

ΤΙΤΛΟΣ

**ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ  
ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ  
ΓΡΑΦΕΙΩΝ**

ΤΟΥ

**ΚΟΝΤΑΔΑΚΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ, ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ, Μ.Sc.**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**Δρ ΤΣΑΓΚΡΑΣΟΥΛΗΣ ΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Δρ ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΣ ΤΟΠΑΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Δρ ΘΑΝΟΣ ΤΖΕΜΠΕΛΙΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΠΟΥ ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΤΙΤΛΟΥ  
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ (PH.D.)**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
10/2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει εκτεταμένη έρευνα για τη δημιουργία χώρων εργασίας που χρησιμοποιούν τον φυσικό φωτισμό (φ.φ., natural light) ως την κύρια πηγή φωτισμού. Οι άνθρωποι έχουν μια φυσική έλξη στο φως της ημέρας και τείνουν να προτιμούν χώρους που είναι φωτισμένοι με φυσικό τρόπο (daylit spaces) από εκείνους που είναι τεχνητά. Οι βελτιώσεις των φωτιστικών σωμάτων, των πηγών φωτισμού, των συστημάτων ελέγχου, των ηλεκτρονικών ρυθμιστών και της τεχνολογίας αυτόματης ρύθμισης των επιπέδων φωτισμού, έχουν επηρεάσει τις ενδεδειγμένες πρακτικές σχεδιασμού σε τέτοιο βαθμό ώστε η χρήση φ.φ. σε έναν χώρο να θεωρείται συχνά ως ένα μεγάλο βαθμό προαιρετική.

Λαμβάνοντας υπόψιν την τάση που επικρατεί στις μέρες μας, με την αύξηση του κόστους της ενέργειας καθώς επίσης και της αυξανόμενης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, ζητήματα εξοικονόμησης ενέργειας και διατήρησης των ενεργειακών πόρων αποτελούν θέματα που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κυβερνητική πολιτική σε κάθε έθνος του πλανήτη. Για τον σκοπό αυτό έχουν αναδειχθεί κυβερνητικά, θεσμικά, κοινωνικά και οικονομικά κίνητρα που καθοδηγούν την ανάπτυξη και υιοθέτηση μεταξύ άλλων, προηγμένων τεχνικών φυσικού φωτισμού για τη μείωση των ηλεκτρικών φορτίων για φωτισμό στα κτίρια που χρησιμοποιούνται κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Επιπρόσθετα παρουσιάζονται διαρκώς έρευνες αναφορικά με την υγεία, την ικανοποίηση των χρηστών και την παραγωγικότητα των εργαζομένων που σχετίζονται και επηρεάζονται άμεσα από την παρουσία φ.φ. και την έκθεση στο ηλιακό φως μέσα σε έναν χώρο. Εντούτοις, η ενσωμάτωση του φυσικού φωτισμού σε μια στρατηγική σχεδιασμού, εξακολουθεί να είναι περίπλοκη καθώς η ένταση, η μεταβλητότητα που παρουσιάζει και το θερμικό φορτίο που σχετίζονται κυρίως με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το μέγεθος των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων και να οδηγήσουν σε σοβαρά προβλήματα άνεσης των χρηστών (θερμικής και οπτικής), εάν δεν ληφθούν πρόσθετα βήματα για την μείωση ή τον έλεγχο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ιστορικά, η χρήση φυσικού φωτισμού (φ.φ.) υπήρξε ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες επιρροής κατά τον σχεδιασμό και κατασκευή των κτιρίων. Το φως της ημέρας (Daylight) και το φως του ήλιου (sunlight) χαρακτηρίζονται από συνεχή αλλαγή, με την ποιότητα και την ποσότητα του φωτισμού να ποικίλλει καθόλη τη διάρκεια των εποχών αλλά

και κατά τη διάρκεια της ημέρας, από το πρωί έως το ηλιοβασίλεμα. Είναι γνωστό ότι η διαδρομή του ήλιου στον ουράνιο θόλο εξαρτάται από την εποχή του χρόνου και την ώρα της ημέρας. Συνεπώς, περιοχές και εσωτερικοί χώροι ενός κτιρίου μπορεί να φωτίζονται ποικίλος, ενώ ο προσανατολισμός θα προσδώσει μια ιδιαίτερη σχέση με τον ήλιο. Σε αντίθεση με τον φ.φ., ο τεχνητός προσδίδει στον χώρο ομοιομορφία διατηρώντας σταθερή ένταση με μια συγκεκριμένη φασματική κατανομή. Η σύζευξη φ.φ. με τον τεχνητό, με τη ζωτικότητα του και τη συνεχώς μεταβαλλόμενη κατανομή λαμπροτήτων, παρέχει στο εσωτερικό περιβάλλον μια αισθητική αναβάθμιση.

Περιοχές μακριά από τις περιμετρικές ζώνες (θέσεις που βρίσκονται κοντά στα παράθυρα) που φωτίζονται από ένα πλευρικό σύστημα ανοιγμάτων (side-lighted systems), είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν θα έχουν ικανοποιητική απόδοση όσον αφορά τα επίπεδα φ.φ., καθώς οι περιοχές αυτές τείνουν να δέχονται σημαντικά χαμηλότερες τιμές φωτισμού στον χώρο μέσω των ανοιγμάτων. Για χώρους που υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο εμβαδόν, διαμόρφωση παραθύρου, προσανατολισμό, εξωτερικά εμπόδια (πχ. κτίρια και δέντρα) κ.λπ. το αποτέλεσμα ακόμη και με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών φ.φ. δεν μπορεί να διατηρήσει αποτελεσματικά και αποδοτικά τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού μέσα στον χώρο.

Το φυσικό φως που εισέρχεται μέσα σε ένα χώρο είναι το άθροισμα: της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (από τον ήλιο), το διάχυτο φως από την ατμόσφαιρα, τα εξωτερικά εμπόδια κ.λπ. και το φως που προέρχεται από ανακλάσεις στις εσωτερικές επιφάνειες του χώρου. Σε αποστάσεις που βρίσκονται μακριά από το άνοιγμα, το μέρος του φωτισμού που οφείλεται στις εσωτερικές ανακλάσεις καθίσταται η κυρίαρχη πηγή φωτισμού και ο πυρήνας του χώρου συχνά απαιτεί επιπλέον υποστήριξη από τον τεχνητό φωτισμό. Είναι προφανές ότι σε μεγάλους σε έκταση εσωτερικούς χώρους το φως της ημέρας δεν μπορεί να υποκαταστήσει τον ηλεκτρικό φωτισμό, ακόμη και σε χρονικές περιόδους όπου η ηλιοφάνεια είναι μεγάλη.

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός κτιρίου, υπάρχει πάντοτε η προσπάθεια να αυξηθεί η περιοχή φυσικού φωτισμού εντός του χώρου και η έρευνα έχει δείξει ότι τα κατακόρυφα ανοίγματα (τυπικών διαστάσεων) μπορούν επαρκώς και αποτελεσματικά να φωτίσουν έως περίπου και 5 m (εκτίμηση βασισμένη στο πρότυπο EN 15193-1:2017) από το παράθυρο στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ περιοχές που βρίσκονται μακρύτερα από το άνοιγμα είναι συχνά λιγότερο φωτισμένες και εξακολουθούν να χρειάζονται πρόσθετη υποστήριξη από τον τεχνητό φωτισμό. Προσπάθειες επέκτασης της ζώνης φ.φ. και ως εκ τούτου της περιοχής

ελέγχου του τεχνητού φωτισμού από την αύξηση του μεγέθους του παραθύρου, συνοδεύονται συνήθως από δυσανάλογη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας στο μπροστινό μέρος του χώρου χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη αύξηση των κερδών στο πίσω μέρος. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του ενεργειακού ισοζυγίου με ανεπιθύμητα αποτελέσματα όπως την αύξηση των ψυκτικών φορτίων. Επιπλέον, η μη-ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού εντός του χώρου, μαζί με την πιθανότητα παρουσίας θάμβωσης (glare), μπορεί να οδηγήσει σε ένα δυσάρεστο περιβάλλον από πλευράς φωτισμού για τους χρήστες (οπτική όχληση).

Οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές φ.φ. θα μπορούσαν να είναι η βελτιστοποίηση του προσανατολισμού και της μορφής του κτιρίου καθώς και η βελτιστοποίηση του μεγέθους και της τοποθέτησης των ανοιγμάτων. Όμως, λόγω των πολλών περιορισμών, όπως η πυκνότητα δόμησης του αστικού περιβάλλοντος, των εξωτερικών εμποδίων, της εσωτερικής διαμόρφωσης των χώρων κ.λπ., είναι όλο και πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές που αφήνουν το φυσικό φως να διεισδύσει βαθιά μέσα στον εσωτερικό χώρο. Ευτυχώς, οι νέες τεχνολογίες καθίστανται όλο και πιο διαθέσιμες, επιτρέποντας στο φως της ημέρας να εισέλθει στο χώρο και να φθάσει σε περιοχές που βρίσκονται απομακρυσμένες από τις περιμετρικές ζώνες φθάνοντας ακόμη και στο εσωτερικό (πυρήνα) πολυώροφων κτιρίων.

Οι τεχνολογίες συστημάτων μεταφοράς φ.φ. βασίζονται κυρίως στην άμεση συνιστώσα του φωτός από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία) ως πηγή φωτισμού και αποτελούν το επίκεντρο αυτής της διδακτορικής διατριβής. Ο πρωταρχικός στόχος ήταν η διερεύνηση των συστημάτων μεταφοράς φ.φ., δίνοντας έμφαση κυρίως στα πλευρικά συστήματα (side-lighting systems) και ειδικότερα στα ηλιοστατικά συστήματα, με σκοπό την επίτευξη βελτιωμένων αποτελεσμάτων όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και την αποδοτικότητα τους στις περιοχές μακριά από τις περιμετρικές ζώνες μέσω της χρήσης θεωρητικών μοντέλων, πειραματικών μετρήσεων και εφαρμοσμένης ανάλυσης. Τελικά, χρησιμοποιώντας τις αποκτηθείσες γνώσεις, ένα πρωτότυπο ηλιοστατικό σύστημα σχεδιάστηκε και η απόδοση του αξιολογήθηκε σε έναν τυπικό χώρο γραφείου.

Οι κύριοι στόχοι της διατριβής μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις (3) κατηγορίες.

- α. Διερεύνηση των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν τον σχεδιασμό με χρήση του φ.φ. και την έκταση της περιοχής φ.φ., όπως ορίζεται από τα ισχύοντα πρότυπα και κανονισμούς σε χώρους με κατακόρυφα ανοίγματα.



- β. Η παροχή πληροφοριών σχετικά με καινοτόμες τεχνολογίες φυσικού φωτισμού για τη μεταφορά του στο εσωτερικό των χώρων και τις μεθόδους που εφαρμόζονται δίνοντας έμφαση στα συστήματα διαχείρισης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και στα ηλιοστατικά συστήματα.
- γ. Η παρουσίαση ενός καινοτόμου ηλιοστατικού συστήματος και η κατασκευή μίας πρωτότυπης ηλιοστατικής συσκευής.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, ακολουθήθηκαν τα ακόλουθα βήματα:

1. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αναφορικά με τις περιμετρικές ζώνες (ζώνες φ.φ.).
2. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας των καινοτόμων συστημάτων φυσικού φωτισμού και μελέτης της βιβλιογραφίας για τα ράφια φωτισμού που βασίζονται κυρίως στην διαχείριση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.
3. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στα ηλιοστατικά συστήματα.
4. Σχεδίαση και ανάπτυξη ενός καινοτόμου ηλιοστατικού συστήματος και αξιολόγηση των επιπτώσεων από πλευράς επιπέδων φ.φ. και εξοικονόμησης ενέργειας.
5. Προσδιορισμός των παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός ηλιοστατικού συστήματος.
6. Ανάπτυξη ενός πρωτότυπου ηλιοστατικού συστήματος μεταφοράς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται ένα καινοτόμο σύστημα μεταφοράς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί μια σειρά κινητών καθρεπτών ικανών να εντοπίζουν τις καθημερινές κινήσεις του ήλιου. Η συσκευή προβάλλει το ανακλώμενο ηλιακό φως σε μια συγκεκριμένη περιοχή (στόχος) πάνω στην οροφή του εσωτερικού του χώρου για την αύξηση των επιπέδων φωτισμού στην περιοχή εργασίας. Το σύστημα αποτελείται από ένα ράφι (το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί στο παράθυρο) και χρησιμοποιεί μια ηλιοστατική συστοιχία σχετικά μικρών ορθογώνιων συλλεκτών. Η συστοιχία των συλλεκτών (κατόπτρων) ιχνηλατεί τις κινήσεις του ήλιου εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο ηλιακής παρακολούθησης διπλού-άξονα (ηλιακή ιχνηλάτηση) για τον προσανατολισμό και την τοποθέτηση των συλλεκτών. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ο αναπροσανατολισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην οροφή του χώρου σε προκαθορισμένη θέση, σε περιοχές όπου η διείδυση της ημέρας είναι περιορισμένη, παρέχοντας υψηλότερα επίπεδα φωτισμού στο επίπεδο εργασίας στο πίσω μέρος του χώρου.

**Λέξεις κλειδιά:** Φυσικός φωτισμός (φ.φ.), εξελιγμένα συστήματα φ.φ., συστήματα μεταφοράς φ.φ., τεχνικές φ.φ., δυναμικά συστήματα, ράφια φωτισμού, ιχνηλάτηση του ήλιου, ηλιοστατικά συστήματα, εξοικονόμηση ενέργειας, κτίρια γραφείων.

## **ABSTRACT**

Over the years, extensive research has been carried out in the creation of working environments, that utilize natural light as the primary source of illumination. People have a natural attraction to daylight and tend to prefer daylit spaces to those that are artificially lit. Improvements in electric fixtures, light sources, control systems, electronic ballasts and dimming technology have influenced standard design practices to such a degree that allowing natural sunlight into a room is often seen as a liability.

In the current climate of increasing energy prices and rising environmental awareness, energy conservation and resource preservation issues are a topic of governmental policy discussions for every nation on the planet. Governmental, institutional, social, and economic incentives have emerged guiding the development and adoption of advanced daylighting techniques to reduce electric lighting loads in buildings used primarily during the day.

A growing body of research demonstrates numerous health, occupant satisfaction, worker productivity and product sales benefits associated with natural lighting and exposure to sunlight. However, incorporating natural light into a lighting strategy is still complicated and risky as the intensity, variability and thermal load associated with sunlight can significantly impact mechanical systems and lead to serious occupant comfort issues if additional steps are not taken to attenuate or control direct sunlight.

Historically, the role of providing natural lighting to a building has been one of the most influential factors in the design and construction of buildings. Daylight and sunlight are characterized by constant change, with the quality and quantity of the light varying throughout seasons, and throughout the day from daybreak until sunset. It is known that the path of the sun varies with the time of the year and, with the time of day. Thus, in any given place, a building may be seen under many kinds of lighting, while its orientation will give it a special relationship to the sun. In contrast to natural light, artificial light strives to give uniform illumination by maintaining a constant intensity with a spectral distribution. The addition of supplemental natural light to artificial light, with its vitality and ever-changing state, provides the environment with an aesthetic appearance.

Areas away from the perimeter zones (places located near the windows) that are illuminated by a side-lighted system is certain to poorly perform in terms of daylight, as these areas tend to receive significantly lower (if any?) illuminance values entering the space from the opening. For spaces exceeding a certain area; window configuration; orientation; external obstructions (i.e., surrounding buildings & trees) etc. this effect even with the use of modern daylighting techniques can be effectively and efficiently maintain the required illuminances. Daylight reaching the interior space is the sum of direct light, from the sun; reflected light by the atmosphere, sky, clouds, external obstructions, etc.; and inter-reflected light, which has been scattered from the internal surfaces of the space. At distances further from the opening the internally reflected component becomes the dominant source of illumination and the core of the space often still requires additional support from artificial lighting. It is obvious that in deep interiors daylight cannot substitute for all electric lighting, even on bright days.

During the design process, there is always an effort to increase the usable daylighting area and research has shown that vertical openings can sufficiently and effectively illuminate up to 5 m from the window-wall in most cases and areas further from the opening are often under-lit and still require additional support from artificial lighting. Attempts to extend the daylight area and as a result the area of lighting control from increasing the window area, introduces disproportional amount of solar radiation into the front part of the room to achieve small gains in daylight levels at the back. This can result in an increase of the cooling loads. In addition, the non-uniform illuminance distribution within the space, together with a probability for glare, can result in an uncomfortable lighting environment for the users.

The most effective daylighting strategies could be to optimize building orientation and form as well as to optimize window size and placement. But, due to several constrains like overcrowded urbanization, external obstructions, etc. it is increasingly difficult to use strategies that let natural light penetrate deep into the interior space. Fortunately, emerging new technologies are becoming more available that allow daylight to enter the space and reach areas away from perimeter zones and even in the core interior of multistory buildings.

Daylight transportation technologies rely primarily on the direct component of daylight (sunlight) as a light source and are the focus of this Ph.D. research. The primary aim has been to explore the aspects of daylight transportation solutions and the investigation of heliostatic applications to reach some results on energy savings and daylight performance for

illuminating areas away from the perimeter zones of side-lighting spaces through the use of theoretical modelling, experimental measurements and case studies. Eventually, using the knowledge acquired, a prototype heliostatic system is proposed, developed, and assessed in a typical side-lighted office room.

The main goals of the dissertation can be summarized into three (3) objectives.

- a. Investigate the key factors that affect daylight design and the extent of the daylight area as defined by current standards and codes in side-lighted spaces.
- b. Provide information regarding innovative daylighting solutions for daylight transportation and the methods implemented specifically for sunlighting systems.
- c. Present some an innovative heliostatic design-solution.

To achieve the above objectives, the following steps have been followed:

1. Literature review of the daylight area.
2. Literature review of innovative daylighting systems and literature studies of lightshelf designs that rely primarily on the direct aspect of daylight.
3. Literature studies of heliostatic applications.
4. Design a prototype concept of a sunlighting system and assess its performance to reach some results on energy savings and daylight performance.
5. Identify the factors that need to be considered for designing a heliostatic system.
6. Develop a prototype heliostat and discuss the tools required.

In this thesis an innovative sunlight redirection system that utilizes a series of movable mirrors capable of tracking the daily movements of the sun is presented. The device projects the reflected sunlight towards a specified fixed target area into the occupied space onto the ceiling for distribution at the task area. The system is consisted of a shelve (that can be mounted on the window) that utilizes a Heliostatic array of relatively small rectangular mirrors. The mirror array tracks the daily movements of the sun by implementing a dual-axis solar tracking algorithm (solar tracking) to orient and position the mirrors (surface normal) to redirect sunlight (incident-ray) onto the ceiling at a predefined position (reflected-ray) in areas where daylight penetration is limited, providing higher work plane illuminance levels at the back of space.

**Keywords:** Daylight, Daylighting, Innovative daylighting systems, Daylight transportation systems, Dynamic systems, Solar tracking, Heliostats, Light shelves, Energy efficiency, Lighting energy savings, Side-lighting, Office buildings.

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ, ΣΥΝΕΔΡΙΑ & ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Kontadakis, A., Tsangrassoulis, A., Doulos, L. T., Zerefos, S. A Review of Light Shelf Designs for Daylit Environments. *Sustainability*, 2018, 10(1), 71; <https://doi.org/10.3390/su10010071>
2. Kontadakis, A., Doulos, L. T., Topalis, F. V. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone. *Building and Environment*, 2017, 113(15), pp. 2677-279. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.029>
3. Doulos, L. T., Tsangrassoulis, A., Kontaxis, P. A., Kontadakis, A., Topalis, F. V. Harvesting daylight with LED or T5 fluorescent lamps? The role of dimming. *Energy and Buildings*, 2017, 140, pp. 336-347. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.013>
4. Doulos, L. T., Kontadakis, A., Madias, E. N., Sinou, M., Tsangrassoulis, A. Minimizing energy consumption for artificial lighting in a typical classroom of a Hellenic public school aiming for near Zero Energy Building using LED DC luminaires and daylight harvesting systems. *Energy and Buildings*, 2019, 194, pp. 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.033>

### ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. Kontadakis, A., Doulos, L., Mantzourani, A. and Tsangrassoulis, A. (2019). Performance assessment of an active sunlight redirection system in areas with different climate: A comparison. *Proceedings in International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE19, Thessaloniki, Greece.*
2. Mantzourani, A., Doulos, L., Kontadakis, A. and Tsangrassoulis, A. (2019). The effect of the daylight zone on lighting energy savings. *Proceedings in International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE19, Thessaloniki, Greece.*
3. Tsangrassoulis, A., Doulos, L., Kontadakis, A. and Drakou, A. (2019). A Methodology to Model the Performance of a Dynamic Mirror Light-shelf Based on Solar Radiant Flux

- Impinging on the Window. Proceedings in the 16th Building Simulation International Conference, Rome, Italy.
4. Kontadakis, A. and Tsangrassoulis, A. (2017). The impacts of a dynamic sunlight redirection system on the energy balance of office buildings. Proceedings in CISBAT2017 International Conference Future of Buildings Districts Energy Efficiency from Nano to Urban Scale. Lausanne, Switzerland.
  5. Tsangrassoulis, A., Kontadakis, A. and Doulos, L. (2016). Assessing Lighting Energy Saving Potential from Daylight Harvesting in Office Buildings Based on Code Compliance & Simulation Techniques: A Comparison. International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE16, Thessaloniki, Greece.
  6. Tsangrassoulis, A., Kontadakis, A. and Roetzel, A. (2015). Comparing climate-based daylight modelling with daylight factor assessment - implications for architects. ASA2015: Living and learning: research for a better built environment. Proceedings in the 49th International conference of the Architectural Science Association, University of Melbourne, Melbourne, Vic., pp. 1097-1106.
  7. Kontadakis, A., Tsangrassoulis, A. and Roetzel, A. (2015). Defining the Boundaries of Daylight Penetration. The use of dynamic and static daylight methods to predict the daylit zone within sidelit spaces, a comparison. BalkanLight 2015, The 6th Balkan Conference on Lighting, Athens: Greece.
  8. Tsangrassoulis, A., Konstantoglou, M., Kontadakis, A. (2014). Lighting energy savings due to the use of a sun tracking mirrored lightshelf in office buildings. EinB2014, Energy in Buildings Annual Conference, Athens: Greece.
  9. Konstantoglou, M., Kontadakis, A., Tsangrassoulis, A. (2013). Dynamic building skins: Performance criteria integration. PLEA2013, 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich: Germany.
  10. Konstantoglou, M., Kontadakis, A., Tsangrassoulis, A. (2013). Counterbalancing daylighting, glare and view out: the role of an external shading system control strategy. Clima2013, 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on IAQVEC, Prague: Czech Republic.



## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

1. IKY Fellowships of Excellence for Postgraduate Studies in Greece - Siemens Programme: Research Projects for Excellence IKY/SIEMENS, 2016.
2. The energy implications of climate-based daylight modeling (project ENER-DAY). Department of Architecture, University of Thessaly and School of Architecture and Built Environment Faculty of Science Engineering and Built Environment, University of Deakin, Australia, 2015.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	II
ABSTRACT .....	VII
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ, ΣΥΝΕΔΡΙΑ & ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ .....	X
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	XV
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	XXI
ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ .....	XXIII
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ, ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΤΗΣ .....	2
1.1.1 ΧΩΡΟΙ ΦΥΣΙΚΑ ΦΩΤΙΣΜΕΝΟΙ .....	17
1.1.2 ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	21
1.2 ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ (DAYLIGHT ZONES) .....	36
1.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΚΤΑΣΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	38
1.2.1.1 ΑΠΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ .....	39
1.2.1.2 ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ .....	49
1.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ .....	59
1.3 ΣΥΝΟΨΗ .....	69
1.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	85
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	86
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	115
2.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	120
2.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	132
2.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	134
2.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ .....	139
2.3 ΣΥΝΟΨΗ .....	145
2.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	153
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ...	167

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	169
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	172
3.2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ-ΥΨΟΥΣ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ .....	183
3.2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ-ΥΨΟΥΣ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ .....	187
3.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (ASRS) .....	191
3.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ .....	203
3.2.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (ASRS) .....	217
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	223
3.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	226
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4      ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ .....	231
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	232
4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (ΜΑΚv1) .....	235
4.2.1 ΚΥΡΙΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	245
4.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (ΜΑΚv1) .....	259
4.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΜΑΚv1 ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ.....	284
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	288
4.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	291
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5      ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	299
5.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	300

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κυρίοι παράγοντες επίδρασης στην παραγωγικότητα των χρηστών στους χώρους εργασίας [25].	5
Εικόνα 2: Ένα εννοιολογικό πλαίσιο που καθορίζει τις διαδρομές με τις οποίες ο φωτισμός μπορεί να επηρεάσει την απόδοση (τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση των αποτελεσμάτων), σύμφωνα με τους Rea και Ouellete [29].	7
Εικόνα 3: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και σε μεγέθυνση το ορατό τμήμα.	9
Εικόνα 4: Μια αναπαράσταση της δομής του ανθρωπίνου ματιού.	13
Εικόνα 5: Εξέλιξη της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές.	39
Εικόνα 6: Ορισμός της γραμμής-αποκοπής (turning-off line) σε έναν χώρο με πλευρικά ανοίγματα, όπως προτάθηκε από τον Matsuura [103].	40
Εικόνα 7: Εμπειρικός κανόνας βασισμένος στο ύψος του παραθύρου (πρέκι) για την εκτίμηση της έκτασης της ζώνης φ.φ.	46
Εικόνα 8: Διαμορφώσεις χωρών κατακόρυφων ανοιγμάτων.	59
Εικόνα 9: Συνθετικές εικόνες για τους εξεταζόμενους χώρους σε σχέση με την αναλογία παραθύρου-τοιχίου (WWR).	60
Εικόνα 10: Αποτελέσματα του βάθους της ζώνης φ.φ. σε σχέση με απλές και δυναμικές τεχνικές υπολογισμού για νότιο και βόρειο προσανατολισμό.	66
Εικόνα 11: Υπολογισμός του βάθους της ζώνης φ.φ. μαζί με την κατανομή του φ.φ. για διαφορά δυναμικά κριτήρια.	67
Εικόνα 12: Μηχανισμός λειτουργίας Laser Cut Panels (LPC).	95
Εικόνα 13: Σκαρίφημα τομής των συστημάτων Okasolar και Fish ανακλαστικών περσίδων.	96
Εικόνα 14: Εικονογράφηση του φωτο-σωλήνα (Light Pipes) με τα κύρια μέρη του.	98
Εικόνα 15: Δυο (2) γκραβούρες που δείχνουν εάν γραφείο που φωτίζεται από φωταέριο σε σύγκριση με εάν γραφείο που χρησιμοποιεί τον φυσικό φωτισμό με τους ανακλαστήρες ευρεσιτεχνίας του Charpuis, οι οποίοι "βελτιώνουν τον φυσικό φωτισμό και αντικαθιστούν το φωταέριο". Πηγή: science museum/science & society picture library.	101
Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση του παραπέτου της Αγίας Σοφίας βασισμένη στον ανακλαστήρα του Ανθέμιου που τοποθετήθηκε πάνω από την διατομή του αρχικού θολού και του παραπέτου και παρουσιάστηκε στο [122].	116
Εικόνα 17: Ανακλαστήρας Φ.Φ. από τους W. Hanifch και CO. [123].	116

Εικόνα 18: Διάφορες εσωτερικές απεικονίσεις ακτινοβολίας ενός χώρου με νότιο προσανατολισμό διαστάσεων 4 x 6 x 3 m και αναλογίας παραθύρου προς το δάπεδο ίσο με 20% στις εξής περιπτώσεις: a) χωρίς ράφι φωτισμού, κάτω από νεφοσκεπή ουρανό, b) τελειά διάχυτο εξωτερικό οριζόντιο ράφι φωτισμού βάθους 0.5 m (ανακλαστικότητας 0.8), κάτω από νεφοσκεπή ουρανό, c) τελειά διάχυτο εξωτερικό οριζόντιο ράφι φωτισμού βάθους 0.5 m (ανακλαστικότητας 0.8), κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού (γωνιά ύψους ηλίου 37.8°), d) παρόμοιο με το (c) αλλά με εξωτερικό οριζόντιο ράφι να είναι καθρέφτης, e) παρόμοιο με το (d) αλλά το ράφι φωτισμού είναι κεκλιμένο προς τα πάνω κατά 15° και f) παρόμοιο με το (e) με εάν τελειά διάχυτο εσωτερικό φως ράφι (βάθους 1.2 m). .....	117
Εικόνα 19: Διατομή ενός χώρου με πλευρικό άνοιγμα το οποίο έχει ένα εκτεταμένο ράφι φωτισμού (εσωτερικό και εξωτερικό) στο οποίο παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι διαστάσεων. ....	121
Εικόνα 20: Διαστάσεις ραφιού φωτισμού με κατακόρυφη γωνιά σκίασης (vertical shade angle) όπως εξετάζεται στο [30]. ....	124
Εικόνα 21: Η διάταξη ραφιού φωτισμού η οποία εξετάστηκε με τις κυρίες διαστάσεις [44]. .....	126
Εικόνα 22: Εκτεταμένο ράφι φωτισμού με ίσα βάθη για το εσωτερικό και εξωτερικό ράφι (0.5 m) και τα μεταβλητά ύψη που εξετάστηκαν [132]. ....	127
Εικόνα 23: Σχηματική αναπαράσταση των περιπτώσεων που εξετάστηκαν στο [134]. ....	129
Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση των σεναρίων που εξετάστηκαν στο [144]. ....	134
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση του ανειδωλικού συστήματος φ.φ. Όπως παρουσιάστηκε στο [40]. ....	136
Εικόνα 26: Σχέδια διατάξεων ραφιών φωτισμού που εξετάστηκαν στο [149]. ....	138
Εικόνα 27: Σχηματική απεικόνιση της δυναμικής λειτουργίας του ραφιού φωτισμού με βάση τις βέλτιστες περιπτώσεις (modes' A, B and C) που προτάθηκε στο [155]. ....	141
Εικόνα 28: Ρυθμιζόμενο ράφι φωτισμού που αντανakλά το φως του ηλίου σε συγκεκριμένη περιοχή στην οροφή που εξετάστηκε στο [153]. ....	142
Εικόνα 29: Αρχή λειτουργίας του συστήματος Varla που παρουσιάστηκε στο [156]. ....	143
Εικόνα 30: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ανακατεύθυνσης της Ηλιάκης ακτινοβολίας που εξετάστηκε στα [71, 157]. ....	144
Εικόνα 31: Ετήσιος αριθμός δημοσιεύσεων που ασχολούνται με την επίδραση των ραφιών φωτισμού στα επίπεδα φωτισμού στα κτίρια. ....	152

Εικόνα 32: Κύρια διαμόρφωση του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης Ηλιάκης ακτινοβολίας (Active Sun Redirection System, ASRS), με την συστοιχία των κάτοπτρων στο παράθυρο.....	169
Εικόνα 33: Τύποι συστημάτων Ηλιάκης ιχνηλάτησης μονού (single-axis) και διπλού άξονα (dual-axis).....	173
Εικόνα 34: Χαρακτηριστικά διανύσματα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την λειτουργία περιστροφής (rotation modes) του ηλιοστάτη. ....	178
Εικόνα 35: Το διάνυσμα του ηλίου σε σχέση με το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων (Center Coordinate System , CCS). Στο σύστημα CCS, τα CM, CE και CP αντιπροσωπεύουν τρεις ορθογωνίους άξονες στο κέντρο της γης που δείχνουν προς τον μεσημβρινό (Meridian), την ανατολή (East) και τον πολικό αστέρα (Polaris), αντίστοιχα. Το GCS αποτελείται από τους άξονες OZ, OE και ON, οι οποίοι δείχνουν προς το ζενίθ (Zenith), την ανατολή (East) και τον νότο (North) αντίστοιχα.....	180
Εικόνα 36: Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (Global Coordinate System, GCS) στο οποίο εντοπίζονται ο στόχος (T) και ο ηλιοστάτης (H) για τη μέθοδο Ηλιάκης ιχνηλάτησης αζιμούθιου-ύψους (azimuth-elevation (AE) solar-tracking method), όπου το κατακόρυφο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) ορίζεται ως η συνάρτηση των γωνιών $\alpha_{ae}$ και $\rho_{ae}$ . $\phi$ είναι η γωνιά όψης (facing angle), και $\lambda$ είναι η γωνιά στόχου (target angle) του ηλιοστάτη. ....	183
Εικόνα 37: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων (Local Coordinate System, LCS) στο οποίο εντοπίζονται ο στόχος (T) και ο ηλιοστάτης (H) για τη μέθοδο Ηλιάκης ιχνηλάτησης περιστροφής- ύψους (SE), όπου το κάθετο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) ορίζεται ως συνάρτηση των γωνιών $\alpha_{se}$ και $\rho_{se}$ . $\phi$ είναι η γωνιά όψης (facing angle), και $\lambda$ είναι η γωνιά στόχου (target angle) του ηλιοστάτη. $\phi = 0^0$ , όταν ο ηλιοστάτης βρίσκεται νοτιά από τον στόχο και έχει θετική τιμή (+) αν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται από τον βορρά προς την ανατολή και $\lambda = 0^0$ εάν ο ηλιοστάτης έχει το ίδιο ύψος με τον στόχο και είναι (+) όταν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο στόχος να βρίσκεται υψηλότερα από τον ηλιοστάτη. ....	187
Εικόνα 38: Διάγραμμα ροής προσδιορισμού της θέσης των συλλεκτών, του ηλιακού ίχνους και της προσπίπτουσας Ηλιάκης ακτινοβολίας του πρωτοτύπου ASRS για την αξιολόγηση της απόδοσης από πλευράς Φ.Φ. Και απαιτήσεων ενέργειας. ....	193
Εικόνα 39: Προσδιορισμός εμβαδού κανονικού πολυγώνου στο επίπεδο σύμφωνα με τον αλγόριθμο "gauss's area formula and the surveyor's formula". ....	195

Εικόνα 40: Στόχος (target) των εισερχομένων ηλιακών ακτίνων (incoming sun-rays) του προτεινομένου συστήματος (ASRS) στην οροφή του χώρου γραφείων.....	197
Εικόνα 41: Διάγραμμα συνεχούς ρύθμισης του τεχνητού φωτισμού (continuous dimming). Το σχήμα δείχνει τη γραμμική σχέση μεταξύ της κλασματικής ισχύος εισόδου και της κλασματικής φωτεινής ροής.....	201
Εικόνα 42: Ετήσια μέση κατανομή του Φ.Φ. Κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα σενάρια. ....	203
Εικόνα 43: Κατανομή των επίπεδων φωτισμού (μέσες τιμές) σε όλη την επιφάνεια του χώρου κατά τις ώρες εργασίας (08:00-17:00) για τις προσομοιωμένες περιπτώσεις. ....	204
Εικόνα 44: Ομοιομορφία τιμών φωτισμού (Uniformity Ratios) των προσομοιωμένων περιπτώσεων.....	206
Εικόνα 45: Συνθετικές εικόνες Radiance για τις προσομοιωμένες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια του θερινού (21/06) και χειμερινού (21/12) ηλιοστάσιου. ....	209
Εικόνα 46: Συνθετικές εικόνες Radiance (fish-eye views) της οροφής του εσωτερικού χώρου για το θερινό (6/21) και χειμερινό ηλιοστάσιο (12/21) κατά τις ώρες εργασίας, και η κατανομή του εμβαδού του ηλιακού ίχνους, για τις περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B.....	210
Εικόνα 47: Ετήσια ενεργειακή απόδοση των προσομοιωμένων περιπτώσεων όσον αφορά τη ζήτηση ενέργειας, την τελική ενέργεια και την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (συντελεστές μετατροπής για ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση, 2,9 και 1,05 για φυσικό αέριο αντίστοιχα).....	211
Εικόνα 48: ετήσια κατανομή των εσωτερικών θερμικών κερδών σε σχέση με το ηλιακό ίχνος για την περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B. ....	212
Εικόνα 49: Συνδυασμένο σύστημα σκιασμού (εξωτερικές περσίδες) με το προτεινόμενο ASRS. Στο πάνω τμήμα του παραθύρου οι περσίδες έχουν σταθερή κλίση ίση με την γωνία-στόχου των συλλεκτών, ενώ στο κάτω τμήμα οι περσίδες είναι οριζόντια τοποθετημένες. ....	215
Εικόνα 50: Μοντέλα υπο κλίμακα με το ράφι φωτισμού και το προτεινόμενο ASRS εγκατεστημένα στο δώμα του κτιρίου. ....	218
Εικόνα 51: Εικόνες των μακετών του ASRS και κατασκευασμένου χώρου.....	218
Εικόνα 52: Εσωτερικές απόψεις των μοντέλων κλίμακας με και χωρίς το ASRS εγκατεστημένο. ....	219

Εικόνα 53: Αποτελέσματα μετρήσεων του των τιμών φωτισμού στα μοντέλα υπο κλίμακα (βάθος 50 cm, ύψος 8 cm) από τις 08:00 έως τις 17:00, για Αθηνά, Ελλάδα (lat. 37.9 <sup>ο</sup> , lon. 23.7 <sup>ο</sup> ) για νότιο προσανατολισμό.....	220
Εικόνα 54: Το 3D-Cad μοντέλο με τις διαστάσεις της πρωτότυπης συσκευής ηλιοστάτη (MAKV1). .....	237
Εικόνα 55: Φωτορεαλιστικές απεικονίσεις του πρωτοτύπου ηλιοστάτη (MAKV1).....	238
Εικόνα 56: Φωτογραφία της πρωτότυπης συσκευής ηλιοστάτη (MAKV1) που κατασκευάστηκε. Στα αριστερά διακρίνεται το σύστημα μηχανικής στήριξης και παρακολούθησης χωρίς τον καθρέπτη, ενώ στα δεξιά ο κεντρικός πίνακας ελέγχου.....	239
Εικόνα 57: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του λογισμικού Arduino. ....	244
Εικόνα 58: Κύρια εξαρτήματα του ηλιοστάτη. ....	245
Εικόνα 59: Στρατηγικές ελέγχου ανοικτού-βρόχου (open-loop) και κλειστού-βρόχου (closed-loop). ....	249
Εικόνα 60: Σύστημα ανειδωλικού συγκεντρωτικού ηλιοστάτη σύμφωνα με [63]. ....	252
Εικόνα 61: Τρεις (3) βασικοί μηχανισμοί περιστροφής των συστημάτων ηλιοστάτη. ....	256
Εικόνα 62: Arduino uno rev.3 πλακέτα ανάπτυξης μικροελεγκτών (microcontroller development board). ....	259
Εικόνα 63: USB 2.0 cable type A/B. Χρησιμοποιείται για την σύνδεση του Arduino uno η με οποιαδήποτε άλλη πλακέτα που διαθέτει USB female A θύρα με τον Η/Υ η το φορητό υπολογιστή.....	260
Εικόνα 64: Βηματικός Κινητήρας Μεγάλης Ροπής (High-Torque Stepper Motor) 42BYGHM809 (1.68 A, 4.5 Kg × cm) σε μέγεθος NEMA17 (42 mm) από την Wantai Motors. Μηχανικές διαστάσεις και διάγραμμα καλωδίωσης (wiring diagram).....	262
Εικόνα 65: Πλακέτα οδηγού βηματικού μοτέρ (μονού-άξονα) (stepper motor (single-axis) driver board) TB6560 3A και η καλωδίωση του στον βηματικό κινητήρα, καθώς και η περιγραφή του τερματικού.....	266
Εικόνα 66: Τροφοδοτικό mean well power supply LRS-100-12 100W 12V. <a href="https://www.meanwell.co.uk/lrs-100-12.html">https://www.meanwell.co.uk/lrs-100-12.html</a> . ....	267
Εικόνα 67: Τερματικοί διακόπτες με ρολό (limit switches w/roller) και η σύνδεση τους με τον μικροελεγκτή (microcontroller). ....	269
Εικόνα 68: Σειριακό ρολόι πραγματικού χρόνου (Serial Real-Time Clock, RTC) βασισμένο στο clock chip DS1307.....	270



Εικόνα 69: Διάγραμμα καλωδίωσης Arduino (Arduino wire circuit diagram) για το σχεδιασμό των εξαρτημάτων.....	272
Εικόνα 70: Ο κεντρικός πίνακας ελέγχου για τη λειτουργία του πρωτοτύπου MAKV1.....	273
Εικόνα 71: Ο κεντρικός πίνακας εντολών (ανοικτός), όπου διακρίνονται τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, και το σύστημα μηχανικής στήριξης και παρακολούθησης (χωρίς τον καθρέφτη). .....	274
Εικόνα 72: Μπροστινή 3D-όψη του πρωτοτύπου ηλιοστάτη MAKV1. ....	275
Εικόνα 73: Αρχική δοκιμαστική κατασκευή της μονάδας ελέγχου. Οι βηματικοί κινητήρες τοποθετήθηκαν σε δυο (2) ξεχωριστές βάσεις. Στην πάνω βάση, τοποθετήθηκε ο βηματικός κινητήρας ύψους, ενώ στην κάτω βάση ο βηματικός κινητήρας αζιμούθιου. Αυτή η διάταξη απορρίφθηκε λόγω του αυξημένου συνολικού ύψους και της μη ισορροπημένης κατανομής βάρους, που προκαλούσε δονήσεις κατά τη διάρκεια προκαταρκτικών δοκιμών. ....	277
Εικόνα 74: Η τελική κινητή πλατφόρμα συμπεριλαμβανομένου και του μηχανισμού μετάδοσης της μονάδας ελέγχου. Οι δυο (2) βηματικοί κινητήρες είναι τοποθετημένοι στην ίδια βάση και είναι υπεύθυνοι για την οδήγηση της επιφάνειας (καθρέφτη) που ακολουθεί η ανακατευθύνει τις ηλιακές ακτίνες χρησιμοποιώντας έναν τύπο κίνησης με ιμάντες χρονισμού.....	278
Εικόνα 75: Τρισδιάστατες (3D) απεικονίσεις της πλατφόρμας στην οποία είναι εγκατεστημένα τα διάφορα εξαρτήματα της πρωτότυπης συσκευής MAKV1 και ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης. ....	280
Εικόνα 76: 3D μοντέλο της κινητής πλατφόρμας. οι δυο (2) τερματικοί διακόπτες περιορισμού (ένας για κάθε περιστροφή) συνδέονται σε αυτήν και χρησιμοποιούνται για την επαναφορά της θέσης του μηχανήματος και την αποτροπή υπερβολικών μετακινήσεων. ....	281
Εικόνα 77: Μηχανισμός μετάδοσης της κίνησης του πρωτοτύπου MAKV1, για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης αζιμούθιου-ύψους. Η μετάδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση δυο (2) βηματικών κινητήρων, εάν για κάθε άξονα περιστροφής, όπου οι άξονες συνδέονται με γρανάζια και ιμάντες χρονισμού, αντίστοιχα. ....	282
Εικόνα 78: Εξωτερικές φωτογραφίες της εγκατάστασης του πρωτοτύπου συστήματος ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη (MAKV1). ....	286
Εικόνα 79: Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των επίπεδων Φ.Φ. Των δυο (2) περιπτώσεων που εξετάστηκαν.....	287

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Δείκτες θάμβωσης. ....	57
Πίνακας 2: Βασικές διαστάσεις των διαμορφώσεων του χώρου αναφοράς.....	60
Πίνακας 3: Έκταση της περιοχής της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τους ενεργειακούς κανονισμούς (στατικές μέθοδοι). ....	61
Πίνακας 4: Έκταση της περιοχής της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τους κριτήρια φ.φ. (Daylight Metrics) (δυναμικές μέθοδοι). ....	62
Πίνακας 5: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις με το λογισμικό Radiance. ....	63
Πίνακας 6: Αποτελέσματα του βάθους της ζώνης φ.φ. για τους χώρους γραφείων σε σχέση με τα κριτήρια φ.φ. ....	65
Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εφαρμογών κατακόρυφων συστημάτων φωτισμού (side-lighting) και οριζοντίων (top-lighting). ....	88
Πίνακας 8: Ανασκοπήσεις σχετικά με τα συστήματα Φ.Φ. Που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. ....	90
Πίνακας 9: Κατασκευαστές Ηλιοστατικών Συστημάτων. ....	114
Πίνακας 10: Συνοπτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων, των αδυναμιών, των ευκαιριών και των απειλών των ραφιών φωτισμού ως Συστήματα Φ.Φ./Σκίασης. ....	151
Πίνακας 11: Στρατηγικές ελέγχου συστημάτων Ηλιάκης ιχνηλάτησης (solar trackers). ....	174
Πίνακας 12: Περιγραφή σεναρίων.....	197
Πίνακας 13: Παράμετροι προσομοίωσης Radiance που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια. ....	199
Πίνακας 14: Παράμετροι προσομοίωσης EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια. ....	200
Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά τεχνητού συστήματος φωτισμού. ....	202
Πίνακας 16: Οι ετήσιες μέσες τιμές φωτισμού κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των χωρών για τα σενάρια.....	203
Πίνακας 17: Ομοιομορφίες φωτισμού (uniformity ratios) των προσομοιωμένων περιπτώσεων.....	205

Πίνακας 18: Διακύμανση του εμβαδού του ηλιακού ίχνους (sun-patch) που δημιουργείται από έναν καθρέφτη με την πάροδο του χρόνου, για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο για τις περιπτώσεις με το πρωτότυπο σύστημα.....	208
Πίνακας 19: Κατανομή του εμβαδού του ηλιακού ίχνους και των εσωτερικών θερμικών κερδών για SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας (08:00-17:00) για το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο. ....	213
Πίνακας 20: Μετρούμενες εσωτερικές τιμές φωτισμού των μοντέλων από τις 28 έως τις 30 Απριλίου (08:00-17:00). ....	221
Πίνακας 21: Μετρούμενες εσωτερικές τιμές φωτισμού των μοντέλων από τις 3 Ιουνίου έως τις 4 Ιουνίου (08:00-17:00). ....	222
Πίνακας 22: Κατηγορίες στρατηγικών ελέγχου ηλιακής ιχνηλάτησης και παραδείγματα εφαρμογής. ....	250
Πίνακας 23: Τεχνικές προδιαγραφές του μοντέλου 42BYGHM809. ....	262
Πίνακας 24: Τεχνικές προδιαγραφές του τροφοδοτικού mean well power supply LRS-100-12 100W 12V. ....	268
Πίνακας 25: Γενική λίστα των εξαρτημάτων και πληροφορίες για την πρωτότυπη συσκευή MAKV1.....	283
Πίνακας 26: Δοκιμές μετρήσεων για το πρωτότυπο σύστημα ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη (MAKV1) για 09/06/2017 από 14:45 έως 17:00. ....	286

## **ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ**

Η διδακτορική διατριβή έλαβε χρηματοδότηση από το πρόγραμμα "ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ ΙΚΥ/SIEMENS".

–ΚΕΝΗ–

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται τα χαρακτηριστικά των περιμετρικών ζωνών (που αναφέρονται επίσης και ως ζώνες φυσικού φωτισμού ή περιοχές φυσικού φωτισμού). Το φως της ημέρας μπορεί να εισέλθει σε ένα χώρο μέσα από διάφορα αρχιτεκτονικά στοιχεία, όπως παράθυρα, φεγγίτες, κ.λπ. Η πιο συνηθισμένη στρατηγική φ.φ. είναι να εισέρχεται μέσα στον χώρο μέσω πλευρικών κατακόρυφων ανοιγμάτων, όπως πχ. τα παράθυρα.

Μετά την εισαγωγή, η οποία συνοψίζει τις βασικές τεχνικές σχεδιασμού με φ.φ., η παράγραφος 1.2 περιλαμβάνει μια λεπτομερή ανάλυση των περιμετρικών ζωνών φ.φ. και των παραμέτρων που τις καθορίζουν. Η μεθοδολογία για τον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού που βρίσκεται εντός των περιμετρικών ζωνών σε ένα κτίριο καθορίζεται από κώδικες και πρότυπα και υλοποιείται μέσω ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου και εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού (συνήθως στην οροφή) το οποίο ανταποκρίνεται στα επίπεδα φ.φ. μέσα στο χώρο. Ο τεχνητός φωτισμός μέσα σε αυτές τις ζώνες μπορεί να ρυθμιστεί ή/και να απενεργοποιηθεί με στόχο την μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να επηρεαστεί αρνητικά η οπτική άνεση και η απόδοση των χρηστών. Δεδομένης της ευρείας χρήσης πρακτικών φ.φ. και συστημάτων που μπορούν σχετικά εύκολα να υιοθετηθούν κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός κτιρίου, παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για την εκτίμηση των περιμετρικών ζωνών και της διείσδυσης του φ.φ.

## 1.1 ΦΥΣΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ, ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΤΗΣ

Πριν την ανακάλυψη του λαμπτήρα πυράκτωσης προς τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα και την εκτεταμένη χρήση του σε συνδυασμό με διαμορφώσεις χώρων ανοικτού τύπου (open-plan spaces) μετά το 1940, ο φυσικός φωτισμός αποτελούσε την κύρια πηγή φωτισμού στα κτίρια. Οι πολυάριθμες εξελίξεις όμως στον σχεδιασμό του τεχνητού φωτισμού (π.χ. εισαγωγή ΗΥ στον εργασιακό χώρο) προκάλεσαν μια σχετικά γρήγορη μετάβαση προς τα σημερινά πρότυπα σχεδιασμού. Τα τεχνητά συστήματα φωτισμού στις μέρες μας παρέχουν εξολοκλήρου ή κατά το μεγαλύτερο βαθμό τα απαραίτητα επίπεδα φωτισμού σε ένα χώρο και μπορούν να λειτουργούν συμπληρωματικά με το φυσικό φως. Η σημερινή όμως προσέγγιση κατά τον σχεδιασμό, στα πλαίσια των στρατηγικών εξοικονόμησης ενέργειας, είναι η μεγιστοποίηση της χρήσης του φυσικού φωτισμού, για τον οποίο θα θέλαμε να αποτελεί την κύρια πηγή φωτισμού όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτός ο σχεδιασμός συνδυάζει την εξοικονόμηση ενέργειας και ικανοποιεί ταυτόχρονα τις προτιμήσεις των χρηστών. Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού ενός κτιρίου η στρατηγική χρήσης του φ.φ. μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο την ενεργειακή του απόδοση όσο και την ευεξία/παραγωγικότητα των χρηστών του. Συνεπώς η ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικούς χώρους σε συνδυασμό με την βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος αποτέλεσαν τον καταλύτη για την αναζωπύρωση της δημοτικότητας της χρήσης του φ.φ. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ποικίλων καινοτόμων πρακτικών σχεδιασμού και στρατηγικών ελέγχου, σε μία προσπάθεια να ενσωματωθεί αποτελεσματικότερα το φως της ημέρας, ενώ άμβλυναν τα πιθανά προβλήματα που σχετίζονταν με την διαχείριση του άμεσου ηλιακού φωτισμού.

Η πρώτη συστηματική καταγραφή συστημάτων και τεχνικών χρήσης φ.φ. παρουσιάσθηκαν στο βιβλίο από το Πρόγραμμα Ηλιακής Θέρμανσης και Ψύξης του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (Solar Heating and Cooling Programme of the International Energy Agency, IEA) με τίτλο "Daylight in Buildings: A Sourcebook on Daylighting Systems and Components" [1] το οποίο περιέχει μία ανασκόπηση της βιβλιογραφίας της τρέχουσα κατάστασης των τεχνολογιών και του σχεδιασμού και περιγράφει τις παραμέτρους και τα κριτήρια

σχεδιασμού με φ.φ., καθώς επίσης και τα πλεονεκτήματα και αδυναμίες των σύγχρονων τεχνολογιών φ.φ..

Σύμφωνα με τον Leslie [2] ο φ.φ. μεταξύ άλλων, πρέπει να εκπληρώνει ταυτόχρονα δύο (2) θεμελιώδεις απαιτήσεις:

- α. να υποστηρίζει την ανθρώπινη υγεία και την παραγωγικότητα και,
- β. να είναι ενεργειακά αποδοτικός.

Για να εξασφαλιστεί μια ορθολογική διαχείριση της ποσότητας και κατανομής του φ.φ. που εισέρχεται στο χώρο, είναι απαραίτητη μια ολιστική προσέγγιση [1].

Από την έως τώρα έρευνα ο φ.φ. μπορεί να επηρεάσει θετικά το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου με την χρήση ενσωματωμένων στρατηγικών ελέγχου του τεχνητού φωτισμού (integrated lighting control strategies). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό επιτυγχάνεται με την ρύθμιση της εξόδου του ηλεκτρικού συστήματος φωτισμού για να διατηρούνται σταθερά τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού μέσα στο χώρο. Οι δυνατότητες που προσφέρουν τα συστήματα αυτά μειώνουν τη χρήση ενέργειας από τον ηλεκτρικό φωτισμό από 20%, έως και 60% σε βέλτιστες συνθήκες [3-7]. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων για ψύξη, καθώς η ποσότητα θερμότητας που παράγεται από το σύστημα φωτισμού μειώνεται επίσης [8-12] γεγονός που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον σε περιοχές με μεγάλα ψυκτικά φορτία.

Επιπρόσθετα, υπάρχει εκτεταμένη έρευνα που υποδηλώνει ότι η χρήση φυσικού φωτισμού στα κτίρια μπορεί να προάγει την ανθρώπινη υγεία και να βελτιώσει την αποδοτικότητα [13-18]. Μία μελέτη που διεξήχθη από τον Elzeyadi προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει τις επιπτώσεις της φυσικής κατάστασης και υγείας των χρηστών μέσα από την παρατήρηση τους στους χώρους εργασίας [15]. Τα ευρήματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ του φυσικού φωτισμού και της ευεξίας και πρότεινε μια μέθοδο για τον ποσοτικό προσδιορισμό της σύνδεσης αυτής. Οι περισσότεροι άνθρωποι προτιμούν να εργάζονται σε χώρους με μεγάλα παράθυρα με ωραία θέα, αφού διάφορες μελέτες έχουν εντοπίσει την καθοριστική επιθυμία της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον [17, 18]. Επιπρόσθετες επιδράσεις είναι η μείωση των πονοκεφάλων, της εποχιακής

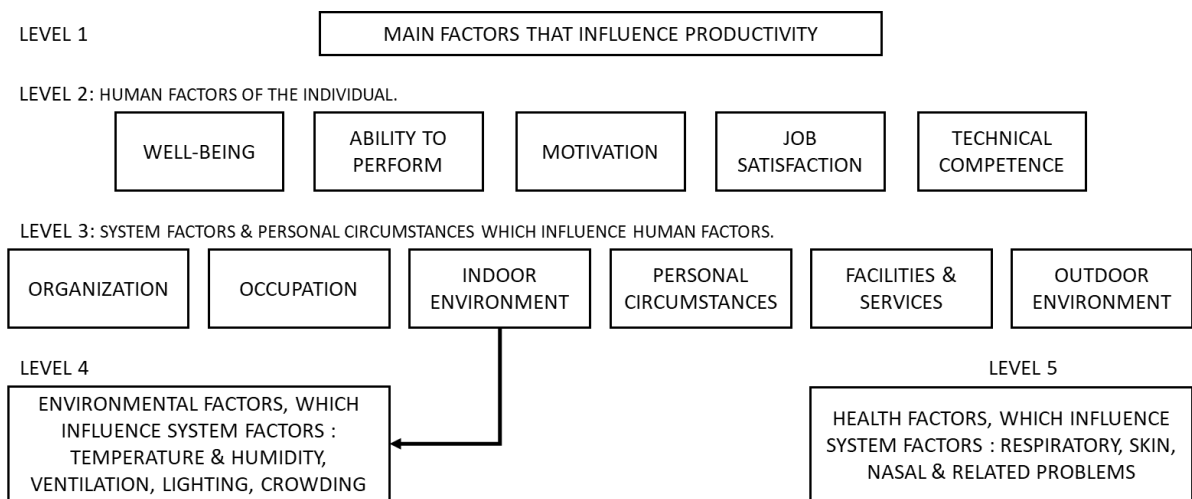


συναισθηματικής διαταραχής (seasonal affective disorder, S. A. D.) και της καταπόνησης των ματιών [19-20].

Η Εποχιακή Συναισθηματική Διαταραχή ή S. A. D. είναι μία από τις πιο διεξοδικά μελετημένες ιατρικές διαταραχές που εξαρτώνται άμεσα από την έκθεση στο ηλιακό φως. Χαρακτηρίζεται από δραστικές μεταβολές της διάθεσης, μειωμένη ενέργεια και κατάθλιψη που συμβαίνουν περίπου την ίδια εποχή κάθε χρόνο (εμφανίζονται το χειμώνα και παύονται την άνοιξη) [21]. Οι μελέτες που διεξήχθησαν από τους Hollick [22] και Neer [23] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υπεριώδης ακτινοβολία από το ηλιακό φως στην περιοχή των 290-315 nm προκαλεί την δημιουργία βιταμίνης D στο δέρμα, απαραίτητο συστατικό για την απορρόφηση ασβεστίου και άλλων θρεπτικών συστατικών από την τροφή. Αν η συγκέντρωση σε βιταμίνη D είναι μειωμένη, τότε το σώμα δεν απορροφά την ποσότητα ασβεστίου που απαιτείται για την κανονική εξέλιξη και ανάπτυξη των οστών. Αυτή η ανεπάρκεια οδηγεί στην κατάσταση που ονομάζεται ραχίτιδα στα παιδιά και οστεομαλακία στους ενήλικες και η οποία χαρακτηρίζεται από έναν αδύναμο, πορώδη και κακοσχηματισμένο σκελετό [21].

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλά επιπλέον χαρακτηριστικά όπως η ηλικία, το φύλο, η εθνικότητα, η σωματική δραστηριότητα, κτλ. αλλά και σωματικοί παράγοντες πχ. νοσογόνες καταστάσεις που μπορούν να επηρεάσουν την αντίληψη της ποιότητας του φωτισμού. Ποιότητα, η οποία δεν μπορεί να εκφραστεί απλώς με όρους φωτομετρικών μεγεθών ούτε μπορεί να υπάρξει μια ενιαία καθολικά εφαρμόσιμη πρακτική για την επίτευξη καλής ποιότητας φωτισμού. Η ποιότητα του φωτισμού σχετίζεται:

- α. Με τα επίπεδα οπτικής άνεσης και της απόδοσης των χρηστών στις διάφορες δραστηριότητες.
- β. Με την ευχαρίστηση που προκαλεί το οπτικό περιβάλλον.



**Εικόνα 1:** Κύριοι παράγοντες επίδρασης στην παραγωγικότητα των χρηστών στους χώρους εργασίας [25].

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η ποιότητα του φωτισμού μπορεί να επηρεάσει την παραγωγικότητα [24]. Στην περίπτωση μας η παραγωγικότητα ορίζεται σαν την σχέση μεταξύ του φ.φ. και της ποσότητας του προϊόντος που παράγεται λόγω της χρήσης του. Η παραγωγικότητα επηρεάζεται τόσο από τον χρήστη όσο και από το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται [25], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1, όπου οι κύριοι παράγοντες παρουσιάζονται ως μία διαδικασία πέντε (5) επιπέδων.

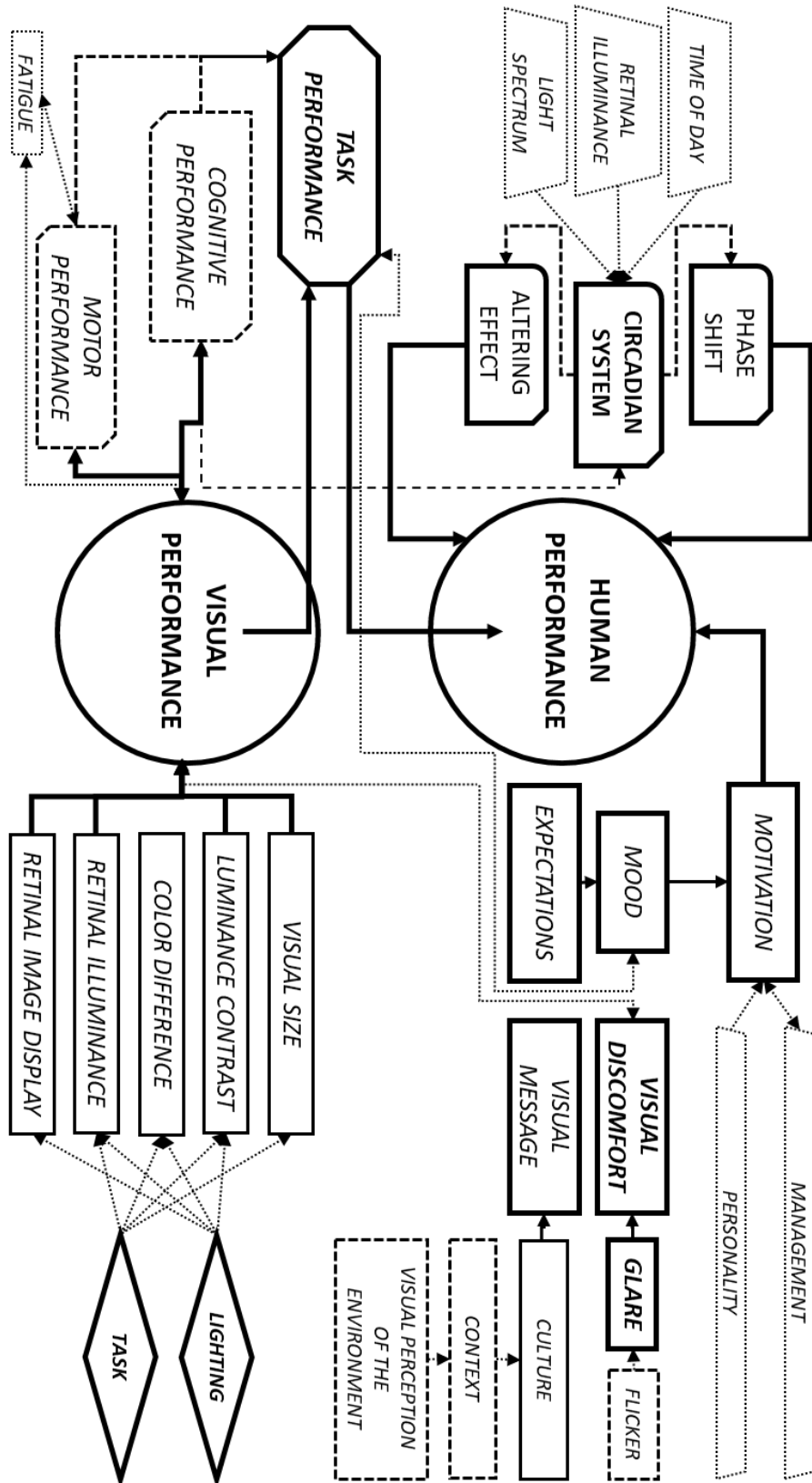
Υπάρχουν τρεις (3) διαδρομές με τις οποίες οι συνθήκες φωτισμού μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του χρήστη:

- α. Το "κίρκαδιανό σύστημα (circadian system)" το οποίο ρυθμίζεται κυρίως από την εναλλαγή ημέρας/νύκτας.
- β. Το "οπτικό σύστημα (visual system)". Οι δυνατότητες του οποίου καθορίζονται από τις συνθήκες φωτισμού.
- γ. Το "σύστημα αντίληψης (perceptual system)". Το μήνυμα που παρέχεται από το σύστημα αντίληψης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, με τον φωτισμό να είναι μόνο ένας από αυτούς (άλλοι είναι πχ. η ιδιοσυγκρασία, η εκπαίδευση κλπ.).

Η οπτική απόδοση (visual performance) ορίζεται από την ικανότητα του ανθρώπινου ματιού να αντιλαμβάνεται λεπτομέρειες εκτελώντας με ταχύτητα και ακρίβεια μια εργασία [26] και εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων (πχ. το μέγεθός και σχήμα του αντικειμένου

παρατήρησης, την λαμπρότητα, την αντίθεση, την παρουσία θάμβωσης). Για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μοντέλα οπτικής απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση/επίδραση των διαφόρων παραμέτρων που εμπλέκονται [27]. Ενώ η ορατότητα (visibility) ορίζεται από την ικανότητά ενός χρήστη να ανιχνεύει αντικείμενα δεδομένων διαστάσεων, σε συγκεκριμένες αποστάσεις και με δεδομένες αντιθέσεις με το υπόβαθρο [28].

Η επιλογή των επιπέδων φωτισμού, ικανών για την εκτέλεση κάποιας δραστηριότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερα από αυτά που απαιτούνται για το όριο ορατότητας. Η οπτική απόδοση βελτιώνεται με την αύξηση των επιπέδων φωτισμού. Ωστόσο, υπάρχει ένα ανώτατο όριο πάνω από το οποίο η περαιτέρω αύξηση των επιπέδων δεν οδηγεί σε βελτίωση της οπτικής απόδοσης [29]. Οι Rea και Ouellete [29] παρουσίασαν ένα πλαίσιο όπου χαρτογράφησαν όλους τους παράγοντες του φωτισμού που επηρεάζουν την ανθρώπινη οπτική απόδοση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.



**Εικόνα 2:** Ένα εννοιολογικό πλαίσιο που καθορίζει τις διαδρομές με τις οποίες ο φωτισμός μπορεί να επηρεάσει την απόδοση (τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση των αποτελεσμάτων), σύμφωνα με τους Rea και Ouellete [29].

Το κίρκαδιανό σύστημα (circadian system) διατηρεί τον άνθρωπο σε συγχρονισμό με τον 24-ωρο ημερήσιο κύκλο. Ένα "εσωτερικό ρολόι" στέλνει σήματα σε πολλά διαφορετικά μέρη του σώματος, επηρεάζοντας λειτουργίες όπως την πέψη, την έκκριση ορμονών, την θερμοκρασία του σώματος και πολλά άλλα. Το φως που πέφτει στον αμφιβληστροειδή και μεταδίδεται στον υποθάλαμο (hypothalamus) ελέγχει τον ανθρώπινο κίρκαδιανό ρυθμό (human circadian rhythm) που είναι υπεύθυνος για τον προαναφερθέντα συγχρονισμό του εσωτερικού ρολογιού. Η πιο εμφανής απόδειξη της ύπαρξης του κίρκαδικού συστήματος είναι ο κύκλος ύπνου-εγρήγορσης.

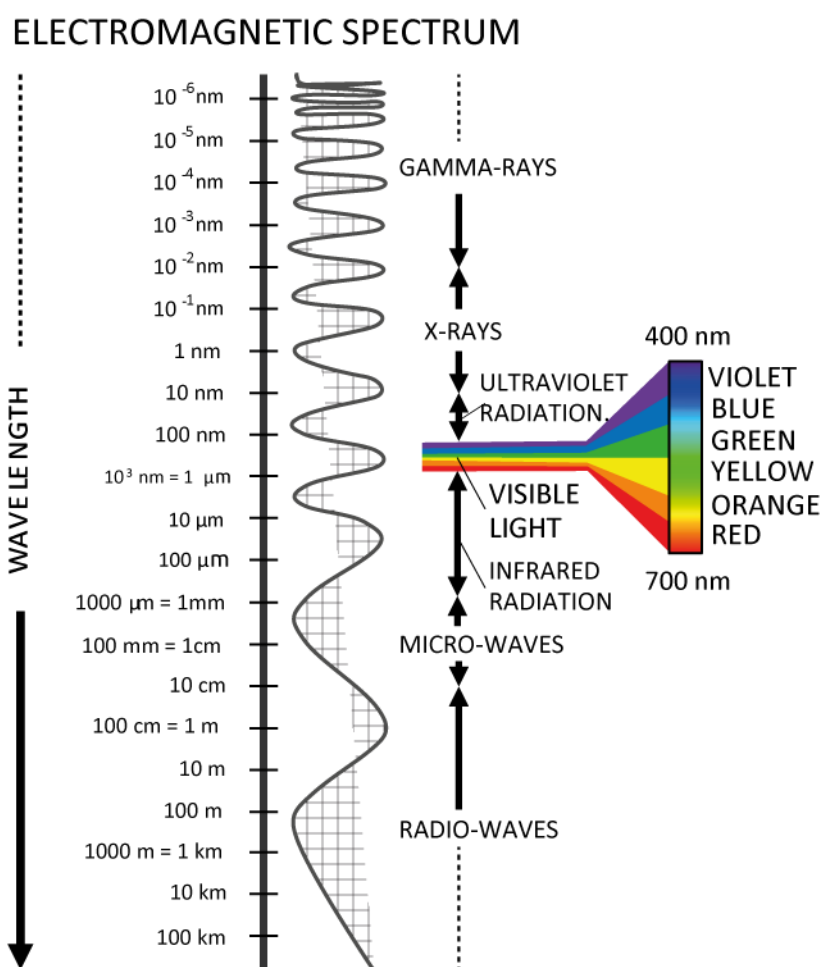
Κάθε πρωί, το φως διεγείρει μια κατηγορία ειδικών γαγγλίων του αμφιβληστροειδούς (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs), τα οποία μεταδίδουν σήματα στο κύριο ρολόι σώματος -τον υπερχιασματικό πυρήνα (suprachiasmatic nucleus, SCN), μέσω της αμφιβληστροποθαλαμικής οδού (retinohypothalamic tract, RHT). Το SCN χρησιμοποιεί νευροενδοκρινικά (neuroendocrine) και αυτόνομα σήματα για τον συγχρονισμό των ρυθμών σε όλους τους άλλους ιστούς, περιλαμβανομένων χωρίς περιορισμό, του καρδιαγγειακού, ηπατικού, παγκρεατικού, λιπώδους ιστού και γαστρεντερικού συστήματος. Καθώς το φως μειώνεται στο τέλος της ημέρας, αυξάνεται η περιεκτικότητα σε μελατονίνη (melatonin) που εκκρίνεται από την επίφυση (pineal gland, PG), με αποτέλεσμα την χαλάρωση του οργανισμού. Κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε φυσικό φως, καταστέλλεται η παραγωγή μελατονίνης και αυξάνεται η συγκέντρωση κορτιζόλης με αποτέλεσμα ο οργανισμός να περνά σε μια κατάσταση εγρήγορσης.

Οι αξιοσημείωτες δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας του οπτικού συστήματος επιτρέπουν την μεταφορά τεράστιου όγκου πληροφοριών από το περιβάλλον στον χρήστη. Τα οπτικά ερεθίσματα υποβάλλονται σε επεξεργασία από το "οπτικό σύστημα". Άλλες μορφές αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον περιλαμβάνουν την αφή, τον ήχο, τη γεύση, την όσφρηση.

Η ενέργεια που μεταδίδεται μέσω του χώρου υπό μορφή κυμάτων ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (electromagnetic radiation), και καλύπτει ένα εύρος μηκών κύματος από  $10^{-6}$  nm μέχρι 100 Km, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Το φως είναι ένα μικρό τμήμα (visible portion) του πολύ μεγαλύτερου ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που

περιλαμβάνει ραδιοκύματα (radio waves), υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation), υπεριώδη ακτινοβολία (ultraviolet radiation), ακτίνες-X (X-rays) και ακτίνες-γ (gamma-rays).

Το ορατό φάσμα φωτισμού αποτελείται από μήκη κύματος που κυμαίνονται από 380 nm ( $3.8 \times 10^{-7}$  m) έως 780 nm περίπου ( $7.8 \times 10^{-7}$  m). Τα συγκεκριμένα μήκη κύματος εντός του φάσματος αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο χρώμα βασισμένο στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι συνήθως αντιλαμβάνονται το φως αυτού του μήκους κύματος.



**Εικόνα 3:** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και σε μεγέθυνση το ορατό τμήμα.

Εκτός από το ορατό τμήμα, το ηλιακό φάσμα περιέχει και ένα υπεριώδες και υπέρυθρο τμήμα. Όσον αφορά τη θερμική ισχύ του ηλιακού φωτός, διαπιστώνεται ότι είναι μεγαλύτερη στο κόκκινο άκρο του φάσματος, ενώ η μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα λαμβάνει χώρα στο μωβ άκρο. Όπως αναφέρθηκε, το ανθρώπινο σώμα μπορεί να

επηρεαστεί από τον φωτισμό που φθάνει στον αμφιβληστροειδή σε ενδοκρινικό, ορμονικό και μεταβολικό επίπεδο. Για να προσδιοριστεί καλύτερα το πώς ο φωτισμός που προσπίπτει στο μάτι επηρεάζει τους ανθρώπους είναι απαραίτητη η κατανόηση των νευρολογικών συνδέσεων μεταξύ του ματιού και του εγκεφάλου.

Επειδή τα μάτια μπορούν να τροποποιήσουν ελαφρώς το σχήμα των φακών τους, το οπτικό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει την εστίαση (focus) για να ανιχνεύσει την απόσταση από το μάτι μέχρι ένα αντικείμενο, τουλάχιστον για τα αντικείμενα που βρίσκονται κοντά, ενώ η εστίαση γίνεται λιγότερο ακριβής όσο η απόσταση των αντικειμένων από τα μάτια αυξάνεται. Η απεστίαση (defocus-from-depth), το βάθος που είναι "διαθέσιμο" στο οπτικό πεδίο, εξαρτάται από τη διάμετρο του φακού (lens diameter). Για πολύ μικρές διαμέτρους, κάθε αντικείμενο φαίνεται καθαρό, ενώ ο περιβάλλον χώρος θολωμένος. Αυτή η περιοχή περιγράφεται στη φωτογραφία ως το βάθος του πεδίου (depth of field), όπου για μεγάλες διαμέτρους το βάθος πεδίου τείνει να είναι μικρό. Το ανθρώπινο μάτι έχει επίσης ρυθμιζόμενη κόρη (pupil). Σε χαμηλό φωτισμό, η κόρη ανοίγει για συλλογή μεγαλύτερης φωτεινής ροής από το περιβάλλον, αλλά με το κόστος του μειωμένου βάθους του πεδίου, ενώ σε έντονο φως, η κόρη κλείνει, ενισχύοντας το βάθος του πεδίου.

Η διάμετρος της κόρης μεταβάλλεται μεταξύ 2 – 8 μm. Με δεδομένη τη συγκεκριμένη μεταβολή θα έπρεπε θεωρητικά η φωτεινή ροή που περνά από την ίριδα να παρουσιάζει εύρος τιμών  $\sim 1/16$ . Επειδή η ευαισθησία του ματιού μεταβάλλεται με τη γωνία πρόσπτωσης ο προαναφερθείς λόγος τροποποιείται  $10/1$ . Στην πράξη όμως το εύρος τιμών είναι  $\sim 1000/1$  (με ακραία τιμή την  $10000/1$ ) σε κάποια κατάσταση προσαρμογής. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μόνο με τη μεταβολή της διαμέτρου της κόρης δεν μπορεί να εξηγηθεί η προσαρμογή του ματιού στις επικρατούσες κάθε φορά συνθήκες [30]. Η τροποποίηση της διαμέτρου της κόρης είναι αποτελεσματική για βραχυπρόθεσμες προσαρμογές. Η μακροπρόθεσμη προσαρμογή είναι μια χημική διαδικασία στους φωτουποδοχείς (receptors). Ο έλεγχος της περιστροφής του ζεύγους οφθαλμών συντονίζεται από το οπτικό σύστημα έτσι ώστε η σύνθεση των εικόνων του περιβάλλοντος που σχηματίζονται στους δυο αμφιβληστροειδείς να μπορεί να σχηματίσει μια ενιαία συνεκτική εικόνα του κόσμου.

Σε γενικές γραμμές το ανθρώπινο μάτι είναι ένα σύστημα ανίχνευσης φωτισμού με μια κόρη (pupil) και μια επιφάνεια με φωτουποδοχείς που ονομάζεται αμφιβληστροειδής (retina). Αυτός, καλύπτεται με κύτταρα που αποκρίνονται στο φως που φτάνει σε αυτά περιέχει δε κυρίως δύο (2) τύπους φωτουποδοχέων: τα ραβδία (Rods) και τα κωνία (Cones). Έχει αναφερθεί προηγουμένως και η ύπαρξη των ειδικών γαγγλιακών κυττάρων ipRGC. Τα ραβδία είναι υπεύθυνα για την ανίχνευση του φωτισμού σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού (π.χ. νυχτερινή όραση), ενώ τα κωνία ενεργοποιούνται σε συνθήκες υψηλότερου φωτισμού και είναι υπεύθυνα για την όραση κατά την διάρκεια ημέρας. Τα ραβδία είναι ευαίσθητα στο ορατό φως όλων των μηκών κύματος, ενώ υπάρχουν τρεις (3) τύποι κωνίων που είναι ευαίσθητοι σε διαφορετικά μήκη κύματος:

- α. Ο πρώτος τύπος έχει την απόκριση αιχμής στα 580 nm.
- β. Ο δεύτερος στα 545 nm.
- γ. Ο τρίτος στα 440 nm.

Υπάρχουν πολύ περισσότερα ραβδία από κωνία (αναλογία περίπου 20: 1) και η κατανομή μεταξύ τους δεν είναι ομοιόμορφη. Στην ωχρά κηλίδα (fovea), μια περιοχή απέναντι από την κόρη (pupil), η κυτταρική πυκνότητα των κωνίων (cone cell density) είναι ιδιαίτερα υψηλή. Ο Deering [31] παρέχει λεπτομερείς περιγραφές αυτών των κατανομών και ένα υπολογιστικό μοντέλο για την ανταπόκριση του ματιού στο φωτισμό. Το φως που φτάνει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα (retina) μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα που μεταδίδονται με το οπτικό νεύρο (optic nerve). Τα περισσότερα από αυτά τα σήματα καταλήγουν στον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου και παράγουν την αίσθηση της ορασης. Ωστόσο, μερικές από τις νευρικές ίνες (nerve fibers) αποκόπτονται από το οπτικό νεύρο αμέσως μετά την απομάκρυνση από το μάτι και στέλνουν σήματα στον υπερχιασματικό πυρήνα (suprachiasmatic nucleus), που είναι η περιοχή του εγκεφάλου όπου βρίσκεται το "κύριο ρολόι" για το ανθρώπινο σώμα [32, 33].

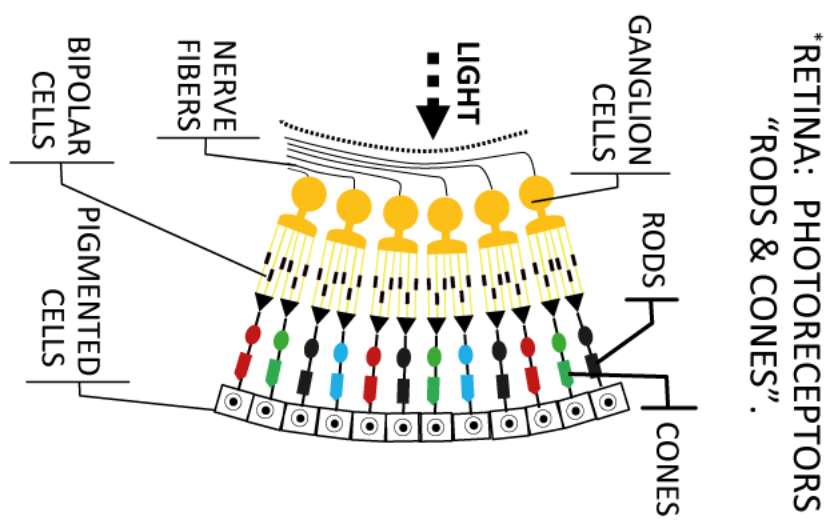
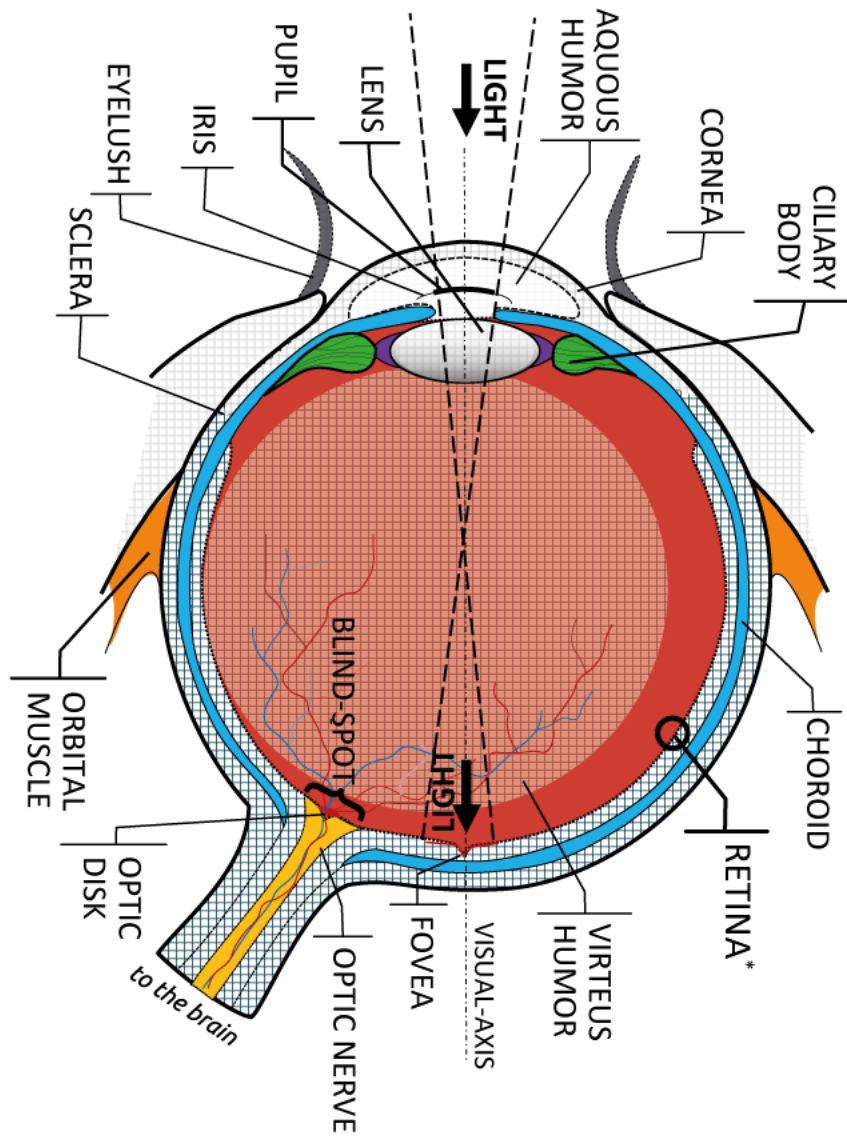
Υπάρχει μια άλλη ειδική περιοχή του αμφιβληστροειδούς, ο οπτικός δίσκος (optic disk), όπου το οπτικό νεύρο συνδέεται με το μάτι. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχουν καθόλου ραβδία ή κωνία. Παρόλα αυτά, ο άνθρωπος δεν αισθάνεται, όπως κοιτάζει, ότι υπάρχει ένα "τυφλό σημείο (blind spot)" στην αντίληψή του για τον κόσμο. Αυτή είναι μια περίπτωση



επεξεργασίας σε ανώτερο επίπεδο που αποκρύπτει (ή συμπληρώνει) τις λεπτομέρειες των πληροφοριών χαμηλού επιπέδου. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η δομή του ανθρώπινου οφθαλμού.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος είναι:

- Ο εντοπισμός των αντιθέσεων αναφορικά με την φωτεινότητα και το χρώμα των αντικειμένων.
- Η ανίχνευση των χωρικών συχνοτήτων μεταβολής της λαμπρότητας (δηλ. ο αριθμός εναλλαγών μεταξύ φωτεινών/σκοτεινών περιοχών).
- Η ανίχνευση κινήσεων (ακόμα και πολύ μικρών), αντικείμενων και σχημάτων, μέσω του ελέγχου στον οφθαλμό (δηλαδή τον έλεγχο των μυών για να βοηθήσει το μάτι να παρακολουθήσει ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος).
- Ο προσδιορισμός μεγεθών και του προσανατολισμού ανεξάρτητα από την οπτική γωνία ή την απόσταση.
- Η αναγνώριση του χρώματος ενός αντικειμένου κάτω από μια ποικιλία συνθηκών φωτισμού και το σχήμα.
- Ο καθορισμός και η αίσθηση του βάθους (συντονισμός χειρός-ματιού).



**Εικόνα 4:** Μια αναπαράσταση της δομής του ανθρώπινου ματιού.

Το άμεσο ηλιακό φως είναι μια εξαιρετικά ισχυρή πηγή φωτισμού, με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται κατά την διάρκεια των θερινής περιόδου σε αίθριες συνθήκες. Λόγω της μεγάλης λαμπρότητας του ηλιακού δίσκου (και της περιοχής του ουρανού που τον περικλείει), η οπτική επαφή μαζί του δημιουργεί μεγάλη οπτική αλλά και θερμική δυσφορία (visual & thermal discomfort). Ο διάχυτος φωτισμός, από την άλλη πλευρά, που προέρχεται από τον ουρανό ή λόγω ανάκλασης του ηλιακού φωτός σε εξωτερικές επιφάνειες, μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετικά ποιοτική πηγή φωτισμού χωρίς τις αρνητικές επιπτώσεις της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι ορθές πρακτικές σχεδιασμού με φ.φ. βασίζονται συνήθως στη μεγιστοποίηση της χρήσης του διάχυτου φ.φ και στην ρύθμιση της διείσδυσης του άμεσου ηλιακού φωτός. Σε γενικές γραμμές, το ηλιακό φως πρέπει να επιτρέπεται να εισέρχεται στο εσωτερικό των χώρων των κτιρίων πάντοτε με ελεγχόμενο τρόπο.

Η παροχή φωτισμού στα κτίρια χρησιμοποιώντας φυσικό φως ως υποκατάστατο του ηλεκτρικού, αποτελεί μία ελκυστική λύση για διάφορους λόγους:

- Το φυσικό φως ως πόρος είναι ουσιώδης. Κατά τη διάρκεια των περισσότερων ωρών εργασίας, η φωτεινή ροή που εισέρχεται από τα ανοίγματα μπορεί εν δυνάμει να καλύψει τις ανάγκες σε φωτισμό, γεγονός που δείχνει ότι θα πρέπει να είναι δυνατή η σχεδίαση ανοιγμάτων που παρέχουν αρκετό φωτισμό για να αντισταθμίσουν στο μεγαλύτερο μέρος ή όλη την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Δυστυχώς λόγω της εκθετικής μείωσης των επιπέδων φωτισμού με την απόσταση από το άνοιγμα, συνοδεύεται από ισχυρή ανομοιομορφία.
- Η φωτεινή αποτελεσματικότητα (luminous efficacy) του φ.φ. είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή των εμπορικά διαθέσιμων ηλεκτρικών λαμπτήρων (όχι από τις τελευταίες γενιές LED των οποίων η φωτεινή αποτελεσματικότητα μπορεί να είναι > 150 Lm/W, πράγμα που σημαίνει ότι το φυσικό φως έχει τη δυνατότητα να μειώσει τα φορτία ψύξης του κτιρίου αντικαθιστώντας το ηλεκτρικό φως.
- Το φυσικό φως είναι φως πλήρους φάσματος, με σημαντικά οφέλη για την υγεία και την χρωματική απόδοση (color rendering).
- Το φυσικό φως υφίσταται συνεχώς αλλαγές στην ένταση και τις λεπτές αλλαγές του χρώματος που ενισχύουν την αίσθηση σύνδεσης του χρήστη με το εξωτερικό περιβάλλον (υπόθεση Βιοφιλίας).

- Η ηλεκτρική ενέργεια είναι εγγενώς μία από τις ακριβότερες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιείται στα κτίρια και τα ηλεκτρικά φωτιστικά είναι αρκετά αναποτελεσματικά στη μετατροπή αυτής της ενέργειας σε φωτισμό.

Κατά την διαδικασία σχεδιασμού ποιοτικά-φωτισμένων χώρων, υπάρχουν τρεις (3) παράγοντες που πρέπει πάντοτε να λαμβάνονται υπόψη: Η ποσότητα, η ποιότητα και η κατανομή του φωτισμού. Όπως αναφέρθηκε τα επίπεδα φ.φ. μειώνονται εκθετικά με την αύξηση της απόστασης από το παράθυρο. Αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο εμφανές σε χώρους με μεγάλο βάθος όπου ακόμη και μια πλήρως από υαλοπίνακες καλυμμένη πρόσοψη ο φ.φ., δεν είναι σε θέση να φωτίσει αποτελεσματικά τον χώρο χωρίς την πρόσθετη υποστήριξη από τον τεχνητό φωτισμό. Είναι προφανές ότι σε χώρους με μεγάλο βάθος ο φ.φ. δεν μπορεί να υποκαταστήσει τον ηλεκτρικό φωτισμό, ακόμη και σε ιδιαίτερα φωτεινές μέρες.

Λόγω των στρατηγικών εξοικονόμηση ενέργειας που έχουν ήδη υιοθετηθεί σε πολλές χώρες του πλανήτη, η χρήση συστημάτων ρύθμισης της φωτεινής ροής των φωτιστικών χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο [34]. Αυτό σημαίνει ότι περιοχές του κτιρίου διαμορφώνονται με κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επωφελούνται από τη χρήση του φ.φ. και είτε να λειτουργούν συμπληρωματικά με τα συστήματα φωτισμού είτε, να αντικαθιστούν τον τεχνητό φωτισμό εντελώς, όταν αυτό είναι δυνατόν. Επομένως, κατά το σχεδιασμό κτιρίων είναι κεφαλαιώδους σημασίας ο προσδιορισμός της διείσδυσης του φ.φ., οποίος πραγματοποιείται με την εκτίμηση των περιοχών ελέγχου φωτισμού (Lighting Control Zones). Σε αυτές τις περιοχές μπορούν να ελεγχθούν ξεχωριστά τα φορτία φωτισμού. Το μέγεθος των ανοιγμάτων, η θέση του στον τοίχο, οι ιδιότητες του υαλοπίνακα και των σκιάστρων επηρεάζουν την προαναφερθείσα διείσδυση.

Τα παράθυρα έχουν τρεις (3) κύριες λειτουργίες στα κτίρια:

- α. Την οπτική σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον.
- β. Την παροχή φυσικού φωτισμού και αερισμού.
- γ. Την είσοδο των ηλιακών κερδών. Ο έλεγχος των ηλιακών κερδών είναι πολλές φορές ανταγωνιστικός της επάρκειας σε φυσικό φως

Το μέγεθος και ο τύπος υαλοπίνακα ενός παραθύρου καθορίζουν πόσο φως μπαίνει σε ένα δωμάτιο, ενώ η θέση και το σχήμα ενός παραθύρου καθορίζουν την κατανομή του φωτισμού. Για παράδειγμα, σε χώρους με μικρή αναλογία παραθύρου-τοίχου (Window-to-Wall Ratio, WWR) η παροχή φυσικού φωτισμού μειώνεται ενώ με μεγαλύτερες αναλογίες WWR πιθανόν να δημιουργηθούν περιοχές με μεγάλη λαμπρότητα και ανομοιόμορφη κατανομή εντός του χώρου. Τα ανοίγματα είναι ο διαμεσολαβητής μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών. Όντας πιο ευαίσθητες στις εξωτερικές επιδράσεις, οι περιμετρικές ζώνες στο εσωτερικό του χώρου μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου αλλά και γενικά της άνεσης των χρηστών, θερμική και οπτική.

Οι ζώνες αυτές οι οποίες αναφέρονται επίσης και ως ζώνες εκμετάλλευσης φυσικού φωτισμού, γειτνιάζουν προφανώς με ανοίγματα, με το βάθος τους να καθορίζει την περιοχή που το σύστημα ηλεκτροφωτισμού μπορεί να ρυθμιστεί από κάποιο σύστημα ελέγχου. Δηλ. πρακτικά ο ορισμός της περιμετρικής ζώνης είναι παρόμοιος με τον ορισμό της θερμικής ζώνης στο σχεδιασμό συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού (heating-ventilation and air conditioning, HVAC) για την επίτευξη θερμικής άνεσης.

### 1.1.1 ΧΩΡΟΙ ΦΥΣΙΚΑ ΦΩΤΙΣΜΕΝΟΙ

Οι κύριοι περιορισμοί του φυσικού φωτισμού συνήθως οφείλονται στα ηλιακά κέρδη και τη μεταβλητότητα της θέσης του ήλιου, της έντασης του φωτισμού και των συνθηκών του ουρανού. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και η ενσωμάτωσή της σε μια στρατηγική ελέγχου του ηλεκτρικού φωτισμού είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία ποιοτικών χώρων εργασίας ή κατοικίας. Κατά την εξέταση ενός φυσικά φωτισμένου περιβάλλοντος, υπάρχουν μια σειρά από παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Η ποικιλία των συνθηκών φωτισμού, κατά την οποία οι άνθρωποι εκτελούν διάφορες εργασίες με ικανοποιητικό τρόπο, είναι μεγάλη και οι διαφορές μεταξύ των ατόμων ως προς το τι θεωρείται ως "ικανοποιητικές οπτικές συνθήκες" είναι μεγάλες [35]. Ο τρόπος με τον οποίο οι άνθρωποι βιώνουν το φως εξαρτάται εν μέρει από τη διάθεσή τους, από την αντίληψη και από τον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται με τον φωτισμό εν γένει, σχέση η οποία διαμορφώνεται κυρίως από τις ατομικές προτιμήσεις και τις ανάγκες δημιουργίας άνετων συνθηκών [36]. Σύμφωνα με τον Steemers [37], ο σχεδιασμός με φ.φ. πρέπει να υποστηρίζει και να ανταποκρίνεται στις οπτικές και αντιληπτικές ανάγκες των χρηστών και συνεπώς οι συνθήκες φωτισμού του εσωτερικού χώρου που ενσωματώνουν τον φ.φ. θα πρέπει να επαρκούν έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να ολοκληρώνουν τα καθήκοντά τους με αποτελεσματικό τρόπο χωρίς οπτική όχληση, κούραση ή άλλης μορφής οπτική δυσφορίας.

Οι Iwata et al. [38] εξέτασαν τη σχέση μεταξύ του φ.φ. και της οπτικής άνεσης σε μια αίθουσα διδασκαλίας. Ένας από τους βασικούς παράγοντες που διαπιστώθηκαν κατά το σχεδιασμό ενός άνετου φυσικά φωτισμένου περιβάλλοντος ήταν η εξάλειψη σκοτεινών περιοχών ή της υπερβολικής φωτεινότητας στο επίπεδο εργασίας. Μία ανασκόπηση από τους Konstantzos et al. [39] παρουσίασε τους παράγοντες των συνθηκών φωτισμού που επηρεάζουν την παραγωγικότητα των χρηστών στους εσωτερικούς χώρους. Με βάση την έρευνα που διεξήχθη τα κύρια συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν είναι ότι η παραγωγικότητα των χρηστών φαίνεται να βελτιώνεται την αύξηση των επιπέδων φωτισμού στο χώρο, με λόγους

αντίθεσης μεταξύ 7 – 11: 1 (με δεδομένο την διασφάλιση μη παρουσίας θάμβωσης στον χώρο), την λαμπρότητα και τη χρωματική απόδοση.

Το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του φυσικού φωτισμού είναι η ένταση φωτισμού (Illuminance). Ορίζεται ως η προσπίπτουσα φωτεινή ροή σε μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας [39]. Είναι το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο μέγεθος μέτρησης του φωτισμού και είναι το μέγεθος που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα του φωτισμού σε μια επιφάνεια, εκπεφρασμένο σε Lux (lx).

Η μεταβλητότητα του φυσικού φωτισμού καθιστά δύσκολη τις απαιτήσεις για επίτευξη συγκεκριμένων επιπέδων φ.φ. Για να ξεπεραστεί αυτό, το φυσικό φως αντιμετωπίζεται κυρίως ως στατική λύση, όπως ο τεχνητός φωτισμός και χρησιμοποιείται ως συμπληρωματικό μέτρο στον φωτισμό του χώρου. Σε ποσοτικό επίπεδο, ο φ.φ. προσδιορίζεται από τα ίδια πρότυπα που χρησιμοποιούνται και για τον τεχνητό φωτισμό και βασίζονται συνήθως σε ενδεδειγμένες πρακτικές που στοχεύουν στα ελάχιστα επίπεδα φωτισμού που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση συγκεκριμένων οπτικών εργασιών με τον καθορισμό κατώτερων ορίων αποδοχής [40-43]. Ωστόσο, ο καθορισμός των επιπέδων αυτών από τα γενικά πρότυπα δεν εξαρτώνται από κάποια συγκεκριμένη πηγή φωτισμού (φυσικό ή τεχνητό φωτισμό), αλλά από μια επιθυμητή τιμή σχεδιασμού. Γενικά οι συνθήκες φωτισμού καθαρίζονται είτε σε πρότυπα, είτε σε οδηγίες σχεδιασμού τις οποίες οι σχεδιαστές εφαρμόζουν. Στην Ε.Ε. τα πρότυπα συνήθως ενσωματώνονται στην νομοθεσία κάθε κράτους μέλους.

Το πρότυπο EN 12464: 1 – 2011. Light and lighting - Lighting of workplaces. Part 1: Indoor workplaces [41], παρέχει τις απαιτήσεις τεχνητού φωτισμού για διαφορετικές καταστάσεις εργασίας. Για παράδειγμα σε χώρους γραφείων για εργασίες όπως γραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων κ.λπ. Τα προτεινόμενα επίπεδα φωτισμού σχεδιασμού είναι γενικά 500 lx στο επίπεδο εργασίας (εκτός των εργασιών σε ΗΥ).

Σύμφωνα με τον Οδηγό Φωτισμού του CIBSE LG10: Daylighting and Window Design [43], το επίπεδο εργασίας ορίζεται ως το οριζόντιο, κάθετο ή κεκλιμένο επίπεδο στο οποίο εκτελείται μια οπτική εργασία. Το επίπεδο εργασίας συνήθως λαμβάνεται ως 0.8 m ή 0.85 m πάνω από το δάπεδο (ανάλογα με το υιοθετημένο πρότυπο κάθε φορά) για χώρους γραφείων. Η

Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) [42] έχει επίσης θεσπίσει ένα σύνολο ελαχίστων προτεινόμενων επιπέδων φωτισμού για μια ποικιλία οπτικών εργασιών και χρήσεις χώρων. Σε αυτές τις απαιτήσεις για καλό φωτισμό, δε γίνεται καμία διάκριση ανάμεσα στο φυσικό και τεχνητό φωτισμό. Συνεπώς το σύστημα φωτισμού έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε να παρέχει τα απαιτούμενα επίπεδα φωτισμού ομοιόμορφα σε όλο το επίπεδο εργασίας, ανεξάρτητα από άλλες πηγές φωτισμού (πχ. ήλιο) που μπορεί να συνεισφέρουν.

Τα επίπεδα φ.φ., το επιθυμητό εύρος τους και η κατανομή έχει εξεταστεί σε πολλές μελέτες [44-50] και καθεμία από αυτές παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα ατομικών προτιμήσεων λόγω της προσαρμογής των χρηστών σε διάφορες συνθήκες φωτισμού. Οι άνθρωποι προτιμούν να εργάζονται σε φυσικά φωτισμένους χώρους σε σχέση με τους τεχνητά φωτισμένους και επιλέγουν την μεταβλητότητα του φ.φ. σε σχέση με την ομοιόμορφη κατανομή που δημιουργείται από το ηλεκτρικό φως. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι άνθρωποι τείνουν να ανέχονται πολύ χαμηλότερα επίπεδα φ.φ. από εκείνα που προέρχονται από το τεχνητό φως, τόσο χαμηλά όσο 50 lx για ανάγνωση, συνήθως κατά το τέλος της ημέρας [44] και περίπου 100 lx για εργασία με ηλεκτρονικούς υπολογιστές [47] ενώ χαρακτηρίζουν πολύ ικανοποιητικά επίπεδα φωτισμού ίσα με 150 lx [45]. Επιπρόσθετα έχει παρατηρηθεί ότι οι χρήστες μπορούν να ανεχθούν επίπεδα φ.φ. μεγαλύτερα από 2500 lx, εάν αποφευχθούν προβλήματα, όπως η θάμβωση ή το άμεσο ηλιακό φως [50].

Διάφορες μελέτες [51-54] έχουν υποθέσει ότι τα υψηλά επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της οπτικής ενόχλησης και με βάση αυτή την υπόθεση, έγιναν συστάσεις για ένα ανώτερο όριο στα επίπεδα φωτισμού όπως > 2500 lx, 3000 lx, 4000 lx και 5000 lx [53-56]. Πιο πρόσφατες μελέτες [55] υποδεικνύουν ότι τα προτιμώμενα επίπεδα φωτισμού βρίσκονται μεταξύ 100 lx και 5000 lx με το κατώτερο όριο να καθορίζεται από την απόδοση του ανθρώπινου οπτικού συστήματος και έτσι συνιστάται περαιτέρω έρευνα σχετικά με αυτό το όριο πριν από την πλήρη αποδοχή ενός προτιμώμενου εύρους. Σε γενικές γραμμές θεωρείται ότι ο επαρκής και ομοιόμορφα κατανομημένος φ.φ. δημιουργεί ένα ευχάριστο εσωτερικό περιβάλλον και οι προαναφερθείσες έρευνες δείχνουν ότι η ανθρώπινη αντίληψη στο τι θεωρεί "άνετο", "καλό" ή "ευχάριστο" φυσικά φωτισμένο εσωτερικό περιβάλλον δεν συσχετίζεται



απαραιτήτως με τα προτεινόμενα επίπεδα φωτισμού για την πραγματοποίηση διαφόρων εργασιών και δραστηριοτήτων.

### 1.1.2 ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα κτίρια, εμπορικά και κατοικιών, αντιπροσωπεύουν το 40% της χρήσης πρωτογενούς ενέργειας και εάν συμπεριληφθεί και η κατανάλωση ενέργειας και στον τομέα της μεταποίησης, του χάλυβα, του τσιμέντου, του αλουμινίου και του γυαλιού που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων, το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί περισσότερο από 50% [56]. Στον Ελλαδικό χώρο συγκεκριμένα, αποτελούν ένα από τους μεγαλύτερους τελικούς χρήστες της ενέργειας. Ο κτιριακός τομέας στην Ελλάδα ευθύνεται για το ένα τρίτο περίπου των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και για το 36% περίπου της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Ο κτιριακός τομέας αντιπροσωπεύει το 25% – 40% της τελικής ζήτησης ενέργειας. Η συνολική ζήτηση ενέργειας θα μπορούσε να μειωθεί με απλή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Αντίστοιχα, πολύ υψηλό είναι και το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στα κτίρια της χώρας. Το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε στην Ελλάδα το 2012 αφορά τον οικιακό (36%) και τον τριτογενή τομέα (29%). Ο ελληνικός τομέας των κτηρίων έχει έντονο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λόγω χρήσης πρωτογενών υλών, κατανάλωσης φυσικών πόρων και παραγωγής ρύπων και αποβλήτων [57].

Επί του παρόντος, στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 4.5 εκατομμύρια κτίρια [58]. Επιπλέον, σχεδόν το 70% του σημερινού κτιριακού αποθέματος χρήζει ανακαίνισης σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων 2002/91/EC [59], δεδομένου ότι έχει κατασκευαστεί πριν από το 1980 [58], πριν από την πρώτη νομοθεσία για την θερμική επάρκεια του κτιριακού κελύφους το 1981. Η κυβέρνηση συνεπώς πρέπει να διασφαλίσει ποιοτικά κριτήρια για την αντιμετώπιση της συνεχιζόμενης ζήτησης κατοικιών και την προώθηση νέων τεχνολογιών για την αναβάθμιση του δομημένου περιβάλλοντος. Τα τελευταία χρόνια υιοθετήθηκαν αρκετοί νόμοι, υπουργικές αποφάσεις, προεδρικά διατάγματα και νομοθετικές πράξεις για την εισαγωγή της ενεργειακής απόδοσης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας σε όλους τους τομείς της Ελλάδας. Στην ανάλυση των Droutsas et al. [60] με χρήση αποτελεσμάτων από ενεργειακές επιθεωρήσεις, η πρωτογενής κατανάλωση για φωτισμό είναι η μεγαλύτερη από την κατανάλωση για θέρμανση, ψύξη και ζεστό νερό χρήσης (ZNX) για κτίρια γραφείων με την αλλαγή του συστήματος φωτισμού να

είναι η δεύτερη στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας που επιλέγεται. Είναι συνεπώς προφανές ότι η μείωση της κατανάλωσης για φωτισμό θα πρέπει να αποτελέσει μια από τις κύριες εθνικές στρατηγικές εξοικονόμησης.

Οι κύριες δράσεις και τα μέτρα που έχουν τεθεί σε ισχύ από το 2007 και μετά, στο πλαίσιο της επίτευξης της στοχοθεσίας για εξοικονόμηση ενέργειας, υλοποιήθηκαν σε εθνικό επίπεδο και αφορούσαν κυρίως την ανάπτυξη του θεσμικού και ρυθμιστικού πλαισίου για την υιοθέτηση των πολιτικών, των υποχρεώσεων και των στρατηγικών σε όλους τους τομείς τελικής χρήσης, στο πλαίσιο της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση και την ενεργειακή επιθεώρηση των κτιρίων, τις ελάχιστες απαιτήσεις των νέων κτιρίων, οι υποχρεώσεις του δημόσιου τομέα και των παρόχων ενέργειας και ο μηχανισμός για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της προόδου προς την επίτευξη του εθνικού στόχου.

Το νομικό πλαίσιο που καλύπτει την δραστηριότητα των κατασκευών είναι ιδιαίτερα εκτενές. Το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο που έχει υιοθετηθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την προώθηση της ορθολογικής χρήσης της ενέργειας στα κτίρια στην Ελλάδα, αλλά και για την αύξηση του μεριδίου της ενέργειας από ΑΠΕ στον κτηριακό τομέα, περιγράφεται συνοπτικά στη συνέχεια.

- Ν. 3661/2008: Μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια και άλλες διατάξεις. Ο νόμος καθορίζει το πλαίσιο της ενεργειακής απόδοσης σχεδόν σε όλους τους τύπους κτιρίων. Ρυθμίζει τη μεθοδολογία για τον καθορισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, τις ελάχιστες προδιαγραφές που θα πρέπει να πληρούν τα κτίρια, το περιεχόμενο των ενεργειακών μελετών και τις προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα πρόσωπα τα οποία εκτελούν τις ενεργειακές μελέτες. Επίσης, ρυθμίζει το περιεχόμενο, τη συχνότητα και τις διαδικασίες εκτέλεσης των ενεργειακών επιθεωρήσεων σε κτίρια, λέβητες και συστήματα κλιματισμού καθώς και τα προσόντα και τη διαδικασία πιστοποίησης των ενεργειακών επιθεωρητών. Καθορίζει ότι σε νέα κτίρια, ή σε κτίρια που ανακαινίζονται ριζικά και τα οποία έχουν επιφάνεια άνω των 1000 m<sup>2</sup> θα πρέπει η μελέτη για την έκδοση αδειάς να συνοδεύεται από ενεργειακή μελέτη.

