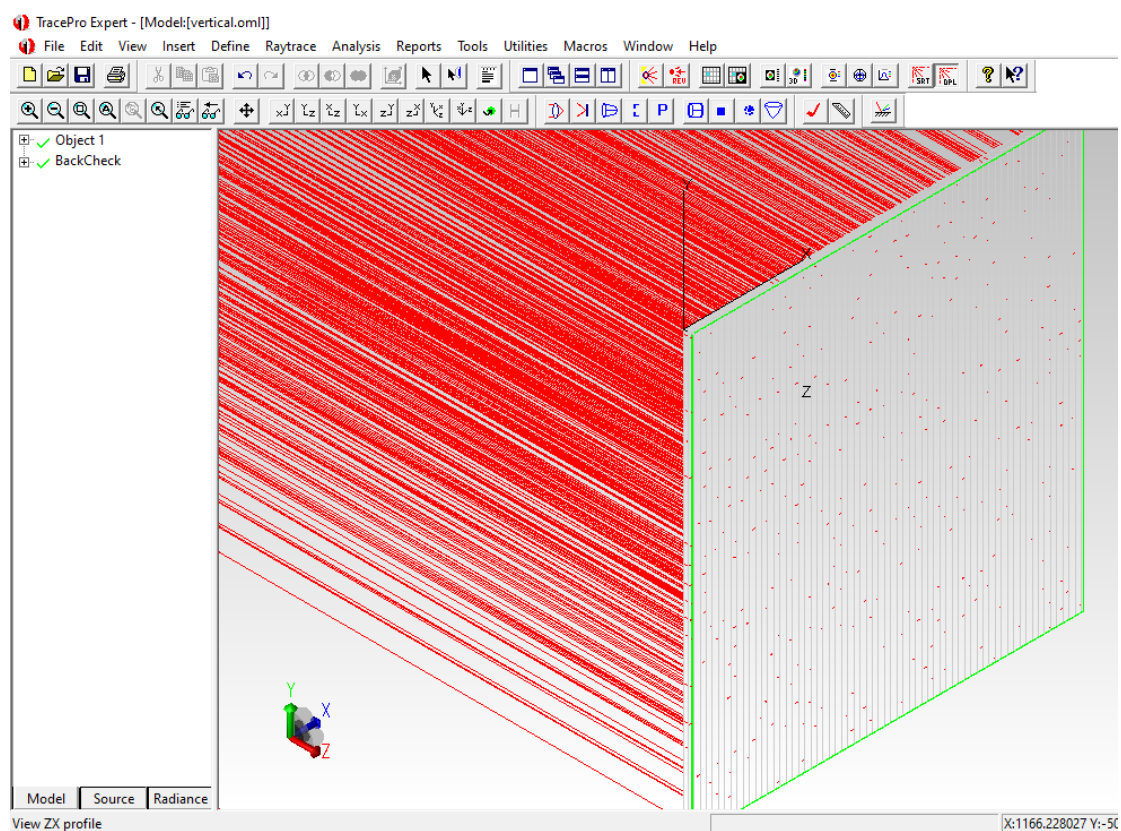


Σχήμα 4.7. Καθορισμός των χαρακτηριστικών στοιχείων της πηγής εκπομπής των ακτίνων

Για τον καθορισμό της ισχύος των ακτινών χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος και πραγματοποιείται αναγωγή των αποτελεσμάτων σε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας όπως υπολογίζονται από το σχετικό μοντέλο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών καθορισμού των χαρακτηριστικών του υλικού και της πηγής εκπομπής, ακολουθεί η εφαρμογή της προσομοίωσης ray tracing, τα αποτελέσματα της οποίας απεικονίζονται οπτικά στο τρισδιάστατο περιβάλλον του προγράμματος (Σχήμα 4.8).