- Ν. 3855/2010: Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση, ενεργειακές υπηρεσίες και άλλες διατάξεις. Ο Ν. 3661/2008 τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του Ν.3855/2010, ο οποίος, μεταξύ άλλων, επιτάσσει την υποχρέωση για τα νέα ή ανακαινισμένα κτίρια να καλύπτουν το 60% των αναγκών τους για ζεστό νερό μέσω θερμικών ηλιακών συστημάτων. Παράλληλα θεσπίστηκε για τα κτήρια η υποχρέωση για την έκδοση Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης τόσο για την κατασκευή νέων και τη ριζική ανακαίνιση υφιστάμενων, όσο και κατά την αγοραπωλησία και ενοικίαση. Όπου στο Άρθρο 8 γίνεται αναφορά για τα μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας στο δημόσιο τομέα και στο Άρθρο 16 σχετικά με το πλαίσιο των Συμβάσεων Ενεργειακής Απόδοσης (ΣΕΑ). Ο νόμος μεταφέρει την Οδηγία 2006/32/ΕΚ στο εθνικό δίκαιο, προβλέπει ειδικά μέτρα για τα κτίρια του δημόσιου τομέα ώστε να βελτιωθεί η ενεργειακή τους απόδοση και να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, θέτει το πλαίσιο για τη δημιουργία της αγοράς των Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών (ΕΕΥ) στην Ελλάδα μέσω των ΣΕΑ, καθώς και την προώθηση της χρήσης των οικιακών συστημάτων ΑΠΕ.
- Ειδικότερα, ως προς τις βασικότερες διατάξεις του Ν.3855/2010, πρέπει να επισημανθεί ότι έχουν θεσπιστεί μέτρα για την ανάπτυξη της αγοράς ενεργειακών υπηρεσιών μέσω Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών, δίδονται κατευθύνσεις για το ρόλο που πρέπει να διαδραματίσει ο δημόσιος τομέας, ενώ παράλληλα αποτυπώνονται και οι υποχρεώσεις προς τους διανομείς ενέργειας, διαχειριστές δικτύων διανομής και επιχειρήσεις λιανικής πώλησης ενέργειας (ενεργειακοί έλεγχοι, διακριτά τιμολόγια, έξυπνοι μετρητές). Τέλος, παρατίθεται μια σειρά θεσμικών μέτρων τα οποία πρέπει να αναπτυχθούν, ώστε να επιτευχθεί η προβλεπόμενη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Οι παραπάνω δύο νόμοι αντικαταστάθηκαν από το Ν. 4122/2013 που ενσωματώνει στην εθνική νομοθεσία την οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ε. Κ. και του Συμβουλίου. Με το Ν. 4122/2013 απαιτείται ο επαναπροσδιορισμός των ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων με μία μεθοδολογία υπολογισμού του βέλτιστου από πλευράς κόστους επιπέδων των ελάχιστων απαιτήσεων. Επιπλέον από 1/1/2021 όλα τα νέα κτίρια πρέπει να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης

ενέργειας (για τα νέα κτίρια του δημοσίου τομέα η υποχρέωση ισχύει από 1/1/2019).

- Υ. Α. Δ6/Β/14826/17.6.2008: Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα.
- Υ. Α. ΥΠΑΝ/Δ5 – ΗΛ/Γ/Φ1/οικ. 15606 (ΦΕΚ. Β'1420/15.7.2009): Καθορισμός εναρμονισμένων τιμών αναφοράς των βαθμών απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.
- Υ. Α. Δ9ΒΔ/Φ166/οικ. 13068/11.06.2009: Η οποία καθορίζει, απλοποιεί και διευκολύνει τη διαδικασία αδειοδότησης και το πλαίσιο για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων για ίδια χρήση μέσω ενεργειακών συστημάτων (γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) για τη θέρμανση και ψύξη των χώρων ενός κτιρίου
- Υ. Α. ΥΠΑΝ/Δ5/–ΗΛ/Γ/Φ1/οικ. 15641 (ΦΕΚ. Β'1420/15.7.2009): Καθορισμός λεπτομερειών της μεθόδου υπολογισμού της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή και της αποδοτικότητας συμπαραγωγής.
- Υ. Α. Δ6/Β/οικ. 5825/9.4.2010: Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων (Κ. Ε. Ν. Α. Κ.). Ο "Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων" καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και τη διαδικασία των ενεργειακών επιθεωρήσεων των κτιρίων και των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού.
- Ν. 3851/2010: Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.
- Υ. Α. 16094/08.04.2008 (ΦΕΚ. Β'917) & 16095/8.04.2008 (ΦΕΚ. Β'925) 3851/2010: του Υφυπουργού Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων. Οι αποφάσεις αυτές ενσωματώνουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα στις διατάξεις που ήδη ισχύουν για τους ηλιακούς συλλέκτες.
- Υ. Α. Α6/Β'/14826/17.6.2008: Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο και ευρύτερο δημόσιο τομέα. Όπου μεταξύ άλλων προβλέπεται η υποχρεωτική σύνδεση με το δίκτυο φυσικού αερίου και η υποχρέωση ορισμού ενεργειακών υπευθύνων στα δημόσια κτίρια.

- Υ.Α.Δ9ΒΔ/Φ166/οικ.13068/11.06.2009: Η οποία καθορίζει, απλοποιεί και διευκολύνει τη διαδικασία αδειοδότησης και το πλαίσιο για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων για ιδία χρήση μέσω ενεργειακών συστημάτων (γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) για τη θέρμανση και ψύξη των χώρων ενός κτιρίου.
- Ν. 3889/2010: Χρηματοδότηση Περιβαλλοντικών Παρεμβάσεων, Πράσινο Ταμείο, Κύρωση Δασικών Χαρτών και άλλες διατάξεις, όπου καθιερώνεται ένα ολοκληρωμένο και ειδικό σύστημα χρηματοδότησης περιβαλλοντικών παρεμβάσεων, με στόχο την ενίσχυση της ανάπτυξης μέσω της προστασίας του περιβάλλοντος και την αποτελεσματική και διαφανή διαχείριση των πόρων για την αναβάθμιση και αποκατάσταση του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Το σύστημα χρηματοδότησης περιλαμβάνει τη θεσμοθέτηση της Στρατηγικής Επιτροπής Περιβαλλοντικής Πολιτικής, τη διασφάλιση, εξειδίκευση, ταξινόμηση και συστηματοποίηση των πόρων που διατίθενται για την προστασία, αναβάθμιση και αποκατάσταση του περιβάλλοντος και την αναδιάρθρωση και οργάνωση του φορέα διαχείρισης των πόρων αυτών, ο οποίος είναι το νομικό πρόσωπο δημοσίου δικαίου με τον επωνυμία "Πράσινο Ταμείο".
- Π. Δ. 100/2010 (ΦΕΚ. 177/ Α' /6.10.2010): Ενεργειακοί Επιθεωρητές Κτιρίων, Λεβήτων και Εγκαταστάσεων Θέρμανσης και Εγκαταστάσεων Κλιματισμού. Καθορίζει τα προσόντα των ενεργειακών επιθεωρητών και τη διαδικασία εγγραφής τους στο Μητρώο Ενεργειακών Επιθεωρητών, όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει με τον Ν. 4111/2013 (ΦΕΚ. Α' 18/25.01.2013): Συνταξιοδοτικές ρυθμίσεις, τροποποιήσεις του Ν. 4093/2012.
- Υ.Α.Δ6/7094/23.5.2011: Πλαίσιο μεθοδολογίας μέτρησης και επαλήθευσης της εξοικονομούμενης ενέργειας για την επίτευξη του ενδεικτικού εθνικού στόχου εξοικονόμησης ενέργειας στην τελική χρήση - Κατάλογος ενδεικτικών επιλέξιμων μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Ενεργειακό περιεχόμενο καυσίμων για τελική χρήση. Με τις διατάξεις της υπουργικής απόφασης καθορίζονται α. ο τρόπος και η διαδικασία για τη μέτρηση και την επαλήθευση της εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς και η περιγραφή της μεθοδολογίας μέτρησης και επαλήθευσης της εξοικονομούμενης ενέργειας, β. κατάλογος ενδεικτικών επιλέξιμων μέτρων

βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και γ. το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσίμων για τελική χρήση και ο πίνακας μετατροπής τους.

- Υ.Α.Δ9ΒΔ/Φ166/οικ.13068/11.06.2009: Η οποία καθορίζει, απλοποιεί και διευκολύνει τη διαδικασία αδειοδότησης και το πλαίσιο για την αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων για ίδια χρήση μέσω ενεργειακών συστημάτων (γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) για τη θέρμανση και ψύξη των χώρων ενός κτιρίου.
- Υ.Α.Δ6/13280/7.6.2011: Επιχειρήσεις Ενεργειακών Υπηρεσιών. Λειτουργία, Μητρώο, Κώδικας Δεοντολογίας και συναφείς διατάξεις. Η υπουργική απόφαση καθορίζει τα κριτήρια των ΕΕΥ, καθώς και τη διαδικασία εγγραφής στο Μητρώο των Επιχειρήσεων Ενεργειακών Υπηρεσιών.
- Ν.4122/2013: Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες που διεξήχθησαν στον κτιριακό τομέα στην Ελλάδα σχετικά με το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας [61-63], τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι οι προσπάθειες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις των ενεργειακών απαιτήσεων και έτσι να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της Ε. Ε. Η οδηγία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων είναι το κύριο νομοθετικό πλαίσιο σε επίπεδο Ε. Ε. για την επίτευξη ενεργειακών επιδόσεων στα κτίρια. Σύμφωνα με την οδηγία αυτή, τα κράτη μέλη πρέπει να ελαχιστοποιούν τις απαιτήσεις σχετικά με την ενεργειακή απόδοση νεόδμητων και υφιστάμενων κτιρίων και να εξασφαλίζουν την πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης τους και των ενεργειακών απαιτήσεων.

Τα κτίρια, όπως σχεδιάζονται και χρησιμοποιούνται σήμερα, συμβάλλουν σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα εξαιτίας της υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας και άλλων φυσικών πόρων. Η στενή σχέση μεταξύ της χρήσης ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προκύπτει, επειδή κατά τον σχεδιασμό ενός κτιρίου έχουν επιλεγεί ενεργειακές λύσεις, ώστε το κτίριο να μπορεί κατά την λειτουργία του να ανταποκριθεί αποδοτικά στις απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό και φωτισμό με αποτέλεσμα να προκαλούν σοβαρή εξάντληση των πολύτιμων περιβαλλοντικών πόρων. Ωστόσο, τα κτίρια μπορούν να σχεδιαστούν για να ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών για θερμική και οπτική άνεση σε

συνδυασμό με μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και πόρων. Η ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy efficiency) σε νέες και υπάρχουσες κατασκευές μπορεί να επηρεαστεί από την υιοθέτηση μιας ολιστικής προσέγγισης (integrated approach) κατά τον σχεδιασμό του κτιρίου. Τα κύρια βήματα αυτής της προσέγγισης παρατίθενται παρακάτω:

- Ενσωμάτωση ηλιακών παθητικών τεχνικών για τον σχεδιασμό κτιρίων ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα φορτία των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης-κλιματισμού (HVAC) [64].
- Σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων φωτισμού [65].
- Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, ηλιακοί συλλέκτες, κτλ., για την πλήρη ή μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών [66].
- Χρήση υλικών με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μοντέλα δομικών πληροφοριών (building information modeling, BIM) ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος [67].

Οι σημερινές γνώσεις σε συνδυασμό με τα τεχνολογικά επιτεύγματα θα μπορούσαν να επιτύχουν αυτές τις δραματικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας από τα κτίρια, αλλά αυτό που παρατηρείται είναι η εφαρμογή τους να γίνεται με αργούς ρυθμούς. Για τη δημιουργία ενός επιτυχημένου κτιρίου υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση στη διαδικασία σχεδιασμού. Καθώς τα κτίρια εξελίσσονται και ο σχεδιασμός τους γίνεται πιο σύνθετος, η χρήση επιπρόσθετων λογισμικών προγραμμάτων και πληροφοριών έχουν αντίκτυπο σε ολόκληρη την διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής. Ανάμεσά τους είναι τα μοντέλα δομικών πληροφοριών (building information modeling, BIM), τα οποία είναι η νεότερη τάση στον σχεδιασμό με τη βοήθεια λογισμικών προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών (computer-aided design CAD) [68, 69]. Το BIM έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τον ρόλο των σχεδίων κατά τη διαδικασία κατασκευής, να βελτιώσει την αρχιτεκτονική παραγωγικότητα και να διευκολύνει την εξέταση και την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού [70].

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, πρέπει να υπάρχει μια ολιστική προσέγγιση που να αποσκοπεί στη μείωση των φορτίων θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού μέσω πρακτικών



εξοικονόμησης ενέργειας που ανταποκρίνονται στο κλίμα (climate-responsive design), χρησιμοποιώντας αρχικά προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης νωρίς στη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποιώντας τις στρατηγικές ελέγχου των συστημάτων πχ. με χρήση αισθητήρων για τον έλεγχο των φορτίων με βάση την παρουσία των χρηστών μέσα στο χώρο, με χρονοπρογράμματα και τη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων, ιδίως του φ.φ. ή τον φυσικό αερισμό [71].

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό αυξάνεται στα κτίρια. Σε θερμά κλίματα, η ενέργεια που καταναλώνεται ειδικά για ψύξη είναι σημαντική λόγω της κλιματικής αλλαγής. Οι κύριοι λόγοι είναι:

- α. Η αύξηση της διάρκειας και της έντασης των θερμών περιόδων.
- β. Η εκτεταμένη χρήση των συστημάτων κλιματισμού.

Το πρόβλημα οφείλεται στον μη αποκλεισμό της θερμότητας να εισέλθει στο εσωτερικό των κτιρίων κυρίως κατά την θερινή περίοδο. Το λάθος έγκειται συνήθως στον σχεδιασμό του κτιρίου ώστε να προστατεύεται σωστά από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία κατ' αρχάς μέσω της επιλογής των υαλοπινάκων. Για κάποιο χώρο καθώς αυξάνεται η αναλογία παραθύρου-τοιχίου (Window-to-Wall Ratio, WWR) αυξάνονται και τα ηλιακά κέρδη [72], που με τη σειρά τους μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση του χώρου. Η τοποθέτηση, ο σχεδιασμός και η επιλογή των υλικών των παραθύρων είναι εξαιρετικά σημαντικές παράμετροι αφού έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τα ψυκτικά και θερμικά φορτία ενός κτιρίου, καθώς, επίσης και τα ηλεκτρικά φορτία για φωτισμό, αφού ελέγχουν σε σημαντικό βαθμό τη ροή ακτινοβολίας.

Η χαρακτηριστική ιδιότητα των διαφανών υλικών να μεταδίδουν την ακτινοβολία με σχετικά μικρά μήκη κύματος, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία και να περιορίζουν την ακτινοβολία μεγαλύτερων μηκών κύματος [73] (ιδίως στις περιπτώσεις υαλοπινάκων με επίστρωση χαμηλής εκπεμπτικότητας), όπως είναι η υπέρυθρη μπορεί να οδηγήσει στην συσσώρευση της θερμότητας εντός του χώρου δημιουργώντας δυσάρεστες συνθήκες για τους χρήστες στο κτίριο [74]. Η απαίτηση για θερμική άνεση στο εσωτερικό περιβάλλον είναι θεμελιώδης αρχή και μη διαπραγματεύσιμη, που έχει σαν αποτέλεσμα σήμερα το να θεωρούμε τα συστήματα

κλιματισμού αναπόσπαστο μέρος του κτιρίου, όχι μόνο στα γραφεία αλλά και στις κατοικίες. Φυσικά το γεγονός αυτό σημαίνει αύξηση των αναγκών για επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια.

Επιπρόσθετο ρόλο ρυθμιστή της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο μέσω των ανοιγμάτων παίζουν τα συστήματα σκίασης. Αυτά με απλούς όρους είναι οποιαδήποτε συσκευές που περιορίζουν την ηλιακή ακτινοβολία από την εισοδό της στον εσωτερικό ενός κτιρίου. Φυσικά, υπάρχει μια εξαιρετικά ευρεία ποικιλία προϊόντων σκίασης διαθέσιμων προς χρήση [75], με διαφορετικές λειτουργίες. Μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη διατηρώντας ένα σχετικά αποδεκτό εύρος θερμοκρασιών στην μεταβολή των εξωτερικών μετεωρολογικών συνθηκών. Μπορούν επίσης να μειώσουν την ηλεκτρική ενέργεια για φωτισμό, εισάγοντας περισσότερο φως κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων συνθηκών (π.χ. νεφοσκεπών ημερών).

Η ενσωμάτωση ενός συστήματος σκιασμού σε ένα κτίριο δεν έχει μόνο αντίκτυπο στα ηλιακά κέρδη που εισέρχονται από την περιοχή του παραθύρου, αλλά και στα επίπεδα φωτισμού, την παρουσία θάμβωσης και την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον [75]. Έτσι, η οπτική και θερμική άνεση των χρηστών, καθώς επίσης και η κατανάλωση ενέργειας σε ένα κτίριο είναι στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους μέσω των συστημάτων σκίασης. Επιπρόσθετα, τα συστήματα σκιασμού προσφέρουν τη δυνατότητα διαφοροποίησης των προσόψεων του κτιρίου επηρεάζοντας το μορφολογικά [80]. Συνεπώς η απόφαση για κάποιο τύπο σκίασης θα πρέπει να λαμβάνεται στα αρχικά στάδια σχεδιασμού ώστε να είναι δυνατή η αισθητική τους ενσωμάτωση στο κτίριο. Συστήματα σκίασης μπορεί να είναι:

- Τα χαρακτηριστικά τοπίου όπως τα δέντρα.
- Τα εξωτερικά στοιχεία για παράδειγμα αρχιτεκτονικές προεξοχές ή κατακόρυφοι πρόβολοι.
- Οι οριζόντιες ανακλαστικές επιφάνειες που ονομάζονται ράφια φωτισμού.
- Οι υαλοπίνακες με χαμηλό συντελεστής σκίασης (Shading Coefficient, SC).
- Οι εσωτερικές ή εξωτερικές συσκευές, όπως τα Βενετσιάνα στόρια ή οι ρυθμιζόμενες περσίδες.

Με βάση τη θέση τους σε σχέση με την πρόσοψη, τα συστήματα σκιασμού μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις (3) κύριες ομάδες [76]:

- α. Εξωτερικά συστήματα.
- β. Εσωτερικά συστήματα.
- γ. Ενδιάμεσα συστήματα (Συσκευές που τοποθετούνται μεταξύ των υαλοπινάκων των παραθύρων).

Τα εξωτερικά συστήματα παρέχουν καλύτερη προστασία κυρίως την θερινή περίοδο από τα εσωτερικά συστήματα, επειδή εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία πριν εισέλθει στον εσωτερικό χώρο.

Τα ενδιάμεσα συστήματα σκιασμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

1. Ενδιάμεσα συστήματα μεταξύ δύο υαλοπινάκων (Double Glass Unit, DGU) και
2. Ενδιάμεσα συστήματα μεταξύ διπλών προσόψεων.

Τα ενδιάμεσα συστήματα σκιασμού είναι λιγότερο εκτεθειμένα στις καιρικές συνθήκες και την σκόνη, οπότε υπάρχει μικρότερη ανάγκη για καθαρισμό τους. Ωστόσο, εάν το σύστημα είναι δυναμικό πχ. Κινούμενες περσίδες αυτόματου ελέγχου, η συντήρηση μπορεί να είναι περίπλοκη και πιο δαπανηρή. Επιπρόσθετα μπορεί να απαιτηθεί μια πιο σύνθετη δομή παραθύρου.

Τα συστήματα σκιασμού μπορούν να είναι είτε σταθερά είτε κινητά. Στην περίπτωση των σταθερών συστημάτων, είναι συνήθως σχεδιασμένα έτσι για να εμποδίζουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται στο εσωτερικό των χώρων την διάρκεια των θερινών μηνών . Σε αντίθεση τα κινητά συστήματα σκίασης μπορούν να ικανοποιήσουν ταυτόχρονα και άλλες απαιτήσεις όπως ο έλεγχος των θερμικών κερδών, η προστασία από την θάμβωση, καθώς και για την μεταφορά φ.φ. στο εσωτερικό των χώρων Η κίνηση τους πραγματοποιείται είτε με κάποιο σύστημα ελέγχου είτε από τους ίδιους τους χρήστες και μπορεί να συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Καθώς τα κτίρια εξελίσσονται με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας γίνεται πιο μεγάλο, με αποτέλεσμα την μείωση των απαιτήσεων ενέργειας και τη δημιουργία πράσινων κτιρίων. Εκτός από τις βελτιώσεις των συστημάτων (αποδοτικές εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, αυτόματα συστήματα ελέγχου του τεχνητού φωτισμού, κλπ.), αλλαγές υφίσταται και το κέλυφος των κτιρίων. Οι

δυναμικές προσόψεις (Dynamic or Adaptive building envelopes) περιλαμβάνουν προηγμένες τεχνολογίες [77] με χρήση αυτοματοποιημένα στοιχεία ελέγχου σκίασης [78]. Η έννοια των δυναμικών προσόψεων είναι η εγκατάσταση ελεγχόμενων στοιχείων στο κέλυφος του κτιρίου, με στόχο τη βελτιστοποίηση ελέγχου του φ.φ. και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας [78]. Συστήματα σκίασης όπως οι δυναμικές περσίδες είναι πολύ αποτελεσματικές στον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας [80-82].

Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί αναφορικά με τις επιπτώσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας και τον φ.φ. στα κτίρια από την τοποθέτηση συστημάτων σκίασμού. Η Dubois [83] πραγματοποίησε μία ανασκόπηση των πλεονεκτημάτων της σκίασης στα κτίρια. Τα κύρια ευρήματα της έρευνας ήταν α. Τα συστήματα σκίασης μπορούν να μειώσουν τις θερμικές απώλειες μέσω του παραθύρου σημαντικά, ειδικά εάν η συσκευή είναι αεροστεγής και έχει ανοιχτό χρώμα, β. Εξωτερική σκίαση, όπως τέντες και προεξοχές, δεν είναι κατάλληλες για τον έλεγχο του φυσικού φωτισμού σε χώρους γραφείων, όπου η εργασία βασίζεται κυρίως σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, επειδή δεν εμποδίζουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται μέσα στο χώρο, γ. Οι πιο αποτελεσματικά συστήματα σκίασης είναι αυτά που εμποδίζουν ή ανακατευθύνουν το άμεσο φως και αφήνουν το διάχυτο να εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου.

Μια άλλη ανασκόπηση από τους Colaco et. al [84] παρουσιάστηκε επίσης σχετικά με τα πλεονεκτήματα από την χρήση συστημάτων ελέγχου των σκιάστρων. Ο Leslie et. al [85] ανέφεραν ότι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή αυτοματοποιημένων περσίδων σε συνδυασμό με συστήματα αυτόματου ελέγχου του τεχνητού φωτισμού. Μία παρόμοια μελέτη πραγματοποιήθηκε από τους Lee et. al [86]. Οι Tzempelikos και Athienitis [87] απέδειξαν ότι η μείωση στα ψυκτικά φορτία μπορεί να επιτευχθεί από την χρήση αυτόματων ελεγχόμενων ρολών (roller blinds) για ένα χώρο γραφείων. Οι Kapsis et. al [88] διεξήγαγαν μια σειρά προσομοιώσεων για bottom-up roller shades αναφορικά με την επίδραση που έχουν στα επίπεδα του φ.φ. σε χώρους γραφείων. Ο Athienitis και άλλοι [89] έδειξαν ότι οι αυτοματοποιημένες περσίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο το διάχυτο φως να εισέρχεται μέσα στον χώρο. Άλλοι ερευνητές [90-92] εξέτασαν επίσης την επίδραση των συστημάτων σκίασης στην κατανάλωση ενέργειας και τον φ.φ. στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων.

Στις μελέτες που προαναφέρθηκαν, το αντικείμενο της έρευνας ήταν είτε η επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση, είτε η μεγιστοποίηση του φ.φ ή και τα δύο, χωρίς όμως να ληφθεί υπόψη η επίδραση που έχουν τα συστήματα σκίασης στους χρήστες του κτιρίου. Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την απόκριση των χρηστών λόγω των αυτοματοποιημένων ελέγχων και χρήσης συστημάτων σκίασης όπως σε αυτή των Vine et al. [93], Reinhart και Voss [94] έδειξαν ότι τα συστήματα δεν ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των χρηστών τους και ότι για το αυτοματοποιημένο σύστημα πρέπει να γίνουν βελτιώσεις αναφορικά με τις στρατηγικές ελέγχου. Ο Rea [95] διεξήγαγε μία έρευνα αναφορικά με τον τρόπο που οι χρήστες χρησιμοποιούν τις περσίδες στα παράθυρα βάσει των επικρατούντων καιρικών συνθηκών και τον προσανατολισμό του χώρου.

Μετά από τη δεκαετία του 1940, η εκτεταμένη χρήση των λαμπτήρων φθορισμού, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό ανοικτών κατόψεων στα κτίρια και το μικρό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε σε μια υποβάθμιση της χρήσης του φυσικού φωτισμού. Η ενεργειακή κρίση που άρχισε την δεκαετία του 70 είχε ως αποτέλεσμα ένα νέο τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής κτιρίων. Παράγοντες όπως η εσωτερική ποιότητα του περιβάλλοντος (indoor environmental quality, IEQ) και η κατανάλωση ενέργειας άρχισαν να λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία σχεδιασμού. Τις τελευταίες δύο (2) δεκαετίες, σημειώθηκε μεγάλη πρόοδος στον τρόπο ανάλυσης της συνολικής απόδοσης των κτιρίων. Αυτές οι εξελίξεις περιλαμβάνουν μια τάση προς δυναμικές προσομοιώσεις που βασίζονται:

- α. Σε κλιματικά δεδομένα (climate-based simulations) [96].
- β. Σε λεπτομερείς μεθόδους πρόβλεψης της θάμβωσης [97, 98].
- γ. Σε μοντέλα που μιμούνται τη χρήση των συστημάτων ελέγχου σκίασης και φ.φ. από τους χρήστες [99].
- δ. Σε μεθόδους αξιολόγησης των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων πολύπλοκων συστημάτων παραθύρων [100].

Η αναζωπύρωση της χρήσης του φ.φ. στη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων (sustainable built environments) έχει προέλθει κυρίως από την ανάγκη μείωσης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τον τεχνητό φωτισμό. Έτσι πριν από την ενεργειακή κρίση, η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια ήταν έντονη λόγω της

εξέλιξης των συστημάτων τεχνητού φωτισμού και σε συνδυασμό με τα χαμηλά κόστη ενέργειας, ο κτιριακός τομέας αύξησε τις απαιτήσεις ενέργειας. Όταν όμως το κόστος της ενέργειας κατέστη υψηλό, εντάθηκε η έρευνα για εξοικονόμηση ενέργειας.

Η ενεργειακή πτυχή από την χρήση του φ.φ. βασίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να υποκαθιστά τον τεχνητό φωτισμό. Η πρώτη έννοια της ενσωμάτωσης (χρήση τεχνητού και φυσικού φωτισμού) εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1950 από τους Hopkinson και Longmore, που πρότειναν και ανέπτυξαν μία μέθοδο για μόνιμο συμπληρωματικό τεχνητό φωτισμό για τους εσωτερικούς χώρους "PSALI, Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors" [100]. Η ιδέα της μεθόδου PSALI βασίστηκε στην απαίτηση ότι ο φ.φ. θα πρέπει να είναι η κύρια πηγή φωτισμού και αν κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό μόνο τότε θα μπορούσε να συμπληρωθεί από τον τεχνητό φωτισμό.

Η υπόθεση πίσω από τη μέθοδο αυτή, ήταν να χρησιμοποιηθεί ο φ.φ. στο μέτρο του δυνατού και η χρήση ηλεκτρικού φωτισμού να περιοριστεί για να καλύψει τα μέρη του δωματίου που απέχουν πολύ από τα ανοίγματα. Με αυτή την διάταξη του ηλεκτρικού συστήματος φωτισμού, μπορούσε να γίνει σημαντική αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού. Η μέθοδος ήταν η πρώτη που καθόριζε ξεχωριστές ζώνες φωτισμού μέσα σε ένα χώρο για να αντισταθμίσει τα σκοτεινά σημεία και τις αντιθέσεις που εμφανίζονται μέσα στους εσωτερικούς χώρους. Η βασική αρχή πίσω από τη μέθοδο PSALI ήταν περισσότερο προσανατολισμένη στην ποιότητα του εσωτερικού χώρου μέσω της βελτίωσης του οπτικού περιβάλλοντος, αντί της εξοικονόμησης ενέργειας. Πάντα βέβαια με την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζονται τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού καθώς και κατανομής, ώστε να δίνεται η εντύπωση ότι ολόκληρο το δωμάτιο ήταν φυσικά φωτισμένο.

Αν και δεν είχε άμεσο αποτέλεσμα στην αποκατάσταση του φ.φ. ως πρωταρχική πηγή κατά τον σχεδιασμό, αυτή η πρώτη προσέγγιση της ενσωμάτωσης του φ.φ. με τον τεχνητό φωτισμό προκάλεσε περαιτέρω έρευνα. Αποτέλεσμα ήταν η επέκταση της έννοιας των ζωνών φωτισμού της μεθόδου PSALI η οποία πλέον καθορίζεται με πιο συγκεκριμένες οπτικές απαιτήσεις, προσανατολισμένες στο είδος της εργασίας που εκτελείται κάθε φορά. Στη συνέχεια ενσωματώθηκε και η εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρει η βελτίωση των συστημάτων ελέγχου του τεχνητού φωτισμού [102-110].

Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Matsuura [103] πρότεινε μια άλλη μορφή ενσωμάτωσης του φ.φ. με τον τεχνητό. Ο συγγραφέας πρότεινε να χωριστεί η ηλεκτρική εγκατάσταση φωτισμού σε δύο μέρη "στο πίσω μέρος του δωματίου ο φωτισμός δεν θα πρέπει να αλληλοεπιδρά με το φ.φ. και να παραμένει καθόλη τη διάρκεια των ωρών εργασίας ενεργοποιημένος, ενώ ο φωτισμός της περιμετρικής περιοχής να μπορεί να απενεργοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας αν οι συνθήκες το επιτρέπουν". Πρότεινε επίσης μια μέθοδο για τον υπολογισμό του βάθους αυτής της περιμετρικής ζώνης για την οποία ο φ.φ. είναι επαρκής.

Ο Collins στην δημοσίευση του [108] σε μία προσπάθεια να εκτιμήσει την εξοικονόμηση ενέργειας από το σύστημα ηλεκτροφωτισμού ανέπτυξε την μέθοδο IDAL: ενσωμάτωση του φ.φ. και του τεχνητού (Integration of Daylight and Artificial Light) η οποία διαδέχθηκε την μέθοδο PSALI. Περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα συστήματα αυτόματου ελέγχου του τεχνητού φωτισμού έδειχναν προς την ίδια κατεύθυνση, όπου ο σχεδιασμός του φ.φ. γινόταν μέρος μιας ολιστικής ολοκληρωμένης διαδικασίας στο σχεδιασμό των κτιρίων. Ο Crisp [104] στο "A Case for 'Active' Daylighting by Appropriate Management of Electric Lighting" αναφέρει:

"...αν μη τι άλλο η ενεργειακή κρίση μπορεί να είναι υπεύθυνη για το αναζωογονημένο ενδιαφέρον για την χρήση του φ.φ. Αυτό ισχυριζόμαστε στο BRE (Building Research Establishment), ότι δηλαδή η απλή εξέταση της παροχής φυσικού φωτισμού, η παραδοσιακή προσέγγιση, είναι ανεπαρκής γιατί δεν θα επιτρέψει την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού αυτού του πόρου και αυτό συνεπάγεται τη σταδιακή υποεκτίμηση του. Οι μέθοδοι σχεδιασμού πρέπει να περιλαμβάνουν αυτό που γνωρίζουμε για την ανταπόκριση των χρηστών στη διαθεσιμότητα του φ.φ., συγκεκριμένα στον τρόπο που τον χρησιμοποιούν μέσω κατάλληλων συστημάτων αυτόματου ελέγχου και θα πρέπει να αναγνωρίζεται ως συμβολή στον "δυναμικό" σχεδιασμό φ.φ. ...".

Οι επιπτώσεις από την ενσωμάτωση συστημάτων εκμετάλλευσης φ.φ. (daylight controls) μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου φ.φ. είναι πάντοτε επωφελής, εάν τοποθετηθούν σωστά και εφόσον η διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας που

εισέρχεται στον χώρο μέσω των ανοιγμάτων είναι τέτοια ώστε να αποτρέπεται η υπερβολική έκθεση. Η εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου φ.φ. μπορεί να μειώσει την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τον τεχνητό φωτισμό, ρυθμίζοντας την ένταση του ή απενεργοποιώντας τον, όταν δεν χρειάζεται. Ο τρόπος ελέγχου ενεργοποιημένο/απενεργοποιημένο, ή συνεχώς ρυθμιζόμενο (switched on/off, dimmed) μπορεί να καθορίσει την ενεργειακή εξοικονόμηση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα σύστημα εκμετάλλευσης φ.φ. μπορεί να μειώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη, συμβάλλοντας με λιγότερα θερμικά φορτία στον εσωτερικό χώρο (εσωτερικά θερμικά κέρδη) εξαιτίας της ελαχιστοποίησης της χρήσης του τεχνητού φωτισμού.

Τα προαναφερθέντα συστήματα ελέγχου συνήθως ελέγχουν ένα αριθμό φωτιστικών που βρίσκονται σε μια περιοχή του κτιρίου (ονομάζεται και ζώνη ελέγχου). Μια ζώνη ελέγχου μπορεί να περιέχει ένα μόνο φωτιστικό σώμα ή μια ομάδα φωτιστικών που ελέγχονται από έναν αισθητήρα που ανιχνεύει τα επίπεδα φωτεινότητας μέσα στην περιοχή ελέγχου. Κατά την ενσωμάτωση συστημάτων αυτόματου ελέγχου φ.φ, οι ζώνες καθορίζονται βάσει ενός συνδυασμού παραγόντων. Η πρόκληση είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των ζωνών ελέγχου, καθώς κάθε ζώνη ελέγχου αυξάνει το κόστος εγκατάστασης. Οι ζώνες ελέγχου που βρίσκονται κοντά σε ανοίγματα (κάθετα ή οριζόντια) ονομάζονται και περιμετρικές ζώνες ή ζώνες φυσικού φωτισμού.



## 1.2 ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ (DAYLIGHT ZONES)

Η ζώνη φ.φ. είναι μία περιοχή μέσα σε ένα χώρο που δημιουργείται από τη διείσδυση του φ.φ. Είναι προφανές ότι η έκταση της θα πρέπει να καθοριστεί με κάποιο πρακτικό τρόπο λαμβάνοντας υπόψη και αποτελέσματα από έρευνες πεδίου σχετικά με τις προτιμήσεις των χρηστών και η ανάπτυξη της βασίζεται στο πώς οι χρήστες ορίζουν ένα φυσικά φωτισμένο περιβάλλον γενικά αλλά και πώς αυτό μπορεί να ερμηνευτεί και να περιγραφεί με αριθμητικό τρόπο. Οι απαντήσεις σε τέτοιες ερωτήσεις είναι υποκειμενικές και συνεπώς ανοιχτές σε ερμηνεία [105]. Με την μετατόπιση της εργασίας από το εξωτερικό στο εσωτερικό κτιριακό περιβάλλον τα ζητήματα του φωτισμού ήταν καθοριστικά με τις περιοχές κοντά στα ανοίγματα να αποτελούν κατά κύριο λόγο και τις περιοχές εργασίας.

Οι συνθήκες φωτισμού συγκαταλέγονταν στις κυρίαρχες καταγγελίες των εργαζομένων, καθώς διαπιστώθηκε ότι οι ανεπαρκείς συνθήκες φωτισμού αποτελούσαν στην πραγματικότητα, μία από τις κύριες αιτίες εργατικών ατυχημάτων [112]. Κατά συνέπεια, εφαρμόστηκαν οι πρώτες πρακτικές και κανονισμοί φωτισμού [113] για τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας. Σήμερα δίδεται έμφαση στα φυσικά και περιβαλλοντικά κριτήρια που προάγουν την υγεία (health), την ευεξία (well-being) και την παραγωγικότητα (productivity) των χρηστών. Το αντικείμενο της έρευνας κατά τον σχεδιασμό με φ.φ. έχει γίνει πιο προσανατολισμένο στον χρήστη και η δημιουργία άνετων εσωτερικών συνθηκών σχετίζεται με την παροχή ικανοποιητικών επιπέδων φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους. Είναι προφανές ότι οι εξωτερικοί παράγοντες διαμορφώνουν την πρόοδο της χρήσης του φ.φ. στα κτίρια.

Στην έρευνα που διεξήχθη από την Galasiu και τον Reinhart το 2007 [110], 177 επαγγελματίες καθόρισαν τον φ.φ. με δύο (2) διαφορετικούς τρόπους. Οι αρχιτέκτονες και οι σχεδιαστές προσανατολίστηκαν προς τον ορισμό "Η αλληλεπίδραση του φυσικού φωτισμού και της μορφής του κτιρίου για την παροχή ενός οπτικά διεγερτικού, υγιούς και παραγωγικού εσωτερικού περιβάλλοντος", ενώ οι μηχανικοί έτειναν προς την κατεύθυνση "Η χρήση συστημάτων υαλοπινάκων και ευέλικτων ελέγχων φωτισμού, για την μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στα κτίρια (θέρμανση, ψύξη, φωτισμός)". Τα αποτελέσματα

από την έρευνα παρουσιάζουν εναλλακτικούς τρόπους χρήσης του φ.φ. στα κτίρια. Οι συμμετέχοντες αρχιτέκτονες έδωσαν προτεραιότητα στα οφέλη των χρηστών, ενώ οι μηχανικοί στην εξοικονόμηση ενέργειας. Σε μία άλλη έρευνα από τους Reinhart και Fitz το 2004 [115], παρατηρήθηκε η δυσκολία να εκτιμηθεί η απόδοση του φ.φ. (daylighting performance) συνδέοντάς την με μία συγκεκριμένη τιμή φωτισμού ή ένα εύρος. Σύμφωνα με την έρευνα οι επαγγελματίες ανέφεραν μάλλον αόριστα τα απαιτούμενα επίπεδα φ.φ. που σχετίζονται με την περιμετρική περιοχή χρησιμοποιώντας όρους όπως "σημαντικά", "επαρκή", "ωφέλιμα", ή "ισορροπημένα" επίπεδα φ.φ. χωρίς να καθορίζουν μια τιμή φωτισμού.

Ενεργειακοί κανονισμοί και πρότυπα [43, 116-118] έχουν ενσωματώσει στις κατευθυντήριες γραμμές τους, μεθόδους και πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας. Οι στρατηγικές, σχετικές με την ενέργεια έχουν ενσωματωθεί στον σχεδιασμό του φ.φ. και λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού με την εφαρμογή στρατηγικών και μεθόδων φυσικού φωτισμού.

- α. Ο IECC – 2012 ενεργειακός κανονισμός [116] ορίζει την ζώνη φ.φ. ως "Την περιοχή που αναμένεται να λάβει υψηλά και για εκτεταμένο χρονικό διάστημα τα επίπεδα φ.φ."
- β. Ο ASHRAE 90.1 – 2016 [117] ορίζει την ζώνη φ.φ. ως εξής: "Η επιφάνεια που εκφράζεται σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ) και λαμβάνει συστηματικά σημαντικές ποσότητες φ.φ. κατά τη διάρκεια της ημέρας".
- γ. Το ενεργειακό πρότυπο EN 15193: 1 – 2017 [118] ορίζει τη ζώνη φ.φ. ως εξής: "Η συνολική επιφάνεια κάτω από φεγγίτες ή δίπλα σε παράθυρα που επωφελούνται από τον φυσικό φωτισμό".
- δ. Ο οδηγός CIBSE LG10 [43] ορίζει τη ζώνη φ.φ. ως: "Την περιοχή κάτω από πλευρικά ή κατακόρυφους φωτισμένους χώρους που μπορούν να φωτιστούν αποκλειστικά από φ.φ."

Όπως φαίνεται οι ορισμοί είναι προφανώς παρόμοιοι, όμως ο υπολογισμός της έκτασης τους είναι διαφορετικός όπως θα παρουσιασθεί και στις παρακάτω παραγράφους.

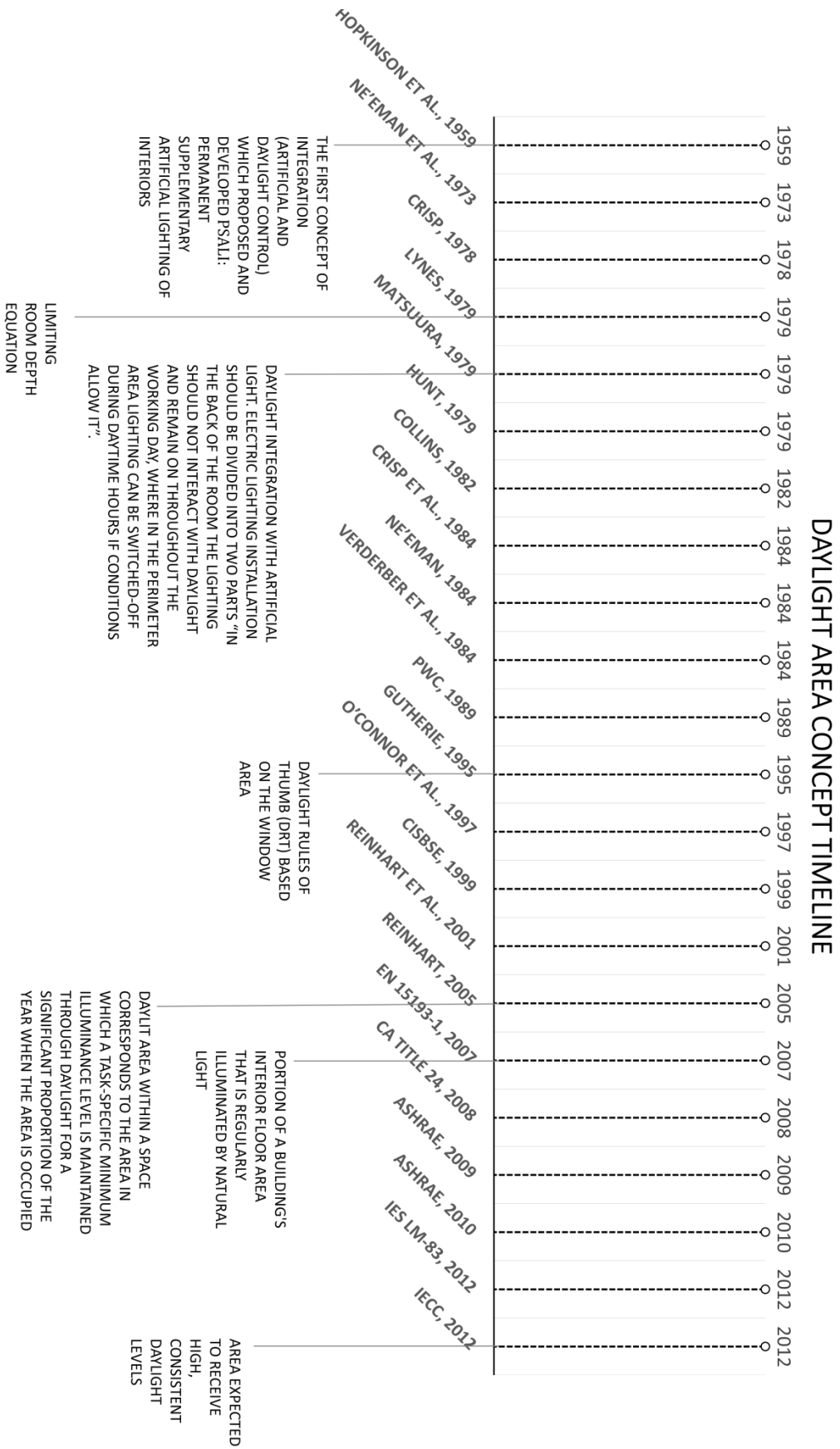
### 1.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΚΤΑΣΗΣ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Η ζώνη φ.φ. (daylit area) σε ένα κτίριο αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία τα απαιτούμενα επίπεδα φωτισμού ή άλλα κριτήρια που βασίζονται στον φωτισμό πληρούνται σε μεγάλο ποσοστό του χρόνου εργασίας. Ανάλογα με τα κριτήρια που έχουν διαμορφωθεί για την ικανοποίηση των διαφόρων σχεδιαστικών στόχων η εκτίμηση της έκτασης της ζώνης φ.φ. μέσα σε ένα χώρο μπορεί να διαφοροποιηθεί.

Η διείδυση του φ.φ. μπορεί να εκτιμηθεί είτε με τη βοήθεια τιμών έντασης φωτισμού, είτε με απλούς κανόνες με χρήση μόνο των χαρακτηριστικών του παραθύρου (μέγεθος, θέση). Έτσι η έκταση της ζώνης φυσικού φωτισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο προσεγγίσεις:

- α. Με απλές τεχνικές εκτίμησης της διείδυσης του φ.φ.
- β. Με χρήση προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

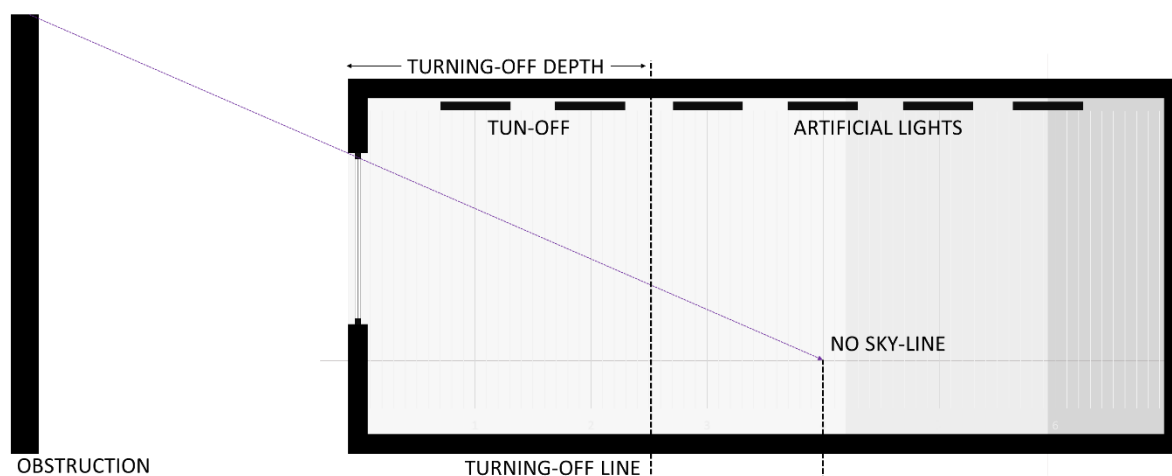
Το Εικόνα 5 παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη της ζώνης φ.φ., όπως διαμορφώθηκε, από τις αρχικές ιδέες μέχρι τις παρούσες εφαρμογές στο σχεδιασμό χώρων με χρήση φ.φ.



**Εικόνα 5:** Εξέλιξη της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές.

### 1.2.1.1 ΑΠΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Οι Hopkinson και Longmore [101] για να παρέχουν ένα ομοιόμορφο φωτισμό μέσα σε ένα δωμάτιο πρότειναν την μέθοδο PSALI (Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors), ένα συνδυασμένο σύστημα τεχνητού και φυσικού φωτισμού. Η κατανομή φωτισμού που παρέχεται με τη μέθοδο PSALI αυξάνει βαθμιαία τον φωτισμό προς τα παράθυρα. Ο συμπληρωματικός φωτισμός που παρέχεται από την PSALI μπορεί να υπολογιστεί επιλέγοντας μία τιμή σχεδιασμού πχ. 300 – 500 lx και από αυτή την τιμή αφαιρείται η συμβολή του φ.φ. Μέσω της επίτευξης μιας ορισμένης ελάχιστης τιμής του παράγοντα φ.φ. (daylight factor, DF), μπορεί να εκτιμηθεί η έκταση της ζώνης φ.φ. Οι Shahriar και Mohit [119] εξέτασαν το βάθος της ζώνης φ.φ. βασιζόμενοι στην φιλοσοφία της μεθόδου PSALI και εφαρμόζοντας την για τον CIE τυπικό νεφοσκεπή ουρανό (CIE Standard General Skies) [120].



**Εικόνα 6:** Ορισμός της γραμμής-αποκοπής (turning-off line) σε έναν χώρο με πλευρικά ανοίγματα, όπως προτάθηκε από τον Matsuura [103].

Μια άλλη μέθοδος για τον προσδιορισμό της έκτασης της ζώνης του φ.φ. στις περιμετρικές περιοχές των χώρων γραφείων προτάθηκε από τον Matsuura για την μείωση της κατανάλωσης του ηλεκτροφωτισμού [104]. Η εκτίμηση του βάθους της ζώνης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Μία μέθοδος προτάθηκε για να υποδείξει σε ποιο βάθος σε ένα δωμάτιο από τα παράθυρα μπορεί να απενεργοποιηθεί ο τεχνητός φωτισμός κατά τη διάρκεια της ημέρας

μέσω του προσδιορισμού του "βάθους απενεργοποίησης" (Turning-off depth) του τεχνητού φωτισμού. Χρησιμοποιώντας γραφήματα (Cumulative Occurrence Rates) του ανεμπόδιστου ουράνιου θόλου σε συνδυασμό με τις διάφορες καμπύλες κατανομής του παράγοντα φ.φ. και τις απαιτήσεις οριζόντιου φωτισμού στο επίπεδο εργασίας, σχημάτισε ένα διάγραμμα για τον προσδιορισμό του "βάθους απενεργοποίησης" (Turning-off depth) του τεχνητού φωτισμού στις περιμετρικές περιοχές με κατακόρυφα ανοίγματα. Το "βάθος απενεργοποίησης", ή το βάθος αξιοποίησης του φ.φ. (daylight utilization depth) ορίστηκε ως η απόσταση από τον τοίχο (με το άνοιγμα) μέχρι τη γραμμή απενεργοποίησης (turning-off line). Η θέση του παραθύρου ορίζεται ως η εσωτερική επιφάνεια του τοίχου του παραθύρου. Η "Γραμμή απενεργοποίησης" (Turning-off line), ή γραμμή αξιοποίησης του φ.φ. (daylight utilization line), είναι η γραμμή μεταξύ των φωτιστικών τα οποία είναι απενεργοποιημένα και αυτών που παραμένουν ενεργά.

Ο Lynes χρησιμοποίησε τον μέσο παράγοντα φ.φ. (average daylight factor,  $DF_{avg}$ ) για χώρους μονόπλευρα φωτισμένους [121] σαν βοήθεια για τον διαχωρισμό του δωματίου σε δύο ζώνες. Ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (daylight factor, DF) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο για την εκτίμηση του φυσικού φωτισμού [122]. Ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (DF) ορίζεται ως ο λόγος της έντασης φωτισμού σε ένα σημείο εντός του χώρου (Εσωτερικό) προς την ένταση φωτισμού σε ένα εξωτερικό σημείο αναφοράς του χώρου χωρίς σκίαση, υπό συνθήκες πρότυπου νεφοσκεπή ουρανού (standard overcast sky) σύμφωνα με CIE. Υψηλή τιμή του DF σημαίνει ότι περισσότερο φυσικό φως είναι διαθέσιμο μέσα σε ένα χώρο. Ο Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (DF) προτάθηκε το 1909 ως μέσο για να θεσπιστεί μια ελάχιστη απαίτηση φ.φ. [123-126]. Αντιπροσωπεύει τις συνθήκες της "χειρότερης-περίπτωσης", δεν εξαρτάται από τον χρόνο, το κλίμα, ή τη χρήση του χώρου [96] και φυσικά δεν λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη του ήλιου. Ο μέσος παράγοντας φ.φ. ( $DF_{avg}$ ) ορίζεται όπως παραπάνω με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται η μέση ένταση φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας στο εσωτερικό του χώρου. Ο υπολογισμός του μέσου παράγοντα φυσικού φωτισμού όπως δόθηκε από τον Sumner [126] είναι ο εξής:

$$DF_{avg} = \frac{A_{glz} \times \tau_{vis} \times \theta}{2 \times A_{tot} \times (1 - \rho_{mean})} \% \quad (1)$$

Όπου,

- $DF_{avg}$ : Ο μέσος παράγοντας φ.φ.
- $A_{glz}$ : Η καθαρή επιφάνεια του υαλοπίνακα.
- $\tau_{vis}$ : Η διαπερατότητα στο ορατό του υαλοπίνακα (Visual glazing transmittance).
- $\theta$ : Η γωνία ουρανού.
- $A_{tot}$ : Η συνολική επιφάνεια όλων των εσωτερικών επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων και των παραθύρων.
- $\rho_{mean}$ : Η μέση ανακλαστικότητα όλων των εσωτερικών επιφανειών σταθμισμένη ανά επιφάνεια.

Μεταγενέστερη έρευνα από τους Crisp και Littlefair [128] παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του μέσου παράγοντα φ.φ. που πρότεινε ο Lynes στο επίπεδο εργασίας (που υπολογίζεται στα 0.85 m). Αυτή εκφράζεται ως εξής:

$$DF_{avg} = \frac{M \times A_{glz} \times \tau_{vis} \times \theta}{A_{tot} \times (1 - \rho_{mean}^2)} \% \quad (2)$$

Η εξίσωση των Crisp και Littlefair [128] (Εξίσωση 2) ενσωματώνει ένα συντελεστή διόρθωσης για την προσαρμογή της μέσης τιμής της έντασης φωτισμού σε όλες τις επιφάνειες στο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Και οι δύο (2) εξισώσεις μπορούν να αναδιαμορφωθούν για να επιτρέψουν τον υπολογισμό της επιφάνειας του παραθύρου που απαιτείται για να επιτευχθεί ένας δεδομένος μέσος παράγοντας φ.φ.

Κατά κανόνα, ο μέσος παράγοντας φ.φ. ( $DF_{avg}$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει την αντίληψη που διαμορφώνει ένας χρήστης στο κατά πόσο καλά φωτισμένο είναι ένα δωμάτιο [129]:

- Κάτω από 2%, το δωμάτιο θα εμφανιστεί μη επαρκώς φωτισμένο (under-lit). Συμπληρωματικός τεχνητός φωτισμός θα απαιτείται κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Μεταξύ 2% και 5%, το δωμάτιο θα φαίνεται καλά φωτισμένο (well-lit). Ενδεχομένως να απαιτηθεί ηλεκτρικός φωτισμός στην επιφάνεια εργασίας.
- Πάνω από 5%, το δωμάτιο θα είναι υπερβολικά φωτισμένο (over-lit). Ο ηλεκτρικός φωτισμός σπάνια χρειάζεται. Ωστόσο, η μεγάλη αναλογία του παραθύρου-τοιχίου είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα υπερθέρμανσης.

Κατά τον Lynes [121] ο μέσος παράγοντας φ.φ. ( $DF_{avg}$ ) για το μπροστινό μισό του χώρου δεν πρέπει να υπερβαίνει τον μέσο όρο για το οπίσθιο μισό του χώρου κατά περισσότερο από έναν συντελεστή τρία (3). Εάν διατηρηθεί αυτός ο λόγος η κατανομή του φωτισμού είναι πιθανόν να φαίνεται αποδεκτή. Ο Lynes πρότεινε επίσης ένα μέγιστο βάθος του δωματίου για την επίτευξη ομοιομορφίας (daylight uniformity). Σε ένα χώρο με πλευρικά ανοίγματα, τα επίπεδα φωτισμού κοντά στο άνοιγμα είναι σημαντικά αυξημένα με τα επίπεδα φωτισμού στο πίσω μέρος του δωματίου. Έτσι θα μπορούσε να προταθεί ένα μέγιστο βάθος δωματίου ώστε αυτή η διαφοροποίηση των επιπέδων φωτισμού να μην είναι έντονη. Κατά τον Lynes το μέγιστο βάθος ενός δωματίου με μονόπλευρο φωτισμό ορίζεται ως εξής:

$$D_{Lynes} = \frac{\left(\frac{2}{1-\rho_{mean,back}}\right)}{\left(\frac{1}{W} + \frac{1}{h_{window\ head\ height}}\right)} \quad (3)$$

Όπου,

- $D_{Lynes}$ : Μέγιστο βάθος του δωματίου για φ.φ. (limiting room depth).
- $W$ : Πλάτος εσωτερικού χώρου.
- $h_{window\ head\ height}$ : Απόσταση ύψους του παραθύρου μεταξύ του δαπέδου και του πρεκίου του παραθύρου.
- $\rho_{mean,back}$ : Η μέση ανακλαστικότητα της επιφάνειας του οπίσθιου μισού ενός χώρου σταθμισμένη ανά επιφάνεια.

Όταν υπάρχουν εξωτερικά εμπόδια, ο Lynes πρότεινε περαιτέρω ότι το μέγιστο βάθος θα πρέπει να αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή ανάμεσα στο μέγιστο βάθος όπως αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση του και της γραμμής (No sky-line depth,  $D_{No\ skyline}$ ). Η απόσταση της γραμμής "No sky-line" από το άνοιγμα ορίζεται έως τη γραμμή στο επίπεδο εργασίας πέρα από την οποία δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή με τον ουρανό.

$$D_{No\ skyline} = (h_{window\ head\ height} - h_{workplane}) \times \tan \theta \quad (4)$$

Όπου,

- $D_{No\ skyline}$ : Το βάθος της γραμμής "No sky-line".



- $h_{\text{window head height}}$ : Απόσταση ύψους του παραθύρου μεταξύ του δαπέδου και του πρεκίου του παραθύρου.
- $h_{\text{workplane}}$ : Ύψος του επιπέδου εργασίας.
- $\theta$ : Γωνία ουρανού (Sky angle). Κατακόρυφη γωνία σε μοίρες υποκείμενη στο κέντρο της περιοχής του υαλοπίνακα με άμεση θέα στον ουρανό.

Ο φορέας Δημοσίων Έργων και Κυβερνητικών Υπηρεσιών του Καναδά (Public Works and Government Services Canada, PWGSC) στο PWC daylighting manual [130] πρότεινε μία μέθοδο προσδιορισμού της επάρκειας σε φ.φ., ο οποίος εισέρχεται σε διάφορες περιοχές μέσα σε ένα χώρο. Η εκτίμηση του παράγοντα σκοπιμότητας (feasibility factor,  $FF$ ) αξιολογεί εάν η ποσότητα που διεισδύει μέσα από μια πρόσοψη μπορεί να οδηγήσει σε επαρκή φ.φ. και εξοικονόμηση ενέργειας από την αντιστάθμιση του ηλεκτρικού φωτισμού.

$$FF = WWR \times \tau_{\text{vis}} \times OF \quad (5)$$

Όπου,

- $WWR$ : Αναλογία παραθύρου-τοίχου (Window-to-Wall Ratio).
- $\tau_{\text{vis}}$ : Η διαπερατότητα στο ορατό του υαλοπίνακα (Visual glazing transmittance).
- $OF$ : Παράγοντας παρεμπόδισης (Obstruction factor). Ισούται με 1 όταν μικρότερο από το 50% του ανοίγματος είναι σκιασμένο και 0.4 όταν ο σκιασμός του ξεπερνά το 90%.

Αν ο παράγοντας σκοπιμότητας (feasibility factor,  $FF$ ) είναι μεγαλύτερος από 25% τότε η επίδραση του φ.φ. αναμένεται να έχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Το κείμενο "Tips for Daylighting with Windows" [131] του Εθνικού Εργαστηρίου Lawrence Berkeley (Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) ανέφερε μια ελαφρώς τροποποιημένη έκδοση της μεθόδου προσδιορισμού του παράγοντα σκοπιμότητας (feasibility factor,  $FF$ ) [130]. Σε αυτό το πλαίσιο ένα δωμάτιο μπορεί να αποτελείται από περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά φυσικού φωτισμού και με τη διεξαγωγή μιας απλής δοκιμής με ένα απλό κριτήριο επιτυχίας ή αποτυχίας, μπορεί κανείς να εντοπίσει αυτές τις περιοχές εντός του χώρου που είναι φυσικά φωτισμένες ή όχι. Η μελέτη σκοπιμότητας του φ.φ. υποδεικνύει ότι εάν το γινόμενο του ενεργού ανοίγματος (effective aperture,  $EA$ ) επί

τον παράγοντα παρεμπόδισης του (obstruction factor, OF), είναι μεγαλύτερο από μια παράμετρο που ονομάζεται παράγοντας σκοπιμότητας φ.φ. (daylight feasibility factor, DFF), τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η ζώνη να έχει το δυναμικό για την εκμετάλλευση του φ.φ.

$$EA \times OF > DFF \quad (6)$$

Όπου,

- DFF: Ο παράγοντας σκοπιμότητας φ.φ. Αν ο  $DFF \geq 0.25$  τότε το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από τον φ.φ. θα είναι σημαντικό. Αν  $DFF < 0.25$ , τότε συνιστάτε η αφαίρεση εμποδίων από τα ανοίγματα, ή αύξηση του μεγέθους των ανοιγμάτων στον χώρο, ή η αύξηση της διαπερατότητας του υαλοπίνακα. Αν οι αλλαγές αυτές δεν είναι εφικτές, τότε είναι απίθανο ότι ο φ.φ. θα είναι μια οικονομικά αποδοτική στρατηγική εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, τα παράθυρα μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να παρέχουν οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και να ελέγχουν την παρουσία θάμβωσης.
- EA: Το ενεργό άνοιγμα. Το (EA) είναι το προϊόν της αναλογίας παραθύρου προς τον τοίχο (Window-to-Wall Ratio, WWR) και της μέσης ορατής διαπερατότητας στο ορατό ( $\tau_{vis}$ ) όλων των ανοιγμάτων της πρόσοψης:

$$WWR \times \tau_{vis} \quad (7)$$

Η αναλογία παραθύρου-τοίχου (WWR) ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής έκτασης των υαλοπετασμάτων με την εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας που βρίσκεται το άνοιγμα.

$$WWR = \frac{A_{glz}}{A_{gross}} \quad (8)$$

Όπου,

- WWR: Αναλογία παραθύρου-τοίχου (Window-to-Wall Ratio).
- $A_{glz}$ : Εμβαδό υαλοπινάκων (Net glazing area).
- $A_{gross}$ : Εξωτερική συνολική επιφάνεια τοίχου. Η περιοχή του εξωτερικού τοίχου της ζώνης είναι το προϊόν του πλάτους του χώρου επί το ύψος του δαπέδου προς την οροφή (ceiling height).

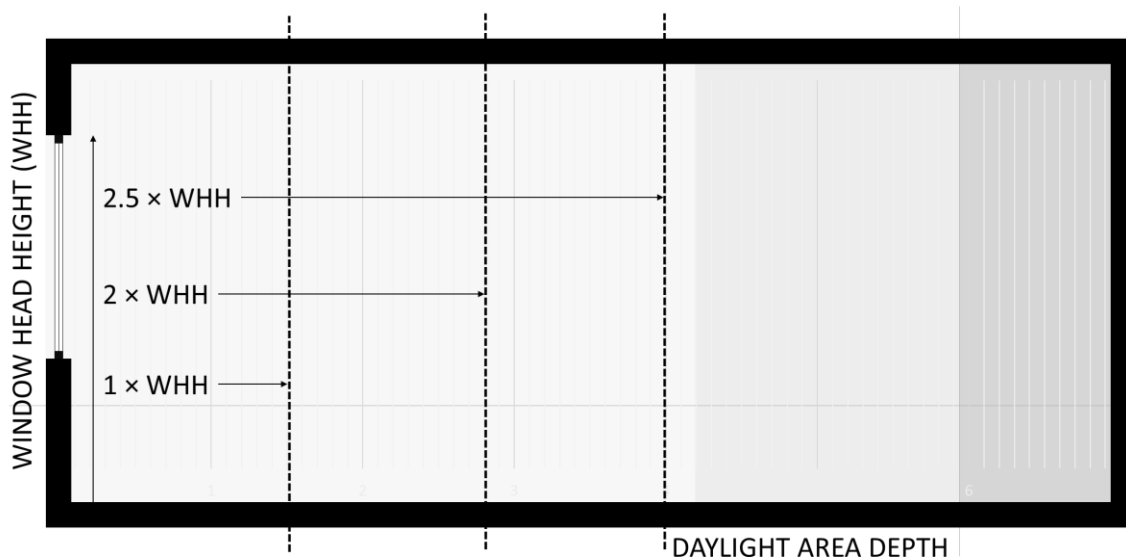
- OF: Παράγοντας παρεμπόδισης (Obstruction factor). Εκτιμάται την επίδραση των εξωτερικών εμποδίων και καθορίζεται ως συνάρτηση του ποσοστού της αποκοπής στην θέα που παρατηρείται από μια τυπική θέση εργασίας [136] με την τιμή του να κυμαίνεται μεταξύ 0% - χωρίς αποκοπή και 100% - πλήρης αποκοπή.

Κατά το παρελθόν έχουν προταθεί διάφοροι εμπειρικοί κανόνες (Daylight Rules Of Thumb, DRT) για την εκτίμηση της έκτασης της ζώνης φ.φ., οι οποίοι βασίζονται στο μέγεθος των παραθύρων [110, 131-139]. Ο πιο συνήθης εμπειρικός κανόνας φ.φ. για τον ορισμό της ζώνης φ.φ. συσχετίζει το ύψος του παραθύρου σε σχέση με το ύψος και τις διαστάσεις του επιπέδου εργασίας. Έτσι για να υπάρχει επάρκεια σε φ.φ. ο λόγος του βάθους ενός δωματίου προς το ύψος του πρεκιού του παραθύρου θα πρέπει να κυμαίνεται από 1 έως 2.5, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.

$$1 < D_{\text{room}} / H_{\text{window head height}} < 2.5 \quad (9)$$

Όπου,

- $D_{\text{room}}$ : Το βάθος του δωματίου (room depth).
- $H_{\text{window head height}}$ : Το ύψος το μεταξύ του δαπέδου και του πρεκιού του παραθύρου.



**Εικόνα 7:** Εμπειρικός κανόνας βασισμένος στο ύψος του παραθύρου (πρέκι) για την εκτίμηση της έκτασης της ζώνης φ.φ.

Μια εκτεταμένη ανασκόπηση των διαφόρων εμπειρικών κανόνων φ.φ. που αναφέρονται στη βιβλιογραφία διεξήχθη από τον Reinhart [139], ο οποίος εξέτασε την εγκυρότητά τους χρησιμοποιώντας το λογισμικό Radiance για προσομοιώσεις ορθογώνιων χώρων που φωτίζονται από κατακόρυφα ανοίγματα και τυπικές ανακλάσεις των εσωτερικών επιφανειών για διάφορες κλιματικές ζώνες, προσανατολισμούς, γεωμετρικές προσόψεις και χρήσεις χώρων. Στην ίδια εργασία προτείνεται επίσης και ένας νέος ορισμός της ζώνης φ.φ. με βάση την αυτονομία φωτισμού (daylight autonomy metric, DA):

"Η ζώνη φ.φ. μέσα σε ένα χώρο αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία διατηρείται ένα ελάχιστο επίπεδο φωτισμού για συγκεκριμένη εργασία από τον φ.φ. για μια σημαντική χρονική περίοδο κατά το έτος στην οποία ο χώρος είναι κατειλημμένος. Η αναλογία αυτή ονομάζεται επίσης αυτονομία φ.φ. και μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις. Ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση του χώρου, η τοποθέτηση μιας συσκευής σκίασης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της αυτονομίας του φ.φ. ή όχι. Το όριο/βάθος της ζώνης φ.φ. αντιστοιχεί σε σημεία στα οποία η αυτονομία του πέφτει στο ήμισυ της μέγιστης τιμής της."

Με βάση τα ευρήματα πρότεινε επίσης και έναν νέο εμπειρικό κανόνα φ.φ.:

"Η ζώνη φ.φ. σε ένα κτίριο αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία η τιμή σχεδιασμού των επιπέδων της έντασης φωτισμού επιτυγχάνονται από φ.φ. κατά τη διάρκεια των ωρών λειτουργίας. Σε ένα χώρο με κατακόρυφα ανοίγματα ένα τυπικό παράθυρο και βενετικά στόρια (Venetian blinds) το βάθος της ζώνης φ.φ. είναι συνήθως 1 έως 2 φορές το μέγεθος του ύψους του πρεκιού του παραθύρου. Ο ακριβής αριθμός για ένα συγκεκριμένο χώρο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του υαλοπίνακα και τα επιθυμητά επίπεδα φωτεινότητας του χώρου. Σε περίπτωση όπου ο χώρος δεν απαιτεί την χρήση μιας συσκευής σκίασης, το εύρος μπορεί να αυξηθεί έως και 2.5."

Ο εμπειρικός κανόνας με βάση το ύψος του παραθύρου (head height daylight rule of thumb) εξετάστηκε από τους Reinhart και Weissman το 2011 [110]. Στην εργασία τους, μια ομάδα 45 και 15 σπουδαστών κλήθηκαν να εντοπίσουν το όριο μεταξύ της φυσικά φωτισμένης και μη περιοχής μέσα σε δύο πραγματικούς χώρους, αντίστοιχα. Τα ευρήματα από τις αξιολογήσεις των σπουδαστών συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις δυναμικών και

στατικών κριτηρίων φ.φ. τα οποία εκτιμούν την περιοχή φ.φ. είτε μέσω προσομοιώσεων των χώρων, είτε με βάση το ύψος του πρεκίου του παραθύρου αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το κριτήριο της Χωρική Κατανομή Αυτονομίας Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA) από την Illuminating Engineering Society Daylight Metrics Committee (IESNA) [145] εκτιμούσε πιο αξιόπιστα τις προβλέψεις των φοιτητών αναφορικά με το μέγεθος της ζώνης φ.φ. σε σχέση με άλλα κριτήρια φ.φ.. Ωστόσο τα δεδομένα που προέκυψαν θεωρήθηκαν προκαταρκτικά και πρέπει να επικυρωθούν και να επιβεβαιωθούν σε άλλους χώρους.

### 1.2.1.2 ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Αρκετοί κανονισμοί και πρότυπα [41, 116-118, 137, 138] έχουν συμπεριλάβει τρόπους αξιολόγησης της διείσδυσης του φ.φ. και καθορίζουν τις διαστάσεις της ζώνης φ.φ. μέσα σε κάποιο χώρο, ενσωματώνοντας τους εμπειρικούς κανόνες οι οποίοι έχουν σαν βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραθύρου καθώς και παραμέτρους που μπορεί να επηρεάσουν την προαναφερθείσα διείσδυση.

Σε ορισμένους κανονισμούς αναγνωρίζεται η διαφορά μεταξύ κύριας και δευτερογενούς ζώνης φ.φ. Ο έλεγχος των συστημάτων φωτισμού στις κύριες ζώνες είναι συνήθως υποχρεωτικός, ενώ ο έλεγχος στις δευτερεύουσες ζώνες ενθαρρύνεται μέσω κινήτρων. Το βάθος και το πλάτος της ζώνης φ.φ. που προτείνεται σε καθέναν από αυτούς τους κώδικες, για χώρους με κατακόρυφα ανοίγματα, βασίζονται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραθύρου. Για παράδειγμα, το πρότυπο EN 15193:1 – 2017 [118] που αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό, υπολογίζει το μέγιστο πιθανό βάθος της ζώνης φ.φ. ( $D_{\text{daylit area},i}$ ) ως εξής:

$$D_{\text{daylit area},\text{max}} = 2.5 \times (H_{\text{window head height}} - H_{\text{task area}}) \quad (10)$$

Όπου,

- $D_{\text{daylit area},\text{max}}$ : Μέγιστο βάθος της ζώνης φ.φ. σε μέτρα (m).
- $H_{\text{window head height}}$ : Ύψος του προεκτιμώμενου από το δάπεδο σε μέτρα (m).
- $H_{\text{task area}}$ : Ύψος της περιοχής εργασίας (επίπεδο αναφοράς) από το δάπεδο σε μέτρα (m).

Το μέγιστο βάθος της ζώνης φ.φ. ( $D_{\text{daylit area},\text{max}}$ ) υπολογίζεται από την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου, κάθετα προς την εξεταζόμενη πρόσοψη.

- α. Εάν το πραγματικό βάθος της ζώνης υπολογισμού είναι μικρότερο από το υπολογισμένο μέγιστο βάθος της ζώνης φ.φ., το βάθος του χώρου μπορεί να ληφθεί ως το βάθος της ζώνης φ.φ. ( $D_{\text{daylit area}}$ ). Εάν ( $D_{\text{daylit area}} > D_{\text{daylit area},\text{max}}$ ), τότε το βάθος του φ.φ. είναι ίσο με ( $D_{\text{daylit area}}$ ).

β. Εάν το πραγματικό βάθος του χώρου είναι μικρότερο από 1.25 φορές το υπολογισμένο μέγιστο βάθος, το πραγματικό βάθος του χώρου υπολογισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ( $D_{\text{daylit area}}$ ). Αν ( $D_{\text{daylit area}} < 1.25 < D_{\text{daylit area,max}}$ ), τότε το βάθος της ζώνης φ.φ. είναι ίσο με ( $D_{\text{daylit area}}$ ).

Έτσι, η υπο-περιοχή ( $A_{\text{daylit area},j}$ ) εκφραζόμενη σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ) του χώρου φ.φ. (j) έχει ως εξής:

$$A_{\text{daylit area},j} = D_{\text{zone depth}} \times W_{\text{zone width}} \quad (11)$$

Όπου,

- $A_{\text{daylit area},j}$ : Περιοχή της ζώνης φ.φ.
- $D_{\text{zone depth}}$ : Βάθος της ζώνης φ.φ.
- $W_{\text{zone width}}$ : Πλάτος της ζώνης φ.φ.

Συνήθως, το πλάτος της ζώνης φ.φ. ( $b_{\text{depth}}$ ) αντιστοιχεί στο εσωτερικό πλάτος της πρόσοψης της ζώνης του κτιρίου ή του τομέα υπολογισμού (τα εσωτερικά τοιχώματα μπορεί να παραμεληθούν). Εάν τα παράθυρα βρίσκονται μόνο σε τμήματα της πρόσοψης, το πλάτος της ζώνης φ.φ. που κατανέμεται σε αυτή την πρόσοψη αντιστοιχεί στο πλάτος του τμήματος πρόσοψης που περιέχει τα παράθυρα και το ήμισυ του βάθους της ζώνης φ.φ.

Η American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) στον κανονισμό ενεργειακού μοντέλου ASHRAE/USGBC/IES 90.1 – 2016, energy model code [117] προσδιορίζει την περιοχή φ.φ. κοντά σε κατακόρυφα ανοίγματα ως εξής:

$$D_{\text{daylit area}} = W_{\text{zone width}} \times D_{\text{zone depth}} \quad (12)$$

Οπού,

- $D_{\text{daylit area}}$ : Η περιοχή της ζώνης φ.φ. που εκφράζεται σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ).
- $W_{\text{zone width}}$ : Το πλάτος της περιοχής με κατακόρυφα ανοίγματα εκφρασμένο σε μέτρα (m). Είναι το πλάτος του παραθύρου συν, σε κάθε πλευρά, το μικρότερο των 0.61 m, ή την απόσταση των 1.524 m ή οποιοδήποτε άλλο μεγαλύτερο κατακόρυφο εμπόδιο.

- $D_{\text{zone depth}}$ : Το βάθος της περιοχής με κατακόρυφα ανοίγματα εκφρασμένο σε μέτρα (m). Είναι το μικρότερο το ύψος του παραθύρου (από το πάτωμα ως το ύψος του πρεκιού του παραθύρου), ή την απόσταση των 1.524 m ή οποιοδήποτε άλλο μεγαλύτερο κατακόρυφο εμπόδιο.

Η American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) στο μοντέλο ASHRAE/USGBC/IES 189.1 – 2009, Model Green Building Code [138] ορίζει τη ζώνη φ.φ. ως: "Το τμήμα της εσωτερικής επιφάνειας του κτιρίου που φωτίζεται τακτικά από το φυσικό φως". Αυτή η περιοχή εκτείνεται πίσω από το παράθυρο μέχρι το πλησιέστερο κατά 1.422 m κατακόρυφο εσωτερικό χώρισμα (πχ. εσωτερικός τοίχος), ή μέχρι 1.75 φορές το ύψος από το δάπεδο έως το πρέκι του βόρειου παραθύρου, μέχρι 1.5 φορά το ύψος από το δάπεδο έως το πρέκι του νότιου παραθύρου, και μέχρι 1.0 φορά το ύψος από το πάτωμα μέχρι τα πρέκια όλων των άλλων παραθύρων, και πλευρικά στο πλησιέστερο κατά 1.422 m ψηλό κατακόρυφο εσωτερικό χώρισμα.

Το πλάτος της περιοχής φ.φ. είναι το πλάτος του παραθύρου και σε κάθε πλευρά συν 0.5 φορές το ύψος από το δάπεδο μέχρι το πρέκι του παραθύρου ή στο πλησιέστερο ψηλό κατακόρυφο εσωτερικό χώρισμα, όποιο από τα δύο είναι μικρότερο.

$$D_{\text{daylit area}} = \begin{cases} 1.75 \times H_{\text{window head height}}, & \text{for North} \\ 1.5 \times H_{\text{window head height}}, & \text{for South} \\ 1.0 \times H_{\text{window head height}}, & \text{for all other} \end{cases} \quad (13)$$

- $D_{\text{daylit area}}$ : Το βάθος της ζώνης φ.φ.
- $H_{\text{window head height}}$ : Το ύψος του παραθύρου, μεταξύ του δαπέδου και του πρεκιού του παραθύρου.

Σύμφωνα με τον κώδικα ICC's International Energy Conservation Code [124], η περιοχή που συνορεύει με το κατακόρυφο παράθυρο που λαμβάνει φυσικό φωτισμό μέσω του ανοίγματος ορίζεται ως η ζώνη φ.φ. Το βάθος της ζώνης φ.φ. θεωρείται ότι επεκτείνεται μέχρι το βάθος των 4.572 m ή μέχρι το πλησιέστερο κατακόρυφο εσωτερικό χώρισμα, όποιο από τα δύο είναι μικρότερο. Το πλάτος της ζώνης φ.φ. θεωρείται ότι είναι το πλάτος του παραθύρου συν 0.61 m σε κάθε πλευρά ή το πλάτος του παραθύρου συν την απόσταση έως



ένα κατακόρυφο εσωτερικό χώρισμα ή το πλάτος του παραθύρου συν το ήμισυ της απόστασης προς τον γειτονικό φεγγίτη ή το κατακόρυφο παράθυρο, όποιο είναι ελάχιστο.

Σύμφωνα με τον California's Title 24, energy state code [137] η ζώνη φ.φ. ορίζεται ως "η επιφάνεια του δαπέδου κάτω από φεγγίτες ή δίπλα στα παράθυρα". Σύμφωνα με τον California Title 24, υιοθετείται ο συνδυασμός μίας κύριας ζώνης φ.φ. (PSA) και μιας δευτερεύουσας ζώνης φ.φ. (SSA). Η έκταση της κύριας ζώνης φ.φ. (PSA) υπολογίζεται με το γινόμενο του πλάτους και του βάθους της ζώνης αυτής.

$$PSA = W_{\text{primary sidelit}} \times D_{\text{primary sidelit}} \quad (14)$$

Όπου,

- PSA: Η κύρια περιοχή με κατακόρυφα ανοίγματα.
- $W_{\text{primary sidelit}}$ : Το πλάτος της περιοχή με κατακόρυφα ανοίγματα είναι το πλάτος του παραθύρου συν, σε κάθε πλευρά, την μικρότερη από την πλησιέστερη απόσταση των 0.61 m ή την απόσταση μέχρι κάθε μόνιμο εμπόδιο ύψους από 1.524 m ή υψηλότερο.
- $D_{\text{primary sidelit}}$ : Το κύριο βάθος της περιοχής με κατακόρυφα ανοίγματα που είναι η οριζόντια απόσταση κάθετα προς το παράθυρο που είναι μικρότερο από μία φορά το ύψος του πρεκιού του παραθύρου ή την απόσταση από οποιαδήποτε μόνιμο κατακόρυφο εμπόδιο ύψους 1.524 m ή μεγαλύτερο.

Η δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. (SSA) υπολογίζεται από την παρακάτω Εξίσωση 15.

$$SSA = W_{\text{secondary sidelit}} \times D_{\text{secondary sidelit}} \quad (15)$$

Όπου,

- SSA: Η δευτερεύουσα περιοχή με κατακόρυφα ανοίγματα.
- $W_{\text{secondary sidelit}}$ : Το πλάτος της δευτερεύουσας περιοχής και ισούται με το πλάτος του παραθύρου συν, σε κάθε πλευρά, το μικρότερο από το πλησιέστερο 0.61 m ή την απόσταση από κάθε μόνιμο εμπόδιο ύψους 1.524 m ή μεγαλύτερο, ή την απόσταση από οποιαδήποτε ζώνη φ.φ. από φεγγίτες.
- $D_{\text{secondary sidelit}}$ : Το βάθος της δευτερεύουσας περιοχής και ισούται με το την οριζόντια απόσταση κάθετα προς το παράθυρο που ξεκινά από το ύψος του πρεκιού

του παραθύρου και καταλήγει στο μικρότερο από τα δύο ύψη ή του πρεκιού του παραθύρου ή την απόσταση από κάθε μόνιμο εμπόδιο ύψους 1.524 m ή υψηλότερο, ή την απόσταση από οποιαδήποτε ζώνη φ.φ. από φεγγίτες.

$$D_{\text{daylit area}} = \begin{cases} \text{PSA} = 1.0 \times h_{\text{window head height}} \\ \text{SSA} = 2.0 \times h_{\text{window head height}} \end{cases} \quad (16)$$

To Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) in the Lighting Guide LG10: Daylighting and Window Design [41], θεωρεί ότι το βάθος ενός δωματίου  $L$  που φωτίζεται από ένα κατακόρυφο άνοιγμα, δεν πρέπει να υπερβαίνει μια οριακή τιμή που δίνεται από την Εξίσωση 17:

$$\frac{D_{\text{room}}}{W_{\text{room}}} + \frac{D_{\text{room}}}{H_{\text{window head height}}} \leq \frac{2}{(1-R_{\text{mean}})} \quad (17)$$

Όπου,

- $D_{\text{room}}$ : Βάθος του δωματίου.
- $W_{\text{room}}$ : Το πλάτος του δωματίου.
- $H_{\text{window head height}}$ : Το ύψος του πρεκιού του παραθύρου πάνω από το επίπεδο του δαπέδου.
- $R_{\text{mean}}$ : Η μέση ανακλαστικότητα των επιφανειών στο πίσω μισό τμήμα του δωματίου (μακριά από το παράθυρο).

Αν το μέγιστο βάθος  $L$  υπερβεί αυτή την τιμή, το πίσω μισό τμήμα του δωματίου θα τείνει να φαίνεται υποβαθμισμένο από πλευράς φωτισμού και θα χρειαστεί συμπληρωματικό φωτισμό από το τεχνητό σύστημα φωτισμού. Εάν ένα κτίριο φωτίζεται αμφίπλευρα από παράθυρα, το μέγιστο βάθος που μπορεί να είναι φωτίζεται επαρκώς από φ.φ. είναι διπλάσιο από το οριακό βάθος  $L$ , από τον έναν τοίχο μέχρι τον άλλον.

Εκτός του Παράγοντας Φυσικού Φωτισμού (daylight factor, DF) που έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, το ετήσιο ποσό του εισερχόμενου φ.φ. σε ένα χώρο σήμερα μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά μέσω των αποκαλούμενων δυναμικών ή κλιματολογικών κριτηρίων φ.φ. (climate-based daylight metrics). Από το 2000 και μετά, υπάρχει μια τάση για τη χρήση λεπτομερέστερων μεθόδων υπολογισμού που απαιτούν εργαλεία προσομοίωσης για την

αξιολόγηση του φ.φ. [140, 141]. Οι προσομοιώσεις επιτρέπουν τον υπολογισμό του φ.φ. σε ωριαία βάση λαμβάνοντας υπόψη τις ωριαίες αλλαγές της κατάστασης του ουρανού καθώς επίσης και τις προτιμήσεις των χρηστών και τα κριτήρια άνεσης [142-145]. Όπως και στον υπολογισμό της κατανομής των παραγόντων φυσικού φωτισμού, και στους δυναμικούς υπολογισμούς χρησιμοποιείται ένας κánaβος σημείων που πραγματοποιείται ο υπολογισμός ανά ώρα σε ετήσια βάση.

Συνεπώς σήμερα μπορούμε να ξεπεράσουμε τους περιορισμούς του Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού (DF), με την υιοθέτηση νέων κριτηρίων. Το κριτήριο Αυτονομίας Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA) ήταν το πρώτο από μια σειρά ετήσιων δυναμικών κριτηρίων φ.φ. που προτάθηκαν αρχικά από την Association Suisse des Electriciens το 1989 και βελτιώθηκαν από τους Reinhart και Walkenhorst το 2001 [142]. Ορίζεται ως "το ποσοστό του χρόνου εργασίας κατά τη διάρκεια του έτους κατά το οποίο μπορούν να καλυφθούν ελάχιστα επίπεδα φυσικού φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας μόνο από φ.φ.". Η Αυτονομία Φ.Φ. είναι ένα κριτήριο που δηλώνει τον χρόνο στον οποίο μπορεί να διατηρηθεί ένα ελάχιστο όριο φ.φ. στο επίπεδο εργασίας μόνο από φ.φ. Η Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) χαρακτηρίζει ένα χώρο φυσικά φωτισμένο, εάν το DA υπερβαίνει το 50% του χρόνου εργασίας του έτους.

Το κριτήριο του Ωφέλιμου Φυσικού Φωτισμού (Useful Daylight Illuminances, UDI), μια τροποποίηση του DA, εκμεταλλεύεται αυτές τις μεθόδους [93]. Βασιζόμενο στην ιδέα του πόσο συχνά κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας επιτυγχάνονται τα απαιτούμενα επίπεδα από φ.φ., το UDI χαρακτηρίζει "το ποσοστό του χρόνου που η ένταση φωτισμού βρίσκεται στην περιοχή 100 lx έως 2000 lx". Ένα άλλο κριτήριο φ.φ. είναι η Συνεχής Αυτονομία Φ.Φ. (continuous Daylight Autonomy, cDA) [143], παρόμοιο με το DA, αλλά το cDA λαμβάνει υπόψη και τις τιμές των επιπέδων φωτισμού που βρίσκονται κάτω από ένα προκαθορισμένη ένταση φωτισμού με γραμμικό τρόπο.

Στην ίδια δημοσίευση, ο Rogers πρότεινε επίσης το κριτήριο μέγιστης τιμής Αυτονομίας Φ.Φ. ( $DA_{max}$ ) που ορίζεται ως "οι ώρες εργασίας όπου τα επίπεδα φωτισμού υπερβαίνουν 10 φορές τα απαιτούμενα επίπεδα φωτισμού". Το  $DA_{max}$  μπορεί να αντιπροσωπεύει τις ώρες κατά την διάρκεια του έτους ένα δεδομένο σημείο λαμβάνει άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Αυτό το κριτήριο είναι ένας άλλος ποιοτικός δείκτης, που αυτή τη φορά σχετίζεται με άλλα κριτήρια θάμβωσης (Glare), αλλά ο συντελεστής δέκα (10) φορές της έντασης φωτισμού σχεδιασμού (Design Illuminance) βασίζεται σε εμπειρικές εκτιμήσεις και όχι σε τεκμηριωμένη έρευνα [96]. Επιπροσθέτως το κατώτατο όριο φωτισμού προτάθηκε επίσης για ένα ορισμένο όριο: Το  $DA_{max}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% για περισσότερο από 5% μιας συγκεκριμένης περιοχή της επιφάνειας εργασίας [54].

Το Ποσοστό Κορεσμού Φ.Φ. (Daylight Saturation Percentage, DSP), αποτελεί μια τροποποίηση του UDI, που προτάθηκε από την Lighting and Daylighting Committee for the Collaborative for High Performance Schools program το 2006 [55] θεωρώντας αποδεκτές τιμές φωτισμού μεταξύ 430 lx και 4300 lx, ενώ επιβάλλει σε τιμές μεγαλύτερες από 4300 lx να αφαιρεθούν από τις τιμές που εμπίπτουν στο προτεινόμενο εύρος.

Δύο (2) νέα κριτήρια φ.φ. εισήχθησαν επίσης από την Illuminating Engineering Society daylight metrics committee in 2012, η Ετήσια Έκθεση στο Ηλιακό Φως (Annual Sunlight Exposure, ASE) και η Χωρική Κατανομή Αυτονομίας Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA) [145]. Η Χωρική Κατανομή Αυτονομίας Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA) περιγράφει πόσο μια "συγκεκριμένη" περιοχή ή ένα κτίριο είναι επαρκώς φυσικά φωτισμένο και ορίζεται ως "το ποσοστό της περιοχής που είναι πάνω από 300 lx για το 50% του χρόνου ή περισσότερο κατά τις ώρες λειτουργίας (π.χ. 50% των ωρών από τις 08:00 π.μ. έως τις 18:00 μ.μ.)". Το κριτήριο αυτό δηλώνει ότι πρέπει να επιτευχθεί ένα ορισμένο ελάχιστο όριο φωτισμού τουλάχιστον κατά 50% των ωρών λειτουργίας, ώστε ο χώρος να θεωρηθεί επαρκώς φυσικά φωτισμένος. Αυτό το όριο μπορεί στη συνέχεια να αναφέρεται ως ζώνη φ.φ. ή ως ποσοστό της επιφάνειας του δαπέδου που είναι φυσικά φωτισμένη.

Το επιθυμητό όριο (preferred threshold) είναι:

$$sDA_{300lx,50\%} \geq 75\% \text{ της περιοχής ανάλυσης (Analysis Area) } (18)$$

Το ονομαστικά αποδεκτό όριο (nominally acceptable threshold) είναι:

$$sDA_{300lx,50\%} \geq 55\% \text{ της περιοχής ανάλυσης (Analysis Area) } (19)$$

Το κριτήριο ASE είναι ο αριθμός ωρών ανά έτος σε ένα δεδομένο σημείο όπου η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια και ορίζεται ως "το ποσοστό χρόνου μιας

περιοχής ανάλυσης που υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. 1000 lx) περισσότερο από ένα συγκεκριμένο αριθμό ωρών (π.χ. 250 ώρες) ανά έτος". Ετήσια Έκθεση Ηλιακής Ακτινοβολίας αξιολογεί τη δυνητική πηγή οπτικής δυσφορίας από την παρουσία της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Το επιθυμητό όριο (preferred threshold) είναι:

$$ASE_{1000lx,250hr} < 3\% \text{ της περιοχής ανάλυσης (Analysis Area) (20)}$$

Το ονομαστικά αποδεκτό όριο (nominally acceptable threshold) είναι:

$$ASE_{1000lx,250hr} < 7\% \text{ της περιοχής ανάλυσης (Analysis Area) (21)}$$

Ο φ.φ. έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την υγεία, την ευημερία και την παραγωγικότητα των χρηστών στους χώρους όπου υπάρχει [146]. Ωστόσο, αυξάνοντας τα επίπεδα φ.φ. μέσα σε ένα χώρο αυξάνεται και η πιθανότητα δημιουργίας συνθηκών θάμβωσης. Η θάμβωση, είναι ένα κριτήριο της σωματικής δυσφορίας του χρήστη που προκαλείται από υπερβολικό φως ή έντονες αντιθέσεις στο οπτικό του πεδίο. Η θάμβωση, είναι ένα κριτήριο της σωματικής δυσφορίας του χρήστη που προκαλείται από υπερβολικό φως ή έντονες αντιθέσεις στο οπτικό του πεδίο. Η θάμβωση, εξαρτάται από την κατανομή της λαμπρότητας στο οπτικό πεδίο του χρήστη και κατηγοριοποιείται συνήθως σε δύο (2) είδη:

- Θάμβωση ανικανότητας (Disability Glare), η οποία προκαλεί ελάττωση της διακριτικής ικανότητας και της ικανότητας εργασίας. Η θάμβωση ανικανότητας επηρεάζει αισθητά την όραση μειώνοντας την αντίθεση της εικόνας στον αμφιβληστροειδή από την παρουσία μιας πολύ έντονης πηγής φωτισμού στο οπτικό πεδίο [147].
- Θάμβωση δυσφορίας (discomfort glare or veiling glare), η οποία προκαλείται δυσφορία από την παρουσία εξαιρετικά λαμπρών φωτεινών πηγών στο πεδίο όρασης, χωρίς όμως να μειώνει την ικανότητα διάκρισης αντικειμένων ή την εκτέλεση μιας εργασίας [148, 149]. Η θάμβωση δυσφορίας παρουσιάζεται όταν το άμεσο φως αντανακλάται από μια επιφάνεια, για παράδειγμα, το φως που πέφτει σε μια οθόνη υπολογιστή εμποδίζοντας την ανάγνωση της οθόνης.

**Πίνακας 1: Δείκτες θάμβωσης.**

Δείκτες θάμβωσης (glare indexes)	Σύμβολο	Περιγραφή	Ref
Δείκτες θάμβωσης που χρησιμοποιούνται στον τεχνητό φωτισμό			
Δείκτης Unified Glare Rating	UGR	Αναπτύχθηκε από την Comission Internationale de L'eclairage (CIE) η οποία πρότεινε έναν ενοποιημένο δείκτη εκτίμησης της θάμβωσης (unified glare rating system), ο οποίος ενσωματώνει τον σημειακό δείκτη του Guth (Guth's position index) και συνδυάζει τους δείκτες CIE CGI και BGI για να εκτίμηση την παρουσία θάμβωσης για ένα τεχνητό σύστημα φωτισμού.	150
Δείκτης Πιθανότητας Οπτικής Άνεσης (Visual Comfort Probability)	VCP	Δείκτης που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση ενός τεχνητά φωτισμένου χώρου. Ορίζεται ως το ποσοστό επί της εκατό των χρηστών οι οποίοι θα χαρακτηρίσουν τον χώρο (περιοχή θέασης και διεύθυνση) ικανοποιητικό από πλευράς παρουσίας θάμβωσης. ο δείκτης θεωρείται αξιόπιστος μόνο για χώρους με κρεμαστά συστήματα φωτισμού οροφής με ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας.	151
Εξίσωση θάμβωσης BRS (glare equation)	BRS ή BGI	Ο βαθμός της παρουσίας θάμβωσης ταξινομήθηκε σύμφωνα με την ένταση της οπτικής όχλησης που προκαλεί στον χρήστη. δεν μπορεί να εκτιμήσει την παρουσία θάμβωσης από μεγάλες πηγές τεχνητού φωτισμού και δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της προσαρμογής του χρήστη.	152

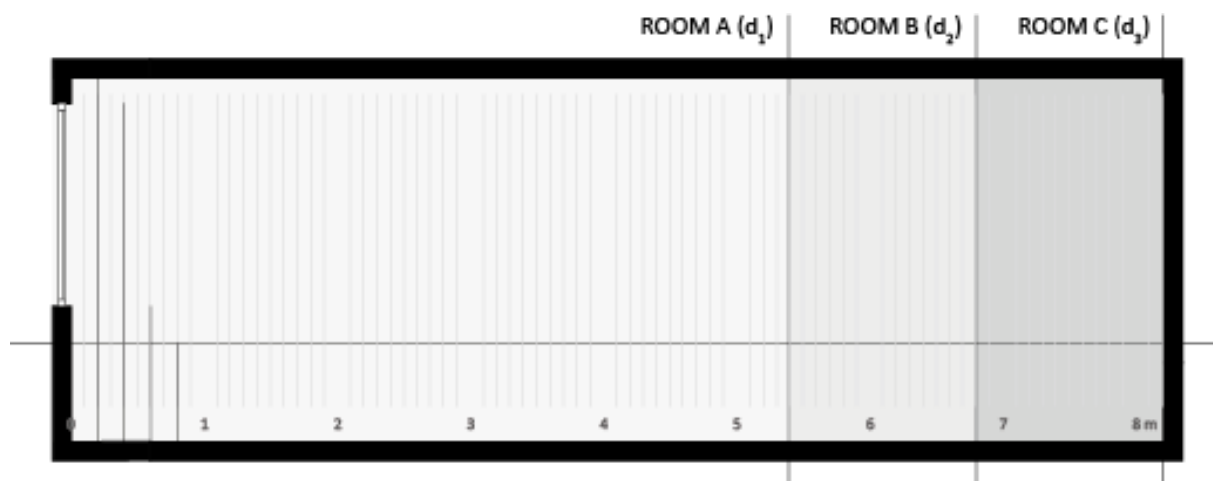
CIE δείκτης θάμβωσης (CIE Glare Index)	CGI	Αναπτύχθηκε από την Comission Internationale de L'éclairage (CIE) η οποία υιοθέτησε την εξίσωση που προτάθηκε από τον Einhorn [161,162] ως μια ολοκληρωμένη διαδικασία εκτίμησης της θάμβωσης. ο δείκτης CGI αναπτύχθηκε για να διόρθωση τις αποκλίσεις της εξίσωσης BRS που δημιουργούνται από την παρουσία πολλαπλών πηγών θάμβωσης.	153
<b>Δείκτες Θάμβωσης Που Χρησιμοποιούνται Στον Φυσικό Φωτισμό</b>			
Πιθανότητα Παρουσίας Θάμβωσης Φ.Φ. (Daylight Glare Probability)	DGP	Ένας δείκτης που αναπτύχθηκε για λαμβάνει υπόψη την παρουσία μεγάλων πηγών θάμβωσης, όπως είναι τμήμα του ουράνιου θολού που είναι ορατό από εάν άνοιγμα (παράθυρο). ο δείκτης δημιουργήθηκε από αξιολογήσεις χρηστών σε χώρους γραφείων με κατακόρυφα ανοίγματα.	156
Δείκτης Θάμβωσης Φ.Φ. (DAYLIGHT GLARE INDEX)	DGI	Η Cornell εξίσωση θάμβωσης, η οποία είναι μια τροποποίηση του δείκτη BGI , ο οποίος προσαρμόστηκε για να λαμβάνει υπόψη την παρουσία μεγάλων πηγών θάμβωσης, όπως είναι ένα άνοιγμα (παράθυρο).	157

## 1.2.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Για να εκτιμηθούν τα όρια της διείσδυσης του φ.φ. που υποδεικνύεται στη βιβλιογραφία για χώρους με κατακόρυφα ανοίγματα, διερευνήθηκε ένας χώρος γραφείων αναφοράς με πλάτος  $w = 3.4 \text{ m}$  και ύψος  $h = 2.7 \text{ m}$ .

Τρεις (3) διαμορφώσεις του χώρου αναφοράς μοντελοποιήθηκαν με βάση το βάθος ( $d_i$ ) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 8. Οι προτεινόμενες διαμορφώσεις εξετάστηκαν για τέσσερις (4) αναλογίες παραθύρων/τοιχίου, WWR 20%, 40%, 60%, & 80%, αντίστοιχα για Νότιο και Βόρειο προσανατολισμό.

- α. Ένα δωμάτιο γραφείου (ROOM A) με βάθος  $d_1 = 5.4 \text{ m}$  (λίγο περισσότερο από δύο (2) φορές το ύψος του πρεκίου του παραθύρου), με συνολική επιφάνεια  $18.36 \text{ m}^2$ .
- β. Ένα δωμάτιο γραφείου (ROOM B) με βάθος  $d_2 = 6.8 \text{ m}$  (Σχεδόν τρεις φορές το ύψος του πρεκίου του παραθύρου), με συνολική επιφάνεια  $23.12 \text{ m}^2$ .
- γ. Ένα δωμάτιο γραφείου (ROOM C) βάθους  $d_3 = 8.2 \text{ m}$  (περίπου λίγο περισσότερο από 3,5 φορές το ύψος του πρεκίου του παραθύρου), με συνολική επιφάνεια  $27.88 \text{ m}^2$ .



Εικόνα 8: Διαμορφώσεις χώρων κατακόρυφων ανοιγμάτων.

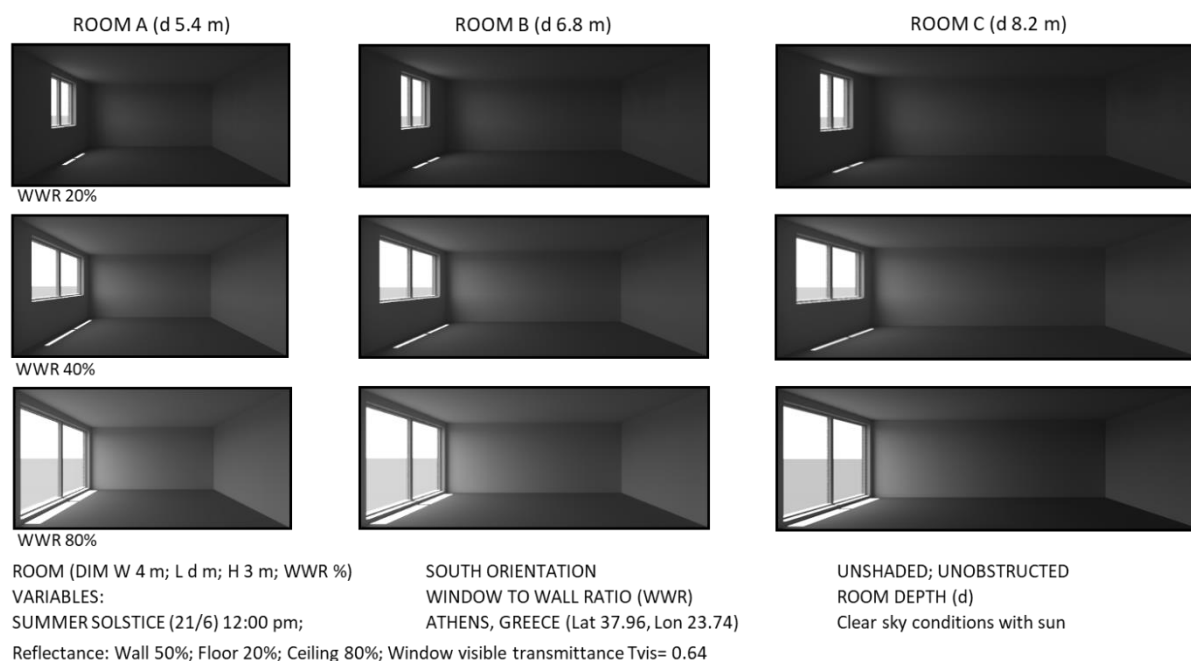
Όλοι οι χώροι είχαν κατακόρυφα ανοίγματα χωρίς εξωτερικά εμπόδια και παρουσία σκιάστρων. Οι λεπτομερείς διαστάσεις των ανοιγμάτων (σε μέτρα) καθορίζονται στον Πίνακα



2. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται συνθετικές εικόνες των εξεταζόμενων χώρων με μεταβλητό WWR για Νότιο προσανατολισμό κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού με ήλιο για την Ελλάδα. Η συνολική απόδοση των χώρων από πλευράς φ.φ. διεξήχθη για την περιοχή της Αθήνας (Lat. 37.9<sup>0</sup>, Long. 23.73<sup>0</sup>). Όσον αφορά τις καιρικές συνθήκες, η Αθήνα έχει ένα ζεστό και ηλιόλουστο κλίμα με μεγάλη διαθεσιμότητα σε φ.φ., ζεστά καλοκαίρια και ήπιες χειμερινές συνθήκες.

**Πίνακας 2:** Βασικές διαστάσεις των διαμορφώσεων του χώρου αναφοράς.

Παράθυρο	Παράμετροι χώρου			
Αναλογία Παραθύρου-Τοίχου, WWR (%)	20	40	60	80
Πλάτος παραθύρου, window width (m)	1.224	2.448	3.06	3.06
Ύψος παραθύρου, window height (m)	1.5	1.5	1.8	2.4
Ύψος πρεκίου παραθύρου, window head height (m)	2.5	2.5	2.5	2.5
Ύψος ποδιάς παραθύρου, window sill (m)	1.0	1.0	0.7	0.1



**Εικόνα 9:** Συνθετικές εικόνες για τους εξεταζόμενους χώρους σε σχέση με την αναλογία παραθύρου-τοίχου (WWR).

Η απόδοση κάθε διαμόρφωσης αξιολογήθηκε με βάση τον υπολογισμό της έκτασης της περιοχής φ.φ. με στατικές και δυναμικές μεθόδους, όπου:

- α. Οι στατικές τεχνικές υπολογισμού αναφέρονται στον υπολογισμό της ζώνης φ.φ. σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου για την εκτίμηση της έκτασης και τον Παράγοντα Φυσικού Φωτισμού (DF) για την εκτίμηση επάρκειας φ.φ. του χώρου.
- β. Οι δυναμικές τεχνικές υπολογισμού αναφέρονται στον υπολογισμό της ζώνης φ.φ. σύμφωνα με την εφαρμογή κριτηρίων φ.φ.

Στην περίπτωση των στατικών μεθόδων, η ζώνη φ.φ. υπολογίζεται όπως ορίζεται από έξι (6) ενεργειακούς κανονισμούς και πρότυπα που έχουν προαναφέρει Ανάλογα με τον κανονισμό που υιοθετείται κάθε φορά και το ύψος του πρεκίου του παραθύρου (η απόσταση από το δάπεδο έως το πρέκι του παραθύρου), η έκταση της περιμετρικής ζώνης φ.φ. υπολογίζεται με τη μορφή μιας εξίσωσης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 3:** Έκταση της περιοχής της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τους ενεργειακούς κανονισμούς (στατικές μέθοδοι).

Στατικές Μέθοδοι (static methods)	Περιγραφή
CIBSE LG-10	$\frac{D_{\text{room}}}{W_{\text{room}}} + \frac{D_{\text{room}}}{h_{\text{window head height}}} \leq \frac{2}{(1 - R_{\text{mean}})}$
EN 15193-1	$D_{\text{daylit area}} = 2.5 \times (h_{\text{window head height}} - h_{\text{task area}})$
CA TITLE-24	
ΚΥΡΙΑ ΖΩΝΗ (PRIMARY ZONE)	$D_{\text{daylit area}} = 1 \times h_{\text{window head height}}$
ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΖΩΝΗ (SECONDARY ZONE)	$D_{\text{daylit area}} = 2 \times h_{\text{window head height}}$
ASHRAE 90.1	$D_{\text{daylit area}} = 1 \times h_{\text{window head height}}$
ASHRAE 189.1	
Για Νότιο Προσανατολισμό (South)	$D_{\text{daylit area}} = 1.5 \times h_{\text{window head height}}$
Για Βόριο Προσανατολισμό (North)	$D_{\text{daylit area}} = 1.75 \times h_{\text{window head height}}$
IECC	4.572 (m)

Στην περίπτωση των δυναμικών μεθόδων, η ζώνη φ.φ. υπολογίζεται με την εφαρμογή τριών (3) κριτηρίων φ.φ., όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Η έκταση της ζώνης φ.φ. υπολογίζεται με βάση το κριτήριο: κάθε σημείο της περιοχής ανάλυσης πρέπει να πληρεί το κριτήριο που έχει καθοριστεί από το κάθε κριτήριο φ.φ. αντίστοιχα.

Ο κάναβος υπολογισμού έχει διαστάσεις  $0.2 \times 0.2$  m και βρίσκεται σε ύψος 0.8 m από το δάπεδο. Για την πρώτη διαμόρφωση γραφείου (ROOM A) χρησιμοποιήθηκε κάναβος  $8 \times 12$  στην επιφάνεια εργασίας που αντιστοιχεί σε 96 σημεία. Για τη δεύτερη διαμόρφωση (ROOM B) ένα πλέγμα  $8 \times 18$  που αντιπροσωπεύεται από 144 σημεία και για την Τρίτη διαμόρφωση (ROOM C) ένα πλέγμα  $8 \times 24$  που αντιπροσωπεύεται από 192 σημεία υπολογισμών στην επιφάνεια εργασίας. Η διαδικασία υπολογισμού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των προγραμμάτων Radiance και DaySim [166, 167].

**Πίνακας 4:** Έκταση της περιοχής της περιμετρικής ζώνης σύμφωνα με τους κριτήρια φ.φ. (Daylight Metrics) (δυναμικές μέθοδοι).