Μέσα από τη διαδικασία ray tracing μπορεί τελικά να αξιολογηθεί η λειτουργία του πρισματικού συστήματος σκίασης καθώς και να εξεταστούν διάφοροι παράμετροι, όπως τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και το υλικό κατασκευής του (Κεφάλαιο 5)



Σχήμα 4.8. Τυπική οπτική απεικόνιση της εφαρμογής ray tracing στο σκίαστρο

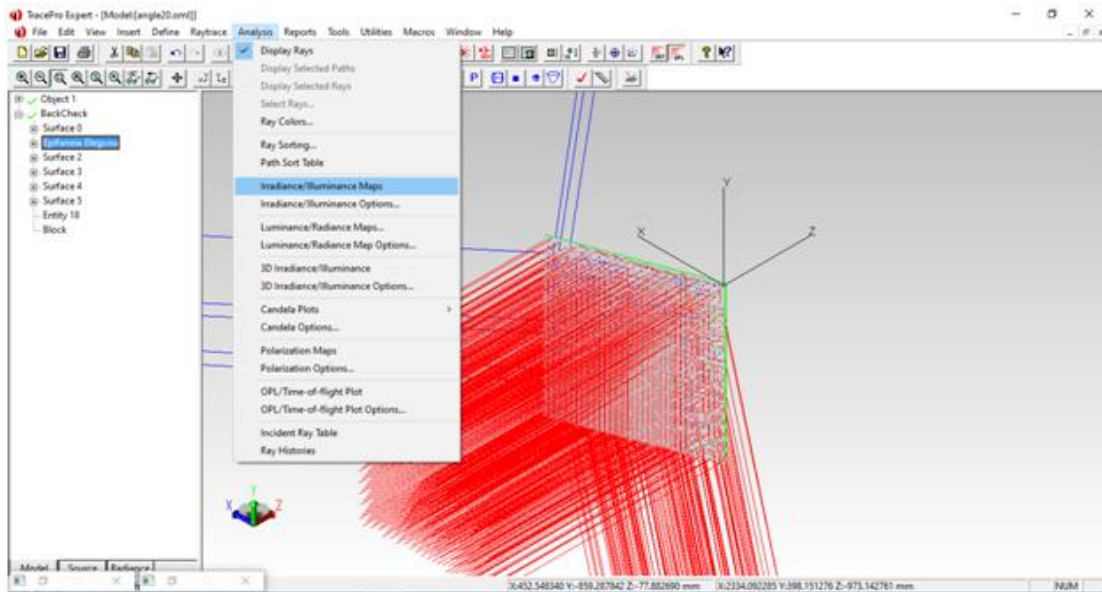
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **5.1. ΣΥΝΟΨΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης του συστήματος σκίασης με το λογισμικό προσομοίωσης ιχνηλάτησης ακτίνων TracePro, ενώ θα γίνουν οι αντίστοιχοι υπολογισμοί. Αρχικά θα γίνει βηματική μεταβολή της κλίσης του συστήματος κατά τους άξονες Y και X, και στη συνέχεια θα υπολογιστεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που διέρχεται από το σκιάστρο. Έπειτα θα γίνει ενεργειακή αποτίμηση για συγκεκριμένες κλίσεις για τους μήνες του έτους. Τέλος, θα εξεταστεί η περίπτωση διαμόρφωσης του σκιάστρου ως σύνθεση δυο επάλληλων πρισματικών πλακών και θα γίνει παραμετρική ανάλυση για την περιστροφή της νέας διαμόρφωσης κατά τον άξονα Y.

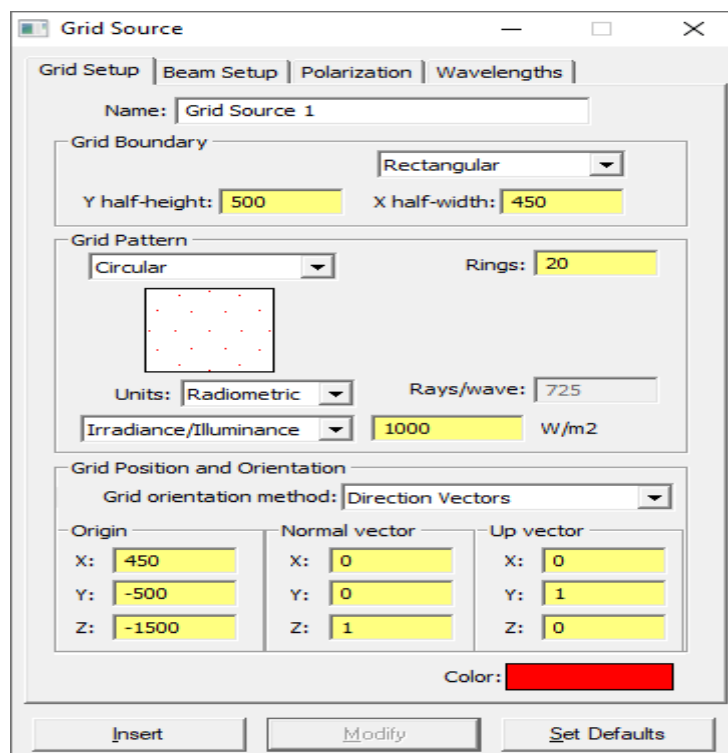
### **5.2. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y**