<b>Δυναμικές μέθοδοι (dynamic methods)</b>	<b>Περιγραφή</b>
Παραγοντας Φ.Φ. (Daylight Factor, DF)	Ελάχιστη μέση τιμή, ίση ή μεγαλύτερη από 1% για κάθε σημείο της περιοχής ανάλυσης.
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	Ελάχιστη τιμή, ίση ή μεγαλύτερη από 500 lx, για κάθε σημείο της περιοχής ανάλυσης για 50% των ωρών εργασίας.
Χωρική Κατανομή Αυτονομίας Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, SDA)	Ελάχιστη τιμή, ίση ή μεγαλύτερη από 300 lx, για κάθε σημείο της περιοχής ανάλυσης για 50% των ωρών εργασίας <sup>#</sup> . <sup>#</sup> δεδομένου ότι η χρήση σκιασμού είναι υποχρεωτική, εάν εσωτερικό σκίαστρο (roller) με ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα (Visible Light Transmittance) 5% θεωρήθηκε, η οποία είναι σύμφωνα με τις ελάχιστες προδιαγραφές του LM-83.

Οι ρυθμίσεις προσομοίωσης για την υλοποίηση των υπολογισμών του φ.φ. παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Για τον ορισμό της γεωμετρίας των παραθύρων, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα διπλού υαλοπίνακα με επίστρωση Low-E, με ορατή διαπερατότητα υαλοπίνακα 63.9% και πλαίσιο 20% επί της επιφάνειας του ανοίγματος. Οι εσωτερικοί τοίχοι των

δωματίων, οροφές και οι ανακλαστικότητες των δαπέδων ήταν 50%, 70% και 20% αντίστοιχα.

**Πίνακας 5:** Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις με το λογισμικό Radiance.

Παράμετροι radiance	Ρυθμίσεις
Ambient Bounces (-ab)	6
Ambient Division (-ad)	2000
Ambient Sampling (-as)	500
Ambient Resolution (-ar)	300
Ambient Accuracy (-aa)	0.1
Direct Sampling (-ds)	0.2

Γενικά σε αυτές τις μεθόδους ο γεωμετρικός προσδιορισμός της ζώνης φ.φ. εξαρτάται κυρίως από ύψος του παραθύρου και ειδικότερα του πρεκιού (WHH). Επειδή το ύψος του πρεκιού του παραθύρου διατηρήθηκε σε σταθερό ύψος 2.5 m για μεταβλητή αναλογία παραθύρου προς τον τοίχο (WWR) στις προτεινόμενες διαμορφώσεις, όλες οι περιπτώσεις είχαν την ίδια υπολογιζόμενη ζώνη φ.φ. ανεξάρτητα από τα ποσοστά WWR. Αν είχαν επιλεγθεί εναλλακτικά ύψη για τα πρέκια των παραθύρων (αντί για 2.5 m) η διεύθυνση της ζώνης φ.φ. μέσα στους χώρους θα τροποποιούνταν ανάλογα. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει τα αποτελέσματα (σε μέτρα) με βάση τη διαμόρφωση του δωματίου και τον κανονισμό που εφαρμόστηκε.

Το εύρος της ζώνης φ.φ. κυμαίνεται μεταξύ 2.5 m και περίπου 6 m για το (ROOM C). Το ελάχιστο βάθος βρίσκεται στα 2.5 m (ASHRAE 90.1) και το μέγιστο στα 5.8 m (CIBSE LG – 10). Όσον αφορά το ύψος του πρεκιού του παραθύρου, η ζώνη φ.φ. μπορεί να μεταφραστεί ως μία φορά το ύψος του πρεκιού του παραθύρου ( $1 \times WHH$ ) σε περίπου δυόμισι φορές το ύψος του πρεκιού του παραθύρου ( $2.5 \times WHH$ ), ανεξάρτητα από τις αναλογίες των δωματίων, εκτός από το CIBSE LG – 10, όπου εξετάζονται και άλλη παράμετροι, αλλά εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του παραθύρου και του χώρου. Τα αποτελέσματα φαίνονται επίσης ότι είναι συμβατά με τους εμπειρικούς κανόνες φ.φ. (DRT), τα οποία

αναφέρουν ότι ο λόγος του βάθους ενός δωματίου προς το ύψος του πρεκτιού του παραθύρου θα πρέπει να κυμαίνεται από 1 έως 2.5 [118, 134-142].

Εκτός από τον κανονισμό ASHRAE 189.1 [142] ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό του χώρου, οι υπόλοιποι κανονισμοί δεν προβλέπουν την επίδραση που έχει ο προσανατολισμός του χώρου στον προσδιορισμό της έκτασης της ζώνης φ.φ.. Επίσης, ο CA Title – 24 [138] κάνει διάκριση αναγνωρίζοντας τη διαφορά μεταξύ των περιοχών κοντά στα ανοίγματα (κύριες ζώνες φ.φ.) και πιο μακριά από αυτές (δευτερεύουσες ζώνες φ.φ.), ενώ το αυτόματο σύστημα ελέγχου και εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού στις κύριες ζώνες είναι συνήθως υποχρεωτικός, ενώ στις δευτερεύουσες ζώνες προαιρετικός.

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει την έκταση των ζωνών φ.φ. που προκύπτουν όπως υπολογίζονται από τις συνθήκες που ορίζουν τα κριτήρια φ.φ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση της αναλογίας παραθύρου προς τον τοίχο (Window-to-Wall Ratio, WWR) μπορεί να επηρεάσει τα επίπεδα φωτισμού μέσα στον χώρο και την κατανομή τους, αλλά η συνολική απόδοση εξαρτάται από το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά και από τις αναλογίες (διαστάσεις) του χώρου προς εξέταση.

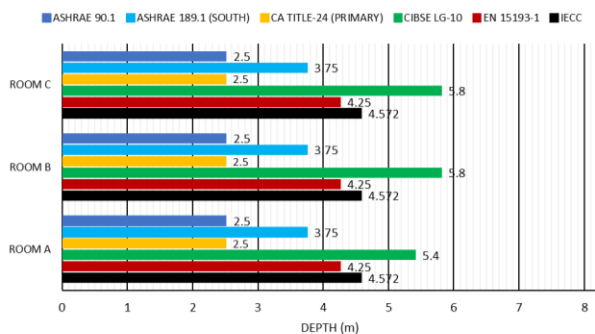
Ένα συνοπτικό διάγραμμα του βάθους της ζώνης φ.φ., όπως υπολογίζεται από τους κανονισμούς και τα κριτήρια φ.φ. στην Εικόνα 10.

**Πίνακας 6:** Αποτελέσματα του βάθους της ζώνης φ.φ. για τους χώρους γραφείων σε σχέση με τα κριτήρια φ.φ..

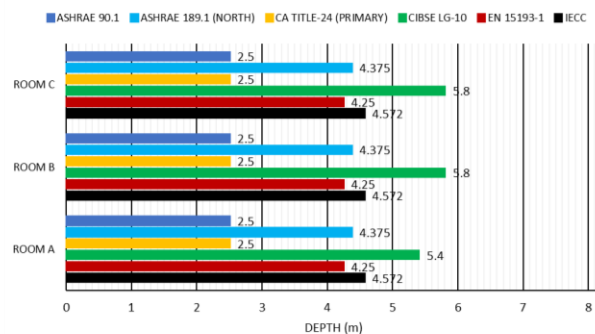
Δυναμικές Μέθοδοι	Αναλογία Παραθυρου-Τοιχου, WWR (%)			
	20	40	60	80
(ROOM A)	Ζώνη Φ.Φ., Daylight Area Depth (m)			
Παράγοντας Φ.Φ. (Daylight Factor, DF)	3.15	5.4	5.4	5.4
Νότιος προσανατολισμός (SOUTH)				
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	2.25	3.6	4.5	5.4
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.7	3.6	4.5	5.4
Βόρειος Προσανατολισμός (NORTH)				
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	1.35	2.7	3.15	3.15
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.25	3.6	4.5	5.4
(ROOM B)	Ζώνη Φ.Φ., Daylight Area Depth (m)			
Παράγοντας Φ.Φ. (Daylight Factor, DF)	3.4	4.54	5.3	6.0
Νότιος προσανατολισμός (SOUTH)				
Αυτονομία φ.φ. (Daylight Autonomy, da)	2.27	3.4	3.8	4.1
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.64	3.77	4.16	4.53
Βόρειος Προσανατολισμός (NORTH)				
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	1.51	2.27	3.0	3.01
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.27	3.4	4.16	4.54
(ROOM C)	Ζώνη Φ.Φ., Daylight Area Depth (m)			
Παράγοντας Φ.Φ. (Daylight Factor, DF)	3.42	4.44	5.2	5.46
Νότιος προσανατολισμός (SOUTH)				
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	2.05	3.42	3.76	4.1
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.73	3.42	4.1	4.44
Βόρειος Προσανατολισμός (NORTH)				
Αυτονομία Φ.Φ. (Daylight Autonomy, DA)	1.37	2.39	2.73	3.01
Χωρική Αυτονομία Φ.Φ. (Spatial Daylight Autonomy, sDA)	2.05	3.41	3.76	4.1

STATIC METHODS: STANDARDS & ENERGY CODES - DAYLIGHT AREA DEPTH (m)

SOUTH ORIENTATION

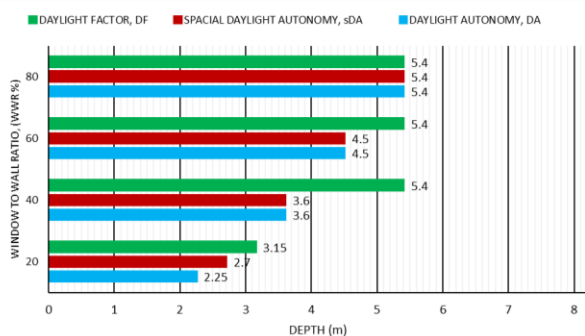


NORTH ORIENTATION

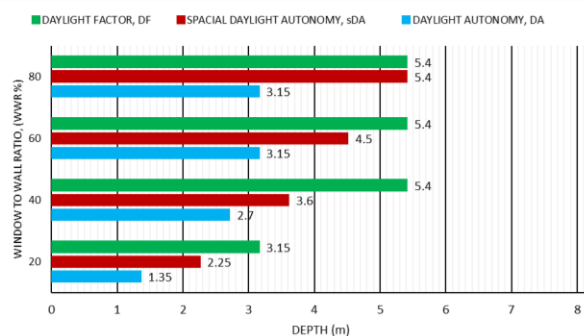


DYNAMIC METHODS: DAYLIGHT METRICS vs. WINDOW TO WALL RATIO - DAYLIGHT AREA DEPTH (m)

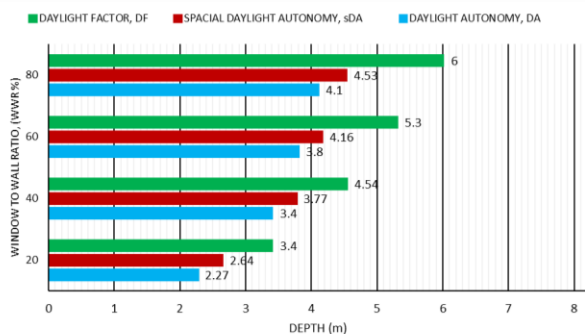
ROOM A



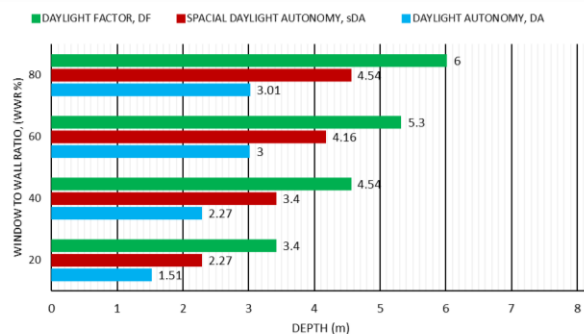
ROOM A



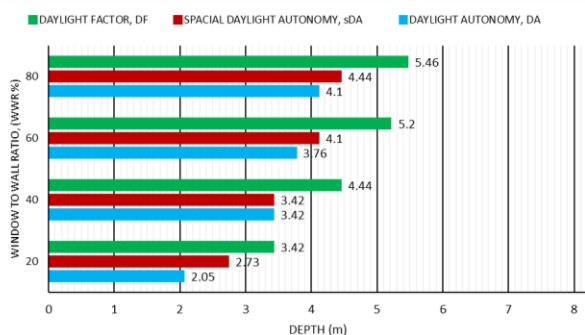
ROOM B



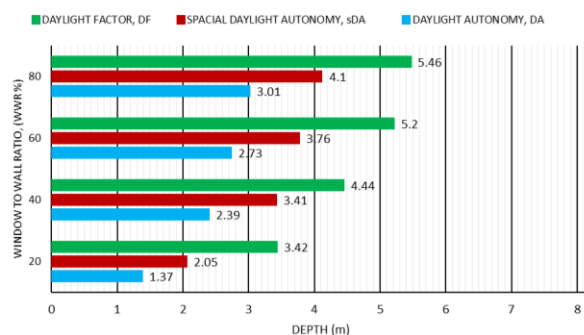
ROOM C



ROOM C

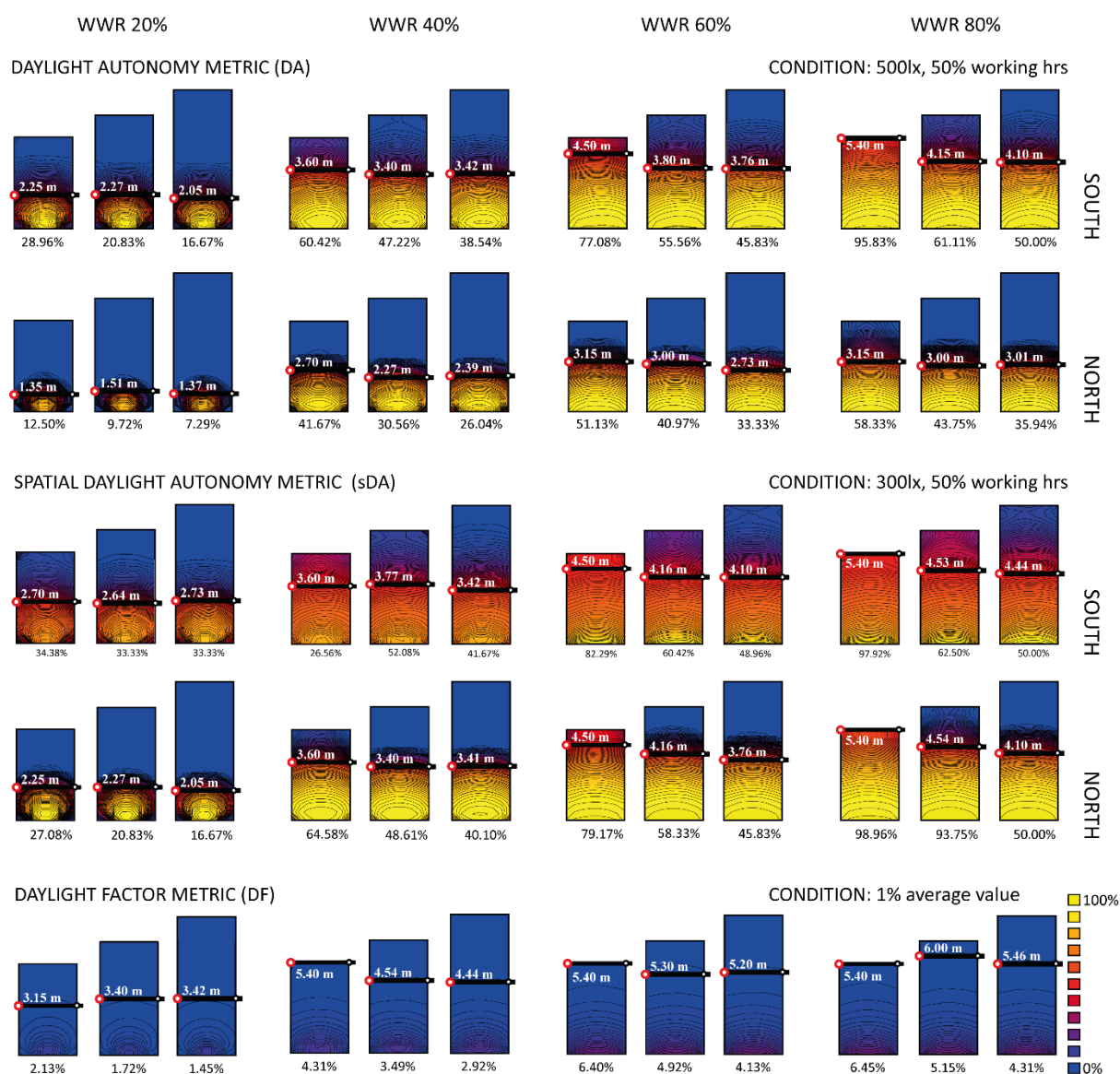


ROOM C



Εικόνα 10: Αποτελέσματα του βάθους της ζώνης φ.φ. σε σχέση με απλές και δυναμικές τεχνικές υπολογισμού για νότιο και βόρειο προσανατολισμό.

Τα κριτήρια φ.φ. DA και sDA βασίζονται και εξαρτώνται από το κλίμα που επικρατεί σε κάθε περιοχή, την διαθεσιμότητα σε φ.φ., τις διαστάσεις του χώρου, το μέγεθος του παραθύρου και τον προσανατολισμό, σε αντίθεση με τον Παράγοντα Φ.Φ. (DF) που είναι περισσότερο στατικός σαν κριτήριο λόγω του μη χειρισμού του ήλιου και των σταθερών κλιματικών συνθηκών και ως εκ τούτου λιγότερα ευαίσθητος στις αλλαγές. Η Εικόνα 11 απεικονίζει την κατανομή των επιπέδων φωτισμού μέσα στους χώρους σε σχέση τα εφαρμοσμένα δυναμικά κριτήρια φ.φ. βάση τις συνθήκες που ορίζουν του βάθος της ζώνης φ.φ.



**Εικόνα 11:** Υπολογισμός του βάθους της ζώνης φ.φ. μαζί με την κατανομή του φ.φ. για διαφορά δυναμικά κριτήρια.



Ο προσανατολισμός του χώρου παίζει σημαντικό ρόλο στον φωτισμό ενός χώρου και επηρεάζει σοβαρά τη διεξόδυση του φυσικού φωτισμού μέσα σε αυτόν. Το κριτήριο Αυτονομίας Φ.Φ. (DA) είναι πιο ευαίσθητο στις αλλαγές και επηρεάζεται περισσότερο από την αλλαγή του προσανατολισμού. Από τα αποτελέσματα προκύπτει μείωση κατά 20% έως 30% του βάθους της ζώνης φ.φ. μεταξύ των χώρων με βόρειο προσανατολισμό σε σχέση με τους αντίστοιχους νότιους. Το κριτήριο της χωρικής κατανομής της αυτονομίας φωτισμού (sDA) είναι λίγο πιο ευαίσθητο στον προσανατολισμό του χώρου, κυρίως λόγω της λειτουργίας του συστήματος σκιασμού, το οποίο ενεργοποιείται κάθε φορά που ανιχνεύονται υψηλές τιμές φωτισμού μέσα στο χώρο και μετριάζει το αποτέλεσμα (αυτό συμβαίνει όταν ανιχνεύεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία). Ο Παράγοντας Φ.Φ. (DF) παραμένει ανεπηρέαστος από την επίδραση του προσανατολισμού στον χώρο.

Η αύξηση της αναλογίας του παραθύρου-τοίχου (WWR) σε όλες τις διαμορφώσεις και τους προσανατολισμούς έχει άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους της ζώνης φ.φ. Τόσο η (DA) όσο και η (sDA) οδηγούν σε περίπου ίδιο βάθος της περιμετρικής ζώνης, με αύξηση περίπου 15% για την (sDA), αλλά αυτό συμβαίνει μόνο για τους νότιους προσανατολισμούς. Όταν ο προσανατολισμός είναι Βόρειος, το βάθος που προκύπτει ποικίλει περίπου κατά 35%. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η (DA) είναι πιο άκαμπτη στην τιμή σχεδιασμού των 500 lx σε αντίθεση με τα 300 lx για την (sDA). Όσον αφορά τον (DF) σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι υπερεκτιμά το βάθος της ζώνης φ.φ. σε σχέση με τα άλλα δύο (2) κριτήρια περίπου 20% για Νότιο προσανατολισμό και πάνω από 30% για τον Βόρειο προσανατολισμό.

### 1.3 ΣΥΝΟΨΗ

Η έρευνα που έχει διεξαχθεί αναφορικά με την ζώνη φ.φ. βασίζεται σε μεταβαλλόμενες σχεδιαστικές πρακτικές που καθορίζονται από τις τρέχουσες περιβαλλοντικές και ενεργειακές ανησυχίες που έχουν ενσωματωθεί στη διαδικασία σχεδιασμού βιώσιμων δομημένων περιβαλλόντων (sustainable built environments) και πιστεύεται ότι θα συνεχίσουν να παράγουν παρόμοιες αλλαγές στο μέλλον. Ένας από τους κύριους λόγους της αποτελεσματικότερης χρήσης του φυσικού φωτισμού είναι η συμμόρφωση με τους ισχύοντες κανονισμούς. Οι κανόνες και τα πρότυπα για την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν ενσωματώσει στις κατευθυντήριες γραμμές τους τρόπους αύξησης της διείσδυσης του φ.φ.

Οι σχεδιαστικοί στόχοι απλών μεθόδων προσδιορισμού, όπως η μέθοδος PSALI και ο τύπος του Lyne, αποσκοπούσαν κυρίως στη βελτίωση του οπτικού περιβάλλοντος. Αργότερα, παράγοντες όπως η εξοικονόμηση ενέργειας και οι απαιτήσεις φωτισμού αναγνωρίστηκαν ως αναπόσπαστο μέρος μιας ολιστικής προσέγγισης σχεδιασμού των χώρων. Η ζώνη φ.φ., όπως την αντιλαμβανόμαστε σήμερα, εκτιμά την δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας από τον φ.φ., παράλληλα με την παροχή ενός επαρκώς φυσικά φωτισμένου εσωτερικού χώρου. Συνεπώς, οι εσωτερικοί χώροι στους οποίους εκτελούνται οπτικές δραστηριότητες/εργασίες απαιτούν συνεχή και καλά διανεμημένο φωτισμό που να ικανοποιεί τις ανάγκες των χρηστών, χωρίς να επηρεάζεται η ικανότητά τους να ολοκληρώνουν τις εργασίες αυτές.

Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος τα τελευταία χρόνια μαζί με την βελτίωση των αλγορίθμων για τον υπολογισμό του φ.φ. επέτρεψαν την χρήση δυναμικών κριτηρίων τα οποία με τη σειρά τους μετέβαλλαν τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται το βάθος της ζώνης φ.φ. Από την ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί με την χρήση τόσο στατικών όσο και δυναμικών μεθόδων για τον προσδιορισμό των ορίων της διείσδυσης του φ.φ. σε χώρους με κατακόρυφα ανοίγματα, εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Στην πλειοψηφία των ενεργειακών κανονισμών ο καθορισμός της ζώνης φ.φ. είναι καθοριστικής σημασίας και πραγματοποιείται συνήθως χρησιμοποιώντας μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου. Καθοριστική παράμετρος είναι συνήθως το ύψος πρεκίου (WHH).

- Το ύψος του πρεκιού του παραθύρου (το ύψος από το δάπεδο έως το παραπέτασμα παραθύρου) διατηρήθηκε σε σταθερό ύψος 2.5 m για τους τρεις (3) υπο εξέταση χώρους. Η παράμετρος η οποία εξετάστηκε ήταν η αναλογία παραθύρου προς τον τοίχο (WWR). Δεδομένου ότι κατά τον υπολογισμό της έκτασης της ζώνης φ.φ. καθοριστική παράμετρος είναι το ύψος πρεκιού (WHH), αυτό είχε σαν αποτέλεσμα και για τους τρεις χώρους να μην παρουσιάζεται μεταβολή της έκτασης της ζώνης φ.φ. ανεξάρτητα από τις εφαρμοζόμενες αναλογίες παραθύρου-τοίχου.
- Τα δυναμικά κριτήρια φ.φ. όπως η αυτονομία φωτισμού DA και η χωρική αυτονομία φωτισμού sDA εξαρτώνται από το κλίμα που επικρατεί σε κάθε περιοχή, την διαθεσιμότητα σε φ.φ., τις διαστάσεις του χώρου, το μέγεθος του παραθύρου και τον προσανατολισμό, σε αντίθεση με τον DF που είναι στατικός αφού αναφέρεται σε πλήρως νεφосκεπή ουρανό με αζιμουθιακή συμμετρία στην κατανομή λαμπρότητας.
- Ο προσανατολισμός του χώρου παίζει σημαντικό ρόλο στον φωτισμό ενός χώρου και επηρεάζει σοβαρά τη διείσδυση του φυσικού φωτισμού μέσα σε αυτόν. Το κριτήριο Αυτονομίας Φ.Φ. (DA) επηρεάζεται περισσότερο από τον προσανατολισμό του χώρου.
- Η αύξηση της αναλογίας του παραθύρου προς τοίχο (WWR) έχει άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους της ζώνης φ.φ. Χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο είτε την (DA) όσο και την (sDA) υπολογίζεται περίπου ίδιο βάθος της ζώνης φ.φ., με αύξηση περίπου 15% για την (sDA), αλλά αυτό συμβαίνει μόνο για τους νότιους προσανατολισμούς.
- Ο (DF) φαίνεται ότι υπερεκτιμά το βάθος της ζώνης φ.φ. σε σχέση με τα άλλα δύο δυναμικά κριτήρια κατά περίπου 20% για Νότιο προσανατολισμό και πάνω από 30% για τον Βόρειο προσανατολισμό.

Οι τεχνικές προσδιορισμού της επίδρασης του φ.φ. σε ένα χώρο συνεχίζουν να βελτιώνονται ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζουν πιο συγκεκριμένες ανάγκες με γνώμονα τους χρήστες ή/και την κατανάλωση ενέργειας. Ο Παράγοντας Φ.Φ. (DF) παραμένει ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα και κοινά αποδεκτά κριτήρια για τον χαρακτηρισμό ενός κτιρίου ως αναφορικά με τον φυσικό φωτισμό, παρά τις διάφορες αναγνωρισμένες αδυναμίες του.

Παρόλο που οι τρέχουσες τάσεις προωθούν τη χρήση του φ.φ. στο μέγιστο δυνατό βαθμό, η έρευνα έχει δείξει ότι οι εμπειρικοί κανόνες φ.φ. (DRT) έχουν ευνοηθεί από τα διάφορα πρότυπα σχεδιασμού και πρακτικές και το ζήτημα της ολοκληρωμένης προσέγγισης είναι απαραίτητο για να ανταποκριθεί στις πραγματικές τις διακυμάνσεις του ήλιου, τον προσανατολισμό και τις διαρκώς μεταβαλλόμενες εσωτερικές συνθήκες που υποστηρίζουν τις ανθρώπινες ανάγκες και την προώθηση του ορθολογικού σχεδιασμού. Δεδομένου ότι οι χώροι έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν αποτελεσματικότερα τον φ.φ. εξαρτώνται λιγότερο από το ηλεκτρικό φως και παρέχουν καλύτερες συνθήκες στον εσωτερικό χώρο.

Παρά την εξέλιξη των εργαλείων προσομοίωσης με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και την ανάπτυξη νέων κριτηρίων φ.φ. με βάση το κλίμα, ο Παράγοντας Φ.Φ. (DF) ενδεχομένως αποτελεί το πιο διαδεδομένο κριτήριο, λόγω της απλότητας του τρόπου υπολογισμού του. Συνήθεις πρακτικές και η εμπειρία χρησιμοποιούνται συχνότερα από τα εργαλεία προσομοίωσης κατά τα αρχικά στάδια της φάσης σχεδιασμού, όταν λαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με την χρήση του φ.φ.

Συνοψίζοντας, οι εμπειρικοί κανόνες φ.φ. (DRT) συχνά αναφέρονται και χρησιμοποιούνται από αρχιτέκτονες και σχεδιαστές για να προβλέψουν το βάθος της ζώνης φ.φ. μέσα σε ένα χώρο. Η ευρεία χρήση των εμπειρικών κανόνων (DRT) μεταξύ αρχιτεκτόνων και άλλων επαγγελματιών στη διαδικασία σχεδιασμού οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι είναι εύκολοι στην εφαρμογή τους και να παράγουν γρήγορα αποτελέσματα. Παρόλο που τα εργαλεία προσομοίωσης έχουν κερδίσει δημοτικότητα για την αξιολόγηση του φ.φ., εμπειρικές πρακτικές συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται συχνότερα από τα εργαλεία προσομοίωσης. Η έλλειψη "τεχνογνωσίας" και η χρονοβόρα διαδικασία ενσωμάτωσης εργαλείων προσομοίωσης και μοντέλων κλίμακας για τις παρατήρησης του φ.φ. καθιστούν τη χρήση των εμπειρικών κανόνων φ.φ. πιο ελκυστική, προσφέροντας μια γρήγορη και απλή λύση για την απόδοση του φ.φ. μέσα στο χώρο.

## 1.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. International Energy Agency, IEA, IES SHC Task 21 Report. Daylight in Buildings: A Sourcebook on Daylighting Systems and Components. Publisher LBNL, Berkeley, USA, 2000.
2. Leslie, R. P. Capturing the Daylight Divided in Buildings: Why and How? *Building and Environment*, 2003, 38(2), pp. 381-385.
3. Doulos, L.; Tsangrassoulis, A.; and Topalis F. Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86, pp. 1069-1077.
4. Doulos, L. T.; Tsangrassoulis, A.; Kontaxis, P. A.; Kontadakis, A.; and Topalis, F. V. Harvesting daylight with LED or T5 fluorescent lamps? The role of dimming. *Energy and Buildings*, 2017, 140, pp. 336-347.
5. Dubois, M. C.; and Blomsterberg, A. Energy Saving Potential and Strategies for Electric Lighting in Future North European, Low Energy Office Buildings: A Literature Review. *Energy and Buildings*, 2011, 43(10), pp. 2572-2582.
6. Ihm, P.; Nermi, A.; and Krafti, M. Estimation of Lighting Energy Savings from Daylight. *Building and Environment*, 2009, 44(3), pp. 509-514.
7. Bodart, M.; and De Herde. A. Global Energy Savings in Offices Buildings by the Use of Daylighting. *Energy and Buildings*, 2002, 34(5), pp. 421-429.
8. Gago, E. J.; Muneer, T.; Knez, M.; and Köster, H. Natural Light Controls and Guides in Buildings. *Energy Saving for Electrical Lighting, Reduction of Cooling Load. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41, pp. 1-13.
9. Galasiu, A.; and Reinhart C. F. Current Daylighting Design Practice: A Survey. *Building Research and Information*, 2007, 36(2), pp. 159-174.
10. Doulos, L.; Tsangrassoulis, A.; and Topalis F. Quantifying energy savings in daylight responsive systems: The role of dimming electronic ballasts. *Energy and Buildings*, 2008, 40, pp. 36-50.
11. Littlefair, P. J. Predicting Lighting Energy Use Under Daylight Linked Lighting Controls. *Building Research and Information*, 1998, 26(4), pp.208-222.

12. Roisin, B.; Bodart, M.; and D'Herdt, D. P. Lighting Energy Savings in Offices Using Different Control Systems and their Real Consumption. *Energy and Buildings*, 2008, 40(4), pp. 514-523.
13. Heerwagen, J. *Biophilia, Health, and Well-being*, 2009.
14. Leather, P.; Pyrgas, M.; Beale, D.; and Lawrence, C. Windows in the Workplace: Sunlight, View, and Occupational Stress. *Environment and Behavior*, 1998, 30(6), pp.739-762.
15. Elzeyadi, I. Daylighting-Bias, and Biophilia: Quantifying the Impacts of Daylight on Occupants Health. In *Thought and Leadership in Green Buildings Research*. Greenbuild Proceedings, USGBC Press, US: Washington, DC, 2011.
16. Boyce, P.; and Rea, M. S. *Lighting and Human Performance II: Beyond Visibility Models, Toward a Unified Human Factors Approach to Performance*, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 2001.
17. Farley, K. M. J.; and Veitch, J. A. *A Room with a View: A Review of the Effects of Windows on Work and Well-Being*. NRC -CNRC Technical Report IRC -RR -136, 2001.
18. Franta, G. and Anstead, K. *Daylighting Offers Great Opportunities*. Window & Door Specifier-Design Lab, pp. 40-43, 1994.
19. Rashid, M.; and Zimring, C. A Review of the Empirical Literature on the Relationships between Indoor Environment and Stress in Health Care and Office Settings: Problems and Prospects of Sharing Evidence. *Environment and Behavior*, 2008, 40(2), pp.151-173.
20. Edwards, L.; and Torcellini, P. *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants*. National Renewable Energy Laboratory, 2002.
21. Liberman, J. *Light: Medicine of the Future*. New Mexico, Bear & Company Publishing, 1991.
22. Holick M. F.; MacLaughlin, J. A.; Clark, M. B.; Holick, S. A.; Potts Jr, J. T.; Anderson, R. R.; Blank, I. H.; Parrish, J. A.; and Elias, P. Photosynthesis of previtamin D3 in human skin and the physiologic consequences. *Science*, 1980, 210, pp. 203-205.
23. Neer, R. M. The Evolutionary Significance of Vitamin D, Skin Pigment, and Ultraviolet Light. *American Journal of Physical Anthropology*, 1975, 43(3), pp. 409-416.

24. Leather, P.; Pyrgas, M.; Beale, D.; and Lawrence, C. Windows in the Workplace: Sunlight, View, and Occupational Stress. *Environment and Behavior*, 1998, 30(6), pp. 739-762.
25. Saaty, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill: New York, 1980.
26. Commission Internationale de l'Éclairage, CIE/IEC. *International Lighting Vocabulary*, 17:4, 1987.
27. Commission Internationale de l'Éclairage, CIE. *The correlation of models for vision and visual performance*, 2002.
28. Commission Internationale de l'Éclairage, CIE. *A unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting*, 1978.
29. Rea, M. S.; and Ouellette, M. J. Relative visual performance: a basis for application. *Lighting Research and Technology*, 1991, 23(3), pp. 135-144.
30. Τσαγκρασούλης, Α., 2015. *Φυσικός Φωτισμός*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/6436>
31. Deering, F. M. A photon accurate model of the human eye. *ACM Trans. Graph.*, 2005, 24(3), pp. 649-658. DOI: <https://doi.org/10.1145/1073204.1073243>.
32. Boyce, P. R. *Human factors in lighting*. 2nd edition, Taylor and Francis, Taylor and Francis Group. London and New York, 2003.
33. Boyce, P. R. *Light, Sight, and Photobiology*. *Lighting Futures*, 1998, 2(3). Available: <http://www.lrc.rpi.edu/Futures/LF-Photobiology/>.
34. Bellia, L., Fragliasso, F., and Pedace, A. *Lighting Control Systems: Factors Affecting Energy Savings' Evaluation*. *Energy Procedia*, 2015, 78, pp. 2645-2650. Baker, N.; and Steemers, K. *Daylight Design of Buildings*. European Commission, Jame & James, 2002.
35. Galasiu, A. D.; and Veitch, J. A. *Occupant Preferences and Satisfaction with the Luminous Environment and Control Systems in Daylit Offices: A Literature Review*. *Energy and Buildings*, 2006, 38(7), pp. 728-742.
36. Boyce, P. R.; Hunter, C.; and Howlett, H. *The Benefits of Daylight through Windows*. *Lighting Research Center*, US: New York, 2003.
37. Steemers, K. *Daylighting Design: Enhancing Energy Efficiency and Visual Quality*. *Renewable Energy*, 1994, 5(2), pp.950-958.

38. Iwata, T.; Hatao, A.; Shukuya, M.; and Kimura, K. Visual Comfort in the Daylight Luminous Environment: Structural Model for Evaluation. *Lighting Research and Technology*, 1995, 26(2), pp. 91-97.
39. Konstantzos, I., Sadeghi, S. A., Kim, M., Xiong, J., and Tzempelikos, A. The effect of lighting environment on task performance in buildings – A review. *Energy and Buildings*, 2020, 226(1), 110394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020>
40. CIBSE Code for Interior Lighting. The Chartered Institute of Building Services Engineers, 1994.
41. EN 12464:1-2011. Light and lighting - Lighting of work places. Part 1: Indoor work places, 2011.
42. The IESNA Lighting Handbook; Reference & Applications. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
43. CIBSE Lighting Guide LG10: Daylighting and Window Design. The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1999.
44. Baker, N. We are All Outdoor Animals. Proceedings in Conference: PLEA 2000, pp.553-555, UK: Cambridge, 2000.
45. Nicol, F.; Wilson, M.; and Chiancarella, C. Using Field Measurements of Desktop Illuminance in European Offices to Investigate its Dependence on Outdoor Conditions and its Effect on Occupant Satisfaction, and the Use of Lights and Blinds. *Energy and Buildings*, 2006, 38, pp. 802-813.
46. Reinhart, C. F. Effects of Interior Design on the Daylight Availability in Open Plan Offices. Proceedings in: ACEEE Conference, Summer Study on Energy Efficient Buildings, pp.1-12, US: California, 2000.
47. Schuler, M. Building Simulation in Application: Developing Concepts for Low Energy Buildings through a Co-operation between Architect and Engineer. Proceedings in: Solar World Congress, the International Solar Energy Society (ISES), Zimbabwe: Harare, 1995.
48. Roche, L.; Dewey, E.; and Littlefair P. Occupant Reaction to Daylight in Offices. *Lighting Research and Technology*, 2000, 32(3), pp. 119-126.



49. Begemann, S. H. A.; Van Den Beld, G. J.; and Tenner, A. D. Daylight, Artificial Light and People in an Office Environment, Overview of Visual and Biological Responses. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1997, 20(3), pp. 231-239.
50. Escuyer, S.; and Fontoynt, M. Lighting Controls: A Field Study of Office Workers' Reactions. *Lighting Research & Technology*, 2001, 33(2), pp. 77-96.
51. Mardaljevic, J.; Hescong, L.; and Lee, E. Daylight Metrics and Energy Savings. *Lighting Research and Technology*, 2009, 41(3), pp.261-283.
52. The U.S. Green Building Council (USGBC). LEED: Leadership in Energy and Environmental Design, 2009. <http://www.usgbc.org/LEED>
53. CHPS Best Practices Manual Vol.1: The Collaborative for High Performance Schools, 2006.
54. Rogers, Z. Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations in the Sensor Placement Optimization Tool. Architectural Energy Corporation, US: Colorado, 2006.
55. Daylight Metrics: PIER Daylighting Plus Research Program: Final Project Report. CEC-500-2012-053. California Energy Commission, 2012.
56. Ahmed, A.; Korres, N. E.; Ploennigs, J.; Elhadi, H.; Menzel, K. Mining Building Performance Data for Energy-Efficient Operation. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, 25(2), pp. 341-354.
57. Droutsas, K., Kontoyiannidis, S., Balaras, K., Dascalaki, E., and Argyriou, A. Energy Mapping Of Hellenic Non Residential Buildings. *Proceedings in 11th National Conference On Renewable Energy Sources*, 2018, Greece Thessaloniki.
58. Theodoridou, I.; Papadopoulos, A. M.; Heggera, M. A Typological Classification of the Greek Residential Building stock. *Energy and Buildings*, 2011, 43, p.p. 2779-2787.
59. EPBD (2002). Directive on energy performance of buildings 2002/91/EC.
60. Δρούτσα, Κ., Κοντογιαννίδης, Σ., Δασκαλάκη, Ε., Μπαλαράς, Κ. Αποτύπωση Της Ενεργειακής Συμπεριφοράς Των Ελληνικών Κτίριων Μέσω Των Ενεργειακών Πιστοποιητικών. *Proceedings in: 10<sup>th</sup> National Conference "Soft Energy Sources"*, 2014, Thessaloniki, Greece.

61. Papadopoulos, A. M.; Theodosiou, T. G.; Karatzas, K. D. Feasibility of Energy Saving Renovation Measures in Urban Buildings: The Impact of Energy Prices and the Acceptable Pay Back Time Criterion. *Energy and Buildings*, 2002, 34(5), pp. 455-466.
62. Balaras, C. A., Gaglia, A. G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Lalas, D. P. European Residential Building and Empirical Assessment of the Hellenic Building Stock, Energy Consumption, and Potential Energy Savings. *Building and Environment*, 2007, 42, pp. 271-281.
63. Koinakis, C.; Sakelaris, J. K. Energy Renovation of Office Buildings in Greece-Potentials based on Case Studies. *International Journal of Energy and Environment*, 2008, 2(1), pp. 1-8.
64. Ralegaonkar, R. V.; Gupta, R. Review of Intelligent Building Construction: A Passive Solar Architecture Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(8), pp. 2238-2242.
65. Dubin, F. S. Energy-Efficient Building Design: Innovative HVAC, Lighting, Energy-Management Control, and Fenestration. *Applied Energy*, 1990, 36(1-2), pp. 11-20.
66. Haas, R.; Panzer, C.; Resch, G.; Ragwitz, M.; Reece, G.; Held, A. A Historical Review of Promotion Strategies for Electricity from Renewable Energy Sources in EU Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(2), pp. 1003-1034.
67. Ortiz, O.; Castells, F.; Sonnemann, G. Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1), pp. 28-39.
68. Gu, N.; London, K. Understanding and Facilitating BIM Adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 2010, 19(8), pp. 988-999.
69. Yan, W.; Culp, C.; Graf, R. Integrating BIM and Gaming for Real-time Interactive Architectural Visualization. *Automation in Construction*, 2011, 20(4), pp. 446-458.
70. Arayici, Y.; Coates, P.; Koskela, L.; Kagioglou, M.; Usher, C.; O'Reilly, K. Technology Adoption in the BIM Implementation for Lean Architectural Practice. *Automation in Construction*, 2011, 20(2), pp. 189-195.
71. Kanagaraj, G.; Mahalingam, A. Designing Energy Efficient Commercial Buildings-A Systems Framework. *Energy and Buildings*, 2011, 43(9), pp. 2329-2343.

72. Sullivan, R.; Lee, E. S.; and Selkowitz, S. A Method of Optimizing Solar Control and Daylighting Performance in Commercial Buildings. California: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1992.
73. Tzempelikos, A.; Athienitis, A. K. The Impact of Shading Design and Control on Building Cooling and Lighting Demand. *Solar Energy*, 2007, 81(3), pp. 69-82.
74. Carmody, J.; Selkowitz, S.; Lee, E. S.; Arasteh, D.; Willmert, T. Window Systems for High-Performance Buildings. New York: W.W. Norton & Company Inc, 2004.
75. El-Refaie, M. F. Performance Analysis of External Shading Devices. *Building and Environment*, 1987, 22(4), pp. 269-284.
76. Wall, M. and Bulow-Hube, H. Solar Protection in Buildings - Part 2: 2000-2002. Report TABK-01/3060. Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund University, 2003, Lund: Sweden
77. Dubois, M. C. Solar Shading and Building Energy Use, a Literature Review Part 1. Report No TABK--01/1023, Department of Construction and Architecture, Lund University, 1997, Lund: Sweden.
78. Tin-tai, C.; Chunying, L.; and Zhang, L. Innovative Solar Windows for Cooling-demand Climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(2), pp. 212-220.
79. Salvo, S. (1998). Solar Control: An Integrated Approach to Solar Control Techniques. *Renewable Energy*, 15(1-4), pp.368-376.
80. Athienitis, A. K.; and Tzempelikos, A. A Methodology for Simulation of Daylight room Illuminance Distribution and Light Dimming for a Room with a Controlled Shading Device. *Solar Energy*, 2002, 72(4), pp. 271-281.
81. Loutzenhiser, P. G.; Manz, H.; Carl, S.; Simmler, H.; and Maxwell, G. M. Empirical Validations of Solar Gain Models for a Glazing Unit with Exterior and Interior Blind Assemblies. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3), pp. 330-340.
82. Tzempelikos, A. The Impact of Venetian Blind Geometry and Tilt Angle on View, Direct Light Transmission, and Interior Illuminance. *Solar Energy*, 2008, 82(12), pp. 1172-1191.
83. Dubois, M. C. Solar Shading for Low Energy Use and Daylight Quality in Offices. Simulations, Measurements and Design Tools. Report No TABK-01/1023, Department of Construction and Architecture, Lund University, 2001, Lund: Sweden.

84. Colaco, S. G.; Kurian, C. P.; George, V. I.; and Colaco, A. M. Prospective Techniques of Effective Daylight Harvesting in Commercial Buildings by Employing Window Glazing, Dynamic Shading Devices, and Dimming Control-a literature review. *Building Simulation*, 2008, 1(4), pp. 279-289.
85. Leslie, R. P.; Raghaven, R.; Howlett, O.; and Eaton, C. The Potential of Simplified Concepts for Daylight Harvesting. *Lighting Research and Technology*, 2004, 37(1), pp. 21-40.
86. Lee, E. S.; DiBartolomeo, D. L.; Vine, E. L.; and Selkowitz, S. E. Integrated Performance of an Automated Venetian Blind/Electric Lighting System in a Full-Scale Private Office. In: *Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*, 1998, USA: Florida.
87. Tzempelikos, A.; Athienitis, A. K. The Effect of Shading Design and Control on Building Cooling Demand. In: *Proceedings of the International Conference: Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment*, 2005, Santorini: Greece.
88. Kapsis, K.; Tzempelikos, A.; Athienitis, A. K.; and Zmeureanu, R. G. Daylighting Performance Evaluation of a Bottom-up Motorized Roller Shade. *Solar Energy*, 2010, 84(12), pp. 2120-2131.
89. Gouri, D. Effect of Fixed Horizontal Louver Shading Devices on Thermal Performance of Building by TRNSYS Simulation. *Renewable Energy*, 2001, 23(3-4), pp. 497-507.
90. Roche, L. Summertime Performance of an Automated Lighting and Blinds Control System. *Lighting Research and Technology*, 2002, 34(1), pp. 11-27.
91. Kuhn, T. E.; Buhler, C.; and Platzer, W. J. Evaluation of Overheating Protection with Sun-Shading Systems. *Solar Energy*, 2001, 38(6), pp. 59-74.
92. Simmler, H.; and Binder, B. Experimental and Numerical Determination of the Total Solar Energy Transmittance of Glazing with Venetian Blind Shading. *Building and Environment*, 2006, 43(2), pp. 197-204.
93. Vine, E.; Lee, E.; Clear, R.; DiBartolomeo, D.; and Selkowitz, S. Office Worker Response to an Automated Venetian Blind and Electric Lighting System: A Pilot Study. *Energy and Buildings*, 1998, 28(2), pp. 205-218.
94. Reinhart, C. F.; and Voss, K. Monitoring Manual Control of Electric Lighting and Blinds. *Research and Technology*, 2003, 35(3), pp. 243-260.

95. Rea, M. Window Blind Occlusion: A Pilot Study. *Building and Environment*, 1984, 19(2), pp. 133-1337.
96. Reinhart, C. F.; Mardaljevic, J.; Rogers, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos*, 2006, 3(1), pp. 1-25.
97. Werner, K. E. Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environment. *Solar Energy*, 2005, 79(2), pp. 140-158.
98. Piccolo, A.; and Simone, F. Effect of Switchable Glazing on Discomfort Glare from Windows. *Building and Environment*, 2009, 44(6), pp. 1171-1180.
99. Reinhart, C. F. Lightswitch 2002: A Model for Manual and Automated Control of Electric Lighting and Blinds. *Solar Energy*, 2004, 77(1), pp. 15-28.
100. Kuhn, T. E. Solar Control: A General Evaluation Method for Facades with Venetian Blinds or Other Solar Control Systems. *Energy and Buildings*, 2006, 38(6), pp. 648-660.
101. Hopkinson, R. G.; and Longmore, J. The Permanent Supplementary Artificial Lighting of Interiors. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1959, 24(2), pp. 121-148.
102. Ne'eman, E., and Longmore, J. The Integration of Daylight with Artificial Light. *Proceedings in: Commission Internationale de L'Eclairage, TC-4.2 Conference*, 1973, pp. K-1 to K-16, Turkey: Istanbul.
103. Crisp, V. H. C. The Light Switch in Buildings, *Lighting Research and Technology*, 1978, 10, pp. 69-82.
104. Matsuura, K. Turning-off line in perimeter areas for saving lighting energy in side-lit offices. *Energy and Buildings*, 1979, 2(1), pp. 19-26.
105. Crisp, V. H. C. A Case for 'Active' Daylighting by Appropriate Management of Electric Lighting. *Energy and Buildings*, 1984, 6(2), pp. 151-158.
106. Verderber, R. R.; and Rubinstein, F. M. Mutual Impacts of Lighting Controls and Daylighting Applications. *Energy and Buildings*, 1984, 6(2), pp. 133-140.
107. Hunt, D. R. G. Improved Daylight Data for Predicting Energy Saving from Photoelectric Controls. *Lighting Research and Technology*, 1979, 11(1), pp. 9-23.
108. Collins, J. B. The Successor to PSALI. *Lighting Equipment News*, 1982, pp.8-10.

109. Ne'eman, E. A Comprehensive Approach to the Integration of Daylight and Electric Light in Buildings. *Energy and Buildings*, 1984, 6(2), pp. 97-108.
110. Reinhart, C. F.; and Weissman, D. A. The Daylit Area - Correlating Architectural Student Assessments with Current and Emerging Daylight Availability Metrics. *Building and Environment*, 2009, 50, pp. 155-164.
111. Osterhaus, W. K. E. Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environments. *Solar Energy*, 2005, 79(2), pp. 140-158.
112. Simpson, R. E. Illumination as a Safety Factor in Industrial Plants. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1914, 9, pp. 459.
113. IES Code of Lighting Factories, Mills and other Workplaces. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 1915, 10, pp. 605-641.
114. Galasiu, A.; and Reinhart C. F. Current Daylighting Design Practice: A Survey. *Building Research and Information*, 2007, 36(2), pp. 159-174.
115. Reinhart, C. F.; and Fitz, A. Key Findings from a Survey on the Use of Daylight Simulation Programs. *Proceedings in: ESIM, 2004, Canada: Vancouver*, pp. 175-182.
116. IECC (2012). ICC's International Energy Conservation Code, Energy Model Code.
117. ASHRAE (2016). ASHRAE/USGBC/IES 90.1- 2016, Energy Model Code.
118. EN 15193-1: Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting; Specifications, Module M9; 2017. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030292858>.
119. Shahriara, A. N. M.; and Mohitb, M. A. Estimating depth of daylight zone and PSALI for side lit office spaces using the CIE Standard General Sky, *Building, and Environment*, 2007, 42(8), pp. 2850-2859.
120. ISO 15469:2004(E)/ CIE S011/E: 2003. Joint ISO/CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight -CIE Standard General Sky.
121. Lynes, J. A. A Sequence for Daylighting Design. *Lighting Research and Technology*, 1979, 11(2), pp. 102-106.
122. Moon, P.; and Spencer, D. E. Illumination from a Non-uniform Sky. *Illuminating Engineering Society*, 1942, 37, pp. 707-726.

123. Waldram, P. J. The Measurement of Illumination; Daylight & Artificial: with Special Reference to Ancient Light Disputes. *The Journal of the Society of Architects*, 1909, 3, pp. 131-140.
124. Pitts, M. The Grumble Point: Is it Still Worth the Candle? *Structural Survey*, 2000, 18(5), pp. 255-258.
125. Chynoweth, P. Progressing the Rights to Light Debate: Part 2: The Grumble Point Revisited, *Structural Survey*, 2005, 23(4), pp. 251-264.
126. Chynoweth, P. Progressing the Rights to Light Debate- Part 1: A Review of Current Practice. *Structural Survey*, 2004, 22(3), pp. 131-137.
127. Sumpner, W. E. The Diffusion of Light. *Proceedings in: The Physical Society*, 1892, 12, pp. 10-29.
128. Crisp V. H. C.; and Littlefair P. J. Average Daylight Factor Prediction. *Proceedings in: CIBS National Lighting Conference, University of Cambridge, 1984, UK: London.*
129. BRE, Desktop guide to daylighting - for architects, Good Practice Guide 245, Building Research Establishment, Watford, 1998.
130. PWC (1989). Public Works and Government Services Canada (PWGSC). PWC Daylighting Manual. Ottawa, Canada: PWGSC.
131. O'Connor, J.; Lee, E.; Rubinstein, F.; and Selkowitz, S. Tips for Daylighting with Windows. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1997, LBNL Report 39945.
132. Guthrie, P. *The Architect's Portable Handbook: First Step Rules of Thumb for Building Design*. McGraw Hill, 1995, US: New York.
133. Cofaigh, E. O.; Fitzgerald, E.; Alcock, R.; Lewis, J. O.; Peltonen, V.; and Marucco, A. *A Green Vitruvius - Principles and Practice of Sustainable Architectural Design*. James & James, 1999, UK: London.
134. Reinhart, C. F. A Simulation Based Review on the Ubiquitous Window Head Height to Daylit Zone Depth Rule of Thumb. *Proceedings in: 9th International IBPSA Conference, 2005, Canada: Montréal.*
135. Reinhart, C. F.; and LoVerso, V. R. M. A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. *Lighting Research and Technology*, 2010, 42(1), pp. 7-31.

136. Mirrahimi, S.; Lukman, N.; Ibrahim, N.; and Surat, M. Estimation Daylight to Find Simple Formulate Based on the Ratio of Window Area to Floor Area Rule of Thumb for Classroom in Malaysia. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering, and Technology*, 2013, 6(5), pp. 931-935.
137. CA Title 24 (2008). California's Title 24-2008, Energy State Code.
138. ASHRAE (2009). ASHRAE/USGBC/IES 189.1- 2009, Model Green Building Code.
139. Moon, P.; and Spencer, D. E. Illumination from a Non-uniform Sky. *Illuminating Engineering Society*, 1942, 37, pp. 707-726.
140. Reinhart, C. F.; and Fitz, A. Findings from a Survey on the Current Use of Daylight Simulations during Building Design. *Energy and Buildings*, 2006, 38(7), pp. 824-835.
141. Sarawgi, T. Survey on the Use of Lighting Design Software in Architecture and Interior Design Undergraduate Education. *International Journal of Architectural Computing*, 2006, 4(4), pp. 91-108.
142. Reinhart, C. F.; Walkenhorst, O. Dynamic Radiance-based Daylight Simulations for a Full-scale Test Office with Outer Venetian Blinds. *Energy and Buildings*, 2001, 33(7), pp.683-697.
143. Nabil, A.; and Mardaljevic J. Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. *Lighting Research and Technology*, 2005, 37(1), pp. 41-59.
144. Mardaljevic, J. Examples of Climate-based Daylight Modelling. *Proceedings in: CIBSE National Conference: Engineering the Future*, 2006, UK: London.
145. IES LM-83, 2012. Spatial Daylight Autonomy and Annual Sunlight Exposure. *Illuminating Engineering Society IES Lighting Measurements*, 2012, ISBN: 978-0-87995-272-3.
146. Osterhaus, W. Windowless environments: are they affecting our health. *Proceedings in LIGHTING'99—Annual Convention of the Illuminating Engineering Society of Australia and New Zealand*, 1999.
147. Commission Internationale de l'Eclairage, CIE Technical Committee 3-13. Discomfort Glare in Interior Lighting. *CIE Publication 117*, 1995, Vienna.



148. Jakubiec, J. A. and Reinhart, C. F. The 'adaptive zone' - A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting Research and Technology*, 2012, 44, pp.149-170.
149. Hopkinson, R. Glare from Daylighting in Buildings. *Applied Ergonomics*, 1972, 3, pp.206-215.
150. CIE, Discomfort Glare in the Interior Lighting, Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), Technical committee TC-3.13, Division 4, Interior Environment and Lighting Design, Vienna Austria, 1992.
151. Guth, S. K. A method for the evaluation of discomfort glare. *Illuminating Engineering*, 1963, 58(5), pp.351-364.
152. Petherbridge, P. and Hopkinson, R. G. Discomfort Glare and the Lighting of Buildings, *Transaction of Illuminating Engineering Society*, 1950, 15(39), London, UK.
153. CIE, Discomfort Glare in the Interior Working Environment, Publication CIE No. 55 (TC-3.4), Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), Vienna, Austria, 43 pp., 1983
154. Einhorn, H. D. A new method for the assessment of discomfort glare, *Lighting Research and Technology*, 1969, 1(4), pp.235-247.
155. Einhorn, H. D. Discomfort glare: a formula to bridge differences, *Lighting Research and Technology*, 1979, 11(2), pp.90-94.
156. Wienold, J. and Christoffersen, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 2006, 38, pp.743-757.
157. Osterhaus, W. K. E. Discomfort Glare Assessment and Prevention for Daylight Applications in Office Environments. *Solar Energy*, 2005, 79(2), pp.140-158.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα των χαρακτηριστικών των συστημάτων φ.φ. (daylighting systems, DS). Μετά από αυτή την εισαγωγή, η οποία συνοψίζει τα βασικά στοιχεία των συστημάτων φ.φ., καθώς επίσης και μια αντιπροσωπευτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας και των εμπορικών προϊόντων των λύσεων σχεδίασης ηλιοστάτων για εφαρμογές συστημάτων φ.φ. σε κτίρια. Η παράγραφος 2.2 αποτελείται από μια αναλυτική ανασκόπηση των ραφιών φυσικού φωτισμού (light shelves) που ταξινομούνται σε τέσσερις (4) γενικές ομάδες:

- α. Οριζόντια ράφια,
- β. Επίπεδα κεκλιμένα ράφια,
- γ. Καμπύλα ράφια και
- δ. Δυναμικά/Ενεργά ράφια.

Οι τεχνικές περιγραφές παρέχουν λεπτομέρειες για το σχεδιασμό και την εφαρμογή κάθε συστήματος, καθώς και πληροφορίες για τις αρχές λειτουργίας τους.

Τα συστήματα φ.φ. που παρουσιάζονται αντιπροσωπεύουν μια μεγάλη γκάμα συστημάτων φ.φ. για εφαρμογή σε χώρους που φωτίζονται από κατακόρυφα (sidelighting) και οριζόντια (toplighting) ανοίγματα. Ορισμένα από αυτά τα συστήματα βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης ή είναι πρωτότυπα και άλλα αποτελούν αρχιτεκτονικές ιδέες και όχι τελικά προϊόντα. Όλα αυτά τα συστήματα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και επομένως διαφορετικές επιπτώσεις στο συνολικό σχεδιασμό καθώς επίσης και διαφορετική απόδοση. Συνεπώς είναι σχετικά δύσκολο να αναπτυχθεί μια ενιαία μεθοδολογία αξιολόγησης ή να καθοριστεί μια σαφής μέθοδος επιλογής για την επιλογή του καλύτερου συστήματος φ.φ.

σε κάθε κατάσταση. Παρ 'όλα αυτά, υπάρχουν γενικές αρχές σχεδιασμού που μπορούν να εφαρμοσθούν.

## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα σύγχρονα κτίρια, η χρήση του φ.φ. αποτελεί μια στρατηγική, με σημαντική συμβολή στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των κτιρίων και την βελτίωση της οπτικής και θερμικής άνεσης των χρηστών. Ο φ.φ. προτιμάται από τον τεχνητό φωτισμό από τους χρήστες λόγω της τέλει χρωματικής απόδοσης του και των συνεπαγόμενων ευεργετικών ψυχολογικών και φυσιολογικών επιπτώσεων (π.χ. παροχή θέας).

Παραδοσιακά, τρεις (3) στρατηγικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή φ.φ. στα κτίρια:

- α. Η πρώτη είναι μέσα από κατακόρυφα πλευρικά ανοίγματα (παράθυρα). Η ικανότητά τους να εισάγουν το φως της ημέρας υπόκειται σε πολλές μεταβλητές όπως το μέγεθος, τον αριθμό, τη θέση και τη διάταξη τους, το ύψος του χώρου, τις ανακλαστικότητες των επιφανειών κ.α. Ο φωτισμός από τα παράθυρα έχει το μειονέκτημα ότι φωτίζει αποτελεσματικά μόνο περιοχές που βρίσκονται κοντά τους. Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η περιοχή που επωφελείται περισσότερο ονομάζεται περιμετρική περιοχή ή ζώνη φ.φ. και επηρεάζεται κυρίως από την τοποθέτηση των παραθύρων και τις διαστάσεις τους [1-4]. Κατά συνέπεια, η κατανομή του φωτός δεν είναι ομοιόμορφη σε χώρους με μεγάλο βάθος, ακόμη και όταν ολόκληρη η επιφάνεια του τοίχου αποτελείται από παράθυρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο φυσικός φωτισμός αδυνατεί να παρέχει με επάρκεια στον χώρο τα απαιτούμενα επίπεδα φ.φ. χωρίς πρόσθετη υποστήριξη από τον τεχνητό φωτισμό, ειδικά σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από την πρόσοψη. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η ενσωμάτωση συστημάτων στο άνοιγμα που μπορούν να συλλέγουν και να διανέμουν τον φ.φ. βαθύτερα στο χώρο ενισχύοντας τα επίπεδα φωτισμού στις απομακρυσμένες από το άνοιγμα περιοχές.

- β. Σε κτίρια μεγάλης κάτοψης πολλές φορές τα ανοίγματα δεν επαρκούν για τον φωτισμό και έτσι αναπτύσσονται στρατηγικές φωτισμού με οριζόντια ανοίγματα (top-lighting strategies) για να εισάγουν τον φ.φ. σε εσωτερικούς χώρους που βρίσκονται μακριά από τα πλευρικά παράθυρα. Σε αντίθεση με τα παράθυρα, τα ανοίγματα οροφής μπορούν να παρέχουν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των επιπέδων φωτισμού μέσα στο χώρο. Τα ανοίγματα οροφής όμως περιορίζονται από τις μεθόδους κατασκευής και έχουν περιορισμένη χρησιμότητα σε πολυώροφα κτίρια. Επιπλέον μπορεί να επιβαρύνουν ενεργειακά το κτήριο ιδίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών.
- γ. Η τρίτη στρατηγική είναι οι ακάλυπτοι χώροι και τα αίθρια,, το οποία μπορούν είτε να είναι κλειστά είτε όχι. Παρέχουν την δυνατότητα να εισάγουν τον φ.φ. μέσα στους εσωτερικούς χώρους από κατακόρυφα ανοίγματα με τα οποία γειτνιάζουν.

Τα ανοίγματα οροφής μπορούν να έχουν είτε οριζόντιους είτε κάθετους υαλοπίνακες. Επειδή ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού από ότι το χειμώνα, χώροι που έχουν ανοίγματα οροφής με οριζόντιους υαλοπίνακες λαμβάνουν περισσότερο άμεσο φως από τον ήλιο το καλοκαίρι (όταν δεν είναι γενικά απαραίτητο) και λιγότερο το χειμώνα (όταν χρειάζεται). Το αντίθετο ισχύει για χώρους που χρησιμοποιούν ανοίγματα οροφής με κάθετους υαλοπίνακες που είναι προσανατολισμένοι προς τον Νότο.

Έτσι, όσον αφορά τη βελτιστοποίηση των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, τα ανοίγματα οροφής με διατάξεις κατακόρυφων υαλοπινάκων που βλέπουν προς τον Βορρά τείνουν να είναι πιο αποτελεσματικά. Αν οι κατακόρυφοι υαλοπίνακες ενός ανοίγματος οροφής είναι προσανατολισμένοι στον Βορρά, τα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό είναι γενικώς μικρότερα από ότι θα ήταν αν ήταν προσανατολισμένα στο Νότο όμως η ομοιομορφία είναι βελτιωμένη. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κατακόρυφων και οριζόντιων ανοιγμάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7. Ο στόχος των συστημάτων φυσικού φωτισμού είναι η βελτίωση της κατανομής φωτισμού στο εσωτερικό ενός χώρου, με ταυτόχρονη ρύθμιση των ηλιακών κερδών και περιορισμό της θάμβωσης [7-10].

**Πίνακας 7:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εφαρμογών κατακόρυφων συστημάτων φωτισμού (side-lighting) και οριζοντίων (top-lighting).

<b>Οριζοντια Συστηματα Φωτισμου (Top-Lighting)</b>	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Καταλληλά για οριζόντια επίπεδα εργασίας Ευκολία στην διαχείριση θάμβωσης Δεν επηρεάζονται από τον προσανατολισμό	Συνήθως, παρέχουν φωτισμό στον τελευταίο όροφο ενός κτιρίου Δυσκολία στην λειτουργία τους Μεγάλο κόστος κατασκευής
<b>Κατακορυφα Συστηματα Φωτισμου (Side-Lighting)</b>	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παρέχουν φωτισμό σε όλους τους ορόφους ενός κτιρίου Παρέχουν οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον	Δυσκολία στην διαχείριση θάμβωσης Περιορισμός στην περιμετρική ζώνη Εξαρτόμενα από τον προσανατολισμό

Η χρήση συνηθισμένων συστημάτων ηλιακής σκίασης, όπως τα ρολά ή οι περσίδες, συχνά μειώνουν σημαντικά την εισαγωγή φ.φ. μέσα σε έναν χώρο. Συνεπώς, η χρήση συστημάτων φ.φ. (daylighting systems, DS), με σκοπό την αύξηση των επιπέδων φ.φ. στον πυρήνα των κτιρίων, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό αλλά μπορεί πιθανόν να αυξήσει τα ψυκτικά φορτία, ειδικά σε χώρους που δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία [11]. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την υιοθέτηση των συστημάτων φ.φ. είναι:

- Το δυναμικό σε φ.φ. της περιοχής (π.χ. γεωγραφικό πλάτος, νέφωση, εξωτερικά εμπόδια κ.λπ.).
- Οι διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (Διάχυτος φωτισμός από ουρανό, άμεση ηλιακή ακτινοβολία, κλπ.).
- Τα ανοίγματα.
- Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

- Η λειτουργία και συντήρηση (π.χ. συνεχής/διακοπτόμενη, συντήρηση κλπ.).
- Η δυνατότητα ανακατεύθυνσης του φ.φ. σε περιοχές με χαμηλό φωτισμό.
- Η βελτίωση της κατανομής του φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας.
- Η βελτίωση της οπτικής άνεσης μέσω του ελέγχου θάμβωσης.
- Η επίτευξη σκίασης με σκοπό τον έλεγχο των ηλιακών κερδών.

Πραγματοποιήθηκαν σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για τον σχεδιασμό συστημάτων φ.φ., για την προστασία των χρηστών από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και για τη βελτίωση της κατανομής των επιπέδων φ.φ. Αυτές έδειξαν ότι τα συστήματα φ.φ. έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας ενός χώρου, ειδικά του ηλεκτρικού ρεύματος για τον φωτισμό [12-14] εάν συνδυαστούν με ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου του τεχνητού φωτισμού. Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει μια σύνοψη των διαφόρων εργασιών με ανασκοπήσεις συστημάτων φ.φ. που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία για διαφορετικούς τύπους συστημάτων ημέρας με (w) και χωρίς (w/o) σκίαση [15-29].

**Πίνακας 8:** Ανασκοπήσεις σχετικά με τα συστήματα Φ.Φ. Που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία.

Ερευνητές	Περιγραφή	Συστήματα φ.φ.	REF
Kischkoweit-Lopin, M.	Επισκόπηση με διαχωρισμό σε κατηγορίες, γραφικές απεικονίσεις και σύντομες περιγραφές των διάφορων τμημάτων των συστημάτων σε δυο (2) βασικές αρχές.	Πρισματικά πανέλα, ανειδωλικά ανοίγματα, στόρια και περσίδες, ράφια φωτισμού, ανειδωλικές οροφές, κτλ.	[15]
Littlefair, P.J.; Aizlewood, M.E.; Birtles, A.B.	Ανασκόπηση της απόδοσης των εξελιγμένων συστημάτων φ.φ. Βάση πειραματικών μετρήσεων που διεξήχθησαν στο Building Research Establishment (BRE).	Ράφια φωτισμού, πρισματικοί υαλοπίνακες, ανακλαστικά στόρια, πρισματικά φίλμ.	[16]
Freewan, A.A.	Η ερευνά περιλαμβάνει μια ταξινόμηση των συστημάτων φ.φ. Με στόχο την ορθή επιλογή συστήματος ανάλογα με τις απαιτήσεις κατά την διαδικασία σχεδιασμού των χωρών/κτιρίων. Η επιλογή του συστήματος βασίζεται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις φωτισμού.	Αυλές, αίθρια, φεγγίτες, φωταγωγοί, ράφια φωτισμού, στόρια, πρισματικά πάνελ, συστήματα σκιασμού καθοδήγησης φ.φ., πανέλα κοπής λέιζερ, φωτο-σωλήνες, ανειδωλικά φρεάτια, φωτοδίοδοι.	[17]
Nair, M.; Ramamurthy, K.; Ganesan, A.	Ανασκόπηση των εξελιγμένων συστημάτων φ.φ. Κατηγοριοποιημένα σε συστήματα καθοδήγησης, μεταφοράς, ανάκλασης και υβριδικά. Μια σύγκριση των συστημάτων παρουσιάζεται αναφορικά με την ευκολία εγκατάστασης, συντήρηση, απόδοση, κτλ.	Ράφια φωτισμού, συστήματα σκίασης καθοδήγησης φ.φ., συστήματα ανάκλασης, πρισματικά πανέλα /φίλμ /υαλοπίνακες, ανειδωλικές οροφές, πανέλα κοπής λέιζερ, ανειδωλικό συγκεντρωτές, ηλιοστάτες, συστήματα μεταφοράς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, φακοί Fresnel, παραβολικοί ανακλαστήρες.	[18]

<p>Mayhoub, M. S.; Carter, D. J.</p>	<p>Ανασκόπηση των υβριδικών συστημάτων καθοδήγησης φ.φ. Περιγραφή πρωτοτύπων και εφαρμοσμένων συστημάτων και εκτίμηση της απόδοσης, κόστος κατασκευής και λειτουργίας, αποδοχή χρηστών και πρακτικές σχεδιασμού τους.</p>	<p>Συστήματα φωταγωγών και φωτοσωλήνων.</p>	<p>[19]</p>
<p>Kim, J. T.; Kim, G.</p>	<p>Ανασκόπηση των οπτικών συστημάτων φ.φ. Και παρουσίαση εμπορικών εφαρμογών. Παρέχονται πρακτικές οδηγίες εφαρμογής των οπτικών συστημάτων φ.φ. Που παρήχθησαν από την διεξαγωγή ερωτηματολογίου.</p>	<p>Φωτο-σωλήνες, οπτικά συστήματα μεταφοράς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.</p>	<p>[20]</p>
<p>McCluney, R.</p>	<p>Παρουσίαση κατηγοριών συστημάτων φ.φ.. Η πρώτη κατηγορία περιγράφει τα συστήματα φ.φ., τα συστήματα υαλοπινάκων και τα ανακλαστικά συστήματα για εφαρμογές σε παράθυρα. Η δεύτερη κατηγορία περιγράφει τα εξελιγμένα συστήματα φ.φ. Για εφαρμογές στον πυρήνα των κτιρίων.</p>	<p>Σκίαστρα, περσίδες, συστήματα φωταγωγών, ανειδωλικό συγκεντρωτές.</p>	<p>[21]</p>
<p>Scartezzini, J. L.; Courret, G.</p>	<p>Παρουσίαση ανειδωλικών συστημάτων που στοχεύουν στην αποδοτική συλλογή και μεταφορά του διάχυτου φ.φ.</p>	<p>Ανειδωλικές οροφές, ενσωματωμένα ανειδωλικά συστήματα), ανειδωλικές περσίδες.</p>	<p>[22]</p>



Wong, I. L.	Ανασκόπηση και σύγκριση στρατηγικών σχεδίασης με χρήση φ.φ., μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα των συστημάτων φ.φ. Και των τεχνικών ανάλυσης όπως μοντέλα υπο κλίμακα, πειραματικές μετρήσεις, προσομοιώσεις και χρήσης διαγραμμάτων.	Συστήματα φ.φ. Για οριζόντιες και κατακόρυφες εφαρμογές.	[23]
Huang, TY.; Hocheng, H.; Chou, TC.; Yang, WH.	Ανασκόπηση προηγμένων συστημάτων φ.φ. Ανάλυση των δυναμικών και στατικών συστημάτων ιχνηλάτησης με στόχο την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό.	Κατοπτρικές περσίδες και στόρια, ράφια φωτισμού και ανακλαστικά ράφια φωτισμού, πρισματικά πανέλα, πανέλα κοπής λέιζερ.	[24]
Littlefair, P.J.	Περιγραφή διαθέσιμων συστημάτων μεταφοράς φ.φ. Άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και συστημάτων πυρήνα καθώς επίσης και των πλεονεκτημάτων τους. Με βάση την ανασκόπηση που γίνεται παρατίθενται σχεδιάστηκες οδηγίες.	Φωτο-σωλήνες, ράφια φωτισμού, ανακλαστικές περσίδες, πρισματικοί υαλοπίνακες.	[25]
Steemers, K.	Ερευνά αναφορικά με τον ρολό του φ.φ. Στην αρχιτεκτονική. Γίνεται αναφορά σε τρέχουσες τεχνολογίες και παρουσιάζονται εφαρμοσμένα παραδείγματα από εγκαταστάσεις.	Ράφια φωτισμού, πρισματικοί υαλοπίνακες, ολογραφικές επιστρώσεις.	[26]

<p>Ruck, N.; Aschehoug, Ø.; Aydinli, S.; Christoffersen, J; et al.</p>	<p>Βιβλίο στο οποίο παρουσιάζεται μια λεπτομερής ανασκόπηση των εξελιγμένων συστημάτων φ.φ., των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση τους και την επίδραση που έχουν στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου, καθώς επίσης και την επίδραση στον χρήστη. Οι πληροφορίες που παρέχονται αφορούν τα αρχικά στάδια σχεδιασμού του κτιρίου. Παρουσίαση διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων, πληροφορίες των εξαρτημάτων τους και κριτήρια επιλογής ανάλογα με τις απαιτήσεις των κτιρίων.</p>	<p>Συστήματα καθοδήγησης άμεσης/διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συστήματα διασπορέας η/και άμεσης Ηλιάκης ακτινοβολίας, συστήματα μεταφοράς Ηλιακής ακτινοβολίας.</p>	<p>[27]</p>
<p>Mayhoub, M. S.</p>	<p>Ανασκόπηση των αναπτυγμένων συστημάτων φ.φ. (εμπορικά συστήματα και πρωτότυπα πειραματικά) και ανάλυση των προκλήσεων κατά την εφαρμογή τους. Παρουσίαση των δυνατοτήτων και περιορισμών εφαρμογής των συστημάτων.</p>	<p>Εξελιγμένα συστήματα φ.φ., συστήματα συλλεκτών, συστήματα καθοδήγησης, συστήματα διάχυσης.</p>	<p>[28]</p>
<p>Konstantoglou, M.; Tsangrassoulis, A.</p>	<p>Ανασκόπηση των δυναμικών μεθόδων λειτουργίας των συστημάτων σκίασης και φ.φ. Με τις αντίστοιχες επιπτώσεις στο ενεργειακό ισοζύγιο των κτιρίων.</p>	<p>Στόρια, περσίδες, ράφια φωτισμού.</p>	<p>[29]</p>

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα φ.φ. μπορούν να χωριστούν σε δύο (2) κύριες ευρείες ομάδες, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες ονομασίες για την ταξινόμηση και περαιτέρω υποδιαίρεση τους:

1. Συστήματα φ.φ., με σκίαση ( $DS_{w/Shade}$ ).
2. Συστήματα φ.φ., χωρίς σκίαση ( $DS_{w/oShade}$ ).

Υπάρχουν δύο (2) τύποι συστημάτων φ.φ. με σκίαση ( $DS_{w/Shade}$ ). Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι ο διαχωρισμός σε κατηγορίες ανάλογα με το τμήμα του φ.φ. που σχεδιάστηκαν να χρησιμοποιούν (άμεσο ή διάχυτο) και την κύρια αρχή λειτουργίας τους:

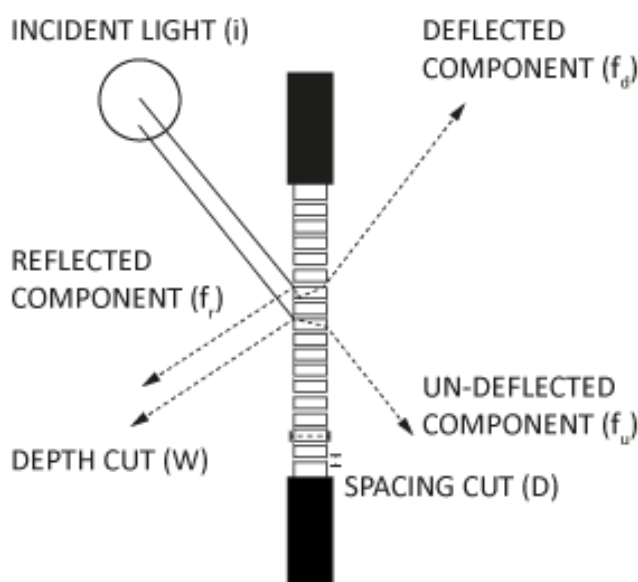
- α. Συστήματα που βασίζονται κυρίως στο διάχυτο φως και τον αποκλεισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.
- β. Συστήματα που χρησιμοποιούν κυρίως τον άμεσο φωτισμό (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), τον οποίο και ανακατευθύνουν στην οροφή ή σε θέσεις πάνω από το ύψος των ματιών.

Τα συστήματα φ.φ. με σκίαση ( $DS_{w/Shade}$ ), αντανακλούν/διαθλούν με σκοπό την κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων από το εξωτερικό προς το εσωτερικό, σε βάθη χώρων μικρότερα συνήθως από 10 – 15 m από την πρόσοψη ενός κτιρίου ενώ ταυτόχρονα παρέχουν και σε ένα βαθμό σκίαση. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για αυτό τον σκοπό [30, 35, 36], περιγράφεται στις παρακάτω παραγράφους. Τα προηγμένα συστήματα φ.φ. βελτιώνουν την κατανομή φωτισμού μέσα στον χώρο, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης και υπερθέρμανσης που μπορεί να παρουσιαστεί σε περιοχές κοντά στο παράθυρο.

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στους εσωτερικούς χώρους, δίπλα στα παράθυρα, μπορεί να ανακατευθυνθεί συνήθως προς στην οροφή γεγονός που προκαλεί και μια αλλαγή στην κατανομή του φ.φ. Μερικά παραδείγματα συστημάτων φ.φ. με σκίαση ( $DS_{w/Shade}$ ) περιλαμβάνουν τα ράφια φωτισμού (light shelves) [30-33], τις ανακλαστικές περσίδες (light redirection louvers) [34, 35], light guiding shades [36-39], και τα ανειδωλικές οροφές (anidolic ceiling) [40-42].

Αρκετές συσκευές εμπίπτουν σε πολλές κατηγορίες, επειδή εκτελούν περισσότερες από μία λειτουργίες. Τα ράφια φωτισμού (light shelves) και τα διαμορφωμένα με κοπές λέιζερ διαφανή πανέλα (laser cut panels, LCP) εξυπηρετούν ένα διπλό σκοπό, δηλ. σκίαση και ανακατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων. Επίσης, υπάρχουν συστήματα που δεν προορίζονται αποκλειστικά για χρήση σε ανοίγματα παραθύρων, όπως τα ανειδωλικά οριζόντια ανοίγματα (anidolic zenithal openings), για παράδειγμα, τα οποία προορίζονται στο να φέρουν διάχυτο φως σε ένα δωμάτιο διαμέσου της ψευδοροφής [43, 44].

Έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ανειδωλικών προσόψεων (anidolic facades) για κτίρια, με βάση τις αρχές της ανειδωλικής απεικόνισης (non-imaging optics), που συλλέγουν και μεταφέρουν το φως βαθύτερα σε κάποιο χώρο με τρόπο που δεν είναι εφικτός από τα συμβατικά παράθυρα [45-48].



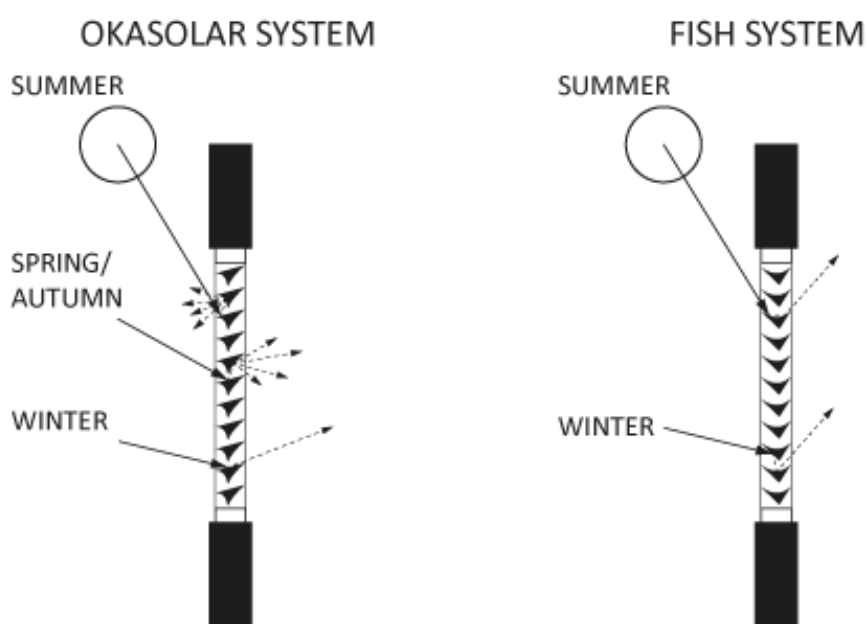
**Εικόνα 12:** Μηχανισμός λειτουργίας Laser Cut Panels (LCP).

Το LCP (laser cut panel) είναι ένα σύστημα φ.φ. που αποτελείται από ένα ακρυλικό φύλλο (PMMA) στο οποίο έχουν δημιουργηθεί τομές με laser. Χρησιμοποιείται για την ανακατεύθυνση προς την οροφή, της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κατακόρυφα ανοίγματα ιδίως όταν το ύψος του ήλιου είναι αυξημένο. Στην Εικόνα 12, φαίνεται πώς λειτουργεί ένα σύστημα LCP και οι τρεις (3) τύποι ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνουν χώρα:

- α. Το αντανακλώμενο τμήμα (Deflected components,  $f_d$ ),
- β. Το μη-αντανακλώμενο τμήμα (Un-deflected components,  $f_u$ ) και
- γ. το ανακλώμενο τμήμα (Reflected-off components,  $f_r$ ).

Τα κλάσματα αυτών των συνιστωσών εξαρτώνται από τον λόγο ( $D/W$ ), όπου ( $D$ ) είναι το βάθος κοπής και ( $W$ ) η απόσταση του διάκενου μεταξύ των κοπών και της προσπίπτουσας γωνίας της ηλιακής ακτινοβολίας [50].

Οι Greenup και Edmonds [51] ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για την προσομοίωση του LCP μέσω του λογισμικού Radiance. Ο αλγόριθμος συνέβαλε στη μελέτη και δοκιμή περισσότερων μεταβλητών σχετικών με τα συγκεκριμένα συστήματα. Το LCP (laser cut panel) μπορεί να τοποθετηθεί από μόνο του, αντικαθιστώντας τον υαλοπίνακα ή ως δευτερεύων εσωτερικός υαλοπίνακας στο πάνω μέρος ενός παραθύρου για να εκτελέσει την ίδια λειτουργία με ένα ράφι φωτισμού. Υπάρχει μια ποικιλία εφαρμογών για την συγκεκριμένη τεχνολογία όπως π.χ. η τοποθέτησή τους σε πυραμιδοειδείς φωταγωγούς με σκοπό να μειώνουν τα ηλιακά κέρδη, όταν ο ήλιος βρίσκεται σχετικά ψηλά στον ουρανό [51].



**Εικόνα 13:** Σκαρίφημα τομής των συστημάτων Okasolar και Fish ανακλαστικών περσίδων.

Οι Βενετικές περσίδες (Venetian blinds) είναι συμβατικά συστήματα σκίασης, οι οποίες τοποθετούνται στα παράθυρα για την μείωση των ηλιακών κερδών και της θάμβωσης [52-

54]. Οι περσίδες με μεταβλητή κλίση έχει διαπιστωθεί ότι μπορούν σε κάποιο βαθμό να ανακατευθύνουν τον ηλιακό φωτισμό (ανάλογα με την γωνία κλίσης τους καθώς και την ανακλαστικότητα τους).

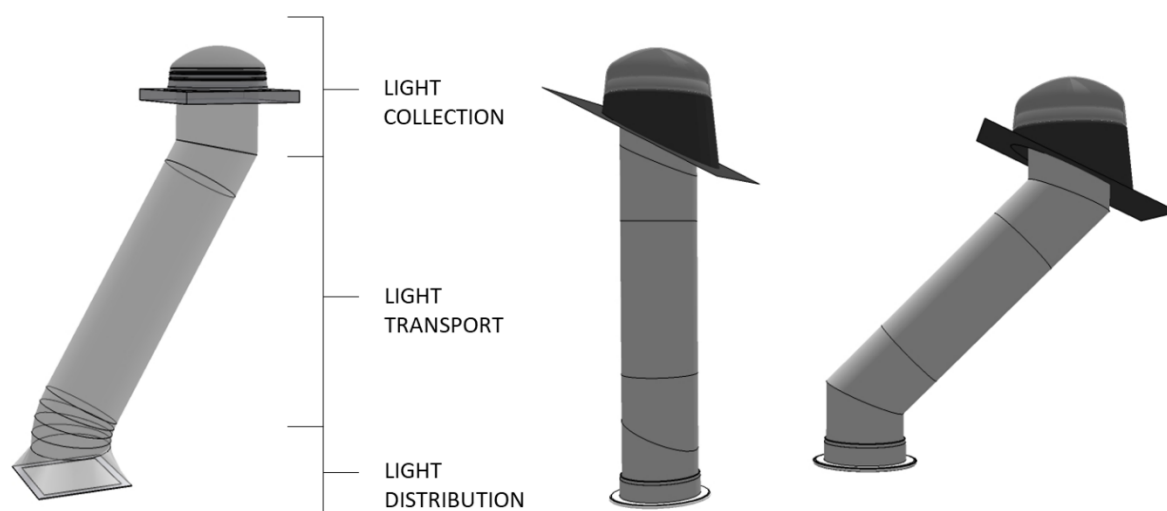
Συνήθως κατασκευάζονται από μια σειρά οριζόντιων, κατακόρυφων ή λοξών καμπύλων ελασμάτων που μπορούν να τοποθετηθούν εσωτερικά, εξωτερικά ή ανάμεσα σε υαλοπίνακες με διπλά τζάμια. Επί του παρόντος, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από μη συμβατικά συστήματα περσίδων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 13. Τα συστήματα Fish και Okasolar [55, 56] είναι συστήματα αποτελούμενα από οριζόντιες περσίδες με μεγάλη ανακλαστικότητα, που τοποθετούνται στο διάκενο διπλών υαλοπινάκων, με στόχο τον σκιασμό ενός χώρου και την ανακατανομή του φωτισμού ανάλογα με το ύψος του ήλιου. Να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι υαλοπίνακες προηγμένων ιδιοτήτων όπως, όπως οι υαλοπίνακες διάχυσης φωτισμού (light diffusing glass), οι υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων, οι θερμοχρωμικοί και ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να μεταβάλλουν την διαπερατότητα τους και συνεπώς επηρεάζουν την κατανομή του φυσικού φωτισμού [57-65].

Τα συστήματα φ.φ. χωρίς σκίαση ( $DS_{w/oShade}$ ) σχεδιάζονται κυρίως για να ανακατευθύνουν το φως της ημέρας σε περιοχές μακριά από τα ανοίγματα των παραθύρων, όπου η πρόσβαση του φ.φ. είναι περιορισμένη. Υπάρχουν πιο πολύπλοκες συσκευές, οι οποίες μπορούν να συλλέγουν, να μεταφέρουν και να διανέμουν το άμεσο φως στις εσωτερικές, απομακρυσμένες περιοχές (πυρήνα) ενός κτιρίου, όπου ο φ.φ. δεν μπορεί να φτάσει και ανάλογα με τον σχεδιασμό τους μπορούν να εμποδίσουν ή όχι το άμεσο ηλιακό φως. Τα συστήματα φ.φ. χωρίς σκίαση ( $DS_{w/oShade}$ ) μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο (2) κύριες κατηγορίες:

- α. Τα συστήματα καθοδήγησης φωτισμού (Light-Guiding Systems, LGS). Μπορεί να διαχειρίζονται τον άμεσο ή/και τον διάχυτο φωτισμό και έχουν σχεδιαστεί για να ανακατευθύνουν κυρίως το φως από τον ουράνιο θόλο ή το ηλιακό φως στο εσωτερικό του δωματίου με περιορισμό των συνθηκών δημιουργίας θάμβωσης.
- β. Συστήματα μεταφοράς φωτισμού (Light-Transport Systems, LTS). Συστήματα που συλλέγουν και μεταφέρουν το ηλιακό φως σε μεγάλες αποστάσεις στον πυρήνα ενός κτιρίου μέσω οπτικών ινών ή φωτο-σωλήνων.

Η βασική λειτουργία αυτών των συστημάτων πραγματοποιείται με χρήση των εξής συστημάτων:

1. Σωλήνες μεταφοράς φωτισμού (light transfer tubes) [66],
2. Ανειδωλικά (anidolic) [41, 46],
3. Καθοδηγητικά συστήματα φωτισμού (optical or guiding lighting systems) [8, 67-69],
4. Στατικά ή με ηλιοστατικές διαμορφώσεις ιχνηλάτησης του ήλιου [70-73] για την ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτισμού.



**Εικόνα 14:** Εικονογράφηση του φωτο-σωλήνα (Light Pipes) με τα κύρια μέρη του.

Οι φωτο-σωλήνες εγκαθίστανται εκεί όπου δεν υπάρχουν παράθυρα ή μακριά από αυτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Ένα μειονέκτημα των φωτο-σωλήνων είναι η μικρή τους απόδοση κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών λόγω του χαμηλού ύψους του ηλίου (λόγω μεγαλύτερου αριθμού ανακλάσεων). Συνήθως για την βελτίωση της απόδοσης χρησιμοποιείται ένας συλλέκτης ή κάποια πρισματική επιφάνεια για την αλλαγή της κατεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των πρισματικής διατομής των φωταγωγών (prismatic tubular guides), διεξήχθη από τον Whitehead [74]. Το βασικό συμπέρασμα αυτής της έρευνας ήταν ότι οι φωτο-σωλήνες δεν ήταν πρακτικοί ως συσκευές μεταφοράς φ.φ. χωρίς την χρήση ενός συστήματος συγκέντρωσης την ηλιακής ακτινοβολίας στην είσοδο του συστήματος, κάτι το οποίο διαπιστώθηκε ότι ήταν απαγορευτικά δαπανηρό.

Ένα παράδειγμα μεταφοράς φωτισμού είναι η συσκευή "Heliohub", η οποία χρησιμοποιεί έναν κοίλο οδηγό φωτισμού όπως οι φωτο-σωλήνες [75]. Ο συλλέκτης λειτουργεί σαν ηλιοστάτης, στέλνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στον ανακλαστικό αγωγό που βρίσκεται κάτω από αυτόν. Σε αυτό το τμήμα υπήρχαν τοποθετημένοι διαχύτες (emitters) που επέτρεπαν το φως να εξέλθει σε διάφορα ύψη μέσα στο κτίριο, ακολουθούμενο από ένα διαχύτη στο τέλος του αγωγού. Το σύστημα είχε επίσης τρεις (3) αποδοτικούς ηλεκτρικούς λαμπτήρες για να λειτουργήσουν στην περίπτωση που ο εξωτερικός φωτισμός δεν ήταν επαρκής. Μετρήσεις που έγιναν κατά την λειτουργία του συστήματος στο κτίριο έδειξε ότι χωρίς ηλεκτρικούς λαμπτήρες το σύστημα τα επίπεδα φωτισμού κατά 1.5 έως 3 φορές και συνολικά η κατανάλωση ενέργειας υπολογίστηκε 3 έως 4 φορές χαμηλότερη από μια τυπική ηλεκτρική εγκατάσταση, μειώνοντας την εγκατεστημένη ισχύ του φωτισμού κατά το ήμισυ.

Ένας άλλος τομέας μεταφοράς φωτός είναι η συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας και μεταφορά του μέσω οπτικών ινών (solar fiber optic concentration), μια ιδέα που υπήρχε από παλιά [76-83]. Τα συστήματα φωτισμού οπτικών ινών (Fiber optics daylighting systems) παρέχουν έναν τρόπο να μεταφέρουν το φυσικό φως σε μεγάλες αποστάσεις βαθιά στο εσωτερικό των χώρων κατοικιών ή εμπορικών κτιρίων. Αποτελούνται από ένα σύστημα ιχνηλάτησης του ήλιου, φακούς και τις οπτικές ίνες. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων φωτισμού οπτικών ινών περιλαμβάνουν ευελιξία στην εγκατάσταση, υψηλή απόδοση και μεγάλη απόσταση μετάδοσης του φυσικού φωτισμού. Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα στην ανάπτυξη και δοκιμή συστημάτων οπτικών ινών, η οποία καλύπτει μεθόδους συγκέντρωσης [84-87] και ιχνηλάτησης της ηλιακής ακτινοβολίας [88-90]. Οι δυο (2) πιο γνωστές εταιρείες που προσφέρουν εμπορικά διαθέσιμα συστήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η σουηδική εταιρία PARANS Solar Lighting AB (και η αμερικανική εταιρεία διανομής HUVCO Daylighting Solutions) [91] και το ηλιακό σύστημα φωτισμού HIMAWARI Solar Lighting System της La Foret Engineering Company, Ltd. στο Τόκιο της Ιαπωνίας [92].

Στο σύστημα PARANS [91], υπάρχει ένα εξωτερικό πάνελ (περίπου 1 m<sup>2</sup>) που συνήθως τοποθετείται στην ταράτσα του κτιρίου (και ονομάζεται SP4), ο οποίος είναι εξοπλισμένος με χωριστούς φακούς Fresnel που παρακολουθούν ενεργά τον ήλιο καθώς μετακινείται στον ουρανό και ελέγχεται από φωτοαισθητήρες και ένα μικροεπεξεργαστή. Κάθε ένας από τους φακούς συγκεντρώνει το ηλιακό φως σε μια πολύ μικρή οπτική ίνα. Οι δέσμες αυτών των



οπτικών ινών συσσωματώνονται σε καλώδια (τέσσερα (4) για κάθε SP4) που έχουν διάμετρο περίπου 6 mm. Αυτά τα καλώδια μπορούν να κινούνται μέχρι περίπου 100 m για να φέρουν το φυσικό φως στους εσωτερικούς χώρους. Στους χώρους όπου πρέπει να παραδοθεί το φως, διατίθενται διάφορα φωτιστικά. Αυτά περιλαμβάνουν προβολείς, συμβατικά φωτιστικά οροφής και μερικά υβριδικά εξαρτήματα που μπορούν να λειτουργήσουν τόσο με φ.φ. όσο και με φωτισμό φθορισμού υψηλής απόδοσης. Ορισμένα εξαρτήματα εξυπηρετούνται από ένα (1) οπτικό καλώδιο, άλλα με δύο (2) ή τέσσερα (4). Το κόστος του συστήματος PARANS ξεκινά από περίπου 10.000\$ για ένα (1) SP4, τέσσερα (4) καλώδια οπτικών ινών και τέσσερα (4) φωτιστικά, χωρίς να υπολογίζεται το κόστος εγκατάστασης.

Το ηλιακό φωτιστικό σύστημα HIMAWARI [92] (το όνομά του από την ιαπωνική λέξη για ηλιοτρόπιο) είναι ένα παρόμοιο σύστημα οπτικών ινών, αλλά μεγαλύτερο σε σύγκριση με το σύστημα PARANS. Το σύστημα HIMAWARI χρησιμοποιεί εξαγωνικού σχήματος φακούς Fresnel σε διάταξη κυψέλης (hexagon-shaped honeycomb-patterned Fresnel lenses), για να ιχνηλατήσει το ηλιακό φως και να το διανέμει μέσα στο κτίριο. Οι μεγάλες εγκαταστάσεις μπορεί να κοστίζουν πάνω από 100.000\$.

Η ιδέα και η ύπαρξη ηλιοστατών είναι πολύ παλιά. Από την αποκρυπτογράφηση της αιγυπτιακής ιερογλυφικής γραφής της Rosetta Stone που ανακαλύφτηκε το 1799 διαπιστώθηκε ότι οι αρχαίοι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν χειροκίνητους απλούς καθρέφτες για την μεταφορά φ.φ. στο εσωτερικό των πυραμίδων. Μία άλλη αναφορά χρήσης ανακλαστών προέρχεται από τον Έλληνα επιστήμονα Αρχιμήδη, που έζησε στην πόλη των Συρακουσών, μια αρχαία ελληνική αποικία που βρίσκεται στην ακτή της Σικελίας. Περίπου το 215 π.Χ., οι Συρακούσες δέχθηκαν επίθεση από τους Ρωμαίους. Λέγεται ότι ο Αρχιμήδης βοήθησε για την υπεράσπισή της πόλης οργανώνοντας τους ανθρώπους να κατέχουν μεγάλο αριθμό καθρεφτών, χρησιμοποιώντας τους για να εστιάσουν το φως του ήλιου στα ρωμαϊκά πλοία, κάτι σαν ένα πεδίο ηλιοστατών που εστιάζει το φως του ήλιου σε ένα σύγχρονο ηλιακό θερμοηλεκτρικό σταθμό. Τα πλοία πυρπολήθηκαν από τη συγκεντρωμένη ηλιακή θερμότητα, αλλά σύγχρονες δοκιμές αυτής της ιδέας έχουν αμφισβητήσει την συγκεκριμένη εκδοχή. Τα πλοία θα έπρεπε να παραμείνουν ακίνητα κοντά στους καθρέφτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν αναφλεγούν. Επίσης, η ευθυγράμμιση όλων των καθρεφτών με ακρίβεια κατά την διάρκεια της μάχης θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Εάν υπάρχει κάποια

αλήθεια πίσω από την ιστορία, είναι πιο πιθανό ότι το φως από τους καθρέφτες χρησίμευσε για να θαμπώσει τους Ρωμαίους, μειώνοντας την ικανότητά τους να πολεμήσουν.

# PERFECT DAYLIGHT! WHY BURN GAS?

## CHAPPUIS' PATENT REFLECTORS

IMPROVE NATURAL DAYLIGHT & SUPERSEDE GAS.  
ESTABLISHED 1851



OFFICE LIGHTED WITH GAS IN DAY-TIME.



OFFICE LIGHTED BY CHAPPUIS' REFLECTORS.

## CHAPPUIS' PATENTS FOR REFLECTING LIGHT,

Adopted by Her Majesty's Commissioners of Works, the Government Offices, the Houses of Parliament, The Admiralty, War Office, Royal Engineers, Board of Works, and many Architects, Contractors, Bankers, Manufacturers, and also on board Ships and in Hotels, Private Houses, &c.

104/22108  
Science & Society  
Viewed by Guest on 9/15/2018

**Εικόνα 15:** Δυο (2) γκραβούρες που δείχνουν εάν γραφείο που φωτίζεται από φωταέριο σε σύγκριση με εάν γραφείο που χρησιμοποιεί τον φυσικό φωτισμό με τους ανακλαστήρες ευρεσιτεχνίας του Chappuis, οι οποίοι "βελτιώνουν τον φυσικό φωτισμό και αντικαθιστούν το φωταέριο". Πηγή: science museum/science & society picture library.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένας ηλιοστάτης είναι μια συσκευή που περιέχει έναν κινούμενο συλλέκτη, που χρησιμοποιείται για να αντικατοπτρίζει το ηλιακό φως σε σταθερή κατεύθυνση διατηρώντας το ανακλώμενο ηλιακό είδωλο σταθερό καθόλη τη διάρκεια της ημέρας [93]. Στις αρχές του 1800, όλοι οι ηλιοστάτες ήταν εργαστηριακά όργανα που χρησίμευαν για οπτικά πειράματα, όπως εκείνοι που κατασκευάστηκαν από τον Silbermann [94]. Οι πρώτοι ορισμοί των ηλιοστατών εκείνης της περιόδου, τους περιγράφουν ως

επιστημονικά όργανα με καθρέφτες που κινούνται με μηχανισμούς από ρολόγια για να αντικατοπτρίζουν το φως του ήλιου σε σταθερούς στόχους. Τα πρώτα εμπορικά συστήματα ανακλαστήρων κατοχυρώθηκαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και διατέθηκαν στο εμπόριο στη δεκαετία του 1850 από τον Paul Emile Charppuis στο Λονδίνο, χρησιμοποιώντας διάφορες μορφές καθρεπτών υπο κλίση, τα οποία κατασκευάζονταν μέχρι το 1953 [95]. Η εικόνα 15 παρουσιάζει μια διαφημιστική αφίσα για τους ανακλαστήρες ευρεσιτεχνίας του Charppuis εκείνης της εποχής.

Οι ηλιοστάτες αποτελούνται από:

- α. Έναν κύριο συλλέκτη (primary reflector) που ανακατευθύνει το ηλιακό φως σε σταθερό στόχο (πχ. Στο εσωτερικό ενός κτιρίου στο ταβάνι) ή,
- β. έναν συνδυασμό κύριου συλλέκτη που ιχνηλατεί τον ήλιο με κάποιο τρόπο και ενός σταθερού δευτερεύοντος συλλέκτη που αντανακλά το φως του ήλιου στο κτίριο.

Για να γίνει αυτό, η ανακλαστική επιφάνεια (αποτελούμενη από ένα (1) ή περισσότερα τεμάχια συλλεκτών) διατηρείται κάθετα προς την διχοτόμο της γωνίας μεταξύ της κατεύθυνσης του ήλιου και του στόχου όπως φαίνεται από την επιφάνεια του συλλέκτη. Καθώς ο ήλιος κινείται στον ουρανό, ένας ηλιοστάτης κάνει μικρές προσαρμογές στη θέση του συλλέκτη του για να κρατήσει το ανακλώμενο φως σταθερό σε έναν στόχο. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συλλέκτης που τοποθετείται στον ηλιοστάτη, τόσο περισσότερη ενέργεια και φως παρέχεται στον στόχο. Σε σύγκριση με τα συστήματα φωτο-σωλήνων και τα συστήματα οπτικών ινών, το φως του ήλιου σε ένα σύστημα ηλιοστάτη ταξιδεύει κατευθείαν στον αέρα, με συνέπεια την αύξηση της αποδοτικότητας σε σχέση με την περίπτωση που το φως διαδίδεται μέσω διαφορετικού μέσου.

Μερικά παραδείγματα γενικών εφαρμογών των ηλιοστατών περιλαμβάνουν:

- Κατοικίες, γραφεία και άλλα κτίρια.
- Παροχή άμεσου ηλιακού φωτισμού σε σκιασμένους χώρους.
- Θερμική διαδικασία (παραγωγή ατμού) για βιομηχανικές εφαρμογές.
- Βελτίωση της διαδικασίας εξόρυξης πετρελαίου.

- Μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία των καλλιεργειών (π.χ. στέγνωμα θαλασσινών).
- Παραγωγή ηλεκτρισμού σε εφαρμογές πύργων ισχύος.
- Κατασκευή ηλιακών φούρνων/καμίνια.

Οι ηλιοστάτες χρησιμοποιούνται συχνότερα σε εγκαταστάσεις συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας (Concentrated Solar Power, CSP) [96]. Οι συγκεντρωτικές τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν διαφορετικές διαμορφώσεις ηλιοστάτη για να συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια σε ένα απορροφητικό υλικό και να την μετατρέπουν σε θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ατμού και να οδηγήσει μια τουρμπίνα για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια ή να χρησιμοποιηθεί ως θερμότητα βιομηχανικής διαδικασίας (industrial process heat). Ένα παράδειγμα μιας μονάδας CSP είναι το ηλιακό εργοστάσιο ηλιακής ενέργειας SolarReserve Crescent Dunes στη Νεβάδα των Η.Π.Α. [97], η οποία είναι η πρώτη εγκατάσταση κλίμακας χρησιμότητας (utility-scale) στον κόσμο που διαθέτει προηγμένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας τετηγμένου άλατος [98]. Ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 110 MW παρέχει ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία 75.000 κατοικιών την ημέρα ή τη νύχτα, ανεξάρτητα από το αν ο ήλιος λάμπει, συν 1100 MWh αποθήκευσης ενέργειας.

Τα συστήματα ηλιοστατών μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν είτε για θέρμανση ενός χώρου εντός του κτιρίου, είτε για θέρμανση μίας εστίας στην περίπτωση του ηλιακού φούρνου [99, 100]. Οι καθρέφτες Scheffler είναι οι ηλιοστάτες που χρησιμοποιούνται συνήθως για να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα μαγειρικό σκεύος [101]. Οι ηλιοστάτες χρησιμοποιούνται επίσης για την παροχή φυσικού φωτισμού, αντανακλώντας το φως του ήλιου, σε περιοχές που κανονικά δε λαμβάνουν ήλιο. Ένα παράδειγμα φωτισμού εξωτερικού χώρου είναι το Teardrop Park, το οποίο βρίσκεται στο Battery Park City στη Νέα Υόρκη, το οποίο είναι ένα πάρκο που περιβάλλεται από ψηλά κτίρια που εμποδίζουν το φως του ήλιου [102]. Τρεις (3) στρογγυλοί ηλιοστάτες (διαμέτρου 2.4 m) τοποθετημένοι στην οροφή ενός κοντινού κτιρίου που αναπροσανατολίζουν το ηλιακό φως προς το πάρκο για να παρέχουν στα δέντρα και τα φυτά το απαιτούμενο φως του ήλιου για να επιβιώσουν.

Μια άλλη εφαρμογή αλλά αυτή τη φορά για φωτισμό εσωτερικών χώρων είναι το Haus der Forschung (Ινστιτούτο έρευνας στη Βιέννη) με την εγκατάσταση 0 – 24 Licht [103]. Ένας ηλιοστάτης εγκατεστημένος στην οροφή του Haus der Forschung συλλέγει το φυσικό φως και το μεταδίδει, μέσω ενός συστήματος, πάνω από την είσοδο του κτιρίου, με το οποίο το φως τροφοδοτείται σε καλώδια οπτικών ινών που φέρνουν το φως του ήλιου στο εσωτερικό του κτιρίου.

Η χρήση των ηλιοστατών για μεταφορά φ.φ. στο εσωτερικό των χώρων έχει μελετηθεί εκτεταμένα [104-112]. Οι ηλιοστάτες για εφαρμογές φυσικού φωτισμού είναι συνήθως μικρότεροι από τις ηλιοστατικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε κεντρικούς ηλιακούς σταθμούς, με επιφάνειες που κυμαίνονται από μερικά τετραγωνικά εκατοστά ( $\text{cm}^2$ ) έως  $< 10 \text{ m}^2$ . Επιπλέον, στις κτιριακές εφαρμογές, οι αποστάσεις που διανύονται από τις ανακλώμενες ακτίνες είναι μικρότερες σε σχέση με εκείνες στις ηλιακές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και επιτρέπουν υψηλότερες ανοχές στα σφάλματα κατεύθυνσης των ανακλώμενων ακτίνων.

Η ηλιακή ιχνηλάτηση είναι μια από τις βασικές τεχνολογίες για τα ηλιακά συγκεντρωτικά θερμικά συστήματα (solar thermal concentrating systems) τους ηλιακούς κλίβανους (solar furnaces), τα κεντρικά συστήματα συστοιχίας ηλιοστατών (central receiver-heliostat array systems), τους παραβολικούς συλλέκτες (parabolic troughs) και τα συστήματα μεταφοράς φ.φ. Για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, η ανακλώμενη γωνία πρέπει να ελέγχεται με ένα ορισμένο βαθμό ακρίβειας και να συγχρονίζεται με την κίνηση του ήλιου. Το σφάλμα παρακολούθησης των ηλιοστατικών συστημάτων για αυτές τις τεχνολογίες είναι συνήθως της τάξης του 1 mrad, το οποίο είναι αξιοσημείωτα χαμηλότερο από την τιμή της φαινομενικής διαμέτρου του ήλιου 9.3 mrad [104]. Αυτή η τιμή σφάλματος (1 mrad) είναι ασήμαντη στις αστικές εφαρμογές, καθώς συνεπάγεται η ανακλώμενη γωνία να έχει απόκλιση μερικών εκατοστών σε σχέση με έναν στόχο που βρίσκεται σε απόσταση 100 m.

Οι Torres-Roldan et al. [104] παρουσίασαν ένα ηλιοστατικό σύστημα κατάλληλο για μικρές εφαρμογές στα κτίρια. Με βάση έναν πολικό ηλιοστάτη ο οποίος ανακατευθύνει τις ακτίνες του ήλιου παράλληλα με τον πολικό άξονα της Γης, οι ηλιακές ακτίνες κατευθύνονταν προς

το επιθυμητό σημείο μέσω ενός σταθερού δευτερεύοντος κατόπτρου. Ο πολικός ηλιοστάτης αποτελείται από ένα πολύγωνο που παραμορφώθηκε λόγω της περιστροφικής κίνησης του άξονα του συστήματος παράλληλα προς τον άξονα της Γης. Η συσκευή χρειάζεται μόνο μία περιστροφή για την τοποθέτησή της, τόσο για την γωνία ύψους όσο και για την γωνία αζιμούθιου του επιπέδου του κύριου συλλέκτη, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα από έναν ελεγκτή (controller). Το βασικό πλεονέκτημα που είχε λόγω του μηχανισμού του, ήταν η δυνατότητα πολλαπλής σύνδεσης διαφορετικών ηλιοστατών, οι οποίοι μπορούν να περιστρέφονται από έναν μόνο κινητήρα. Ωστόσο, από την διεξαγωγή πειραμάτων της προτεινόμενης συσκευής, οι συγγραφείς δήλωσαν ότι η απλότητα του μηχανισμού οδηγεί στην ύπαρξη ορισμένων συστηματικών σφαλμάτων, επειδή η κίνηση του συλλέκτη δεν ήταν συνεχής αλλά διακριτή ανάλογα με το βήμα του σπειρώματος του άξονα του συστήματος γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ο συλλέκτης του ηλιοστάτη. Από την μελέτη των σφαλμάτων που πραγματοποιήθηκε αποδείχτηκε η δυνατότητα λήψης μέσω των τιμών σφαλμάτων κατά προσέγγιση χιλιοστών ακτινίων, προκαλώντας σφάλματα κάτω από 9 mrad (φαινόμενη διάμετρος του ήλιου), η οποία είναι συνεπώς αποδεκτή, ιδιαίτερα για αστικές εφαρμογές.

Οι Oh et al. [105] εξέτασαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος φ.φ. τύπου coelostat για την βελτίωση της οπτικής άνεσης ενός ανοικτού τύπου γραφείου (open-plan office). Το σύστημα φ.φ. τύπου coelostat αποτελείται από ένα κινούμενο κάτοπτρο (διάμετρο 0.91 m), ικανό να ιχνηλατήσει τον ήλιο και ένα σταθερό δευτερεύον κάτοπτρο (διάμετρο 0.76 m), οι οποίοι, ενεργώντας από κοινού, δημιουργούν μία κυκλική δέσμη ηλιακού φωτός που ταξιδεύει προς τα κάτω μέσω ενός ηλιακού φρεατίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα συστήματα φ.φ. coelostat σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα χαρακτηριστικά του κτιρίου θα μπορούσαν να βελτιώσουν όχι μόνο το οπτικό περιβάλλον αλλά και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε μια καλύτερη αναλογία ομοιομορφίας φωτισμού καθόλη τη διάρκεια του έτους. Οι Pohl και Anselm [106] ανέπτυξαν μια τεχνολογία ηλιοστάτη αποτελούμενη από τρία συστήματα:

- α. Έναν κινητό συλλέκτη που ιχνηλατεί τον ήλιο (ηλιοστάτης),
- β. Ένα συμπληρωματικό σύστημα τεχνητού φωτισμού που αντικαθιστά την παρουσία του ήλιου όταν αυτός δεν υπάρχει (ηλιακός προσομοιωτής) και

γ. Ένα σύστημα που μεταφέρει και διανέμει το φως του ήλιου μέσα στο κτίριο (διανομέας).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μετρήσεις της πειραματικής διάταξης έδειξαν ότι τα επίπεδα φωτισμού σε ένα δωμάτιο χωρίς παράθυρα (μήκος 7.8 m, πλάτος 4.5 m, ύψος 2.4 m) κυμαίνονταν από 100 – 1200 lx, τα οποία επέτρεψαν εξοικονόμηση ενέργειας κατά 40 – 60% σε σύγκριση με ένα συμβατικό ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού.

Οι Rosemann et al. [107] εξέτασαν ένα σύστημα μεταφοράς φ.φ. το οποίο αποτελούταν από έναν ηλιοστάτη σε συνδυασμό με φωτο-σωλήνες. Ο ηλιοστάτης αποτελούταν από ένα καθρέπτη 6.25 m<sup>2</sup> ο οποίος μπορούσε να παρακολουθήσει τον ήλιο ακολουθώντας τη γωνία αζιμουθίου. Ένα οπτικό σύστημα που αποτελείται από φακούς Fresnel και ειδικά σχεδιασμένους ανακλαστήρες χρησιμοποιήθηκε για να συγκεντρώσει το άμεσο φως που προέρχεται από διαφορετικές γωνίες αζιμουθίου και καθοδηγεί το φως μέσα στο σύστημα φωτο-σωλήνων. Το φως αυτό ανακλάται προς τα κάτω από τον δευτερεύοντα συλλέκτη. Το σύστημα εγκαταστάθηκε στο κλιμακοστάσιο (12 m ύψος) του κτιρίου Semperlux στο Βερολίνο το οποίο δεν διαθέτει καθόλου παράθυρα. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φωτισμού για τρεις (3) διαφορετικές καταστάσεις: α. ηλιόλουστη μέρα, β. μερικώς συννεφιασμένη μέρα και γ. μέρα με πλήρως συννεφιασμένο ουρανό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την ηλιόλουστη μέρα, η τεχνητή πηγή φωτισμού παρέμεινε απενεργοποιημένη για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας καθώς το σύστημα ήταν σε θέση να παρέχει στο χώρο επίπεδα φωτισμού πάντα υψηλότερα από 100 lx, που ήταν η απαίτηση. Για την μερικώς συννεφιασμένη μέρα, το σύστημα τεχνητού φωτισμού λειτουργούσε συμπληρωματικά για την κάλυψη των απαιτούμενων επιπέδων όταν το σύστημα δεν μπορούσε, ενώ για την κατάσταση με τον συννεφιασμένο ουρανό, τα φώτα παρέμειναν ανάμεσα καθόλη τη διάρκεια της ημέρας.

Οι Kim et al. [108] ανέπτυξαν ένα σύστημα ηλιοστάτη αποτελούμενο από δύο (2) καθρέφτες, τοποθετημένους στην οροφή ενός κτιρίου τεσσάρων (4) ορόφων στη Νότια Κορέα. Η κύρια ανακλαστική επιφάνεια προοριζόταν για την ιχνηλάτηση και συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και σχεδιάστηκε ως κυκλικό αλουμινένιο γυαλί με διάμετρο 0.75 m. Η δευτερεύουσα ανακλαστική επιφάνεια κατασκευάστηκε για να δέχεται το ηλιακό φως που

ανακλάται από τον πρώτο. Το σχήμα του καθρέφτη ήταν είτε επίπεδο είτε κοίλο και είχε τοποθετηθεί μπροστά από το άνοιγμα σε ένα δωμάτιο στον πρώτο όροφο του κτιρίου για να μεταφέρει το φως του ήλιου στο εσωτερικό του δωματίου. Ο καθρέφτης μπορούσε να περιστραφεί προς όλες τις διευθύνσεις ελευθέρα για να ελέγχει την κατεύθυνση του ηλιακού φωτός. Η απόσταση μετάδοσης ήταν περίπου 15 m. Οι πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν επιβεβαίωσαν ότι, σε σύγκριση με τα μη ηλιοστατικά συστήματα, υπάρχει μια σχετική βελτίωση στον εσωτερικό φωτισμό του χώρου και το αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εκπροσωπήθηκε από τον λόγο του ηλιακού φωτισμού (sunlight illumination ratio, SIR). Ο SIR είναι ο εσωτερικός φωτισμός σε μια οριζόντια επιφάνεια προς τον εξωτερικό φωτισμό σε μια οριζόντια επιφάνεια σε συνθήκες αίθριου ουρανού. Χωρίς το σύστημα εγκατεστημένο, ο SIR στο δωμάτιο κυμαινόταν από 0.20% έως 0.70% και ο μέσος φωτισμός κυμαινόταν από 226 lx έως 518 lx συναρτήσει του χρόνου. Με το σύστημα ηλιοστάτη, ο SIR κυμάνθηκε από 0.27% έως 0.81%, αύξηση κατά μέσο όρο 18%.

Οι Chong et al. [109] πρότειναν ένα νέο ενεργό σύστημα φ.φ. χρησιμοποιώντας έναν ανιδολικό ηλιακό συγκεντρωτή δύο σταδίων (two-stage non-imaging solar concentrator (2S – NISC)). Το πρωτότυπο 2S – NISC σύστημα αποτελείται από ογδόντα (80) πρωτογενή κάτοπτρα με διάσταση  $5 \times 5$  cm το καθένα και είκοσι (20) δευτερεύοντες ανακλαστήρες διαστάσεων  $8 \times 8$  cm το καθένα και πυκνά συσκευασμένες πλαστικές οπτικές ίνες που αποτελούν το σύστημα διανομής φ.φ. (daylight distribution system). Το πρωτότυπο ενεργό σύστημα φ.φ. με συνολική επιφάνεια  $0.2 \text{ m}^2$  ήταν ικανό να φωτίσει ομοιόμορφα μια επιφάνεια γραφείου  $7.8 \text{ m}^2$  με μέση τιμή της έντασης φωτισμού 500 lx. Μια οικονομική ανάλυση για μια βελτιστοποιημένη περιοχή του συστήματος 2S – NISC προτάθηκε στα  $4 \text{ m}^2$  με συνολικό εκτιμώμενο κόστος τα 1231.2 USD για να εξισορροπηθεί το κόστος του συστήματος ανίχνευσης ήλιου και της κατασκευής. Η συνολική περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε στα 6.1 έτη, κάτι που ήταν αρκετά λογικό, επειδή το ενεργό σύστημα φ.φ. μπορεί να έχει διάρκεια ζωής άνω των 15 ετών.

Αν και τα συστήματα ηλιοστατών για φ.φ. μπορούν να μεταφέρουν το φως σε μεγάλες αποστάσεις, δεν υπάρχουν πολλές αναφορές στην βιβλιογραφία αναφορικά με την απόδοσή τους. Οι Song et al. [110] ανέπτυξαν ένα σύστημα ηλιοστάτη μεγάλης κλίμακας το οποίο



αποτελείται από ένα κύριο συλλέκτη και έναν δευτερεύοντα για την μεταφορά φ.φ. σε ένα κτίριο. Ο μεγάλος κλίμακας ηλιοστάτης είχε έκταση 22.95 m<sup>2</sup> και εγκαταστάθηκε σε κτίριο ύψους 70 m για να ανακλά οριζόντια το ηλιακό φως στην επιφάνεια του δευτερεύοντος συλλέκτη. Ο δευτερεύων συλλέκτης ήταν ένας επίπεδος καθρέφτης, με γωνία 45<sup>ο</sup> από το οριζόντιο επίπεδο και μπορούσε να ανακλά το ηλιακό φως κατακόρυφα προς στο ισόγειο του κτιρίου. Η απόσταση μετάδοσης του φωτισμού ήταν πάνω από 70 m και το σύστημα μπορούσε να προσφέρει επίπεδα φ.φ. της τάξης των 20 – 80 klx κτά την διάρκεια της ημέρας, τιμές πολύ υψηλότερες από εκείνες των παραδοσιακών συστημάτων τεχνητού φωτισμού (περίπου 300 lx), όπως π.χ. τα LED. Στο ίδιο άρθρο οι μελετητές πρότειναν επίσης παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης του φωτισμού:

- α. Η ανακλαστικότητα των κατόπτρων,
- β. Η διαπερατότητα (transmittance) του γυαλιού,
- γ. Το ποσοστό της κάλυψης από μη ανακλαστικά στοιχεία του συστήματος και
- δ. Τον ρυθμό ηλιοφάνειας της επιφάνειας (Sunshine Area Rate, SAR) του ηλιοστάτη, που ορίζεται ως η αναλογία της περιοχής του συλλέκτη προς την συνολική επιφάνεια του ηλιοστάτη.

Από την ανάλυση κόστους που διεξήχθη φάνηκε ότι το σύστημα φ.φ. είχε ικανοποιητική απόδοση εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό. Για το σύστημα ηλιοστάτη που παρουσιάστηκε, η περίοδος απόσβεσης εκτιμήθηκε περίπου 3.9 – 4.9 χρόνια.

Τα συστήματα που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν πρωτότυπα συστήματα ηλιοστατών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Επί του παρόντος, διάφορα συστήματα ηλιοστατών είναι εμπορικά διαθέσιμα και έχουν κατασκευαστεί από διάφορες εταιρείες και κάθε σύστημα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά. Η EGIS [111] κατασκευάζει σύστημα ηλιοστάτη αποτελούμενο από έναν ηλιακό ιχνηλάτη και έναν συλλέκτη φωτισμού (επίπεδο καθρέφτη). Ο ηλιακός ιχνηλάτης περιέχει την εξωτερική μονάδα, ένα μοτέρ (ρότορα) διπλού-άξονα και την εσωτερική μονάδα, που περιέχει τον υπολογιστή. Διατίθεται σε μία ποικιλία μεγεθών του συλλέκτη που κυμαίνεται από 0.8 m<sup>2</sup> έως 5,5 m<sup>2</sup>, με επικάλυψη του επιπέδου

καθρέφτη με μία μεταλλική επίστρωση ή με πολυστρωματικό κάτοπτρο αλουμινίου πάχους 3 mm. Ο συλλέκτης μεταλλικού γυαλιού είναι βαρύτερος, αλλά είναι ιδιαίτερα χαμηλές οι απαιτήσεις για συντήρηση. Παρέχει απόδοση απόκρισης περίπου 85% σε πολύ χαμηλή κυματισμό.

Όσον αφορά το κάτοπτρο αλουμινίου, λόγω της μικρότερης ακαμψίας του υλικού (αλουμινίου), η προκύπτουσα υπολειπόμενη κυμάτωση είναι μεγαλύτερη κάτι το οποίο συνεπάγεται και μια ελαφρώς πιο διευρυμένη διασπορά του φωτισμού και αποτελεί έναν από τους λόγους που μειώνεται η απόδοση του ηλιοστάτη. Επίσης, στις μακροσκοπικές και μικροσκοπικές κλίμακες, μια κάπως τραχιά επίστρωση αντανάκλασης προκαλεί μια μικρή ευρεία διασπορά και σημαντική έκλυση. Αυτό το υλικό παρέχει απόδοση ανάκλασης 84%. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό ρολόι με ημερολόγια που εντοπίζει τη θέση του ήλιου σε πραγματικό χρόνο και ενεργοποιεί τους δύο κινητήρες κάθε 20 sec για να ενημερώσουν τη θέση τους. Το κόστος των σειρών αυτών των συσκευών, ανάλογα με το μέγεθος του συλλέκτη κυμαίνεται από 9260 έως 16550 USD χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι φόροι.

Ένα άλλο σύστημα που αναπτύχθηκε από την Bomin Solar στο Lorrach της Γερμανίας είναι το Lighttron [112]. Στον χώρο αναμονής του αεροδρομίου του Μάντσεστερ στην Αγγλία έχουν εγκατασταθεί τέσσερις (4) κρυστάλλινοι πολυέλαιοι 6 m ο κάθε ένας. Σε κάθε πολυέλαιο, υπάρχει ένας ηλιοστάτης εγκατεστημένος στην οροφή του κτιρίου του αεροδρομίου. Οι ηλιοστάτες μεταφέρουν το φως του ήλιου μέσα από ένα άνοιγμα στον γυάλινο τρούλο μέσω ενός σταθερού καθρέφτη τοποθετημένου υπό κλίση. Η συγκεντρωμένη δέσμη κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω στον κοίλο πολυέλαιο σε μια εσωτερική συστοιχία μικρών πρισμάτων και καθρεπτών (που ονομάζεται sparkle-tube), ο οποίος ενεργεί ως διαχύτης του εισερχόμενου ηλιακού φωτός προς τα πλάγια στα περιβάλλοντα γυάλινα στοιχεία. Οι ηλιοστάτες ελέγχονται από ένα εξειδικευμένο αλγόριθμο και το συνολικό κόστος του συστήματος ανήρθε σε 200000 USD.

Το σύστημα ηλιοστάτη που κατασκευάζεται από τη SOLENICA [113], το οποίο ονομάζεται CAIA, είναι ένας φορητός αυτό-τροφοδοτούμενος (solar powered) ηλιοστάτης με διάμετρο καθρέφτη 36 cm. Ο CAIA δεν απαιτεί εγκατάσταση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το

φωτισμό μιας περιοχής έως 50 m<sup>2</sup> σύμφωνα με τους κατασκευαστές. Δεν χρειάζεται εξωτερική πηγή ενέργειας ή επαναφόρτιση επειδή τροφοδοτείται από το ηλιακό φως που αντανακλά. Καθώς ο ήλιος κινείται στον ουρανό, ο μηχανισμός CAIA κάνει μικρό-ρυθμίσεις στη θέση καθρέφτη. Το κόστος της συσκευής είναι 300 USD.

Η εταιρεία LightManufacturing [114] έχει αναπτύξει έναν ηλιοστάτη, που ονομάζεται H1, με προηγμένους ανακλαστήρες μεμβράνης και ασύρματο δίκτυο. Μπορεί να συνδυάζει πολλαπλές συσκευές H1 για να αξιοποιήσει την ηλιακή ενέργεια. Ο H1 heliostat μπορεί να αποδώσει περισσότερα από 1000 Watts σε ένα δωμάτιο ή πάνω από 115000 Lm φωτισμού. Πολλαπλοί ηλιοστάτες αυτού του τύπου μπορούν να συνδυαστούν για να θερμάνουν ένα μόνο δωμάτιο γρηγορότερα ή διαφορετικούς χώρους ταυτόχρονα. Οι εφαρμογές του συστήματος περιλαμβάνουν σχολεία, κτίρια γραφείων, σπίτια, βιομηχανικούς χώρους, αγροτικά κτίρια και πολλές άλλες αρχιτεκτονικές χρήσεις. Οι διαστάσεις του συλλέκτη είναι 1.21 × 1.21 m, και το υλικό του είναι από αλουμίνιο (επιφάνεια 2.3 m<sup>2</sup>) με ανακλαστικότητα 85%. Ο ηλιοστάτης έχει έναν εσωτερικό μικροεπεξεργαστή και δεν απαιτείται εξωτερικός υπολογιστής για την λειτουργία του, αλλά χρειάζεται ένας κατά την αρχική ρύθμιση (π.χ. εισαγωγή τοποθεσίας, όσον αφορά το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος, την ώρα της ημέρας, τη ζώνη ώρας κ.λπ.) και τον καθορισμό των στόχων του ηλιοστάτη (όπου πηγαίνει το φως και η θερμότητα από τον ηλιοστάτη). Το κόστος για μία (1) και έως τρεις (3) μονάδες είναι 2471 USD και μπορεί να μειωθεί σε 1999 USD εάν παραγγελθούν περισσότερες από τέσσερις (4) μονάδες. Το κόστος της συσκευής χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο καθρέφτης είναι 1849 USD.

Η Taisei Corp., μια μεγάλη Ιαπωνική κατασκευαστική εταιρεία, έχει αναπτύξει ένα ηλιακό σύστημα, που ονομάζεται T – Soleil [115]. Το Minato Mirai Center Building, στην περιοχή Minato Mirai, στην πόλη Γιοκοχάμα της Ιαπωνίας, εγκατέστησε το σύστημα, το οποίο επιτρέπει στο φως του ήλιου να περάσει στο κτίριο από την ταράτσα. Μέσα από αυτό το σύστημα, το φυσικό ηλιακό φως που μεταφέρεται από την οροφή μεταδίδεται στους άλλους ορόφους χρησιμοποιώντας έναν αυτόματο ανιχνευτή του ήλιου και πολυβάθμιους καθρέφτες τοποθετημένους μέσα σε ένα κλιμακοστάσιο ύψους 80 m (που εκτείνεται στον τέταρτο (4) όροφο στην ταράτσα) στο κεντρικό μέρος του κτιρίου των 21 ορόφων (συνολικό ύψος περίπου 100 m). Το σύστημα χρησιμοποιεί διάφορους καθρέφτες: ο κύριος καθρέπτης

διαθέτει μια αυτόματη λειτουργία ανίχνευσης ήλιου που συλλέγει μεγάλες ποσότητες ηλιακού φωτισμού, ενώ ο δεύτερος και ο τρίτος καθρέφτης διαχέουν το ηλιακό φως μέσα στο κτίριο. Η κατανομή πολλαπλών καθρεφτών επιτρέπει το ηλιακό φως να αντανακλάται αποτελεσματικά σε όλες τις κατευθύνσεις. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύστημα, η φωτεινότητα μπορεί να τριπλασιαστεί σε σύγκριση με τα τυπικά οριζόντια συστήματα φ.φ. και το φως μπορεί να φτάσει σε όλα τα δωμάτια όλο το χρόνο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαίωσαν ότι το σύστημα μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για ηλεκτρικό φωτισμό κατά 20 – 30%, ενώ το υλικό που μειώνει τη θάμβωση και η διαμόρφωση των καθρεφτών στοχεύει στην επίτευξη ενός υψηλής οπτικής άνεσης του εσωτερικού περιβάλλοντος και στην προστασία της υγείας των ματιών.

Η Wikoda Inc. [116] στο Concord της Μασαχουσέτης έχει αναπτύξει έναν ηλιοστάτη σχεδιασμένο για οικιακή χρήση, που ονομάζεται SUNFLOWER2, ο οποίος είναι σε θέση να παρέχει φ.φ. σε χώρους με χαμηλά επίπεδα φ.φ. Σε αντίθεση με τους ηλιοστάτες που προορίζονται για βιομηχανικούς σκοπούς, το SUNFLOWER2 της Wikoda Inc. δεν απαιτεί προγραμματισμό ή ειδικευμένη γνώση για την ρύθμιση και λειτουργία. Ο υπολογιστής, οι σερβομηχανισμοί κίνησης και οι ηλιακοί αισθητήρες είναι όλα ενσωματωμένα και αυτοτελή. Δεν χρειάζεται καν μπαταρίες ή ένα καλώδιο τροφοδοσίας επειδή ο ίδιος ο ηλιοστάτης είναι ηλιακός. Μόλις εγκατασταθεί και τεθεί σε λειτουργία, ο ηλιοστάτης παρακολουθεί τον ήλιο κάθε μέρα και μεταφέρει το ηλιακό φως μέσα από ένα άνοιγμα που παρέχει ελεύθερο φως και ζεστασιά. Ο ηλιοστάτης της Wikoda Inc. είναι διαθέσιμος στα 399 USD.

Η Heliostat.nl [117] που βρίσκεται στην Ολλανδία έχει επίσης αναπτύξει έναν ηλιοστάτη για οικιακή χρήση. Ο ηλιοστάτης λειτουργεί χωρίς αισθητήρες φωτισμού αλλά με χρήση αλγορίθμων για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου στον ουρανό. Με τον υπολογισμό και τη ρύθμιση της θέσης του καθρέπτη κάθε δευτερόλεπτο, το σύστημα αυτό μπορεί να αντανακλά το ηλιακό φως στο ίδιο σημείο κατά την διάρκεια της ημέρας. Αρχικά, ο ελεγκτής ιχνηλάτησης χρειάζεται να γνωρίζει τη θέση του ήλιου (σε αυτή τη συγκεκριμένη στιγμή). Στην συνέχεια υπολογίζει πού να μετακινήσει τους κινητήρες για να πάρει τη σωστή θέση ανάκλασης για τον καθρέφτη. Οι ρότορες στο σύστημα δίνουν τη δυνατότητα στον ηλιοστάτη να ρυθμίσει τον συλλέκτη στη σωστή θέση. Ο διπλός άξονας έχει δύο (2) τρόπους λειτουργίας α. ο πρώτος είναι να λειτουργεί ως ηλιακός ιχνηλάτης και β. ο δεύτερος είναι να

ενεργεί ως ηλιοστάτης. Η εταιρεία προσφέρει διάφορα Κιτ ηλιακής ιχνηλάτησης που περιέχουν όλα τα μηχανικά εξαρτήματα και τις ηλεκτρονικές συσκευές σε τιμές που κυμαίνονται από 350 έως 570 USD.

Ο ηλιοστάτης, που ονομάζεται PSI – 1kW, από την Practical Solar [118] μια κατασκευαστική εταιρεία με έδρα στη Βοστώνη, χρησιμοποιεί έναν υπολογιστή για την παρακολούθηση του ήλιου, προκειμένου να μεταφέρει την ενέργειά του σε ένα δωμάτιο ή να τον συγκεντρώσει για εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Η ανακλαστική επιφάνεια αποτελείται από δώδεκα (12) επιμέρους κάτοπτρα, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο σε συστοιχία  $3 \times 4$ . Η επιφάνεια κάθε επιμέρους κατόπτρου είναι  $1.12 \text{ m}^2$ , πάχους 2 mm και έχει ανακλαστικότητα 90%. Ο σχεδιασμός του πλαισίου επιτρέπει στον κάθε έναν από τους δώδεκα (12) καθρέφτες να γέρνουν με υψηλή ακρίβεια τοποθέτησης  $0.1^\circ$  τόσο στο Αζιμούθιο όσο και στην γωνία Ύψους έτσι ώστε ολόκληρη η ανακλαστική επιφάνεια να έχει ένα επιθυμητό εστιακό μήκος. Ο σχεδιασμός του ηλιοστάτη PSI – 1kW χρησιμοποιεί δύο υψηλής ακρίβειας περιστροφικούς κωδικοποιητές (proprietary high-accuracy rotary position encoders). Αυτό επιτρέπει μια πολύ ακριβή εστίαση, με την ανακλώμενη δέσμη του ηλιακού φωτός να τοποθετείται σε απόσταση 20 cm, σε απόσταση 50 m από τον στόχο. Κάθε μεμονωμένος ηλιοστάτης μπορεί να προγραμματιστεί και να ελεγχθεί αυτόνομα από το λογισμικό που περιλαμβάνεται και μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να επικεντρώνεται σε διαφορετικούς στόχους ή σε έναν κοινό στόχο ταυτόχρονα. Η Practical Solar παράγει επίσης και έναν θερμικό δέκτη σχεδιασμένο για τη θέρμανση του νερού για χρήση σε εφαρμογές εμπορικής και βιομηχανικής θέρμανσης και ψύξης. Η τιμή του PSI – 1kW διαφέρει ανάλογα με την ποσότητα. Για έναν μόνο ηλιοστάτη, η τιμή είναι 3500 USD και μπορεί να μειωθεί κάτω από 650 USD για πάνω από 1000 μονάδες.

Η HelioTrack [119] έχει αναπτύξει λύσεις ηλιακής ιχνηλάτησης με εφαρμογές κοινής ωφέλειας, έρευνας και DIY. Οι κατασκευασμένοι ηλιοστάτες ιχνηλατούν την πορεία του ήλιου μέσω ενός ηλεκτρονικού συστήματος διπλού-άξονα. Το αναλογικό κύκλωμα ηλιακής ιχνηλάτησης ελέγχει δύο (2) μηχανικούς ενεργοποιητές (mechanical actuators) που κινούν σε ένα κάτοπτρο σε δύο (2) άξονες. Το επίπεδο του καθρέφτη αντικατοπτρίζει τον ήλιο σε έναν ακίνητο στόχο κατά τη διάρκεια της ημέρας και στη συνέχεια θα επιστρέψει σε μια προκαθορισμένη πρωινή θέση μετά το ηλιοβασίλεμα. Το ηλεκτρονικό σύστημα

παρακολούθησης μπορεί να παρακολουθεί τον ήλιο με μεγάλη ακρίβεια. Τα Kit του ηλιοστάτη διαθέσιμα στο εμπόριο ξεκινούν από 2500 USD και δεν περιλαμβάνουν το σύστημα έδρασης ή καθρέφτες, ενώ ένα Kit ηλιοστάτη με βάση ανέρχεται στα 3000 USD.

Εκτός από τους κατασκευαστές ηλιοστατών γενικής χρήσης (general-purpose heliostats), υπάρχει εκτενής εργασία για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την κατασκευή ηλιακών ιχνηλατών και ηλιοστατών οι οποίοι διατίθενται στο ευρύ κοινό, συνήθως ανοιχτού κώδικα (open-source), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο από ερασιτέχνες όσο και από εμπορικές εγκαταστάσεις σε κάποιο βαθμό. Ο ηλιοστάτης που κατασκευάστηκε από τον Leo Gerst στο Heliostat.us αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα [120]. Ο Leo Gerst έχει κατασκευάσει ένα πρωτότυπο ηλιοστάτη με κόστος περίπου 130 USD ανά τετραγωνικό μέτρο συνολικά, Το σύστημα ηλιοστάτη είναι διπλού-άξονα και για την κατασκευή του έχουν χρησιμοποιηθεί εξαρτήματα τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο. Πρόκειται για ένα σημαντικό επίτευγμα λόγω του εξαιρετικά χαμηλού κόστους κατασκευής και υποδεικνύει τη δυνητική οικονομική σκοπιμότητα της συγκεντρωτικής ηλιακής θερμικής ισχύος (concentrator solar thermal power) με τη χρήση ηλιοστατών σε μικρή κλίμακα. Ο Πίνακας 9 παρέχει έναν κατάλογο κατασκευαστών γενικής χρήσης, ηλιοστατών διπλού-άξονα που διατίθενται στο εμπόριο.

**Πίνακας 9:** Κατασκευαστές Ηλιοστατικών Συστημάτων.

Κατασκευαστής	Περιγραφή	Ιστότοπος
Suncentral	Κατασκευαστής ηλιοστατικών συστημάτων για εφαρμογές φ.φ.	<a href="http://www.suncentralinc.com/">http://www.suncentralinc.com/</a>
Espacio solar	Κατασκευαστής φωτο-σωλήνων και ηλιοστάτων	<a href="http://espaciosolar.com/">http://espaciosolar.com/</a>
Widoka	Κατασκευαστής ηλιοστάτων για εφαρμογές σε κτίρια	<a href="http://wikoda.com/">http://wikoda.com/</a>
Tourneseul	Κατασκευαστής ηλιοστατικών συστημάτων με χρήση αισθητήρων για την ηλιακή ιχνηλάτηση	<a href="http://tourneseul.fr/">http://tourneseul.fr/</a>
Sat control	Κατασκευαστής ηλιακών ιχνηλατών και ηλιοστάτων	<a href="http://www.solar-motors.com/">http://www.solar-motors.com/</a>
Titan tracker	Ανάπτυξη ηλιακών ιχνηλατών διπλού-άξονα και ηλιοστάτων	<a href="http://www.titantracker.es/">http://www.titantracker.es/</a>
Helios: a DIY heliostat	Εκπαιδευτικό πρόγραμμα κατασκευής ηλιοστάτη στο Kickstarter	<a href="http://www.kickstarter.com/projects/1362268059/helios-a-diy-heliostat/">http://www.kickstarter.com/projects/1362268059/helios-a-diy-heliostat/</a>
Heliostat.nl	Κατασκευαστής ηλιοστάτων μικρής κλίμακας για αστικές εφαρμογές	<a href="http://www.heliostaat.nl/index.html">http://www.heliostaat.nl/index.html</a>
Practical solar	Κατασκευαστής ηλιοστάτων και ηλιακών συλλεκτών για εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές	<a href="http://www.practicalsolar.com/index.html">http://www.practicalsolar.com/index.html</a>
Heliotrack	Κατασκευαστές ηλιοστάτων και συστημάτων Ηλιάκης ιχνηλάτησης	<a href="https://www.heliotrack.com/Index.html">https://www.heliotrack.com/Index.html</a>

## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

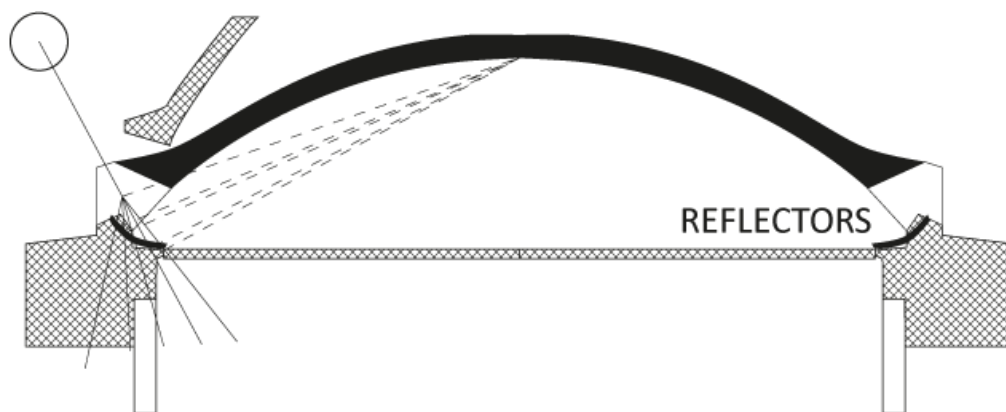
Τα ράφια φωτισμού (Light shelves) αντιπροσωπεύουν μία από τις πιο δημοφιλείς επιλογές σχεδιασμού σε σύγχρονα κτίρια και συχνά υποδεικνύονται στη βιβλιογραφία ως αποτελεσματικές συσκευές που μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα φωτισμού ενός χώρου και να προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται συστήματα εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού.

Τα ράφια φωτισμού είναι ίσως τα πιο απλά μεταξύ των συστημάτων φ.φ., μια οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια που τοποθετείται σε ένα παράθυρο πάνω από το επίπεδο των ματιών, είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά και μπορεί να ελέγχει και να αναδιανέμει το εισερχόμενο φ.φ. μέσω αντανάκλασης.

Λόγω της θέσης του σε σχέση με το άνοιγμα, χωρίζει το παράθυρο σε δύο μέρη: ένα ανώτερο τμήμα (clerestory) που μπορεί να θεωρηθεί ως φορέας του φ.φ. και ένα χαμηλότερο παράθυρο θέασης. Ως εκ τούτου, μπορεί να λειτουργήσει είτε ως διάταξη σκίασης, η οποία εμποδίζει το υπερβολικό φως του ήλιου να προσπίπτει στην επιφάνεια εργασίας και εάν είναι εγκατεστημένο εξωτερικά μπορεί να μειώσει τα ηλιακά κέρδη, είτε ως συσκευή φ.φ., η οποία μέσω της αντανάκλασης των ηλιακών ακτίνων, συνήθως στην οροφή, ενισχύοντας την διείσδυση του φ.φ. βαθύτερα στο εσωτερικό του χώρου.

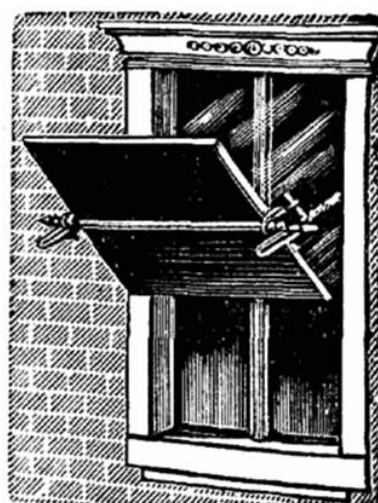
Μέχρι σήμερα, πολλά συστήματα ραφιών φωτισμού έχουν προταθεί από επίπεδα ή καμπύλα σε στατικά ή δυναμικά μέσω της ιχνηλάτησης του ήλιου, χρησιμοποιώντας την κατοπτρική ανάκλαση και η απόδοσή τους καθορίζεται κυρίως σε σχέση με τα επίπεδα φωτισμού που έχουν επιτευχθεί στο εσωτερικό των χώρων. Αν και η χρήση καθρεφτών ως μέσο για την ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτός είναι γνωστή από την αρχαιότητα (για παράδειγμα τα κατοπτρικά χαρακτηριστικά της κοίλης πλευράς των ασπίδων που χρησιμοποίησε ο Αρχιμήδης το 212 π.Χ. για να καούν τα πανιά του ρωμαϊκού στόλου ή η χρήση καθρεφτών για τον φωτισμό θεατρικών σκηνών), ο Ανθέμιος ο Τραλλιανός και ο Ισίδωρος ο Μιλήσιος [122], ήταν οι πρώτοι που σχεδίασαν ένα πρώιμο σύστημα ραφιού φωτισμού για την Αγία Σοφία στην Κωνσταντινούπολη τον 6<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ.





**Εικόνα 16:** Σχηματική απεικόνιση του παραπέτου της Αγίας Σοφίας βασισμένη στον ανακλαστήρα του Ανθέμιου που τοποθετήθηκε πάνω από την διατομή του αρχικού θόλου και του παραπέτου και παρουσιάστηκε στο [122].

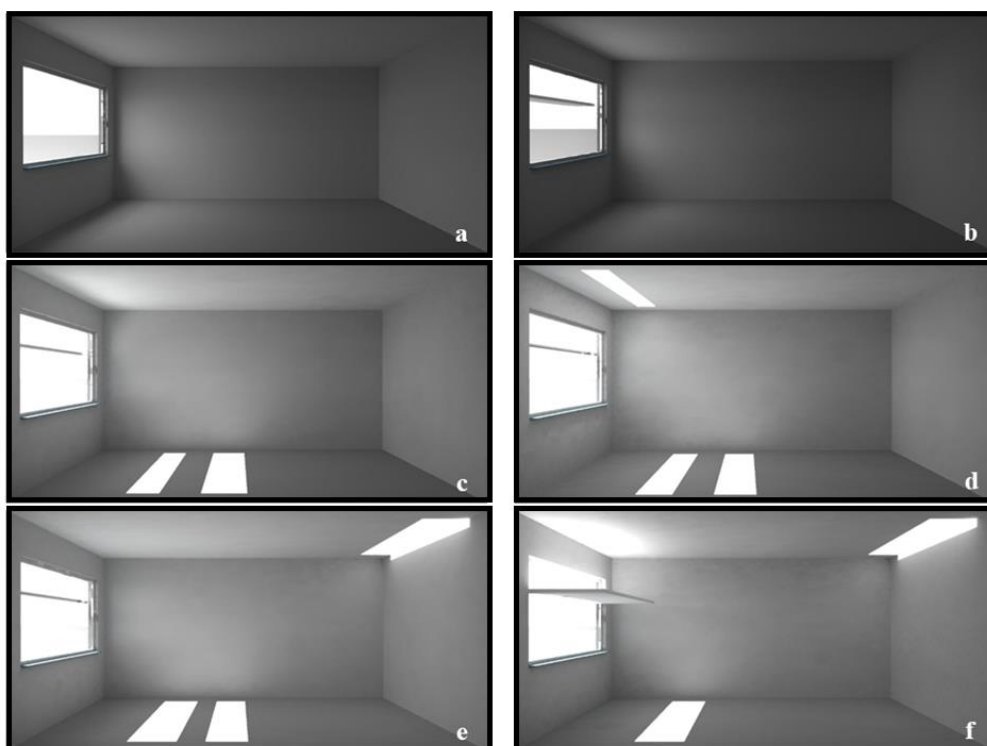
Στα αρχικά σχέδια, ο Ανθέμιος χρησιμοποίησε ανακλαστικές ψηφίδες στα περβάζια των παραθύρων, τα οποία ήταν τοποθετημένα γύρω από το θόλο έτσι ώστε το ηλιακό φως να αντανακλάται στην εσωτερική επιφάνεια του θόλου για να αυξήσει τη φωτεινότητα του [121, 122]. Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα οι ανακλαστήρες ήταν σε παραγωγή για να αυξήσουν τα επίπεδα φωτισμού των εσωτερικών χώρων όπως οι ανακλαστήρες του W. Hanifch and Co. [123], οι οποίοι παρουσιάστηκαν στην εμπορική έκθεση του Βερολίνου το 1889, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17.



Reflektor von W. Hanifch  
& Co., Berlin.

**Εικόνα 17:** Ανακλαστήρας Φ.Φ. από τους W. Hanifch και CO. [123].

Δεν είναι απολύτως σαφές πότε άρχισε να χρησιμοποιείται ο όρος "ράφι φωτισμού (light shelf)". Μια πρώιμη μελέτη για τη χρήση ραφιών φωτισμού στα νοσοκομεία πραγματοποιήθηκε από τον Hopkins κατά τη δεκαετία του 1950 [124]. Το ράφι φωτισμού αντιπροσωπεύει ένα από τα απλούστερα συστήματα που μπορεί να μειώσει τα ηλιακά κέρδη και αναδιανέμει τον φυσικό φωτισμό στο εσωτερικό του κτιρίου. Η επικεντρωμένη έρευνα σχετικά με την απόδοση των ραφιών φωτισμού ξεκίνησε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980.



**Εικόνα 18:** Διάφορες εσωτερικές απεικονίσεις ακτινοβολίας ενός χώρου με νότιο προσανατολισμό διαστάσεων 4 x 6 x 3 m και αναλογίας παραθύρου προς το δάπεδο ίσο με 20% στις εξής περιπτώσεις: a) χωρίς ράφι φωτισμού, κάτω από νεφοσκεπή ουρανό, b) τελειά διάχυτο εξωτερικό οριζόντιο ράφι φωτισμού βάθους 0.5 m (ανακλαστικότητα 0.8), κάτω από νεφοσκεπή ουρανό, c) τελειά διάχυτο εξωτερικό οριζόντιο ράφι φωτισμού βάθους 0.5 m (ανακλαστικότητα 0.8), κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού (γωνιά ύψους ηλίου  $37.8^\circ$ ), d) παρόμοιο με το (c) αλλά με εξωτερικό οριζόντιο ράφι να είναι καθρέφτης, e) παρόμοιο με το (d) αλλά το ράφι φωτισμού είναι κεκλιμένο προς τα πάνω κατά  $15^\circ$  και f) παρόμοιο με το (e) με εάν τελειά διάχυτο εσωτερικό φως ράφι (βάθους 1.2 m).

Παρόλο που η επίδραση του ραφιού φωτισμού στο ενεργειακό ισοζύγιο ενός κτιρίου (ειδικά στα ψυκτικά φορτία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού) είναι σημαντική, σε αυτή την ανασκόπηση ο όρος "απόδοση" σχετίζεται με την προκύπτουσα κατανομή λαμπρότητας και φωτισμού στις επιφάνειες του χώρου που σχετίζονται με αυτόν. Αυτή η απόδοση ποικίλλει ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες του ουρανού, καθώς τα ράφια φωτισμού ελέγχουν τον διάχυτο και τον άμεσο φωτισμό διαφορετικά, ανάλογα με τη γεωμετρία του ραφιού και το υλικό που χρησιμοποιείται στην ανώτερη του επιφάνεια. Τα εξωτερικά ράφια φωτισμού μπορούν να ανακατευθύνουν τον φ.φ. και να παρέχουν σκίαση στο κάτω μέρος του παραθύρου, ενώ τα εσωτερικά μπορούν να ελαχιστοποιήσουν του ίχνος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που δημιουργείται στην επιφάνεια εργασίας, ειδικά όταν ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά, βελτιώνοντας έτσι την κατανομή του φωτισμού. Είναι επομένως προφανές ότι το βάθος τους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα επίπεδα φωτισμού. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.

Έτσι, οι παράμετροι που έχουν προσδιοριστεί και επηρεάζουν την απόδοση του από πλευράς φ.φ. είναι οι εξής:

- Η γεωμετρία (πλάτος, μήκος, ύψος τοποθέτησης, γωνία κλίσης και σχήμα).
- Η ικανότητα ανάκλασης του υλικού (κατοπτρική ή διάχυτη).
- Ο τύπος υλικού (μεταλλικό, διάτρητο ή όχι, διαφανές).
- Η ρύθμιση θέσης (περιστροφή, λειτουργία).
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου
- Οι κλιματικές συνθήκες.

Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι η άμεση σύγκριση των επιδόσεων των διαφόρων συστημάτων ραφιών φωτισμού είναι αρκετά δύσκολη καθώς δεν υπάρχει ανάλυση στην βιβλιογραφία (εκτός από τα ανειδωλικά συστήματα). Η ύπαρξη κριτηρίων επιλογής για τα ράφια φωτισμού θα μπορούσε να δώσει μια ένδειξη των επιπτώσεων που έχουν στην κατανομή του φ.φ. μέσα στο χώρο. Ένα κριτήριο θα μπορούσε να είναι η εκτίμηση της συνάρτησης BTDF (bidirectional transmittance distribution function) που αντιπροσωπεύει τον «τρόπο» που ανακλάται το φως από την ανακλαστική επιφάνεια. Στην βιβλιογραφία, η απόδοση του ραφιού φωτισμού αξιολογείται ανάλογα με τα επίπεδα φωτισμού στην

επιφάνεια εργασίας ενός δωματίου ή την κατανομή της λαμπρότητας στις επιφάνειές του. Δεδομένου ότι οι διαστάσεις των δωματίων που χρησιμοποιούνται από διάφορες ερευνητικές ομάδες ποικίλλουν ευρέως, οι προτάσεις για τα βέλτιστα χαρακτηριστικά των ραφιών φωτισμού ποικίλουν επίσης, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένη οδηγία σχεδιασμού.

Ως εκ τούτου, τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος ραφιού φωτισμού, είναι τα εξής:

- Αύξηση των επιπέδων φωτισμού, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές από τα ανοίγματα.
- Αύξηση της ομοιομορφίας.
- Η βελτίωση της οπτικής άνεσης.
- Η παροχή ικανοποιητικής σκίασης.

Τα ράφια φωτισμού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την γεωμετρία τους. Ως εκ τούτου, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανασκόπησης για τα ράφια φωτισμού που είναι:

- α. Οριζόντια.
- β. Επίπεδα με κλίση.
- γ. Καμπύλα.
- δ. Δυναμικά (Active light shelves).

## 2.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Αποτελούν την απλούστερη μορφή. Οι τύποι των ραφιών φωτισμού που εξετάστηκαν είναι τα οριζόντια και τα κεκλιμένα ράφια με κατοπτρικές ή διάχυτες αντανakλαστικές επιφάνειες. Ο Selkowitz et al. [125], απέδειξαν ότι σε περιοχές με μεγάλα ποσοστά ηλιοφάνειας τα ράφια φωτισμού είναι αποτελεσματικά στην αύξηση των επιπέδων φωτισμού στο πίσω μέρος του χώρου σε σύγκριση με τα τυπικά παράθυρα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, γενικά, τα συμβατικά σχέδια των ραφιών φωτισμού βελτιώνουν την διείσδυση του φ.φ.. Το μέγιστο βάθος του εξωτερικού ραφιού φωτισμού ( $d_{\text{ext lightshelf,max}}$ ) θα πρέπει να είναι μικρότερο από 1.5 φορές το ύψος του πάνω μέρους του παραθύρου ( $h_{\text{clerestory}}$ ):

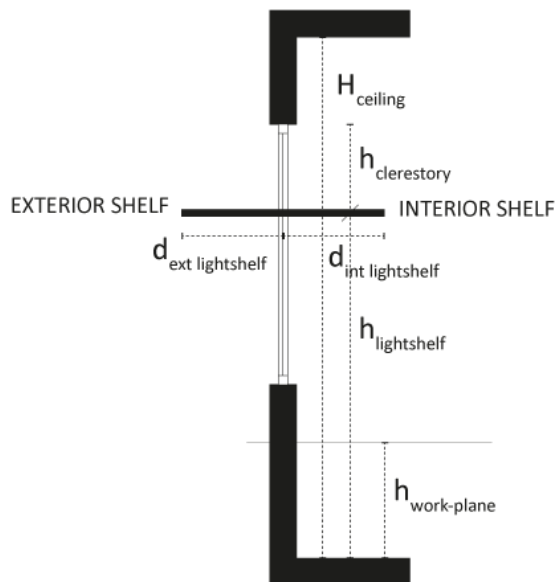
$$d_{\text{ext lightshelf,max}} \leq 1.5 \times h_{\text{clerestory}} \quad (22)$$

Σύμφωνα με τους Place et al. [126]:

- Το βάθος του εξωτερικού οριζόντιου ραφιού θα πρέπει να είναι 1.25 – 1.5 φορές το ύψος του πάνω μέρους του παραθύρου για προσόψεις με Νότιο προσανατολισμό ( $\pm 20^\circ$  από τον Νότο) και
- Το βάθος του εξωτερικού οριζόντιου ραφιού θα πρέπει να είναι 1.5 – 2 φορές το ύψος του φεγγίτη για Νότιες προσόψεις προσανατολισμένες σε γωνίες μεγαλύτερες από  $20^\circ$  και μικρότερες από  $160^\circ$  (το Αζιμούθιο μετράτε από το Βορρά ( $0^\circ$ ), δεξιόστροφα).

Ο Littlefair [127] συνέχισε την προηγούμενη έρευνα του προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά των ραφιών φωτισμού. Τα ευρήματά του έδειξαν ότι τα ράφια φωτισμού αύξησαν την ομοιομορφία στο χώρο χωρίς όμως να αυξήσουν σημαντικά τα επίπεδα φωτισμού στο πίσω μέρος του δωματίου. Τα ράφια φωτισμού λειτουργούσαν καλύτερα όταν υπήρχε εξωτερικό εμπόδιο, αυξάνοντας τις τιμές φωτισμού στον πυρήνα κατά περίπου 15%. Αυτή η ανάλυση παρείχε κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις βέλτιστες διαστάσεις του ραφιού φωτισμού. Το βάθος του εσωτερικού ραφιού ( $d_{\text{int lightshelf}}$ ) θα πρέπει να είναι ίσο με το ύψος του φεγγίτη ( $h_{\text{clerestory}}$ ), ενώ το βάθος του εξωτερικού ραφιού ( $d_{\text{ext lightshelf}}$ ) θα πρέπει να είναι μικρότερο από τη διαφορά μεταξύ των αποστάσεων του ύψους του ραφιού από το δάπεδο

( $h_{\text{lightshelf}}$ ) και το επίπεδο εργασίας ( $h_{\text{work-plane}}$ ). Η ανακλαστικότητα των επιφανειών των ραφιών θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, ενώ η απόδοσή του αυξάνεται όταν χρησιμοποιείται σε χώρους με ψηλά ταβάνια, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 19.



**Εικόνα 19:** Διατομή ενός χώρου με πλευρικό άνοιγμα το οποίο έχει ένα εκτεταμένο ράφι φωτισμού (εσωτερικό και εξωτερικό) στο οποίο παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι διαστάσεων.

$$d_{\text{int lightshelf}} = h_{\text{clerestory}} \quad (23)$$

$$d_{\text{ext lightshelf}} \leq h_{\text{lightshelf}} - h_{\text{work-plane}} \quad (24)$$

Όπου,

- $d_{\text{int lightshelf}}$ : Βάθος εσωτερικού ραφιού φωτισμού.
- $h_{\text{clerestory}}$ : Ύψος του πάνω μέρους του παραθύρου (clerestory window).
- $d_{\text{ext lightshelf}}$ : Βάθος εξωτερικού ραφιού φωτισμού.
- $h_{\text{lightshelf}}$ : Ύψος ραφιού φωτισμού από το δάπεδο.
- $h_{\text{work-plane}}$ : Ύψος επιφάνειας εργασίας από το δάπεδο.

Οι Abdulmohsen et al. [128] διερεύνησε την επίδραση του βάθους των ραφιών φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας χρησιμοποιώντας εσωτερικά, εξωτερικά και συνδυασμένα ράφια. Η ανακλαστικότητα της ανώτερης επιφάνειας των ραφιών ήταν 80% και το βάθος των ραφιών κυμαινόταν από 0 έως 3.5 m για τα εξωτερικά και από 0 έως 3 m για τα εσωτερικά,

τοποθετημένα στο παράθυρο 2 m πάνω από το δάπεδο. Οι αξιολογήσεις βασίστηκαν σε μοντέλα υπό-κλίμακα για τις μετρήσεις φ.φ. και σε μοντέλα προσομοίωσης για την εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας στο Τέξας, ΗΠΑ. Το μοντέλο υπό-κλίμακα αντιπροσώπευε έναν ανοικτό χώρο (open plan) γραφείου προσανατολισμένο προς το Νότο με διαστάσεις  $9 \times 9$  m και ύψος 3.5 m, ενώ η αναλογία παραθύρου-τοίχου ήταν 100%. Το ράφι φωτισμού σχεδιάστηκε για να παρέχει επαρκή σκίαση στο κάτω παράθυρο θέασης και φυσικά να αντανakλά τον φ.φ. βαθιά μέσα στο χώρο από το πάνω μέρος του παραθύρου (clerestory window), πάνω από το ράφι. Διαφορετικά βάθη ραφιών φωτισμού συγκρίθηκαν με προβόλους (overhangs) διαφόρων μεγεθών που αντιστοιχούσαν σε μήκη 1.2 m, 2.5 m και 3.65 m. Όσον αφορά τα επίπεδα φωτισμού, την ομοιομορφία και την παρουσία θάμβωσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα συνδυασμένα (εσωτερικά και εξωτερικά) συστήματα ραφιών φωτισμού λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, βελτιώνοντας σημαντικά την ομοιομορφία. Μεταξύ των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, ο συνδυασμός ενός εξωτερικού ραφιού φωτισμού βάθους δύο έως τρεις φορές το ύψος του παραθύρου θέασης και ενός εσωτερικού ραφιού με βάθος 2 έως 3 φορές μεγαλύτερο από το ύψος του πάνω μέρους του παραθύρου, παρουσίασε την καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, όπως ανέφεραν οι ερευνητές, τα αποτελέσματα αντιστοιχούσαν στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για χαμηλές γωνίες ύψους του ήλιου (solar altitude angle),  $30^\circ$  και αυτό εξηγεί το μεγάλο μέγεθος των ραφιών φωτισμού.

Οι Littlefair et al. [16] εξέτασαν ένα εσωτερικό ράφι φωτισμού που είχε βάθος 1 m σε ύψος 2.08 m από το πάτωμα, τοποθετημένο σε μία μακέτα ενός χώρου γραφείου με Νοτιοδυτικό προσανατολισμό (Γεωγραφικό πλάτος:  $53.35^\circ$  N). Ο χώρος είχε διαστάσεις  $3 \times 9$  m με ύψος οροφής 2.7 m. Επειδή το σύστημα κατάφερε να μειώσει τα επίπεδα φωτισμού περισσότερο στο μπροστινό μέρος του δωματίου παρά στο πίσω μέρος, η ομοιομορφία αυξήθηκε υπό όλες τις συνθήκες, αλλά με μικρότερες βελτιώσεις από αυτές που εμφανίστηκαν κατά τις συνθήκες νεφελώδους ουρανού. Σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (συμβατικό παράθυρο), τα ευρήματα από τις μετρήσεις έδειξαν μείωση των επιπέδων φυσικού φωτισμού που κυμαίνονταν από 10% έως 20%. Ως γενικό συμπέρασμα, πρότειναν ότι τα σταθερά συστήματα μπορούν να αυξήσουν μόνο τον φωτισμό του πυρήνα των χώρων υπό ορισμένες συνθήκες και μόνο όταν ο ήλιος βρίσκεται απευθείας στο παράθυρο και η

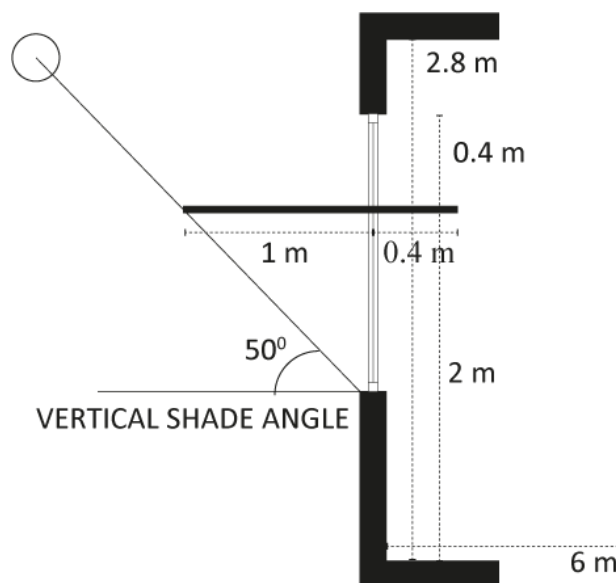
απόδοσή του θα μπορούσε να αυξηθεί αν υιοθετηθεί ένα κινητό σύστημα το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί για να λειτουργήσει πιο αποτελεσματικά. Φαίνεται ότι δεν ήταν εφικτή μια μεγάλη αύξηση των επιπέδων φωτισμού του πυρήνα και, ως εκ τούτου, στο Ηνωμένο Βασίλειο, αυτά τα συστήματα φ.φ. θα πρέπει να θεωρούνται περισσότερο ως συσκευές σκίασης.

Οι Soler και Oteiza [129, 130] χρησιμοποίησαν δύο (2) μοντέλα υπό κλίμακα με Νότιο προσανατολισμό και ορθογώνια ανοίγματα για να εξετάσουν την αποτελεσματικότητα ενός ανακλαστικού (91%) ραφιού φωτισμού στη Μαδρίτη (Γεωγραφικό πλάτος: 40.41°). Τα μοντέλα αντιπροσωπεύαν χώρους με διαστάσεις 6 × 6 m και ύψος οροφής 2.8 m, με αναλογία παραθύρου προς τον τοίχο 50%. Το ένα ήταν εξοπλισμένο με το ράφι φωτισμού και το άλλο αφέθηκε ελεύθερο από εμπόδια για να λειτουργήσει ως σενάριο αναφοράς. Οι μετρήσεις των μέσων ωριαίων τιμών της έντασης φωτισμού λήφθηκαν κατά τη διάρκεια περιόδου ενός έτους για τα δύο μοντέλα. Ο στόχος ήταν να φανεί η εξάρτηση της γωνίας ύψους και αζιμουθίου του ήλιου στην απόδοση των συστημάτων όσον αφορά τον φ.φ. Η εξάρτηση ορίστηκε ως ο λόγος των μέσων ωριαίων τιμών φωτισμού που λαμβάνονται από το μοντέλο εφοδιασμένο με το ράφι φωτισμού και το μοντέλο αναφοράς αντίστοιχα. Σαν συσκευή σκίασης, το ράφι φωτισμού σχεδιάστηκε με κάθετη γωνία σκίασης 50° (Vertical Shade Angle). Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις έδειξαν ότι το ράφι παρείχε μεγαλύτερη ομοιομορφία σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Επιπρόσθετα οι μετρήσεις έδειξαν ότι η αποτελεσματικότητα του συστήματος αυξάνεται μαζί με την γωνία ύψους του ήλιου, μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται. Περαιτέρω αύξηση της γωνίας ύψους είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του ραφιού φωτισμού. Οι μέγιστες τιμές της αποτελεσματικότητας φ.φ. λαμβάνονται μόνο σε καθαρές ημέρες και περίπου μεταξύ της 110<sup>ης</sup> και της 270<sup>ης</sup> ημέρας του έτους. Αυτό σημαίνει ότι τα εξωτερικά ράφια φωτισμού έχουν δυσκολία να αντιμετωπίσουν τις χαμηλότερες θέσεις του ήλιου.

Σε μια παρόμοια μελέτη, ο Carlos και ο Soler [30] συνέκριναν την απόδοση φ.φ. δύο διαμορφώσεων ενός ραφιού φωτισμού που είχαν τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά μέρη με εκείνη των προβόλων. Τέσσερα μοντέλα υπό κλίμακα με ανοίγματα Νότια προσανατολισμένα κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τις ίδιες διαστάσεις χώρου με εκείνα των [72, 73]. Το πρώτο ήταν εξοπλισμένο με ένα λευκό αδιαφανές μετακρυλικό



(metacrilate) ράφι φωτισμού, το δεύτερο ήταν το ίδιο με το πρώτο αλλά η επιφάνεια του ραφιού ήταν από καθρέφτη, το τρίτο είχε ένα πρόβολο, ενώ το τελευταίο έμεινε χωρίς ράφι ως σενάριο αναφοράς. Οι μετρήσεις φωτισμού πραγματοποιήθηκαν στη Μαδρίτη της Ισπανίας για περίοδο ενός έτους. Τα ράφια φωτισμού και ο πρόβολος είχαν σχεδιαστεί για να παρέχουν την ίδια σκίαση (κάθετη γωνιά σκίασης  $50^\circ$ ) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20.



**Εικόνα 20:** Διαστάσεις ραφιού φωτισμού με κατακόρυφη γωνιά σκίασης (vertical shade angle) όπως εξετάζεται στο [30].

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι τα ράφια, με την ανακατεύθυνση του φ.φ. στο εσωτερικό, είχαν καλύτερη απόδοση από έναν κλασικό πρόβολο 10 έως 25% όσον αφορά τα επίπεδα φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου. Το ράφι από μετακρυλικό υλικό είναι πιο αποτελεσματικό από τον καθρέφτη, κατά τους κεντρικούς μήνες του έτους και τις ώρες 08:30 έως 11:30 εμφανίζοντας βελτιώσεις που κυμαίνονταν από 10% έως 35%. Το αντίθετο συμβαίνει στην αρχή και στο τέλος του έτους. Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ανακλάσεως της άνω επιφάνειας του ραφιού φωτισμού.

Οι Berardi και Anaraki [131] αξιολόγησαν τα οφέλη των ραφιών φωτισμού με τη διεξαγωγή ετήσιων προσομοιώσεων, υπολογίζοντας την Ωφέλιμη Κατανομή Φυσικού Φωτισμού (Useful Daylight Illuminances, UDI) σε κτίρια γραφείων λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές αναλογίες παραθύρου-τοίχου, σχήματα παραθύρων, προσανατολισμούς προσόψεων και

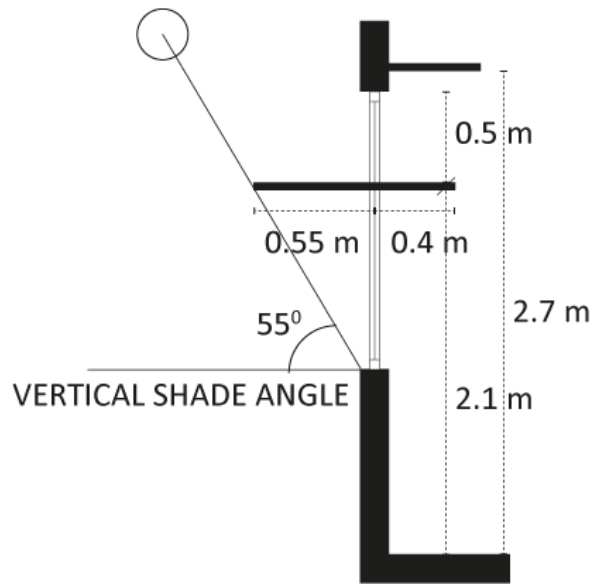
εξωτερικά εμπόδια. Ο Νότια προσανατολισμένος χώρος είχε διαστάσεις  $10 \times 15$  m και ύψος οροφής 3 m και ήταν στο Τορόντο του Καναδά (Γεωγραφικό πλάτος:  $43.65^\circ$  N). Το βέλτιστο μήκος και βάθος των ραφιών υπολογίστηκε με βάση τις ακόλουθες παραμέτρους: το ύψος του πρεκτιού, το ύψος της ποδιάς, το ύψος του ραφιού φωτισμού, το πάχος τοίχου και τη θέση του ηλίου (ηλιακό ύψος και αζιμούθιο). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, στο πλαίσιο της ανάλυσης, τα ράφια φωτισμού αύξησαν την UDI κυρίως στα πρώτα 6 μέτρα από τα παράθυρα και παρείχαν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του φυσικού φωτισμού.

Η μελέτη έδειξε ότι τα στενά παράθυρα των οποίων το ύψος τους έφτανε μέχρι την οροφή παρείχαν καλύτερα επίπεδα φ.φ. σε σχέση με κοντύτερα παράθυρα με μεγάλα πλάτη και ότι τα ράφια φωτισμού δεν παρουσίαζαν οφέλη όταν εφαρμόζονται σε παράθυρα που δεν βλέπουν προς Νότο. Επιπλέον, η μελέτη έδειξε ότι ανεξάρτητα από τη γεωμετρία των παραθύρων, τα ράφια φωτισμού ενισχύουν τον φ.φ. ειδικά στην κύρια ζώνη φ.φ. και κυρίως για ανοίγματα με Νότιο προσανατολισμό. Τα μέγιστα επίπεδα UDI για περιπτώσεις χωρίς ράφια εμφανίστηκε στα 3 m, 4 m, 5.5 m και 6 m μακριά από τα παράθυρα, όταν ο λόγος παραθύρου προς τοίχο ήταν 25%, 35%, 45% και 55%, αντίστοιχα. Η παρουσία του ραφιού φωτισμού μείωσε λίγο τις προαναφερθείσες αποστάσεις σε 2.5 m, 3.5 m, 4 m και 5.5 m. Ο τελικός σχεδιασμός των ραφιών φωτισμού είχε ύψος 2.25 m από το δάπεδο με την ανακλαστικότητα να είναι 80%.

Οι Ochoa και Carpeluto [44] πραγματοποίησαν μια ανάλυση φ.φ. σε μια βαθιά αίθουσα συνεδριάσεων εξοπλισμένη με ένα ράφι φωτισμού χρησιμοποιώντας το Radiance για προσομοιώσεις. Το δωμάτιο βρισκόταν στη Χάιφα (Γεωγραφικό πλάτος:  $32.5^\circ$  N). Συνολικά εξετάστηκαν τρία (3) συστήματα:

- α. Ένα ενιαίο παράθυρο χωρίς εξωτερική προστασία,
- β. Ένα οριζόντιο ράφι φωτισμού και
- γ. Ένας ανειδωλικός συγκεντρωτής (anidolic concentrator).

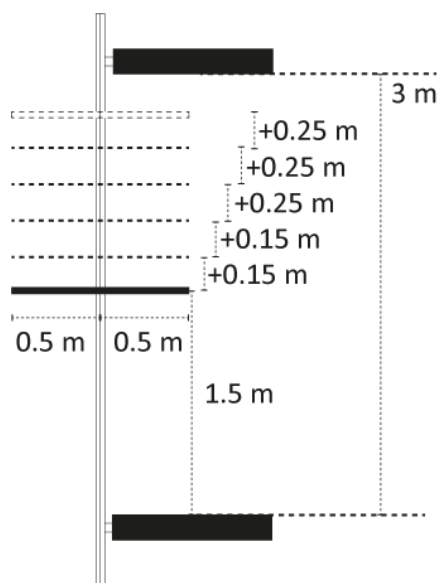
Οι διαστάσεις του προσομοιωμένου ραφιού φωτισμού παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 21.



**Εικόνα 21:** Η διάταξη ραφιού φωτισμού η οποία εξετάστηκε με τις κυρίες διαστάσεις [44].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το ράφι φωτισμού παρείχε την ασφαλέστερη προσέγγιση στο πρόβλημα της διείσδυσης του φ.φ., μειώνοντας την αντίθεση μεταξύ των περιοχών κοντά στο παράθυρο και εκείνων που βρίσκονται στο πίσω μέρος του δωματίου, θυσιάζοντας όμως τα επίπεδα φωτισμού. Οι τιμές φωτισμού πέρα από τη ζώνη φ.φ. που ξεπερνούσαν τα 300 lx ήταν 1.5 – 2 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Επιπλέον, το ράφι είχε μέγιστη απόδοση όταν ο ήλιος βρισκόταν απευθείας πάνω του, ενώ η αποτελεσματικότητά του μειωνόταν σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 6 – 7 m από το παράθυρο. Το ανιδολικό σύστημα βρέθηκε ότι αυξάνει τα επίπεδα φωτισμού σε όλο το δωμάτιο για όλους τους προσανατολισμούς.

Ο Joarder et al. [132] πραγματοποίησαν μια σειρά προσομοιώσεων φ.φ. στη Dhaka του Μπαγκλαντές (Γεωγραφικό πλάτος: 23.8°) συνδυασμένα (εξωτερικά και εσωτερικά) οριζόντια ράφια φωτισμού βάθους 0.5 m και τα δύο, με διάχυτη ανακλαστικότητα της άνω επιφάνειας ίση με 88%. Η παράμετρος ανάλυσης ήταν το ύψος τοποθέτησης του ραφιού από το πάτωμα κάτω από συνθήκες νεφосκεπή ουρανού. Η Εικόνα 22 απεικονίζει τις περιπτώσεις που ελήφθησαν υπόψη.



**Εικόνα 22:** Εκτεταμένο ράφι φωτισμού με ίσα βάθη για το εσωτερικό και εξωτερικό ράφι (0.5 m) και τα μεταβλητά ύψη που εξετάστηκαν [132].

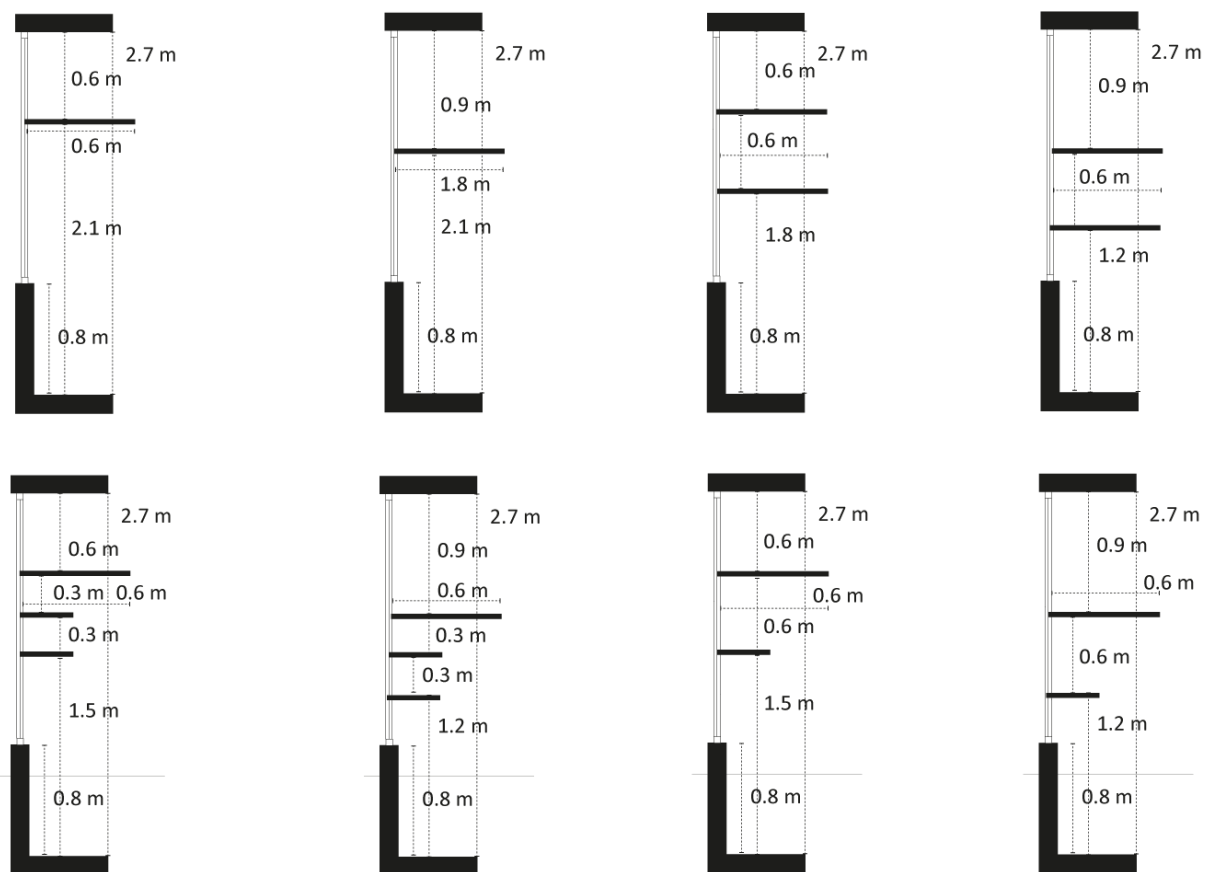
Και πάλι, όπως σημειώνεται και σε άλλες μελέτες, οι μέσες τιμές φωτισμού ήταν υψηλότερες στην περίπτωση χωρίς τη χρήση ραφιού, ενώ η ομοιομορφία παρουσίαζε βελτίωση κατά την παρουσία του. Τα επίπεδα φ.φ. που υπολογίστηκαν για την περίπτωση χωρίς το ράφι να είναι εγκατεστημένο ήταν κατά μέσο όρο 650 lx, αλλά με άνιση κατανομή. Για τις περιπτώσεις με τα ράφια παρατηρήθηκε η μέγιστη μέση τιμή (478 lx) για την υψηλότερη διαμόρφωση (2.75 m πάνω από το επίπεδο του δαπέδου) και η ελάχιστη σε ύψος 2 m. Στις βαθύτερες περιοχές, η επίδραση του ύψους των ραφιών στα επίπεδα φωτισμού δεν ήταν τόσο σημαντική λόγω των συννεφιασμένων συνθηκών του ουρανού. Ωστόσο, οι φωτεινότερες εσωτερικές οροφές καταγράφηκαν για ένα ράφι σε ύψος 2 m, ενώ οι πιο σκοτεινές για ένα ράφι σε ύψος 2.5 m. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένα ράφι φωτισμού ύψους 2 m από το επίπεδο του δαπέδου σε συνδυασμό με οροφές ύψους 3 μέτρων ήταν καλύτερα από άλλες εναλλακτικές λύσεις, συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης αναφοράς, όπου δεν υπήρχε τοποθετημένο ράφι φωτισμού. Επιπλέον, υπήρξε σημαντική αύξηση των επιπέδων φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας που κυμαίνονταν από 300 – 900 lx κατά 60% σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς σκιασμό.

Μία μελέτη που διεξήχθη από τους Hu et al. [133] αξιολόγησαν την απόδοση διαφόρων εσωτερικών ραφιών φωτισμού χρησιμοποιώντας αρχικά μοντέλα υπό κλίμακα στο Raleigh,

της Βόρειας Καρολίνας, ΗΠΑ (Γεωγραφικό πλάτος: 35.7° N). Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ετήσια βάση χρησιμοποιώντας το λογισμικό DAYSIM. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το βάθος του ραφιού φωτισμού, το ύψος της οροφής και τα εσωτερικά χωρίσματα που είναι τυπικά για τα κτίρια γραφείων της Βόρειας Αμερικής, σε ένα πολυώροφο κτίριο γραφείων. Τα εσωτερικά μήκη των ραφιών που εξετάστηκαν κυμαίνονταν από 0.6 m έως 3.6 m με ένα βήμα 0.6 m, ενώ το ύψος και το εσωτερικό του χώρου παρέμεινε αμετάβλητο.

Με τον ίδιο τρόπο, μελετήθηκε το ύψος της οροφής που κυμαίνονταν από 2.75 m έως 3.65 m με βήμα 0.3 m, ενώ το εσωτερικό ράφι έχει σταθερό βάθος 0.6 m. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι αν και τα ράφια γενικά ενισχύουν τον φ.φ. σε περιοχές μακριά από το άνοιγμα, η απόδοσή τους εξαρτάται από την περιοχή του πάνω τμήματος του παραθύρου (clerestory area) και το ύψος της οροφής. Η προσθήκη χωρισμάτων που είναι είτε παράλληλα είτε κάθετα στο παράθυρο που βλέπει προς το Νότο οδηγεί σε σημαντική μείωση των τιμών φωτισμού, ειδικά σε περιοχές μακριά από το παράθυρο. Μεταξύ των έξι (6) περιπτώσεων, το ράφι με βάθος 1.2 m είχε καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις εναλλακτικές, αλλά το εσωτερικό, με βάθος 1.85 m φάνηκε να είναι η βέλτιστη λύση που παρέχει περισσότερη σκίαση παρεμποδίζοντας την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η αύξηση της φωτεινότητας της οροφής είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης του φ.φ. στο εσωτερικό του χώρου.

Οι Lim και Ahmad [134] αξιολόγησαν διάφορες διαμορφώσεις εσωτερικών ραφιών φωτισμού από πλευράς φ.φ. χρησιμοποιώντας μετρήσεις της κατανομής φωτισμού σε δύο (2) μοντέλα κλίμακας που αντιπροσωπεύαν χώρους μήκους 8.4 m, πλάτους 8.4 m και ύψους 2.7 m στο Johor, Μαλαισία (Γεωγραφικό πλάτος: 1.33° N) με αναλογία παραθύρου προς τον τοίχο 70.4% και διαπερατότητας υαλοπινάκων 25%, 50% και 75%. Μονωμένα, διπλά και τριπλά ράφια από αλουμίνιο (ανακλαστικότητα 51.29%) αξιολογήθηκαν με βάθος 0.3 και 0.6 και μεταβαλλόμενα ύψη σχισμών (clerestory heights), 0.3 m και 0.45 m υπό διάφορες συνθήκες ουρανού (Εικόνα 23).



**Εικόνα 23:** Σχηματική αναπαράσταση των περιπτώσεων που εξετάστηκαν στο [134].

Τα εσωτερικά ράφια φωτισμού ήταν σε θέση να βελτιώσουν την ομοιομορφία έως και 30 – 90% κάτω από τον ενδιάμεσο ουρανό (intermediate sky) χωρίς άμεσο ηλιακό φως σε σύγκριση με το βασικό σενάριο (χωρίς ράφι φωτισμού). Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι τα εσωτερικά ράφια δεν ήταν μόνο αποτελεσματικά για να μειώσουν τις εξαιρετικά υψηλές φωτεινές ενδείξεις στην περιοχή κοντά στο παράθυρο, αλλά επίσης μπορούσαν να αυξήσουν τις φωτεινές ενδείξεις στην βαθύτερη περιοχή του δωματίου και αυτό συμβαίνει ακόμη και για τις συνεφιασμένες συνθήκες. Σύμφωνα με τα ευρήματα, η πιο αποτελεσματική απόδοση επιτεύχθηκε σε χαμηλές γωνίες ύψους του ήλιου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντιφατικά με τα αποτελέσματα που παρουσίασε ο Littlefair [127], του οποίου τα κύρια συμπεράσματά δε συνιστούσαν μείωση των επιπέδων φωτισμού κάτω από συνθήκες νεφосκεπούς ουρανού.

Οι Kurtay και Esen [135] πρότειναν μια μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της καλύτερης διάταξης ραφιού φωτισμού προσομοιώνοντας μια τυπική μονάδα γραφείου για έξι (6)

γεωγραφικά πλάτη με τρία (3) διαφορετικά ύψη γραφείων χρησιμοποιώντας το πρότυπο CIE για νεφосκεπή ουρανό (CIE Standard overcast sky). Οι τιμές εσωτερικού φωτισμού συσχετίστηκαν με διάφορα μεγέθη και θέσεις του ραφιού φωτισμού και ως αποτέλεσμα δημιουργήθηκε μια σειρά καμπυλών (CUN – OKAY) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί το σωστό ράφι για μια συγκεκριμένη θέση.

Ο Warriar και ο Raphael [136] χρησιμοποίησαν μετρήσεις φωτισμού σε χώρους κλίμακας στο Chennai της Ινδίας (Γεωγραφικό πλάτος: 13.08° N) και προσομοιώσεις για να ελέγξουν την επίδραση δύο (2) τύπων ραφιών φωτισμού (κατοπτρικά και διάχυτα) και των γωνιών κλίσης στην κατανομή του φ.φ. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι όταν χρησιμοποιήθηκε ένα οριζόντιο ράφι (αλουμίνιο ή καθρέφτη), παρατηρήθηκε αύξηση περίπου 21% στα επίπεδα φωτισμού. Παραδόξως, προσομοιώσεις έδειξαν ότι στο 30% των εξεταζόμενων περιπτώσεων, τα ράφια αύξησαν τον φωτισμό κοντά στο παράθυρο μειώνοντας την ομοιομορφία του χώρου.

Οι Lee et al. [137] συνέκριναν την απόδοση δύο (2) ραφιών φωτισμού, ενός κατοπτρικού και ενός με διάχυτη αντανάκλαση, καθώς αυτό επιτεύχθηκε με ένα συνδυασμό διαφόρων σχημάτων μικροανακλαστήρων που βρίσκονται στην επίπεδη άνω επιφάνεια του ραφιού. Ένα δωμάτιο με Νότιο προσανατολισμό στη Σεούλ της Κορέας (Γεωγραφικό πλάτος: 37.56°) με διαστάσεις 4.9 × 6.6 m και ύψος οροφής 2.5 m χρησιμοποιήθηκε το οποίο είχε WWR 32%. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση στην ομοιομορφία. Αυτή η αύξηση κυμαίνονταν 29.9 – 34.3% για τα εξωτερικά ράφια και 10.4 – 13.7% για τα εσωτερικά, σε σύγκριση με το ράφι φωτισμού τύπου καθρέφτη. Επιπλέον, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας από την χρήση των φωτιστικών σωμάτων μπορεί να αυξηθεί κατά 7.98 – 13.3% (εξωτερικό ράφι) και κατά 1.8 – 4.4% (εσωτερικό ράφι) σε σύγκριση με το ράφι τύπου καθρέφτη.

Ανάμεσα στις εργασίες το έργο των Moscoso και Matusiak [138] είναι πολύ ενδιαφέρον, αφού εξετάζει την επίδραση ενός ραφιού φωτισμού μεταξύ άλλων συστημάτων, στην αισθητική αντίληψη ενός μικρού γραφείου. Τέσσερα (4) διαφορετικά συστήματα φ.φ. είχαν εγκατασταθεί σε ένα δωμάτιο γραφείων στο Trondheim της Νορβηγίας (Γεωγραφικό πλάτος: 63.43°) και πενήντα συμμετέχοντες αξιολόγησαν στερεοσκοπικές εικόνες βαθμολογώντας εννέα χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής ποιότητας κάτω από συνθήκες καθαρού και

συννεφιασμένου ουρανού. Τα αποτελέσματα κάτω από τον καθαρό ουρανό δείχνουν αύξηση της αντίθεσης φωτεινότητας όταν χρησιμοποιείται ένα ράφι φωτισμού προκαλώντας προβλήματα θάμβωσης και κάνοντας το δωμάτιο λιγότερο ευχάριστο από άλλα συστήματα φ.φ. (όπως αντανακλαστικές περσίδες). Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, οι αντανακλαστικές περσίδες έλαβαν τις υψηλότερες βαθμολογίες σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες.



## 2.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Οι Moazzeni και Ghiabaklou [139] προσομοίωσαν διάφορες παραμέτρους που αφορούν την απόδοση των ραφιών φωτισμού σε ένα χώρο εκπαίδευσης για τέσσερις (4) προσανατολισμούς. Το εξωτερικό βάθος των ραφιών φωτισμού κυμαίνονταν από 0.3 έως 1.2 m, το εσωτερικό πλάτος κυμαινόταν από 0 m έως 1 m, ενώ η γωνία κλίσης τους ήταν ίση με 0°, 5°, 10°, 20° και 30°. Ο εκπαιδευτικός χώρος που χρησιμοποιήθηκε, ήταν στην Τεχεράνη, Ιράν (Γεωγραφικό πλάτος: 35.68°), με διαστάσεις 7 × 8 m, ύψος οροφής 3.5 m και WWR 50%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τον Νότιο προσανατολισμό, οι αυξημένες διαστάσεις του ραφιού φωτισμού είχαν σαν αποτέλεσμα την αύξηση, στο επίπεδο εργασίας, των επιπέδων φ.φ., ενώ η θάμβωση παρουσίασε μείωση σε σύγκριση με το δωμάτιο χωρίς το ράφι φωτισμού εγκατεστημένο. Φαίνεται ότι τα οριζόντια εξωτερικά ράφια φωτισμού είναι πιο αποτελεσματικά από αυτά που έχουν γωνία κλίσης 30°. Για τους Βόρειους προσανατολισμούς, η έλλειψη της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας οδήγησε σε μια χειρότερη απόδοση του χώρου από την τοποθέτηση του ραφιού. Καθώς το εσωτερικό και εξωτερικό βάθος των ραφιών αυξανόταν, ο φ.φ. μειώθηκε ενώ η γωνία κλίσης τους δεν είχε σημαντική επίδραση. Τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ίδια για τους Ανατολικούς και Δυτικούς προσανατολισμούς. Γενικά, η αύξηση των διαστάσεων των εσωτερικών και εξωτερικών ραφιών φωτισμού μειώνει τις περιοχές που είναι υπερβολικά φωτισμένες, λόγω της βελτίωσης της σκίασης του παραθύρου. Η άνοδος της γωνίας κλίσης του ραφιού προκάλεσε αύξηση της διείσδυσης του άμεσου ηλιακού φωτός, η οποία με τη σειρά του επηρέασε την απόδοση του χώρου από πλευράς φ.φ.

Ο Moore [140] πρότεινε ότι η βέλτιστη κλίση ενός λευκού ραφιού φωτισμού μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση για Νότια προσανατολισμένους χώρους:

$$\text{Slope Angle} = 40^\circ - \left(\text{Latitude}/2\right) \quad (25)$$

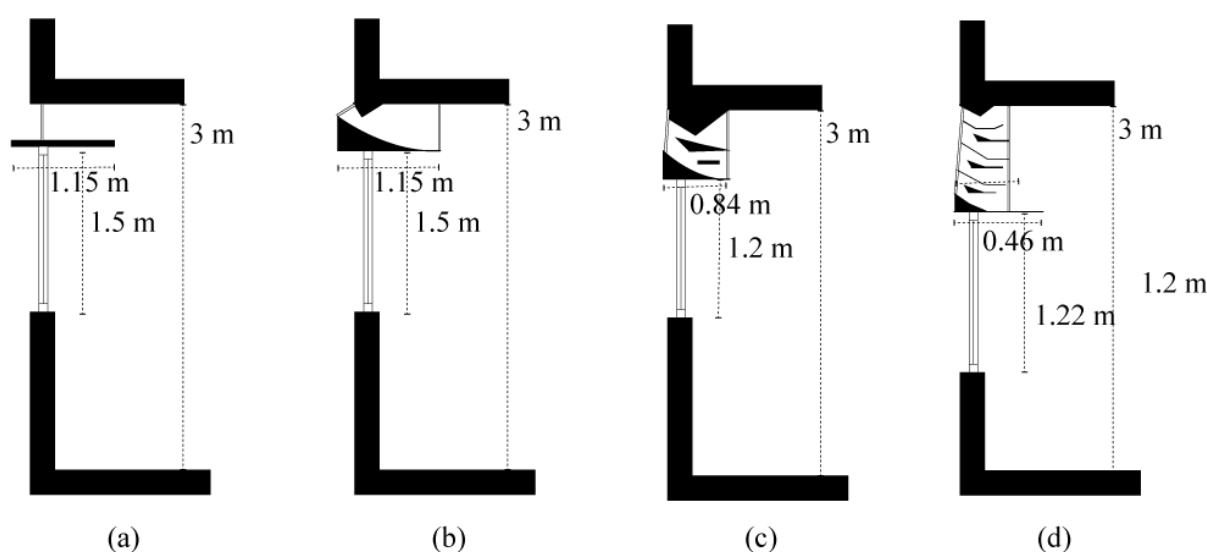
σε ένα εύρος  $\pm 15^\circ$  προς Ανατολικά-Δυτικά.

Η Meresi [141] εξέτασε μια τυπική αίθουσα διδασκαλίας με Νότιο προσανατολισμό στην Αθήνα, Ελλάδα (Γεωγραφικό πλάτος: 37.98°) χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επαληθευτήκαν με μετρήσεις του Παράγοντα Φ.Φ. που διεξήχθησαν στην αίθουσα διδασκαλίας. Το σύστημα αποτελούταν από ένα ράφι φωτισμού και κινητές εξωτερικές ημι-διαφανείς περσίδες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καλύτερη περίπτωση από πλευράς αύξησης των επιπέδων φυσικού φωτισμού και της μείωσης της θάμβωσης ήταν εκείνη που είχε τοποθετημένο το ράφι φωτισμού σε απόσταση 2 m από το δάπεδο και βάθος  $0.8 \pm 0.2$  m και γωνία κλίσης μεταξύ 10° και 20° με ανακλαστικότητα ίση με 90%.

Η χρήση ενός αντανακλαστικού ραφιού φωτισμού για τη μείωση της παρουσίας θάμβωσης και την αναδιανομή του φ.φ. σε ένα εκπαιδευτικό ανοιχτού χώρου στούντιο διερευνήθηκε από την Al-Sallal [142]. Σε αυτή την έρευνα εξετάστηκαν οι διάφορες γωνίες κλίσης ενός ραφιού φωτισμού που εγκαταστάθηκαν στη Βόρεια πρόσοψη μαζί με άλλες παραμέτρους σχεδιασμού, όπως το ύψος του ραφιού και την κλίση της οροφής. Η μέση τιμή του Παράγοντα Φ.Φ. για την βασική περίπτωση ήταν 30.28%. Για την περίπτωση της κεκλιμένης οροφής η μέση τιμή του Παράγοντα Φ.Φ. ήταν 29.24% και τα επίπεδα φωτισμού στα περισσότερα σημεία μικρότερα από 1 m, στο στούντιο ήταν μικρότερα από 2000 lx. Αν και η κλίση της οροφής δεν επηρέαζε σημαντικά την απόδοση του χώρου, παρατηρήθηκε πιο ομοιόμορφη κατανομή των επιπέδων του Παράγοντα Φ.Φ. σε όλο το ύψος του χώρου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κεκλιμένη οροφή 5° με γωνία κλίσης για το ράφι φωτισμού ίση με 60°, συνέβαλε στη μείωση των διαφορών φωτισμού μεταξύ της οροφής και των πίσω τοιχωμάτων.

### 2.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Τον Μάιο του 1996, οι Lee et al. [143] πρότειναν ένα ανακλαστικό καμπύλο ράφι φωτισμού με ένα μικρό άνοιγμα εισόδου ικανό να ανακατευθύνει το ηλιακό φως σε βάθη 9 m από το παράθυρο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου κλίμακας απέδειξαν ότι η ομοιομορφία του φωτισμού βελτιώθηκε περισσότερο από ένα τυπικό φεγγίτη. Το σύστημα εγκαταστάθηκε σε πραγματική κλίμακα, όπου πολλοί επισκέπτες ερωτήθηκαν για τη γνώμη τους σχετικά με θέματα οπτικής άνεσης. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.



**Εικόνα 24:** Σχηματική αναπαράσταση των σεναρίων που εξετάστηκαν στο [144].

Οι Beltran et al. [144] εξέτασαν διάφορα σχέδια ραφιών φωτισμού μαζί με τους φωτοσωλήνες. Το έργο αυτό ήταν συνέχεια μιας προηγούμενης έρευνας [108]. Συνολικά, τέσσερα (4) συστήματα εξετάστηκαν στο Λος Άντζελες (Γεωγραφικό πλάτος: 34° N) για Νότιους και Ανατολικούς/Δυτικούς προσανατολισμούς. Τα σχέδια των ραφιών φωτισμού που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 24. Τα συστήματα σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας τεχνικές ιχνηλάτησης ακτίνων (ray-tracing techniques) και μετρήσεις φ.φ. σε μοντέλα υπό-κλίμακα και ακολούθως η προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς τους έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό DOE 2.1E. Το δωμάτιο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη είχε ένα παράθυρο (clerestory window) με σχισμές ύψους 0.5 m ενώ το ίδιο το δωμάτιο είχε 3 μέτρα ύψος. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διατάξεις (4) ραφιών φωτισμού:

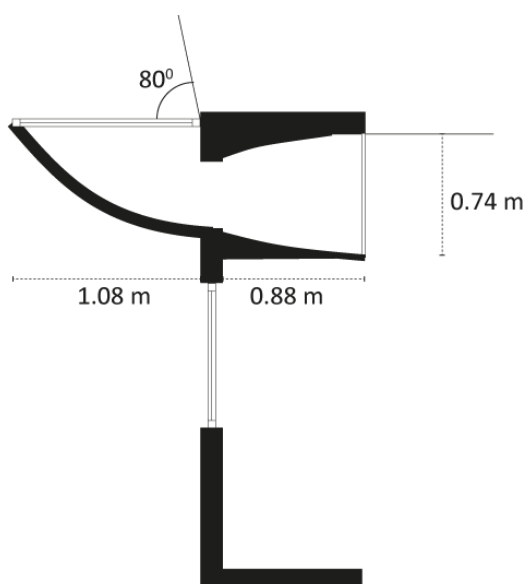
1. Ένα οριζόντιο στατικό εξωτερικό και εσωτερικό (βάθους 1.1 m συνολικά) ράφι φωτισμού, του οποίου η ανώτερη επιφάνεια είχε λευκό χρώμα (a).
2. Ένα ενιαίο καμπύλο ράφι φωτισμού με πλευρικούς ανακλαστήρες των οποίων οι επιφάνειες είχαν καλυφθεί με ανακλαστικό φιλμ (b).
3. Ένα δι-επίπεδο (bi-level) ράφι φωτισμού (c).
4. Ένα πολύ-επίπεδο (multi-level) ράφι φωτισμού (d).

Οι καμπύλες διαμορφώσεις (a, c, d) αποτελούνταν από μια τμηματική επιφάνεια για την ανακατεύθυνση των ηλιακών ακτινών από την μεταβολή της γωνίας ύψους του ήλιου. Η κλίση κάθε τμήματος υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό του παραθύρου και το γεωγραφικό πλάτος, για να εξασφαλιστεί μια βέλτιστη γωνία για την ανακατεύθυνση μέσα στον χώρο. Αυτά τα τμήματα επικαλύφθηκαν με λεπτό φιλμ υψηλής ανακλαστικότητας (ανακλαστικότητα 88%). Η περιοχή ανοίγματος για το ράφι φωτισμού μονού-επιπέδου ήταν 2.8% της επιφάνειας του δαπέδου και επιτεύχθηκαν επίπεδα φωτισμού άνω των 200 lx στην επιφάνεια εργασίας καθόλη τη διάρκεια του έτους από τις 10:30 έως τις 13:30 και στα 8,4 m από το παράθυρο κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού. Το δι-επίπεδο ράφι φωτισμού είχε μια περιοχή ανοίγματος περισσότερο από δύο (2) φορές εκείνη του μονού-επιπέδου και επιτύγχανε ακόμη υψηλότερα επίπεδα φωτισμού από την βασική περίπτωση.

Συνολικά, τα ράφια φωτισμού μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα φωτισμού του εσωτερικού χώρου σε μια ζώνη μεταξύ 4.6 και 9.1 m μακριά από το παράθυρο κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού με μια μάλλον μικρή περιοχή ανοίγματος. Αναπτύσσοντας περαιτέρω τα προαναφερθέντα πρωτότυπα σχέδια παρουσιάστηκαν και νέες μελέτες που βελτίωναν την απόδοση των επιπέδων του φ.φ. σε πιο πλάγιες/χαμηλές ηλιακές γωνίες στο παράθυρο [145, 146].

Ο Lee et al. [145] πρότειναν διάτρητα ράφια φωτισμού (perforated light shelves) με στόχο την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της πίεσης του ανέμου όταν εγκαθίστανται σε πολυώροφα κτίρια. Χρησιμοποιήθηκε ένας πειραματικός χώρος πραγματικής κλίμακας για την αξιολόγηση της απόδοσης από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας φωτισμού. Το διάτρητο ράφι κατασκευάστηκε με διάτρηση οπών διαφόρων σχημάτων στην επιφάνεια του. Οι

παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν ο λόγος εξαερισμού (vent ratio) ο οποίος ορίστηκε ως ο λόγος της διάτρητης περιοχής προς ολόκληρη την περιοχή του ραφιού και της γωνίας κλίσης (tilt angle) του ραφιού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση του λόγου εξαερισμού από 29.5% σε 35.3% υπάρχει αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας φωτισμού από 20.6% σε 48.3% αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από μια περίπτωση της οποίας το ράφι φωτισμού δεν ήταν διάτρητο. Ο λόγος για το αποτέλεσμα αυτό ήταν η μειωμένη ποσότητα φ.φ. που εισάγεται στον εσωτερικό χώρο μέσω της αντανάκλασης λόγω της διάτρησης του ραφιού. Ωστόσο, η κατανάλωση ενέργειας φωτισμού μειώνεται όταν τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων περιπτώσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα από την περίπτωση όπου δεν είχε τοποθετηθεί ράφι στο παράθυρο.



**Εικόνα 25:** Σχηματική αναπαράσταση του ανειδωλικού συστήματος φ.φ. Όπως παρουσιάστηκε στο [40].

Οι Scartezzini και Gourret [40] παρουσίασαν μια ανάλυση απόδοσης τριών (3) ανειδωλικών συστημάτων φ.φ. εγκατεστημένων σε ένα βαθύ χώρο 6.55 m στη Lausanne (Γεωγραφικό πλάτος: 46,51°). Ένα από αυτά ήταν ένα ολοκληρωμένο σύστημα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 25, το οποίο αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις για δύο (2) τύπους διαμορφώσεων οροφής (επίπεδη και κεκλιμένη). Και στις δύο (2) περιπτώσεις, το σύστημα παρουσίασε αύξηση του Παράγοντα Φ.Φ. σε σύγκριση με μια πρόσοψη αναφοράς με συμβατικά διπλά τζάμια. Στο βαθύτερο μέρος της αίθουσας, η αύξηση του Π.Φ.Φ. ήταν 1.4

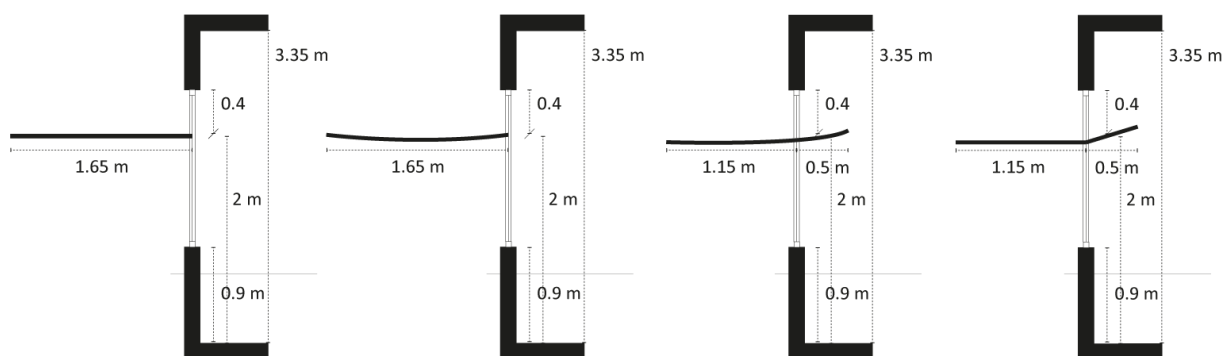
φορές μεγαλύτερη από την τιμή της περίπτωσης αναφοράς, όταν δεν υπήρχε εξωτερικό εμπόδιο και 1.7 φορές όταν προσομοιώθηκε μέσε σε ένα αστικό περιβάλλον.

Μία άλλη έρευνα που ασχολείται με την τροποποίηση της γεωμετρίας της οροφής είναι αυτή των Freewan et al. [148]. Στην παρούσα εργασία, οι συγγραφείς μελέτησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων γεωμετρικών οροφών με ένα ράφι φωτισμού, χρησιμοποιώντας πειράματα με μοντέλα κλίμακας και προσομοιώσεις με το Radiance σε ένα βαθύ χώρο με πλευρικά ανοίγματα. Διαφορετικές διαμορφώσεις οροφής δοκιμάστηκαν συμπεριλαμβανομένων κυρτών (curved), λοξοτομημένων (chamfered), κεκλιμένων προς τα επάνω (sloped upward) από το παράθυρο και κεκλιμένων προς τα κάτω (sloped downward) από το παράθυρο. Η αξιολόγηση της απόδοσης των ραφιών λόγω των τροποποιημένων γεωμετρικών οροφών βασίζεται στον υπολογισμό των επιπέδων φωτισμού και της ομοιομορφίας στο επίπεδο εργασίας.

Το μοντέλο κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε αντιπροσώπευε ένα δωμάτιο με Νότιο προσανατολισμό στο Irbid, Ιορδανία (Γεωγραφικό πλάτος: 32,55°) με διαστάσεις 6 × 8 m με ύψος οροφής 3.25 m και WWR 40%. Τα επίπεδα φωτισμού αυξήθηκαν στο πίσω μέρος του δωματίου κατά 21 – 36% και μειώθηκαν κατά 20 – 55% μπροστά όταν χρησιμοποιήθηκε καμπύλη ή λοξότμητη οροφή. Όταν άλλαξε ο τύπος ανάκλασης της επιφάνειας οροφής σε κατοπτρική, παρατηρήθηκε μια περαιτέρω αύξηση των επιπέδων φωτισμού στο πίσω μέρος του δωματίου. Η αύξηση αυτή είναι 52% και 30% για καμπύλες και λοξοτομημένες οροφές αντιστοίχως σε σύγκριση με τις εκτιμώμενες τιμές φωτισμού για επίπεδη οροφή. Επιπλέον, τα επίπεδα φωτισμού στο μπροστινό μέρος του δωματίου μειώθηκαν κατά 27% και 30% για καμπύλες και λοξές οροφές αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές, το καλύτερο σχήμα οροφής όσον αφορά τα επίπεδα φ.φ. και την ομοιομορφία ήταν το κυρτό.

Επεκτείνοντας την προηγούμενη δουλειά του, ο Freewan [149] εξέτασε σε αυτή την εργασία τον συνδυασμό καμπύλων οροφών με διάφορα κυρτά ράφια φωτισμού ράφια (Εικόνα 26). Το Νότιο προσανατολισμένο δωμάτιο που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είχε διαστάσεις 8 × 6 m με ύψος οροφής 3.25 m και αναλογία παράθυρου-τοιχίου 35.8%. Τόσο τα εξωτερικά κυρτά όσο και τα λοξά εξωτερικά ράφια φωτισμού απέδωσαν καλύτερα όταν

χρησιμοποιήθηκε καμπύλη οροφή. Επιπλέον, η ομοιομορφία βελτιώθηκε σε σύγκριση με ένα οριζόντιο ράφι φωτισμού.



**Εικόνα 26:** Σχέδια διατάξεων ραφιών φωτισμού που εξετάστηκαν στο [149].

Ο Xue et al. [150] εξέτασαν την απόδοση ενός ραφιού φωτισμού που διαμορφώθηκε από γυαλί (meniscus glazing panel). Το πάχος και η γωνία καμπυλότητας (curvature angle) ήταν οι παράμετροι που μελετήθηκαν με τις οποίες και πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση της απόδοσης του ραφιού. Τα αποτελέσματα, μετά από προσομοιώσεις ενός χώρου προσανατολισμένου προς Νότο στο Χονγκ Κονγκ, Κίνα (Γεωγραφικό πλάτος:  $22.39^\circ$  N) διαστάσεων  $10 \times 15$  m και ύψους οροφής 3 m με αναλογία παραθύρου-τοίχου 52% έδειξαν ότι το meniscus glazing panel ενισχύει το φωτισμό το καλοκαίρι και τον μειώνει το χειμώνα, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με την ομοιομορφία. Η αύξηση στα επίπεδα φωτισμού παρατηρείται, όταν η γωνία καμπυλότητας κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $44.3^\circ$  για υψηλές γωνίες ύψους του ήλιου και μεταξύ  $44.3^\circ$  και  $90^\circ$  για χαμηλά ηλιακά ύψη.

## 2.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΑΦΙΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ

Τα δυναμικά ράφια (πχ. Ράφια φωτισμού που ιχνηλατούν τον ήλιο) χρειάζονται μια στρατηγική ελέγχου για να προσαρμόσουν τη θέση τους σε σχέση με παράθυρο (clerestory window). Έτσι, η λειτουργία τους βασίζεται στην περιστροφή τους ανάλογα με τη θέση του ήλιου και σημείο στόχευσης στην οροφή [151] ή την εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό που επιτυγχάνεται [152].

Το 1983, οι Smart και Ballinger [72] πρότειναν ένα σύνολο κατόπτρων ιχνηλάτησης σε μία ισημερινή βάση στήριξης (equatorial mount). Αυτή η διάταξη επιλέχθηκε επειδή η ανακλώμενη δέσμη είναι παράλληλη με τον άξονα ορθής αναφοράς (right-ascension axis) και η περιοχή συλλογής μπορεί να μεγιστοποιηθεί. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση των φωτιστικών σωμάτων μέχρι 200 Wh/m<sup>2</sup> day μπορεί να επιτευχθεί σε περιοχές όπου ο κάθετος ηλιακός φωτισμός (normal beam illuminance) υπερβαίνει τα 50 Klx για τουλάχιστον τέσσερις (4) ώρες την ημέρα.

Ο Franco [153] εξέτασε τη διαφορά ανάμεσα στα στατικά και δυναμικά ράφια φωτισμού (ρύθμιση γωνίας κλίσης) χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις και μετρήσεις μοντέλων υπό κλίμακα στο Σάο Πάολο, Βραζιλία (Γεωγραφικό πλάτος: -23° S). Η συγκεκριμένη έρευνα ασχολείται και με την αύξηση των θερμικών κερδών, ένα μάλλον σπάνιο γεγονός στη βιβλιογραφία. Τα μοντέλα κλίμακας Βόρειου προσανατολισμού που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 0.6 × 1 m με ύψος οροφής ίσο με 0.6 m και αναλογία παραθύρου-τοιχού 100%. Για τις μετρήσεις φωτισμού και ακτινοβολίας δύο (2) μακέτες χρησιμοποιήθηκαν τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη με τη μία να έχει τοποθετημένο ένα στατικό ράφι φωτισμού και την άλλη ένα δυναμικό χρησιμοποιώντας σαν υλικό ανακλαστικό αλουμίνιο (polished aluminum) στην πάνω επιφάνεια. Σε σύγκριση με τις συνήθεις οριζόντιες συσκευές σκίασης, τα θερμικά κέρδη από τη χρήση ραφιών φωτισμού αυξήθηκαν, αλλά αυτό δεν φάνηκε να δημιουργεί συνθήκες υπερθέρμανσης. Τα στατικά ράφια φωτισμού, βελτιώνουν την ομοιομορφία, αλλά μειώνουν τα επίπεδα φωτισμού κάτω από συννεφιασμένες συνθήκες. Από την άλλη πλευρά, τα δυναμικά θα πρέπει να ρυθμίζονται με τη βέλτιστη κλίση ανάλογα με τη θέση του ήλιου, διαφορετικά, θα έχουν απόδοση μικρότερη από τα στατικά.