Αρχικά γίνεται εισαγωγή του σκιάστρου στο λογισμικό προσομοίωσης TracePro. Επιλέγεται το υλικό του σκιάστρου, το οποίο είναι το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (pmma). Στη συνέχεια, τοποθετείται επιφάνεια ελέγχου στο πίσω μέρος του σκιάστρου, ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό των ακτινών που φτάνουν στην επιφάνεια αυτή, μετά τη διέλευση των ακτινών στο εσωτερικό του σκιάστρου. Οι ακτίνες αρχικά προσπίπτουν στο σύστημα κάθετα ως προς τον άξονα X. Εξετάζεται η συμπεριφορά του σκιάστρου με βηματική περιστροφή 5 μοιρών ως προς τον άξονα Y. Τυπική εφαρμογή της προσομοίωσης με περιστροφή 20° εικονίζεται στο Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.1. Προσομοίωση κατά την περιστροφή του σκιάστρου κατά 20 μοίρες ως προς τον άξονα Y

Οι αρχικές συνθήκες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 725 ακτίνες ανά δοκιμή, με ποσότητα της άμεσης ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.2. Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας

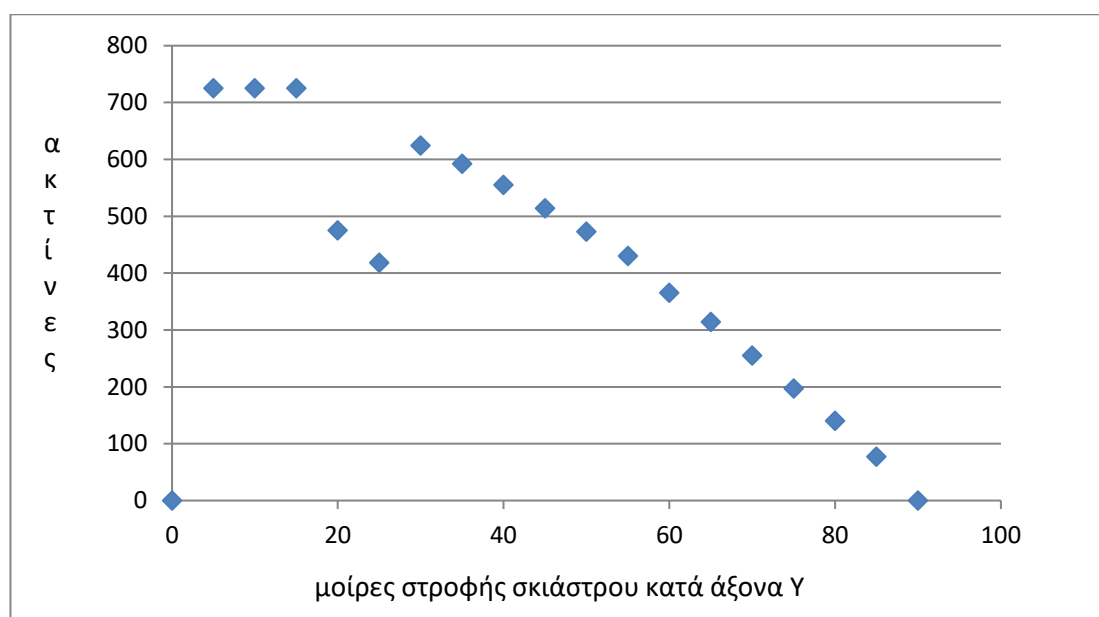


Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα προσομοιώσεων κατά την περιστροφή του σκιάστρου κατά άξονα Υ