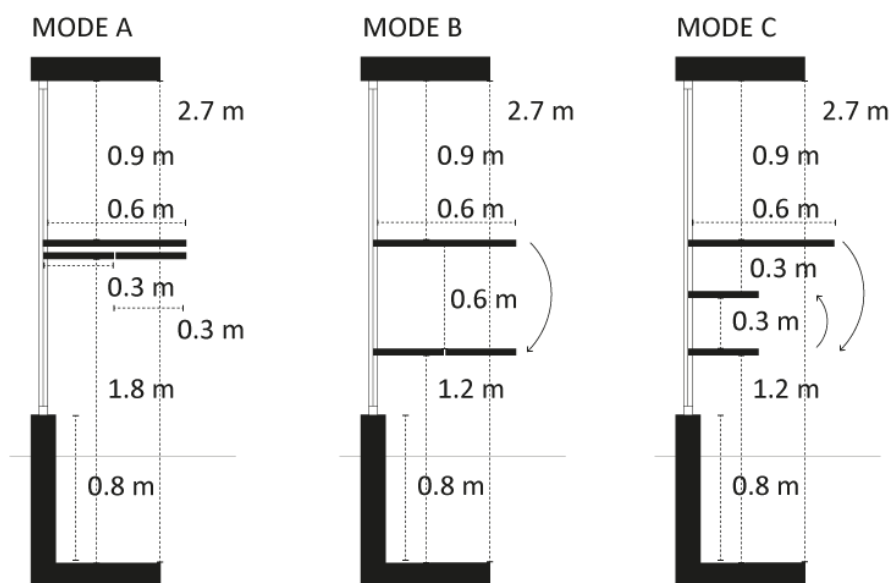


Οι Dogan και Stec [154] χρησιμοποίησαν μια διαδικασία προσομοίωσης για να βελτιστοποιήσουν τη σχεδίαση ενός οριζόντιου ραφιού φωτισμού, που αποτελείται από μια σειρά πλακιδίων από ανακλαστικό υλικό που μπορούν να περιστρέφονται γύρω από δύο (2) άξονες ιχνηλατώντας τον ήλιο. Πέντε (5) εναλλακτικά σενάρια εξετάστηκαν για να επιλέξουν την πιο αποδοτική παραλλαγή. Το σύστημα αποτελούταν από ένα πλαίσιο το οποίο συγκρατεί μια σειρά από δεκαπέντε (15) πλακίδια. Δύο (2) βηματικοί κινητήρες (stepper motors) χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή του συστήματος στους δύο (2) άξονες. Το σύστημα προσομοιώθηκε σε τρεις τοποθεσίες, τη Νέα Υόρκη (Γεωγραφικό πλάτος: 40.70°), το Anchorage (Γεωγραφικό πλάτος: 61.21°) και το Phoenix (Γεωγραφικό πλάτος: 33.44°), χρησιμοποιώντας ένα χώρο διαστάσεων 9 × 12 m με ύψος οροφής 3 m. Για τις δύο (2) πρώτες τοποθεσίες, χρησιμοποιήθηκε Νότιος προσανατολισμός, ενώ για την Τρίτη τοποθεσία η εξετάστηκαν και η Ανατολή και Δύση επίσης. Τα ευρήματα έδειξαν ότι το δυναμικό ράφι αύξησε τα επίπεδα φ.φ. με αποτέλεσμα την αύξηση της εκτιμώμενης εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας από τον φωτισμό σε σύγκριση με ένα στατικό καθρέφτη κατά 8% για (Phoenix EW) και 22% για (Phoenix S).

Ο Raphael [152] εξέτασε ένα ράφι φωτισμού με προσαρμοστική γεωμετρία. Αυτό αποτελούσε ένα εξωτερικό τμήμα το οποίο μπορούσε να περιστραφεί και ένα εσωτερικό τμήμα του οποίου το βάθος μπορούσε να ρυθμιστεί. Χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις με το Radiance, κατάφερε να εκτιμήσει την ωριαία μεταβολή της γωνίας του ραφιού για ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτιστικά σε ένα κτίριο γραφείων στη Σιγκαπούρη (Γεωγραφικό πλάτος: 1.35° N). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας φωτισμού περίπου 12% είναι δυνατή σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό στατικό ράφι φωτισμού.

Οι Lim και Heng [155] επεκτείνουν την προαναφερθείσα μελέτη [96] εξετάζοντας την απόδοση του φ.φ. διαφόρων διατάξεων εσωτερικών ραφιών φωτισμού με χρήση του λογισμικού Radiance για προσομοιώσεις και μοντέλων υπό-κλίμακα. Και πάλι, οι μετρήσεις διεξήχθησαν με τα μοντέλα το ένα δίπλα στο άλλο, το ένα εξοπλισμένο με τις εσωτερικές διαμορφώσεις των ραφιών (Εικόνα 27) και το άλλο ενεργώντας ως υπόθεση αναφοράς. Τα ευρήματα δείχνουν ότι το ύψος του άνω παραθύρου (clerestory window) διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στον προσδιορισμό της απόδοσης των ραφιών φωτισμού. Σε σύγκριση με

την περίπτωση αναφοράς, παρατηρήθηκε μείωση των επιπέδων φωτισμού, αλλά παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της ομοιομορφίας. Τα ράφια με ύψος 0.9 m είχαν υψηλότερες τιμές φωτισμού από τα ράφια με ύψος φεγγίτη (clerestory) 0.6 m αλλά όταν συγκρίθηκαν οι βέλτιστες περιπτώσεις με το σενάριο αναφοράς σημειώθηκε μείωση του ποσοστού DF από -62.0% σε 34.1%. Οι βέλτιστες περιπτώσεις έδειξαν σημαντική αύξηση του ποσοστού ομοιομορφίας περίπου 178.6%.

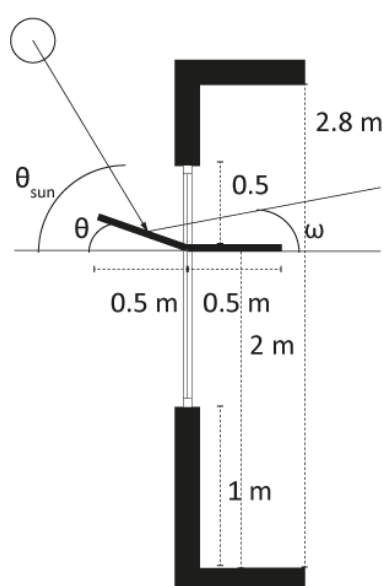


**Εικόνα 27:** Σχηματική απεικόνιση της δυναμικής λειτουργίας του ραφιού φωτισμού με βάση τις βέλτιστες περιπτώσεις (modes' A, B and C) που προτάθηκε στο [155].

Με βάση τα συμπεράσματα, οι συγγραφείς πρότειναν ότι υπό συνθήκες καθαρού ουρανού η απόδοση φ.φ. των ραφιών φωτισμού εξαρτάται από τη δυναμική κίνηση του ήλιου και πρότειναν ένα δυναμικό έλεγχο του ραφιού με ρυθμιζόμενο ύψος που ανταποκρίνεται στις βέλτιστες διαμορφώσεις. Οι συγγραφείς πρότειναν έναν έλεγχο τριών-βημάτων (three-step control) της ανάπτυξης των ραφιών που θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη χρήση ενός αισθητήρα φωτισμού για τη μέτρηση της εξωτερικής φωτεινότητας και αν τιμές κάτω των 20 Klx παρατηρούνταν (που υποτίθεται ότι αντιπροσωπεύουν έναν νεφοσκεπή ουρανό στον τροπικό) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η πρώτη διαμόρφωση. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το δυναμικό εσωτερικό ράφι θα μπορούσε να προγραμματιστεί για να διαμορφώσει τα άλλα δύο βήματα, με βάση τους προσανατολισμούς, μήνες και ώρες.

Οι Kostantoglou και Tsangrassoulis [153] εξέτασαν μια μέθοδο ελέγχου βασισμένη στη γωνία κλίσης ενός εξωτερικού ραφιού φωτισμού καθρέφτη ανάλογα με τη θέση του ήλιου και μια προκαθορισμένη περιοχή στόχου στην οροφή και ανέλυσαν την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας φωτισμού που προέκυψε. Δύο (2) περιπτώσεις προσομοιώθηκαν σε ένα βαθύ, Νότια προσανατολισμένο χώρο γραφείου με διαστάσεις  $4 \times 7 \times 2.8$  m:

- α. Με στατικό ράφι φωτισμού και
- β. Με αυτόματα ελεγχόμενο εξωτερικό ράφι, στην Αθήνα, Ελλάδα (Γεωγραφικό πλάτος:  $37.8^\circ$ ).



**Εικόνα 28:** Ρυθμιζόμενο ράφι φωτισμού που αντανακλά το φως του ηλίου σε συγκεκριμένη περιοχή στην οροφή που εξετάστηκε στο [153].

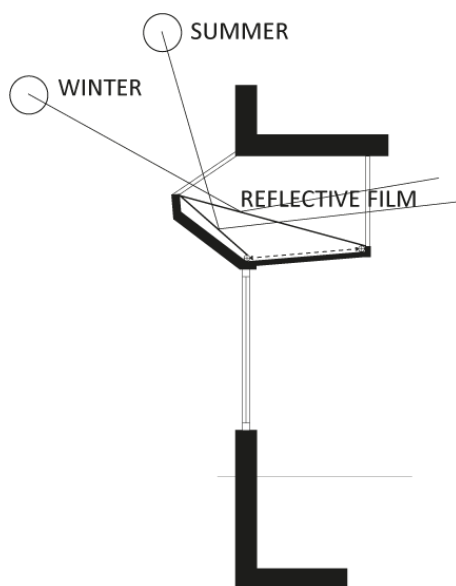
Χρησιμοποιώντας την παραπάνω Εικόνα 28, η γωνία κλίσης του ραφιού φωτισμού ( $\theta$ ) ορίστηκε ως εξής:

$$\theta = (\theta_{\text{sun}} - \omega) / 2 \quad (26)$$

Όπου,

- $\theta$ : Γωνία κλίσης (Tilt angle) του ραφιού φωτισμού.
- $\theta_{\text{sun}}$ : Η προβολή της γωνίας ύψους του ήλιου (Projected sun's elevation angle).
- $\omega$ : Σταθερή γωνία που ορίζεται από το σημείο στόχευσης.

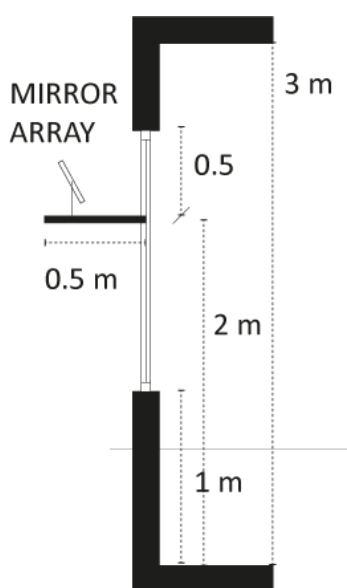
Οι προκύπτουσες τιμές της Αυτονομίας Φ.Φ. εξαρτώνται έντονα από το μέγεθος του παραθύρου. Χρησιμοποιώντας μόνο το άνω παράθυρο (clerestory window) (Αναλογία παραθύρου-τοιχού 6.2%), η αύξηση της Αυτονομίας Φ.Φ. ήταν 5 φορές υψηλότερη από την τιμή αναφοράς (χωρίς ράφι) ενώ όταν χρησιμοποιήθηκε και παράθυρο θέασης (view window), η αύξηση ήταν μόνο 1.15.



**Εικόνα 29:** Αρχή λειτουργίας του συστήματος Varla που παρουσιάστηκε στο [156].

Μια ενδιαφέρουσα ιδέα είναι αυτή που προτάθηκε από τους Howard et al. [156]. Το VARLA (Variable Area Light Reflecting Assemblies), είναι ένα δυναμικό σύστημα ραφιού φωτισμού που αντανakλά το φως σε ένα κτίριο στη Νότια πρόσοψη (South elevation) ή στην οροφή και χρησιμοποιεί τόσο το άμεσο όσο και το διάχυτο ηλιακό φως. Αυτή η διαμόρφωση μπορεί να εκτελεστεί αποτελεσματικότερα κάτω από όλες τις γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (incident sun angles). Χρησιμοποιώντας ένα μοτέρ συνεχούς ρεύματος (DC), η επιφάνεια της αντανakλαστικής πλαστικής μεμβράνης μπορεί να ρυθμιστεί πάνω από ένα σύστημα κυλίνδρων ιχνηλάτησης με ελατήριο όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 29. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος περιορίζεται σε βάθος περίπου 9 m ανάλογα με τις συνθήκες του ουρανού και την επάρκεια του χώρου τοποθέτησης. Η περίοδος αποπληρωμής για το VARLA κυμαίνεται από τρία (3) έως είκοσι (20) χρόνια, ανάλογα με διάφορες παραμέτρους όπως το κλίμα, ο λόγος της επιφάνειας συλλογής ανά φωτισμένη επιφάνεια δαπέδου, τύπος κτιρίου, κλπ.

Οι Kontadakis et al. [71] και Kontadakis και Tangrassoulis [157] αξιολόγησαν την απόδοση φ.φ. σε έναν βαθύ χώρο γραφείου μαζί με το ενεργειακό του ισοζύγιο όταν χρησιμοποιήθηκε ένα ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τοποθετημένο σε ένα ράφι φωτισμού (Εικόνα 30). Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση του συστήματος υποδηλώνουν τη δυνατότητα σημαντικής βελτίωσης των επιπέδων φ.φ. των απομακρυσμένων περιοχών που κυμαίνονται από 30% έως 50%, ανάλογα με το εμβαδόν του καθρέφτη και βελτίωση της ομοιομορφίας (< 40%) σε σύγκριση την περίπτωση αναφοράς (μη σκιασμένο/ χωρίς εξωτερικά εμπόδια). Αν και μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση της ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα φωτισμού, τα ψυκτικά φορτία αυξάνονται σημαντικά, μειώνοντας τα οφέλη από την εξοικονόμηση ενέργειας του ηλεκτροφωτισμού. Τα χαρακτηριστικά του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και η αξιολόγηση του περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3 αναλυτικά.



**Εικόνα 30:** Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ανακατεύθυνσης της Ηλιακής ακτινοβολίας που εξετάστηκε στα [71, 157].

## 2.3 ΣΥΝΟΨΗ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας ανασκόπησης, δεν έχει παρουσιαστεί έρευνα που να εξετάζει τη βέλτιστη ανάλυση κόστους (cost-optimal analysis) για τα ράφια φωτισμού. Για τον προσδιορισμό της σχέσης κόστους/αποτελεσματικότητας, απαιτείται μια ανάλυση του κύκλου ζωής, όπου όλες οι δαπάνες που σχετίζονται με το ράφι (αρχική εγκατάσταση, λειτουργία, συντήρηση) αξιολογούνται κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του. Τα συμβατικά εξωτερικά επίπεδα ράφια φωτισμού κοστίζουν περίπου ~100\$ ανά m<sup>2</sup> [158]. Ανάλογα με τη γεωμετρική μορφή του και το φινίρισμα της ανώτερης επιφάνειας, το κόστος του ραφίου φωτισμού μπορεί να τροποποιηθεί σημαντικά. Σε γενικές γραμμές, τα ράφια δεν είναι τυποποιημένα προϊόντα, καθώς τα εξωτερικά ράφια φωτισμού σχεδιάζονται ως μέρος της πρόσοψης του κτιρίου. Ωστόσο, οι εσωτερικές διαμορφώσεις τους είναι σήμερα διαθέσιμες σε προκατασκευασμένες μονάδες [159-163].

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια επισκόπηση της έρευνας που πραγματοποιήθηκε αναφορικά με τα ράφια φωτισμού τα τελευταία 34 χρόνια εξετάζοντας σαράντα αναφορές που μελέτησαν τις επιπτώσεις των ραφίων φωτισμού στο δομημένο περιβάλλον. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (92%) που εξετάστηκαν, θεωρήθηκε ένας ανοικτός χώρος γραφείων με νοτιοανατολικό προσανατολισμό με βάθος από 5 m έως 9 m με ύψος οροφής μεταξύ 2.7 και 3.5 m και αναλογία παραθύρου προς το τοίχο μεταξύ 10% και 100% κάτω από κλίματα με υψηλή διαθεσιμότητα φ.φ. Σε ένα μικρό ποσοστό (18%) των περιπτώσεων, αξιολογήθηκε η απόδοση των ραφίων σε μακέτες υπό-κλίμακα, δεδομένου ότι οι υπολογιστικές προσομοιώσεις ή τα πειράματα με μοντέλα κλίμακας θεωρούνται ακριβές και οικονομικά αποδοτικές προσεγγίσεις.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα προσομοίωσης θα πρέπει να εξεταστούν με προσοχή, ιδίως όταν χρησιμοποιείται ένας γεωμετρικά και οπτικά πολύπλοκος σχεδιασμός, καθώς αυτά απαιτούν επαλήθευση έναντι μετρήσεων με μοντέλα υπό-κλίμακα. Τα οριζόντια ράφια αξιολογούνται συχνότερα, ενώ το 37% των περιπτώσεων αντιμετωπίζονται με καμπύλες μορφές. Η πλειοψηφία των συστημάτων (82%) που εξετάστηκαν σε αυτήν την ανασκόπηση ήταν

στατικά και φαίνεται ότι η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς τους είναι αρκετά περιορισμένη.

Δεν είναι εύκολο να εξαχθούν πρακτικοί κανόνες από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, δεδομένου ότι τα προβλήματα σχεδιασμού που συνεπάγονται από την υιοθέτηση συστημάτων ραφιών φωτισμού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε κάθε περίπτωση. Επιπρόσθετα, δεδομένου των διαφορετικών διαμορφώσεων των χώρων που έχουν εξεταστεί σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, είτε για την διεξαγωγή μετρήσεων είτε για προσομοιώσεις καθιστά δύσκολη την άμεση σύγκριση των επιδόσεων διαφόρων σχεδίων με τη χρησιμοποίηση των υφιστάμενων αποτελεσμάτων της έρευνας.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες κοινές διαπιστώσεις:

- Τα ράφια φωτισμού αποδίδουν διαφορετικά κάτω από διάφορες συνθήκες ουρανού. Η λιγότερο ευνοϊκή συνθήκη είναι αυτή που σχετίζεται με τις συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Αυτή η κατάσταση έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση των εσωτερικών επιπέδων φωτισμού, αν και μπορεί να επιτευχθεί ελαφρά αύξηση της ομοιομορφίας. Ωστόσο, φαίνεται ότι η χρήση ενός ανειδωλικού ραφιού μπορεί να αυξήσει τον Παράγοντα Φ.Φ. σε σύγκριση με μια πρόσοψη αναφοράς με συμβατικά διπλά τζάμια. Στα βαθύτερα τμήματα του χώρου, αυτή η αύξηση ήταν 1.7 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς όταν προσομοιώθηκε ένα αστικό περιβάλλον [40].
- Τα ράφια φωτισμού λειτουργούν καλύτερα όταν εγκαθίστανται σε προσόψεις με Νότιο προσανατολισμό.
- Τα ράφια φωτισμού τοποθετούνται συνήθως πάνω από το επίπεδο των ματιών για να αποφευχθεί η θάμβωση από την ανώτερη επιφάνεια τους. Ωστόσο, στο Collège la Vanoise στο Modane της Γαλλίας, τα Νότια περβάζια παραθύρων χρησιμοποιούνται ως ανακλαστικά ράφια με κλίση προς τα Νότια για να αποφευχθεί η θάμβωση. Λόγω αυτής της κλίσης, το ράφι παρουσιάζει μια εποχική επιλεκτικότητα στο ανακλώμενο φως του ήλιου.

- Τα εξωτερικά ράφια φωτισμού μπορούν να σκιάσουν το κατώτερο παράθυρο θέασης και, αν έχουν σχεδιαστεί σωστά, η απόδοσή τους μπορεί να είναι καλύτερη από τα συμβατικά συστήματα σκίασης (π.χ. προεξοχές) [30, 137].
- Η ομοιομορφία του φ.φ. αυξάνεται αν και η αντίθεση λαμπροτήτων (luminance contrast) μπορεί να αυξηθεί προκαλώντας προβλήματα θάμβωσης. Η μέγιστη αύξηση της ομοιομορφίας που αναφέρθηκε είναι 178.6% σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (δηλ. Παράθυρο χωρίς σύστημα σκίασης) υπό συνθήκες αίθριου ουρανού [150]. Υπό νεφοσκεπείς συνθήκες, βελτιώνεται επίσης η ομοιομορφία, αλλά αυτό οφείλεται στη μείωση των επιπέδων φωτισμού στην περιοχή κοντά στο παράθυρο. Ένας άλλος τρόπος για να αυξηθεί η ομοιομορφία είναι η χρήση μιας επεξεργασμένης άνω επιφάνειας [137]. Με τη χρήση μικρών προσανατολισμένων επιφανειών με καθρέφτες, η ομοιομορφία μπορεί να αυξηθεί κατά 29.9 – 34.3% για το εξωτερικό ράφι και 10.4 – 13.7% για το εσωτερικό, σε σύγκριση με το υπάρχον επίπεδο ράφι τύπου καθρέφτη.
- Σε πολύ γενικές γραμμές, η μέγιστη τιμή του βάθους ενός εξωτερικού ραφιού φωτισμού ( $d_{\text{ext lightshelf,max}}$ ) μπορεί να οριστεί από τα [125, 126] χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 22.
- Μία ακραία τιμή του βάθους των ραφιών φωτισμού μπορεί να είναι ίση με δύο (2) έως τρεις (3) φορές από το ύψος του άνω παραθύρου προτάθηκε από τους Abdulmohsen et al. [128] όταν το ράφι έπρεπε να βελτιστοποιηθεί για χαμηλές γωνίες ύψους του ήλιου. Για τα εσωτερικά ράφια φωτισμού, η μέγιστη τιμή του βάθους που αναφέρεται στη βιβλιογραφία είναι και πάλι από τους Abdulmohsen et al. [128]. Πρότειναν ότι το εσωτερικό βάθος των ραφιών φωτισμού πρέπει να είναι δύο (2) έως τρεις (3) φορές το ύψος του φεγγίτη (clerestory window) για να μειωθεί το ηλιακό ίχνος (sun patch) στην επιφάνεια εργασίας. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, εξετάστηκαν εσωτερικά βάθη ραφιών από 0.4 – 1.85 m.
- Όσον αφορά τα επίπεδα φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας, όταν χρησιμοποιείται ένα ράφι φωτισμού, υπάρχει συνολική μείωση των τιμών φωτισμού μεταξύ 20% και 60% σε σύγκριση με μια περίπτωση αναφοράς (χωρίς παρουσία σκιάστρου ή/και ραφιού φωτισμού), ενώ η αποτελεσματικότητά τους μειώθηκε μετά από 6 – 7 m από το



παράθυρο. Ωστόσο, τα ράφια μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα φωτισμού στο επίπεδο εργασίας στη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. που κυμαίνεται από 10% έως πάνω από 70% όταν χρησιμοποιούνται υλικά με υψηλή ανακλαστικότητα ή επιφάνειες καθρέφτη. Αυτή η σχετική αύξηση είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους του παραθύρου [66, 131, 135, 139, 153, 145, 150, 154, 157].

- Μια ελαφριά κλίση του ραφιού φωτισμού μπορεί να αυξήσει τη ροή φωτισμού που εισέρχεται στο δωμάτιο ειδικά κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στο Βόρειο ημισφαίριο, αυξάνοντας ταυτόχρονα όμως τα ψυκτικά φορτία. Η αύξηση του γεωγραφικού πλάτους μειώνει αυτή τη γωνία [137]. Στο [11] οι Lee et al. χρησιμοποιώντας ένα ράφι πλάτους 0.6 m με γωνία κλίσης ίση με  $30^{\circ}$  προς τα πάνω για κτίρια στην Κορέα, επέτυχαν εξοικονόμηση τόσο για φωτισμό όσο και για ψύξη. Προτείνουν ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα πρέπει να αφαιρεθεί το ράφι για εξοικονόμηση ενέργειας. Φαίνεται ότι η εξίσωση 25 που προτείνεται από τον Moore [140] παρέχει αποτελέσματα συμβατά με αυτά που βρέθηκαν από το έργο της Meresi [141], ενώ ελαφρώς αποκλίνει από εκείνα των Warriar και Raphael [136].
- Φαίνεται ότι το σχήμα της οροφής μπορεί να επηρεάσει την κατανομή φωτισμού. Όταν χρησιμοποιείται μια λοξή οροφή, τα επίπεδα φωτισμού αυξήθηκαν στο πίσω μέρος του δωματίου κατά 21 – 36% και μειώθηκαν κατά 20 – 55% μπροστά. Εάν χρησιμοποιηθεί μια κατοπτρική οροφή, εμφανίζεται περαιτέρω αύξηση των επιπέδων φωτισμού [30, 152]. Παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή του τύπου ανακλαστικότητας της επιφάνειας της οροφής από διάχυτη σε κατοπτρική οδηγεί σε περαιτέρω αυξημένα επίπεδα φωτισμού στο πίσω μέρος του δωματίου. Επιπλέον, τα εξωτερικά καμπυλωμένα και λοξά εξωτερικά ράφια φωτισμού λειτουργούν καλύτερα όταν χρησιμοποιείται κυρτή οροφή [144].
- Ο δυναμικός έλεγχος των ανακλαστικών ραφιών φωτισμού μπορεί να προσφέρει ορισμένα οφέλη, καθώς μπορούν να ανακατευθύνουν το φως του ήλιου σε μια συγκεκριμένη περιοχή στην οροφή. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι ο μικρός λόγος παραθύρου-πατώματος (WFR) επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης των επιπέδων φ.φ. στο βαθύτερο μέρος του χώρου. Τα δυναμικά ράφια φωτισμού επέτυχαν αύξηση της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτιστικών σωμάτων

σε σύγκριση με ένα στατικό ράφι φωτισμού καθρέφτη φωτός από 8 – 22% [132, 140, 143, 150, 155].

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένα ράφι φωτισμού είναι ένα από τα πιο απλά συστήματα φ.φ. Ανεξάρτητα από την ευκολία εγκατάστασής του, θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις και αυτό μπορεί να δημιουργήσει μια δυσκολία, καθώς απαιτεί συγκεκριμένες γνώσεις. Παρά υπάρχουσες έρευνες, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για το πώς μπορούν να εφαρμοστούν καλύτερα. Πιστεύουμε ότι απαιτούνται περαιτέρω έρευνες με ράφια εγκατεστημένα σε πραγματικά κτίρια όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν καλύτερες εκτιμήσεις μέσω μετρήσεων και ερωτηματολογίων. Σε ένα σύστημα πλήρους κλίμακας, όλες οι πιθανές ανακρίβειες της ανακλαστικής επιφάνειας μαζί με την φθορά των ανακλαστικών ιδιοτήτων του στο χρόνο θα μπορούσαν να εκτιμηθούν. Φυσικά, η δοκιμή σε πραγματική κλίμακα παρέχει μία σχετική ακρίβεια, αλλά είναι επίσης και δαπανηρή, για το λόγο αυτό επιλέγεται η χρήση εργαλείων προσομοίωσης. Πρόκειται για μια πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί.

Το υλικό που χρησιμοποιείται στην ανώτερη επιφάνεια ενός ραφίου πρέπει να διατηρήσει μια πολύ υψηλή τιμή ανακλαστικότητας με την πάροδο του χρόνου. Οι μεταλλικοί καθρέφτες είναι διαθέσιμοι σήμερα, προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα, καθώς έχουν τη δυνατότητα σχηματισμού που απαιτείται για τα καμπυλωμένα ράφια φωτισμού και τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά συντήρησης. Δυστυχώς, τα έξοδα συντήρησης δεν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά σε σχέση με τη βιβλιογραφία των συστημάτων φ.φ. [8]. Η ρύπανση μπορεί να μειώσει 8 – 12% την αντανακλαστική ικανότητα των ανακλαστικών επιφανειών [154] και έτσι έχουν αναπτυχθεί ποικίλες επικαλύψεις για να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Για παράδειγμα, οι επικαλύψεις  $\text{TiO}_2$  χρησιμοποιούνται σήμερα ως προστατευτικά στρώματα κατά της ρύπανσης. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται προληπτική τεχνική, ενώ χρησιμοποιούνται επίσης τεχνικές αποκατάστασης (δηλ. χειρωνακτικός καθαρισμός).

Παρά την υιοθέτηση προγραμμάτων προσομοίωσης υπολογιστών, η πολυπλοκότητα αυτών των προγραμμάτων μαζί με τους περιορισμούς τους στην προσομοίωση οπτικά πολύπλοκων επιφανειών ή/και ενεργά ελεγχόμενων ανακλαστικών επιφανειών, μπορούν να αποτελούν αδυναμίες όταν απαιτείται η εκτίμηση των επιδόσεων ενός συστήματος σε ωριαία βάση. Τα

περισσότερα εργαλεία προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων χρησιμοποιούν χρονοσειρές των τιμών φωτισμού στο επίπεδο της εργασίας για την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας λόγω της υιοθέτησης ενός συστήματος ελέγχου φωτισμού με γνωστά χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες όταν συγκρίνονται διάφορες εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού αλλά έχουν περιορισμένη αξία όταν απαιτείται μια ακριβής εκτίμηση της εξοικονόμησης. Ο τοποθετημένος στην οροφή φωτοαισθητήρας ανταποκρίνεται στον φωτισμό που δέχεται και τον οποίο και μετατρέπει σε σήμα ελέγχου. Η επιλογή του σωστού οπτικού πεδίου ενός αισθητήρα σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χώρου είναι πολύ σημαντική για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Η χρήση ενός ράφι φωτισμού μπορεί να αυξήσει το σήμα του αισθητήρα λόγω του ανακλώμενου φωτισμού καθιστώντας δύσκολη την ακριβή παρακολούθηση των αλλαγών του φωτισμού στο επίπεδο εργασίας. Συνεπώς, χρειάζονται περισσότερες μελέτες σε πραγματικούς χώρους εξοπλισμένους με συστήματα ραφιών φωτισμού και συστημάτων αυτόματου ελέγχου του φωτισμού των φωτιστικών.

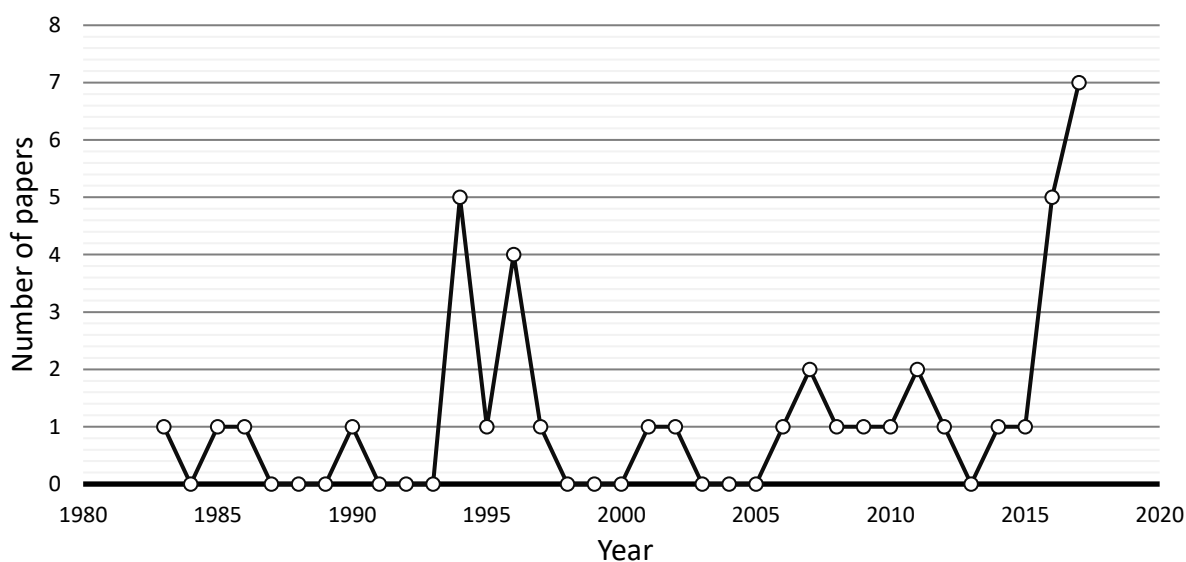
Τα συμπεράσματα αυτής της ανασκόπησης είναι χρήσιμα για τον εντοπισμό των πλεονεκτημάτων, των αδυναμιών, των ευκαιριών και των απειλών των ραφιών φωτισμού ως συστήματος φ.φ./σκίασης. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support System, DSS) θα ήταν ευπρόσδεκτο από τις ομάδες σχεδιασμού. Αυτό το DSS θα πρέπει να βασίζεται σε μια διαδικασία συγκριτικής αξιολόγησης η οποία προϋποθέτει την εκτίμηση της απόδοσης ενός συγκεκριμένου σχεδίου ραφίου έναντι μιας περίπτωσης αναφοράς. Αυτή η περίπτωση αφορά τη χρήση ενός χώρου δοκιμών με συγκεκριμένες διαστάσεις. Η συγκριτική αξιολόγηση ενός σχεδίου μπορεί να δώσει μια εικόνα για το πόσο καλά λειτουργεί αυτό, επιτρέποντας στην ομάδα σχεδιασμού να ανακαλύψει ποια χαρακτηριστικά χρειάζονται βελτιώσεις.

**Πίνακας 10:** Συνοπτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων, των αδυναμιών, των ευκαιριών και των απειλών των ραφιών φωτισμού ως Συστήματα Φ.Φ./Σκίασης.

<b>πλεονεκτήματα</b>	<b>αδυναμίες</b>
Βελτίωση φωτισμού εσωτερικών χώρων	Αιτιολόγηση της εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει. Η αύξηση των εισερχομένων ηλιακών κερδών στον χώρο ενδέχεται να αντισταθμίσει την εξοικονόμησης ενέργειας από την χρήση του τεχνητού φωτισμού
Παραγωγικότητα, ευεξία, και βελτιωση διαθεσης χρηστων	Η ανακλωμενη ηλιακη ακτινοβολια ενδεχεται να επηρεασει αρνητικα την αποδοση του συστηματος ελεγχου του τεχνητου φωτισμου
Βελτίωση ομοιομορφίας φωτισμού	Παρουσία θάμβωσης
Αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας από την χρήση του τεχνητού φωτισμού	Δυσκολία συντήρησης, κυρίως για δυναμικά συστήματα
Ευκολία τοποθέτησης/εγκατάστασης	Περιορισμοί στην αξιολόγηση της απόδοσης του και στον σχεδιασμό από τα λογισμικά
Αποδοχη απο σχεδιαστες	
<b>Ευκαιρίες</b>	<b>Απειλές</b>
Ανάπτυξη νέων καινοτόμων υλικών για την βελτιστοποίηση της συλλογής και μεταφοράς της Ηλιακής ακτινοβολίας	Δυσκολία στην κατασκευή κυρτών ανακλαστικών επιφανειών.
Βελτίωση λογισμικών ανάλυσης και αξιολόγησης	Έλλειψη ειδίκευσης για τον σχεδιασμό εξελιγμένων συστημάτων ραφιών φωτισμού λόγω πολυπλοκότητας
Βελτίωση την παραγωγικής διαδικασίας για κυρτά ράφια φωτισμού	Σχηση κοστους - αποδοσης
Ανάπτυξη ραφιών φωτισμού Ηλιακής ιχνηλάτησης	
Μείωση του κόστους παραγωγής	

Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται ο ετήσιος αριθμός των δημοσιεύσεων που εξετάστηκαν από το 1983 μέχρι σήμερα. Φαίνεται ότι τα τελευταία δύο (2) χρόνια υπήρξε σημαντική αύξηση αυτού του αριθμού. Πιστεύουμε ότι ο λόγος αυτής της αύξησης είναι η προσπάθεια επίτευξης οικονομικά αποδοτικών λύσεων για την εκμετάλλευση του φ.φ. και, φυσικά, οι βελτιώσεις στα εργαλεία προσομοίωσης.



**Εικόνα 31:** Ετήσιος αριθμός δημοσιεύσεων που ασχολούνται με την επίδραση των ραφιών φωτισμού στα επίπεδα φωτισμού στα κτίρια.

Τα κύρια αποτελέσματα αυτής της ανασκόπησης επισημαίνουν ότι υπάρχει έρευνα που πρέπει να πραγματοποιηθεί για τη βελτίωση της απόδοσης των ραφιών φωτισμού. Φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές ευκαιρίες σε σχέση με νέα υλικά, νέες γεωμετρίες και δυναμική λειτουργία των ραφιών φωτισμού, που καθορίζουν το μελλοντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Τέλος, όλα τα ζητήματα πρέπει να συνοδεύονται από αξιολόγηση κύκλου ζωής για τον προσδιορισμό τύπων ραφιών που είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

## 2.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Reinhart, C. F. A Simulation Based Review on the Ubiquitous Window Head Height to Daylit Zone Depth Rule of Thumb. In Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montréal, QC, Canada, 15-18 August 2005.
2. EN 15193-1: Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting; Specifications, Module M9; 2017. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=00000000030292858>.
3. Reinhart, C. F.; LoVerso, V. R. M. A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. *Light. Res. Technol.* 2010, 42, pp. 7-31.
4. Kontadakis, A.; Tsangrassoulis, A.; Roetzel, A. Defining the Boundaries of Daylight Penetration. The use of dynamic and static daylight methods to predict the daylit zone within sidelit spaces, a comparison. In Proceedings of the BalkanLight 2015, the 6th Balkan Conference on Lighting, Athens, Greece, 16-19 September 2015.
5. Konstantoglou, M.; Tsangrassoulis, A. Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 60, pp. 268-283.
6. Bellia, L.; Marino, C.; Minichiello, F.; Pedace, A. An Overview on Solar Shading Systems for Buildings. *Energy Procedia* 2017, 62, pp. 309-317.
7. Aschehoug, O.; Christoffersen, J.; Jakobiak, R.; Johnsen, K.; Lee, E.; Ruck, N.; Selkowitz, S. Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components; Report of IEA SHC Task 21/ECBCS Annex 29; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, CA, USA, 2000. Available online: <https://facades.lbl.gov/publications/daylight-buildings-source-book-daylighting-systems>.
8. Mayhoub, M. S. Innovative daylighting systems' challenges: A critical study. *Energy Build.* 2014, 80, pp. 394-405.
9. Aizlewood, M. E. Innovative daylighting systems: An experimental evaluation. *Int. J. Light. Res. Technol.* 1993, 25, pp. 141-152.
10. Littlefair, P. J. Developments in Innovative Daylighting; IHS BRE Press: Bracknell, UK, 2000.

11. Lee, H.; Kim, S.; Seo, J. Evaluation of a light shelf based on energy consumption for lighting and air conditioning. *Indoor Built Environ.* 2017, doi:10.1177/1420326X17719954.
12. Littlefair, P.J. Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods. *Light. Res. Technol.* 1990, 22, pp. 1-17.
13. Wong, I.L. A review of daylighting design and implementation in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 74, pp. 959-968.
14. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). Recommended Practice of Daylighting, RP-5, 1978. In *IES Lighting Handbook*, IESNA: New York, USA, 2000.
15. Kischkoweit-Lopin, M. An overview of daylighting systems. *Sol. Energy* 2002, 73, pp. 77-82.
16. Littlefair, P.J.; Aizlewood, M.E.; Birtles, A.B. The performance of innovative daylighting systems. *Renew. Energy*, 1994, 5, pp. 920-934.
17. Freewan, A.A. Developing daylight devices matrix with special integration with building design process. *Sustain. Cities Soc.* 2015, 15, pp. 144-152.
18. Nair, M.; Ramamurthy, K.; Ganesan, A. Classification of indoor daylight enhancement systems. *Light. Res. Technol.* 2014, 46, pp. 245-267.
19. Mayhoub, M. S.; Carter, D. J. Towards hybrid lighting systems: A review. *Lighting Res. Technol.* 2010, 42, pp. 51-71.
20. Kim, J. T.; Kim, G. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment*, 2010, 45, pp. 256-269.
21. McCluney, R. Advanced fenestration and daylighting systems. Proceedings in: *Daylighting '98*, International conference on daylighting technologies for energy efficient buildings, 10-13 May, Ottawa, Canada.
22. Scartezzini, J. L.; Courret, G. Anidolic Daylighting Systems. *Solar Energy*, 2002, 73(2), pp. 123-135.
23. Wong, I. L. A review of daylighting design and implementation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74, pp. 959-968.
24. Huang, T. Y., Hocheng, H., Chou, T. H., and Yang, W. H. Bring Free Light to Buildings: Overview of Daylighting System. In *Materials and Processes for Energy:*

- Communicating Current Research and Technological Developments, edited by Mendez-Vilas A. Formatex Research Center, 2013.
25. Littlefair, P. J. Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods. *Light. Res. Technol.* 1990, 22(1), pp. 1-17.
  26. Steemers, K. Daylighting design: Enhancing energy efficiency and visual quality. *Renewable Energy*, 1994, 5(2), pp. 950-958.
  27. Ruck, N.; Aschehoug, Ø.; Aydinli, S.; Christoffersen, J; Courret, G.; Edmonds, I.; Jakobiak, R.; Kischkoweit-Lopin, M.; Klinger, M.; Lee, E. S.; Michel, L.; Scartezzini, J. L.; Selkowitz, S. E. *Daylight in Buildings. A Source Book on Daylighting Systems and Components.* International Energy Agency, IEA, Solar Heating and Cooling Programme, SHC, Task 21, Energy Conservation in Buildings & Community Systems, ECBCS Programme Annex 29, 2000, LBNL-47493. <https://books.google.gr/books?id=kzIJYAAACAAJ>
  28. Mayhoub, M. S. Innovative daylighting systems' challenges: A critical study. *Energy and Buildings*, 2014, 80, pp. 394-405
  29. Konstantoglou, M.; Tsangrassoulis, A. Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60, pp. 268-283.
  30. Claros, S. T.; and Soler, A. Indoor daylight climate-comparison between light shelves and overhang performances in Madrid for hours with unit sunshine fraction and realistic values of model reflectance. *Solar Energy*, 71(4), pp. 233-239, 2001.
  31. Benton, C.; Erwine, B.; Warren, M.; and Selkowitz, S. Field Measurements of Light Shelf Performance in a Major Office Installation. *Proceedings in 11th International Passive Solar Conference*, Boulder, CO, USA, 1986.
  32. Warriar, G. A.; and Benny R. Performance evaluation of light shelves. *Energy and Buildings*, 2017, 140(1), pp. 19-27.
  33. Soler A; and Oteiza P. Dependence on solar elevation of the performance of a light shelf as a potential daylighting device. *Renewable Energy*, 8(1-5), pp. 198-201, 1996.
  34. Hashemi, A. Daylighting and solar shading performances of an innovative automated reflective louvre system. *Energy and Buildings*, 2014, 82, pp. 607-620.



35. Rosenfeld, H.; Selkowitz, S. Beam Daylighting: An Alternative Illumination Technique. *Energy and Building*, 1977, 1, pp. 43-50.
36. Casini, M. Light and solar control glazing and systems. *Smart Buildings*, 2016, pp. 279-304.
37. Appelfeld, D.; Svendsen, S. Performance of a daylight-redirecting glass-shading system. *Energy and Buildings*, 2013, 64, pp. 309-316.
38. Leung, T. C. Y.; Rajagopalan, P.; Fuller, R. Performance of a daylight guiding system in an office building. *Solar Energy*, 2013, 94, pp. 253-265.
39. Edmonds, I. R. Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1993, 29(1), pp. 1-26.
40. Scartezzini, J. L.; Courret G. Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 2002, 73, pp. 123-135.
41. Wittkopf, S. K. Daylight performance of anidolic ceiling under different sky conditions. *Solar Energy*, 2007, 81(2), pp. 151-161.
42. Wittkopf, S. K.; Yuniarti, E.; And Soon L. K. Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates. *Energy and Buildings*, 2006, 38(9), pp. 1120-1129.
43. Roshan, M.; Barau, A. S. Assessing Anidolic Daylighting System for efficient daylight in open plan office in the tropics. *Journal of Building Engineering*, 8, pp. 58-69, 2016.
44. Ochoa, C. E.; Capeluto I. G. Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and Environment*, 2006, 41(8), pp. 1128-1135.
45. Altherr, R.; Gay J. B. A low environmental impact anidolic façade. *Building and Environment*, 2002, 37(12), pp. 1409-1419.
46. Courret, G.; Francioli, D.; Scartezzini, J. L.; Meyer, J. J. Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Buildings*, 1998, 28(1), pp. 79-99.
47. Courret, G.; Paule, B.; Michel, L.; Scartezzini, J. L. Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 2000, 69(1-6), pp. 117-129.
48. Welford, W. T.; and Winston, R. *High Collection Nonimaging Optics Academic*. San Diego, Calif, 1989, 19892, p. 55.

49. Edmonds, I. R. Performance of laser cut light reflecting panels in daylighting applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1993, 29(1), pp. 1-26.
50. Greenup P. J.; and Edmonds I. R. Test room measurements and computer simulations of the micro-light guiding shade daylight redirecting device. *Solar Energy*, 2004, 76, pp. 99-109.
51. Edmonds, I. R.; Greenup, P. J. Daylighting in the tropics. *Solar Energy*, 2002, 73(2), pp. 111-121.
52. Breitenbach, J.; Lart, S.; Langle, I.; Rosenfeld, J. L. J. Optical and thermal performance of glazing with integral venetian blinds. *Energy and Buildings*, 2001, 33(5), pp. 433-442.
53. Santos, L.; Leitão, A.; Caldas, L. A comparison of two light-redirecting fenestration systems using a modified modeling technique for Radiance 3-phase method simulations. *Solar Energy*, 2018, 161, pp. 47-63.
54. Appelfeld, D.; Svendsen, S. Performance of a daylight-redirecting glass-shading system. *Energy and Buildings*, 2013, 64, pp. 309-316.
55. Heim, D.; and Kieszowski, K. Shading Devices Designed to Achieve the Desired Quality of Internal Daylight Environment. Proceedings in: 23rd PLEA Conference, Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland: Geneva, 2006.
56. Aizlewood, M.E. Innovative Daylighting Systems: An Experimental Evaluation. *Lighting Research and Technology*, 1993, 25(4), pp. 141-152.
57. Inoue, T. Solar shading and daylighting by means of autonomous responsive dimming glass: practical application. *Energy and Buildings*, 2003, 35(5), pp. 463-471.
58. Inoue, T.; Ichinose, M.; Ichikawa, N. Thermotropic glass with active dimming control for solar shading and daylighting. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3), pp. 385-393.
59. Reim, M.; Beck, A.; Korner, W.; Petricevic, R.; Glora, M.; Weth, M.; Schliermann, T.; Fricke, J.; Schmidt, C.; Potter, F. J. Highly insulating aerogel glazing for solar energy usage. *Solar Energy*, 2002, 72, pp. 21-29.
60. Buratti, C.; Moretti, E. Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems. *Applied Energy*, 2012, 97, pp. 430-437.

61. Yajun, Lv.; Huijun, W.; Yanchen, L.; Yu, H.; Tao, X.; Xiaoqing, Z.; Renda, H. Quantitative research on the influence of particle size and filling thickness on aerogel glazing performance. *Energy and Buildings*, 2018, 174, pp. 190-198.
62. Cuce, E.; Riffat, S. B. A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41, pp. 695-714.
63. Citherlet, S.; Guglielmo, F.; Gay, ZB. Window and advanced glazing systems life cycle assessment. *Energy and Buildings*, 2000, 32(3), pp. 225-234.
64. Littlefair, P.; Roche, L. The lighting implications of advanced glazing systems. *Proceedings of the CIBSE national lighting conference*, 1998, pp. 292-299.
65. Ghosh, A.; Norton, B. Advances in switchable and highly insulating autonomous (self-powered) glazing systems for adaptive low energy buildings. *Renewable Energy*, 2018, 126, pp. 1003-1031.
66. Beltran. L. O.; Lee E. S.; Selkowitz, S. E. *Advanced Optical Daylighting Systems*. IESNA Annual Conference, Cleveland, USA, 1996.
67. Ullah, I.; Lv, H.; Whang, A. J.W., and Su, Y. Analysis of a novel design of uniformly illumination for Fresnel lens-based optical fiber daylighting system. *Energy and Buildings*, 2017, 154, pp. 19-29.
68. Song, J.; Zhu, Y.; Jin, Z.; Yang, Y. Daylighting system via fibers based on two-stage sun-tracking model. *Solar Energy*, 2014, 108, pp. 331-339.
69. Garcia-Hansen, V.; Edmonds, I. Methods for the illumination of multilevel buildings with vertical light pipes. *Solar Energy*, 2015, 117, pp. 74-88.
70. Torres-Roldán, M.; López-Luque, R., and Varo-Martínez M. Assessment of the pointing error of heliostats with a single not polar rotation axis for urban applications. *Solar Energy*, 2016, 137, pp. 281-289.
71. Kontadakis, A.; Tsangrassoulis, A.; Doulos, L.; Topalis, F. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone. *Building and Environment*, 2017, 113, pp. 267-279.
72. Smart, M., and Ballinger, J. A. Tracking Mirror Beam Sunlighting for Deep Interior Spaces. *Solar Energy*, 1983, 30(6), pp. 527-536.

73. Tsangrassoulis, A; Kostantoglou, M.; Kontadakis, A (2014). Lighting energy savings due to the use of a sun tracking mirrored lightshelf in office buildings. Proceedings in: ASHRAE 3rd International Conference, Energy in buildings, Greece: Athens.
74. Whitehead, L. A. Overview of hollow light guide technology and applications. Proceedings of Daylighting 98 - International conference on daylighting technologies for energy efficiency in buildings, 1998, pp. 197-204.
75. Aizenberg, J. Principal new hollow light guide system "Heliobus" for daylighting and artificial lighting of central zones of multi storey buildings. *Right Light*, 1997, 2(4), pp. 239-243.
76. Sedki, L.; Maaroufi, M. Design of parabolic solar daylighting systems based on fiber optic wires: A new heat filtering device. *Energy and Buildings*, 2017, 152, pp. 434-441.
77. Rahou, M.; Mojiri, A.; Rosengarten, G.; Andrews, J. Optical design of a Fresnel concentrating solar system for direct transmission of radiation through an optical fibre bundle. *Solar Energy*, 2016, 124, pp. 15-25.
78. Feuermann, D.; Gordon, J. M. Solar fiber-optic mini-dishes: a new approach to the efficient collection of sunlight. *Solar Energy*, 1999, 65(3), 159-170.
79. Cariou, J. M.; Dugas, J.; Martin, L. Transport of solar energy with optical fibres. *Solar Energy*, 1982, 29(5), pp. 397-406.
80. Wang, C.; Abdul-Rahman, H.; Rao, S. P. Daylighting can be fluorescent: Development of a fiber solar concentrator and test for its indoor illumination. *Energy and Buildings*. 42(5), 2010, pp. 717-727.
81. Vu, NH; Shin, S. Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators. *Solar Energy*, 2016, 136, pp. 145-152
82. Cariou, J. M.; Dugas, J.; Martin, L. Transport of solar energy with optical fibres. *Solar Energy*, 1982, 29(5), pp. 397-406.
83. Feuermann, D.; Gordon, J. M.; Huleihil, M. Solar fiber-optic mini-dish concentrators: First experimental results and field experience. *Solar Energy*, 2002, 72, pp. 459-472.
84. Ngoc-Hai V.; Shin, S. Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators. *Solar Energy*, 2016, 136, pp. 145-152.

85. Kim, Y.; Jeong, H. J.; Kim, W.; Chun, W.; and Lim, S. H. A comparative performance analysis on daylighting for two different types of solar concentrators: Dish vs. Fresnel lens. *Energy*, 2017, 137, pp. 449-456.
86. Kandilli, C.; Ulgen, K. Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009, 13, pp. 67-84.
87. Song, J.; Jin, Z.; Zhu, Y.; Zhou, Z.; and Yang, Y. Development of a fiber daylighting system based on the parallel mechanism and direct focus detection. *Solar Energy*, 2015, 115, pp. 484-493.
88. Schlegel, G.; Burkholder, F.; Klein, S.; Beckman, W.; Wood, B.; and Muhs, J. Analysis of a full spectrum hybrid lighting system. *Sol Energy*, 2004, 76(4), pp. 359-368.
89. Sapia, C. Daylighting in buildings: developments of sunlight addressing by optical fiber. *Sol Energy*, 2013, 89, pp. 113-121.
90. Tsangrassoulis, A.; Doulos, L.; Santamouris, M.; Fontoynt, M.; Maamari, F.; Wilson, M.; Jacobs, A.; Solomon, J.; Zimmerman, A.; Pohl, W.; Mihalakakou, G. On the energy efficiency of a prototype hybrid daylighting system. *Solar Energy*, 2005, 79(1), pp. 56-64.
91. PARANS System: SP4 Sunlight Collector. <https://www.parans.com/>.
92. Himawari Solar Lighting System. [https://www.himawari-net.co.jp/e\\_page-index01.html](https://www.himawari-net.co.jp/e_page-index01.html).
93. Heliostat-Wikipedia. Available online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heliostat>
94. Silbermann, J. T. Rapport fait à l'Académie Royale des Sciences sur un nouvel heliostat. *Annales de Chimie et de Physique*, 1844, 10, pp. 298-306.
95. Science & Society Picture Library. Archived 2011-06-06 at the Wayback Machine. Advertisement for Chappuis' patent reflectors, c 1851-1870. [www.scienceandsociety.co.uk](http://www.scienceandsociety.co.uk).
96. Zhang, H. L.; Baeyens, J.; Degève, J.; Cacères, G. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22, pp. 466-481.
97. SolarReserve Crescent Dunes Solar Energy Plant. <https://www.solarreserve.com/en/global-projects/csp/crescent-dunes>.

98. González-Roubaud, E.; Pérez-Osorio, D.; and Prieto, C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80, pp. 133-148.
99. Visa, I.; and Duta, A. Innovative Solutions for Solar Thermal Systems Implemented in Buildings. *Energy Procedia*, 2016, 85, pp. 594-602.
100. Indora, S.; and Kandpal, T. C. Institutional cooking with solar energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 84, pp. 131-154.
101. Kumar, A.; Prakash, O.; and Kaviti, A. K. A comprehensive review of Scheffler solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77, pp. 890-898.
102. Dumiak, M. Simple and bright, heliostats tap sunlight for lighting outdoor and, increasingly, indoor spaces. *Architectural Record*, 2007, 195(5), pp. 251. <http://archrecord.construction.com/tech/techbriefs/0705dignews-1.asp>.
103. Stagno, A.; and Straeten, A. 0-24 Licht -A project between Art and Research, 2006. <http://www.andreavanderstraeten.net/index.php/architecture/0-24-licht/>.
104. Torres-Roldan, M.; Lopez-Luque, R.; and Varo-Martínez, M. Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments, *Solar Energy*, 2015, 119, pp. 159-168.
105. Oh, S. J.; Dutton, S.; Selkowitz, S.; and Han, H. J. Application of a coelostat daylighting system for energy savings and enhancement of indoor illumination: A case study under clear-sky conditions. *Energy and Buildings*, 2017, 156, pp. 173-186.
106. Pohl, W.; Anselm, C. Report of EC-funded Joule-Craft research project: development of an economic and energy saving heliostat technology for room illumination, publishable final report, contract no. JOR3-CT98-7042. Aldrans: Bartenbach LichtLabor GmbH; 2001.
107. Rosemann, A.; and Kaase, H. Lightpipe applications for daylighting systems. *Solar Energy*, 2005, 78(6), pp. 772-780.
108. Kim, J. T.; Kim, G. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment*, 2010, 45(2), pp. 256-269.

109. Chong, K. K.; Onubogu, N. O.; Yew, T. K.; Wong, C. W.; and Tan, W. C. Design and construction of active daylighting system using two-stage non-imaging solar concentrator. *Applied Energy*, 2017, 207, pp. 45-60.
110. Song, J.; Luo, G.; Li, L.; Tong, K.; Yang, Y.; and Zhao, J. Application of heliostat in interior sunlight illumination for large buildings. *Renewable Energy*, 2018, 121, pp. 19-27.
111. EGIS. <http://egis.org/index.html>.
112. Bomin Solar. [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de).
113. SOLENICA. <https://solenica.com/>.
114. LightManufacturing. <https://lm.solar/>.
115. TAISEI. <http://www.aisei.co.jp/english/>.
116. Widoka Inc. <http://wikoda.com/>.
117. Heliostat.nl. <http://www.heliostaat.nl/index.html>.
118. Practical Solar. <http://www.practicalsolar.com/index.html>.
119. HelioTrack. <https://www.heliotrack.com/>
120. Gerst, L. <https://www.heliostat.us/>.
121. Wassim, J.; Potamianos, I. Geometry, Light, and Cosmology in the Church of Hagia Sophia. *Int. J. Archit. Comput.* 2007, 5, pp. 304-319.
122. Potamianos, I. Light into Architecture: The Evocative Use of Natural Light as Related to Liturgy in Byzantine Churches. Ph.D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1996.
123. Tageslichtreflector. Available online: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:L-Tageslichtreflector.png>.
124. Hopkinson, R. G. Daylighting a hospital ward. *Archit. J.* 1952, 115, pp. 255-259.
125. Selkowitz, S.; Navvab, M.; Mathews, S. Design and Performance of Light Shelves. In *Proceedings of the International Daylighting Conference*, Phoenix, AZ, USA, 16-18 February 1983.
126. Place, W.; Howard, T. C. Daylighting Multistory Office Buildings; North Carolina Alternative Energy Corporation: city, country, 1990.
127. Littlefair, P. J. Light shelves: Computer assessment of daylighting performance. *Light. Res. Technol.* 1995, 27, pp. 79-91.

128. Abdulmohsen, A.; Boyer, L.; Degelman, L. Evaluation of lightshelf daylighting systems for office buildings in hot climates. In Proceedings of the Ninth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Arlington, TX, USA, 19-20 May, 1994.
129. Soler, A.; Oteiza, P. Dependence on solar elevation of the performance of a light shelf as a potential daylighting device. *Renew. Energy*, 1996, 8, pp. 198-201.
130. Soler, A.; Oteiza, P. Light Shelf performance in Madrid Spain. *Build. Environ.* 1997, 22, pp. 87-93.
131. Berardi, U.; Anaraki, H. K. The benefits of light shelves over the daylight illuminance in office buildings in Toronto. *Indoor Build Environ.* 2016, pp. 1-19. doi: 10.1177/1420326X16673413
132. Joarder, M. A. R.; Ahmed, Z. N.; Price, A.; Mourshed, M. A simulation assessment of the height of light shelves to enhance daylighting quality in tropical office buildings under overcast sky conditions in Dhaka, Bangladesh. In Proceeding of the 11th International IBPSA Conference, Glasgow, UK, 27-30 July 2009.
133. Hu, J.; Du, J.; Place, W. The Assessment of Advanced Daylighting Systems in Multi-Story Office Buildings Using a Dynamic Method. In Proceeding of the World Renewable Energy Congress, Low Energy Architecture (LEA), Linkoping, Sweden, 8-13 May 2011.
134. Lim, Y.; Ahmad, M. H. The effects of direct sunlight on light shelf performance under tropical sky. *Indoor Built Environ.* 2015, 24, pp. 788-802.
135. Kurtay, C.; Esen, O. A new method for light shelf design according to latitudes: CUN-OKAY light shelf curves. *J. Build. Eng.* 2017, 10, pp. 140-148.
136. Warriar, G. A.; Raphael, B. Performance evaluation of light shelves. *Energy Build.* 2017, 140, pp. 19-27.
137. Lee, H.; Jeon, G.; Seo, J.; Kim, Y. Daylighting performance improvement of a light-shelf using diffused reflection. *Indoor Build Environ.* 2017, 26, pp. 717-726.
138. Moscoso, C.; Matusiak, B. Aesthetic perception of a small office with different daylighting systems. *Indoor Built Environ.* 2017, doi:10.1177/1420326X17711490.



139. Moazzeni, M. H.; Ghiabaklou, Z. Investigating the Influence of Light Shelf Geometry Parameters on Daylight Performance and Visual Comfort, a Case Study of Educational Space in Tehran, Iran. *Buildings* 2016, 6, pp. 26.
140. Moore, F. *Concepts and Practice of Architectural Daylighting*; Van Nostrand Reinhold Company: New York, NY, USA, 1985.
141. Meresi, A. Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece. *Energy Build.* 2016, 116, 190-205.
142. Al-Sallal, K. A. Testing glare in universal space design studios in Al-Ain, UAE desert climate and proposed Improvements. *Renew. Energy* 2007, 32, pp. 1033-1044.
143. Kostantoglou, M.; Tsangrassoulis, A. Performance evaluation of an automatically controlled light-shelf. In *Proceedings of the 5th Balkan Light Conference*, Belgrad, Serbia, 3-6 October 2012.
144. Raphael, B. Active Control of Daylighting Features in Buildings. *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.* 2011, 26, pp. 393-405.
145. Lee, E. S.; Beltrán, L. O.; Selkowitz, S. E. Demonstration of a Light-redirecting Skylight system at the Palm Springs Chamber of Commerce. Presented at the ACEEE 1994 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, *Building Tomorrow: The Path to Energy Efficiency*, Pacific Grove, CA, USA, 28 August-3 September 1994.
146. Beltran, L. O.; Lee, E. S.; Papamichael, K. M.; Selkowitz, S. E. The Design and Evaluation of Three Advanced Daylighting Systems: Light Shelves, Light Pipes, and Skylights. In *Proceedings of the ASES 19th National Passive Solar Conference*, San Jose, CA, USA, 25-30 June 1994.
147. Lee, E. S.; Selkowitz, S. E.; Rubinstein, F. M.; Klems, J. H.; Beltrán, L. O.; DiBartolomeo, D. L. A Comprehensive Approach to Integrated Envelope and Lighting Systems for New Commercial Buildings; Report Number: LBL-35732; Lawrence Berkeley National Laboratory: Berkeley, CA, USA, 1994.
148. Lee, E. S.; Beltrán, L. O.; Selkowitz, S.E. Demonstration of a Light-redirecting Skylight system at the Palm Springs Chamber of Commerce. Presented at the 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: *Profiting from Energy Efficiency*, Pacific Grove, CA, USA, 25-31 August 1996.

149. Lee, H.; Kim, K.; Seo, J.; Kim, Y. Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving. *Energy Build.* 2017, 144, pp. 144-151.
150. Freewan, A. A.; Shao, L.; Riffat, S. Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates. *Sol. Energy* 2008, 82, 343-353.
151. Freewan, A. A. Maximizing the lightshelf performance by interaction between lightshelf geometries and a curved ceiling. *Energy Convers. Manag.* 2010, 51, pp. 1600-1604.
152. Xue, P.; Mak, C. M.; Cheung, H. D. New static lightshelf system design of clerestory windows for Hong Kong. *Build. Environ.* 2014, 72, pp. 368-376.
153. Franco, I. M. Efficacy of light shelves: Passive, dynamic and automatic devices related to light and thermal behavior. Presented at Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings X, Clearwater Beach, Florida, 2-7 December 2007.
154. Dogan, T.; Stec, P. Prototyping a façade-mounted, dynamic, dual-axis daylight redirection system. *Light. Res. Technol.* 2016, 50(4), pp. 583-595.
155. Lim, Y. W.; Heng, C. Y. S. Dynamic Internal Light Shelf for Tropical Daylighting in High-rise Office Buildings. *Build. Environ.* 2016, 106, pp. 155-166.
156. Howard, T. C.; Place, W.; Andersson, B.; Coutiers, P. Variable area light reflecting assemblies (VALRA). In Proceedings of the 2nd International Daylighting Conference, Long Beach, CA, USA, 4-7 November 1986, pp. 222-234.
157. Kontadakis, A.; Tsangrassoulis, A. The impacts of a dynamic sunlight redirection system on the energy balance of office buildings. In Proceedings of the CISBAT 2017 International Conference—Future Buildings & Districts—Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, Lausanne, Switzerland, 6-8 September 2017.
158. Wulfinghoff, R. W. *Energy Efficiency Manual*; Energy Institute Press: Wheaton, MD, USA, 1999; ISBN 978-0-9657926-7-7.
159. InLighten Interior Light Shelf. Available online: [http://www.kawneer.com/kawneer/north\\_america/en/product.asp?prod\\_id=1852&desc=aluminum-curtain-wall-light-shelves](http://www.kawneer.com/kawneer/north_america/en/product.asp?prod_id=1852&desc=aluminum-curtain-wall-light-shelves).
160. BrightShelf. Available online: <http://brightshelf.com/index.html>.
161. aLuminate Light Shelves. Available online: <https://www.tubeliteinc.com/aluminate-light-shelves/>.

162. Luminance Light Shelf System. Available online:  
<https://www.ykkap.com/commercial/product/sun-control/luminance/>.
163. Atkinson, C.; Sansom, C. L.; Almond, H. J.; Shaw, C. P. Coatings for concentrating solar systems-A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 45, pp. 113-122.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

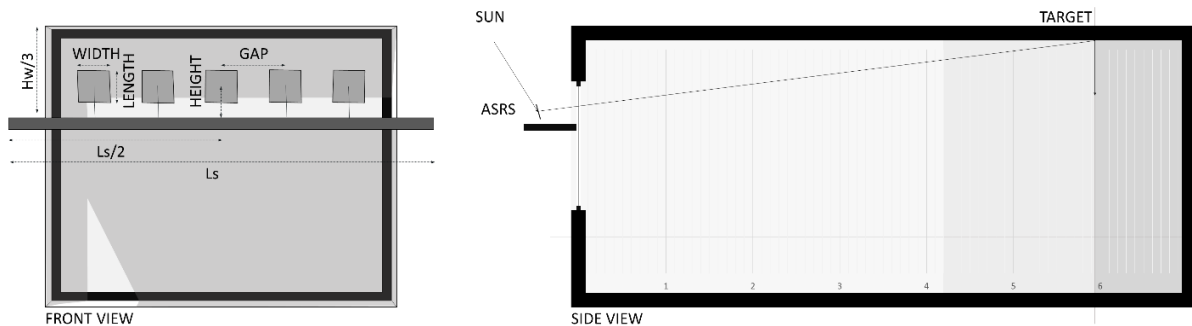
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα πρωτότυπο σύστημα φ.φ. για εφαρμογές με πλευρικά ανοίγματα (side-lighted applications) που αναφέρεται ως ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system, ASRS). Περιλαμβάνει ένα ράφι φωτισμού, τοποθετημένο σε ύψος περίπου στο μέσο του παραθύρου, που λαμβάνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιώντας μια ηλιοστατική διαμόρφωση που παρακολουθεί ενεργά και συλλέγει το φως του ήλιου με τη χρήση μιας σειράς καθρεφτών. Το ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (ASRS) μπορεί να τοποθετηθεί στην πρόσοψη του κτιρίου, στο παράθυρο και να ανακατευθύνει την ηλιακή ακτινοβολία βαθύτερα μέσα στο δωμάτιο σε συγκεκριμένες θέσεις στην οροφή. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υψηλότερα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας βαθύτερα στο χώρο, μακριά από την περιμετρική ζώνη αντισταθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις απαιτήσεις ενέργειας φωτισμού σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια δαπέδου.

Το κεφάλαιο αυτό δομείται ως εξής. Η εισαγωγή (Παρ. 3.1), παρέχει μια περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος (ASRS) και της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε για να εκτιμηθεί η απόδοσή του. Η ενότητα 3.2 συνίσταται σε μια λεπτομερή ανάλυση των δύο (2) πιο κοινά χρησιμοποιούμενων μεθόδων ηλιακής ιχνηλάτησης που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές ηλιακής ενέργειας για συστήματα διπλού άξονα. Η παράγραφος 3.3 παρουσιάζει τις επιδόσεις του ASRS. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας Νότια προσανατολισμένος χώρος γραφείου με μεγάλο βάθος σαν σενάριο αναφοράς. Συνολικά, τέσσερα (4) σενάρια του δεδομένου χώρου, με εναλλακτικές διαμορφώσεις του συστήματος του παραθύρου μοντελοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν για την Αθήνα, Ελλάδα (Γεωγραφικό πλάτος  $37.9^{\circ}$ , Γεωγραφικό μήκος  $23.7^{\circ}$ ). Η κεντρική εστίαση βρίσκεται κατά κύριο λόγο στη διερεύνηση των επιδόσεων τόσο από πλευράς αποδοτικότητας του φ.φ. όσο και ενεργειακών επιπτώσεων του συστήματος. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις μηχανές Radiance και EnergyPlus ενώ τα δεδομένα εισόδου στα λογισμικά που απαιτήθηκαν δημιουργήθηκαν με

έναν νέο αλγόριθμο ικανό να δημιουργήσει τρισδιάστατα μοντέλα του προτεινόμενου συστήματος μαζί με την ανακλώμενη επιφάνεια (ηλιακό ίχνος) στην οροφή.

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system, ASRS) περιλαμβάνει ένα ράφι φωτισμού, τοποθετημένο περίπου στο μέσο του παραθύρου, ενώ πάνω του έχουν στερεωθεί μικροί ηλιοστάτες εφοδιασμένοι με επίπεδα κάτοπτρα τα οποία παρακολουθούν ενεργά τον ήλιο (ιχνηλάτηση). Καθώς ο ήλιος κινείται στον ουρανό, τα κάτοπτρα ρυθμίζουν τις θέσεις τους για να παρακολουθούν τον ήλιο και να κρατούν το ανακλώμενο φως σταθερό σε μία περιοχή της οροφής. Η λειτουργία του εξεταζόμενου συστήματος (ASRS) παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.



**Εικόνα 32:** Κύρια διαμόρφωση του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης Ηλιακής ακτινοβολίας (Active Sun Redirection System, ASRS), με την συστοιχία των κάτοπτρων στο παράθυρο.

Το σύστημα αναπτύχθηκε για να επιτύχει ακόλουθους στόχους:

- α. Μεγιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου φ.φ. και ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος τεχνητού φωτισμού μέσω της χρήσης ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου με αισθητήρες φωτισμού.
- β. Παροχή υψηλών επιπέδων φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας πιο βαθιά μέσα στο δωμάτιο, μακριά από την περιμετρική ζώνη αντισταθμίζοντας τις απαιτήσεις ενέργειας για τεχνητό φωτισμό σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια δαπέδου.
- γ. Αύξηση της απόστασης μεταφοράς του φ.φ. από την περίμετρο στον πυρήνα του κτιρίου.
- δ. Διατήρηση ενός εσωτερικού περιβάλλοντος που προάγει την ευημερία των χρηστών και αυξάνει την παραγωγικότητά τους.

ε. Ευκολία εγκατάστασης τόσο σε νεόδμητα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια.

Για την ιχνηλάτηση του ήλιου, το προτεινόμενο σύστημα ηλιοστάτη χρησιμοποιεί τη μέθοδο Περιστροφής-Ύψους (Spinning-Elevation (SE) method). Η αρχή λειτουργίας και οι μαθηματικές εκφράσεις των γωνιών ιχνηλάτησης της μεθόδου έχουν παρουσιαστεί σε αρκετά άρθρα [1-3].

Ο σχεδιασμός του προτεινόμενου συστήματος βασίστηκε στις ακόλουθες παραμέτρους:

- Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να μεταφερθεί μέσω του άνω τμήματος του παραθύρου, το μέγιστο ύψος του οποίου (~0.5 m) επηρεάζει τη μέγιστη διάσταση των κατόπτρων έτσι ώστε η ανακλώμενη φωτεινή ροή να κατευθύνεται μέσα στο δωμάτιο χωρίς απώλεια (λόγω της πρόσοψης και του πλαισίου του παραθύρου). Τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας μικρότερα διαστάσεων κάτοπτρα, αλλά πρέπει να αυξηθούν σε αριθμό, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του συστήματος.
- Η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων είναι τέτοια ώστε να μπορούν να περιστρέφουν ελεύθερα, αποφεύγοντας την επαφή με οποιεσδήποτε γειτονικές επιφάνειες (καθρέφτες, ράφι και τοίχο πρόσοψης), εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι στις ακραίες θέσεις του ήλιου αποφεύγεται η αμοιβαία σκίαση κατά τη λειτουργία τους.
- Το σύστημα πρέπει να τοποθετηθεί σε μια βάση, η οποία στην περίπτωσή μας είναι το εξωτερικό ράφι που προσφέρει σκίαση στο κάτω παράθυρο και ικανοποιεί μερικώς τα κριτήρια αρχιτεκτονικής ενσωμάτωσης.
- Η ικανότητά του να αυξάνει τα επίπεδα φ.φ. σε περιοχές πέρα από την περιμετρική ζώνη, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν η τροχιά του ήλιου είναι αρκετά υψηλή. Το κριτήριο ήταν ο διπλασιασμός των επιπέδων φωτισμού στην δευτερεύουσα ζώνη φ.φ., σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς (χωρίς καθόλου σκίαση).

Σήμερα, τρία (3) διαφορετικά εργαλεία σχεδιασμού χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του φ.φ. (ή του τεχνητού φωτισμού) στα κτίρια:

1. Απλά εργαλεία σχεδίασης που παρέχουν συμβουλές σχετικά με τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού (πχ. Γραφοεικονικές μέθοδοι), αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουν λεπτομερώς μια στρατηγική ή να μοντελοποιήσουν προηγμένα συστήματα. Είναι πιο κατάλληλα για τις πρώιμες φάσεις σχεδιασμού και για βασικά προβλήματα σχεδίασης.
2. Εργαλεία βασισμένα σε υπολογιστή (Computer-Based Tools) που επιτρέπουν την προσομοίωση ενός προηγμένου συστήματος φ.φ., ενός κτιρίου ή ενός χώρου αναφοράς χρησιμοποιώντας ένα γραφικό περιβάλλον για την πρόβλεψη και ανάλυση του φυσικού φωτισμού μέσω προσομοιώσεων. Επιταχύνουν τη διαδικασία σχεδιασμού και παρέχουν μεγάλη ποικιλία σε δεδομένα εξόδου (εικόνες, υπολογισμοί οπτικής άνεσης κ.λπ.).
3. Φυσικά μοντέλα που αναπαράγουν την κατανομή του φ.φ. σε ένα υπό κλίμακα μοντέλο σχεδόν όπως ακριβώς και σε ένα δωμάτιο πλήρους μεγέθους όταν είναι κατάλληλα κατασκευασμένα. Επιτρέπουν τη μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια σχετικών παραμέτρων.

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος, πραγματοποιήθηκαν για να υπολογιστούν σε ωριαία βάση:

- α. Την ετήσια κατανομή της έντασης φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας (0.8 m από το πάτωμα), χρησιμοποιώντας την μηχανή Radiance [4].
- β. Την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος τεχνητού φωτισμού τόσο για τις περιμετρικές όσο και για τις δευτερεύουσες ζώνες του χώρου που είναι εφοδιασμένες με ένα ιδανικό σύστημα αυτόματου ελέγχου.
- γ. Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη που οφείλονται στο ανακλώμενο ηλιακό ίχνος που σχηματίζεται στην οροφή.
- δ. Την ετήσια ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας την μηχανή EnergyPlus [5].



### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

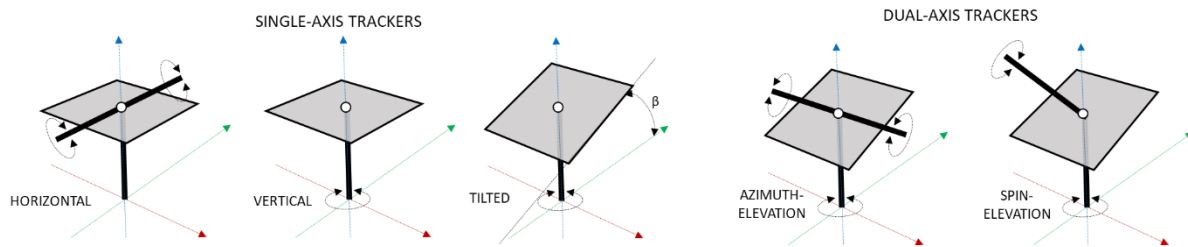
Υπάρχουν δύο (2) βασικές κατηγορίες ηλιοστατικών συστημάτων για την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και την ανακατεύθυνση της σε ένα σύστημα μεταφοράς ή καθοδήγησης:

- α. Τα παθητικά ηλιοστατικά συστήματα που χρησιμοποιούν σταθερά ανακλαστικά ή/και διαθλαστικά στοιχεία και,
- β. Τα ενεργά ηλιοστατικά συστήματα που χρησιμοποιούν κινητά στοιχεία.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, το σύστημα κατεύθυνσης μπορεί να είναι απλώς ένας χώρος στο ίδιο το κτίριο, όπως ο χώρος ενός αίθριου. Οι παθητικοί ηλιοστάτες δεν διαθέτουν τον έλεγχο που είναι εγγενής σε ένα ενεργό σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης, αλλά έχουν χαμηλότερο κόστος και απαιτούν λιγότερη συντήρηση. Το πλεονέκτημα όμως των ενεργών συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης είναι η δυνατότητα συλλογής και μεταφοράς σχετικά μεγάλης φωτεινής ροής με μικρότερο δίκτυο μεταφοράς καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, όλο το χρόνο. Η ηλιακή ιχνηλάτηση των ενεργών ηλιοστατικών συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε με την βοήθεια αλγορίθμων, είτε με την βοήθεια αισθητήρων, για τον εντοπισμό της θέσης του ήλιου στον ουρανό. Η επιφάνεια συλλογής των ηλιοστατικών συστημάτων μπορεί να είναι είτε επίπεδα κάτοπτρα, είτε Καμπύλοι καθρέφτες ή Φακοί.

Η ηλιακή ιχνηλάτηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε διάφορες εφαρμογές ηλιακής ενέργειας (πχ. φωτοβολταϊκά, ηλιοστάτες), με τα οφέλη της από πλευράς αποδοτικότητας να είναι αυξημένα συγκριτικά με τα παθητικά συστήματα. Υπάρχουν δύο (2) τύποι συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης που εξαρτώνται από τους βαθμούς ελευθερίας, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 33:

- α. Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης μονού-άξονα (single-axis solar tracking systems) [6, 7], και
- β. Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης διπλού-άξονα (dual-axis solar tracking systems) [8, 9]



**Εικόνα 33:** Τύποι συστημάτων Ηλιακής ιχνηλάτησης μονού (single-axis) και διπλού άξονα (dual-axis).

Η ταξινόμηση των συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης πραγματοποιείται με τη βοήθεια των στρατηγικών ελέγχου. Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει τις στρατηγικές ελέγχου των συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης. Κάθε στρατηγική παρουσιάζει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθούν προβλήματα που σχετίζονται με την εγκατάσταση και λειτουργία τους, όπως το κόστος, η αξιοπιστία, η κατανάλωση ενέργειας, η συντήρηση καθώς και η συνολική τους απόδοση μεταξύ άλλων. Τα συστήματα μονού-άξονα παρακολουθούν τον ήλιο (συνήθως από την Ανατολή προς τη Δύση) χρησιμοποιώντας ένα μόνο σημείο περιστροφής που κινείται γύρω από έναν σταθερό οριζόντιο άξονα. Σε αντίθεση τα συστήματα διπλού-άξονα χρησιμοποιούν δύο (2) άξονες περιστροφής έτσι ώστε το διάνυσμα του ήλιου (sun vector) να είναι πάντα κάθετο στην επιφάνεια επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο 100% αποδοτικότητα συλλογής της ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχουν και τύποι συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης με πολύ πιο περίπλοκη κατασκευαστική δομή, όμως αυτοί δεν είναι τόσο δημοφιλείς όσο τα συστήματα μονού και διπλού άξονα [10, 11].

**Πίνακας 11:** Στρατηγικές ελέγχου συστημάτων Ηλιακής ιχνηλάτησης (solar trackers).

<b>Ηλιακοί ιχνηλάτες μονού-άξονα (single-axis solar tracking systems)</b>	
Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης οριζοντίου-άξονα (horizontal-axis solar tracking systems)	Ο άξονας περιστροφής παραμένει παράλληλος με το επίπεδο του εδάφους και έχει πάντα κατεύθυνση περιστροφής από την ανατολή προς την δύση ή από τον βορρά προς τον νότο
Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης κεκλιμένου-άξονα (tilted-axis solar tracking systems)	Ο άξονας περιστροφής είναι υπο κλίση από το οριζόντιο επίπεδο και προσανατολισμένος μεταξύ βορρά-νότου
Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης κατακόρυφου-άξονα (vertical-axis solar tracking systems)	Ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με τον κατακόρυφο άξονα του επιπέδου του εδάφους (Αζιμούθιος ηλιακός ιχνηλάτης)
<b>Ηλιακοί ιχνηλάτες διπλού-άξονα (dual-axis solar tracking systems)</b>	
Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης αζιμούθιου-ύψους (azimuth-elevation solar tracking systems)	Ο Αζιμούθιος άξονας περιστροφής είναι προσανατολισμένος στο ζενίθ, ενώ ο άλλος άξονας περιστροφής ύψους (elevation-axis) είναι παράλληλος με τον αζιμούθιο άξονα και εφαπτόμενος στο επίπεδο του ηλιακού ιχνηλάτη
Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης περιστροφής-ύψους (spinning-elevation solar tracking systems)	Ο άξονας περιστροφής (spin-axis) του ηλιακού ιχνηλάτη, δείχνει προς τον στόχο και είναι υπεύθυνος για την διατήρηση του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας του ηλιακού ιχνηλάτη στο εφαπτόμενο επίπεδο, ενώ ο άλλος άξονας περιστροφής ύψους, είναι κάθετος στον πρώτο άξονα και εφαπτόμενος στο επίπεδο του ηλιακού ιχνηλάτη

Η θέση του ηλίου, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, προσδιορίζεται από το ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ) και το ηλιακό αζιμούθιο ( $A$ ). Αυτές οι γωνίες χρησιμοποιούνται για να προσανατολίσουν τον συλλέκτη (κάτοπτρο) ενός συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης:

- α. σε οποιοδήποτε σημείο σε σχέση με τον ήλιο, αν έχει ρυθμιστεί ως ηλιακός ιχνηλάτης (πχ. φωτοβολταϊκά συστήματα) ή
- β. για να κατευθύνει την ηλιακή δέσμη προς έναν καθορισμένο στόχο εάν έχει ρυθμιστεί ως ηλιοστάτης (πχ. Συστήματα φ.φ.).

Μια συνήθης εφαρμογή των συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης είναι η υποστήριξη φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μονού-άξονα μπορεί να αυξήσει την παραγόμενη ενέργεια κατά 12% έως 20% σε σύγκριση με ένα σταθερό επίπεδο φωτοβολταϊκό σύστημα [12] και αν ο μηχανισμός της ηλιακής ιχνηλάτησης βελτιστοποιηθεί, η αύξηση της ενέργειας μπορεί να υπερβεί το 30% [13, 14]. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων διπλού-άξονα, η αύξηση συλλογής της ηλιακής ενέργειας μπορεί να φτάσει έως και 21% [15], ενώ σε μια παρόμοια έρευνα [16] η συλλογή της ηλιακής ενέργειας ήταν 44% μεγαλύτερη σε σχέση με ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σταθερής κλίσης.

Διάφοροι ερευνητές συνέκριναν την απόδοση τόσο των μονό-αξονικών όσο και του διπλού-άξονα φωτοβολταϊκών συστημάτων και παρατηρήθηκε αύξηση 3% – 5% των ιχνηλατών διπλού-άξονα σε σύγκριση με τους μονό-αξονικούς [17]. Έτσι παρόλο που οι ηλιακοί ιχνηλάτες διπλού-άξονα είναι ακριβότεροι και πιο πολύπλοκοι στην κατασκευή, προσφέρουν αποδοτικότερη συλλογή της ηλιακής ενέργειας σε σύγκριση με τους αντίστοιχους μονού-άξονα [20-22]. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κάποιο συλλέκτη που εδράζεται πάνω σε ένα σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης, μπορεί να μεγιστοποιηθεί με απλή ρύθμιση του συλλέκτη ώστε οι ακτίνες του ηλίου να είναι κάθετες στην επιφάνεια του [18]. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό επιτυγχάνεται ευκολότερα με ιχνηλάτες διπλού-άξονα περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο τύπο. Χρειάζεται μια βελτιστοποίηση στη λειτουργία τους διαφορετικά επηρεάζεται η ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου και κατά συνέπεια η απόδοση τους [19].

Για μονό-αξονικά συστήματα, το σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης οδηγεί τον συλλέκτη γύρω από έναν άξονα περιστροφής έως ότου οι ακτίνες του ήλιου να είναι κάθετες στην επιφάνεια του. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν τρεις (3) τύποι συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης μονού-άξονα:

- α. Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης οριζόντιου άξονα (Horizontal-axis trackers), όπου ο άξονας παρακολούθησης παραμένει παράλληλος με την επιφάνεια της γης και είναι πάντοτε προσανατολισμένος κατά μήκος της κατεύθυνσης Ανατολής-Δύσης ή Βορρά-Νότου.
- β. Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης κεκλιμένου άξονα (Tilted-axis trackers), όπου ο άξονας παρακολούθησης είναι κεκλιμένος σε σχέση με τον ορίζοντα κατά μια γωνία προσανατολισμένος στην κατεύθυνση Βορρά-Νότου, π.χ. ηλιοστάτης έχει κλίση ίση με το Γεωγραφικό πλάτος (Latitude-Tilted axis solar-tracker).
- γ. Συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης κατακόρυφου άξονα (Vertical-axis trackers), όπου ο άξονας παρακολούθησης είναι παράλληλος με τον κατακόρυφό σε κάποια περιοχή (ζενίθια) και είναι γνωστός ως σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης αζιμούθιου (Azimuth solar-tracker).

Ο προσανατολισμός του συλλέκτη σε σχέση με τον σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης μπορεί να επηρεάσει την απόδοση [23]. Υπάρχουν διάφορες διαμορφώσεις συλλεκτών μονού-άξονα που περιλαμβάνουν:

1. Συλλέκτες σε οριζόντια διάταξη.
2. Συλλέκτες σε οριζόντια διάταξη με κεκλιμένα στοιχεία.
3. Συλλέκτες κατακόρυφα τοποθετημένους και
4. Συλλέκτες με κεκλιμένη διάταξη.

Σύμφωνα με έρευνα που διενεργήθηκε από τους Helwa et al. [24] τα συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης κάθετου άξονα είναι πιο αποτελεσματικά από τις υπόλοιπες διατάξεις ηλιακής ιχνηλάτησης μονού-άξονα. Οι ηλιακοί ιχνηλάτες κάθετου άξονα ακολουθούν τον ήλιο γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα και είναι πιο αποτελεσματικοί σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη από τους οριζόντιους, αλλά απαιτούν μεγαλύτερους χώρους για να αποφευχθεί η σκίαση των συλλεκτών από άλλους γειτονικούς ιχνηλάτες [25, 26]. Οι οριζόντιοι ιχνηλάτες συνήθως εξοικονομούν χώρο σε σύγκριση με άλλους τύπους μονό-αξονικών ιχνηλατών, χάρη στον προσανατολισμό τους [24]. Οι κεκλιμένοι ηλιακοί ιχνηλάτες έχουν έναν άξονα περιστροφής που βρίσκεται μεταξύ του οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα, παρέχοντάς ισχυρή αντίσταση στις επιπτώσεις που προκαλούνται από τους ανέμους υψηλής ταχύτητας και τη

σκίαση μεταξύ άλλων. Μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν αν οι γωνίες κλίσης και γεωγραφικού πλάτους επιλεχθούν σωστά.

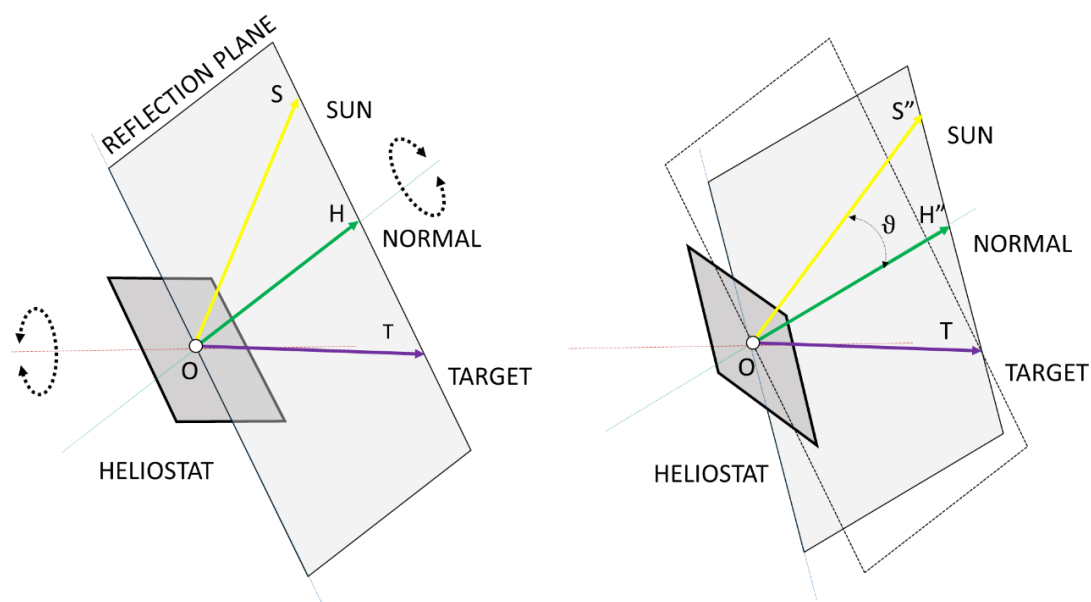
Τα τελευταία χρόνια έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την απόδοση και τη χρήση συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης διπλού-άξονα [10, 18, 22, 27-32]. Οι Maatallah et al. [29] πρότειναν ότι οι ηλιακοί ιχνηλάτες διπλού-άξονα έχουν πάντα καλύτερη ισχύ εξόδου σε σύγκριση με μονό-αξονικά ή/και στατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια ή συστήματα παραβολικών συγκεντρωτήρων. Οι Kacira et al. [31] συνέκριναν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος διπλού-άξονα με ένα στατικό επίπεδο φωτοβολταϊκό πάνελ. Τα ηλιακά κέρδη που επιτεύχθηκαν από το σύστημα διπλού-άξονα ήταν περίπου 35% μεγαλύτερα. Σε παρόμοια μελέτη των Davis et al. [32] ο ιχνηλάτης διπλού-άξονα παρήγαγε 30% και 45% ενεργειακά κέρδη κατά τις ημέρες του χειμερινού και θερινού ηλιοστάσιου αντίστοιχα, σε σύγκριση με έναν μονό-αξονικό ιχνηλάτη.

Για τα συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης διπλού-άξονα (dual-axis systems), οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι ηλιακής ιχνηλάτησης που χρησιμοποιούνται είναι:

- α. Μέθοδος ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (Azimuth-Elevation (AE) solar-tracking method) [33].
- β. Μέθοδος ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (Spinning-Elevation (SE) solar-tracking method) [1, 2].

Οι μαθηματικές εκφράσεις των αλγορίθμων ηλιακής ιχνηλάτησης για τις μεθόδους AE και SE αναπτύχθηκαν από τους Stine και Harrigan [33] και Chen et al. [34] αντίστοιχα και παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους. Στη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (AE), ένας από τους άξονες περιστροφής του ηλιοστάτη είναι κατακόρυφος (άξονας Αζιμουθίου), ενώ ο άλλος είναι οριζόντιος (άξονας ύψους) προς τον πρώτο. Η γωνία ιχνηλάτησης γύρω από τον άξονα αζιμουθίου είναι η γωνία αζιμουθίου ( $\alpha_{AE}$ ) και η γωνία ιχνηλάτησης γύρω από τον άξονα ύψους είναι η γωνία ύψους ( $\rho_{AE}$ ). Με τα χρόνια έχουν προκύψει νέες μέθοδοι για την κίνηση των ηλιοστατών και την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας [1, 2, 34]. Μεταξύ αυτών, η μέθοδος ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE) [1, 2], είναι πιο αποδοτική από την μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης

Αζιμουθίου-Ύψους (ΑΕ), γιατί ελαχιστοποιεί το φαινόμενο εκτροπής (aberration effect) και έχει καλύτερη οπτική απόδοση. Επιπλέον, ο αριθμός των εξαρτημάτων ελέγχου μπορεί να μειωθεί σημαντικά, γεγονός που με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο κόστος κατασκευής και κατανάλωση λιγότερης ενέργειας, από 4.8% έως 9.3% [35-37].



**Εικόνα 34:** Χαρακτηριστικά διανύσματα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την λειτουργία περιστροφής (rotation modes) του ηλιοστάτη.

Η μέθοδος ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (Spinning-Elevation, SE), απεικονίζεται στην Εικόνα 34. Ο πρώτος άξονας είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια του ηλιοστάτη (heliostat normal) στο εφαπτόμενο επίπεδο (tangential plane), ενώ ο δεύτερος περιστρέφεται μέχρι να διχοτομήσει το διάνυσμα του ήλιου (sun position vector) και το διάνυσμα του στόχου (target position vector). Η γωνία ιχνηλάτησης γύρω από τον άξονα αζιμουθίου είναι η γωνία αζιμούθιου (solar azimuth angle,  $\alpha_{SE}$ ) και η γωνία ιχνηλάτησης γύρω από τον άξονα περιστροφής είναι η γωνία ύψους (solar elevation angle,  $\rho_{SE}$ ).

Δεδομένου ότι ο ήλιος είναι ένα κινούμενο αντικείμενο και ο στόχος είναι ένα σταθερό σημείο, το κατακόρυφο διάνυσμα στην επιφάνεια του ηλιοστάτη (heliostat normal) πρέπει να ρυθμίζεται συνεχώς λόγω της αλλαγής της θέσης του ήλιου. Δεδομένου ότι ο ήλιος και ο στόχος είναι ανεξάρτητοι της χρησιμοποιούμενης μεθόδου ιχνηλάτησης του ήλιου, και οι

δύο (2) μέθοδοι επιτυγχάνουν την ίδια γωνία πρόσπτωσης για τις εισερχόμενες ακτίνες του ήλιου, αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικούς άξονες ιχνηλάτησης για την περιστροφή του κατακόρυφου διανύσματος στην επιφάνεια του ηλιοστάτη στη θέση αυτή.

Για τον προσανατολισμό του συλλέκτη των ηλιοστατικών συστημάτων και οι δύο (2) μέθοδοι χρησιμοποιούν τρία (3) διανύσματα, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 34:

- α. Το μοναδιαίο διάνυσμα του ήλιου (sun position vector ( $S$ )).
- β. Το μοναδιαίο διάνυσμα στόχευσης των ανακλώμενων ηλιακών ακτίνων (target position vector ( $T$ ) -reflected sun ray).
- γ. Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του συλλέκτη (heliostat normal vector ( $H$ )).

Το επίπεδο περιστροφής (rotation plane) που περιέχει τα τρία (3) διανύσματα ονομάζεται επίπεδο ανάκλασης (reflection plane) ή εφαπτόμενο επίπεδο (tangential plane) το οποίο είναι το επίπεδο που δημιουργείται από το διάνυσμα του ήλιου και το διάνυσμα του στόχου. Μετά την περιστροφή του ηλιοστάτη, το διάνυσμα  $OS''$  δείχνει τη νέα θέση του ήλιου και το διάνυσμα  $ON''$  είναι το κατακόρυφο διάνυσμα στην επιφάνεια του συλλέκτη του νέου προσανατολισμού έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες να αντανακλώνται προς το στόχο.

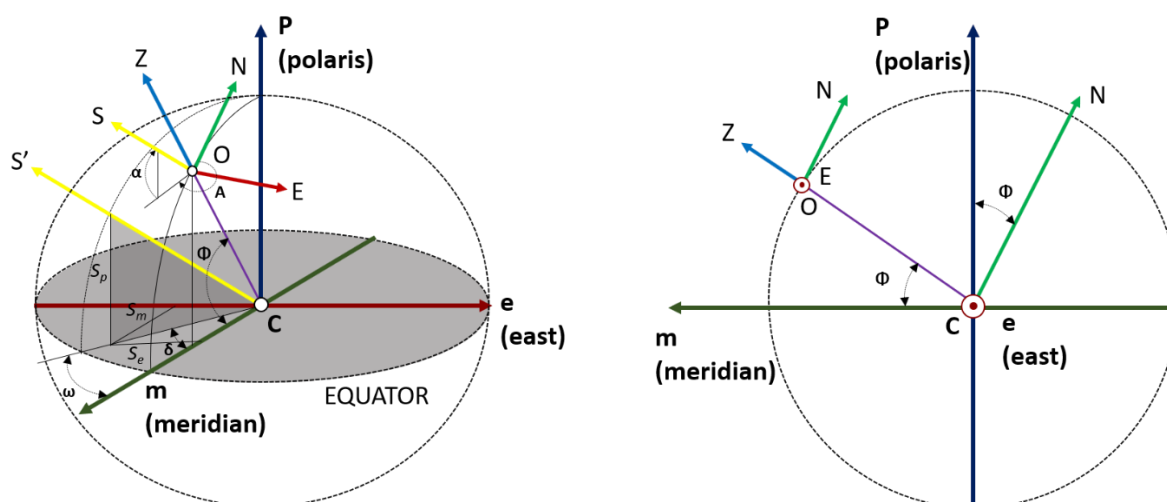
Για την ανάλυση της κίνησης των δύο (2) διαφορετικών μεθόδων ηλιακής ιχνηλάτησης, καθορίζονται τρία (3) ορθογώνια συστήματα συντεταγμένων αναφοράς:

- α. Κεντρικό σύστημα συντεταγμένων (Center coordinate system ( $CCS$ )), που συνδέεται στο κέντρο της Γης.
- β. Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (Global coordinate system ( $GCS$ )), συνδεδεμένο σε σχέση με οποιαδήποτε θέση στην επιφάνεια της Γης.
- γ. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων (Local coordinate system ( $LCS$ )), προσαρτημένο στο κέντρο του ηλιοστάτη.

Το μοναδιαίο διάνυσμα θέσης του ήλιου ( $S$ ) περιγράφεται συνήθως στο κεντρικό σύστημα συντεταγμένων ( $CCS$ ), ενώ το μοναδιαίο διάνυσμα θέσης του σταθερού στόχου ( $T$ ) εκφράζεται πιο εύκολα στο σύστημα παγκόσμιων συντεταγμένων ( $GCS$ ), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 35. Για τον υπολογισμό των γωνιών περιστροφής του καθενός από τους δύο



άξονες της μεθόδου ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (AE) και ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE) που συνδέεται με τον ηλιοστάτη, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός στα δύο (2) συστήματα συντεταγμένων αναφοράς, το Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (GCS) και το Τοπικό σύστημα συντεταγμένων (LCS) αντίστοιχα.



**Εικόνα 35:** Το διάνυσμα του ηλίου σε σχέση με το κεντρικό σύστημα συντεταγμένων (Center Coordinate System , CCS). Στο σύστημα CCS, τα CM, CE και CP αντιπροσωπεύουν τρεις ορθογωνίους άξονες στο κέντρο της γης που δείχνουν προς τον μεσημβρινό (Meridian), την ανατολή (East) και τον πολικό αστέρα (Polaris), αντίστοιχα. Το GCS αποτελείται από τους άξονες OZ, OE και ON, οι οποίοι δείχνουν προς το ζενίθ (Zenith), την ανατολή (East) και τον νότο (North) αντίστοιχα.

Προκειμένου να αντληθούν οι εξισώσεις της ηλιακής ιχνηλάτησης, πρέπει μέσω του μετασχηματισμού συντεταγμένων (coordinate transformation method) να πραγματοποιηθεί η μετατροπή του διανύσματος του ήλιου (S) και του διανύσματος του στόχου (T) στο πιο βολικό σύστημα συντεταγμένων:

- α. Για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (AE) από το σύστημα συντεταγμένων (CCS), έως το σύστημα συντεταγμένων (GCS).
- β. Για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE), από το σύστημα συντεταγμένων (CCS) έως το σύστημα συντεταγμένων (GCS) και στη συνέχεια στο σύστημα συντεταγμένων (LCS).

Έτσι ώστε το μοναδιαίο διάνυσμα θέσης του ήλιου και το μοναδιαίο διάνυσμα θέσης του στόχου να μπορεί να εκφραστεί και στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων. Σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων, ο νόμος της ανάκλασης μπορεί να εφαρμοστεί για να αποκτηθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την ηλιακή ιχνηλάτηση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η θέση του ήλιου σε σχέση με οποιαδήποτε θέση στην επιφάνεια της γης μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από τη γωνία ύψους του ήλιου ( $\alpha$ ) και τη γωνία αζιμούθιου ( $A$ ), στην επιφάνεια της γης σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος ( $\Phi$ ). Στο σύστημα συντεταγμένων (CCS), το διάνυσμα του ηλίου ( $S'$ ) που δείχνει προς τον ήλιο περιγράφεται σε σχέση με την ωριαία γωνία ( $\omega$ ) και την απόκλιση ( $\delta$ ). Σύμφωνα με τον Stine και τον Harrigan [6], ο μετασχηματισμός του διανύσματος του ήλιου από το (CCS) στο (GCS) μπορεί να επιτευχθεί με τον πολλαπλασιασμό του πίνακα μετασχηματισμού του γεωγραφικού πλάτους (latitude transformation matrix)  $[\Phi]$  στο διάνυσμα του ήλιου ( $S'$ ).

Τα μοναδιαία διάνυσμα θέσης του ηλίου  $[S']$  στο (CCS) μπορεί να γραφεί με τη μορφή των συνημίτονων (direction cosines) ως εξής (Εξίσωση 27):

$$[S'] = \begin{bmatrix} S_m \\ S_e \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \omega \\ -\cos \delta \sin \omega \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (27)$$

Ο μετασχηματισμός της γωνίας περιστροφής που είναι ισοδύναμος με τη γωνία γεωγραφικού πλάτους ( $\Phi$ ) με τη μορφή συνημίτονων ως εξής (Εξίσωση 28):

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin A \\ \cos \alpha \cos A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & 0 & \sin \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Phi & 0 & \cos \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \omega \\ -\cos \delta \sin \omega \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (29)$$

Το ύψος του ήλιου ( $\alpha$ ) ορίζεται ως:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \omega \cos \Phi) \quad (30)$$

Το αζιμούθιο του ήλιου ( $A$ ) ορίζεται ως:

$$A = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta \cos \Phi - \cos \delta \cos \omega \sin \Phi}{\cos \alpha} \right) \quad (31)$$

Αν  $\sin \omega > 0$  τότε,

$$A = A - 2\pi \quad (32)$$

Η ακρίβεια της γωνίας απόκλισης είναι σημαντική στην πλοήγηση και την αστρονομία. Ωστόσο, μια προσέγγιση με ακρίβεια έως  $1^0$  είναι επαρκής για πολλές εφαρμογές ηλιακής γεωμετρίας. Μια προσέγγιση για τη γωνία απόκλισης ( $\delta$ ) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[ \frac{360}{365} \times (284 + N) \right] \quad (33)$$

Όπου,

- $N$ : Ο αριθμός ημερών ενός ημερολογιακού έτους,  $N = 1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου,  $N = 42$  για την 11<sup>η</sup> Φεβρουαρίου και  $N = 365$  σημαίνει 31 Δεκεμβρίου.

Ο ηλιακός χρόνος καθορίζεται από τη θέση του ήλιου σε σχέση με τη Γη, με το υψηλότερο σημείο στον ορίζοντα να αντιστοιχεί σε ηλιακό χρόνο ίσο με 12:00. Η ωριαία γωνία ( $\omega$ ) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

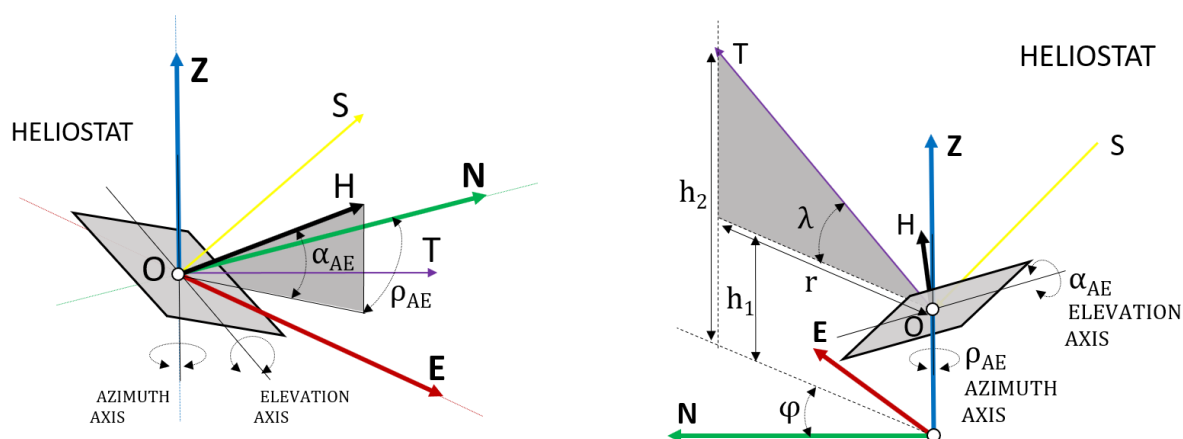
$$\omega = 15 \times (t_s - 12) \quad (34)$$

Όπου,

- $t_s$ : Ηλιακή ώρα σε μορφή 24-ωρών, αντί AM/PM.

### 3.2.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ-ΥΨΟΥΣ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (AE), το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων αναφέρεται στο Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (GCS). Το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια του συλλέκτη (H), ορίζεται ως συνάρτηση της γωνίας αζιμουθίου (azimuth angle,  $\alpha_{AE}$ ) και της γωνίας ύψους (elevation angle,  $\rho_{AE}$ ), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 36. Το αζιμούθιο είναι υπεύθυνο για τον προσανατολισμό του κατακόρυφου διανύσματος στην επιφάνεια του ηλιοστάτη στο εφαπτόμενο επίπεδο (το επίπεδο που δημιουργείται από το μοναδιαίο διάνυσμα του ήλιου και το μοναδιαίο διάνυσμα του στόχου), ενώ η γωνία ύψους είναι υπεύθυνη για τον προσανατολισμό του κατακόρυφου διανύσματος του ηλιοστάτη έως ότου διχοτομήσει την γωνία που σχηματίζεται στο ανάμεσα στο διάνυσμα του ήλιου (S) και το διάνυσμα του στόχου (T).



**Εικόνα 36:** Παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (Global Coordinate System, GCS) στο οποίο εντοπίζονται ο στόχος (T) και ο ηλιοστάτης (H) για τη μέθοδο Ηλιακής ιχνηλάτησης αζιμούθιου-ύψους (azimuth-elevation (AE) solar-tracking method), όπου το κατακόρυφο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) ορίζεται ως η συνάρτηση των γωνιών  $\alpha_{AE}$  και  $\rho_{AE}$ .  $\phi$  είναι η γωνιά όψης (facing angle), και  $\lambda$  είναι η γωνιά στόχου (target angle) του ηλιοστάτη.

Οι δύο (2) γωνίες μπορούν να εξαχθούν μόνο με βάση τον νόμο της ανάκλασης που σχετίζει το μοναδιαίο διάνυσμα του ήλιου (S), το διάνυσμα στόχευσης (T) και το κάθετο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (GCS).

Το μοναδιαίο διάνυσμα του ήλιου (S) μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$S = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin A \\ \cos \alpha \cos A \end{bmatrix} \quad (35)$$

Το μοναδιαίο διάνυσμα του στόχου (T) εκφράζεται με τους όρους των γωνιών προσανατολισμού, που είναι η γωνία στόχου (target angle) ( $\lambda$ ) και η γωνία όψης (facing angle) ( $\varphi$ ) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 36 και εκφράζεται στα ακόλουθα:

Η γωνία όψης ( $\varphi$ ) είναι ο άξονας περιστροφής (OT) όταν περιστρέφεται από την κατεύθυνση που δείχνει προς το Βορρά προς την κατεύθυνση προς έναν σταθερό στόχο, εάν ο σταθερός στόχος και το κεντρικό σημείο του ηλιοστάτη είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Όπου,

- $\varphi = 0^0$ , αν ο ηλιοστάτης βρίσκεται Νότια από τον στόχο και έχει θετικό (+) πρόσημο, αν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται από το Βορρά προς την Ανατολή (τοποθετείται Νότια του στόχου).
- $\varphi = 90^0$ , αν ο ηλιοστάτης βρίσκεται Δυτικά του στόχου.

Συνήθως, το κεντρικό σημείο του ηλιοστάτη δεν βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον στόχο. Επομένως, απαιτείται μετασχηματισμός περιστροφής μέσω της γωνίας στόχου ( $\lambda$ ) γύρω από τον άξονα (ON).

Όπου,

- $\lambda = 0^0$ , αν ο ηλιοστάτης έχει το ίδιο ύψος με τον στόχο και έχει θετικό (+) πρόσημο, όταν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται έτσι ώστε ο στόχος να είναι υψηλότερος από τον ηλιοστάτη (ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον στόχο). Η κατεύθυνση του  $\lambda$  ορίζεται ως θετική (+) τιμή με τρόπο που η ανύψωση του στόχου να είναι πάντα πάνω από τον ηλιοστάτη.
- $\lambda = 10^0$ , σημαίνει ότι ο άξονας (OT) βρίσκεται στη θέση  $10^0$  δεξιόστροφα από την οριζόντια γραμμή, δηλαδή ο στόχος είναι κάτω από τον ηλιοστάτη.

Ο διάνυσμα θέσης του στόχου (T) έχει ως εξής:

$$T = \begin{bmatrix} \sin \lambda \\ \cos \lambda \sin \varphi \\ \cos \lambda \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (36)$$

Το κάθετο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) που εκφράζεται ως προς τις γωνίες  $\alpha_{AE}$  και  $\rho_{AE}$  έχει ως εξής:

$$H = \begin{bmatrix} \sin \alpha_{AE} \\ \cos \alpha_{AE} \sin \rho_{AE} \\ \cos \alpha_{AE} \cos \rho_{AE} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Από τον νόμο της ανάκλασης, η σχέση μεταξύ των τριών (3) διανυσμάτων έχει ως εξής:

$$H = \frac{1}{2 \cos \vartheta} (S + T) \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \sin \alpha_{AE} \\ \cos \alpha_{AE} \sin \rho_{AE} \\ \cos \alpha_{AE} \cos \rho_{AE} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \cos \vartheta} \begin{bmatrix} \sin \alpha + \sin \lambda \\ \cos \alpha \sin A + \cos \lambda \sin \varphi \\ \cos \alpha \cos A + \cos \lambda \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (39)$$

Όπου η γωνία πρόσπτωσης (incident angle) μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$2 \cos \vartheta = (S \cdot T) \quad (40)$$

$$\vartheta = \frac{1}{2} \cos^{-1}(\sin \alpha \sin \lambda + \cos \alpha \sin A \cos \lambda \sin \varphi + \cos \alpha \cos A \cos \lambda \cos \varphi) \quad (41)$$

Από την Εξίσωση 39, οι γωνίες ύψους και αζιμούθιου της μεθόδου ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους, μπορούν να υπολογισθούν ως εξής:

Από την πρώτη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού της Εξίσωσης 39:

$$\alpha_{AE} = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \alpha + \sin \lambda}{2 \cos \vartheta} \right) \quad (42)$$

Από τη δεύτερη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού της Εξίσωσης 39:

Αν  $\cos \rho_{AE} > 0$  τότε,

$$\rho_{AE}^+ = \sin^{-1} \left( \frac{\cos \alpha \sin A + \cos \lambda \sin \varphi}{2 \cos \vartheta \cos \alpha_{AE}} \right) \quad (43)$$

Αν  $\cos \rho_{AE} < 0$  τότε,

$$\rho_{AE}^- = \pi - \rho_{AE}^+ \quad (44)$$

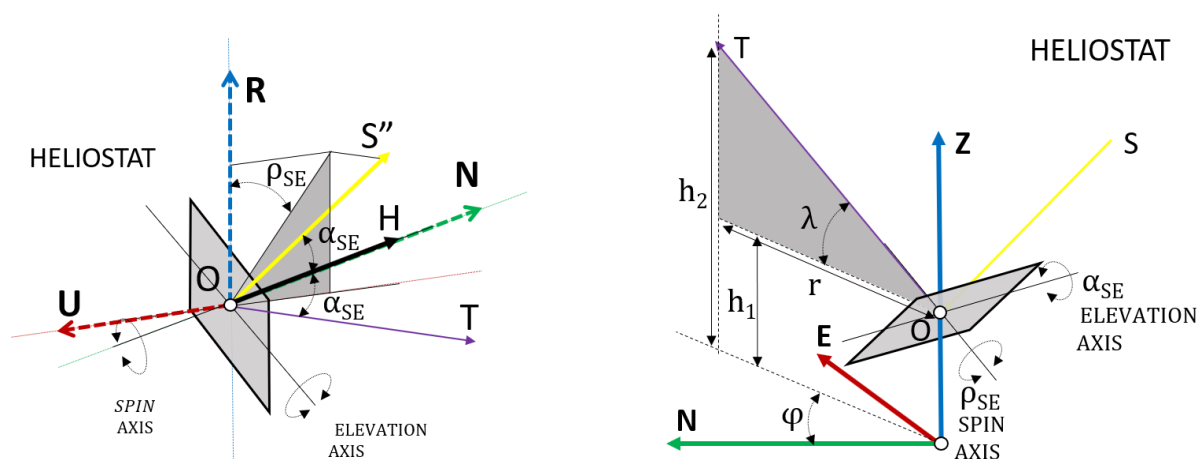
Από την τρίτη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού της Εξίσωσης 14:

$$\cos \rho_{AE} = \frac{\cos \alpha \sin A + \cos \lambda \sin \varphi}{2 \cos \theta \cos \alpha_{AE}} \quad (45)$$

Από τις Εξισώσεις 42-45 και οι δύο (2) γωνίες  $\alpha_{AE}$  και  $\rho_{AE}$  είναι ακριβώς  $0^\circ$  όταν ο άξονας ύψους είναι ευθυγραμμισμένος ώστε να είναι παράλληλος κατά μήκος του άξονα Ανατολής-Δύσης και το πλαίσιο του ηλιοστάτη να βλέπει προς τον Βορρά.

### 3.2.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ-ΥΨΟΥΣ ΙΧΝΗΛΑΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE), το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων αναφέρεται στο πλαίσιο αναφοράς ηλιοστάτη (LCS), με την αρχή (O) να ορίζεται ως το σημείο τομής των δύο (2) αξόνων της ηλιακής ιχνηλάτησης. Τα OR, OU, και ON είναι τρεις (3) σταθεροί ορθογώνιοι άξονες με τον άξονα ON να δείχνει από την αρχή του συστήματος προς την κατεύθυνση του στόχου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 37.



**Εικόνα 37:** Τοπικό σύστημα συντεταγμένων (Local Coordinate System, LCS) στο οποίο εντοπίζονται ο στόχος (T) και ο ηλιοστάτης (H) για τη μέθοδο Ηλιακής ιχνηλάτησης περιστροφής- ύψους (SE), όπου το κάθετο διάνυσμα του ηλιοστάτη (H) ορίζεται ως συνάρτηση των γωνιών  $\alpha_{se}$  και  $\rho_{se}$ .  $\phi$  είναι η γωνιά όψης (facing angle), και  $\lambda$  είναι η γωνιά στόχου (target angle) του ηλιοστάτη.  $\phi = 0^\circ$ , όταν ο ηλιοστάτης βρίσκεται νοτιά από τον στόχο και έχει θετική τιμή (+) αν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται από τον βορρά προς την ανατολή και  $\lambda = 0^\circ$  εάν ο ηλιοστάτης έχει το ίδιο ύψος με τον στόχο και είναι (+) όταν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο στόχος να βρίσκεται υψηλότερα από τον ηλιοστάτη.

Ο αρχικός προσανατολισμός του ηλιοστάτη ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονες περιστροφής του, ο άξονας περιστροφής (spin axis) και ο άξονας ύψους (elevation axis), να είναι ευθυγραμμισμένοι με τους άξονες OR και OU αντίστοιχα. Το κατακόρυφο διάνυσμα στην επιφάνεια του ηλιοστάτη (heliostat normal vector (H)), ορίζεται ως η συνάρτηση των γωνιών  $\alpha_{SE}$  και  $\rho_{SE}$ .



Η γωνία περιστροφής (spinning angle ( $\rho_{SE}$ )) και η γωνία ύψους (elevation angle ( $\alpha_{SE}$ )) του ηλιοστάτη συνδέονται με το διάνυσμα θέσης ηλίου (S) μέσω του γραμμικού μετασχηματισμού της γωνίας όψεως ( $\varphi$ ) και ακολούθως με εκείνη της γωνίας στόχου ( $\lambda$ ) που εκφράζονται στα ακόλουθα:

Η γωνία όψης (facing angle ( $\varphi$ )) είναι ο άξονας περιστροφής όταν περιστρέφεται από την κατεύθυνση που δείχνει από το Βορρά προς την κατεύθυνση προς έναν σταθερό στόχο, εάν ο σταθερός στόχος και το κεντρικό σημείο του ηλιοστάτη είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Όπου,

- $\varphi = 0^0$ , αν ο ηλιοστάτης βρίσκεται Νότια από τον στόχο και έχει θετικό (+) πρόσημο, αν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται από το Βορρά προς την Ανατολή (τοποθετείται Νότια του στόχου).
- $\varphi = 90^0$ , αν ο ηλιοστάτης βρίσκεται Δυτικά του στόχου.

Ο πίνακας μετασχηματισμού για τη γωνία όψης ( $\varphi$ ) γύρω από το Ζενίθ είναι:

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (46)$$

Συνήθως, το κεντρικό σημείο του ηλιοστάτη δεν βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον στόχο. Επομένως, απαιτείται μετασχηματισμός περιστροφής (rotation transformation) μέσω της γωνίας στόχου ( $\lambda$ ) γύρω από τον άξονα (ON).

Όπου,

- $\lambda = 0^0$ , αν ο ηλιοστάτης έχει το ίδιο ύψος με τον στόχο και έχει θετικό (+) πρόσημο, όταν ο άξονας περιστροφής περιστρέφεται έτσι ώστε ο στόχος να είναι υψηλότερος από τον ηλιοστάτη (ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον στόχο). Η κατεύθυνση του  $\lambda$  ορίζεται ως θετική (+) τιμή με τρόπο που η ανύψωση του στόχου να είναι πάντα πάνω από τον ηλιοστάτη.
- $\lambda = 10^0$ , σημαίνει ότι ο άξονας (OT) βρίσκεται στη θέση  $10^0$  δεξιόστροφα από την οριζόντια γραμμή, δηλαδή ο στόχος είναι κάτω από τον ηλιοστάτη.

Ο πίνακας μετασχηματισμού είναι τότε:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \lambda & 0 & \cos \lambda \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{SE}\right) \cos \rho_{SE} \\ -\cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{SE}\right) \sin \rho_{SE} \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{SE}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & 0 & -\sin \lambda \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \lambda & 0 & \cos \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin A \\ \cos \alpha \cos A \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \lambda \sin \alpha - \sin \lambda \sin \varphi \cos \alpha \sin A - \sin \lambda \cos \varphi \cos \alpha \cos A \\ \cos \varphi \cos \alpha \sin A - \sin \varphi \cos \alpha \cos A \\ \sin \lambda \sin \alpha + \cos \lambda \sin \varphi \cos \alpha \sin A + \cos \lambda \cos \varphi \cos \alpha \cos A \end{bmatrix} \quad (48)$$

Οι γωνίες ύψους και Περιστροφής του ηλιοστάτη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE), μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

Από την τρίτη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού των συντεταγμένων της Εξίσωσης 48:

$$\alpha_{SE} = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \sin^{-1}(\sin \lambda \sin \alpha + \cos \lambda \sin \varphi \cos \alpha \sin A + \cos \lambda \cos \varphi \cos \alpha \cos A) \quad (49)$$

Από την πρώτη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού των συντεταγμένων της Εξίσωσης 48 η διεύθυνση της περιστροφής είναι η εξής:

$$\cos \rho_{SE} = \frac{\cos \lambda \sin \alpha - \sin \lambda \sin \varphi \cos \alpha \sin A - \sin \lambda \cos \varphi \cos \alpha \cos A}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{SE}\right)} \quad (50)$$

Από τη δεύτερη σειρά του πίνακα μετασχηματισμού των συντεταγμένων της Εξίσωσης 48:

Αν  $\cos \rho_{AE} > 0$  τότε,

$$\rho_{SE}^+ = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \varphi \cos \alpha \cos A - \cos \varphi \cos \alpha \sin A}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha_{SE}\right)} \right) \quad (51)$$

Αν  $\cos \rho_{AE} < 0$  τότε,

$$\rho_{SE}^- = \pi - \rho_{SE}^+ \quad (52)$$

Από τις Εξισώσεις 49-52 και οι δύο (2) γωνίες  $\rho_{SE}$  και  $\alpha_{SE}$  είναι ακριβώς  $0^\circ$  όταν ο άξονας ύψους είναι ευθυγραμμισμένος ώστε να είναι παράλληλος με τον άξονα ΟΥ και το άνω πλαίσιο του ηλιοστάτη να βλέπει προς τον άξονα ΟR.

### 3.2.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (ASRS)

Η Εικόνα 38 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε με την βοήθεια προγράμματος (σε ηλεκτρονικό υπολογιστή) γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Ruby [38] με στόχο:

- α. Την επίλυση της μεθόδου ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE) ώστε να προσανατολίσει κατάλληλα τον συλλέκτη ή μία συστοιχία από συλλέκτες στον τρισδιάστατο χώρο
- β. τον υπολογισμό του ηλιακού ίχνους που σχηματίζεται στην οροφή από τους συλλέκτες, και
- γ. την δημιουργία των μοντέλων Radiance του χώρου με το πρωτότυπο σύστημα ASRS για προσομοιώσεις φ.φ.

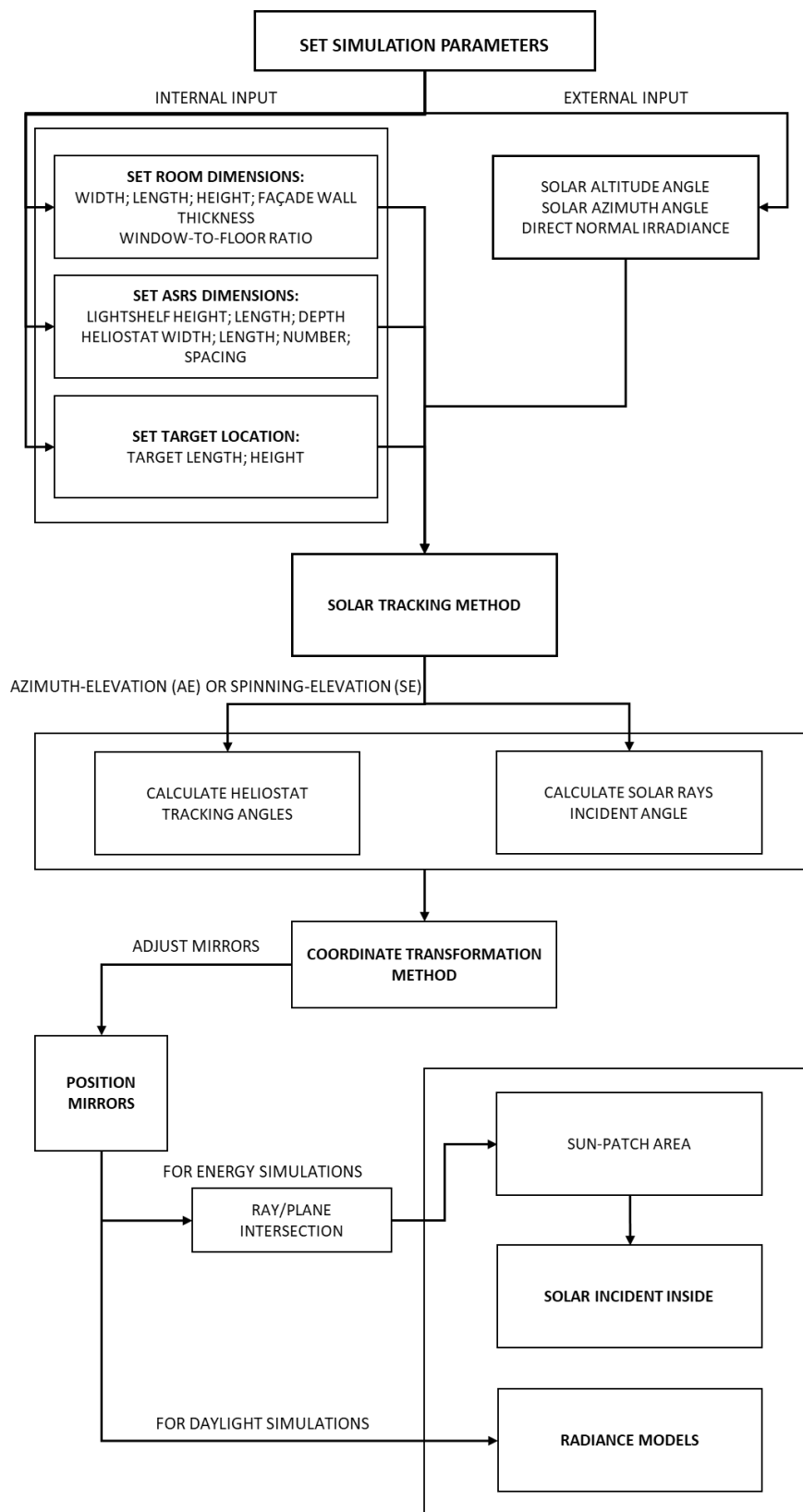
Το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει σε ωριαία βάση:

1. Τον προσανατολισμό των συλλεκτών, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία που αντανακλάται από κάθε συλλέκτη να κατευθύνεται σε συγκεκριμένα σημεία στην οροφή.
2. Την επίδραση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην οροφή που βασίζεται στην υπολογιζόμενη επιφάνεια του ηλιακού ίχνους από κάθε συλλέκτη στην οροφή.

Για την εκτίμηση της απόδοσης του πρωτότυπου συστήματος ASRS οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους Radiance [4] και EnergyPlus [5] αντίστοιχα. Το πρόγραμμα δημιουργεί τα μοντέλα Radiance από τη λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος μαζί με το ίχνος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας (reflected sun-patch) στην οροφή και στη συνέχεια τα δεδομένα που εξάγονται χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων φ.φ. με τη χρήση της μηχανής Radiance που αποσκοπούν:

- στον υπολογισμό της ετήσιας κατανομής των επιπέδων φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας (0.8 m από το δάπεδο) του χώρου και
- στον υπολογισμό της εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό τόσο για την περιμετρική ζώνη φ.φ. όσο και για τη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ., χρησιμοποιώντας ένα ιδανικό σύστημα αυτόματου ελέγχου και ρύθμισης της στάθμης των φωτιστικών σωμάτων με αισθητήρες.

Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τα προηγούμενα βήματα χρησιμοποιούνται την δημιουργία χρονοδιαγραμμάτων στο δεύτερο ενεργειακό μοντέλο EnergyPlus του χώρου όπου και υπολογίζεται η ετήσια ενεργειακή απόδοση. Η επίδραση των ηλιακών ιχνών στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το αντικείμενο "SurfaceProperty:SolarIncidentInside" του EnergyPlus. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, ο κανονικός υπολογισμός EnergyPlus αντικαθίσταται από ένα χρονοδιάγραμμα των τιμών ηλιακής πρόσπτωσης που υπολογίζονται με τη βοήθεια του αλγόριθμου ηλιακής ιχνηλάτησης.



**Εικόνα 38:** Διάγραμμα ροής προσδιορισμού της θέσης των συλλεκτών, του ηλιακού ίχνους και της προσπίπτουσας Ηλιακής ακτινοβολίας του πρωτοτύπου ASRS για την αξιολόγηση της απόδοσης από πλευράς Φ.Φ. Και απαιτήσεων ενέργειας.

Όπως έχει αναφερθεί για την περιστροφή των συλλεκτών χρησιμοποιείται η μέθοδος ηλιακής ιχνηλάτησης Περιστροφής-Ύψους (SE). Οι γωνίες  $\rho_{SE}$  και  $\alpha_{SE}$  υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις 49-52. Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από την οροφή του χώρου, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση ως εξής:

$$E_{c,inc} = (Nb_m \times A_{sun-patch}) \times \tau_{sol} \times \frac{E_{dir,nor} \times R_c \times \cos \theta_t}{A_c} \quad (53)$$

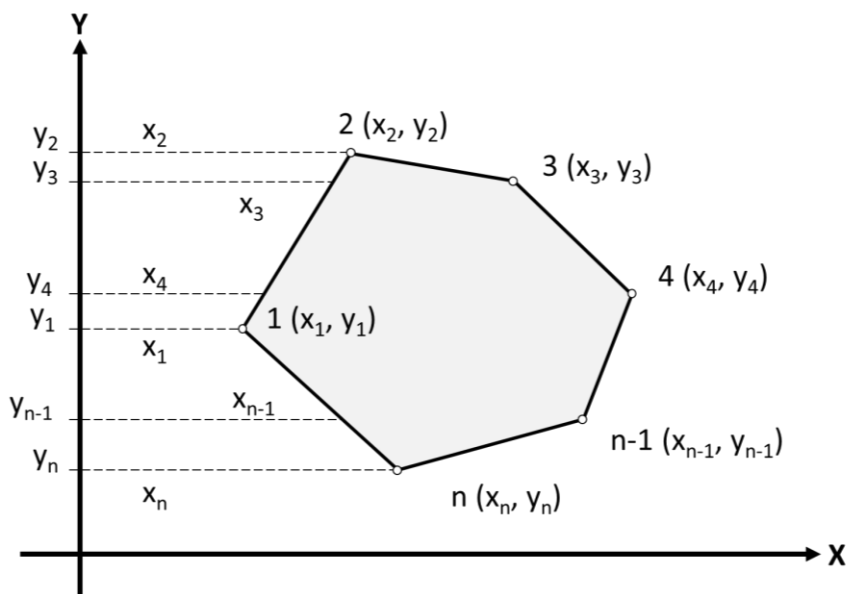
Όπου,

- $E_{c,inc}$ : Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην ανοιγμένη επιφάνεια της οροφής σε  $W/m^2$ .
- $E_{dir,nor}$ : Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία.
- $\theta_t$ : Η γωνία ανάκλασης του στόχου στο επίπεδο της οροφής που σχηματίζεται μεταξύ της ανακλώμενης ακτίνας και του επιπέδου της οροφής.
- $A_{sun-patch}$ : Το εμβαδόν των ηλιακών ιχνών στο επίπεδο της οροφής που σχηματίζονται καθώς η άμεση ηλιακή ακτινοβολία περνάει μέσα από το παράθυρο λόγω των συλλεκτών.
- $\tau_{sol}$ : Η διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία του υαλοπίνακα.
- $A_c$ : Το εμβαδόν της επιφάνειας της οροφής.
- $R_c$ : Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας της οροφής.
- $Nb_m$ : Ο συνολικός αριθμός ηλιοστατών.

Μεταξύ αυτών των τιμών, το ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ), η γωνία αζιμουθίου ( $A$ ) και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία ( $E_{dir,nor}$ ) μπορούν να συλλεχθούν από τα κλιματικά αρχεία που αντιστοιχούν στην τοποθεσία όπου θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις του χώρου γραφείων. Τα κλιματικά αρχεία μπορούν να ληφθούν από τη βιβλιοθήκη μετεωρολογικών δεδομένων του Energy Plus (<https://energyplus.net/weather>).

Ο υπολογισμός της επιφάνειας των "ηλιακών ιχνών" ( $A_{sun-patch}$ ) στο επίπεδο της οροφής, υπολογίζεται βάσει του αλγόριθμου shoelace (shoelace algorithm), γνωστός και ως "Gauss's area formula and the surveyor's formula", ο οποίος είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του εμβαδού ενός κανονικού πολύγωνα του οποίου οι κορυφές

περιγράφονται από τις καρτεσιανές συντεταγμένες (Cartesian coordinates) στο επίπεδο. Ο τύπος για δεδομένες συντεταγμένες ενός πολυγώνου με  $n$  κορυφές εκφράζεται ως εξής:



**Εικόνα 39:** Προσδιορισμός εμβαδού κανονικού πολυγώνου στο επίπεδο σύμφωνα με τον αλγόριθμο "gauss's area formula and the surveyor's formula".

$$A = \frac{1}{2} \times \left| \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_i + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i + x_1 y_n \right| = A_{\text{sun-patch}} \quad (54)$$

Όπου,

- $A$ : Το εμβαδόν του πολυγώνου, που αντιστοιχεί στην επιφάνεια των ηλιακών ιχνών που σχηματίζεται στο επίπεδο της οροφής.
- $n$ : Ο αριθμός των πλευρών του πολυγώνου.
- $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ : Οι κορυφές (ή γωνίες) του πολυγώνου.

Από την άλλη πλευρά, ο συνολικός αριθμός των ηλιοστατών και το εμβαδόν τους είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος ASRS, ενώ η γεωμετρία του χώρου γραφείων, ορίζεται από τα δεδομένα εισόδου του χρήστη. Παρέχοντας τα κλιματικά δεδομένα ως στοιχεία εισόδου (χρονοδιαγράμματα τιμών) για μια σειρά ημερών ή για ολόκληρο το έτος (ετήσια), καθώς και τις απαραίτητες γεωμετρικές πληροφορίες για τον χώρο (δηλ. Διαστάσεις, αναλογία παραθύρου-τοίχου, ανακλαστικότητα των επιφανειών, κλπ.) και τα χαρακτηριστικά του ASRS ο αλγόριθμος για τον προσδιορισμό της θέσης των

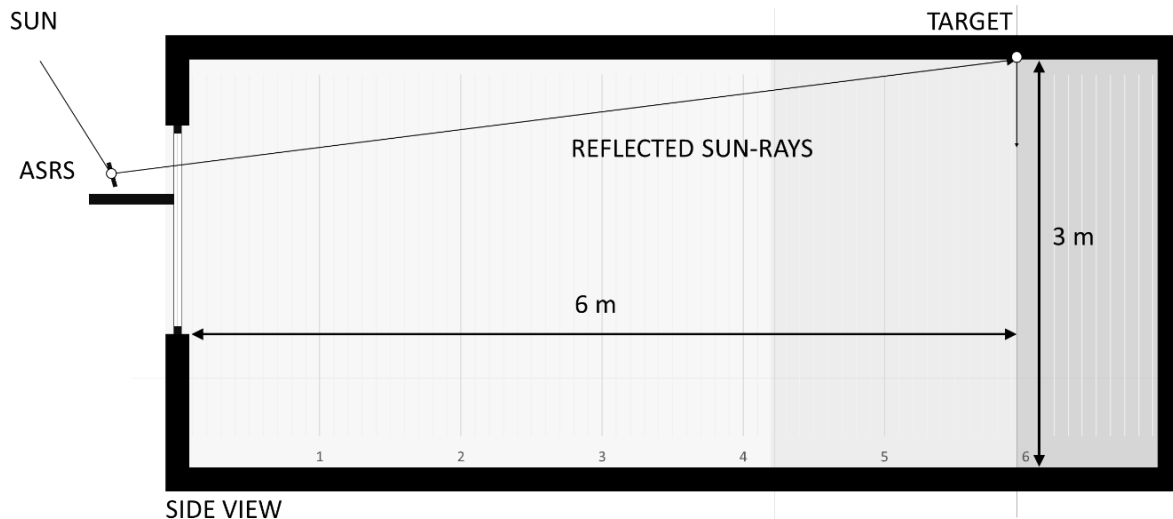


ηλιοστατών, του ηλιακού ίχνους και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας του πρωτότυπου ASRS μπορεί να εκτελεστεί. Οι ακόλουθες δυνατότητες και περιορισμοί υπάρχουν στο πρόγραμμα:

- Θεωρείται ότι όλοι οι ηλιοστάτες έχουν το ίδιο μέγεθος.
- Οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν μόνο για ορθογώνιους ηλιοστάτες.
- Το πρόγραμμα υποθέτει ότι οι ηλιοστάτες είναι τοποθετημένοι σε σειρά.
- Θεωρείται ότι η κάθε επιφάνεια ηλιοστάτη σχηματίζεται από τέσσερα (4) σημεία στις γωνίες τους.

Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (ASRS), ως χώρος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένας βαθύς χώρος γραφείου. Ο χώρος είχε ένα κατακόρυφο παράθυρο χωρίς εξωτερικά εμπόδια με αναλογία παραθύρου-δαπέδου (Window to Floor Ratio (WFR)) 10% (συμπεριλαμβανομένου του πλαισίου του παραθύρου). Ένα παρόμοιο δωμάτιο έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν [39, 40], με μικρότερο βάθος (~5.4 m). Οι προσομοιώσεις έλαβαν χώρα για Νότιο προσανατολισμό. Συνολικά τέσσερα (4) σενάρια του δεδομένου χώρου, με εναλλακτικές διαμορφώσεις του ανοίγματος δημιουργήθηκαν και προσομοιώθηκαν για την Αθήνα, Ελλάδα (Γεωγραφικό πλάτος  $37.9^{\circ}$ , Γεωγραφικό μήκος  $23.7^{\circ}$ ). Ο Πίνακας 12 παρέχει τα σενάρια που προσομοιώθηκαν, ενώ η Εικόνα 40 απεικονίζει τον χώρο με το σύστημα τοποθετημένο.

Οι διαστάσεις του χώρου ήταν: Πλάτος (width) 4 m, Μήκος (length) 7 m, και 3 m ύψος (height), με ανακλαστικότητες των εσωτερικών επιφανειών για το δάπεδο, τοίχους και οροφή 20%, 60% και 80% αντίστοιχα. Η ποδιά του παραθύρου είχε ύψος 1 m, με τις ακόλουθες διαστάσεις: ύψος 1.5 m και πλάτος 1.6 m, με πλαίσιο παραθύρου  $0.05 \times 0.05$  m. Το παράθυρων περιλαμβάνει ένα διαφανές διπλό υαλοπίνακα Low-E τύπου με συντελεστή ορατής διαπερατότητας (visible transmittance) 74.4%, συντελεστή ηλιακής θερμότητας (Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)) 56.8% και συντελεστή θερμοπερατότητας (U-Factor)  $1.912 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ .



**Εικόνα 40:** Στόχος (target) των εισερχομένων ηλιακών ακτίνων (incoming sun-rays) του προτεινομένου συστήματος (ASRS) στην οροφή του χώρου γραφείων.

**Πίνακας 12:** Περιγραφή σεναρίων.

Σενάριο	Περιγραφή
Βασικό σενάριο (BASE CASE)	Χώρος αναφοράς, χωρίς την παρουσία σκιάστρων και χωρίς εξωτερικά εμπόδια
Σενάριο με ράφι φωτισμού (LIGHTSHELF CASE)	Χώρος αναφοράς με τοποθετημένο εξωτερικό ράφι φωτισμού πλάτους 0.5 m και μήκους ίσο με το μήκος του παραθύρου (1.6 m)
Σενάριο Α με το σύστημα ανακατεύθυνσης της Ηλιάκης ακτινοβολίας (SUNLIGHT CASE A)	Χώρος αναφοράς με το προτεινόμενο ASRS με διαστάσεις ανακλαστήρων 0.15 × 0.15 m
Σενάριο Β με το σύστημα ανακατεύθυνσης της Ηλιάκης ακτινοβολίας (SUNLIGHT CASE B)	Χώρος αναφοράς με το προτεινόμενο ASRS με διαστάσεις ανακλαστήρων 0.2 × 0.2 m

Το BASE CASE (βασικό σενάριο) αναφέρεται στον χώρο του γραφείου όπως έχει περιγραφεί παραπάνω. Το σύστημα του ραφιού φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο LIGHTSHELF CASE είχε μία ανακλαστική επιφάνεια απόλυτα διάχυτη (80% ανακλαστικότητα), τοποθετημένο εξωτερικά σε ύψος 2 m από το δάπεδο, με πλάτος 0.5 m και μήκος ίσο με το μήκος του παραθύρου (1.6 m). Τα σενάρια SUNLIGHT CASE A και

SUNLIGHT CASE B αντιστοιχούν στο προτεινόμενο πρωτότυπο σύστημα ASRS. Το σύστημα τοποθετήθηκε σε ύψος 2 m από το δάπεδο, διαιρώντας το παράθυρο σε ένα χαμηλό τμήμα 1 m και ένα υψηλό 0.5 m.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) ηλιοστάτες σε σειρά με συλλέκτες διαστάσεων  $0.15 \times 0.15$  m το κάθε ένα συνολικής επιφάνειας έκαστος  $0.0225$  m<sup>2</sup> για το σενάριο SUNLIGHT CASE A και για το σενάριο SUNLIGHT CASE B,  $0.2 \times 0.2$  m μ το κάθε ένα συνολικής επιφάνειας έκαστος  $0.04$  m<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Το ράφι φωτισμού ήταν απόλυτα διάχυτο (perfectly diffuse (80%)) και οι ηλιοστάτες θεωρήθηκαν ότι είχαν ανακλαστικότητα στο ορατό (specular reflectance) 98%. Η συστοιχία συλλεκτών ρυθμίστηκε για να ανακατευθύνει τις εισερχόμενες ακτίνες του ήλιου προς το πίσω μέρος του δωματίου, πέρα από την περιμετρική ζώνη στα και 6 m από το άνοιγμα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 39.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός, το σχήμα και το μέγεθος των συλλεκτών εξαρτάται από τους περιορισμούς των διαστάσεων του παραθύρου (συνολικό πλάτος και μήκος). Το σύστημα μπορεί να φιλοξενήσει συγκεκριμένο αριθμό ηλιοστατών, οι οποίοι μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα για την αποφυγή συγκρούσεων με τους γειτονικούς τους ηλιοστάτες. Αυτό στα ηλιοστατικά συστήματα αναφέρεται ως σκίαση (shadowing) και αποκλεισμός (blocking) που με τη σειρά τους μπορεί να προκαλέσει μείωση της απόδοσης του συστήματος. Η σκίαση συμβαίνει σε χαμηλές γωνίες ηλίου όταν ένας ηλιοστάτης σκιάζει άλλους ηλιοστάτες που βρίσκονται πίσω του. Επομένως, δεν φτάνει όλη η ηλιακή ροή στον ηλιοστάτη. Ο αποκλεισμός συμβαίνει όταν ένας ηλιοστάτης βρίσκεται μπροστά από έναν άλλο ηλιοστάτη και εμποδίζει την ανακλώμενη ροή προς τον στόχο. Ο αποκλεισμός μπορεί να παρατηρηθεί σημειώνοντας το ανακλώμενο φως στις πλάτες της επιφάνειας των ηλιοστατών.

Για τις προσομοιώσεις φ.φ. χρησιμοποιήθηκε ένα κানাβος ανάλυσης  $0.5 \times 0.5$  m, με συνολικά 105 σημεία υπολογισμού κατά μήκος της επιφάνειας εργασίας σε ύψος 0.8 m πάνω από το επίπεδο του δαπέδου. Το διάκενο της περιμετρικής ζώνης μεταξύ του πλέγματος και των περιμετρικών τοιχωμάτων καθορίστηκε στα 0.25 m. Οι παράμετροι του Radiance για τις προσομοιώσεις φ.φ. παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

**Πίνακας 13:** Παράμετροι προσομοίωσης Radiance που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια.

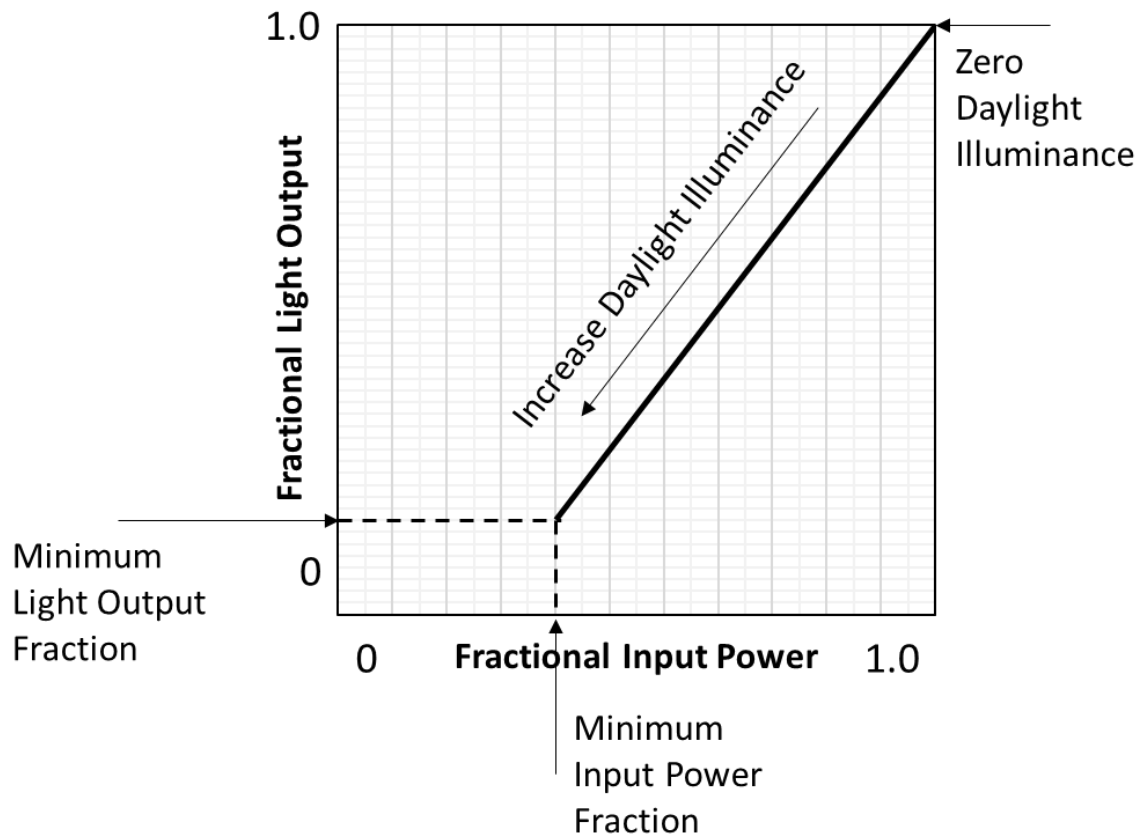
Παράμετροι	Τιμές
Ambient bounces (-ab)	5
Ambient division (-ad)	4096
Ambient sampling (-as)	2048
Ambient resolution (-ar)	1024
Ambient accuracy (-aa)	0.1
Direct relays for secondary sources (-dr)	1

Για τις ενεργειακές προσομοιώσεις, ο χώρος γραφείου σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αποτελεί μέρος ενός κτιρίου γραφείων με μόνο μία πρόσοψη εκτεθειμένη στο εξωτερικό περιβάλλον. Η αίθουσα γραφείων κατασκευάστηκε για να καλύψει τις ελάχιστες απαιτήσεις (Β' Κλιματική Ζώνη) του κανονισμού N. 3661/2008: Κανονισμός για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων-ΚΕΝΑΚ [41], όπου περιγράφεται η μεθοδολογία υπολογισμού σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα από 08:00 έως 18:00 χωρίς να υπολογίζονται Σαββατοκύριακα. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας για την Πρόσοψη (façade U-value)  $0.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (πάχος τοιχώματος πρόσοψης 0.255 m). Τα Σημεία ρύθμισης της θερμοκρασίας (Temperature set points) ήταν  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  για ψύξη και  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  για θέρμανση, η εγκατεστημένη ισχύς για το σύστημα τεχνητού φωτισμού  $16 \text{ W/m}^2$ , και η ισχύς για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό  $15 \text{ W/m}^2$ . Ο Πίνακας 14 συνοψίζει τα θερμικά χαρακτηριστικά των εσωτερικών επιφανειών και τις εσωτερικές συνθήκες σχεδιασμού του χώρου.

Ένα ιδανικό σύστημα ρύθμισης του τεχνητού φωτισμού με αισθητήρες διαμορφώθηκε για να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της κλασματικής ισχύος εισόδου (fractional input power) και της κλασματικής φωτεινής ροής (fractional lighting output), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 41.

**Πίνακας 14:** Παράμετροι προσομοίωσης EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια.

<b>Παράμετροι</b>	<b>Τιμές</b>
construction set (min. requirements)	
Exterior Wall U-value (W/m <sup>2</sup> K)	0.5
Window Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)	0.568
Window Visible Transmittance (%)	74.4
Glass U-Factor (W/m <sup>2</sup> K)	1.912
Frame Conductance (W/m <sup>2</sup> K)	56.424
Interior conditions (min. Requirements)	
Hours Of Operation (hrs)	10 (from 08:00 to 18:00)
Mechanical Ventilation (m <sup>3</sup> /sec)	0.03
Infiltration (ACH)	1
Occupancy (person/m <sup>2</sup> )	0.1
Electric Lights (W/m <sup>2</sup> )	16
Electric Equipment (W/m <sup>2</sup> )	15
Thermostat Set Points	
Heating Set Point (°C)	20
Cooling Set Point (°C)	26



**Εικόνα 41:** Διάγραμμα συνεχούς ρύθμισης του τεχνητού φωτισμού (continuous dimming). Το σχήμα δείχνει τη γραμμική σχέση μεταξύ της κλασματικής ισχύος εισόδου και της κλασματικής φωτεινής ροής.

Η εξοικονόμηση ενέργειας φωτισμού για όλες τις περιπτώσεις υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Radiance όπου και τα αποτελέσματα μετατράπηκαν σε χρονοδιαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην μηχανή ενεργειακής προσομοίωσης EnergyPlus. Η εξοικονόμηση ενέργειας φωτισμού υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας δύο (2) σημεία υπολογισμού μέσα στο δωμάτιο: ένα (1) στο κέντρο της περιοχής της περιμετρικής ζώνης φ.φ., όπως υπολογίστηκε με το πρότυπο EN 15193: 1 [42] στα 2.125 m και το άλλο στο κέντρο της δευτερεύουσας ζώνης φ.φ., στο πίσω μέρος του δωματίου στα 5.625 m. Η ένταση φωτισμού του χώρου (design illuminance) ρυθμίστηκε στα 500 lx και για τους δύο αισθητήρες [43]. Οι παράμετροι προσομοίωσης του συστήματος φωτισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

**Πίνακας 15:** Χαρακτηριστικά τεχνητού συστήματος φωτισμού.

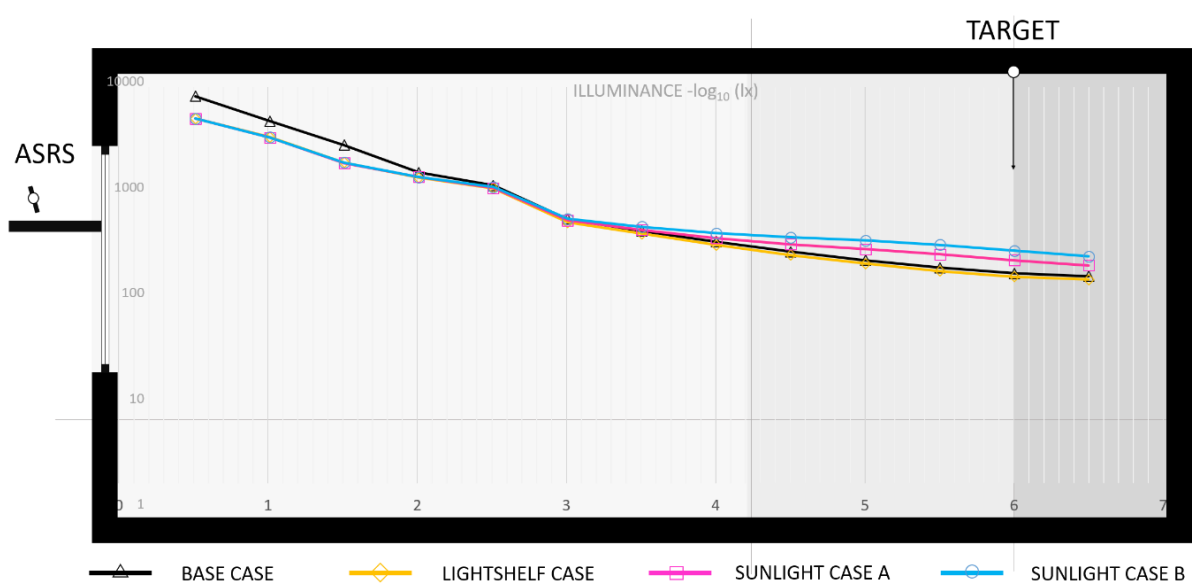
<b>Παράμετροι</b>	<b>Τιμές</b>
Luminaire type	Surface mount fluorescent lamps
Return air fraction	0.33
Fraction radiant	0.42
Fraction visible	0.18
Fraction replaceable	1
Min. Fractional electric lighting input power	0.15
Min. Fractional electric lighting output	0.05

### 3.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η απόδοση του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system (ASRS)) αξιολογήθηκε και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων διαμορφώσεων του χώρου.

**Πίνακας 16:** Οι ετήσιες μέσες τιμές φωτισμού κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των χωρών για τα σενάρια.

ILL. (lx)/Βάθος (m)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
BASE CASE	7259	4221	2511	1378	1037	499	386	304	245	204	173	153	144
LIGHTSHELF CASE	4473	2985	1716	1231	976	463	362	284	228	190	161	142	134
SUNLIGHT CASE A	4472	2959	1697	1251	986	484	395	330	288	259	231	203	182
SUNLIGHT CASE B	4466	2972	1716	1243	1004	502	421	366	335	313	285	250	221



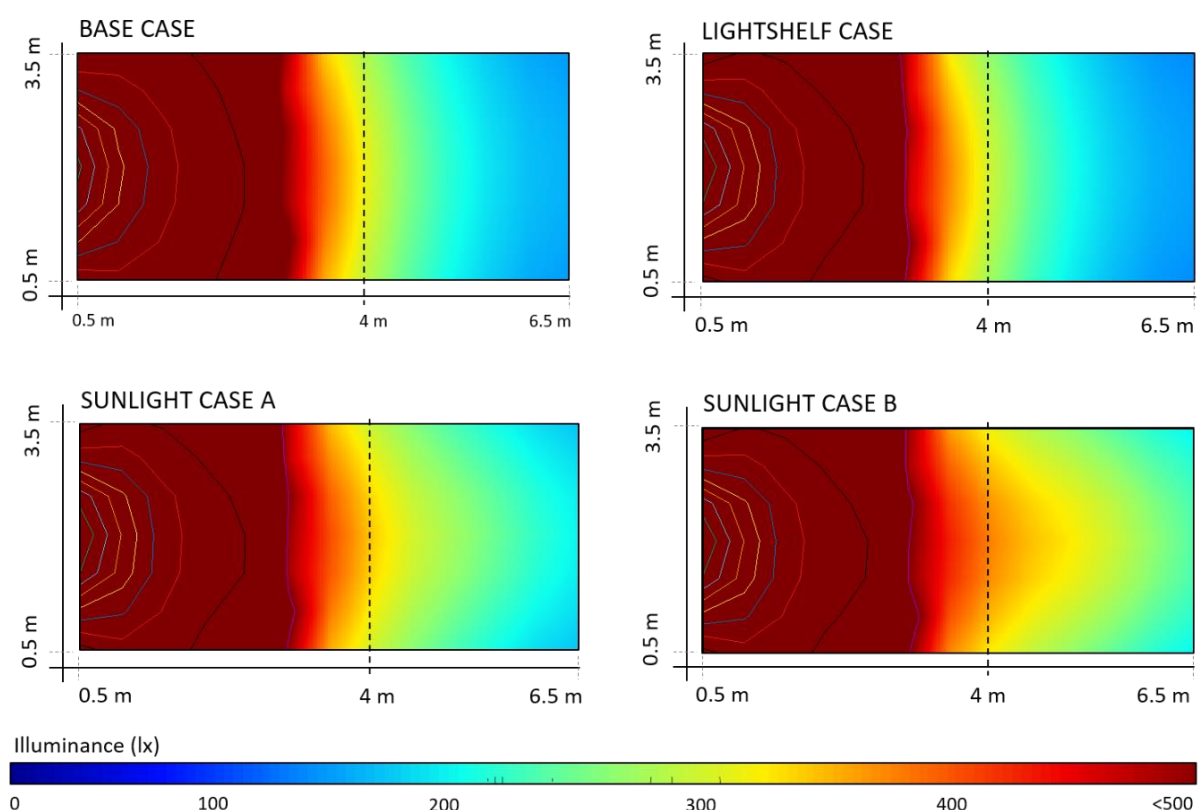
**Εικόνα 42:** Ετήσια μέση κατανομή του Φ.Φ. Κατά μήκος της κεντρικής γραμμής για τα σενάρια.

Η Εικόνα 42 απεικονίζει τα αποτελέσματα της μέσης τιμής του φωτισμού σε ετήσια βάση κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης στην μέση της πρόσοψης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει τις αντίστοιχες τιμές της έντασης φωτισμού. Τα



σενάρια SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B αντιστοιχούν στον χώρο αναφοράς με το πρωτότυπο ASRS τοποθετημένο, με εμβαδό καθρέφτη 0.0225 m<sup>2</sup> και 0.04 m<sup>2</sup>, αντίστοιχα. Το σενάριο BASE CASE και το σενάριο LIGHTSHELF CASE αποτελούν τις περιπτώσεις αναφοράς και αντιστοιχούν στον χώρο με το παράθυρο μόνο (όπως περιγράφεται παραπάνω) και στον χώρο με το ράφι φωτισμού τοποθετημένο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις περιπτώσεις αναφοράς, με αύξηση των τιμών φυσικού φωτισμού μέσω της λειτουργίας των κινητών κατόπτρων, ειδικά στη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. του χώρου (> 4.25 m, όπως υπολογίζεται από το πρότυπο EN 15193 – 1 [42]). Σε σύγκριση με το σενάριο BASE CASE, ο χώρος γραφείου εξοπλισμένος με το προτεινόμενο σύστημα (ASRS) επιφέρει αύξηση στα επίπεδα φωτισμού στην δευτερεύουσα περιοχή από 30% για το SUNLIGHT CASE A, σε πάνω από 50% για το SUNLIGHT CASE B.



**Εικόνα 43:** Κατανομή των επιπέδων φωτισμού (μέσες τιμές) σε όλη την επιφάνεια του χώρου κατά τις ώρες εργασίας (08:00-17:00) για τις προσομοιωμένες περιπτώσεις.

Η αύξηση του μεγέθους του καθρέπτη κατά 80%, από 0.0225 m<sup>2</sup> έως 0.04 m<sup>2</sup>, αυξάνει τις μέσες τιμές φωτισμού στη δευτερεύουσα περιοχή περίπου κατά 20%. Η γραφική απεικόνιση της περιοχής στην Εικόνα 43 αντιστοιχεί στην ετήσια μέση κατανομή του φυσικού φωτισμού για όλες τις περιπτώσεις, στην επιφάνεια εργασίας (0.8 m από το δάπεδο), όπου είναι εμφανής η διαφορά απόδοσης μεταξύ των περιπτώσεων που είναι εξοπλισμένες με το προτεινόμενο σύστημα σε σχέση με τα σενάρια αναφοράς.

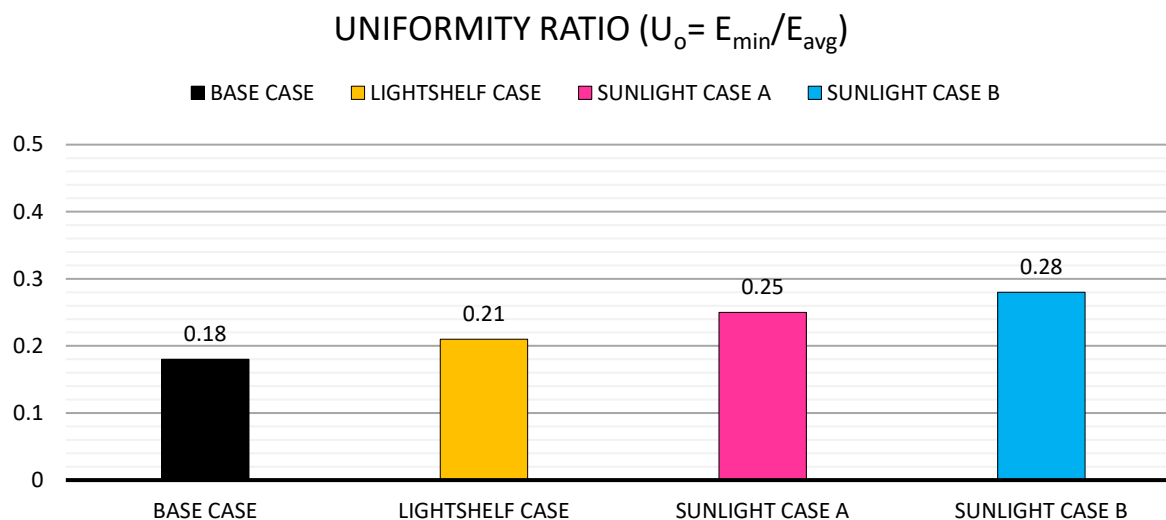
Η ομοιομορφία στην κατανομή του φωτισμού από την παρουσία του πρωτότυπου συστήματος επηρεάζεται σημαντικά. Οι τιμές ομοιομορφίας εκφραζόμενες ως αναλογία των ελάχιστων τιμών φωτισμού (min. illuminance) προς τον μέσο όρο για όλα τα σενάρια παρουσιάζεται στην Εικόνα 44. Οι υψηλές τιμές φωτισμού κοντά στο άνοιγμα και οι χαμηλότερες στο πίσω μέρος δημιουργούν ένα μη ομοιόμορφο περιβάλλον φωτισμού με υψηλές αντιθέσεις. Η εφαρμογή του προτεινόμενου ASRS για τις περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B (με εμβαδό καθρέπτη 0.0225 m<sup>2</sup> και 0.04 m<sup>2</sup>), καταφέρνει να εξισορροπήσει την κατανομή φωτισμού μέσα στο χώρο. Αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον, αφού το σύστημα του τεχνητού φωτισμού του δωματίου μπορεί να ελεγχθεί, χρησιμοποιώντας μόνο έναν αισθητήρα για την ρύθμιση της στάθμης.

**Πίνακας 17:** Ομοιομορφίες φωτισμού (uniformity ratios) των προσομοιωμένων περιπτώσεων.

Σενάριο	Αναλογία ομοιομορφίας	Αύξηση (%)
BASE CASE	0.18	–
LIGHTSHELF CASE	0.21	16.3
SUNLIGHT CASE A	0.25	38.5
SUNLIGHT CASE B	0.28	54.8

Ο πίνακας 17 παρουσιάζει τις υπολογισμένες τιμές ομοιομορφίας των προσομοιωμένων περιπτώσεων. Η αύξηση των επιπέδων φωτισμού στο πίσω μέρος του δωματίου, ως αποτέλεσμα της παρουσίας του εξωτερικού ραφίου φωτισμού, μειώνει τις μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ του μπροστινού και πίσω τμήματος του χώρου, παρέχοντας μια πιο ισορροπημένη κατανομή. Η LIGHTSHELF CASE βελτιώνει την ομοιομορφία κατά 16.3% σε

σχέση με το σενάριο BASE CASE. Τα σενάρια SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B (με τη συστοιχία καθρεπτών ηλιακής ιχνηλάτησης) καταφέρνουν να βελτιώσουν την ομοιομορφία κατά περίπου 39% και 55% αντίστοιχα.



**Εικόνα 44:** Ομοιομορφία τιμών φωτισμού (Uniformity Ratios) των προσομοιωμένων περιπτώσεων.

Οι εσωτερικές απόψεις των εξεταζόμενων περιπτώσεων απεικονίζονται στην Εικόνα 45 για το θερινό (6/21) και χειμερινό (12/21) ηλιοστάσιο κατά τις ώρες εργασίας (08:00-17:00). Για τις περιπτώσεις που είναι εξοπλισμένες με το ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (ASRS), τα ηλιακά ίχνη που δημιουργούνται στην οροφή εξαρτώνται από το μέγεθος, το σχήμα και τις φωτομετρικές ιδιότητες του συλλέκτη.

Η κατοπτρική ανάκλαση (Specular reflection) δημιουργεί ένα καθορισμένο ρομβοειδές σχήμα και παράλο που το σημείο στόχου είναι σταθερό, το συνολικό εμβαδό του σημείου μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της αλλαγής της σχετικής θέσης του συλλέκτη ως προς τον ήλιο. Το εμβαδόν κάθε ηλιακού ίχνους στην οροφή κυμαίνεται περίπου από 0.05 m<sup>2</sup> έως 0.14 m<sup>2</sup> για την περίπτωση SUNLIGHT CASE A, και περίπου από 0.1 m<sup>2</sup> έως 0.24 m<sup>2</sup> για το SUNLIGHT CASE B.

Οι προαναφερθέντες ρομβοειδείς επιφάνειες παρουσιάζονται στην Εικόνα 46 για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B, κατά τη διάρκεια του θερινού και χειμερινού ηλιοστάσιου για τις ώρες εργασίας (από τις 08:00 έως τις 17:00) μαζί με το ετήσιο συνολικό εμβαδό του στόχου που δημιουργήθηκε στη οροφή για την SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B.

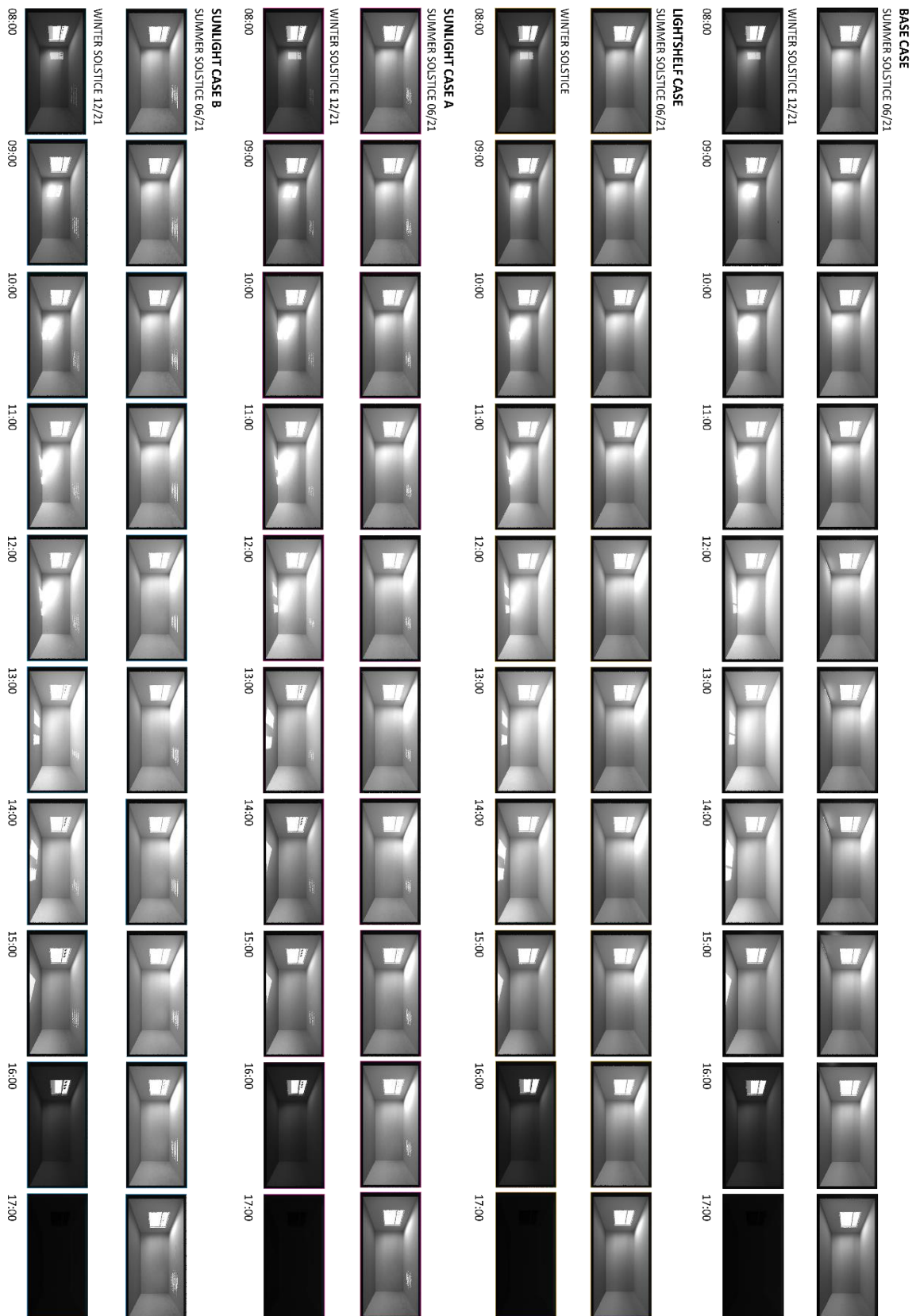
Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει το εμβαδό του ηλιακού ίχνους (target area) στην οροφή, που δημιουργείται από έναν καθρέφτη για τις περιπτώσεις που είναι εξοπλισμένες με το ASRS. Η συνολική έκταση εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, όπου η υψηλότερη θέση ηλιοφάνειας αντιστοιχεί σε μια μικρότερη επιφάνεια του ηλιακού ίχνους. Η αύξηση της περιοχής στόχου από χειμώνα σε καλοκαίρι είναι περίπου 100%.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ενεργειακής απόδοσης του χώρου από πλευράς ζήτησης ενέργειας (energy demand), τελικής ενέργειας (final energy) και πρωτογενούς ενέργειας (primary energy), για τα διάφορα σενάρια παρουσιάζονται στην Εικόνα 47. Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό για την "Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων - KENAK" [41], οι συντελεστές μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας είναι 2.9 για την ηλεκτρική ενέργεια και 1.05 για το φυσικό αέριο, ενώ η απόδοση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης (με χρήση συντελεστή ενεργειακής απόδοσης) για το κτίριο αναφοράς είναι 0.95 και 2.8 αντίστοιχα.

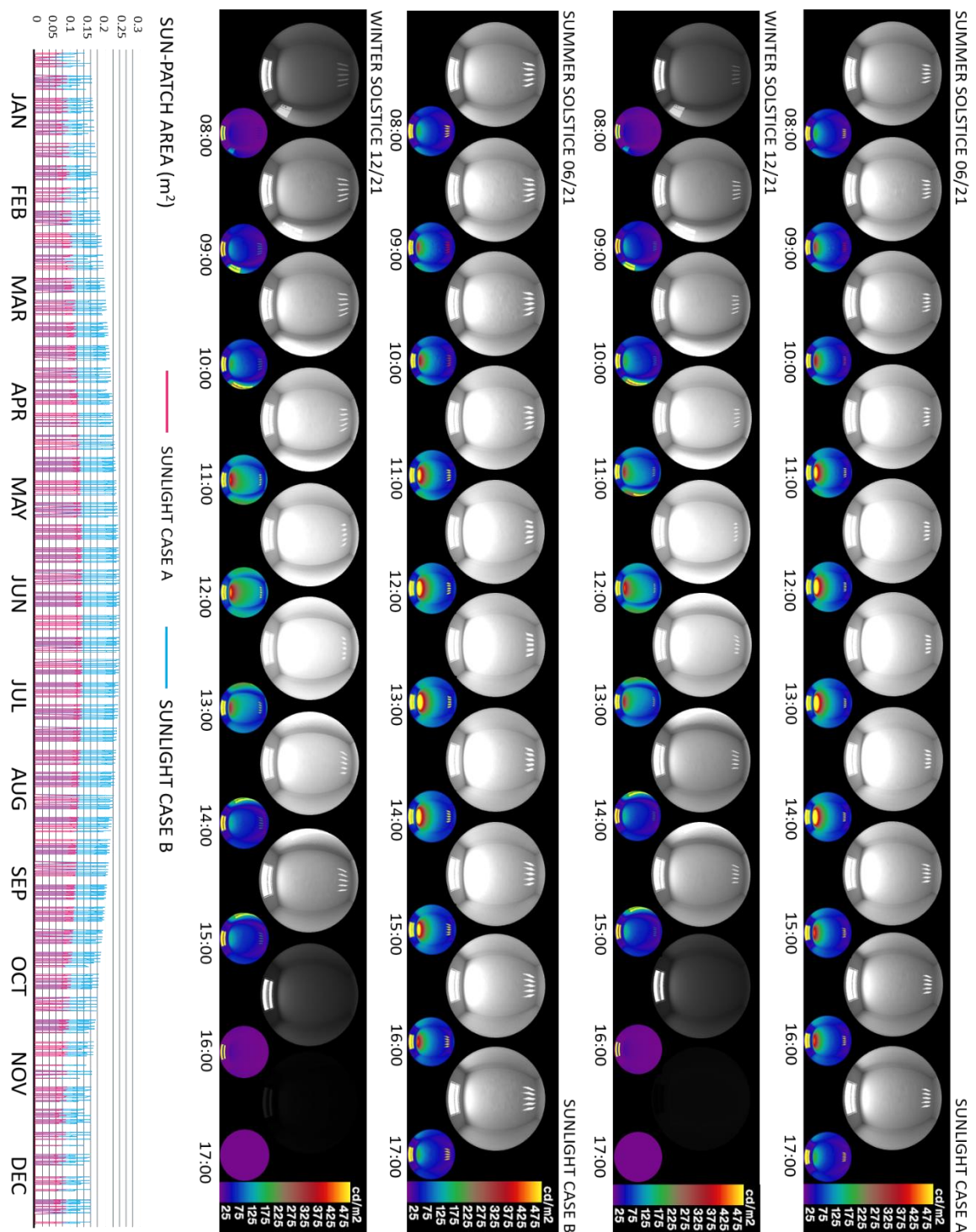
Η επίδραση των ηλιακών ίχνων που σχηματίζονται από την ανάκλαση των καθρεπτών στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το "SurfaceProperty: SolarIncidentInside" του EnergyPlus. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, ο κανονικός υπολογισμός EnergyPlus αντικαθίσταται από ένα χρονοδιάγραμμα των τιμών των θερμικών κερδών που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του αλγόριθμου ηλιακής ιχνηλάτησης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η κατανομή των θερμικών κερδών σε σχέση με την επιφάνεια του ηλιακού ίχνους στο επίπεδο της οροφής για το SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B παρουσιάζεται στην Εικόνα 48, ενώ ο Πίνακας 18 δείχνει τις τιμές που προκύπτουν για το χειμερινό (21/21) και θερινό ηλιοστάσιο (06/12 ) αντίστοιχα.

**Πίνακας 18:** Διακύμανση του εμβαδού του ηλιακού ίχνους (sun-patch) που δημιουργείται από έναν καθρέφτη με την πάροδο του χρόνου, για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο για τις περιπτώσεις με το πρωτότυπο σύστημα.

<b>Winter Solstice (12/21)</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Target Area (m<sup>2</sup>)</b>
08:00	0.069	0.122
09:00	0.061	0.108
10:00	0.055	0.099
11:00	0.054	0.097
12:00	0.058	0.102
13:00	0.064	0.115
14:00	0	0
15:00	0	0
16:00	0	0
17:00	0	0
<b>Summer Solstice (06/21)</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Target Area (m<sup>2</sup>)</b>
08:00	0.124	0.221
09:00	0.12	0.213
10:00	0.117	0.208
11:00	0.116	0.206
12:00	0.118	0.209
13:00	0.121	0.216
14:00	0.126	0.224
15:00	0.132	0.235
16:00	0	0
17:00	0	0

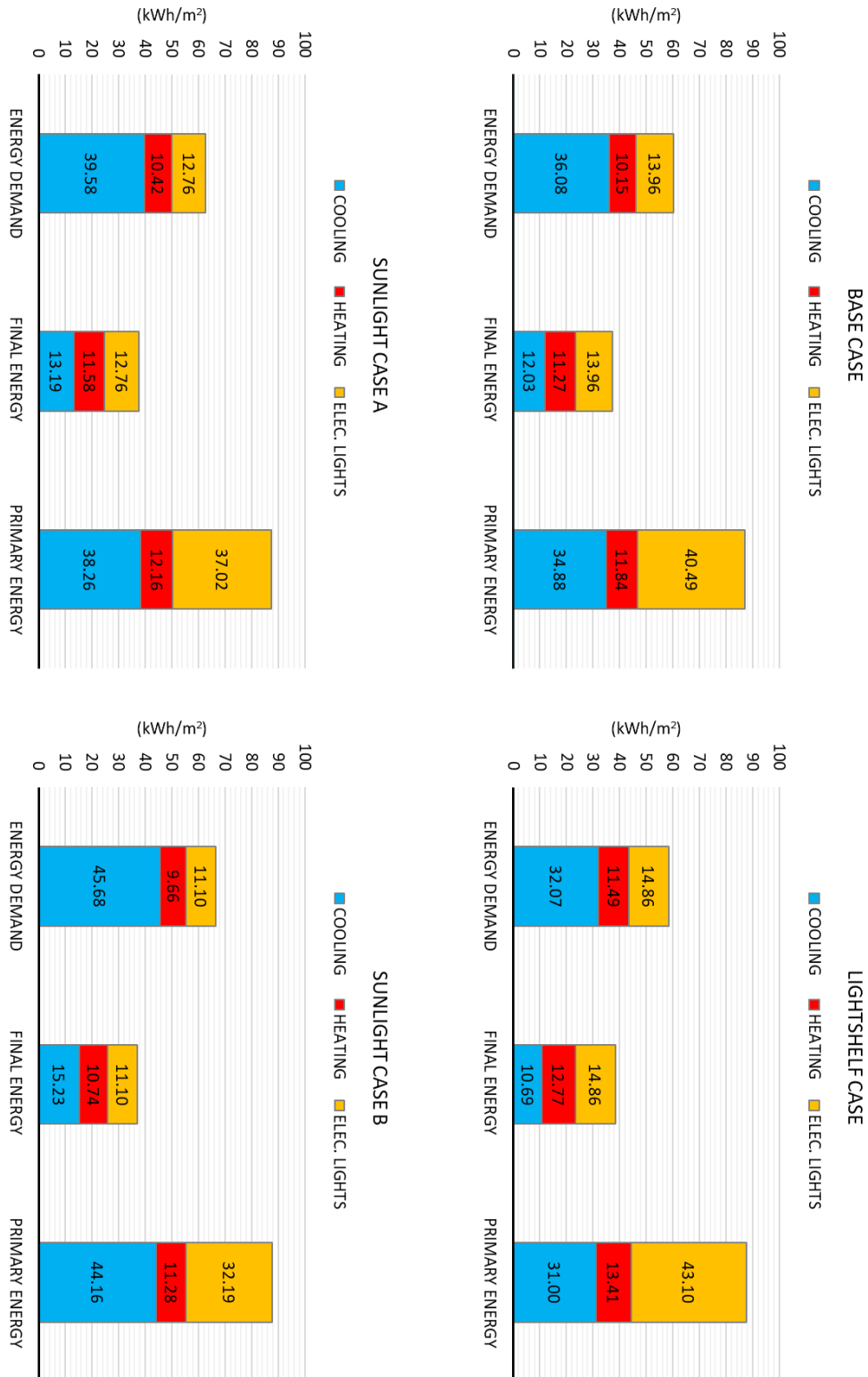


**Εικόνα 45:** Συνθετικές εικόνες Radiance για τις προσομοιωμένες περιπτώσεις κατά τη διάρκεια του θερινού (21/06) και χειμερινού (21/12) ηλιοστάσιου.



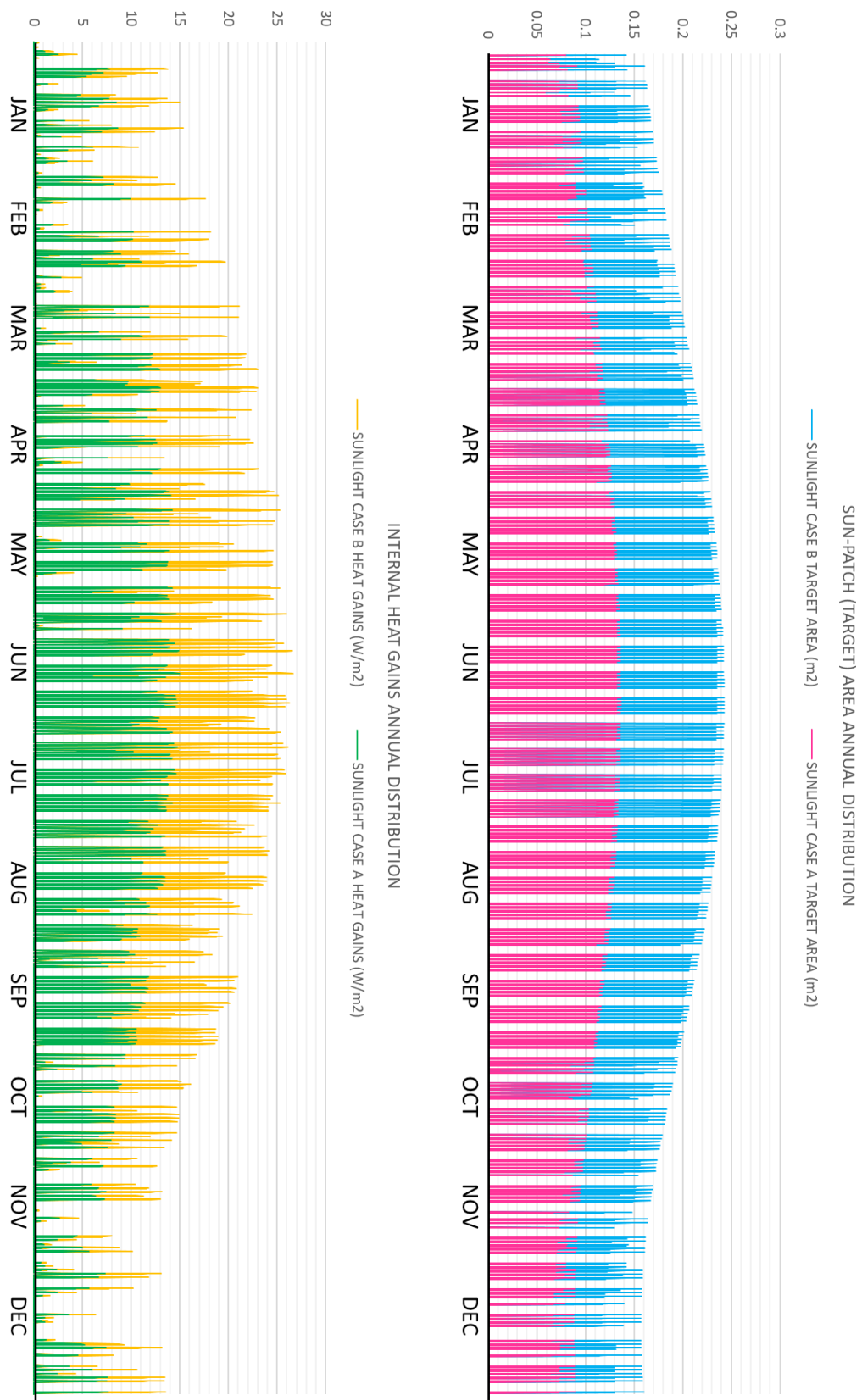
**Εικόνα 46:** Συνθετικές εικόνες Radiance (fish-eye views) της οροφής του εσωτερικού χώρου για το θερινό (6/21) και χειμερινό ηλιοστάσιο (12/21) κατά τις ώρες εργασίας, και η κατανομή του εμβαδού του ηλιακού ίχνους, για τις περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B.





**Εικόνα 47:** Ετήσια ενεργειακή απόδοση των προσομοιωμένων περιπτώσεων όσον αφορά τη ζήτηση ενέργειας, την τελική ενέργεια και την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (συντελεστές μετατροπής για ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση, 2,9 και 1,05 για φυσικό αέριο αντίστοιχα).





**Εικόνα 48:** ετήσια κατανομή των εσωτερικών θερμικών κερδών σε σχέση με το ηλιακό ίχνος για την περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B.

**Πίνακας 19:** Κατανομή του εμβαδού του ηλιακού ίχνους και των εσωτερικών θερμικών κερδών για SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B κατά τη διάρκεια των ωρών εργασίας (08:00-17:00) για το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο.

<b>Winter solstice</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Heat Gains (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Heat Gains (W/m<sup>2</sup>)</b>
08:00	0.069	0.841	0.122	1.487
09:00	0.061	2.532	0.108	4.484
10:00	0.055	3.515	0.099	6.326
11:00	0.054	4.560	0.097	8.191
12:00	0.058	2.991	0.102	5.261
13:00	0.064	0.861	0.115	1.548
14:00	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0
<b>Summer Solstice</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE A Heat Gains (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Target Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>SUNLIGHT CASE B Heat Gains (W/m<sup>2</sup>)</b>
08:00	0.124	2.530	0.221	4.509
09:00	0.120	6.019	0.213	10.684
10:00	0.117	10.808	0.208	19.215
11:00	0.116	12.968	0.206	23.029
12:00	0.118	13.559	0.209	24.016
13:00	0.121	12.567	0.216	22.433
14:00	0.126	11.051	0.224	19.646
15:00	0.132	6.976	0.235	12.420
16:00	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ενεργειακές προσομοιώσεις EnergyPlus δείχνουν την ενεργειακή απόδοση του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system (ASRS)). Συγκρίνοντας το σενάριο αναφοράς (BASE CASE) με το SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B, η μείωση της χρήσης του ηλεκτρικού ρεύματος για τεχνητό φωτισμό εκτιμάται σε 9% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE A και σε 20% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B. Η μείωση αυξάνεται σε σύγκριση με το LIGHTSHELF CASE κατά περίπου 14% και 25% για το SUNLIGHT CASE A και το SUNLIGHT CASE B, αντίστοιχα.

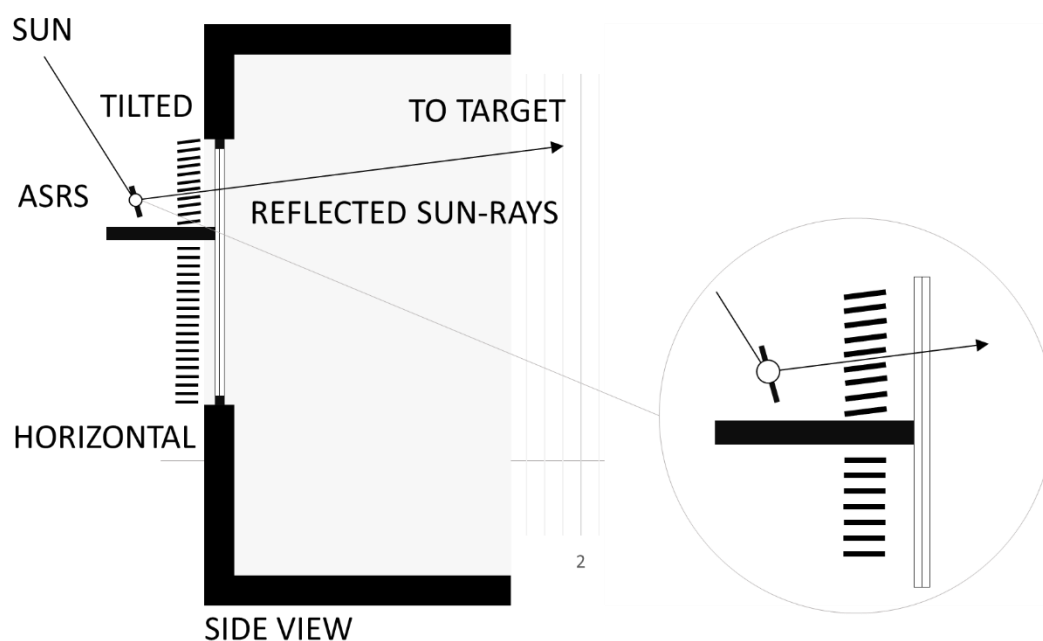
Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη μπορεί να είναι χρήσιμα όταν ο χώρος απαιτεί θέρμανση (κατά τη διάρκεια του χειμώνα) αλλά δεν είναι όταν το κτίριο χρειάζεται ψύξη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Γενικά, τα συστήματα ψύξης πρέπει να αντισταθμίζουν τη θερμότητα που παράγεται από το σύστημα φωτισμού και την προσθήκη άλλων εσωτερικών θερμικών φορτίων όπως ο ηλεκτρικός εξοπλισμός, η παρουσία ανθρώπων κλπ. Η χρήση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου του τεχνητού φωτισμού βοηθά στη μείωση της επιβάρυνσης του συστήματος ψύξης, καθώς το σύστημα φωτισμού προσθέτει λιγότερη θερμότητα στο χώρο ανά μονάδα εκπεμπόμενης φωτεινής ροής. Κατά συνέπεια, το σύστημα ψύξης απαιτεί λιγότερη ενέργεια για να καλύψει τη ζήτηση για τη διατήρηση των επιπέδων θερμοκρασίας στο επιθυμητό σημείο ρύθμισης.

Για τις περιπτώσεις που είναι εξοπλισμένες με το ASRS, τα θερμικά κέρδη προστίθενται στον χώρο από τις συστοιχίες καθρεφτών και εξαρτώνται από το αρχικό τους μέγεθος και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ειδικότερα την άμεση συνιστώσα. Όσον αφορά την κατανάλωση ψύξης, υπάρχει μια φαινομενική αύξηση, η οποία υπολογίζεται σε  $\approx 9\%$  για την περίπτωση SUNLIGHT CASE A και σε ποσοστό  $\approx 26\%$  για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B σε σύγκριση με την υπόθεση αναφοράς BASE CASE. Σε σύγκριση με το συμβατικό ράφι φωτισμού (LIGHTSHELF CASE), η αύξηση της κατανάλωσης σε ψύξη εκτιμάται σε  $\approx 23\%$  και  $\approx 42\%$  αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η ανακατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας (sunlight redirection) βελτιώνει σαφώς τα επίπεδα φωτισμού στη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. και την ομοιομορφία του χώρου, αλλά η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας είναι αμφίβολη για τις

περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι το γεγονός ότι τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε χώρους με πλευρικά παράθυρα. Όταν τα παράθυρα αυτά έχουν μεγάλο μέγεθος, ο χώρος μπορεί να καταστεί κορεσμένος από φυσικό φωτισμό (ειδικά τους χειμερινούς μήνες, όταν η θέση του ήλιου είναι χαμηλά στον ουρανό) καθιστώντας έτσι τη συμβολή των συστημάτων ασήμαντη.

Η επίδραση ενός συστήματος σκίασης εξετάστηκε μαζί με το προτεινόμενο σύστημα στο [44], για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας πιο αποτελεσματικά. Το σύστημα σκίασης στο κάτω μέρος του παραθύρου αποτελούταν από σταθερές οριζόντιες εξωτερικές περσίδες με γωνία κλίσης των περσίδων  $90^{\circ}$ , καλύπτοντας ολόκληρο το τζάμι. Το πλάτος και το μεταξύ τους διάκενο θεωρήθηκε 0.025 m, ενώ η ανακλαστικότητα (Lambertian) θεωρήθηκε 80%. Οι περσίδες που βρίσκονταν στο πάνω τμήμα του παραθύρου είχαν την ίδια γωνία κλίσης με τη γωνία-στόχου των συλλεκτών προκειμένου να επιτρέψουν στο φως του ήλιου να φτάσει στο εσωτερικό χωρίς να εμποδίζεται. Η Εικόνα 49 παρουσιάζει το σύστημα σκιασμού σε συνδυασμό με το προτεινόμενο ASRS.



**Εικόνα 49:** Συνδυασμένο σύστημα σκιασμού (εξωτερικές περσίδες) με το προτεινόμενο ASRS. Στο πάνω τμήμα του παραθύρου οι περσίδες έχουν σταθερή κλίση ίση με την γωνία-στόχου των συλλεκτών, ενώ στο κάτω τμήμα οι περσίδες είναι οριζόντια τοποθετημένες.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων [44], που έλαβαν χώρα για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο κατά τις ώρες λειτουργίας του γραφείου έδειξαν ότι η καλύτερη διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας βελτίωσε σημαντικά την επίδραση του πρωτότυπου ASRS στα ψυκτικά φορτία. Η τοποθέτηση των εξωτερικών περσίδων υπό κλίση στο πάνω μέρος του παραθύρου επέτρεπε το ανακλώμενο φως του ήλιου από τους ηλιοστάτες να εισέλθει στο εσωτερικό του χώρου, αποκόπτοντας παράλληλα την εκτεταμένη διείσδυση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα για ολόκληρη την περιοχή του δωματίου (κύρια και δευτερεύουσα ζώνη φ.φ.), τα επίπεδα φ.φ. στην περίπτωση με το εξωτερικό σύστημα σκιασμού ελαττώθηκαν κατά 8.8% και 54% για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα σε σχέση με το βασικό σενάριο. Είναι προφανές ότι η ανακατεύθυνση του της ηλιακής ακτινοβολίας με το σύστημα σκιασμού λειτουργεί καλύτερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Οι απαιτήσεις ενέργειας για τεχνητό φωτισμό στην περίπτωση με το σύστημα σκιασμού ήταν χαμηλότερη κατά 12.6% κατά τη διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου, αλλά παρουσίασε αύξηση κατά 9.6% κατά τη διάρκεια του χειμερινού ηλιοστασίου.

### 3.2.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (ASRS)

Η αξιολόγηση του προτεινόμενου πρωτότυπου ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (ASRS) είναι πολύπλοκη διαδικασία λόγω παραγόντων όπως η κίνηση της θέσης του ήλιου στον ουρανό, η θολότητα της ατμόσφαιρας, η ανακλαστικότητα της επιφάνειας του καθρέφτη και η μείωση της ανακλαστικότητας (light loss factor) από την σκόνη. Επομένως, για την καλύτερη αξιολόγηση του συστήματος από πλευράς φ.φ. μια εμπειρική προσέγγιση με μοντέλα υπό κλίμακα πραγματοποιήθηκε. Δύο (2) όμοια μοντέλα υπό κλίμακα του προσομοιωμένου χώρου κατασκευάστηκαν τα οποία αντιστοιχούσαν στο σενάριο αναφοράς (BASECASE) σε κλίμακα 1: 10 αντιπροσωπεύοντας δύο (2) σενάρια:

- a. LIGHTSHELF CASE, με το ράφι φωτισμού εγκατεστημένο σε ύψος 20 cm από το δάπεδο, τοποθετημένο εξωτερικά με πλάτος 5 cm και μήκος ίσο με το μήκος του παραθύρου (16 cm), το οποίο αποτέλεσε την υπόθεση αναφοράς.
- b. SUNLIGHT CASE B, που αντιστοιχεί στο προτεινόμενο ASRS που είναι τοποθετημένο σε ύψος 20 cm από το δάπεδο με πέντε (5) καθρέπτες σε σειρά διαστάσεων  $2 \times 2$  cm ο κάθε ένας (εμβαδόν  $4 \text{ cm}^2$ ).

Οι μετρήσεις με μακέτες πραγματοποιήθηκαν στο δώμα κτιρίου με τέσσερις (4) ορόφους πάνω από το έδαφος που βρίσκεται στην Αθήνα, (Γεωγραφικό πλάτος  $37.9^\circ$ , Γεωγραφικό μήκος  $23.7^\circ$ ) για Νότιο προσανατολισμό. Οι Εικόνες 50 και 51 παρουσιάζουν τις διαμορφώσεις των κατασκευασμένων μοντέλων κλίμακας του δωματίου με το ράφι φωτισμού και του προτεινόμενου συστήματος (ASRS) τα οποία τοποθετήθηκαν στο δώμα του κτιρίου. Οι εσωτερικές διαστάσεις του δωματίου ήταν  $W40 \times L70 \times H30$  cm, με WFR 10% (ποδιά παραθύρου 10 cm και ύψος από το δάπεδο στα 25 cm), ενώ οι ανακλαστικότητες των επιφανειών ήταν 20%, 50%, 80% για το δάπεδο, τους τοίχους και την οροφή αντιστοίχως.



**Εικόνα 50:** Μοντέλα υπο κλίμακα με το ράφι φωτισμού και το προτεινόμενο ASRS εγκατεστημένα στο δώμα του κτιρίου.



**Εικόνα 51:** Εικόνες των μακετών του ASRS και κατασκευασμένου χώρου.

Οι μετρήσεις των επιπέδων φωτισμού πραγματοποιήθηκαν για χρονικό διάστημα από τις 08:00-17:00 (10 ώρες) για περίοδο πέντε (5) ημερών, από τις 28 έως τις 30 Απριλίου - Μέτρηση A (measurement A) και από τις 3 έως τις 4 Ιουνίου -Μέτρηση B (measurement B), κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού και μερικώς συννεφιασμένου ουρανού. Η καταγραφή των ενδείξεων φωτισμού τόσο του εσωτερικού χώρου όσο και του εξωτερικού

πραγματοποιήθηκαν με την χρήση φωτόμετρων. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν εντός των χώρων στα 50 cm, μετρούμενοι από το εσωτερικό τοίχωμα της πρόσοψης σε ύψος 8 cm, στα δύο (2) μοντέλα κλίμακας όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 50. Στην Εικόνα 52 επίσης απεικονίζονται τα ηλιακά ίχνη που δημιουργούνται από την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην οροφή της μακέτας από την λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος (ASRS).

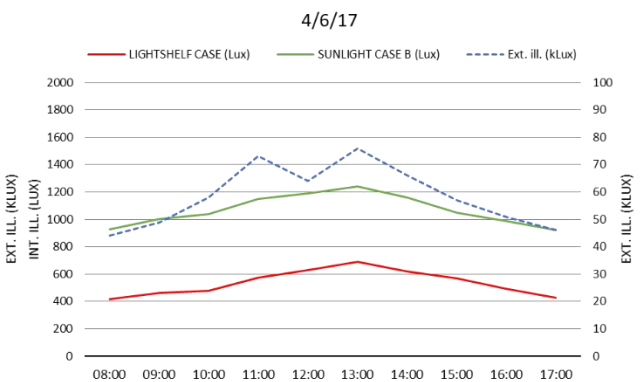
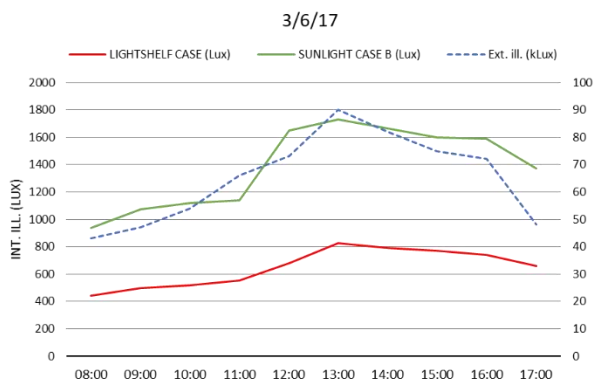
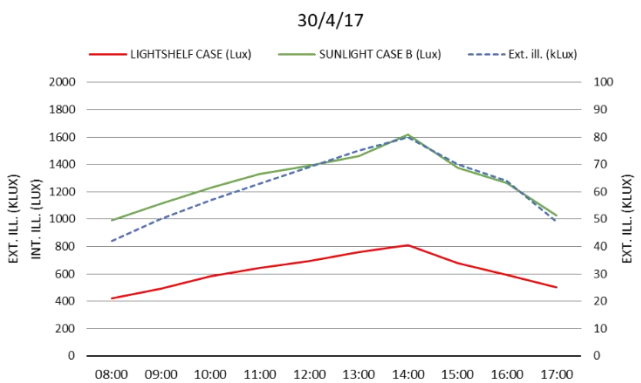
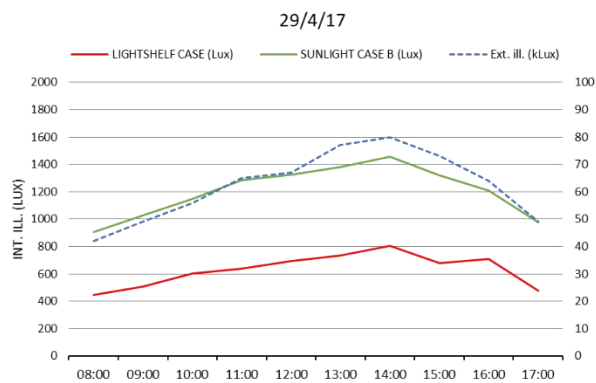
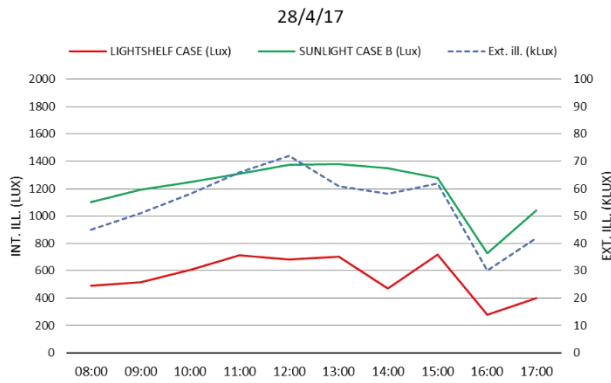


**Εικόνα 52:** Εσωτερικές απόψεις των μοντέλων κλίμακας με και χωρίς το ASRS εγκατεστημένο.

Η Εικόνα 53 και οι Πίνακες 19 και 20 συνοψίζουν τα συνολικά αποτελέσματα της απόδοσης από πλευράς φ.φ. των δύο (2) συστημάτων. Τα μετρούμενα επίπεδα φωτισμού για το LIGHTSHELF CASE ήταν 600 lx. Η ένταση φωτισμού που καταγράφηκε από την χρήση του προτεινόμενου ASRS, είχε μέση τιμή 1230 lx, μια δραματική αύξηση 100%. Χωρίς το ASRS, οι μετρηθείσες τιμές φωτισμού στο μοντέλο κυμάνθηκαν από 535 lx έως 650 lx ως συνάρτηση του χρόνου (08:00-17:00). Με το ASRS (SUNLIGHT CASE B), οι μετρηθείσες τιμές φωτισμού κυμαίνονταν μεταξύ 0 lx έως 1390 lx, οι οποίες αυξήθηκαν κατά 100% κατά μέσο όρο. Όπως φαίνεται στους Πίνακες 19 και 20, οι μετρημένες φωτεινές ενδείξεις με το σύστημα ήταν υψηλότερες μεταξύ 12:00 και 14:00 και χαμηλότερες μετά τις 15:00, σε σύγκριση με το LIGHTSHELF CASE.

Η δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. έλαβε έως και δύο (2) φορές περισσότερο φως σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται να επικυρώνουν τα προσομοιωμένα αποτελέσματα που παράγουν τα ίδια αποτελέσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τη χρονική περίοδο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, οι συνθήκες του ουρανού ήταν μερικώς νεφελώδεις και σε μερικές μετρήσεις ο ήλιος κάλυπτε πλήρως τα σύννεφα. Τα αποτελέσματα για την ένδειξη αυτών σημειώνονται με (\*) και η μείωση της απόδοσης του συστήματος κυμαίνεται από 40% έως 80%.





**Εικόνα 53:** Αποτελέσματα μετρήσεων του των τιμών φωτισμού στα μοντέλα υπο κλίμακα (βάθος 50 cm, ύψος 8 cm) από τις 08:00 έως τις 17:00, για Αθηνά, Ελλάδα (lat. 37.9<sup>0</sup>, lon. 23.7<sup>0</sup>) για νότιο προσανατολισμό.

**Πίνακας 20:** Μετρούμενες εσωτερικές τιμές φωτισμού των μοντέλων από τις 28 έως τις 30 Απριλίου (08:00-17:00).

Illuminance	Ext. ill. (kLx)	LIGHTSHELF CASE (Lx)	SUNLIGHT CASE B (Lx)
28-04-17			
08:00*	45	490	1100
09:00*	51	518	1194
10:00*	58	605	1250
11:00*	66	714	1310
12:00*	72	680	1375
13:00*	61	705	1378
14:00*	58	470	1350
15:00*	62	720	1280
16:00*	30	280	730
17:00*	42	402	1042
29/4/17			
08:00*	42	444	904
09:00*	49	505	1029
10:00*	56	604	1148
11:00	65	640	1284
12:00	67	695	1325
13:00	77	736	1379
14:00	80	804	1455
15:00	73	680	1320
16:00*	64	710	1210
17:00*	49	478	978
30/4/17			
08:00*	42	420	994
09:00*	50	491	1113
10:00*	57	584	1230
11:00*	63	643	1328
12:00*	69	696	1388
13:00*	75	760	1459
14:00*	80	810	1620
15:00*	70	676	1377
16:00*	64	592	1265
17:00*	49	501	1027
*Cloudy, partially cloudy Sky conditions.			

**Πίνακας 21:** Μετρούμενες εσωτερικές τιμές φωτισμού των μοντέλων από τις 3 Ιουνίου έως τις 4 Ιουνίου (08:00-17:00).

Illuminance	Ext. ill. (kLx)	LIGHTSHELF CASE (Lx)	SUNLIGHT CASE B (Lx)
03-06-17			
08:00*	43	440	937
09:00*	47	496	1075
10:00*	54	520	1120
11:00	66	552	1140
12:00*	73	678	1650
13:00	90	826	1730
14:00	82	790	1663
15:00	75	770	1600
16:00	72	742	1587
17:00*	48	660	1370
04-06-17			
08:00*	44	415	925
09:00*	49	460	1005
10:00	58	478	1040
11:00	73	573	1150
12:00	64	631	1190
13:00*	76	690	1240
14:00*	66	620	1160
15:00	57	567	1050
16:00	51	493	989
17:00	46	428	922
*Cloudy, partially cloudy Sky conditions.			

### 3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει γίνει σημαντική έρευνα στην αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού και της ενεργειακής αποδοτικότητας των καινοτόμων συστημάτων φ.φ. Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση των πιο συνηθισμένων ηλιοστατικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές μεταφοράς φ.φ.. Βάσει των παραπάνω προτάθηκε και αξιολογήθηκε ένα πρωτότυπο ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system, ASRS). Το ASRS τοποθετήθηκε εξωτερικά στην πρόσοψη ενός χώρου γραφείων.

Μέσω προσομοιώσεων αλλά και μετρήσεων σε χώρους υπο κλίμακα εκτιμήθηκε η επίδραση του εξεταζόμενου συστήματος τόσο στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου όσο και στην κατανομή των επίπεδων φυσικού φωτισμού. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα (4) διαφορετικά σενάρια, στη νότια πρόσοψη ενός χώρου γραφείου με αναλογία παραθύρου προς δάπεδο (Window-to-Floor Ratio, WFR) 10%. Η συστοιχία των ηλιοστατών παρακολουθεί τις καθημερινές κινήσεις του ήλιου και προβάλλει το ανακλώμενο φως του ήλιου προς μια καθορισμένη σταθερή περιοχή-στόχος στην οροφή. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός αλγόριθμου ηλιακής ιχνηλάτησης διπλού-άξονα για τον προσανατολισμό και την τοποθέτηση των συλλεκτών, ώστε να αναπροσανατολίζουν τις ηλιακές ακτίνες προς τις προκαθορισμένες θέσεις στην οροφή, παρέχοντας υψηλότερα επίπεδα φωτισμού στον χώρο μακριά από την περιμετρική ζώνη.

Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος υποδηλώνουν τη δυνατότητα να βελτιωθούν σημαντικά τα επίπεδα και η κατανομή του φ.φ. (που κυμαίνεται από 30% έως 50%, ανάλογα με το εμβαδό των συλλεκτών και να βελτιώσουν την ομοιομορφία του χώρου πάνω από 40%) σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Ωστόσο η εισαγωγή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο χώρο συνοδεύεται και με προσθήκη θερμότητας στο χώρο υπό την μορφή θερμικών κερδών. Αυτή η επιπρόσθετη θερμότητα έχει αρνητικό αντίκτυπο στο ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται για την ψύξη αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που με τη σειρά του μειώνει

την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται από το σύστημα αυτόματου ελέγχου των φωτιστικών σωμάτων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι:

- Το πρωτότυπο σύστημα αυξάνει τα επίπεδα φωτισμού της δευτερεύουσας ζώνης φ.φ. του χώρου (περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A, και SUNLIGHT CASE B). Η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 30% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE A σε πάνω από 50% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B. Η αύξηση του εμβαδού των καθρεπτών κατά περίπου 80%, από 0.0225 m<sup>2</sup> σε 0.04 m<sup>2</sup>, αυξάνει τις μέσες τιμές φωτισμού στην δευτερεύουσα περιοχή περίπου κατά 20%.
- Η ομοιομορφία ενισχύεται σημαντικά. Συγκρίνοντας την περίπτωση αναφοράς (BASE CASE) με την SUNLIGHT CASE B, η ομοιομορφία αυξάνεται κατά 55%.
- Η περίπτωση SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B παρουσιάζουν μείωση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό κατά 9% και 20% σε σύγκριση με το σενάριο BASE CASE. Η μείωση αυξάνεται σε σύγκριση με την περίπτωση LIGHTSHELF CASE κατά 14% και 25%, αντίστοιχα.
- Για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη αυξάνεται κατά ~26% σε σύγκριση με την περίπτωση BASE CASE. Το ίδιο συμβαίνει και με την SUNLIGHT CASE A, αλλά σε μικρότερο βαθμό (~9%) λόγω της μικρότερης επιφάνειας των καθρεπτών και συνεπώς των πρόσθετων εσωτερικών θερμικών κερδών. Σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα φυσικού φωτισμού (LIGHTSHELF CASE), η αύξηση της κατανάλωσης ψύξης εκτιμάται σε ~23% και ~42% αντίστοιχα.

Η επίδραση του εξεταζόμενου συστήματος στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φωτισμού είναι εμφανής για τις περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B. Αυτό το οποίο παρατηρείτε είναι ότι μια μείωση στην ηλεκτρική κατανάλωση για φωτισμό συνοδεύεται πάντα από μια ελαφρά αύξηση στην κατανάλωση για ψύξη και αντίστροφα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι πάντα πιο έντονη πηγή φωτισμού σε σχέση με τις συμβατικές πηγές τεχνητού φωτισμού και μεταφέρει πολύ περισσότερη υπέρυθη ενέργεια,

συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας των επιφανειών που την δέχονται.

Ο σκοπός του προτεινόμενου συστήματος ήταν η αξιοποίηση και ο έλεγχος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την βελτίωση των επιπέδων φ.φ. στις απομακρυσμένες περιοχές των χώρων και στην αύξηση της ομοιομορφίας. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, το ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system, ASRS) ενισχύει την ομοιομορφία του χώρου και αυξάνει σημαντικά την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό στη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. Δυστυχώς, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας είναι ελαφρώς αυξημένη σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς.

### 3.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Schubnell, M.; and Ries, H. Velocity-Controlled Tracking of the Sun. *Solar Energy Materials*, 21, 1990, pp. 207-212.
2. Chen, Y. T.; Chong, K. K.; Bligh, T. P.; Chen, L. C.; Yunus, J.; Kannan, K. S.; Lim, B. H.; Lim, C. S.; Alias, M. A.; Bidin, N.; Aliman, O.; Salehan, S.; Shk. Abd. Rezan, S. A. H.; Tam, C. M.; and Tan, K. K. Non-imaging Focusing Heliostat. *Solar. Energy*, 71(3), 2001, pp. 155-164.
3. Chen, Y. T., Kribus, A., Lim, B. H., Lim, C. S., Chong, K. K., Karni, J., Buck, R., Pfahl, A. and Bligh, T. P. Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field. *Journal of Solar Energy Engineering*, 126(1), 2004, pp. 638-644.
4. Ward L. G. and Shakespeare, R. *Rendering with Radiance. The Art and Science of Lighting Visualization*, 1998. Web: <http://www.radiance-online.org/>
5. EnergyPlus, Energy Simulation Software, Version 8.5. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2016. Web: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
6. Sallaberry, F.; Pujol-Nadal, R.; Larcher, M.; Rittmann-Frank, M. H. Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Convers Manag.* 2015, 105, pp. 1281-90.
7. Li, Z.; Liu, X.; Tang, R. Optical performance of vertical single-axis tracked solar panels. *Renew Energy*, 2011, 36, pp. 64-68.
8. Eke, R.; Sentruk, A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Sol Energy*, 2012, 86, pp. 2665-2672.
9. Arbab, H.; Jazi, B.; Rezagholizadeh, M. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow. *Renew Energy*, 2009, 34, pp. 1114-1118.
10. Abu-Khader, M. M.; Badran, O. O.; Abdallah, S. Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan. *Renew Sustain Energy Rev*, 2008, 12, pp. 864-73.

11. Sungur, C. Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic panels in Turkey. *Renew Energy*, 2009, 34, pp. 1119-1125.
12. Lazaroiu, G. C.; Longo, M.; Roscia, M.; Pagano, M. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. *Energy Convers Manag*, 2015, 92, pp. 143-148.
13. Eke, R.; Sentruk, A. Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system. *Sol Energy*, 2012, 86, pp. 2665-2672.
14. Dakkak, M.; and Babeli, A. Design and performance study of a PV tracking system (100W – 24Vdc/220Vac). *Energy Procedia*, 2012, 19, pp. 91-95.
15. Ismail, M.; Moghavvemi, M.; Mahlia, T. Analysis and evaluation of various aspects of solar radiation in the Palestinian territories. *Energy Convers Manag*, 2013, 73, pp. 57-68.
16. Abdallah, S. The effect of using sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of flat plate PV. *Energy Convers Manag*, 2004, 45, pp. 1671-169.
17. Koussa, M.; Cheknane, A.; Hadji, S.; Haddadi, M.; Noureddine, S. Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. *Appl Energy*, 2011, 88, pp. 1756-1771.
18. Abdallah, S.; Nijmeh, S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Convers Manag*, 2004, 45, pp. 1931-1939.
19. Clifford, M. J.; and Eastwood, D. Design of a novel passive solar tracker. *Sol Energy*, 2004, 77, pp. 269-280.
20. Seme, S.; Stumberger, G.; Vorsic, J. Maximum efficiency trajectories of a two axis sun tracking system determined considering system consumption. *IEEE Trans Power Electron*, 2011, 26, pp. 1280-1289.
21. Mavromatakis, F.; Franghiadakis, Y. A highly efficient novel azimuthal heliotrope. *Sol Energy*, 2008, 82, pp. 336-342.
22. Seme, S.; Stumberger, G. A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and Differential evolution for dual-axis sun tracking purposes. *Sol Energy* 2011, 85, pp. 2757-2770.



23. Mousazadeh, H.; Keyhani, A.; Javadi, A.; Mobli, H.; Abrinia, K.; Sharifi, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renew Sustain Energy Rev* 2009, 13, pp. 1800-1818.
24. Helwa, N. H.; Bahgat, A. B. G.; Shafee, A. M. R. E.; Shenawy, E. T. E. Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems. *Energy Sources*, 2000, 22, pp. 23-24.
25. Sallaberry, F.; Pujol-Nadal, R.; Larcher, M.; Rittmann-Frank, M. H. Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. *Energy Convers Manag*, 2015, 105, pp. 1281-1290.
26. Khalifa, A. N.; Al-Mutawalli, S. S. Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators. *Energy Convers Manag*, 1998, 39, pp. 1073-1079.
27. Kivrak S. Design of a low cost sun tracking controller system for photovoltaic panels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(3), 033119.
28. Fathabadi, H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. *Appl Energy* 2016, 173, pp. 448-459.
29. Maatallah, T.; Alimi, S. E.; Nassrallah, S. B. Performance modeling and investigation of fixed single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15, pp. 4053-4066.
30. Barker, L.; Neber, M.; Lee, H. Design of a low-profile two-axis solar tracker. *Solar Energy* 2013, 97, pp. 569-576.
31. Kacira, M.; Simsek, M.; Babur, Y.; Demirkol, S. Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renew Energy*, 2004, 29, pp. 1265-1275.
32. Davis, M.; Lawler, J.; Coyle, J.; Reich, A.; Williams, T. Machine vision as a method for characterizing solar tracker performance. *Photovolt Spec Conf*, 2008, 33, pp. 1-6.
33. Stine, W. B.; and Harrigan, R. W. The sun's position. In: *Solar Energy Fundamentals and Design: With Computer Applications*, pp. 38-69. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-88718-8, New York, 1985.