Περιστροφή του σκιάστρου κατά άξονα Υ (μοίρες)	Αριθμός ακτινών που διέρχονται στην επιφάνεια ελέγχου	Ποσοστό ακτινών που διαπερνούν το σκιάστρο (%)
0	0	-
5	725	100
10	725	100
15	725	100
20	475	65,5
25	418	57,7
30	624	86,1
35	592	81,7
40	555	76,6
45	514	70,9
50	473	65,2
55	430	59,3
60	365	50,3
65	314	43,3
70	255	35,2
75	197	27,2
80	140	19,3
85	77	10,6
90	0	-

Τα παραπάνω αποτελέσματα οπτικοποιούνται στο ακόλουθο διάγραμμα:

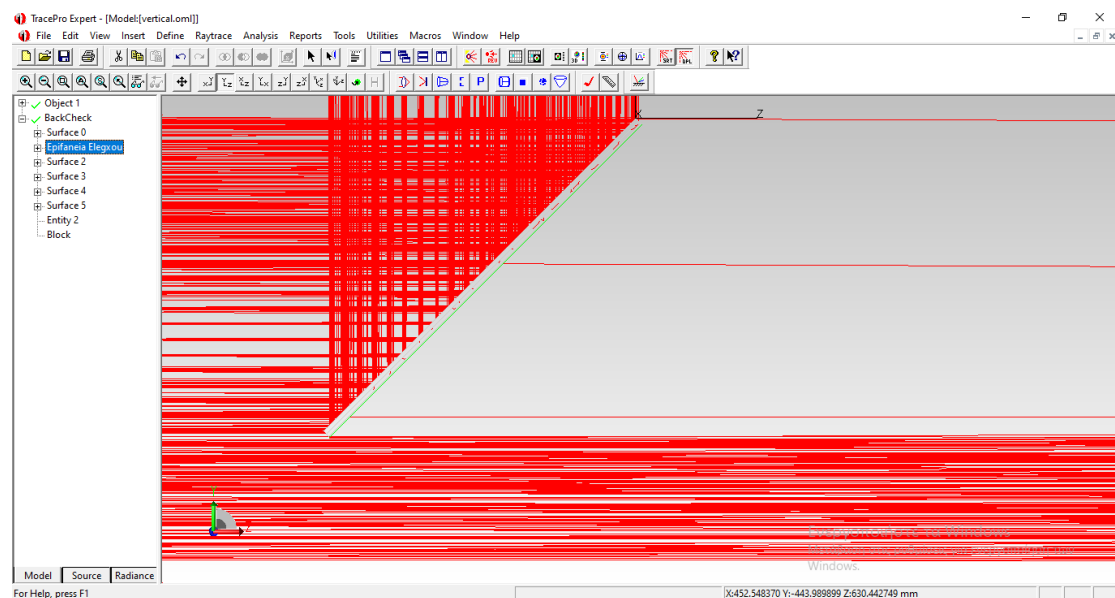


Σχήμα 5.3. Διάγραμμα ακτινών-μοιρών στροφής σκιάστρου

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι για πολύ μικρή κλίση του σκιάστρου σε σχέση με τον άξονα Υ, διέρχεται από αυτό το σύνολο των ακτινών προς την επιφάνεια ελέγχου. Αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση, τόσο μικρότερη ποσότητα των ακτινών φτάνει στην επιφάνεια αυτή. Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι είναι πολύ σημαντική η τοποθέτηση του σκιάστρου κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να ακολουθείται η πορεία του ηλίου από την ανατολή προς τη δύση, για την επίτευξη όσο δυνατόν καλύτερης ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

### 5.3. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ

Στη συνέχεια ακολουθεί η διεξαγωγή προσομοιώσεων με τα ίδια δεδομένα ακτινοβολίας, αλλά αυτή τη φορά με περιστροφή του σκιάστρου κατά τον άξονα Χ, κατά 5 μοίρες σε κάθε δοκιμή.



Σχήμα 5.3. Προσομοίωση κατά την περιστροφή του σκιάστρου κατά 45 μοίρες ως προς τον άξονα Χ

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων κατά την περιστροφή του σκιάστρου κατά άξονα X

Περιστροφή του σκιάστρου κατά άξονα X (μοίρες)	Ακτίνες που διέρχονται στην επιφάνεια ελέγχου	Ποσοστό ακτινών που διαπερνούν το σκιάστρο (%)
0	0	-
5	1	0,14
10	0	-
15	0	-
20	3	0,41
25	2	0,28
30	2	0,28
35	2	0,28
40	5	0,69
45	1	0,14
50	0	-
55	1	0,14
60	0	-
65	3	0,41
70	8	1,1
75	4	0,55
80	5	0,69
85	4	0,55
90	4	0,55

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι κατά την περιστροφή του σκιάστρου κατά τον άξονα X, δηλαδή κατά την αλλαγή του ηλιακού ύψους, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα η ολική εσωτερική ανάκλαση που γίνεται στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα να μην περνάει σχεδόν καμία ακτίνα στην επιφάνεια ελέγχου στο πίσω μέρος του σκιάστρου. Οι τιμές αποκλίνουν από το 0 καθώς είναι πιθανή η ύπαρξη σφάλματος στην εισαγωγή των διαστάσεων του σκιάστρου και της επιφάνειας ελέγχου στο πρόγραμμα προσομοίωσης των ακτινών.

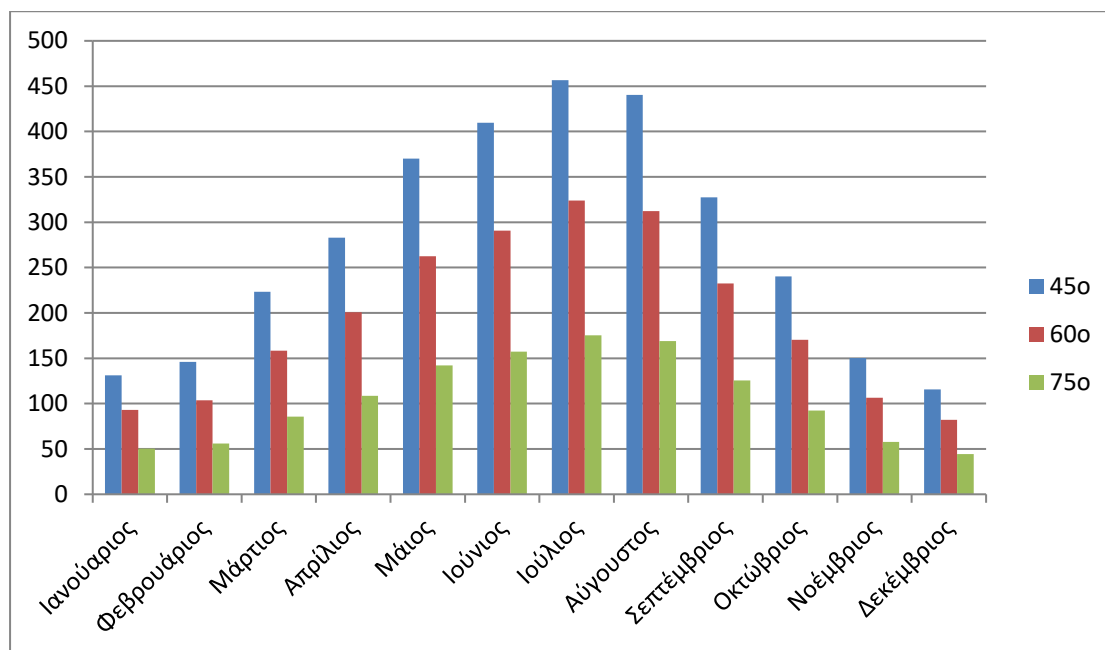
## 5.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά των ακτινών που διέρχονται στην επιφάνεια ελέγχου, ανάλογα με την κλίση του σκιάστρου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα της ακτινοβολίας που διέρχεται από αυτό, ανάλογα με τον μήνα του χρόνου. Για τον υπολογισμό αυτό, χρησιμοποιούνται οι μετρήσεις των μέσων τιμών άμεσης ακτινοβολίας για κάθε μήνα, στις 12:00, οπότε και οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν σχεδόν κάθετα στην επιφάνεια. Η ανάλυση γίνεται για δεδομένα ακτινοβολίας της Αττικής και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων για την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια ελέγχου κατά μέσο όρο κάθε μήνα, μετρημένη σε  $W/m^2$  ανάλογα με την κλίση του σκιάστρου:

Πίνακας 5.4. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια ελέγχου ανάλογα τον μήνα και την κλίση του σκιάστρου ως προς τον άξονα Υ.