34. Chen, Y. T.; Kribus, A.; Lim, B. H.; Lim, C. S.; Chong, K. K.; Karni, J.; Buck, R.; Pfahl, A.; and Bligh, T. P. Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2004, 126(1), pp. 638-644.
35. Chong, K. K.; and Tan, M. H. Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field. *Solar Energy*, 2011, 85(9), pp. 1837-1850.
36. Chen, Y. T.; Chong, K. K.; Lim, B. H.; and Lim, C. S. Study of residual aberration for non-imaging focusing heliostat. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, 79, pp. 1-20.
37. Wei, X., Lu, Z., Yu, W. and Wang, Z. A new code for the design and analysis of the heliostat field layout for power tower system. *Solar Energy*, 2010, 84(4), pp. 685-690.
38. Ruby Programming Language, 2016. Web: <https://www.ruby-lang.org/en/>
39. IEA Task 27, Performance of Solar Facade Components, Subtask A report. International Energy Agency, 2007.
40. Switchable Façade Technology, Reference Office for Thermal, Solar and Lighting Calculations. European Commission FP5 Contract No. ENK6-CT-1999-00012, Coordinator Fraunhofer ISE, Germany, 2003.
41. Regulation on the Energy Performance of Buildings-KENAK. N.3661/2008.
42. EN 15193-1: Energy Performance of Buildings. Energy Requirements for Lighting; Specifications, Module M9; 2017. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030292858>.
43. EN 12464:1: Light and lighting-Lighting of work places. Part 1: Indoor work places, 2011.
44. Kontadakis, A.; Tsangrassoulis, A.; Doulos, L.; Topalis, F. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone. *Building and Environment*, 2017, 113, pp. 267-279.
45. Leather P, Pyrgas M, Beale D, Lawrence C. Windows in the workplace: Sunlight, view, and occupational stress. *Environment and Behavior*, 1998, 30(6), pp. 739-762.

46. Farley, K. M. J.; Veitch, J. A. A room with a view: A review of the effects of windows on work and well-being. NRC-CNRC Technical Report IRC-RR-136, 2001.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό, τις προδιαγραφές και την κατασκευή ενός πρωτοτύπου συστήματος αυτόματου ηλιοστάτη διπλού-άξονα (prototype dual-axis heliostat system). Ο κινητήρας ενεργοποιείται προς την κατεύθυνση όπου βρίσκεται ο ήλιος (και το ανακατευθύνει) σε πραγματικό χρόνο για την αποτελεσματική παρακολούθηση του ήλιου, έτσι ώστε να μην απαιτείται η χρήση εξωτερικών δεδομένων. Ο ηλιοστάτης σε αυτή την διατριβή περιγράφεται στα διάφορα στάδια ανάπτυξης και έχει δοκιμαστεί, αναπτυχθεί και λειτουργήσει για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Μετά από αυτή την εισαγωγή, στην ενότητα 4.2 περιλαμβάνεται μια λεπτομερή παρουσίαση των κύριων στοιχείων ενός ηλιοστάτη και συζητούνται οι μηχανολογικές πτυχές του προτεινόμενου συστήματος ηλιοστάτη, σχεδιασμού, ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και του λογισμικού ελέγχου για τη διαδικασία της ηλιακής ιχνηλάτησης που απαιτείται για την κατασκευή του.

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συμβατικά συστήματα φυσικού φωτισμού, όπως τα παράθυρα, και οι φεγγίτες στον τοίχο ή την οροφή ενός κτιρίου, για διάφορους λόγους, αποδείχθηκαν αναποτελεσματικά στην επίλυση του προβλήματος της επάρκειας ικανοποιητικών επιπέδων φ.φ. σε χώρους με μεγάλο βάθος και σε ψηλά πολυώροφα κτίρια κατασκευασμένα σε πυκνές αστικές περιοχές [1-3]. Ως εκ τούτου, η πρόκληση είναι να αναπτυχθούν συστήματα για τη χρησιμοποίηση τόσο του άμεσου όσο και του διάχυτου φυσικού φωτισμού στα κτίρια, διατηρώντας ταυτόχρονα και βελτιώνοντας την οπτική άνεση των χρηστών, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τους εξωτερικούς τοίχους.

Για την κάλυψη της ανάγκης για φωτισμό χώρων με μεγάλα βάθη έχουν αναπτυχθεί ποικίλα καινοτόμα συστήματα φ.φ., συνήθως αναφερόμενα ως οπτικά συστήματα (optical systems) ή συστήματα μεταφοράς φωτισμού ή/και καθοδήγησης (light transport and/or guiding systems), τα οποία χρησιμοποιούν κυρίως την άμεση συνιστώσα του φ.φ. (την ηλιακή ακτινοβολία) ως πηγή φωτισμού [4]. Ως εκ τούτου είναι καταλληλότερα για τοποθεσίες με αίθριες συνθήκες [5, 6], αλλά έχουν διεξαχθεί μελέτες και υπό συνθήκες νεφοσκεπυούς ουρανού [7-10]. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτά μπορούν να χωριστούν σε τρεις (3) βασικούς τύπους συστημάτων [11]:

- α. Φωτο-σωλήνες,
- β. Οπτικών ινών και
- γ. Ηλιοστάτες.

Τέτοια οπτικά συστήματα απαιτούν τρία (3) κύρια στοιχεία:

1. Ένα σύστημα συλλογής (collection system) για τη συγκέντρωση και την ανακατεύθυνση της διαθέσιμης ροής φωτισμού.
2. Ένα σύστημα μετάδοσης (transmission system) όπου η ροή φωτισμού περνάει μέχρι το σημείο χρήσης σε ένα κτίριο.
3. Ένα σύστημα διανομής (distribution system) όπου η φωτεινή ροή παρέχεται με τρόπο συμβατό με την τελική χρήση του φωτισμού.

Το σύστημα συλλογής μπορεί να αποτελείται από ανακλαστικές ή διαθλαστικές συσκευές που μπορούν να είναι παθητικές ή ενεργές. Το ενεργό σύστημα φ.φ. είναι πιο δαπανηρό αλλά περισσότερο αποδοτικό. Σε αντίθεση το παθητικό σύστημα έχει χαμηλότερο κόστος, αλλά γενικά συνοδεύεται από χαμηλότερη απόδοση. Το ενεργό σύστημα απαιτεί συντήρηση κατά τη διάρκεια της ζωής του για να λειτουργεί σωστά. Οι πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες είναι αυτές που μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο κέλυφος των κτιρίων που μπορούν να προσφέρουν τα μέγιστα οφέλη όσον αφορά τη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και την ικανοποίηση των χρηστών, με λογικό κόστος.

Οι στόχοι των υποσχόμενων αυτών τεχνολογιών περιλαμβάνουν:

- Απλό σχεδιασμό και κατασκευή με λίγα ή καθόλου κινούμενα μέρη.
- Εύκολη προσαρμογή στους περισσότερους τύπους κτιρίων, που υπάρχουν ή βρίσκονται υπό κατασκευή.
- Σταθερή και είναι δυνατόν υψηλή απόδοση κατά τη διάρκεια του έτους.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής.
- Την μεταφορά φυσικού φωτισμού στον πυρήνα του κτιρίου.

Τα συστήματα φωτο-σωλήνων (Light pipe systems) μεταφέρουν το ηλιακό φως μέσα στο σωλήνα (κατασκευασμένος από ένα πολύ ανακλαστικό μεταλλικό υλικό) από την πηγή στο άνοιγμα εξόδου μέσω πολλαπλών κατοπτρικών αντανακλάσεων. Ένα τυπικό σύστημα φωτο-σωλήνων αποτελείται από έναν εξωτερικό συλλέκτη, έναν κυλινδρικό συλλέκτη και ένα διαχύτη (φωτιστικό) που μεταδίδει το φως στο εσωτερικό ενός χώρου. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση αυτών των συστημάτων εξαρτώνται από [12-19]:

- α. Τη γωνία εισόδου του προσπίπτοντος φωτός.
- β. Την αναλογία των διαστάσεων του σωλήνα και το σχήμα της εγκάρσιας τομής.
- γ. Τον τύπο του διαχύτη.
- δ. Την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου του διαχύτη με το επίπεδο εργασίας.
- ε. Τον δείκτη αιθριότητας του ουρανού (sky clearness index).

Εφαρμογές συστημάτων φωτο-σωλήνων μπορούν να βρεθούν σε σχολεία, κτίρια γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, οδικές σήραγγες [20-23], οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση

του εσωτερικού φωτισμού και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από την χρήση συστημάτων τεχνητού φωτισμού. Μερικά από τα οφέλη από τη χρήση συστημάτων φωτοσωλήνων είναι η εύκολη διαδικασία εγκατάστασης και οικονομικής απόδοσης, αλλά από την άλλη, οι πολλαπλές αντανακλάσεις στο εσωτερικό του σωλήνα προκαλούν μεγάλες απώλειες φωτισμού οι οποίες με τη σειρά τους περιορίζουν την απόσταση μετάδοσης [24, 25], σε σύγκριση με συστήματα οπτικών ινών και ηλιοστατών που μπορούν να παρακολουθούν ενεργά τον ήλιο [26].

## 4.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (ΜΑΚv1)

Μία πρωτότυπη και λειτουργική μονάδα μικρής-κλίμακας ηλιοστάτη, που αναφέρεται ως ΜΑΚv1, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε για να λειτουργεί με το πιο κοινό σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης διπλού-άξονα, η οποία εφαρμόζει τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμουθίου-Ύψους (Azimuth-Elevation (AE) solar-tracking method) [66]. Στις Εικόνες 54, 55 και 56 παρουσιάζεται η πρωτότυπη μονάδα ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη (ΜΑΚv1) στη φάση σχεδιασμού (3D – CAD μοντέλο) και η τελική συναρμολογημένη μονάδα, αντίστοιχα. Η πρωτότυπη μονάδα ηλιοστάτη [67, 68] μπορεί είτε να συλλέξει είτε να ανακατευθύνει το φως του ήλιου με βάση την επιλεγμένη λειτουργία:

- a. "Λειτουργία ηλιοστάτη (Heliostat – Mode)": Αν έχει ρυθμιστεί ως ηλιοστάτης, τότε αντικατοπτρίζει σταθερά το φως σε μια (1) κατεύθυνση τοποθετώντας τον εαυτό του στη γωνία διαμήκους μεταξύ της γωνίας προς τον ήλιο και της γωνίας προς τον στόχο.
- b. "Λειτουργία ηλιακού ιχνηλάτη (Solar Tracker – Mode)": Αν έχει ρυθμιστεί ως ηλιακός ιχνηλάτης, δείχνει σταθερά προς τον ήλιο τοποθετώντας τον συλλέκτη (καθρέπτη) κάθετα με τη γωνία του ήλιου.

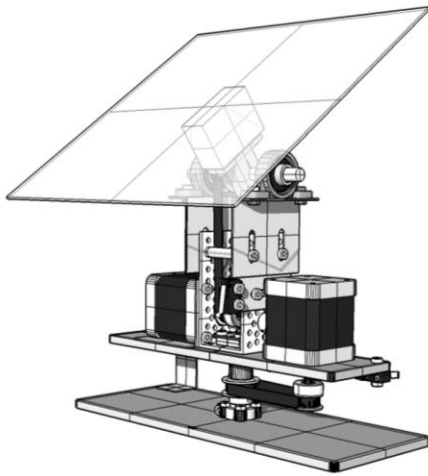
Το αντικείμενο αυτού του έργου είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση/κατασκευή μιας πρωτότυπης μονάδας ηλιοστάτη που χρησιμοποιείται κυρίως για την ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτός και δεν αναμένεται να είναι ένα πλήρες προϊόν για εμπορική χρήση, αλλά να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Ως εκ τούτου, εστιάζεται σε πρακτικές και τεχνικές πτυχές του θέματος, όπως η μηχανική και ηλεκτρονική ρύθμιση του συστήματος, τα υποσυστήματα και τα εξαρτήματα του, τη δομή του συστήματος και άλλους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία και την απόδοση ηλιοστατικών συστημάτων.

Το πρωτότυπο σύστημα ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) αποτελείται από ένα μηχανισμό που επιτρέπει στην επιφάνεια (καθρέπτη) να ακολουθήσει ή να ανακατευθύνει τις ηλιακές ακτίνες. Η μηχανική δομή αποτελείται από δύο (2) βηματικούς κινητήρες που οδηγούν τον μηχανισμό και έναν προγραμματιζόμενο μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνος για την παροχή ηλεκτρικών σημάτων στους κινητήρες σύμφωνα με τη γωνία του ήλιου για να επιτευχθεί η

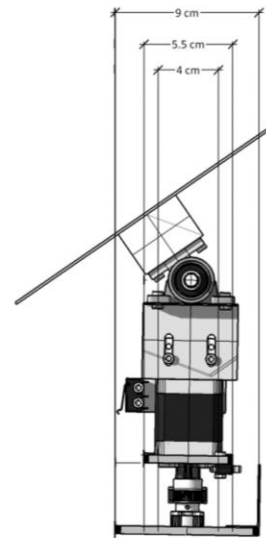


παρακολούθηση. Η προτεινόμενη μονάδα ηλιοστάτη διπλού άξονα (ΜΑΚv1) χρησιμοποιεί ένα επίπεδο καθρέπτη  $0.2 \times 0.2$  m για να ανακατευθύνει το ηλιακό φως σε έναν συγκεκριμένο στόχο. Ένα σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου (open-loop control system) χρησιμοποιήθηκε για το πρωτότυπο ΜΑΚv1 ώστε να διατηρηθεί ο σχεδιασμός απλός και οικονομικός. Ο σχεδιασμός της συσκευής και οι πληροφορίες που παρέχονται σε αυτό το κεφάλαιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημείο αναφοράς για τη μελλοντική ανάπτυξη πιο προηγμένων συστημάτων για διάφορες εφαρμογές φυσικού φωτισμού που χρησιμοποιούν τον ήλιο.

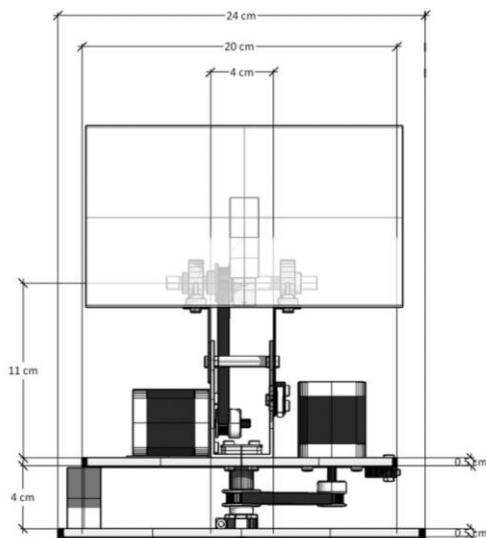
PERSPECTIVE VIEW



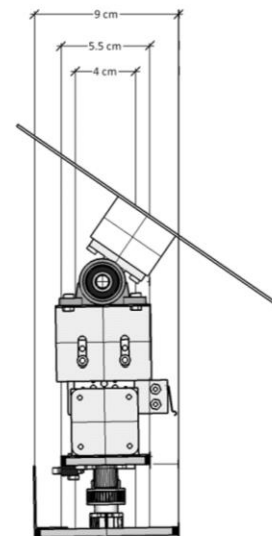
RIGHT VIEW



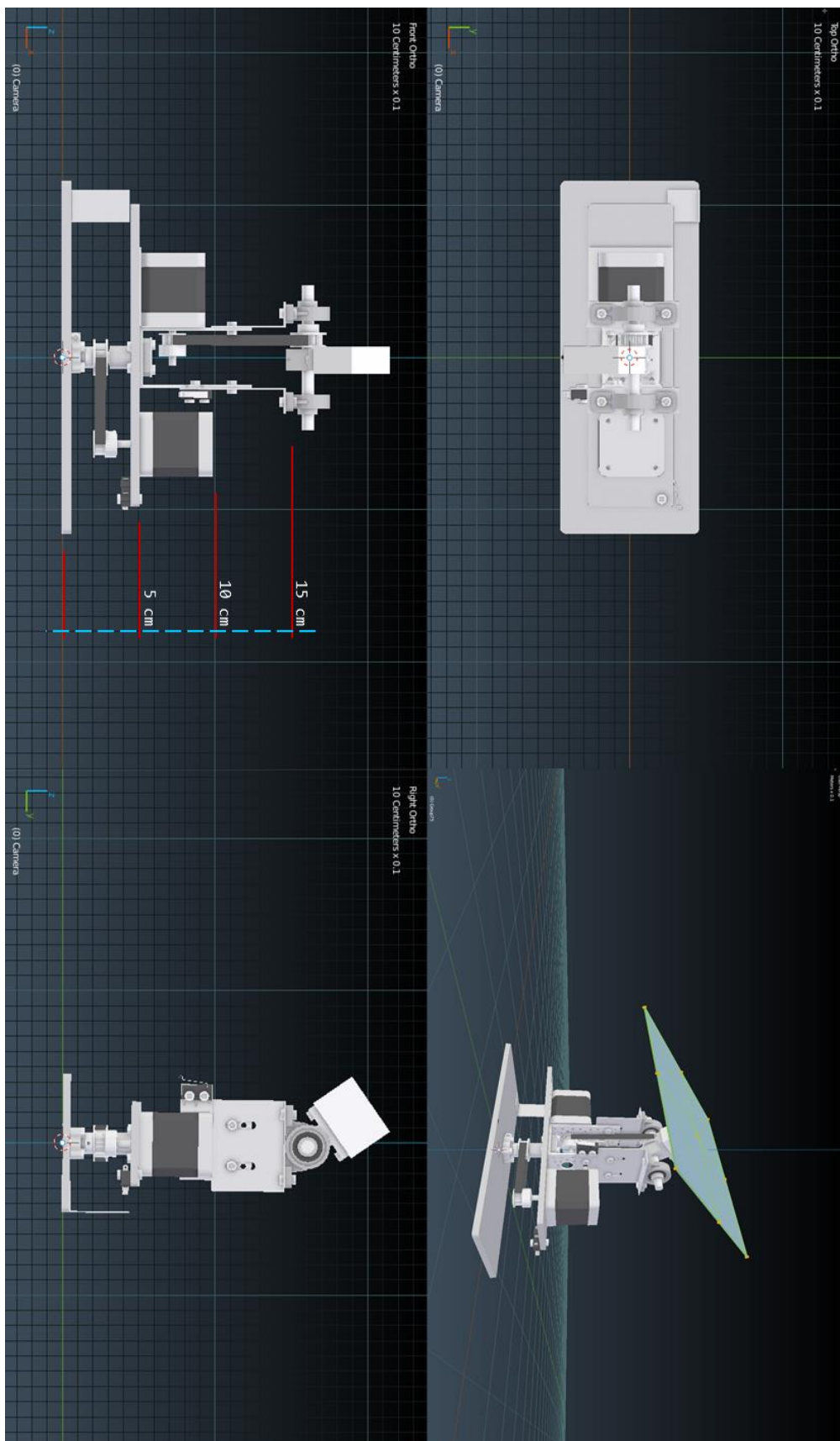
FRONT VIEW



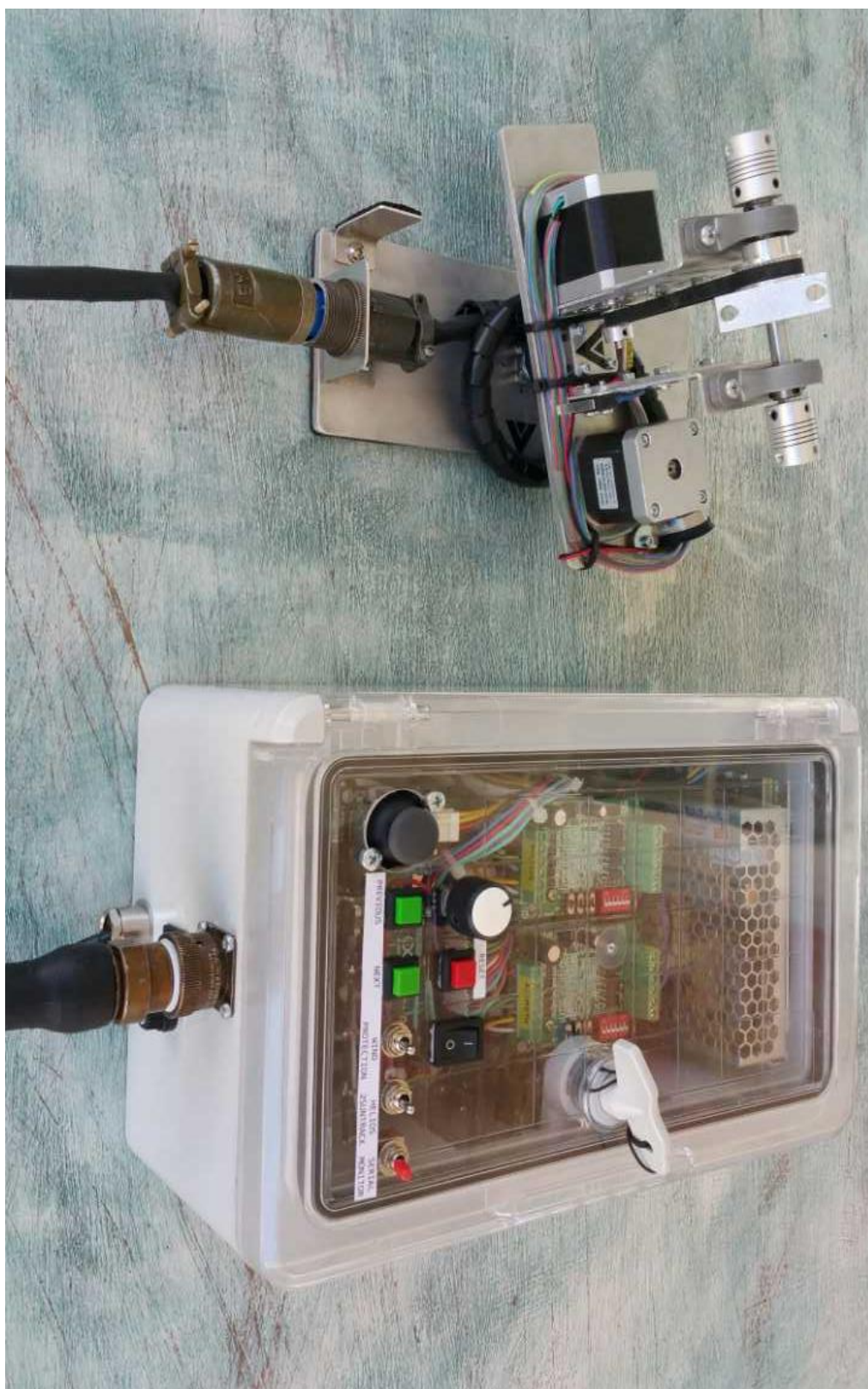
LEFT VIEW



**Εικόνα 54:** Το 3D-Cad μοντέλο με τις διαστάσεις της πρωτότυπης συσκευής ηλιοστάτη (MAKV1).



**Εικόνα 55:** Φωτορεαλιστικές απεικονίσεις του πρωτοτύπου ηλιοστάτη (ΜΑΚV1).



**Εικόνα 56:** Φωτογραφία της πρωτότυπης συσκευής ηλιοστάτη (ΜΑΚV1) που κατασκευάστηκε. Στα αριστερά διακρίνεται το σύστημα μηχανικής στήριξης και παρακολούθησης χωρίς τον καθρέπτη, ενώ στα δεξιά ο κεντρικός πίνακας ελέγχου.

Η διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος ηλιοστάτη πραγματοποιήθηκε μέσω των ακόλουθων δύο (2) κύριων βημάτων:

- a. Τον σχεδιασμό του μηχανικού συστήματος στήριξης και παρακολούθησης.
- b. Τον σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Ο σχεδιασμός του μηχανικού συστήματος προετοιμάστηκε χρησιμοποιώντας προγράμματα σχεδιασμού τρισδιάστατων μοντέλων, Trimble SketchUp [68] και Blender [69], ελεύθερα διαθέσιμα 3D – CAD λογισμικά υπολογιστή προς χρήση, τα οποία είναι εύκολα στην μάθηση και χρησιμοποίησή τους. Το MAKv1 υιοθετεί ένα ορθογώνιο επίπεδο κάτοπτρο διαστάσεων  $0.2 \times 0.2$  cm, συνολικής επιφάνειας  $0.04$  m<sup>2</sup>. Ο ηλιοστάτης μπορεί να κινηθεί σε δύο (2) βαθμούς ελευθερίας, στο αζιμούθιο και την κατεύθυνση ύψους, αντίστοιχα. Η μονάδα MAKv1 εφαρμόζει μια μέθοδο ιχνηλάτησης του ήλιου με χρήση από έναν υπολογιστή, όπου αρχικά δίδεται το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος της θέσης του ηλιοστάτη στη γη καθώς επίσης η ώρα και η ημερομηνία. Αυτό επιτυγχάνεται σε ένα κεντρικό πίνακα ελέγχου που φιλοξενεί τον μικροϋπολογιστή (ή τον μικροελεγκτή) που είναι υπεύθυνος για την επίλυση της θέσης του ηλιοστάτη καθώς και άλλους ελεγκτές (κουμπιά, διακόπτες κλπ.) που εξυπηρετούν την χειροκίνητη επιλογή του στόχου και την εκτέλεση διαφόρων εργασιών.

Η ηλιακή ιχνηλάτηση του MAKv1 επιτευχθεί μέσω της χρήσης ενός προγράμματος ελέγχου ανοιχτού-κώδικα βασισμένο στην πλατφόρμα Microsoft Windows, το "Arduino Sun Tracking/Heliostat Program" που παρέχεται από το "Open Sun Harvesting Project" [65]. Ένας μικροελεγκτής (microcontroller unit, MCU) Arduino Uno Rev.3, ένα ρολόι πραγματικού χρόνου (Real-Time Clock module, RTC) και ένα ζευγάρι δύο (2) βηματικών κινητήρων (stepper motors), ένας (1) για κάθε άξονα παρακολούθησης, είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργία και τον έλεγχο της συσκευής. Το Arduino Uno Rev.3 [71] είναι ένας χαμηλού κόστους μικροελεγκτής προγραμματιζόμενος σε C/C++. Η χωρητικότητα μνήμης προγράμματος αυτού του μικροελεγκτή (MCU) επιτρέπει την υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Το Arduino [72] είναι μια πλατφόρμα πρωτοτύπων ηλεκτρονικών ανοικτής πηγής που βασίζεται σε ευέλικτα και εύχρηστα εξαρτήματα και λογισμικά και μπορεί να

προγραμματιστεί μέσω του ολοκληρωμένου περιβάλλοντος ανάπτυξης Arduino (Integrated Development Environment, IDE).

Λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση του στόχου, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις απαιτούμενες γωνίες ιχνηλάτησης, δηλαδή η γωνία ύψους (altitude angle και η γωνία αζιμούθιου (azimuth angle, A). Ο υπολογισμός λαμβάνει χώρα αρχικά σύμφωνα με το γεωγραφικό πλάτος (latitude,  $\Phi$ ), το γεωγραφικό μήκος (longitude,  $\Lambda$ ), την τοπική ώρα (local time, LTC), και τη ζώνη ώρας (time zone, TZ), σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας, και τοποθετεί τη συσκευή στην κατεύθυνση της απαιτούμενης γωνίας. Στη συνέχεια παράγει ψηφιακούς παλμούς που αποστέλλονται στους βηματικούς κινητήρες για να οδηγήσουν το μηχανήμα, έτσι ώστε να μετατοπίσουν την ανακλαστική επιφάνεια του ηλιοστάτη στη σωστή ευθυγράμμιση διαδοχικά. Κάθε φορά, το πρόγραμμα ελέγχου ενεργοποιεί μόνο ένα (1) από τους δύο (2) βηματικούς κινητήρες. Αυτή η ακολουθία λειτουργιών επαναλαμβάνεται σε προκαθορισμένα χρονικά βήματα για να διατηρείται ο προσανατολισμός του συλλέκτη στην σωστή θέση.

Το μηχανικό σύστημα στήριξης και παρακολούθησης που σχεδιάστηκε έχει τοποθετημένο έναν συλλέκτη πάνω σε δύο (2) ελεγχόμενους κάθετους μεταξύ τους άξονες. Η επιλογή του σχεδιασμού ήταν να κατασκευαστεί το σώμα εξ ολοκλήρου από μέταλλο (αλουμίνιο και χάλυβα), υλικά τα οποία είναι εύκολα να αποκτηθούν, άκαμπτα και μπορούν να επεξεργαστούν (κοπούν) σχετικά εύκολα. Επίσης, για μέγιστη αντοχή και ακαμψία, δόθηκε προσοχή στο σχεδιασμό του σώματος έτσι ώστε όλα τα μέρη να είναι είτε σε τάση είτε σε συμπίεση. Επιπλέον, οι άξονες που είναι προσαρτημένοι στον συλλέκτη (έναν (1) για κάθε άξονα περιστροφής) τροφοδοτούνται μέσω ιμάντων χρονισμού.

Τέλος, ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης για το MAKv1 αποτελείται από βηματικούς κινητήρες (stepper motors) και τα σχετιζόμενα γρανάζια συνδέονται με ιμάντες χρονισμού. Δύο (2) βηματικοί κινητήρες (έναν (1) για κάθε άξονα περιστροφής), με ακρίβεια  $0.9 \pm 5\% \text{ }^\circ/\text{STEP}$ , συνδέονται με τους δύο (2) άξονες (ύψους και αζιμούθιου) με αναλογία γραναζιών (gear ratio) 1:1 με συνολική μέτρηση ανά περιστροφή (counts per revolution) 400 STEPS/REV. Αυτό εξασφαλίζει ότι το φως του ήλιου κατευθύνεται αξιόπιστα προς το σημείο στόχευσης.

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, στην πρώτη ενεργοποίηση του Arduino, ο Αζιμουθιακός βηματικός κινητήρας αρχικά θα αναζητήσει τον διακόπτη περιορισμού (limit switch). Μετά την ενεργοποίησή του, το μηχάνημα θα απομακρυνθεί από το διακόπτη έτσι ώστε να μην είναι πλέον ενεργός. Αφού ο Αζιμουθιακός βηματικός κινητήρας ολοκληρώσει την επαναφορά του, τότε ο βηματικός κινητήρας ύψους θα επαναλάβει την ίδια διαδικασία (στην περίπτωση της ρύθμισης πολλαπλών μηχανών, ο καθένας θα ακολουθήσει τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω). Μετά την αρχική επαναφορά, η συσκευή θα μετακινηθεί στη θέση της κάνοντας μία (1) από τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Εάν ο ήλιος είναι κάτω από τον ορίζοντα, το μηχάνημα δεν θα κινηθεί μετά την επαναφορά.
- Όταν ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα, τότε αν το μηχάνημα είναι τοποθετημένο ως ηλιακός ιχνηλάτης, θα μετακινηθεί προς το σημείο στον ήλιο, διαφορετικά αν η μηχανή είναι τοποθετημένη ως ηλιοστάτης, θα κινηθεί για να αντικατοπτρίζει το φως από τον ήλιο στον καθορισμένο στόχο.

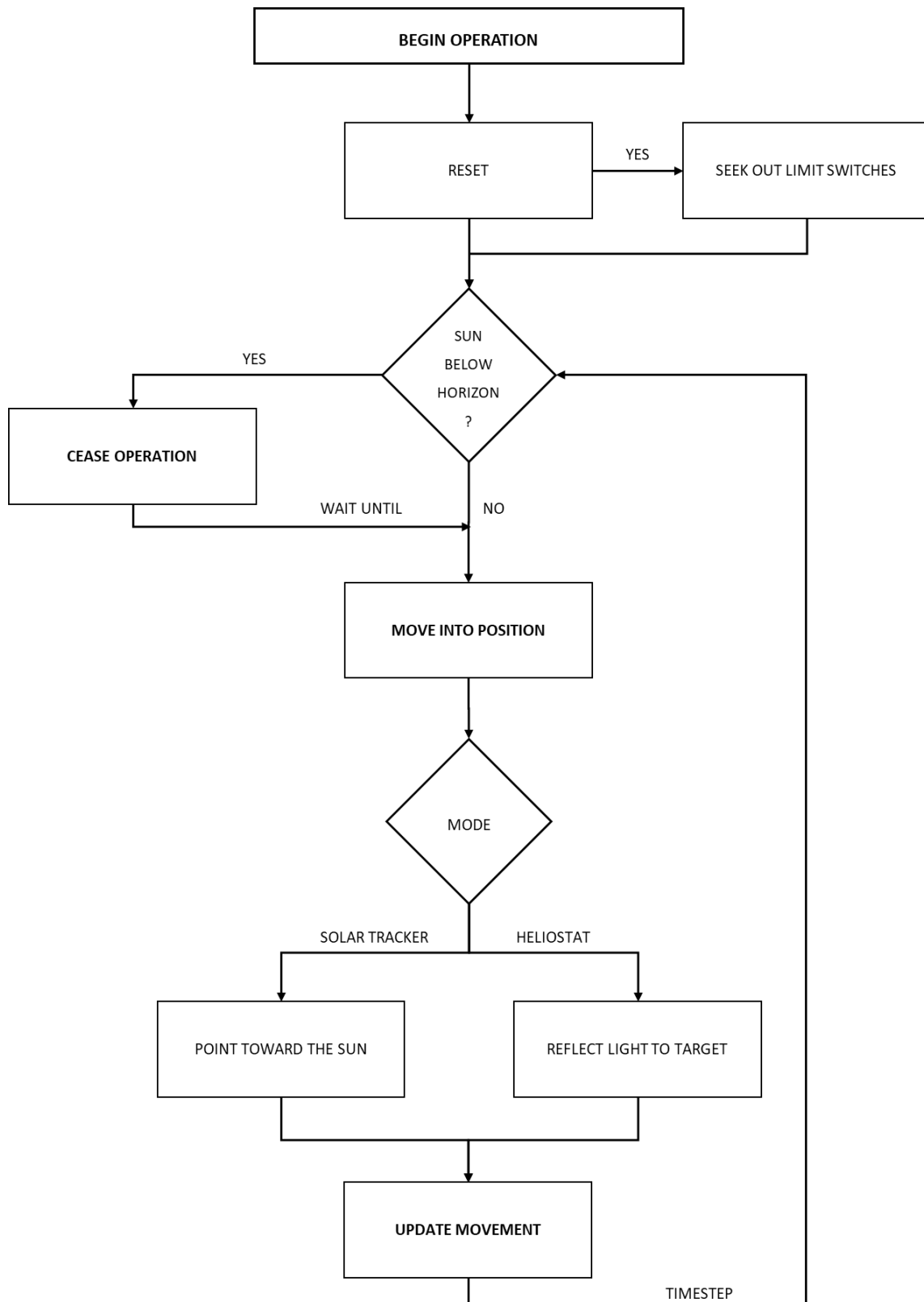
Μόλις το μηχάνημα τοποθετηθεί στη θέση, θα ενημερώνει την κίνησή του με βάση ένα προκαθορισμένο από τον χρήστη χρονικό βήμα (πχ. κάθε 30 δευτερόλεπτα), έως ότου ο ήλιος πέσει κάτω από τον ορίζοντα ή η επόμενη κίνηση να βρίσκεται εκτός των ορίων του μηχανήματος. Σημείωση, ότι η συσκευή δεν θα μετακινηθεί στη θέση της εάν η απαιτούμενη κίνηση είναι εκτός των ορίων του μηχανήματος που είναι οι μέγιστες γωνίες που μπορεί να περιστραφεί ελεύθερα η συσκευή. Αν συμβεί αυτό, τότε στη σειριακή οθόνη του Arduino (Arduino IDE's Serial Monitor) θα εμφανιστεί το ακόλουθο μήνυμα: "Μετακίνηση υπερβαίνει τα όρια (Move exceeds bounds)". Εάν η επόμενη υπολογισμένη κίνηση βρίσκεται εντός των ορίων του λογισμικού, τότε το μηχάνημα θα μετακινηθεί στη θέση του.

Τη νύχτα, το μηχάνημα θα έχει σταματήσει την κίνηση του, καθώς ο ήλιος θα είναι κάτω από τον ορίζοντα. Όταν εμφανιστεί η ώρα της προγραμματισμένης επαναφοράς της μηχανής, θα επαναρυθμιστεί στους τερματικούς περιοριστές όπως έγινε στην αρχή και θα περιμένει μέχρι το πρωί πριν από την επανέναρξη της λειτουργίας. Η λειτουργία του προγράμματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής στην Εικόνα 57.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι:

- Μπορεί να ελέγχει τόσο τους ηλιακούς ιχνηλάτες όσο και τους ηλιοστατικούς ή ακόμα και ένα μείγμα των δύο (2).
- Μπορεί να ελέγξει έως και δεκαέξι (16) μηχανές ταυτόχρονα.
- Παρέχει έναν ενσωματωμένο κώδικα για την ηλεκτρονική μονάδα ρολογιού πραγματικού χρόνου (Real – Time Clock, RTC).
- Χειροκίνητος έλεγχος του μηχανήματος χρησιμοποιώντας είτε την σειριακή οθόνη του Arduino (the Arduino IDE's Serial Monitor) είτε μέσω του χειριστηρίου (Joystick).
- Χειροκίνητος χειρισμός του ηλιοστατικού στόχου μέσω της σειριακής οθόνης του Arduino (the Arduino IDE's Serial Monitor) είτε μέσω του χειριστηρίου (Joystick).
- Οι στόχοι του ηλιοστάτη αποθηκεύονται αυτόματα στο EEPROM αφού οριστούν χειροκίνητα.
- Λειτουργία είτε σαν Ηλιοστάτης είτε σαν Ηλιακός ιχνηλάτης.
- Λειτουργία προστασίας από δυνατούς ανέμους.
- Ενσωματωμένη επιτάχυνση του μοτέρ βηματοδότη.
- Μπορεί να ελέγχει μηχανές που χρησιμοποιούν είτε γραμμικούς ενεργοποιητές (linear actuators) είτε χρησιμοποιούν σύστημα μείωσης γραναζιών (reduction system) ή συνδυασμό των δύο (2).





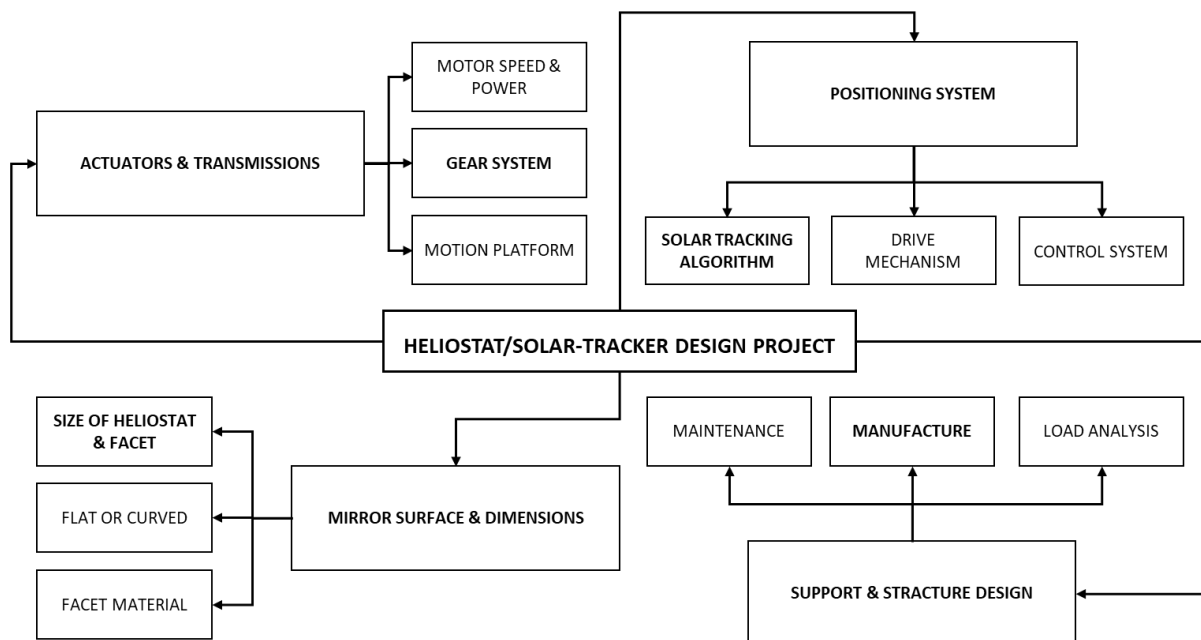
**Εικόνα 57:** Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του λογισμικού Arduino.

#### 4.2.1 ΚΥΡΙΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΗΛΙΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Οι ηλιοστατικά συστήματα κυρίως αποτελούνται από:

- α. Τη βάση,
- β. Οι συλλέκτες (που αναφέρονται επίσης ως κάτοπτρα),
- γ. Το σύστημα ιχνηλάτησης και ελέγχου και,
- δ. όλες τις απαιτούμενες συναφείς συνδέσεις, εξαρτήματα και υποδομές, για την διασφάλιση της αποτελεσματικής απόδοσης και την καλή λειτουργία σε όλες τις συνθήκες.

Όλα αυτά τα στοιχεία έχουν πολλές επιλογές σχεδιασμού και η τελική επιλογή απαιτεί βελτιστοποίηση του συνδυασμού των τεχνικών προδιαγραφών και κόστους. Η εικόνα 58 παρουσιάζει μια επισκόπηση των κύριων στοιχείων κατά τον σχεδιασμό ενός ηλιοστάτη. Τα κύρια στοιχεία και τα εξαρτήματα μιας ηλεκτρικά κατευθυνόμενης συσκευής ηλιοστάτη περιγράφονται στις παρακάτω παραγράφους.



Εικόνα 58: Κύρια εξαρτήματα του ηλιοστάτη.

Οι συλλέκτες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα ηλιακά συστήματα ως παραβολικές κοιλότητες, παραβολικά πιάτα, σφαιρικά κύπελλα και ηλιοστατικά. Καθένα από αυτά έχει

συγκεκριμένες απαιτήσεις σχεδίασης. Ωστόσο, τα κύρια χαρακτηριστικά που αναζητούνται στις προδιαγραφές σχεδιασμού της μονάδας του συλλέκτη πρέπει να περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Υψηλή οπτική απόδοση (ανακλαστικότητα, διαπερατότητα, κατοπτρικότητα).
- Γεωμετρική διάταξη.
- Χαμηλή συντήρηση (χωρίς σκόνη).
- Χαμηλό αρχικό κόστος.
- Μακροζωία.

Η ανακλαστική επιφάνεια ενός ηλιοστάτη αποτελείται γενικά από έναν (1) ή περισσότερους συλλέκτες, που επίσης αναφέρονται ως όψεις (facets), και μπορούν να διευθετηθούν σε σφαιρική (κεκλιμένα) ή τετράγωνη διάταξη, για να συλλεχθεί/συγκεντρωθεί το ανακλώμενο φως σε ένα δέκτη (στόχο). Για να διευκολυνθεί η κατασκευή χρησιμοποιούνται συνήθως επίπεδα κάτοπτρα, αλλά μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε ελαφρώς κοίλη μορφή για να βοηθήσουν στη συγκέντρωση της ανακλώμενης δέσμης. Ο διαχωρισμός της ανακλαστικής επιφάνειας σε όψεις δεν είναι μόνο για τεχνικούς λόγους αλλά επίσης διευκολύνει τον χειρισμό τους, κατά τη διάρκεια της κατασκευής και επιτρέπει τον ευκολότερο έλεγχο της καμπυλότητας για μεγάλες ηλιοστατικές μονάδες. Τα τυπικά μεγέθη προσόψεων κυμαίνονται από 1 m<sup>2</sup> έως 10 m<sup>2</sup>, αλλά ανάλογα με την εφαρμογή (πχ. Μεταφορά φ.φ.) μπορούν να εφαρμοστούν ακόμα μικρότερες όψεις.

Το ανακλαστικό υλικό πρέπει να αντικατοπτρίζει την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια με ελάχιστη απώλεια και οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες αυτού του υλικού έχουν προφανή σημασία. Επιπλέον, η ανακλαστικότητα δεν πρέπει να ποικίλει ανάλογα με την αλληλεπίδραση με την υγρασία, την υπεριώδη ακτινοβολία, το φως, τη θερμοκρασία και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Άλλες ιδιότητες μεγάλης σημασίας είναι το κόστος και η δυνατότητα κατασκευής. Τα παραδοσιακά σχέδια ηλιοστάτη μπορούν να χωριστούν σε δευτερεύοντα σχέδια επιφανειακού καθρέφτη, τα οποία χρησιμοποιούν καθρέφτες από γυαλί για την ανακλαστική μονάδα και σχέδια με τεντωμένη μεμβράνη (stretched-membrane) που χρησιμοποιούν προηγμένα οπτικά υλικά, όπως αντανακλαστικές πλαστικές

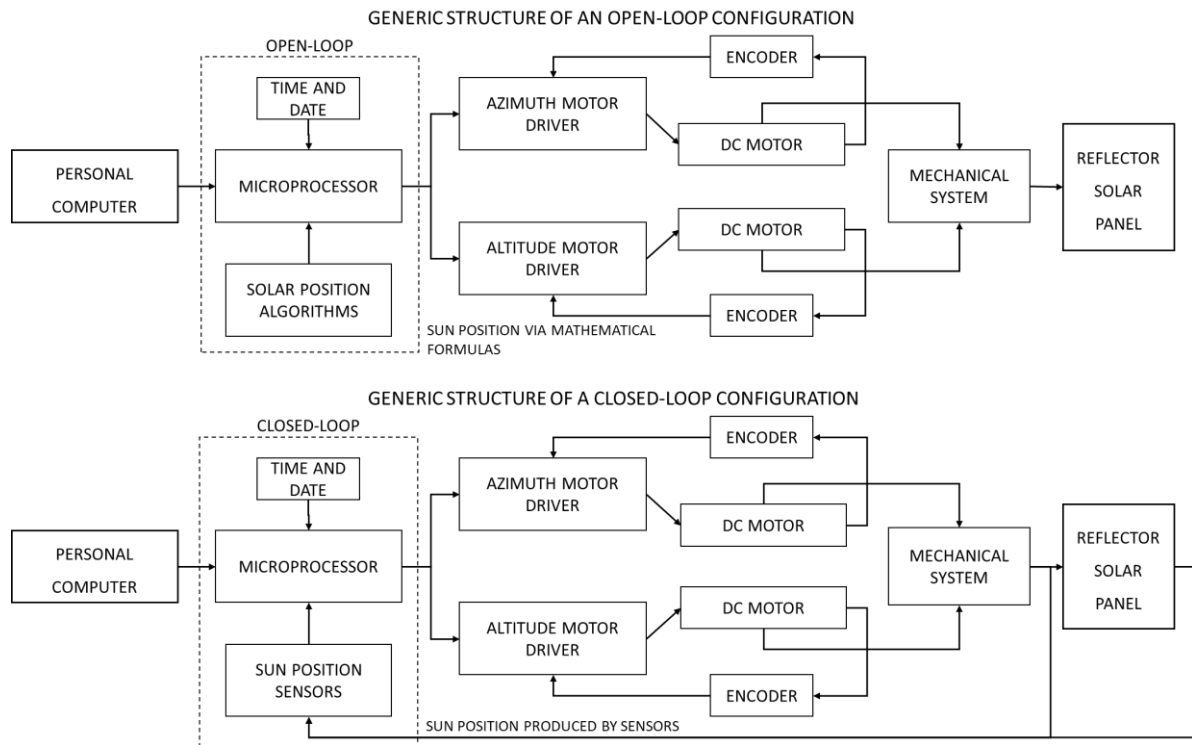
μεμβράνες (metalized plastic films) (τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, PET) και στιλπνές μεταλλικές επιφάνειες (polished metal surfaces) (αλουμίνιο, ασήμι) [73, 74].

Τα γυάλινα κάτοπτρα θεωρούνται γενικά ως το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλιοστατικών συστημάτων. Ο επίπεδος γυάλινος καθρέφτης είναι ένα φύλλο από γυαλί 1 – 4 mm, το οποίο έχει στο πίσω μέρος του μια ανακλαστική μεταλλική επίστρωση. Προκειμένου να προστατευθεί η επίστρωση από την διάβρωση, είτε ένα δεύτερο φύλλο γυαλιού προσαρτάται στο πίσω μέρος του πρώτου φύλλου (δηλ. γίνεται μια ελασματοποιημένη δομή), είτε το πίσω μέρος είναι βαμμένο με προστατευτική βαφή. Το γυαλί μπορεί να κυρτωθεί αρκετά εύκολα κατά μήκος ενός άξονα. Τα γυάλινα κάτοπτρα έχουν υψηλή ανακλαστικότητα συνήθως 91% σε γωνία πλήρους αποδοχής 8 mrad, μακρά διάρκεια ζωής, ανθεκτικότητα στο πεδίο και (συνήθως) μέτρια υποβάθμιση της ανακλαστικότητας κατά τη διάρκεια ζωής του [74]. Τα κύρια μειονεκτήματα του γυαλιού είναι α. το βάρος, β. η ευθραυστότητα, και γ. το κόστος. Μια εναλλακτική λύση για το γυαλί είναι οι καθρέπτες πολυμερών που έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι εύκαμπτοι, ελαφροί και λιγότερο δαπανηροί, αλλά έχουν μικρότερη αντοχή και μικρότερη διάρκεια ζωής από τους καθρέπτες γυαλιού.

Ο Stardobtsev et al. περιέγραψαν για πρώτη φορά έναν ηλιακό συγκεντρωτή χρησιμοποιώντας έναν καθρέπτη πολυμερούς το 1965 [75]. Από τα ανακλαστικά μέταλλα, το αλουμίνιο και ο άργυρος παρέχουν τα καλύτερα αποτελέσματα, με ανακλαστικότητες μεγαλύτερες από 0.9. Ο άργυρος είναι το υλικό που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την ανακλαστική επιφάνεια λόγω της τεχνολογικής βάσης που καθιερώθηκε στη βιομηχανία καθρεπτών και επειδή το αλουμίνιο έχει μια ανεπιθύμητη ζώνη απορρόφησης στα 800 nm. Η ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται γενικά από 0.95 έως 0.97 για κατοπτρικές επιφάνειες αργύρου [76]. Οι καθρέπτες από άργυρο πρέπει να προστατεύονται από τη χημική και φυσική αλλοίωση του, ενώ τα κάτοπτρα αλουμινίου είναι πιο ανθεκτικά στην διάβρωση, δεδομένου ότι τόσο οι επιφάνειες αντανάκλασης από άργυρο όσο και από αλουμίνιο σε ηλιακές εφαρμογές πρέπει να διατηρούν την υψηλότερη ανακλαστικότητα τους για πολλά χρόνια, για τον λόγο αυτό οι αντανάκλαστικές επιφάνειες προστατεύονται με διαφανή υλικά επικάλυψης.

Η θέση του ηλίου, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους, περιγράφεται από δύο γωνίες: το ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ) και το ηλιακό αζιμούθιο ( $A$ ). Αυτές οι γωνίες χρησιμοποιούνται για να προσανατολίσουν τον συλλέκτη (κάτοπτρο) ενός συστήματος ηλιακής ιχνηλάτησης, σε οποιοδήποτε σημείο σε σχέση με τον ήλιο, αν έχει ρυθμιστεί ως ηλιακός ιχνηλάτης ή για να κατευθύνει την ηλιακή δέσμη προς έναν καθορισμένο στόχο εάν έχει ρυθμιστεί ως ηλιοστάτης. Για την ιχνηλάτηση του ήλιου έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι υπολογισμού της θέσης του ήλιου.

Οι Blanco-Muriel et al. [77] επανεξέτασαν διάφορους αλγόριθμους ιχνηλάτησης της ηλιακής ακτινοβολίας και αναγνώρισαν τέσσερις (4) που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για την εκτίμηση της θέσης του ήλιου [78-81]. Ο αλγόριθμος ιχνηλάτησης που προτάθηκε από τον Michalsky [81] να είναι ο πιο ακριβής, έχοντας μια αβεβαιότητα της τάξεως 0.177 mrad. Ένας βελτιωμένος αλγόριθμος του Michalsky εισήχθη λίγα χρόνια αργότερα "The Plataforma Solar de Almeria (PSA) algorithm" ο οποίος είχε αβεβαιότητα 0.15 mrad [77]. Ο πιο ακριβής μέχρι σήμερα αλγόριθμος για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου δημοσιεύτηκε το 2004 από τους Reda και Andreas, "The Solar Position Algorithm (SPA)" [82] με σχετική ακρίβεια 0.005 mrad, που ισχύουν από το 2000 π.Χ. έως 6000 μ.Χ. Το άρθρο βασίστηκε στην έκδοση του αλγορίθμου που περιεγράφηκε αρχικά σε ένα βιβλίο του Meeus το 1988 [83]. Ο αλγόριθμος που προτείνεται από τον Meeus είναι ακριβής με αποκλίσεις περίπου  $0.0003^{\circ}$ , αλλά είναι πολύ πιο περίπλοκος και απαιτεί σημαντική ισχύ επεξεργασίας και μεγαλύτερους υπολογιστικούς χρόνους. Το 2008, ο Grena δημοσίευσε έναν αλγόριθμο με μέγιστη ακρίβεια 0.047 mrad [84]. Ενώ είναι λιγότερο ακριβής από το SPA, σχεδιάστηκε για υπολογιστική απόδοση και είναι πολύ απλούστερος. Σε μεταγενέστερη έρευνα του Grena, τέσσερα (4) χρόνια αργότερα, παρουσιάστηκαν πέντε (5) νέοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της ηλιακής θέσης [85], ωστόσο, κανένας από αυτούς τους αλγόριθμους δεν είχε ακρίβεια μικρότερη από 0.047 mrad.



**Εικόνα 59:** Στρατηγικές ελέγχου ανοικτού-βρόχου (open-loop) και κλειστού-βρόχου (closed-loop).

Τα ηλιακά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- α. Σε παθητικά ηλιακά συστήματα και
- β. Σε ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα συνήθως ενσωματώνουν μια στρατηγική ελέγχου ηλιακής ιχνηλάτησης που μπορεί να είναι είτε ανοικτού-βρόχου, είτε κλειστού-βρόχου [86], όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 59:

1. Ανοικτού-βρόχου ελεγκτές (Open-loop controllers).
2. Κλειστού-βρόχου (Closed-loop controllers).
3. Υβριδικού-βρόχου (Hybrid-loop),

Ο πίνακας 22 παρουσιάζει μερικά παραδείγματα των τεχνολογιών σε κάθε κατηγορία. Αυτές αναλύονται περαιτέρω στις παρακάτω παραγράφους με λεπτομέρεια.

**Πίνακας 22:** Κατηγορίες στρατηγικών ελέγχου ηλιακής ιχνηλάτησης και παραδείγματα εφαρμογής.

Ταξινόμηση	Παθητική ιχνηλάτηση	Δυναμική ιχνηλάτηση
Ανοικτού-βρόχου ελεγκτές	Μηχανισμοί ρολογιού	Αλγόριθμοι ελέγχου της ηλιακής ιχνηλάτησης με μικροεπεξεργαστές
Κλειστού-βρόχου ελεγκτές	Ιχνηλάτες που χρησιμοποιούν ενεργοποιητές θερμικής διαστολής	Ιχνηλάτες που χρησιμοποιούν ηλεκτροπτικής ανάδρασης αισθητήρες
Υβριδικού-βρόχου ελεγκτές	Συνδυασμός ελέγχου ανοικτού και κλειστού βρόχου	

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα είναι μηχανικής φύσης και δεν απαιτούν για την λειτουργία τους ηλεκτρονικούς αισθητήρες ή ενεργοποιητών (actuators). Δεν είναι σύνθετες κατασκευές και δεν παρουσιάζουν περιορισμούς ή μειονεκτήματα όσον αφορά την εφαρμογή των εξαρτημάτων [88]. Η λειτουργία τους είναι μάλλον απλή, οι περισσότεροι από αυτούς έχουν ένα ζεύγος ενεργοποιητών με αέριο (expansible gas) [89] ή ένα κράμα με μνήμη σχήματος (on-shape memory alloy) [86], των οποίων η κίνηση επιτυγχάνεται μέσω της θερμικής επέκτασης. Ένα παράδειγμα παθητικού ηλιακού ιχνηλάτη ανοικτού βρόχου σχεδιάστηκε από τους Abdulrahim et al. που λειτουργεί με μηχανισμό ρολογιού [90]. Ένα άλλο παράδειγμα, αυτή τη φορά, ενός παθητικού ηλιακού ιχνηλάτη κλειστού βρόχου συζητήθηκε από τους Clifford και Eastwood [86], όπου δύο (2) πανομοιότυποι κυλινδρικοί σωλήνες γεμισμένοι με υγρό υπό μερική πίεση και μερικώς σκιασμένοι τοποθετούνται αντιδιαμετρικά σε κάθε πλευρά ενός πάνελ. Η θερμική ενέργεια από τον ήλιο προκαλεί το υγρό να εξατμίζεται στους σωλήνες και να μετακινείται από τον πιο εκτεθειμένο κύλινδρο στον λιγότερο εκτεθειμένο. Έτσι, η ανισορροπία της μάζας να αναγκάζει το πάνελ να προσανατολισθεί προς τον ήλιο, έτσι ώστε και οι δύο κύλινδροι να λαμβάνουν πάντα ίση ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας.

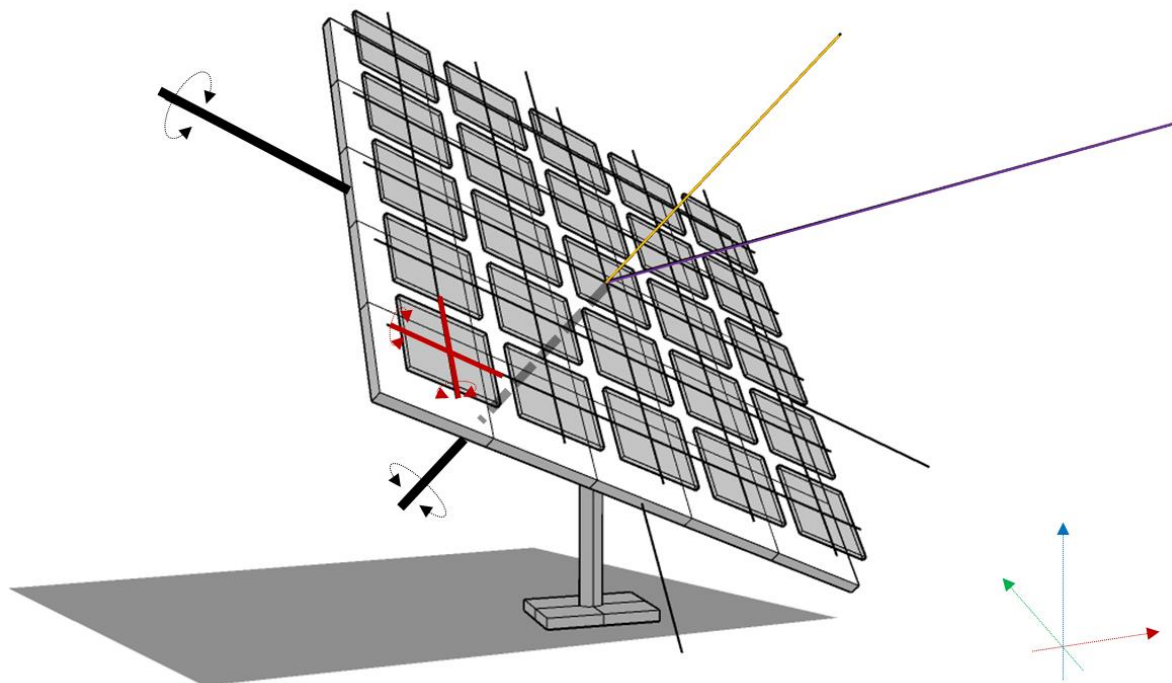
Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα (Active trackers), οι οποίοι ονομάζονται επίσης και συνεχείς ηλιακοί ιχνηλάτες (continuous trackers) χρησιμοποιούν αισθητήρες καθώς και ηλεκτρικούς κινητήρες για τη λειτουργία τους. Οι αισθητήρες (συνήθως ένα ζευγάρι των δύο (2)) τους βοηθούν να καθορίζουν συνεχώς τη θέση του ήλιου στον ουρανό και χρησιμοποιούν κινητήρες για να προσαρμόσουν ανάλογα τον προσανατολισμό των εξαρτημάτων τους. [85]. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για την ενεργή ηλιακή ιχνηλάτηση κλειστού βρόχου είναι η ηλεκτρο-οπτική ανάδραση αισθητήρα (electro-optical sensor feedback) [90].

Στα ενεργά συστήματα ηλιακών ιχνηλατών, όταν η ηλιακή ακτινοβολία και το πάνελ του ιχνηλάτη δεν είναι κανονικά ευθυγραμμισμένοι, οι ηλεκτρο-οπτικοί αισθητήρες λαμβάνουν διαφορετικό φωτισμό δημιουργώντας ένα διαφορικό σήμα που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης στην οποία πρέπει να κινηθεί ο ιχνηλάτης. Το σήμα διαφορικού ελέγχου οδηγεί τους ενεργοποιητές, προσανατολίζοντας τη συσκευή προς τον ήλιο μέχρι να εξαλειφθεί το διαφορικό σήμα. Η κίνηση του ιχνηλάτη σταματά όταν οι δύο (2) αισθητήρες φωτιστούν εξίσου, δηλαδή όταν η ακτίνα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι κάθετη προς τη μονάδα. Η βιβλιογραφία [91] υποδεικνύει ότι αυτή η μέθοδος ανίχνευσης του ήλιου είναι ακριβής, εκτός από τις πολύ νεφοσκεπείς ημέρες όταν καθίσταται αρκετά δύσκολο για τους αισθητήρες να προσδιορίσουν με ακρίβεια τη σχετική θέση του ήλιου.

Οι ελεγκτές ανοικτού βρόχου (Open-loop controllers) παρακολουθούν τον ήλιο μέσω αλγόριθμου χωρίς φυσικά να χρησιμοποιούνται αισθητήρες. Ο αλγόριθμος εκτελείται σε κάποιον υπολογιστή που είναι υπεύθυνος για τη μετακίνηση των κινητήρων ή των ενεργοποιητών της συσκευής για την ιχνηλάτηση του ήλιου. Ένα σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου ενός ηλιοστάτη παρουσιάστηκε από τους Baheti και Scott [92] χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή αυτοβαθμονόμησης ο οποίος ήταν σε θέση να διορθώσει το σύστημα ελέγχου για άγνωστα, αιτιοκρατικά σφάλματα (deterministic errors). Οι Chen et al. [93] δημιούργησαν έναν ανειδωλικό συγκεντρωτικό ηλιοστάτη (non-imaging, focusing heliostat) χρησιμοποιώντας έναν έλεγχο ανοικτού βρόχου, που αποτελείται από εικοσιπέντε (25)  $40 \times 40$  cm ξεχωριστά ελεγχόμενα κάτοπτρα διατεταγμένα σε ένα πλέγμα  $5 \times 5$  με συνολική επιφάνεια ανακλάσεως  $4 \text{ m}^2$ . Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 60. Οι



εκθέσεις σχετικά με την απόδοση του ηλιοστάτη [94] αποκάλυψαν ότι ο ηλιοστάτης αύξησε τη θερμοκρασία ενός ηλιακού κλιβάνου σε 3400 °C ενώ παρουσίαζε ακρίβεια εντοπισμού 2.5 mrad.



**Εικόνα 60:** Σύστημα ανειδωλικού συγκεντρωτικού ηλιοστάτη σύμφωνα με [63].

Η τρέχουσα τάση στους σύγχρονους βιομηχανικούς προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (programmable logic controller, PLC) στα συγκεντρωτικά συστήματα και στα συστήματα ηλιακής ιχνηλάτησης είναι η χρήση ελεγκτών ανοιχτού βρόχου. Τα συστήματα ελεγκτών ανοιχτού βρόχου έχουν συνήθως υψηλή αξιοπιστία, αν το μηχανικό σύστημα κατασκευαστεί με ακρίβεια. Η ακρίβεια ιχνηλάτησης αυτών των προσεγγίσεων υπολογίζεται σε περίπου 0.2<sup>0</sup> και εξαρτώνται από την ακρίβεια της μηχανικής δομής και την κατάλληλη ευθυγράμμιση, έτσι ώστε να δείχνει κατευθείαν προς τον ήλιο. Γενικά, αυτοί οι αλγόριθμοι λόγω της υπολογιστικής τους πολυπλοκότητας απαιτούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση.

Οι ελεγκτές κλειστού βρόχου (Closed-loop controllers) επιτυγχάνουν τη βέλτιστη ακρίβεια ιχνηλάτησης χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ευαίσθητα στο φως (φακούς ή ηλιακούς αισθητήρες, οπτικούς κωδικοποιητές, κτλ.) ώστε να επιτρέπουν στον ελεγκτή να παρακολουθεί την κίνηση του ήλιου. Καθώς ο ήλιος κινείται, αρχίζει να σκιάζει έναν ή

περισσότερους αισθητήρες, τους οποίους το σύστημα ανιχνεύει και ενεργοποιεί τους κινητήρες ή τους ενεργοποιητές για να μετακινήσει τη συσκευή πίσω σε μια θέση όπου όλοι οι αισθητήρες φωτίζονται και πάλι εξίσου. Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (closed-loop control system) βασίζεται σε ανάδραση (feedback) που αποκτάται από το σύστημα. Οι τυπικές πηγές ανάδρασης όσον αφορά την ηλιακή ιχνηλάτηση είναι:

- α. Η τοπική ανάδραση (Local feedback) αναφέρεται σε ανάδραση από ενεργοποιητές και άλλους αισθητήρες στην ίδια την συσκευή.
- β. Η ανάδραση δέσμης (Beam feedback) αναφέρεται σε ανάδραση από αισθητήρες που μετρούν τη γωνία ανακλώμενης δέσμης
- γ. Η ανάδραση του δέκτη (Receiver feedback) αναφέρεται σε ανάδραση από αισθητήρες στον κεντρικό δέκτη.

Οι Roos et al. [95] σχεδίασαν έναν κλειστού κυκλώματος ηλιοστάτη 25 m<sup>2</sup> που χρησιμοποιούσε έναν ελεγκτή τοπικής ανάδρασης (local feedback controller), στο Συμβούλιο Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας (Council for Scientific and Industrial Research, CSIR) στη Νότιο Αφρική. Χρησιμοποιήθηκε ένα ήλεκτρο-οπτικό σύστημα ηλιακής ιχνηλάτησης που αποτελούταν από μία συσκευή σκίασης και φωτοδιόδους (photodiodes) με ακρίβεια παρακολούθησης 3.3 mrad. Ο σχεδιασμός του ηλιοστάτη βασίστηκε σε ένα σύστημα που είχε προταθεί αρχικά από τους Ries και Schubnell [96]. Οι Quero et al. δημιούργησαν έναν ελεγκτή ανάδρασης δέσμης (beam feedback controller) χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο σχέδιο αισθητήρα [98] που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας [99] και συζητήθηκε από τους Brey et al. [100]. Ο ελεγκτής αποτελούταν από δύο (2) γειτονικές φωτοδιόδους και επέτρεπε την ανίχνευση οποιασδήποτε εσφαλμένης κατεύθυνσης του ανακλώμενου φωτισμού από την διαφορά ρεύματος.

Ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, από τους Yogev και Krupkin, παρουσίασε ένα σύστημα που επέτρεπε την ευθυγράμμιση των μεμονωμένων ηλιοστατών στο σημείο συγκέντρωσης της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας [101]. Τέσσερις (4) κάμερες τοποθετήθηκαν γύρω από τον δέκτη, στραμμένοι προς το ηλιοστατικό πεδίο. Κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού διαστήματος ανάδρασης, οι κάμερες φωτογραφίζουν ταυτόχρονα το ηλιοστατικό πεδίο μπορούσαν να εντοπίσουν τους μη-ευθυγραμμισμένους ηλιοστάτες από την ανισοροπία

στην φωτεινότητα που δημιουργούταν στις φωτογραφίες. Αν συνέβαινε αυτό, τότε οι ηλιοστάτες είχαν εντολή να προσαρμόσουν τον προσανατολισμό τους μέχρις ότου εξαλειφθεί αυτή η ανισορροπία φωτεινότητας. Βάσει αυτού του διπλώματος ευρεσιτεχνίας, οι Kribus et al. [102] ανέπτυξαν ένα σύστημα στο Weizmann Institute heliostat field, επιτυγχάνοντας ακρίβεια παρακολούθησης 0.1 – 0.3 mrad. Τα συστήματα κλειστού βρόχου είναι χρήσιμα για συστήματα με έναν (1) ή μερικούς ηλιοστάτες. Ένα μειονέκτημα με τον έλεγχο ηλιακού εντοπισμού κλειστού βρόχου με ηλιακό αισθητήρα είναι ότι το σύστημα εξαρτάται από το αν υπάρχει ή όχι άμεση ηλιακή ακτινοβολία, καθιστώντας δύσκολη τη διατήρηση της σταθερής λειτουργίας ιχνηλάτησης σε συνθήκες νεφοσκεπούς ουρανού. Εάν ένα ηλιακό σύστημα ιχνηλάτησης κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί μόνο οπτικούς αισθητήρες μπορεί να επηρεαστεί εύκολα από την παρουσία νεφών και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Τα συστήματα κλειστού βρόχου έχουν υψηλή αξιοπιστία, αν το μηχανικό σύστημα έχει κατασκευαστεί με ακρίβεια, επιτρέποντας υψηλή ακρίβεια ιχνηλάτησης και εξοικονόμηση από πλευράς κόστους, χρόνου και προσπάθειας, παρόλο που η δομή της ανίχνευσης είναι σχετικά απλή.

Για την εκτέλεση του αλγόριθμου ηλιακής ιχνηλάτησης (solar-tracking algorithm), απαιτείται μια κεντρική μονάδα ελέγχου που συντονίζει την κίνηση του συστήματος. Η μονάδα ελέγχου (control unit) είναι υπεύθυνη για τον συνεχή προσανατολισμό και τοποθέτηση του ηλιοστάτη σε σχέση με το διάλυσμα ηλίου με τέτοιο τρόπο ώστε ο συλλέκτης να ακολουθεί την τροχιά της διαδρομής της κίνησης του ήλιου καθόλη τη διάρκεια του κύκλου της ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο, ο συλλέκτης μπορεί να ανακλάσει την ηλιακή ακτινοβολία.

Η αρχιτεκτονική ελέγχου ενός τυπικού ηλιοστάτη που χρησιμοποιεί ένα σύστημα ελέγχου διπλού-άξονα απαιτεί δύο (2) κινητήρες για την κίνηση του συλλέκτη και την ανακατεύθυνση του προς τον επιλεγμένο στόχο. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία, συνήθως οι κινητήρες μετάδοσης της κίνησης αποσυνδέονται, πράγμα που σημαίνει ότι η περιστροφή του ενός μοτέρ δεν επηρεάζει τον άλλον. Ο σχεδιασμός της λογικής ελέγχου πρέπει να λειτουργεί εντός των καθορισμένων από τον χρήστη παραμέτρων και προδιαγραφών και εξαρτάται κυρίως από στοιχεία όπως:

- την μηχανική πλατφόρμα,

- την συμπεριφορά του μηχανικού συστήματος,
- τις κινήσεις μετάδοσης,
- την στρατηγική ελέγχου,
- τις εισόδους και εξόδους του συστήματος ελέγχου,
- τους μηχανισμούς των αισθητήρων.

Στα ηλιοστατικά συστήματα το σύστημα εντοπισμού θέσης (positioning system), κινεί τον συλλέκτη για να τον τοποθετήσει σε σχέση με τον ήλιο στις βέλτιστες γωνίες. Το σύστημα εντοπισμού θέσης αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο χρησιμοποιεί περιστροφικούς κωδικοποιητές (rotary encoders) για την παρακολούθηση της τρέχουσας θέσης του συλλέκτη και την μετακίνηση του στις επιθυμητές θέσεις. Ένας περιστροφικός κωδικοποιητής, ονομαζόμενος επίσης και κωδικοποιητής άξονα (shaft encoder), είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που μετατρέπει τη γωνιακή θέση ή την κίνηση ενός άξονα σε ένα αναλογικό ή ψηφιακό σήμα εξόδου. Γενικά, υπάρχουν δύο (2) τύποι περιστροφικών κωδικοποιητών:

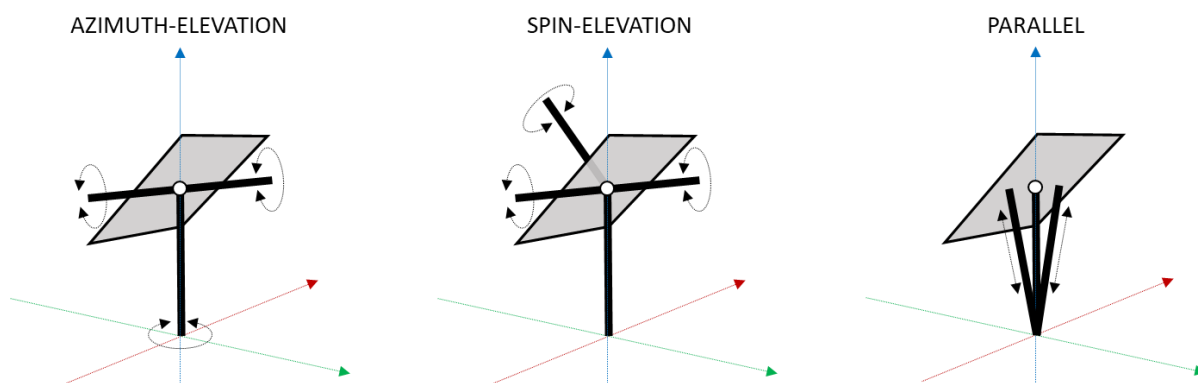
- α. Απόλυτοι (περιστροφικοί) κωδικοποιητές (Absolute (rotary) encoders).
- β. Διαδοχικοί ή διαφορικοί (περιστροφικοί) κωδικοποιητές (Incremental or differential (rotary) encoders).

Οι απόλυτοι (περιστροφικοί) κωδικοποιητές (Absolute (rotary) encoders) παρακολουθούν τη γωνιακή θέση ενός συστήματος και διατηρούν τις γωνιακές πληροφορίες όταν αφαιρείται ενέργεια από το σύστημα. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι η τελευταία θέση του κωδικοποιητή είναι γνωστή και είναι διαθέσιμη αμέσως μετά την εφαρμογή ισχύος στον αισθητήρα. Μία μέθοδος είναι η τοποθέτηση ενός αξονικού κωδικοποιητή (shaft encoder) στους άξονες αζιμούθιου και ύψους της ηλιακής πλατφόρμας ιχνηλάτησης. Αυτό συχνά δημιουργεί μία μικρή δυσκολία καθώς δεν υπάρχει πάντα η δυνατότητα πρόσβασης στον κεντρικό άξονα ή στους άξονες γενικά. Γενικές πρακτικές για τη μέτρηση του προσανατολισμού του ηλιοστάτη σε σχέση με την διεύθυνση του, είναι η σύνδεση του αξονικού κωδικοποιητή στους κινητήρες (DC/AC motor actuator drives) και στην συνέχεια η μέτρηση των στροφών των κινητήρων αζιμούθιου και ύψους κατά τη λειτουργία της ηλιακής ιχνηλάτησης.

Τα ηλιοστατικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τρόπο στερέωσης των ενεργοποιητών ως:

- α. Σειριακά ηλιοστατικά συστήματα ή
- β. Παράλληλα ηλιοστατικά συστήματα.

Σε έναν σειριακού τύπου ηλιοστάτη, οι ενεργοποιητές τοποθετούνται σε σειρά, όπως σε σειριακό ρομπότ. Ο μηχανισμός της μεθόδου ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμούθιου-Ύψους (azimuth-elevation, AE) είναι αυτού του τύπου, καθώς και ο Περιστροφής-Ύψους (spinning-elevation, SE). Τα οφέλη είναι ένας απλός σχεδιασμός και έλεγχος, ενώ τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν μειωμένη σταθερότητα. Σε έναν παράλληλου τύπου ηλιοστάτη, τουλάχιστον δύο (2) ενεργοποιητές έρχονται σε επαφή ταυτόχρονα με τον συλλέκτη και την βάση. Για τον παράλληλο τύπο ηλιοστατών χρειάζονται γραμμικοί ενεργοποιητές συνήθως υδραυλικοί ή πεπιεσμένου αέρα. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου κίνησης είναι η αυξημένη σταθερότητα. Μεταξύ των δύο (2) μηχανισμών ευθυγράμμισης των σειριακών ηλιοστατικών συστημάτων, του Αζιμούθιου-Ύψους (azimuth-elevation, AE) και του Περιστροφής-Ύψους (spinning-elevation, SE), ο τελευταίος παρουσιάζει οπτικά πλεονεκτήματα και επιτρέπει σε μία δεδομένη έκταση (εμβαδόν) την τοποθέτηση περισσότερων ηλιοστατών, περίπου διπλάσιου αριθμού. Ως εκ τούτου, ο τύπος Περιστροφής-Ύψους φαίνεται ενδιαφέρουσα λύση σε περιορισμένους χώρους, αλλά απαιτεί μία επιπρόσθετη άρθρωση η οποία μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του κόστους κατασκευής της δομής στήριξης του ευθυγράμμου στόχου σε σύγκριση με τον απλούστερο τύπο του Αζιμούθιου-Ύψους. Η Εικόνα 61 απεικονίζει τις έννοιες των τριών (3) μηχανισμών, που αναφέρθηκαν παραπάνω.



**Εικόνα 61:** Τρεις (3) βασικοί μηχανισμοί περιστροφής των συστημάτων ηλιοστάτη.

Οι τερματικοί διακόπτες περιορισμού (Limit switches) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταχύτητας και την αποφυγή υπερβολικών μετακινήσεων. Τα όρια μηχανικής υπέρβασης της διαδρομής χρησιμοποιούνται για την αποφυγή βλαβών του ιχνηλάτη ή των καλωδίων. Η ανάδραση ύψους επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού τερματικών διακοπών και μετρήσεων κωδικοποιητή κινητήρα (motor encoder counts). Άλλες αισθητήριες συσκευές, όπως το ανεμόμετρο/αισθητήρας ανέμου, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Εάν οι συνθήκες ανέμου είναι πολύ ισχυρές, ο συλλέκτης οδηγείται συνήθως σε μια ασφαλή οριζόντια θέση και παραμένει στη θέση ασφαλείας (safety position) έως ότου η ταχύτητα ανέμου πέσει κάτω από το καθορισμένο σημείο.

Η δομή και τα θεμέλια ενός ηλιοστάτη πρέπει να αντέχουν κάθε φορτίο που μπορεί να εμφανιστεί σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του, υπολογιζόμενη από 20 έως 30 έτη και κάτω από το πλήρες φάσμα των συνθηκών περιβάλλοντος, χωρίς να προκαλούνται μόνιμες βλάβες. Συνήθως, τα φορτία που δέχονται οφείλονται στον άνεμο, ο οποίος επιδρά πάνω στη μηχανική δομή του ηλιοστάτη σύμφωνα με την Εξίσωση 55 [103]. Για σταθερή ταχύτητα ανέμου σε σχέση με το ύψος η επιβαλλόμενη δύναμη του ανέμου (F) στον ηλιοστάτη είναι ανάλογη της πίεσης του ανέμου (p) στην επιφάνεια του συλλέκτη (A).

$$M = F \times A^{1/2} = p \times A^{3/2} \quad (55)$$

Η ροπή ανά μονάδα επιφάνειας (M / A) είναι:

$$M/A = p \times A^{1/2} \quad (56)$$

Όπου,

- M: Η Ροπή.
- M/A: Η Ροπή ανά επιφάνεια.
- F: Το Φορτίο ανέμου.
- p: Η Πίεση ανέμου.
- A: Η Επιφάνεια.

Αυτός ο νόμος ισχύει επίσης για κινητήριες μονάδες, κινητήρες, βάσεις στήριξης, θεμέλια κ.λπ. Επιπλέον, οι ταχύτητες ανέμου είναι μικρότερες για ηλιοστάτες που βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος. Επομένως, αυτή η μηχανική προδιαγραφή επιτυγχάνεται ευκολότερα με ηλιοστάτες μικρού μεγέθους. Έτσι, καθώς αυξάνεται το μέγεθος του ηλιοστάτη, τα υψηλότερα φορτία ανά μονάδα επιφάνειας αυξάνουν το βάρος και το κόστος των εξαρτημάτων που εξαρτώνται από το φορτίο του ηλιοστάτη.

#### 4.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ (ΜΑΚv1)

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του ΜΑΚv1 είναι η εγκατάσταση των απαραίτητων εξαρτημάτων που σχετίζονται με τον έλεγχο, την αυτοματοποίηση του συστήματος και προετοιμάζει το κύκλωμα με τις συνδέσεις όλων των εξαρτημάτων. Τα βασικά στοιχεία (ηλεκτρονικά και εξαρτήματα) και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους περιγράφονται παρακάτω.



**Εικόνα 62:** Arduino uno rev.3 πλακέτα ανάπτυξης μικροελεγκτών (microcontroller development board).

Ο μικροελεγκτής (microcontroller) είναι ο εγκέφαλος ολόκληρου του συστήματος και ελέγχει το σύστημα ιχνηλάτησης. Βασικά, είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και σε απόκριση αποστέλλει ένα σήμα στους κινητήρες που είναι συνδεδεμένοι με την πλακέτα για να τους μετακινήσουν σε σχέση με τη θέση του ήλιου από την οποία μπορούν να ληφθούν ή να ανακλαστούν οι βέλτιστες ηλιακές ακτίνες. Το Arduino Uno είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς μικροελεγκτές. Είναι ανοιχτού-κώδικα και χρησιμοποιείται ευρέως τόσο από ερασιτέχνες και επαγγελματίες για ποικίλες εφαρμογές. Το Arduino Uno υποστηρίζει μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων, ενεργοποιητών και κινητήρων. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές από αυτές τις συσκευές που είναι έτοιμες για το Arduino Uno. Η Εικόνα 62 δείχνει την πλακέτα ανάπτυξης του μικροελεγκτή Arduino Uno Rev.3 και τα πινάκια (pin-outs) του.

Ο μικροελεγκτής αποτελείται από στοιχεία λογισμικού και εξαρτημάτων. Η συνιστώσα του λογισμικού είναι βασικά τα προγράμματα υπολογιστή που αποκωδικοποιούν τα σήματα



εισόδου και στέλνουν ένα κατάλληλο σήμα για τον έλεγχο του συστήματος ιχνηλάτησης. Τα εξαρτήματα εκτελούν τις εντολές. Για την τροφοδοσία της πλακέτας Arduino απαιτούνται 5 V DC. Το Arduino μπορεί επίσης να τροφοδοτείται μέσω του ίδιου καλωδίου USB που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του (Εικόνα 63) για προσωρινές ρυθμίσεις και τη λειτουργία.



**Εικόνα 63:** USB 2.0 cable type A/B. Χρησιμοποιείται για την σύνδεση του Arduino uno η με οποιαδήποτε άλλη πλακέτα που διαθέτει USB female A θύρα με τον Η/Υ η το φορητό υπολογιστή.

Για αυτό το έργο, επιλέχθηκε ένας μικροελεγκτής Arduino Uno Rev.3, με βάση το ATmega328P [104]. Έχει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες εισόδου/εξόδου (από τους οποίους έξι (6) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM (Pulse Width Modulation, PWM), ένας τρόπος για να παράσχει ένα μεταβλητό σήμα από ένα δεδομένο καθορισμένο σήμα, αλλάζοντας το πλάτος των παλμών, αλλάζει τον κύκλο λειτουργίας ενός τετραγωνικού κύματος επηρεάζοντας την ισχύ που τροφοδοτείται στο συνδεδεμένο εξάρτημα), έξι (6) αναλογικές εισόδους, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή τροφοδοσίας, μια κεφαλίδα ICSP και ένα κουμπί επαναφοράς. Παρέχει την δυνατότητα να συνδεθεί εύκολα σε έναν υπολογιστή με καλώδιο USB ή να τροφοδοτηθεί με προσαρμογέα AC – το – DC. Έχει μια γρήγορη και απλή πλατφόρμα ανάπτυξης πρωτοτύπων ηλεκτρονικών συσκευών (Arduino IDE Software) και απαιτεί βασικές γνώσεις προγραμματισμού C/C++, με καλή υποστήριξη από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη και μια πολύ ενεργή κοινότητα προγραμματιστών στο διαδίκτυο.

Για την ανάπτυξη του MAKv1 χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα "Arduino Sun Tracking/Heliostat Program" [65] και χρησιμοποιήθηκαν για τον αλγόριθμο ελέγχου της ηλιακής ιχνηλάτησης. Το πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα αποτέλεσε την βάση με την οποία

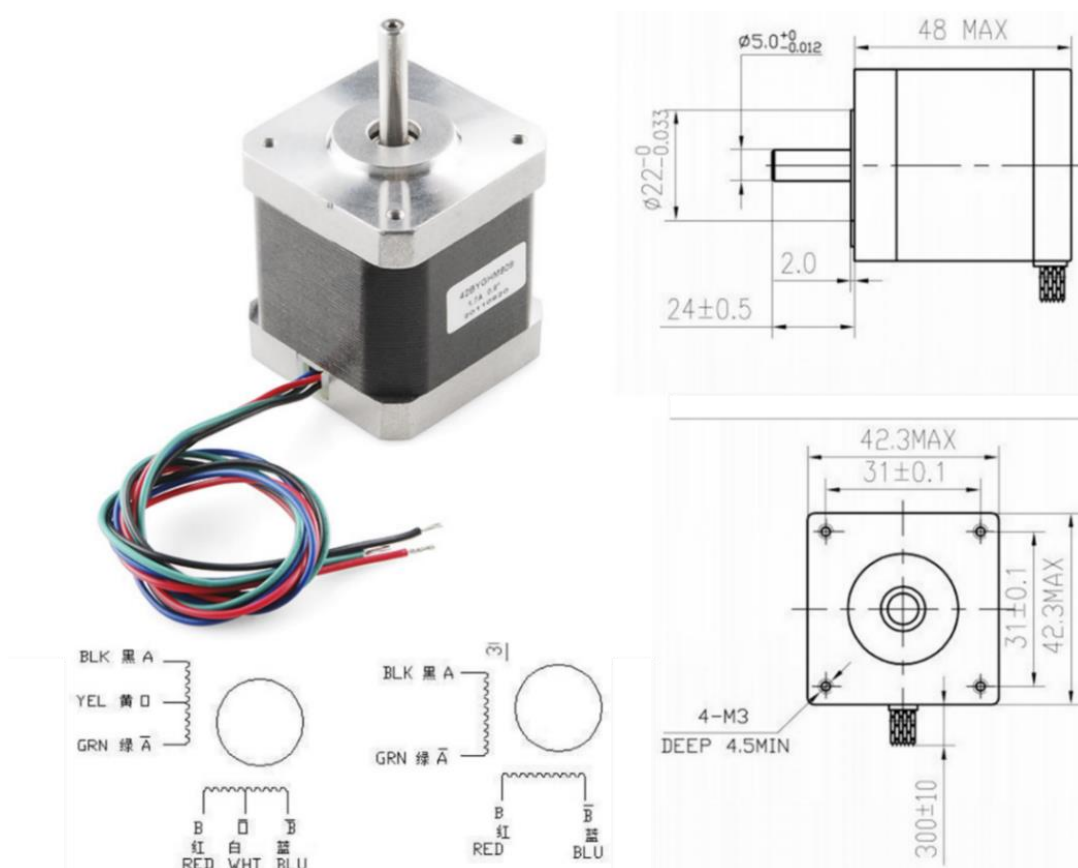
επιτευχθεί η λειτουργία του ηλιοστάτη. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου (control algorithm), έγινε η λήψη του κώδικα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και στη συνέχεια μετατράπηκε σε δυαδική ή γλώσσα της μηχανής με το λογισμικό Arduino IDE σε Windows περιβάλλον πριν φορτωθεί στο Arduino Uno Rev.3 μέσω της σύνδεσης USB. Η διαδικασία για την εφαρμογή του αλγορίθμου του υπολογισμού των ηλιακών γωνιών (αζιμουθίου και ύψους) για την περιστροφή της μηχανής μπορεί να βρεθεί στο Open Sun Harvesting Project [65] και στο Παράρτημα αυτής της διατριβής. Με την εισαγωγή των τοπικών παραμέτρων (το γεωγραφικό πλάτος (latitude,  $\Phi$ ), το γεωγραφικό μήκος (longitude,  $\Lambda$ ), την τοπική ώρα (local time, LTC), τη ζώνη ώρας (time zone, TZ) κ.λπ.), το πρόγραμμα υπολογίζει το αζιμούθιο και το ύψος του ήλιου την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, καθώς επίσης και τον χρόνο ανατολής και δύσης του ήλιου για την ημέρα του υπολογισμού. Ο μικροελεγκτής μαζί με το κύκλωμα του ελεγκτή θα ελέγχει την κίνηση της συσκευής για την ιχνηλάτηση του ήλιου.

Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του MAKv1 είναι βηματικοί κινητήρες μεγάλης ροπής NEMA17 (42 mm) από την Wantai Motors, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 64. Ο τύπος μοντέλου ήταν 42BYGHM809, με γωνία βήματος  $0.9^\circ$  (πλήρες βήμα, 400 STEPS/REV) με D-άξονα (διάμετρος 5 mm) για εύκολη και αξιόπιστη σύνδεση με τον ζεύκτη. Είναι ένας διπολικός ηλεκτροκινητήρας, με μόνο δύο (2) πόλους στο σταθερό πεδίο του κινητήρα (2 φάσεων). Ο Πίνακας 23 παρέχει τις τεχνικές προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων βηματικών μοτέρ.

Οι βηματικοί κινητήρες (Stepper motors) είναι εύχρηστοι και πρακτικοί στα σημερινά ρομποτικά και μηχανικά συστήματα, καθώς παρέχουν υψηλό επίπεδο ακρίβειας όντας απλά στην σύνδεση τους (καλωδίωση) και σχετικά απλά στον έλεγχο. Ένας βηματικός κινητήρας είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος περιστρέφεται με διακριτά βήματα. Έχουν πολλαπλά πηνία που οργανώνονται σε ομάδες που ονομάζονται "φάσεις". Με την ενεργοποίηση κάθε φάσης σε σειρά, ο κινητήρας θα περιστραφεί, ένα βήμα τη φορά και μέσω του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου βηματισμού μπορεί να επιτευχθεί πολύ ακριβή ρύθμιση της θέσης και/ή της ταχύτητας. Σε κάθε βήμα, ο κινητήρας διατηρεί τη θέση του χωρίς να χρειάζεται επιπρόσθετη ενέργεια. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για αισθητήρες θέσης ανάδρασης (feedback positioning sensors) αν ο κινητήρας είναι σωστά διαστασιοποιημένος και δεν παραλείπεται κανένα βήμα.

**Πίνακας 23:** Τεχνικές προδιαγραφές του μοντέλου 42BYGHM809.

Μοντέλο	Step Angle (°)	Motor Length (mm)	Rated Voltage (V)	Rate Current (A)	Phase Resistance (Ω)	Phase Inductance (mH)
42BYGHM809	0.9	48	2.8	1.7	1.65	4



**Εικόνα 64:** Βηματικός Κινητήρας Μεγάλης Ροπής (High-Torque Stepper Motor) 42BYGHM809 (1.68 A, 4.5 Kg × cm) σε μέγεθος NEMA17 (42 mm) από την Wantai Motors. Μηχανικές διαστάσεις και διάγραμμα καλωδίωσης (wiring diagram).

Η κατάργηση της απαίτησης ανάδρασης και η ψηφιακή φύση ενός βηματικού μοτέρ καθιστά εύκολη την ενσωμάτωση σε ψηφιακά συστήματα. Για το λόγο αυτό, ο βηματικός κινητήρας είναι ο κινητήρας που επιλέγεται για πολλές εφαρμογές ελέγχου ακριβείας. Είναι πιο εφαρμόσιμα σε ορισμένες εφαρμογές από τους τυπικούς ηλεκτροκινητήρες συνεχούς ρεύματος, δεδομένου ότι είναι ελεγχόμενοι από την θέση τους και όχι από την περιστροφή

τους και επομένως καθίστανται κατάλληλοι σε ηλιακά συστήματα ιχνηλάτησης τα οποία απαιτούν υψηλή ακρίβεια θέσης.

Οι βηματικοί κινητήρες (Stepper motors) διατίθενται σε πολλά διαφορετικά μεγέθη, τύπους και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν τρεις (3) κύριοι τύποι βηματικών κινητήρων:

1. Βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet stepper motors),
2. Βηματικοί κινητήρες μεταβλητής απροθυμίας (variable reluctance stepper motors)  
και
3. Υβριδικοί βηματικοί κινητήρες (hybrid stepper motors).

Ο βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet stepper motor) χρησιμοποιεί έναν μόνιμο μαγνήτη στον άξονα του κινητήρα (ρότορα) και στους ηλεκτρομαγνήτες γύρω από την περίμετρο (στάτορα). Τα βήματα επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας τις ελκυστικές και απωθητικές αλληλεπιδράσεις με τον μαγνήτη και τους ηλεκτρομαγνήτες. Αυτό δίνει στον κινητήρα μόνιμου μαγνήτη υψηλή ροπή, αλλά χωρίς την ανάλυση που παρέχουν οι οδοντωτοί. Οι βηματικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν τα μεγαλύτερα μεγέθη βημάτων, γενικά από  $7.5^{\circ} - 15^{\circ}$  per step (24 – 48 STEPS/REV).

Οι βηματικοί κινητήρες μεταβλητής απροθυμίας (Variable reluctance stepper motors) έχουν μαγνητικό στροφέα σε σχήμα γραναζιού που έλκεται από τους πόλους των οδοντωτών μαγνητών. Τα δόντια συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της ανάλυσης του βηματικού μοτέρ με τη μείωση της ροπής.

Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες (Hybrid stepper motors) συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα τόσο των μόνιμων μαγνητών όσο και των μεταβλητών βηματικών κινητήρων απροθυμίας για την επίτευξη υψηλών ροπών σε σχέση με το μέγεθος τους. Ο περιστρεφόμενος ρότορας του βηματικού κινητήρα με μεταβλητή απροθυμία συνδυάζεται με έναν αξονικά ευθυγραμμισμένο μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος αυξάνει την απόδοση των δοντιών και αυξάνει τη ροπή συγκράτησης του κινητήρα. Οι υβριδικοί βηματικοί κινητήρες έχουν τα μεγέθη  $0.9^{\circ} - 3.6^{\circ}$  (100 – 400 STEPS/REV), με  $1.8^{\circ}$  steps.

Οι βηματικοί κινητήρες διατίθενται σε δύο (2) βασικές διαμορφώσεις καλωδίωσης, α. διπολική (bipolar) και β. μονοπολική (unipolar).

- α. Οι μονοπολικοί κινητήρες (Unipolar motors) αποτελούνται από δυο (2) τυλίγματα κάθε ένα από τα οποία έχει μια κεντρική ελικοτομή (center tap). Οι ελικοτομές έχουν δύο (2) τρόπους σύνδεσης 1. είτε να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν δύο (2) ξεχωριστά καλώδια 2. είτε τα δύο (2) αυτά καλώδια να συνδέονται εσωτερικά και να φέρονται έξω από τον κινητήρα σαν ένα καλώδιο. Αυτό επιτρέπει την εύκολη αντιστροφή της κατεύθυνσης του κινητήρα αλλάζοντας το τμήμα της φάσης που τροφοδοτείται αντί να αναστρέφει τη ροή ρεύματος. Αυτό επιτρέπει στο κύκλωμα ελέγχου να είναι πολύ απλό. Οι μονοπολικοί κινητήρες έχουν τυπικά έξι (6) καλώδια, τρία για κάθε φάση, αλλά μπορούν επίσης να βρεθούν με πέντε (5) καλώδια, με την κεντρική ελικοτομή και των δύο φάσεων εσωτερικά συνδεδεμένη. Οι μονοπολικοί κινητήρες μπορούν εύκολα να ελεγχθούν με έναν μικροελεγκτή ή έναν βηματικό ελεγκτή και είναι πολύ προσιτοί.
- β. Οι διπολικοί κινητήρες έχουν ένα (1) ή δύο (2) τυλίγματα με τέσσερα (4) καλώδια χωρίς κεντρικές ελικοτομές (center tap) για κάθε φάση. Για την αντιστροφή της κατεύθυνσης περιστροφής σε ένα διπολικό μοτέρ, η τρέχουσα κατεύθυνση πρέπει να αντιστραφεί. Αυτή η απαίτηση καθιστά το κύκλωμα οδήγησης πιο περίπλοκο και γενικά εφαρμόζεται με διάταξη ελέγχου Η-γέφυρας ή οδηγό κινητήρα Η-γέφυρας. Ενώ είναι πιο περίπλοκοι στην οδήγηση, οι διπολικοί κινητήρες είναι πολύ πιο ισχυροί για το ίδιο βάρος και μέγεθος. Οι διπολικοί κινητήρες μπορούν να διαμορφωθούν είτε με σειριακά είτε με παράλληλα τυλίγματα, επιτρέποντάς τους να κινούνται με χαμηλότερο ρεύμα σε σειρά ή με υψηλότερη επαγωγή και μεγαλύτερη ροπή παράλληλα. Οι διπολικοί κινητήρες έχουν γενικά τέσσερις (4) ή οκτώ (8) αγωγούς, δύο (2) ή τέσσερις (4) ανά φάση, επιτρέποντάς τους να διακριθούν από τους πέντε (5) και έξι (6) μονοπολικούς ηλεκτροκινητήρες.

Τα πλεονεκτήματα των βηματικών κινητήρων είναι:

- Τοποθέτηση: Εφόσον οι βαθμίδες μετακινούνται σε επαναλαμβανόμενα βήματα, υπερέχουν σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή τοποθέτηση.

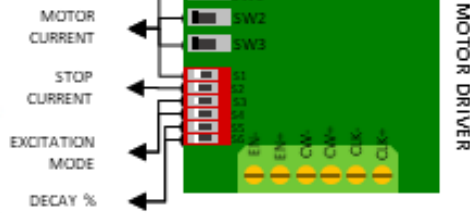
- Έλεγχος ταχύτητας: Οι ακριβείς αυξήσεις της κίνησης επιτρέπουν επίσης τον εξαιρετικό έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και τη ρομποτική.
- Ροπή χαμηλής ταχύτητας: Οι κανονικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος (Normal DC motors) δεν έχουν υψηλές ροπές σε χαμηλές ταχύτητες. Ένας βηματικός κινητήρας έχει μέγιστη ροπή σε χαμηλές ταχύτητες, έτσι είναι μια καλή επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή ταχύτητα με μεγάλη ακρίβεια.

Οι περιορισμοί των βηματικών κινητήρων είναι:

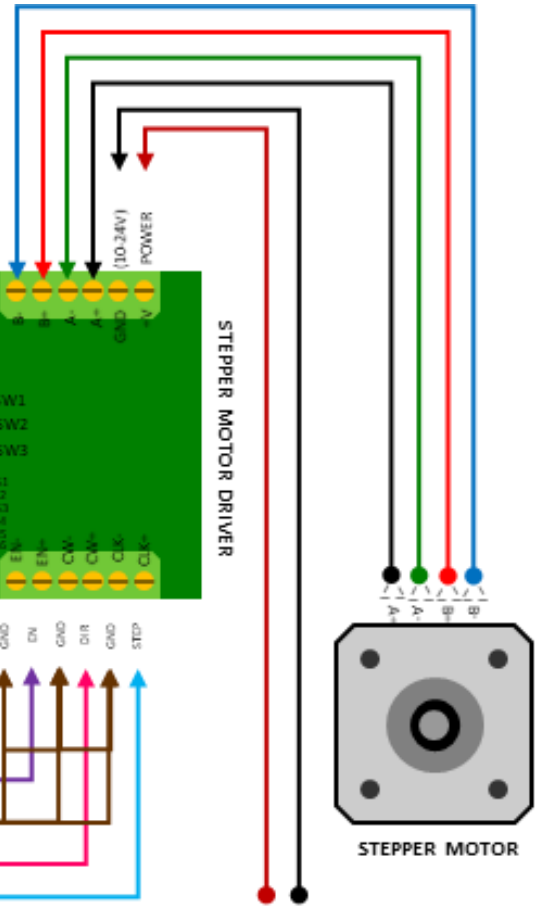
- Χαμηλή απόδοση: Σε αντίθεση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors), η κατανάλωση ρεύματος του βηματικού μοτέρ είναι ανεξάρτητη από το φορτίο. Καταναλώνουν το περισσότερο ρεύμα όταν δεν εκτελούν κάποια εργασία. Εξαιτίας αυτού, τείνουν να εμφανίζουν υψηλές θερμοκρασίες κατά την λειτουργία τους.
- Περιορισμένη ροπή υψηλής ταχύτητας: Γενικά, οι βηματικοί κινητήρες έχουν μικρότερη ροπή σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τις χαμηλές ταχύτητες. Ορισμένες βαθμίδες είναι βελτιστοποιημένες για καλύτερη απόδοση σε υψηλές ταχύτητες, αλλά πρέπει να συνδυαστούν με έναν κατάλληλο οδηγό για την επίτευξη αυτής της απόδοσης.
- Χωρίς ανάδραση: Σε αντίθεση με τους σέρβο-κινητήρες, τα περισσότερα βήματα δεν έχουν ανάδραση για τη θέση. Παρόλο που μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια με έλεγχο ανοιχτού βρόχου. Οι τερματικοί διακόπτες ή οι ανιχνευτές στρέψης συνήθως απαιτούνται για την ασφάλεια και/ή για τη δημιουργία μιας θέσης αναφοράς.

Ο μικροελεγκτής (microcontroller, MCU) για τον έλεγχο της περιστροφής των βηματικών κινητήρων, απαιτεί μια πλακέτα οδηγού βηματικού κινητήρα να ενεργοποιεί τις φάσεις με έγκαιρη σειρά και να τους κάνει να γυρίσουν. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) πλακέτες οδηγού μονού κινητήρα TB6560 3A. Η τάση ρεύματος είναι ρυθμιζόμενη για να ικανοποιεί διάφορες απαιτήσεις σε εφαρμογές. Είναι αυτόματα ρυθμιζόμενα με ημι-ροή, εύκολα κατά την λειτουργία και χρησιμοποιούν μια ψύκτρα, για καλή απορρόφηση της παραγόμενης θερμότητας. Η Εικόνα 65 απεικονίζει λεπτομερώς το μπλοκ διάγραμμα και την κάρτα οδηγού.

		Running Current													
(A)		0.3	0.5	0.8	1	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.9	2	2.2	2.6	3
SW1		OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
SW2		OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON
SW3		ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON
s1		ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF
Stop Current															
s2															
20%		ON													
50%		OFF													
Excitation Mode		Decay Setting		"s3, GND" Power positive and negative											
STP	s3	s4	s5	s6	"HA, A" Motor phase A										
whole	OFF	OFF	0%	OFF	OFF	"HB, B" Motor phase B									
half	ON	OFF	25%	ON	OFF	"CLK+, CLK-" Pulse positive and negative									
"1/8"	ON	ON	50%	OFF	ON	"CW+, CW-" Direction positive and negative									
"1/16"	OFF	ON	100%	ON	ON	"EN+, EN-" Enable positive and negative									



ENABLE PIN  
GROUND PIN  
DIRECTION PIN  
STEP PIN

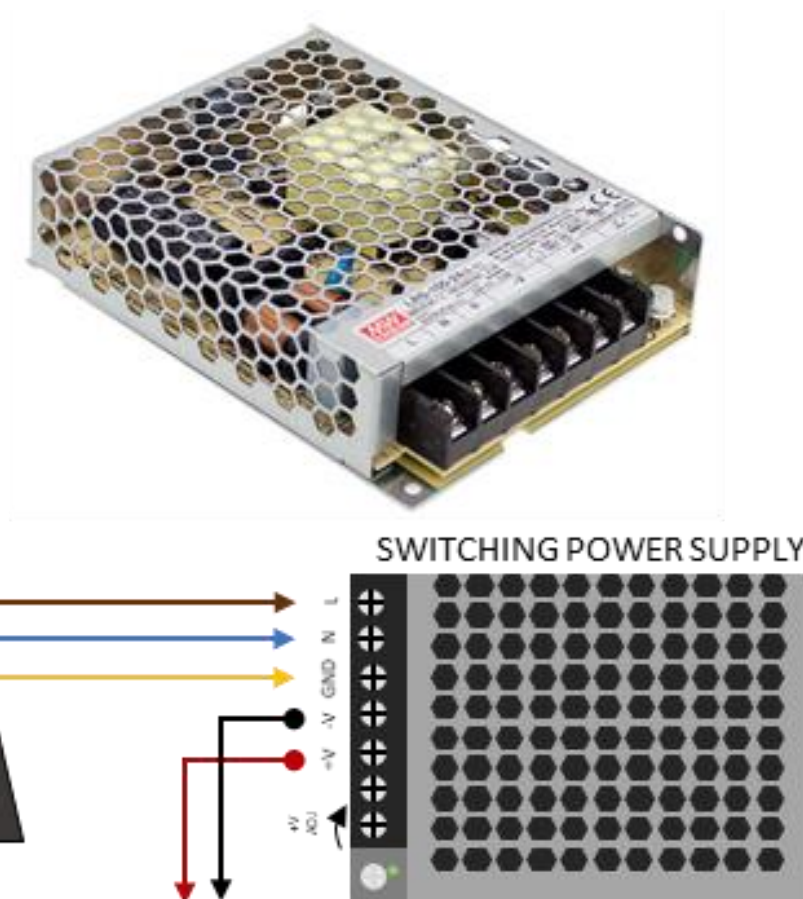


**Εικόνα 65:** Πλακέτα οδηγού βηματικού μοτέρ (μονού-άξονα) (stepper motor (single-axis) driver board) TB6560 3A και η καλωδίωση του στον βηματικό κινητήρα, καθώς και η περιγραφή του τερματικού.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του οδηγού μοτέρ TB6560 3A (single-motor driver board) είναι:

- Τάση λειτουργίας: DC 10V – 35V, με προτεινόμενη την τροφοδοσία DC 24V.
- 6N137 οπτική ζεύξη υψηλής ταχύτητας, για να εξασφαλιστεί υψηλή ταχύτητα χωρίς να χάνεται το βήμα.
- Toshiba TB6560AHQ τσιπ, με χαμηλή τάση απενεργοποίησης, υπέρβασης θερμοκρασίας και υπερκείμενου κυκλώματος προστασίας χώρου στάθμευσης, για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση.
- Ονομαστική ισχύς:  $\pm 3A$ , μέγιστη 3.5A.

- Κατάλληλα πρότυπα 42, 57 3A στα δύο/τεσσάρων φάσεων, τέσσερα σύρματα/έξι σύρματα κινητήρα, και δεν είναι κατάλληλα για περισσότερο από 3A βηματικούς κινητήρες.
- Αυτόματη υποβάθμιση κατά το ήμισυ (Automatic half-decay).
- Λειτουργία διέγερσης (Excitation Mode): Αυτόματη λειτουργία ρεύματος κατά το ήμισυ με τμήματα πλήρους βήματος, μισής βαθμίδας, 1/8-βημάτων, 1/16βημάτων, μέχρι 16 τμήματα.
- Διαστάσεις: 7.5 × 5 × 3.5 cm.
- Βάρος: 82 gr.