Κλίση/Μήνας	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάιος	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπτ.	Οκτ.	Νοεμ.	Δεκ.
5	185	206	315	399	522	578	644	621	462	339	212	163
10	185	206	315	399	522	578	644	621	462	339	212	163
15	185	206	315	399	522	578	644	621	462	339	212	163
20	121,2	134,9	206,3	261,3	341,9	378,6	421,8	406	302,6	222	138,9	106,8
25	106,7	118,9	181,8	230,2	301,2	333,5	371,6	358,3	266,6	195,6	122,3	94,1
30	159,3	177,4	271,2	343,5	449,4	497,7	554,5	534,7	397,8	291,9	182,5	140,3
35	151,1	168,3	257,4	326	426,5	472,2	526,1	507,4	377,5	277	173,2	133,2
40	141,7	157,8	241,3	305,6	399,9	442,7	493,3	475,7	353,9	259,7	162,4	124,9
45	131,2	146,1	223,3	282,9	370,1	409,8	456,6	440,3	327,6	240,4	150,3	115,6
50	120,6	134,3	205,4	260,1	340,3	376,9	419,9	404,9	301,2	221	138,2	106,3
55	109,7	122,2	186,8	236,6	309,5	342,8	381,9	368,3	274	201	125,7	96,7
60	93,1	103,6	158,4	200,7	262,6	290,7	323,9	312,4	232,4	170,5	106,6	82
65	80,1	89,2	136,4	172,8	226	250,3	278,9	268,9	200	146,8	91,8	70,6
70	65,1	72,5	110,9	140,4	183,7	203,4	226,7	218,6	162,6	119,3	74,6	57,4
75	50,3	56	85,7	108,5	142	157,2	175,2	168,9	125,7	92,2	57,7	44,3
80	35,7	39,7	60,8	77	100,7	111,6	124,3	119,9	89,2	65,4	40,9	31,5
85	19,6	21,8	33,4	42,3	55,3	61,3	68,3	65,8	49	35,9	22,5	17,3

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνουμε ότι κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, διέρχεται η μεγαλύτερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας από το σκιάστρο στην επιφάνεια ελέγχου. Το ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνει τις τιμές αυτές για κλίση του σκιάστρου κατά 45, 60 και 75 μοίρες ως προς τον άξονα Υ.



Σχήμα 5.4. Μέση ένταση ακτινοβολίας που διέρχεται στην επιφάνεια ελέγχου τους μήνες του χρόνου, για 3 διαφορετικές κλίσεις του σκιάστρου ως προς τον άξονα Υ.

## 5.5. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΔΙΠΛΟΥ ΣΚΙΑΣΤΡΟΥ ΚΑΤΑ ΑΞΟΝΑ Υ

Στη συνέχεια τοποθετείται όμοιο σύστημα σκίασης, με ίδιες διατάξεις και σε απόσταση 5 εκατοστών από το ήδη υπάρχον. Επομένως έχει σχηματιστεί ένα σύστημα με 2 σκιάστρα ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Τα σκιάστρα περιστρέφονται ταυτόχρονα, μαζί και με την επιφάνεια ελέγχου, κατά 5 μοίρες ως προς τον άξονα Υ για κάθε δοκιμή. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Περιστροφή του σκιάστρου κατά άξονα Υ (μοίρες)	Ακτίνες που διέρχονται στην επιφάνεια ελέγχου	Ποσοστό ακτινών που διαπερνούν το διπλό σκίαστρο (%)
0	0	-
5	725	100
10	725	100
15	678	93,5
20	419	57,8
25	13	1,8
30	478	65,9
35	614	84,7
40	546	75,3
45	417	57,5
50	286	39,4
55	321	44,3
60	367	50,6
65	375	51,7
70	253	34,9
75	200	27,6
80	145	20
85	75	10,3
90	0	-

Παρατηρείται ότι για το μεγαλύτερο εύρος γωνιών, οι μετρήσεις με την τοποθέτηση ενός ή 2 σκιάστρων είναι παρόμοιες. Ιδιαίτερη εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι στις 25° διέρχονται απειροελάχιστες ακτίνες, γεγονός που οφείλεται στη γεωμετρία του συστήματος. Και στη συγκεκριμένη περίπτωση, επομένως, με την τοποθέτηση δύο πανομοιότυπων σκιάστρων, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία κλίσης του συστήματος, τόσο λιγότερες ακτίνες διέρχονται προς την επιφάνεια ενδιαφέροντος.

## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία η έρευνα περιορίστηκε στη μελέτη της πρόσπτωσης των ακτινών του Ήλιου κάθετα προς το πρισματικό σύστημα σκίασης και της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη βηματική περιστροφή του.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η διεξαγωγή οπτικών προσομοιώσεων για όλο το εύρος της ηλιακής τροχιάς λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή των κινήσεων του ήλιου. Το λογισμικό προσομοίωσης TracePro διαθέτει για το σκοπό αυτό ειδικό εργαλείο ανάλυσης, το οποίο δεν ήταν διαθέσιμο στην έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία. Ενδεικτικά, προτείνεται η μελέτη της συμπεριφοράς συνδυαστικών πρισματικών συστημάτων σκίασης (π.χ πολυστρωματικές διατάξεις), ενώ χρήσιμη θα ήταν και η μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά (π.χ γυαλί, πολυκαρβονικό κτλ.), για την εύρεση της βέλτιστης επιλογής.

Συμπερασματικά, με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας μπορούν να σχεδιαστούν ειδικά συστήματα σκίασης κτηρίων και να εξαχθούν πολύτιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά τόσο στατικών όσο και κινούμενων διατάξεων οδηγώντας στη βελτίωση της τεχνολογικής στάθμης των υφιστάμενων συστημάτων σκίασης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

1. Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. 4th ed. New York: Wiley; 2013
2. Σαχσαμάνογλου Χ., Μακρογιάννης Τ., Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας. Αθήνα: Εκδόσεις Art of Text, 2004.
3. ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2009
4. 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, Pages 293-302, 1982.
5. Young, H.D. Freedman, R., Πανεπιστημιακή φυσική, Τόμος Β: Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική, 3<sup>η</sup> Ελληνική Έκδοση, Εκδόσεις Παπαζήση, 2019.
6. Eugene Hecht, “Οπτική”, Schaum’s Outline Series, McGraw-Hill, NY, 1979.
7. ASHRAE Handbook – Fundamentals, ISBN:1939200598, May, 2017
8. Olgyay, A., Solar control & shading devices. Princeton, Princeton University Press, 1957.
9. Seeger, B.I., Optical control of sunlight at window and door openings with controlled positioning of composite transparent materials to eliminate glaring sunlight rays while providing normal daylight illumination, US Patent 3,438,699, 1969.
10. Bartenbach, C. Protection device against solar light, US, Patent 4,517,960, 1983.
11. Murphy, J.A. and Campbell, D.K., Venetian blinds having prismatic reflective slats, US Patent 4,773,733, 1988.
12. Lorenz, W., Pane for solar protection, daylighting and energy conservation, US Patent 6,311,437, 2001.
13. Koster, H., Sun protection installation comprising sun protection lamellae having a toothed upper side. US Patent 6,367,937, 2002.
14. Lee, E.S., DiBartolomeo, D.L. and Selkowitz, S.E., Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office, Energy and Buildings, 29(1), 47–63, 1998.



15. Kuhn, T.E., Buhler, C. and Platzer, W.J., Evaluation of overheating protection with sun-shading systems. *Solar Energy*, 69(Suppl. 6), 59–74, 2000.
16. Reinhart, C., Mardaljevic, J. and Rogers, Z., Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design, *Leukos*, 3(1), 7–31, 2006.
17. Pfrommer, P., Lomas, K.J. and Kupke, C., Solar radiation transport through slat-type blinds: a new model and its application for thermal simulation of buildings. *Solar Energy*, 57(2), 77–91, 1996.
18. Glassner A.S., *An introduction to ray tracing*, Elsevier Science & Technology, 1989.