**Εικόνα 66:** Τροφοδοτικό mean well power supply LRS-100-12 100W 12V.

<https://www.meanwell.co.uk/lrs-100-12.html>.



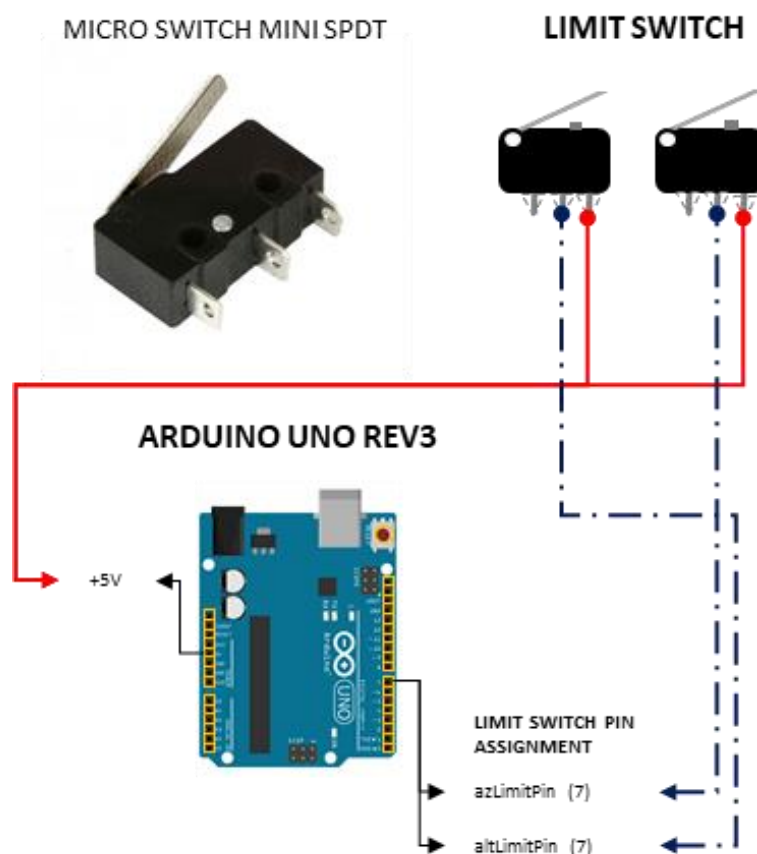
**Πίνακας 24:** Τεχνικές προδιαγραφές του τροφοδοτικού mean well power supply LRS-100-12 100W 12V.

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Output voltage	12 VDC
Output current range	0-8.5A
Power rating	102 W
Input voltage	85 → 264 VAC, 120 → 373 VDC (withstand 300 VAC surges for 5 seconds. without damage)
Efficiency	88%
Number of outputs	1
Mounting type	Chassis mount
Package type	Enclosed

Όλα τα μέρη του ηλιοστάτη τροφοδοτήθηκαν από ένα τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης (switching power supply) από την Mean Well Corporation, όπως φαίνεται στην Εικόνα 66. Λόγω της μεταβλητότητας το τροφοδοτικό Mean Well Power Supply LRS – 100 – 12 (100 W, 12V) μπορεί να τροφοδοτεί με ρεύμα 3.5V και 5V στην έξοδο, τη συσκευή. Η σειρά LRS – 100 μονής-εξόδου 100 W, κλειστού τύπου τροφοδοτικό, έχει χαμηλό προφίλ (30 mm) και έχει εξαιρετική απόδοση. Με τιμές εισόδου που μπορεί να κυμανθούν 85 – 264 VAC, όλη η σειρά παρέχει τάσης εξόδου 3.3V, 5V, 12V, 15V, 24V, 36V και 48V. Εκτός από την υψηλή απόδοση έως και 88%, ο σχεδιασμός του μεταλλικού πλέγματος ενισχύει την διάχυση της θερμότητας του LRS – 100 με αποτέλεσμα να λειτουργεί σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -30 °C through 70 °C χωρίς την χρήση ανεμιστήρα. Η πλακέτα τροφοδοσίας μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε από έναν AC μετασχηματιστή ή από μία USB πηγή τροφοδοσίας. Οι τεχνικές προδιαγραφές του LRS – 100 συνοψίζονται στον Πίνακα 24.

Άλλα σημαντικά εξαρτήματα για την πρωτότυπη μονάδα ΜΑΚv1 είναι ένα ζεύγος τερματικών διακοπών (με ρολό), ένα ποτενσιόμετρο, μια ηλεκτρονική μονάδα ρολογιού πραγματικού χρόνου (Real – Time Clock, RTC και διάφορα κουμπιά και διακόπτες για τον έλεγχο του μηχανήματος. Αυτά τα εξαρτήματα απεικονίζονται στην Εικόνα 69.

Ένα ποτενσιόμετρο γραμμικής απλής περιστροφής 10K ohm (Target Changer) το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με την πλακέτα Arduino για την εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών ομάδων-στόχων ηλιοστάτη.



**Εικόνα 67:** Τερματικοί διακόπτες με ρολό (limit switches w/roller) και η σύνδεση τους με τον μικροελεγκτή (microcontroller).

Οι τερματικοί διακόπτες χρησιμοποιούνται για την επαναφορά της θέσης του μηχανήματος. Ο τύπος των τερματικών διακοπτών που χρησιμοποιήθηκε είναι με ρολό. Το ρολό είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω από τον ενεργοποιητή, το οποίο προστατεύει τη μεταλλική ταινία από ατυχήματα. Οι περισσότεροι τερματικοί διακόπτες μπορούν να συνδεθούν με δύο (2) τρόπους:

1. Κανονικά ανοικτοί (Normally Open, NO) και
2. Κανονικά κλειστοί (Normally Closed, NC).

Κανονικά ανοιχτό (NO) σημαίνει ότι το ρεύμα ρέει μόνο όταν ο διακόπτης είναι ενεργοποιημένος (έχει πατηθεί). Κανονικά κλειστό (NC) είναι η αντίθετη κατάσταση. Το

ρεύμα ρέει πάντα μέχρι να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης για να διακόψει τη σύνδεση. Η καλωδίωση των τελικών διακοπών για την συσκευή είναι κανονικά ανοιχτή (NO). Η Εικόνα 67 δείχνει τους τερματικούς διακόπτες που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με την σύνδεση των καλωδίων με την πλακέτα Arduino για κανονικά ανοιχτό (NO).

Για το έργο, χρησιμοποιήθηκε ένα τσιπ RTC (μοντέλο DS1307) το οποίο είναι ένα εξειδικευμένο τσιπ που μπορεί να παρακολουθεί το χρόνο. Αυτό το προϊόν που παρουσιάζεται στην Εικόνα 68, είναι ένας φορέας για το ολοκληρωμένο κύκλωμα DS1307 της Maxim. Το σειριακό ρολόι πραγματικού χρόνου (serial real-time clock, RTC) DS1307 είναι ένα ρολόι/ημερολόγιο δεκαδικού ψηφιακού 56 bytes (binary-coded decimal, BCD) με χαμηλή κατανάλωση και NV SRAM με μπαταρία. Το ρολόι/ημερολόγιο παρέχει πληροφορίες για δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες, ημέρα, ημερομηνία, μήνα και έτος. Στο τέλος του μήνα, η ημερομηνία προσαρμόζεται αυτόματα για μήνες με λιγότερες από 31 ημέρες, συμπεριλαμβανομένων των διορθώσεων για το δίσεκτο έτος. Το ρολόι λειτουργεί είτε σε 24ωρη είτε σε 12ωρη μορφή με δείκτη AM/PM. Το ενσωματωμένο DS1307 έχει ενσωματωμένο κύκλωμα αισθητήρα ισχύος που ανιχνεύει βλάβες ρεύματος και μεταβαίνει αυτόματα στην εφεδρική παροχή. Η λειτουργία χρονομέτρησης συνεχίζεται ενώ το τμήμα λειτουργεί από την εφεδρική τροφοδοσία.



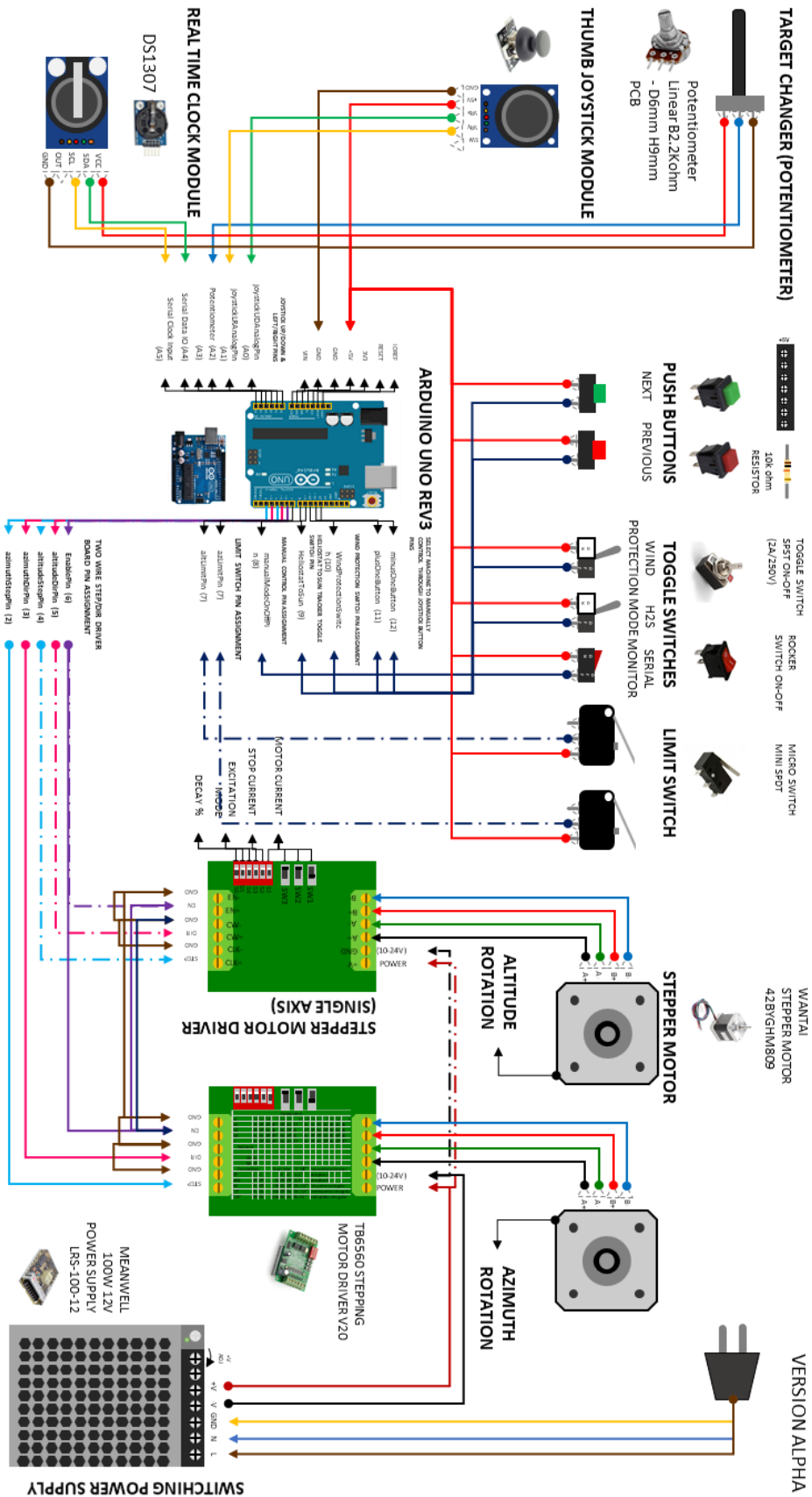
**Εικόνα 68:** Σειριακό ρολόι πραγματικού χρόνου (Serial Real-Time Clock, RTC) βασισμένο στο clock chip DS1307.

Χρησιμοποιώντας ένα RTC, παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης και καταγραφής του χρόνου για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ακόμα και αν ο μικροελεγκτής επαναπρογραμματιστεί ή αποσυνδεθεί από το USB ή από την τροφοδοσία. Οι περισσότεροι μικροελεγκτές, συμπεριλαμβανομένου και του Arduino, έχουν ενσωματωμένο χρονιστή που ονομάζεται millis() και υπάρχουν επίσης χρονομετρητές ενσωματωμένοι στο τσιπ που μπορούν να παρακολουθούν μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, όπως λεπτά ή ημέρες. Αλλά

το millis() παρακολουθεί μόνο το χρόνο από την τελευταία φορά που το Arduino τροφοδοτήθηκε. Αυτό σημαίνει ότι όταν η τροφοδοσία είναι ενεργοποιημένη, ο χρονιστής σε χιλιοστά του δευτερολέπτου επανέρχεται στο μηδέν. Με ένα RTC μπορεί κανείς να προγραμματίσει την ημερομηνία και την ώρα και θα μπορούσε να μετρήσει από εκείνο το σημείο. Το πρώτο πράγμα που απαιτείται για τον καθορισμό του χρόνου είναι ένα σύντομο πρόγραμμα Arduino, το οποίο ονομάζεται "SET\_RTC\_TIME", το οποίο παρέχεται δωρεάν από τον Gabriel Miller στο Cerebral Meltdown [65]. Ο πλήρης κωδικός Arduino για τη μονάδα RTC μπορεί επίσης να βρεθεί στο Παράρτημα I.

Το διάγραμμα καλωδίωσης της Εικόνας 69 δείχνει πώς ο μικροελεγκτής Arduino Uno Rev3 σχετίζεται με όλα τα εξαρτήματα. Το ολοκληρωμένο μπλοκ διάγραμμα με τις σωστές συνδέσεις pinout της Εικόνας 69 περιγράφει τη δομή των εξαρτημάτων του κυκλώματος ελέγχου. Όπως εισηχθη, ο μικροελεγκτής στέλνει εξόδους στις κάρτες οδηγού TB6560 3A μονού μοτέρ μέσω των ακίδων ψηφιακής εξόδου. Κάθε άξονας παρακολούθησης έχει το δικό του κύκλωμα ελέγχου και κάθε οδηγός απαιτεί μία (1) είσοδο ενεργοποίησης και δύο (2) εισόδους ελέγχου. Για τη σύνδεση των βηματικών κινητήρων στους οδηγούς τους, χρησιμοποιήθηκε ένα καλώδιο επέκτασης, επειδή τοποθετήθηκαν στη βάση της συσκευής.

Όλα τα στοιχεία λειτουργούν χρησιμοποιώντας ισχύ από τη μονάδα PSU (Mean Well Power Supply LRS – 100 – 12), συμπεριλαμβανομένου και του μικροελεγκτή (MCU). Επιπλέον, όταν η πλακέτα είναι συνδεδεμένη με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, η τροφοδοσία USB μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για τη δοκιμή της λειτουργικότητας της πρωτότυπης συσκευής MAKv1. Όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στο κεντρικό κουτί/πίνακα εντολών, παρέχοντας προστασία για τα κυκλώματα και τα εξαρτήματα, καθώς και ευκολία για τον χρήστη να ελέγχει και να χειρίζεται την συσκευή. Χρησιμοποιήθηκε ένα εκτεταμένο καλώδιο τροφοδοσίας για τη σύνδεση του κεντρικού πλαισίου εντολών με τη μονάδα ελέγχου, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε απόσταση από τη συσκευή. Οι Εικόνες 69 και 70 παρουσιάζουν το κεντρικό κουτί ελέγχου.

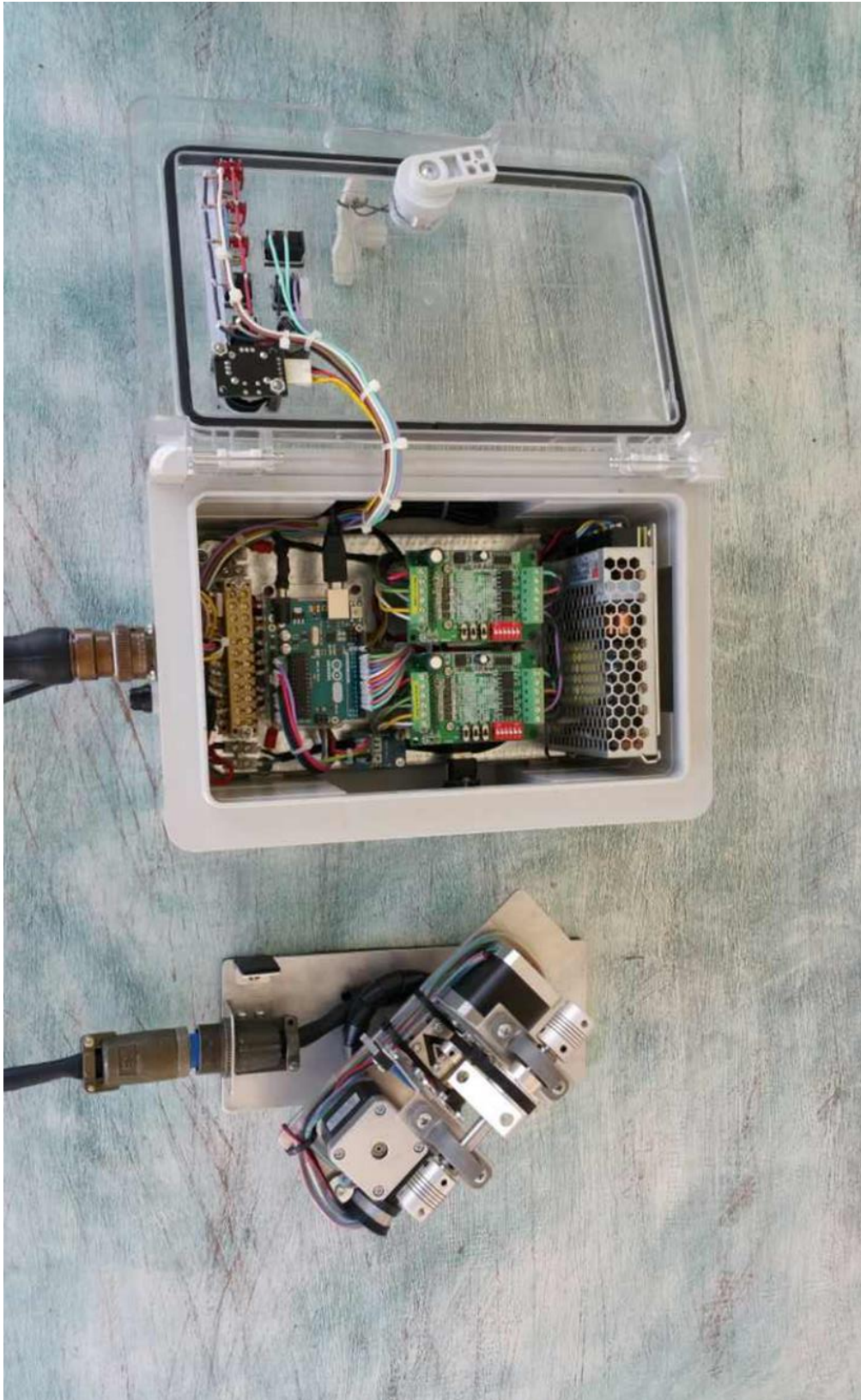






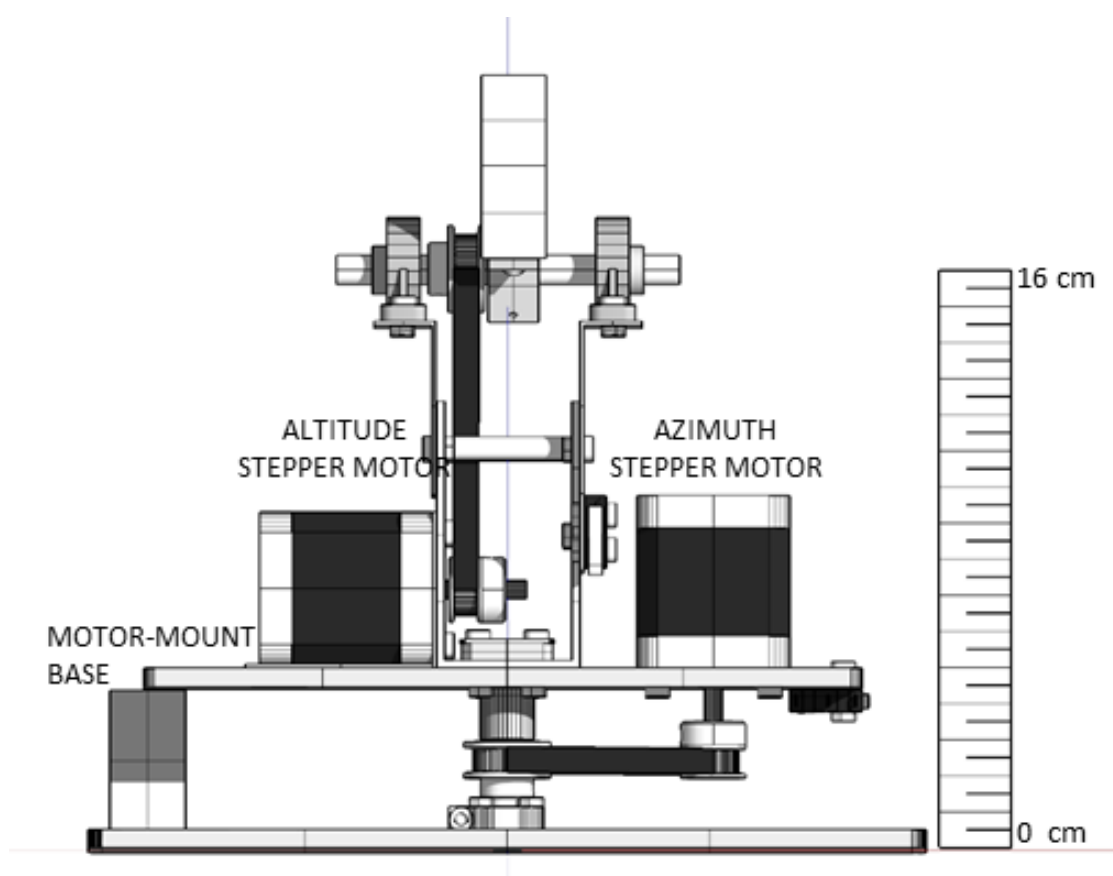
**Εικόνα 70:** Ο κεντρικός πίνακας ελέγχου για τη λειτουργία του πρωτοτύπου ΜΑΚV1.





**Εικόνα 71:** Ο κεντρικός πίνακας εντολών (ανοικτός), όπου διακρίνονται τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, και το σύστημα μηχανικής στήριξης και παρακολούθησης (χωρίς τον καθρέφτη).

Αυτή η ενότητα παρέχει ορισμένες λεπτομέρειες σχετικά με την κατασκευή της μηχανικής μονάδας στήριξης και ελέγχου για τον πρωτότυπο ηλιοστάτη/ηλιακό ιχνηλάτη (ΜΑΚv1). Η ανάπτυξη και η κατασκευή του πρωτοτύπου συστήματος ΜΑΚv1 περιλαμβάνει μία μονάδα ελέγχου με βηματικούς κινητήρες ελεγχόμενους από ιμάντες χρονισμού/οδοντωτού ιμάντα για τον έλεγχο των γωνιών ύψους και αζιμουθίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 71. Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό που μπορεί να φανεί από την Εικόνα 72 είναι η εγκατάσταση των βηματικών κινητήρων (σύστημα κίνησης) και το συνολικό μικρό μέγεθος του συστήματος.



**Εικόνα 72:** Μπροστινή 3D-όψη του πρωτοτύπου ηλιοστάτη ΜΑΚv1.

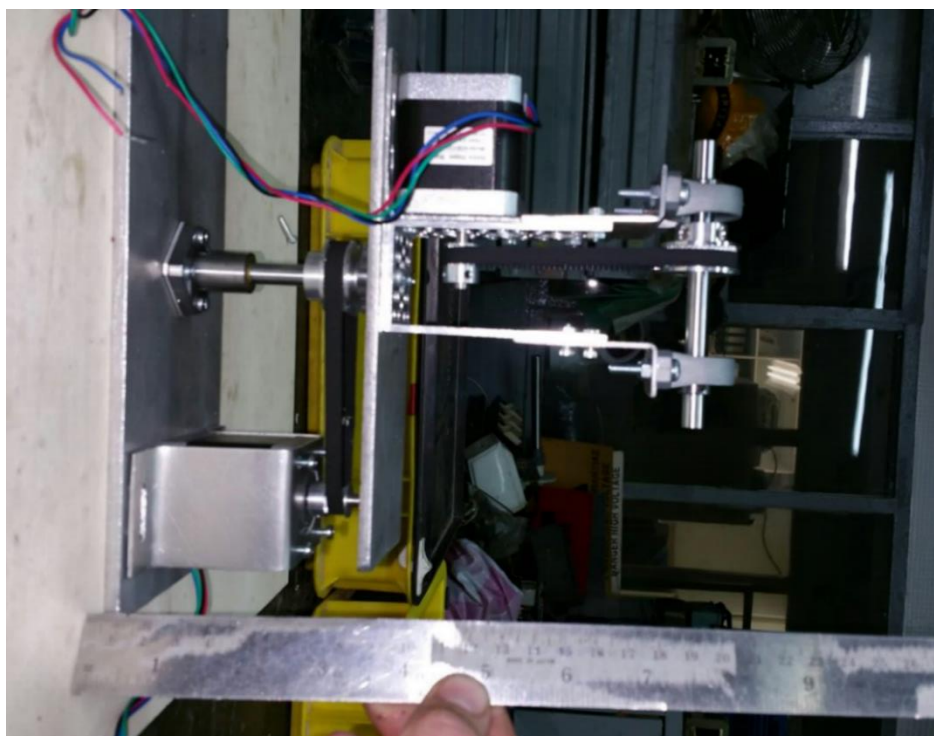
Ο βηματικός κινητήρας Αζιμούθιου τοποθετήθηκε απευθείας στη βάση (βάση στήριξης κινητήρα) έτσι ώστε ο άξονάς του να ευθυγραμμιστεί με τον κατακόρυφο άξονα. Για να ενεργοποιηθεί η περιστροφή στον δευτερεύοντα άξονα, ο βηματικός κινητήρας Ύψους τοποθετήθηκε στην ίδια βάση με τον πρώτο κινητήρα, έτσι ώστε δύο (2) κινητήρες να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτή η τοποθέτηση των κινητήρων συνέβαλε στη διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος, τη διατήρηση του ύψους μικρού μήκους (περίπου 16 cm) και



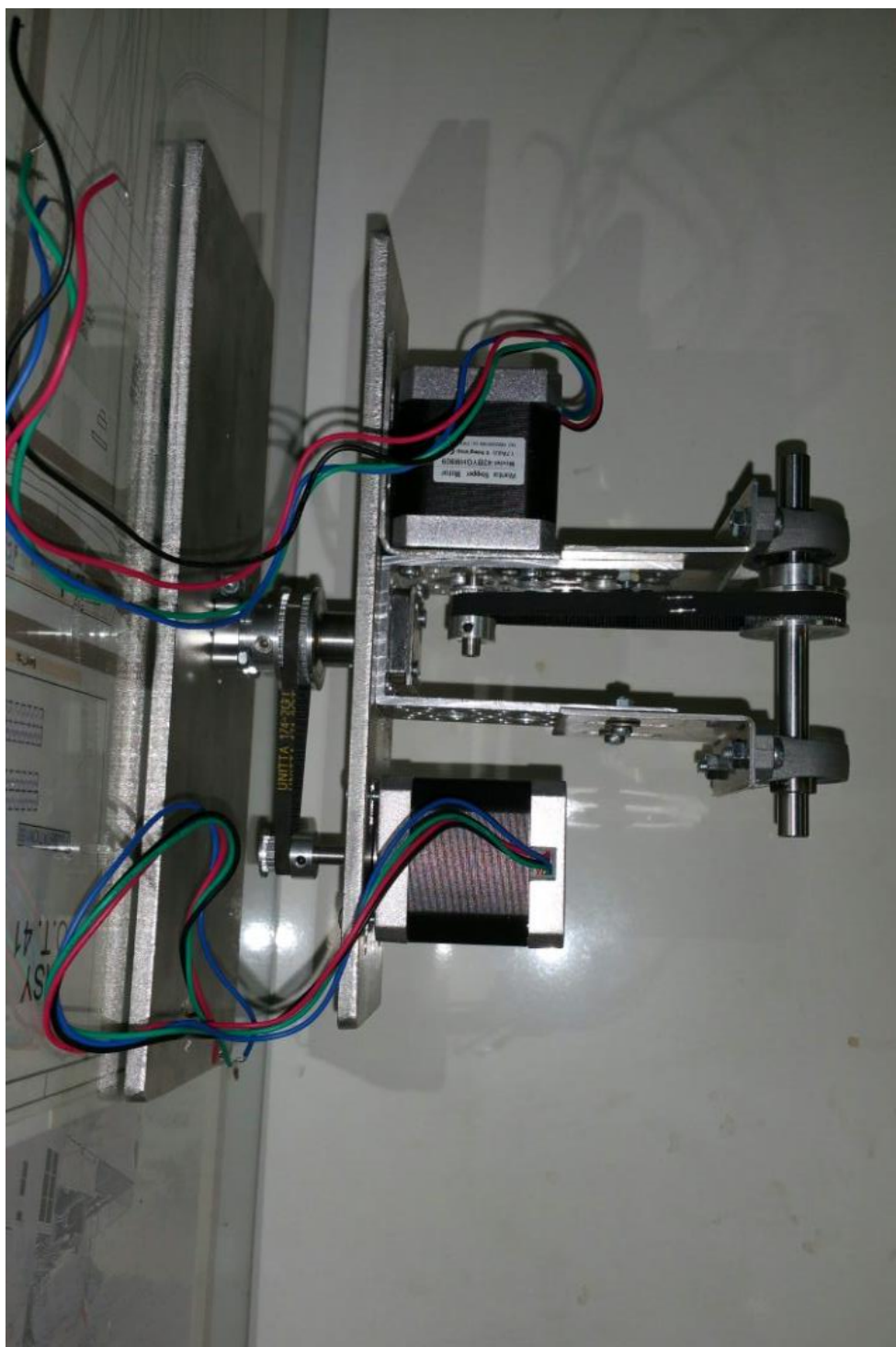
τη μείωση των ανεπιθύμητων κραδασμών που προκαλούνται από τη λειτουργία των κινητήρων. Η Εικόνα 73 παρουσιάζει μια αρχική κατασκευή της μονάδας ελέγχου η οποία απορρίφθηκε λόγω του αυξημένου ύψους κατά προσέγγιση 20 cm, της άνισης κατανομής βάρους και της δομικής ανισορροπίας, ενώ η Εικόνα 74 παρουσιάζει την τελική συναρμολογημένη μονάδα ελέγχου.

Πριν από την πραγματική συναρμολόγηση της μονάδας κινητήρα και της πλακέτας ελέγχου, οι λειτουργίες τους ελέγχθηκαν προσεκτικά, ώστε να διασφαλιστεί ότι όλες οι μονάδες λειτουργούσαν κανονικά κατά την τοποθέτηση και τη σύνδεση σύμφωνα με το σχεδιασμό. Με αυτή την ρύθμιση, κάθε μεμονωμένο στοιχείο μπορεί επίσης να αντικατασταθεί ή να αναβαθμιστεί εύκολα αν υπάρχει ανάγκη για κάτι τέτοιο. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά και οι τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της συσκευής μπορούν να ικανοποιήσουν σε κάποιο βαθμό τις απαιτήσεις σχεδιασμού παραγωγής. Τα υλικά, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και οι τεχνικές κατασκευής έγιναν λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και το χρόνο κατασκευής στο πλαίσιο του έργου. Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του πρωτότυπου συστήματος ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Απλό σύστημα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιεί μόνο δύο (2) κινητήρες που μπορούν να επιτύχουν υψηλές απαιτήσεις ροπής.
- Στερεό και άκαμπτο σύστημα πλατφόρμας συμμετρικής κινητικότητας με μειωμένους ανεπιθύμητους κραδασμούς, κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από μέταλλο και αλουμίνιο.
- Συμπαγής και μικρού μεγέθους κατασκευή με άμεσα προσβάσιμα τα εξαρτήματα που μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν ή να αναβαθμιστούν.



**Εικόνα 73:** Αρχική δοκιμαστική κατασκευή της μονάδας ελέγχου. Οι βηματικοί κινητήρες τοποθετήθηκαν σε δυο (2) ξεχωριστές βάσεις. Στην πάνω βάση, τοποθετήθηκε ο βηματικός κινητήρας ύψους, ενώ στην κάτω βάση ο βηματικός κινητήρας αζιμούθιου. Αυτή η διάταξη απορρίφθηκε λόγω του αυξημένου συνολικού ύψους και της μη ισορροπημένης κατανομής βάρους, που προκαλούσε δονήσεις κατά τη διάρκεια προκαταρκτικών δοκιμών.



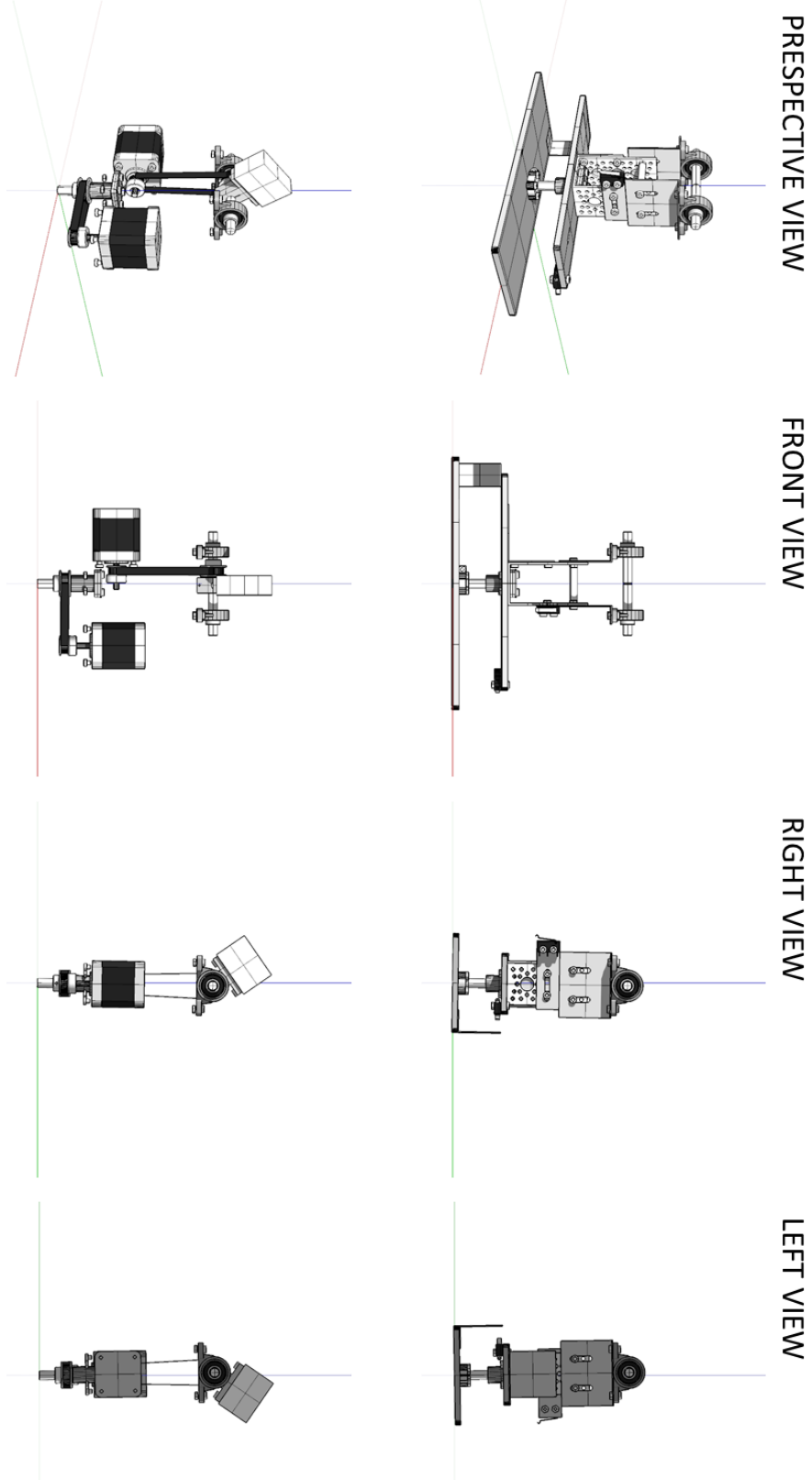
**Εικόνα 74:** Η τελική κινητή πλατφόρμα συμπεριλαμβανομένου και του μηχανισμού μετάδοσης της μονάδας ελέγχου. Οι δυο (2) βηματικοί κινητήρες είναι τοποθετημένοι στην ίδια βάση και είναι υπεύθυνοι για την οδήγηση της επιφάνειας (καθρέφτη) που ακολουθεί η ανακατευθύνει τις ηλιακές ακτίνες χρησιμοποιώντας έναν τύπο κίνησης με ιμάντες χρονισμού.

Η Εικόνα 75 δείχνει τα κύρια μηχανικά μέρη της μονάδας ελέγχου του συστήματος πρωτότυπου ΜΑΚv1, χωρισμένα σε δύο (2) βασικά στοιχεία, την πλατφόρμα κίνησης που κατασκευάστηκε για να φιλοξενήσει τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και τον καθρέφτη και το μηχανισμό μετάδοσης. Η πλατφόρμα κίνησης αποτελείται από δύο (2) βάσεις παράλληλα τοποθετημένες, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 76. Στο κάτω μέρος, η βάση θεμελίωσης κατασκευάστηκε από μία επίπεδη ορθογώνια πλάκα αλουμινίου, όπου τοποθετήθηκε ο άξονας Αζιμούθιου καθώς και τα υπόλοιπα εξαρτήματα της μηχανής. Στην κορυφή, η βάση τοποθέτησης των κινητήρων, κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό με τη βάση θεμελίωσης, στεγάζει τους δύο (2) βηματικούς κινητήρες που συνδέθηκαν σε σειρά, ένας (1) για κάθε άξονα περιστροφής αντίστοιχα.

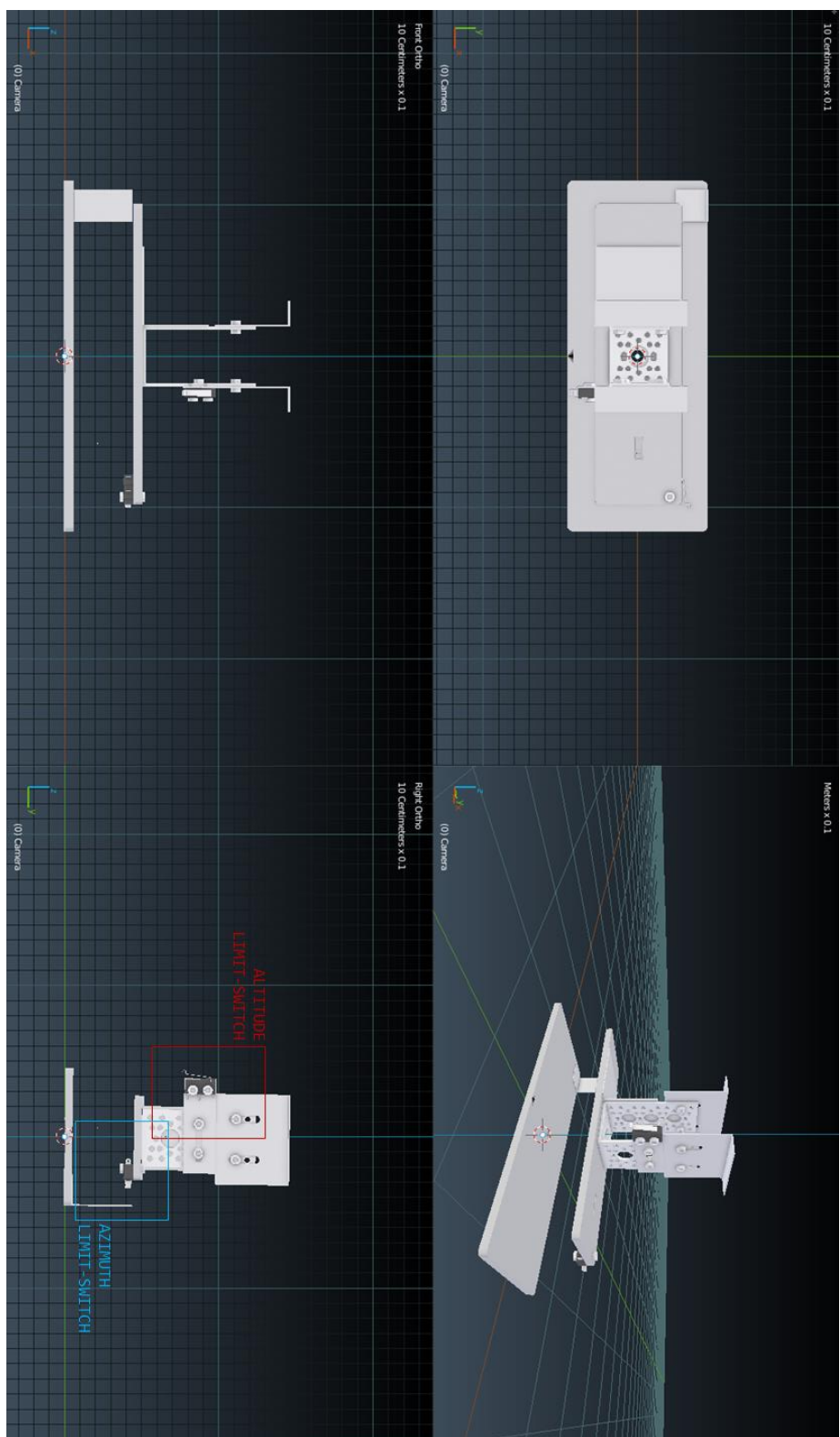
Οι βηματικοί κινητήρες προσανατολίστηκαν αναλόγως έτσι ώστε ο μηχανισμός μετάδοσης να δημιουργήσει ένα ανεστραμμένο σχήμα Τ που ταιριάζει με τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης Αζιμούθιου-Ύψους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 77. Η κίνηση αζιμούθιου αποτελείται από ένα βηματικό μοτέρ που οδηγεί έναν ιμάντα που περιβάλλει την πλατφόρμα Αζιμούθιου. Η ζώνη που χρησιμοποιείται είναι η οδοντωτή ζώνη από νεοπρένιο που είναι ενισχυμένη με πολυεστερικό ύφασμα η οποία πολύ θετικό και άκαμπτο έλεγχο του ηλιοστάτη. Μια οδοντωτή τροχαλία τοποθετημένη στον άξονα του κινητήρα της βηματικής κίνησης οδηγεί τον ιμάντα. Ο μηχανισμός Ανύψωσης χρησιμοποιεί τον ίδιο τύπο κινητήρα της βηματικής κίνησης, ιμάντα και μηχανισμό μετάδοσης κίνησης όπως περιγράφηκε παραπάνω για τη μονάδα Αζιμούθιου.

Στην πράξη, η διάταξη ανεστραμμένου σχήματος Τ των βηματικών κινητήρων επέτρεψε μέγιστη περιστροφή 135 μοίρων για τον άξονα ύψους (στην κατεύθυνση Ανατολής-Δύσης) και 175 μοιρών για άξονα αζιμουθίου (στην κατεύθυνση Βορρά-Νότου). Σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο ιχνηλάτησης του προγράμματος μικροελεγκτών, αυτή η ικανότητα περιστροφής θα μπορούσε να παρακολουθεί τον ήλιο στις περισσότερες πιθανές θέσεις κατά την ενεργή λειτουργία του συστήματος του πρωτότυπου ΜΑΚv1. Η ανακλαστική επιφάνεια τοποθετήθηκε στη βάση του κινητήρα μέσω ελαφρού διαύλου αλουμινίου.

Ο Πίνακας 25 παρουσιάζει όλα τα ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη της τελικής κατασκευής του συστήματος ηλιοστάτη (ΜΑΚv1).

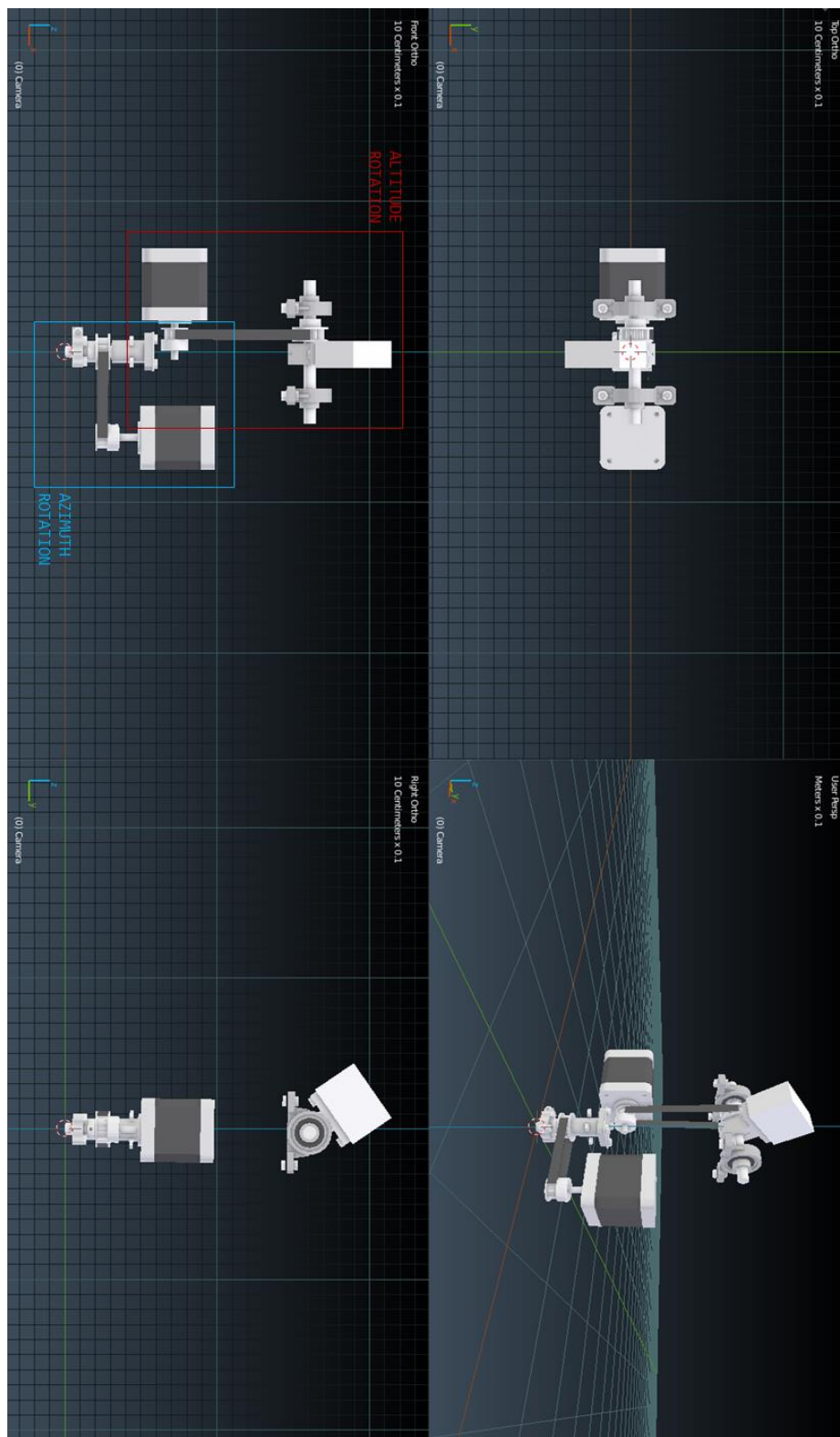


**Εικόνα 75:** Τρισδιάστατες (3D) απεικονίσεις της πλατφόρμας στην οποία είναι εγκατεστημένα τα διάφορα εξαρτήματα της πρωτότυπης συσκευής MAKV1 και ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης.



**Εικόνα 76:** 3D μοντέλο της κινητής πλατφόρμας, οι δυο (2) τερματικοί διακόπτες περιορισμού (ένας για κάθε περιστροφή) συνδέονται σε αυτήν και χρησιμοποιούνται για την επαναφορά της θέσης του μηχανήματος και την αποτροπή υπερβολικών μετακινήσεων.





**Εικόνα 77:** Μηχανισμός μετάδοσης της κίνησης του πρωτοτύπου MAKV1, για τη μέθοδο ηλιακής ιχνηλάτησης αζιμούθιου-ύψους. Η μετάδοση επιτυγχάνεται με τη χρήση δυο (2) βηματικών κινητήρων, εάν για κάθε άξονα περιστροφής, όπου οι άξονες συνδέονται με γρανάζια και ιμάντες χρονισμού, αντίστοιχα.





#### 4.2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΜΑΚv1 ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης του αναπτυγμένου συστήματος ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) διεξήχθη πειραματικός έλεγχος. Η δοκιμή της συσκευής πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Αρχιτεκτόνων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στο Βόλο (Γεωγραφικό πλάτος  $39.35^{\circ}$ , Γεωγραφικό μήκος  $22.93^{\circ}$ ) σε έναν τυπικό χώρο γραφείου με νοτιοδυτικό προσανατολισμό ( $\sim 246^{\circ}$  από το Βορρά). Οι δοκιμές έδειξαν ότι το σύστημα ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) μπορεί να παρακολουθεί με ακρίβεια τις κινήσεις του ήλιου με την πάροδο του χρόνου, χωρίς προβλήματα ευθυγράμμισης (ακρίβεια στόχευσης) με κάποια περιοχή της οροφής.

Οι δοκιμές λειτουργίας που αφορούν τον έλεγχο προβλημάτων υπερθέρμανσης, σταθεροποίησης στόχευσης πραγματοποιήθηκαν τον μήνα Ιούνιο, ενώ για την μέτρηση των τιμών φωτισμού πραγματοποιήθηκε μέτρηση μιας ημέρας στις 9 Ιουνίου από τις 15:00 – 17:00 (λόγω δυτικού προσανατολισμού του γραφείου) με ένα χρονικό διάστημα 15 λεπτών, κάτω από συνθήκες αίθριου ουρανού. Το πρωτότυπο σύστημα ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) υπέστη με επιτυχία κάποιες δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες και κακή συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένης μιας πτώσης από ύψος 2 m σε σκληρό σκυρόδεμα. Η επιβίωση από τα μεγάλα ύψη και η ένταση σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας (εξωτερικές θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους  $40^{\circ}\text{C}$ ) παραμένει να καθοριστεί με μελλοντικές προσπάθειες δοκιμών. Δεν παρατηρήθηκαν θερμικά προβλήματα οποιουδήποτε είδους κατά τη διάρκεια της περιόδου δοκιμών.

Οι εσωτερικές διαστάσεις του δωματίου ήταν  $W 3.5 \times L 5.6 \times H 3$  m, με WFR 10% (ποδιά παραθύρου 1 m και ύψος από το δάπεδο στα 2.5 m) με ανακλαστικότητα 20%, 50%, 80% για το δάπεδο, τους τοίχους και την οροφή αντίστοιχα. Το δωμάτιο ήταν εξοπλισμένο με εσωτερικές ελασματοποιημένες Βενετσιάνες περσίδες λευκού χρώματος και εξωτερικά ένα ράφι φωτισμού τοποθετημένο σε απόσταση 2 μέτρων από το έδαφος το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την στέγαση του πρωτότυπου συστήματος. Οι θέσεις των σημείων των αισθητήρων που λήφθηκαν μετρήσεις στο εσωτερικό του χώρου ήταν  $pt1(x, y, z) = (2.5, 1.5, 0.8)$  m και  $pt2(x, y, z) = (1.5, 4.5, 0.8)$  m. Εξετάστηκαν δύο (2) περιπτώσεις:

- α. Με το πρωτότυπο σύστημα ενεργοποιημένο, η οποία αναφέρεται ως SUNLIGHT CASE B (SS) και
- β. Χωρίς το πρότυπο σύστημα ενεργοποιημένο (απενεργοποιημένο), η οποία αναφέρεται ως LIGHTSHELF CASE (LS).

Στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την χρονική περίοδο, ενώ οι Εικόνες 77 και 78 παρουσιάζουν εξωτερικές όψεις με το σύστημα εγκατεστημένο και τα αποτελέσματα των δοκιμών. Το πρωτότυπο σύστημα χρησιμοποιεί βηματικούς κινητήρες και ενισχυμένες με πολυεστέρα οδοντωτές ζώνες από νεοπρένιο (ιμάντες χρονισμού) για να οδηγούν τον ηλιοστάτη. Οι δοκιμές υποδεικνύουν ότι το σύστημα παρέχει ακριβή και επαναλαμβανόμενη στόχευση στο σημείο-στόχο της οροφής. Ο ηλιοστάτης είχε εντολή από το λογισμικό ελέγχου να δείχνει στο στόχο, και το αρχικό σημείο ήταν 4.5 m από την πρόσοψη. Εντός της ακρίβειας που μπορούσε να μετρηθεί η θέση του ηλιακού ίχνους, δεν υπήρχε απόκλιση από το αρχικό σημείο. Σε αυτές τις δοκιμές, η δέσμη επέστρεψε στην ίδια θέση στο στόχο.

Η επίδραση της κίνησης ιχνηλάτησης από τους βηματικούς κινητήρες αναφορικά με το σχήμα του ηλιακού ίχνους και την θέση της δέσμης είναι ελάχιστη. Όταν ενεργοποιείται ένας βηματικός κινητήρας για να διατηρηθεί το σημείο στόχευσης του ηλιοστάτη σταθερό στον προκαθορισμένο στόχο, υπάρχει μια ταλάντωση της θέσης της δέσμης με αρχικό μέγεθος μικρότερο από  $\pm 1$  cm (μικρότερο από  $0.1^\circ$ ). Η ταλάντωση σταματάει μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα μέχρι το σημείο όπου δεν είναι ορατή η μετατόπιση. Δεν υπάρχει καμία ορατή αλλαγή στο σχήμα της δέσμης στο στόχο όταν εμφανίζεται ένας παλμός κινητήρα ιχνηλάτησης. Οι βηματικοί κινητήρες ενεργοποιούνται κανονικά σε διαστήματα περίπου 30 δευτερολέπτων.

Ο Πίνακας 26 συνοψίζει τα συνολικά αποτελέσματα από την επίδοση του πρωτότυπου συστήματος. Η μετρούμενη μέση ένταση φωτισμού για το σενάριο LIGHTSHELF CASE (LS) ήταν 227 lx και 178 lx για τα σημεία pt1 και pt2 αντίστοιχα. Ενώ η ένταση φωτισμού στα σημεία που μετρήθηκαν από τη λειτουργία των συστημάτων (SUNLIGHT CASE B (SS)) ήταν 240 lx και 256 lx αντίστοιχα. Οι τιμές της έντασης φωτισμού στα δύο σημεία παρουσίασαν αύξηση 13% και 78%.

**Πίνακας 26:** Δοκιμές μετρήσεων για το πρωτότυπο σύστημα ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη (ΜΑΚV1)  
για 09/06/2017 από 14:45 έως 17:00.

LIGHTSHELF (LS)	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	16:45	17:00
LS:pt1	162	180	200	216	220	243	250	254	270	279
LS:pt2	145	168	167	172	177	178	185	189	197	200
SUNLIGHT (SS)	14:45	15:00	15:15	15:30	15:45	16:00	16:15	16:30	16:45	17:00
SS:pt1	170	205	215	230	215	256	265	269	280	290
SS:pt2	240	252	250	260	258	260	262	260	256	262



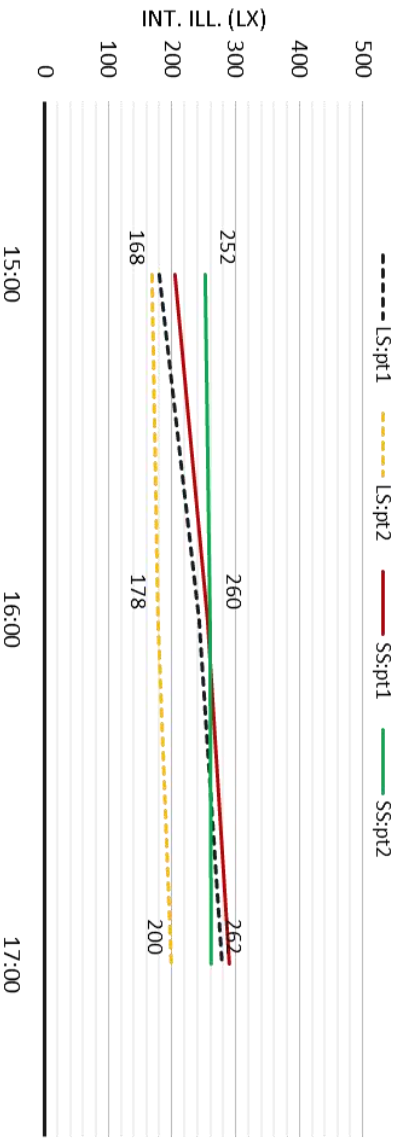
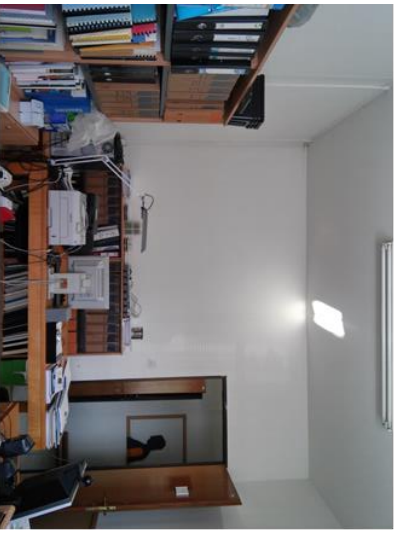
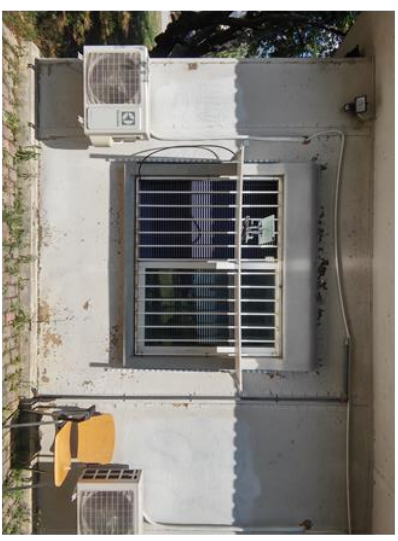
**Εικόνα 78:** Εξωτερικές φωτογραφίες της εγκατάστασης του πρωτοτύπου συστήματος ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη (ΜΑΚV1).

OFFICE ROOM W 3.5 m; L 5.6 m; H 3 m; LS 0.5 m; WFR 10%;  
 LIGHTSHELF CASE LS (single-unit, disabled)  
 SUNLIGHT CASE B SS (single-unit, enabled)

INTERIOR VENETIAN BLINDS; OVERHANG L 0.5 m  
 VOLOS, GREECE (Lat 39.35°; Lon 22.93°)  
 SOUTH-WEST ORIENTATION (~246 DEG FROM NORTH)

DATE: 9/6/17

SENSOR LOCATION POINTS: Pt1 (x, y, z)=(2.5 m, 1.5 m, 0.8 m) & Pt2 (x, y, z)=(1.5 m, 4.5 m, 0.8 m)



**Εικόνα 79:** Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των επίπεδων Φ.Φ. Των δυο (2) περιπτώσεων που εξετάστηκαν.

### 4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προσπάθειες μεταφοράς φ.φ. σε χώρους χωρίς παράθυρα και απομακρυσμένους χώρους μέσα στα κτίρια οδήγησαν στην ανάπτυξη συστημάτων καθοδήγησης/μεταφοράς φ.φ., τα οποία έγιναν ένας από τους σημαντικότερους τομείς της καινοτομίας τα τελευταία χρόνια. Η επιθυμία δημιουργίας κτιρίων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης με καλή διείσδυση του φ.φ. στο εσωτερικό των χώρων κάνει την μεταφορά φ.φ. ελκυστική για τους σχεδιαστές φωτισμού και τους αρχιτέκτονες. Δεδομένου ότι η καθοδήγηση φ.φ. υπόκειται στην εξωτερική διαθεσιμότητα φωτισμού, η ύπαρξη ενός τεχνητού συστήματος ηλεκτρικού φωτισμού παραμένει απαραίτητη. Έτσι, η σύνδεση μεταξύ των συστημάτων μεταφοράς/καθοδήγησης φ.φ. με τα ηλεκτρικά συστήματα φωτισμού προκύπτει ως απαραίτητη προϋπόθεση για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων.

Οι υποστηρικτές των συστημάτων καθοδήγησης/μεταφοράς φ.φ. προωθούν δύο (2) βασικά επιχειρήματα για τη χρήση τους:

- α. Πρώτον, παρέχουν φ.φ. βαθιά στους εσωτερικούς χώρους, όπου οι συμβατικές σχεδιαστικές πρακτικές είναι ανεπαρκείς.
- β. Δεύτερον, με αυτόν τον τρόπο η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα φωτισμού μπορεί περαιτέρω να μειωθεί από την αντικατάσταση της λειτουργίας του από τον φ.φ.

Η έρευνα που έχει διεξαχθεί μέχρι σήμερα αποδεικνύει ότι οι ηλιοστάτες μπορούν να μεταφέρουν αποδοτικά το φυσικό φως υπό ευνοϊκές συνθήκες ουρανού (αίθριες συνθήκες), παρέχοντας ικανοποιητικά επίπεδα φ.φ. στον εσωτερικό χώρο ικανά να δημιουργήσουν έναν καλά φυσικά φωτισμένο χώρο. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί διάφορα υβριδικά συστήματα φυσικού φωτισμού, δεν έχουν δημοσιευθεί μελέτες που να παρουσιάζουν την απόδοση τους μετά την εγκατάσταση. Επίσης, υπάρχουν ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους σχεδιασμού ή τα κριτήρια ή τις επιδόσεις των συστημάτων που χρησιμοποιούνται. Σε αυτό το κεφάλαιο ερευνήθηκαν πολυάριθμα ηλιοστατικά συστήματα και εφαρμογές για τον φυσικό φωτισμό των εσωτερικών χώρων.

Τα επίπεδα φ.φ. που παρέχονται εξαρτώνται από τον τύπο του συστήματος, τον τρόπο χρήσης του και την ηλιακή διαθεσιμότητα. Χρησιμοποιώντας το άμεσο ηλιακό φως ως κύρια πηγή τα ηλιοστατικά συστήματα, υπό ευνοϊκές συνθήκες, μπορούν να παράσχουν επαρκή φωτισμό. Το κύριο μειονέκτημα, ωστόσο, είναι ότι αυτός ο τύπος λειτουργεί μόνο αποτελεσματικά κάτω από αίθριο ουρανό και αποδίδει πολύ λιγότερο κάτω από τις συννεφιασμένες ή εν μέρει συννεφιασμένες συνθήκες. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για τη χρήση αυτών των συσκευών σε εύκρατα γεωγραφικά πλάτη. Επίσης, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι τα συστήματα καθοδήγησης/μεταφοράς φ.φ. μπορούν να επηρεάσουν την εσωτερική αρχιτεκτονική και να έχουν επιπτώσεις στα υπόλοιπα συστήματα των κτιρίων, καθώς απαιτούν οδεύσεις χωρίς εμπόδια για την οδήγηση του φωτός.

Ο στόχος της διδακτορικής διατριβής ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρωτοτύπου μικρής κλίμακας ηλιοστάτη. Το αποτέλεσμα ήταν ο πλήρης σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος, με λειτουργικότητα που πληρούσε τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Αποτελεί μία χρήσιμη αναφορά για εκείνους που ξεκινούν τον σχεδιασμό και ανάπτυξη παρόμοιων συστημάτων. Οι γνώσεις και οι πληροφορίες από αυτό το έργο μπορούν επίσης να αποτελέσουν την αφετηρία για τη μελλοντική ανάπτυξη σε διάφορες εφαρμογές. Το τελικό προϊόν ήταν σε θέση να εκτελέσει τις βασικές λειτουργίες ενός ηλιοστατικού συστήματος:

- Την ιχνηλάτηση του ήλιου με ακρίβεια και ανακατεύθυνση του.
- Την χρησιμοποίηση μια σχετικά απλής και μικρής κατασκευής.
- Την παροχή πρακτικής γνώσης των ηλιοστατικών συστημάτων σε σχέση με το θεωρητικό υπόβαθρο.

Στο πλαίσιο της δοκιμής λειτουργικότητας, η συσκευή ήταν σε θέση να ιχνηλατήσει και να την κίνηση του ήλιου και να ανακατευθύνει το ηλιακό φως σε έναν καθορισμένο στόχο. Η πρωτότυπη συσκευή έκανε ορθή χρήση των βηματικών μοτέρ, πράγμα που επέτρεψε ένα ευρύ φάσμα περιστροφής για τον καθρέφτη όπως αναμενόταν. Επιπλέον, οι πειραματικές μετρήσεις της συσκευής απέδειξαν την αξιοσημείωτη βελτίωση του εσωτερικού χώρου από πλευράς φ.φ. σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Συνολικά, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αυτά τα αποτελέσματα έχουν εκπληρώσει τους αρχικούς στόχους του

έργου και ότι η λειτουργικότητα της συσκευής ικανοποίησε τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Ο ηλιακός ιχνηλάτης, ωστόσο, δεν είναι μια τέλεια συσκευή χωρίς μειονεκτήματα και περιορισμούς. Η διαδικασία δοκιμής για τη συσκευή και όλα τα συλλεγμένα αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν σε μια ηλιόλουστη μέρα την θερινή περίοδο. Δεν είναι ακόμα σαφές πόσο καλά συμπεριφέρονται οι λειτουργίες του συστήματος σε δύσκολες ή ασταθείς συνθήκες. Ως εργαστηριακό πρωτότυπο, αυτό το σύστημα χρειάζεται πιο εκτεταμένες δοκιμές και εξετάσεις, έτσι ώστε ο αλγόριθμος, η κατασκευή και κατά επέκταση η λειτουργία του να μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω για πρακτική χρήση.

Για μία πλήρη εικόνα της απόδοσης του ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις για όλη την διάρκεια του έτους. Από άλλες υλοποιήσεις αντίστοιχων διατάξεων παρακολούθησης του ήλιου προκύπτει σημαντικότερη αύξηση της παραγόμενης ενέργειας της ημέρες με ηλιοφάνεια των χειμερινών μηνών. Έχοντας δεδομένα για ένα ολόκληρο έτος, μπορούμε να έχουμε ολοκληρωμένη άποψη για την απόδοση της διάταξης και κατ' επέκταση να κάνουμε μία ακριβή μελέτη για αναφορικά με την απόδοση που επιφέρει η χρήση του ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη.

Γενικά, το έργο ήταν μια επιτυχημένη προσπάθεια έρευνας και εφαρμογής της γνώσης της τρέχουσας τεχνολογίας για τη δημιουργία ενός εργαστηριακού πρωτοτύπου ηλιοστατικού συστήματος. Για μελλοντική εξέλιξη, ο σχεδιασμός του συστήματος σε αυτό το έργο μπορεί να είναι χρήσιμος και να αποτελέσει ένα οδηγό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, είτε εξελίσσοντας περαιτέρω την συσκευή (αναβαθμισμένες εκδόσεις) ή κατασκευάζοντας σχεδιαστικές παραλλαγές του για χρήση σε διαφορετικές εφαρμογές.

#### 4.4 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Kontadakis, A.; Tsangrassoulis, A.; Roetzel, A. Defining the Boundaries of Daylight Penetration. The use of dynamic and static daylight methods to predict the daylight zone within sidelit spaces, a comparison. In Proceedings of the BalkanLight 2015, the 6th Balkan Conference on Lighting, Athens, Greece, 16-19 September 2015.
2. Reinhart, C. F. A Simulation Based Review on the Ubiquitous Window Head Height to Daylit Zone Depth Rule of Thumb. In Proceedings of the 9th International IBPSA Conference, Montréal, QC, Canada, 15-18 August 2005.
3. Kischkoweit-Lopin, M. An overview of daylighting systems. *Solar Energy*, 2002, 73(2), pp. 77-82.
4. Mirkovich, D. N. Assessment of beam lighting systems for interior core illumination in multy-story commercial buildings. *ASHRAE Transactions: Symposia*, 1993, 99, pp. 117-129.
5. Littlefair, P. Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods. *Lighting Research Technology*, 1990, 22, pp. 1-17.
6. Sweitzer, G. Three advanced daylighting technologies for offices. *Energy (Oxford)*, 1993, 18, pp. 107-114.
7. Linhart, F.; Scartezzini, J. L. Minimizing lighting power density in office rooms equipped with anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 2010, 84, pp. 587-595.
8. Molteni, S.; Courret, G.; Paule, B.; Michel, L.; and Scartezzini, J. L. Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 2000, 69, pp. 117-129.
9. Welford, W. T.; Wilson, R. *Non Imaging Optics*. New York: Academic Press, 1989.
10. Courret, G.; Scartezzini, J. L.; and Francioli, D. Design and assessment of an anidolic light-duct. *Energy and Building*, 1998, 28, pp. 79-99.
11. Close, J. Optimising daylighting in high-rise commercial developments in SE Asia and the use of computer programmes as a design tool. *Renewable Energy*, 1996, 8(1-4), pp. 206-209.



12. Ayers, M. J.; and Carter, D. J. Remote Source Electric Lighting Systems: A Review. *Lighting Research and Technology*, 1995, 27, pp. 1-15.
13. Darula, S.; Kittler, R.; Kocifaj, M. Luminous effectiveness of tubular light-guides in tropics. *Applied Energy*, 2010, 87, pp. 3460-3466.
14. Carter, D. J. The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems. *Lighting Research and Technology*, 2002, 34, pp. 39-52.
15. Carter, D. J. Developments in tubular daylight guidance systems. *Building Research and Information*, 2004; 32, pp. 220-234.
16. Shao, L.; Riffat, S. B.; Hicks, W.; Yohannes, I. Study of performance of light pipes under cloudy and sunny conditions in the UK. *Right Light*, 1997, 4, pp. 155-159.
17. Zhang, X.; Muneer, T.; and Kubie, J. A design guide for performance assessment of solar light-pipes. *Lighting Research and Technology*, 2002, 34, pp. 149-168.
18. Edmonds I. Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and Indoor daylight enhancement systems hexagonal cross section. *Solar Energy*, 2010, 84, pp. 928-938.
19. Vasilakopoulou, K.; Kolokotsa, D.; Santamouris, M.; Kousis, I.; Asproulis, H.; Giannarakis, I. Analysis of the experimental performance of light pipes. *Energy and Buildings*, 2017, 151, pp. 242-249.
20. Ikuzwe, A.; Sebitosi, A. B. A novel design of a daylighting system for a classroom in rural South Africa. *Solar Energy*, 2015, 114, pp. 349-355.
21. Malet-Damour, B.; Boyer, H.; Fakra, A. H.; Bojic, M. Light pipes performance prediction: inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides, *Energy Procedia*, 2014, 57, pp. 1977-1986.
22. Peña-García, A.; Gil-Martínc, L. M.; Hernández-Montes, E. Use of sunlight in road tunnels: An approach to the improvement of light-pipes' efficacy through heliostats. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60, pp. 135-140.
23. Garcia-Hansen, V.; and Edmonds, I. Methods for the illumination of multilevel buildings with vertical light pipes. *Solar Energy*, 2015, 117, pp. 74-88.
24. Kennedy, D. M.; O'Rourke, F. Experimental analysis of a scaled, multi-aperture, light-pipe, daylighting system. *Solar Energy*, 2015, 122, pp. 181-190.

25. Baroncini, C.; Boccia, O.; Chella, F.; Zazzini, P. Experimental analysis on a 1:2 scale model of the double light pipe, an innovative technological device for daylight transmission. *Solar Energy*, 2010, 84(2), pp. 296-307.
26. Mayhoub, M. S. Innovative daylighting systems' challenges: a critical study. *Energy and Buildings*, 2014, 80, pp. 394-405.
27. Feuermann, D.; Gordon, J. M.; Huleihil, M. Solar fiber-optic mini-dish concentrators: First experimental results and field experience. *Solar Energy*, 2002, 72, pp. 459-472.
28. Ngoc-Hai V.; Shin, S. Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators. *Solar Energy*, 2016, 136, pp. 145-152.
29. Kim, Y.; Jeong, H. J.; Kim, W.; Chun, W.; and Lim, S. H. A comparative performance analysis on daylighting for two different types of solar concentrators: Dish vs. Fresnel lens. *Energy*, 2017, 137, pp. 449-456.
30. Kandilli, C.; Ulgen, K. Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2009, 13, pp. 67-84.
31. Song, J.; Jin, Z.; Zhu, Y.; Zhou, Z.; and Yang, Y. Development of a fiber daylighting system based on the parallel mechanism and direct focus detection. *Solar Energy*, 2015, 115, pp. 484-493.
32. Schlegel, G.; Burkholder, F.; Klein, S.; Beckman, W.; Wood, B.; and Muhs, J. Analysis of a full spectrum hybrid lighting system. *Sol Energy*, 2004, 76(4), pp. 359-368.
33. Sapia, C. Daylighting in buildings: developments of sunlight addressing by optical fiber. *Sol Energy*, 2013, 89, pp. 113-121.
34. Tsangrassoulis, A.; Doulos, L.; Santamouris, M.; Fontoynt, M.; Maamari, F.; Wilson, M.; Jacobs, A.; Solomon, J.; Zimmerman, A.; Pohl, W.; Mihalakakou, G. On the energy efficiency of a prototype hybrid daylighting system. *Solar Energy*, 2005, 79(1), pp. 56-64.
35. PARANS System: SP4 Sunlight Collector. <https://www.parans.com/>.
36. Himawari Solar Lighting System. [https://www.himawari-net.co.jp/e\\_page-index01.html](https://www.himawari-net.co.jp/e_page-index01.html).
37. Heliostat-Wikipedia. Available online: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heliostat>
38. Silbermann, J. T. Rapport fait à l'Académie Royale des Sciences sur un nouvel heliostat. *Annales de Chimie et de Physique*, 1844, 10, pp. 298-306.

39. Science & Society Picture Library. Archived 2011-06-06 at the Wayback Machine. Advertisement for Chappuis' patent reflectors, c 1851-1870. [www.scienceandsociety.co.uk](http://www.scienceandsociety.co.uk).
40. Zhang, H. L.; Baeyens, J.; Degrève, J.; Cacères, G. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22, pp. 466-481.
41. SolarReserve Crescent Dunes Solar Energy Plant. <https://www.solarreserve.com/en/global-projects/csp/crescent-dunes>.
42. González-Roubaud, E.; Pérez-Osorio, D.; and Prieto, C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80, pp. 133-148.
43. Visa, I.; and Duta, A. Innovative Solutions for Solar Thermal Systems Implemented in Buildings. *Energy Procedia*, 2016, 85, pp. 594-602.
44. Indora, S.; and Kandpal, T. C. Institutional cooking with solar energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 84, pp. 131-154.
45. Kumar, A.; Prakash, O.; and Kaviti, A. K. A comprehensive review of Scheffler solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77, pp. 890-898.
46. Dumiak, M. Simple and bright, heliostats tap sunlight for lighting outdoor and, increasingly, indoor spaces. *Architectural Record*, 2007, 195(5), pp. 251. <http://archrecord.construction.com/tech/techbriefs/0705dignews-1.asp>.
47. Stagno, A.; and Straeten, A. 0-24 Licht -A project between Art and Research, 2006. <http://www.andreavanderstraeten.net/index.php/architecture/0-24-licht/>.
48. Torres-Roldan, M.; Lopez-Luque, R.; and Varo-Martínez, M. Design of an innovative and simplified polar heliostat for integration in buildings and urban environments, *Solar Energy*, 2015, 119, pp. 159-168.
49. Oh, S. J.; Dutton, S.; Selkowitz, S.; and Han, H. J. Application of a coelostat daylighting system for energy savings and enhancement of indoor illumination: A case study under clear-sky conditions. *Energy and Buildings*, 2017, 156, pp. 173-186.
50. Pohl, W.; Anselm, C. Report of EC-funded Joule-Craft research project: development of an economic and energy saving heliostat technology for room illumination,

- publishable final report, contract no. JOR3-CT98-7042. Aldrans: Bartenbach LichtLabor GmbH; 2001.
51. Rosemann, A.; and Kaase, H. Lightpipe applications for daylighting systems. *Solar Energy*, 2005, 78(6), pp. 772-780.
  52. Kim, J. T.; Kim, G. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment*, 2010, 45(2), pp. 256-269.
  53. Chong, K. K.; Onubogu, N. O.; Yew, T. K.; Wong, C. W.; and Tan, W. C. Design and construction of active daylighting system using two-stage non-imaging solar concentrator. *Applied Energy*, 2017, 207, pp. 45-60.
  54. Song, J.; Luo, G.; Li, L.; Tong, K.; Yang, Y.; and Zhao, J. Application of heliostat in interior sunlight illumination for large buildings. *Renewable Energy*, 2018, 121, pp. 19-27.
  55. EGIS. <http://egis.org/index.html>.
  56. Bomin Solar. [www.bomin-solar.de](http://www.bomin-solar.de).
  57. SOLENICA. <https://solenica.com/>.
  58. LightManufacturing. <https://lm.solar/>.
  59. TAISEI. <http://www.taisei.co.jp/english/>.
  60. Widoka Inc. <http://wikoda.com/>.
  61. Heliostat.nl. <http://www.heliostaat.nl/index.html>.
  62. Practical Solar. <http://www.practicalsolar.com/index.html>.
  63. HelioTrack. <https://www.heliotrack.com/>
  64. Gerst, L. <https://www.heliostat.us/>.
  65. Miller, G. <https://www.cerebralmeltdown.com/>.
  66. Stine, W. B.; and Harrigan, R. W. The sun's position. In: *Solar Energy Fundamentals and Design: With Computer Applications*, pp. 38-69. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-88718-8, New York, 1985.
  67. Chaves, J. *Introduction to Nonimaging Optics*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
  68. Winston, R.; Minano, J.; Benitez, P. *Nonimaging Optics*, 1st Edition. Academic Press 2005. eBook ISBN: 9780080479736.
  69. Trimble SketchUp. Available: <https://www.sketchup.com/>, 2018.

70. Mullen, T. Mastering Blender. John Wiley & Sons, ISBN 9781118330562, 2012.  
Software available at: <https://www.blender.org/>.
71. Arduino Uno Rev3. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, 2018.
72. Arduino. Available: <https://www.arduino.cc/>, 2018.
73. Mar, R. W.; and Swearingen, J. C. Materials Issues in Solar Thermal Energy Systems. *Solar Energy Materials*, 1981, 5, pp. 37-53.
74. Alpert, D. J.; Mancini, T. R.; Houscr, R. M.; Grossman, J. W.; Schissel, P.; Carasso M.; Jorgensen, G.; and Scheve, M. Solar concentrator development in the United States. *Solar Energy Materials*, 1991, 24, pp. 307-319.
75. Starodubtsev, S. V.; Umarov, G. Ya; and Kordub, N. V. A 2.7 Meter Diameter Vacuum Film Solar Concentrator. *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)* 1965, 1(1), pp. 16.
76. Jorgensen, G.; Williams, T.; Wendelin, T. Advanced reflector materials for solar concentrators. Proceedings in: The 7th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies, Moscow, Russia, September 26-30, 1994.
77. Blanco-Muriel, M.; Alarcon-Padilla, D.; and Lopez, T. Computing the solar vector. *Solar Energy*, 2001, 70(5), pp. 431-441.
78. Spencer, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 1971, 2, pp. 172-173.
79. Pitman, C. L.; and Vant-Hull, L. L. Errors in locating the sun and their effect on solar intensity predictions. In Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, Denver, August 1978, pp. 701-706.
80. Walraven, R. Calculating the position of the sun. *Solar Energy*, 1978, 20, pp. 393-397.
81. Michalsky, J. J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position. *Solar Energy*, 1988, 40(3), pp. 227-235.
82. Reda, I.; and Andreas, A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *Solar Energy*, 2008, 76(5), pp. 577-589.
83. Meeus, J. *Astronomical Algorithms*. Astronomical Algorithms, Willmann-Bell, Inc., Virginia, 1991.
84. Grena, R. An Algorithm for the Computation of the Solar Position. *Solar Energy*, 2008, 82, pp. 462-470.

85. Grena, R. Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110. *Solar Energy*, 2012, 86, pp. 1323-1337.
86. Clifford M. J.; and Eastwood, D. Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy*, 2004, 77, pp. 269-280.
87. Lee, C. Y.; Chou, P. C.; Chiang, C. M.; and Lin, C. F. Sun tracking systems: A review. *Sensors*, 2009, 9, pp. 3875-3890.
88. Poulek V. Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. In *Proceedings of the 24th IEEE photovoltaic specialists conference*, 1994, 1, pp. 1131-1133.
89. Mwithiga, G.; Kigo, S. N. Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. *Journal of Food Engineering*, 2006, 74(2), pp. 247-252.
90. Abdulrahim, A. T.; Diso, I. S.; and Oumarou, M. B. Development of a solar tracking bifocal collectors. *Continental Journal of Renewable Energy*, 2011. 2, pp. 19-33.
91. Mousazadeh, H.; Keyhani, A.; Javadi, A.; Mobli, H.; Abrinia, K.; Sharifi, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8), pp. 1800-1818.
92. Baheti, R. S.; and Scott, P. F. Design of self-calibrating controllers for heliostats in a solar power plant. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, AC-25(6), pp. 1091-1097.
93. Chen, Y. T.; Chong, K. K.; Bligh, T. P.; Chen, L. C.; Yunus, J.; Kannan, K. S.; Lim, B. H.; Lim, C. S.; Alias, M. A.; Bidin, N.; Aliman, O.; Salehan, S.; Shk. Abd. Rezan, S. A. H.; Tam, C. M.; and Tan, K. K. Non-imaging, focusing heliostat. *Solar Energy*, 2001, 71, pp. 155-163.
94. Chen, Y. T.; Chong, K. K.; Lim, C. S.; Lim, B. H.; Tan, K. K.; Aliman, O.; Bligh, T. P.; Tan, B. K.; Bligh, T. P.; and Ismail, G. Report of the first prototype of non-imaging focusing heliostat and its application in high temperature solar furnace. *Solar Energy*, 2002, 72(6), pp. 531-544.
95. Roos, T.; Zwane, N.; Kruger, E.; Perumal, S.; and Cathro, R. A 25 m<sup>2</sup> target-aligned heliostat with closed-loop control. *Proceedings of ISES World Congress 2007, Vol. I-V, Solar Energy and Human Settlement*, pp.1773-1781.

96. Ries, H.; and Schubnell, M. The optics of a two-stage solar furnace. *Solar Energy Materials*, 1990, 21, pp. 213-217.
97. Chen, Y. T.; Kribus, A.; Lim, B. H.; Lim, C. S.; Chong, K. K.; Karni, J.; Buck, R.; Pfahl, A.; and Bligh, T. P. Comparison of two sun tracking methods in the application of a heliostat field. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2004, 126, pp. 638-644.
98. Quero, J. M.; Aracil, C.; Franquelo, L. G.; Ricart, J.; Ortega, P. R.; Dominguez, M.; Castaner, L. M.; and Osuna, R. Tracking control system using an incident radiation angle microsensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2), pp. 1207-1216.
99. Quero Reboul, J. M.; Ortega, J. G.; and Franquelo, L. G. Sensor electronico para la medida de la posicion angular de un objeto luminiscente. Spanish Patent P9901385, 1999.
100. Brey, J. J.; Quero, J. M.; Franquelo, L. G.; Dominguez, M.; and Castaner, L. Light source tracking microsensor for solar power plants. *MST News*, 2002, 3, pp. 45-46.
101. Yogev, A.; and Krupkin, V. Control of a heliostat field in a solar energy plant. U.S. Patent 5862799, 1999.
102. Kribus, A.; Vishnevetsky, I.; Yogev, A.; and Rubinov, T. Closed loop control of heliostats. *Energy*, 2004, 29, pp. 905-913.
103. Lovegrove, K.; and Stein, W. *Concentrating Solar Power Technology -Principles, Developments and Applications*, 1st Edition. Woodhead Publishing , 2012. eBook ISBN: 9780857096173.
104. Microchip. Available:  
<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5    ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανακεφαλαίωση με βάση τα ευρήματα και τα δεδομένα που αποκτήθηκαν σε όλη τη διάρκεια αυτής της διδακτορικής διατριβής. Αυτή η διατριβή επικεντρώθηκε σε καινοτόμα συστήματα φυσικού φωτισμού και τεχνικές μεταφοράς του σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από τις περιμετρικές ζώνες που κυρίως χρησιμοποιούν συστήματα τεχνητού φωτισμού για την κάλυψη των αναγκών τους δίνοντας έμφαση στις ηλιοστατικές εφαρμογές. Χρησιμοποιώντας την έρευνα που βρέθηκε στη βιβλιογραφία αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε ένα νέο πρωτότυπο σύστημα αυτόματου ηλιοστάτη διπλού-άξονα.



## 5.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού στοχεύει στην επίτευξη οπτικής άνεσης μέσα στα κτίρια και στην εξοικονόμηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και στη γενικότερη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης μέσα στους χώρους, συνδυάζοντας φως, θέα, δυνατότητα αερισμού, αξιοποίηση και ρύθμιση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας.

Ιδιαίτερη σημασία κατά την αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού έχει η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη των απαιτήσεων σε φωτισμό από το φυσικό φως, ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και την εργασία που επιτελείται μέσα στους χώρους. Με την πάροδο των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, δείκτες απόδοσης και εργαλεία για την αξιολόγηση της χρήσης φ.φ. και των επιπτώσεών της. Αυτά μπορούν να συνοψιστούν ως πρόωρες μέθοδοι εκτίμησης της έκτασης της διείσδυσης του φ.φ. στους εσωτερικούς χώρους και των σημερινών πρακτικών που υιοθετούνται με τη μορφή γενικών κωδίκων, κατευθυντήριων γραμμών και νέων εξελίξεων που βασίζονται σε δυναμικές διαδικασίες (προσομοιώσεις κτιρίων) με χρήση κριτηρίων φ.φ.

Η ζώνη φ.φ. ή περιμετρική ζώνη σε ένα κτίριο αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία τα επίπεδα φ.φ. ή τα άλλα κριτήρια φωτισμού πληρούνται συνήθως από το φως της ημέρας μόνο. Ο φυσικός φωτισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φιλοξενήσει διάφορους σχεδιαστικούς στόχους, όπως η εντύπωση ενός καλά φωτισμένου περιβάλλοντος, την επίτευξη στόχων φωτισμού του χώρου (απαιτούμενα επίπεδα), μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας από τον τεχνητό φωτισμό, την προώθηση της ευεξίας των χρηστών και την παραγωγικότητα. Ανάλογα με τα κριτήρια που έχουν διαμορφωθεί για τη διευκόλυνση διαφόρων σχεδιαστικών στόχων, όπως ο φ.φ., η περιμετρική ζώνη μπορεί να μεταρρυθμιστεί και να αναμορφωθεί.

Σε αυτή τη διδακτορική διατριβή παρουσιάστηκε μια βιβλιογραφική έρευνα αναφορικά με την ζώνη φ.φ. στους εσωτερικούς χώρους. Μια σειρά από προσομοιώσεις φ.φ. που διεξήχθησαν προσπάθησαν να προσδιορίσουν ποσοτικά την επίδραση του φ.φ. και κατά επέκταση την περιμετρική ζώνη. Για να εκτιμηθούν τα όρια της διείσδυσης του φ.φ. που υποδεικνύεται στη βιβλιογραφία για χώρους με κατακόρυφα ανοίγματα, διερευνήθηκε ένας

χώρος γραφείων αναφοράς με πλάτος  $w = 3.4$  m και ύψος  $h = 2.7$  m. Η απόδοση κάθε διαμόρφωσης αξιολογήθηκε με βάση τον υπολογισμό της έκτασης της περιοχής φ.φ. για στατικές και δυναμικές μεθόδους. Οι προτεινόμενες διαμορφώσεις εξετάστηκαν για τέσσερις (4) αναλογίες παραθύρων/τοιχίου, WWR 20%, 40%, 60%, & 80%, αντίστοιχα για Νότιο και Βόρειο προσανατολισμό.

Συγκρίνοντας τις δύο (2) μεθόδους υπολογισμού (στατικές και δυναμικές) της ζώνης φ.φ., αν και φαίνεται να εμπίπτουν στα ίδια όρια, υπάρχουν κάποιες διαφορές. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα του φ.φ., τις κλιματικές συνθήκες, καθώς επίσης και τις διαστάσεις των δωματίων, την επιφάνεια των παραθύρων και τις φυσικές ιδιότητες, οι δυναμικές διαδικασίες, καταφέρνουν να δώσουν μια πιο συγκεκριμένη εκτίμηση για έναν συγκεκριμένο χώρο σε μια συγκεκριμένη θέση, σε αντίθεση με τις στατικές μεθόδους που είναι λιγότερο ευαίσθητες στις μεταβολές του χώρου και δεν επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες. Ίσως ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των στατικών μεθόδων είναι το γεγονός ότι δεν λαμβάνουν υπόψη τον προσανατολισμό του χώρου και την πραγματική επιφάνεια του παραθύρου. Όπως αναμένεται, η αύξηση της (WWR) οδηγεί σε μεγαλύτερη διείσδυση του φ.φ. μέσα στον χώρο, η οποία μεταφράζεται τελικά με την επέκταση της ζώνης φ.φ. Παρόλο που οι δυναμικές μέθοδοι παρέχουν λεπτομερέστερες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του χώρου από πλευράς φ.φ., οι στατικές μέθοδοι δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα συνοψίζονται παρακάτω:

- Η ζώνη φ.φ. στους προτεινόμενους κανονισμούς σχεδιασμού διαμορφώνεται με βάση τις παραμέτρους περιορισμού των χώρων και ειδικότερα από τις ιδιότητες του παραθύρου. Ο γεωμετρικός προσδιορισμός της ζώνης φ.φ. εκφράζεται σε σχέση με το ύψος του παραθύρου και ειδικότερα του πρεκτιού (WHH) που επηρεάζει τη συνολική έκφραση της διείσδυσης του φυσικού φωτισμού στο χώρο. Επειδή το ύψος του πρεκτιού του παραθύρου (το ύψος από το δάπεδο έως το παραπέτασμα παραθύρου) διατηρήθηκε σε σταθερό ύψος 2.5 m για μεταβλητή αναλογία παραθύρου προς τον τοίχο (WWR) στις προτεινόμενες διαμορφώσεις, όλες οι

περιπτώσεις είχαν την ίδια υπολογιζόμενη ζώνη φ.φ. ανεξάρτητα από τις εφαρμοζόμενες αναλογίες παραθύρου-τοιχίου.

- Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση της αναλογίας παραθύρου προς τον τοίχο (Window-to-Wall Ratio, WWR) μπορεί να επηρεάσει τον φωτισμό του χώρου καθώς και τον προσανατολισμό των προσόψεων, αλλά η συνολική απόδοση εξαρτάται επίσης από το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά και από τις αναλογίες των δωματίων. Τα κριτήρια φ.φ. DA και sDA βασίζονται και εξαρτώνται από το κλίμα που επικρατεί σε κάθε περιοχή, την διαθεσιμότητα σε φ.φ., τις διαστάσεις του χώρου, το μέγεθος του παραθύρου και τον προσανατολισμό, σε αντίθεση με τον DF που είναι περισσότερο στατικός σαν κριτήριο λόγω του χειρισμού του ήλιου και των σταθερών κλιματικών συνθηκών και ως εκ τούτου λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές.
- Η αύξηση της αναλογίας του παραθύρου-τοιχίου (WWR) σε όλες τις διαμορφώσεις και τους προσανατολισμούς έχει άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του βάθους της ζώνης φ.φ. Τόσο η (DA) όσο και η (sDA) οδηγούν σε περίπου ίδιο βάθος της περιμετρικής ζώνης, με αύξηση περίπου 15% για την (sDA), αλλά αυτό συμβαίνει μόνο για τους νότιους προσανατολισμούς. Όταν οι διαμορφώσεις είναι στραμμένες προς το Βορρά, το βάθος που προκύπτει ποικίλει περίπου κατά 35%. Όσον αφορά τον (DF) σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι υπερεκτιμά το βάθος της ζώνης φ.φ. σε σχέση με τα άλλα δύο (2) κριτήρια περίπου 20% για Νότιο προσανατολισμό και πάνω από 30% για τον Βόρειο προσανατολισμό.

Μια περιγραφή των συστημάτων φ.φ. παρουσιάστηκε, και ειδικότερα έγινε μία αναλυτική ανασκόπηση των ραφιών φυσικού φωτισμού (Light Shelves), τα οποία ταξινομήθηκαν σε τέσσερις (4) γενικές ομάδες:

- α. Οριζόντια ράφια,
- β. Επίπεδα κεκλιμένα ράφια,
- γ. Καμπύλα ράφια και
- δ. Δυναμικά/Ενεργά ράφια.

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα φ.φ. (daylighting systems, DS) μπορούν να χωριστούν σε δύο (2) κύριες ευρείες ομάδες, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες ονομασίες για την ταξινόμηση και περαιτέρω υποδιαίρεση τους:

1. Συστήματα φ.φ., με σκίαση ( $DS_{w/Shade}$ ).
2. Συστήματα φ.φ., χωρίς σκίαση ( $DS_{w/oShade}$ ).

Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εφαρμογή των συστημάτων φ.φ. συνοψίζονται παρακάτω:

- Το δυναμικό σε φ.φ. της περιοχής (π.χ. γεωγραφικό πλάτος, νέφωση, εμπόδια κ.λπ.).
- Οι διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (Φωτισμός, άμεση ηλιακή ακτινοβολία, κλπ.).
- Οι αντικειμενικοί στόχοι και στρατηγικές φυσικού φωτισμού που εννοούνται στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό.
- Τα ανοίγματα και η λειτουργία.
- Οι στόχοι μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας.
- Οι λειτουργικές εκτιμήσεις (π.χ. συνεχής/διακοπτόμενη, συντήρηση κλπ.).
- Η ανακατεύθυνση του φ.φ. σε περιοχές με χαμηλό φωτισμό.
- Η βελτίωση του φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας.
- Η βελτίωση της οπτικής άνεσης, έλεγχος παρουσίας θάμβωσης.
- Η επίτευξη σκίασης, και ο θερμικός έλεγχος.

Τα ράφια φωτισμού (Light shelves) αντιπροσωπεύουν μία από τις πιο δημοφιλείς επιλογές σχεδιασμού σε σύγχρονα κτίρια και συχνά υποδεικνύονται στη βιβλιογραφία ως αποτελεσματικές συσκευές που μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα φωτισμού ενός χώρου και να προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται συστήματα εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανασκόπησης, δεν έχει παρουσιαστεί έρευνα που να εξετάζει τη βέλτιστη ανάλυση κόστους (cost-optimal analysis) για τα ράφια φωτισμού.

Για τον προσδιορισμό της σχέσης κόστους/αποτελεσματικότητας, απαιτείται μια ανάλυση του κύκλου ζωής, όπου όλες οι δαπάνες που σχετίζονται με το ράφι (αρχική εγκατάσταση, λειτουργία, συντήρηση και διάθεση) αξιολογούνται κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής

του. Τα συμβατικά εξωτερικά επίπεδα ράφια φωτισμού κοστίζουν περίπου ~100\$ ανά m<sup>2</sup> [120]. Ανάλογα με τη γεωμετρική μορφή του και το τελείωμα της ανώτερης επιφάνειας, το κόστος του ραφιού φωτισμού μπορεί να ποικίλει ευρέως. Σε γενικές γραμμές, τα ράφια δεν είναι τυποποιημένα προϊόντα, καθώς τα εξωτερικά ράφια φωτισμού σχεδιάζονται ως μέρος της πρόσοψης του κτιρίου. Οι βασικές διαπιστώσεις από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που διεξήχθη για τα ράφια φωτισμού παρουσιάζονται παρακάτω:

- Τα ράφια φωτισμού αποδίδουν διαφορετικά κάτω από διάφορες συνθήκες ουρανού. Η λιγότερο ευνοϊκή συνθήκη είναι αυτή που σχετίζεται με τις συνθήκες νεφοσκεπή ουρανού. Αυτή η κατάσταση έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση των εσωτερικών επιπέδων φωτισμού, αν και μπορεί να επιτευχθεί ελαφρά αύξηση της ομοιομορφίας
- Τα ράφια φωτισμού λειτουργούν καλύτερα όταν εγκαθίστανται σε προσόψεις με Νότιο προσανατολισμό.
- Τα ράφια φωτισμού τοποθετούνται συνήθως πάνω από το επίπεδο των ματιών για να αποφευχθεί η θάμβωση από την ανώτερη επιφάνεια τους.
- Τα εξωτερικά ράφια φωτισμού μπορούν να σκιάσουν το κατώτερο παράθυρο θέασης και, αν έχουν σχεδιαστεί σωστά, η απόδοσή τους μπορεί να είναι καλύτερη από τα συμβατικά συστήματα σκίασης (πχ. προεξοχές).
- Η ομοιομορφία του φ.φ. αυξάνεται αν και η αντίθεση φωτεινότητας (luminance contrast) μπορεί να αυξηθεί προκαλώντας προβλήματα παρουσίας θάμβωσης. Υπό νεφοσκεπείς συνθήκες, βελτιώνεται επίσης η ομοιομορφία, αλλά αυτό οφείλεται στη μείωση των επιπέδων φωτισμού στην περιοχή κοντά στο παράθυρο.
- Σε πολύ γενικές γραμμές, η μέγιστη τιμή του βάθους ενός εξωτερικού ραφιού φωτισμού ( $d_{\text{ext lightshelf,max}}$ ) μπορεί να οριστεί από τα [87, 88] χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 1.
- Όσον αφορά τα επίπεδα φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας, όταν χρησιμοποιείται ένα ράφι φωτισμού, υπάρχει συνολική μείωση των τιμών φωτισμού μεταξύ 20% και 60% σε σύγκριση με μια περίπτωση αναφοράς (χωρίς παρουσία σκιάστρου ή/και ραφιού φωτισμού). Ωστόσο, τα ράφια μπορούν να αυξήσουν τα επίπεδα φωτισμού στο επίπεδο εργασίας στη δευτερεύουσα ζώνη φ.φ. που κυμαίνεται από 10% έως πάνω

από 70% όταν χρησιμοποιούνται υλικά με υψηλή ανακλαστικότητα ή επιφάνειες καθρέφτη.

- Μια ελαφριά κλίση του ραφιού φωτισμού μπορεί να αυξήσει τη ροή φωτισμού που εισέρχεται στο δωμάτιο ειδικά κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στο Βόρειο ημισφαίριο, αυξάνοντας ταυτόχρονα όμως τα ψυκτικά φορτία.
- Φαίνεται ότι το σχήμα της οροφής μπορεί να επηρεάσει την κατανομή φωτισμού. Όταν χρησιμοποιείται μια λοξή οροφή, τα επίπεδα φωτισμού αυξήθηκαν στο πίσω μέρος του δωματίου κατά 21 – 36% και μειώθηκαν κατά 20 – 55% μπροστά.
- Ο δυναμικός έλεγχος των ανακλαστικών ραφιών φωτισμού μπορεί να προσφέρει ορισμένα οφέλη, καθώς μπορούν να ανακατευθύνουν το φως του ήλιου σε μια συγκεκριμένη περιοχή στην οροφή. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι ο μικρός λόγος παραθύρου-πατώματος (WFR) επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης των επιπέδων φ.φ. στο βαθύτερο μέρος του χώρου.

Σε αυτή τη διατριβή έγινε προσπάθεια να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα αποδοτικό σύστημα μεταφοράς φ.φ. και να εφαρμοστεί σε ένα παράθυρο. Προχωρώντας προς μια δυναμική προσέγγιση στη διαχείριση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά χώρων, μπορούν να επιτευχθούν βελτιώσεις στη συνολική απόδοση από πλευράς φωτισμού του. Ένα πρωτότυπο σύστημα φ.φ. για εφαρμογές με πλευρικά ανοίγματα (side-lighted applications) που αναφέρεται ως ενεργό σύστημα ανακατεύθυνσης ηλιακής ακτινοβολίας (active sunlight redirection system, ASRS) αναλύθηκε. Περιλαμβάνει ένα ράφι φωτισμού, τοποθετημένο σε ύψος περίπου στο μέσο του παραθύρου, που λαμβάνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιώντας μια ηλιοστατική διαμόρφωση που παρακολουθεί ενεργά και συλλέγει το φως του ήλιου με τη χρήση μιας σειράς καθρεφτών. Για την ιχνηλάτηση του ήλιου, το προτεινόμενο σύστημα χρησιμοποιεί τη μέθοδο Περιστροφής-Ύψους (Spinning-Elevation (SE) method). Μία λεπτομερή ανάλυση των δύο (2) πιο κοινά χρησιμοποιούμενων μεθόδων ηλιοστάτων/συστημάτων ηλιακής ιχνηλάτησης που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές ηλιακής ενέργειας για συστήματα διπλού άξονα παρουσιάστηκε. Αυτές είναι:

- a. Ηλιακά συστήματα ιχνηλάτησης μονού-άξονα (single-axis solar tracking systems), και
- b. Ηλιακά συστήματα παρακολούθησης διπλού-άξονα (dual-axis solar tracking systems)

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει υψηλότερα επίπεδα φωτισμού στην επιφάνεια εργασίας πιο βαθιά μέσα στο δωμάτιο, μακριά από την περιμετρική ζώνη αντισταθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις απαιτήσεις ενέργειας φωτισμού σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια δαπέδου. Το σύστημα αναπτύχθηκε για να επιτύχει ακόλουθους στόχους:

- Μεγιστοποίηση της χρήσης του διαθέσιμου φ.φ. και ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος τεχνητού φωτισμού μέσω της χρήσης ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου και εκμετάλλευσης του φυσικού φωτισμού με αισθητήρες φωτισμού.
- Παροχή υψηλών επιπέδων φ.φ. στην επιφάνεια εργασίας πιο βαθιά μέσα στο δωμάτιο, μακριά από την περιμετρική ζώνη αντισταθμίζοντας τις απαιτήσεις ενέργειας για τεχνητό φωτισμό σε μια μεγαλύτερη επιφάνεια δαπέδου.
- Αύξηση της απόστασης μεταφοράς του φ.φ. στον πυρήνα του κτιρίου.
- Διατήρηση ενός εσωτερικού περιβάλλοντος που προάγει την ευημερία των χρηστών και αυξάνει την παραγωγικότητά τους.
- Κάλυψη ευρέων παραλλαγών εφαρμογών όσον αφορά την χρήση των κτιρίων και των γεωγραφικών τοποθεσιών.
- Ευκολία εγκατάστασης τόσο σε νεόδμητα όσο και σε υφιστάμενα κτίρια.

Η απόδοση του ενεργού συστήματος ανακατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας (ASRS) αξιολογήθηκε και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων διαμορφώσεων του χώρου.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι:

- Το πρωτότυπο σύστημα αυξάνει τα επίπεδα φωτισμού της δευτερεύουσας ζώνης φ.φ. του χώρου (περιπτώσεις SUNLIGHT CASE A, και SUNLIGHT CASE B). Η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 30% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE A σε πάνω από 50% για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B. Η αύξηση του εμβαδού των καθρεπτών κατά περίπου 80%, από 0.0225 m<sup>2</sup> σε 0.04 m<sup>2</sup>, αυξάνει τις μέσες τιμές φωτισμού στην δευτερεύουσα περιοχή περίπου κατά 20%.

- Η ομοιομορφία ενισχύεται σημαντικά. Συγκρίνοντας την περίπτωση αναφοράς (BASE CASE) με την SUNLIGHT CASE B, η ομοιομορφία αυξάνεται κατά 55%.
- Η περίπτωση SUNLIGHT CASE A και SUNLIGHT CASE B παρουσιάζουν μείωση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό κατά 9% και 20% σε σύγκριση με το σενάριο BASE CASE. Η μείωση αυξάνεται σε σύγκριση με την περίπτωση LIGHTSHELF CASE κατά 14% και 25%, αντίστοιχα.
- Για την περίπτωση SUNLIGHT CASE B, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ψύξη αυξάνεται κατά  $\approx 26\%$  σε σύγκριση με την περίπτωση BASE CASE. Το ίδιο συμβαίνει και με την SUNLIGHT CASE A, αλλά σε μικρότερο βαθμό ( $\approx 9\%$ ) λόγω της μικρότερης επιφάνειας των καθρεπτών και συνεπώς των πρόσθετων εσωτερικών θερμικών κερδών. Σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα φυσικού φωτισμού (LIGHTSHELF CASE), η αύξηση της κατανάλωσης ψύξης εκτιμάται σε  $\approx 23\%$  και  $\approx 42\%$  αντίστοιχα.

Στη διαδικασία σχεδιασμού ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων, κάθε μεταβλητή έχει τη σημασία της και επηρεάζει τη χρήση ενέργειας καθώς και τις συνθήκες εσωτερικού χώρου. Αλλάζοντας μια αρχική ρύθμιση, οι επιπτώσεις πρέπει να μελετηθούν και να αξιολογηθούν εκ νέου. Τα υπερβολικά επίπεδα φ.φ. ή/και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην κατανάλωση ενέργειας. Η βελτιστοποίηση της χρήσης του φ.φ. επιδρά θετικά στην μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης για ψύξη (ψυκτικά φορτία) και τεχνητό φωτισμό. Εάν χρησιμοποιηθεί ολοκληρωμένο σύστημα σκίασης και φωτισμού, τότε μπορεί να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τις ανάγκες των χρηστών για φυσικό φως. Για τα ζεστά και ηλιόλουστα κλίματα, όπως η Ελλάδα, η διαθεσιμότητα του φ.φ. είναι υψηλή και ως αποτέλεσμα συστήματα που μπορούν να αξιοποιήσουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να βελτιστοποιήσουν ενεργά τον φωτισμό σε ένα χώρο.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το σχεδιασμό, τις προδιαγραφές και την κατασκευή ενός πρωτοτύπου συστήματος αυτόματου ηλιοστάτη διπλού-άξονα (prototype dual-axis heliostat/solar-tracker system). Ο κινητήρας ενεργοποιείται προς την κατεύθυνση όπου βρίσκεται ο ήλιος (και το ανακατευθύνει). Αυτός ο τύπος μηχανισμού ιχνηλάτησης ονομάζεται σερβομηχανισμός (servo mechanism) και είναι επίσης γνωστός ως ιχνηλάτηση σε πραγματικό χρόνο (real-time tracking). Επιλύθηκε ότι η



ιχνηλάτηση σε πραγματικό χρόνο θα ήταν απαραίτητη για την αποτελεσματική παρακολούθηση του ήλιου, έτσι ώστε να μην απαιτείται η χρήση εξωτερικών δεδομένων.

Ο κύριος στόχος είναι ανάπτυξη μιας συσκευής ηλιοστάτη για τις εφαρμογές φ.φ. Ενώ οι μηχανολογικές πτυχές του προτεινόμενου συστήματος ηλιοστάτη, σχεδιασμού, ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και του λογισμικού ελέγχου για τη διαδικασία της ηλιακής ιχνηλάτησης που απαιτείται για την κατασκευή του παρουσιάστηκε. Τα υλικά, τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα και οι τεχνικές κατασκευής έγιναν λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και το χρόνο κατασκευής στο πλαίσιο του έργου. Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του πρωτότυπου συστήματος ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Απλό σύστημα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιεί μόνο δύο (2) κινητήρες που μπορούν να επιτύχουν υψηλές απαιτήσεις ροπής.
- Στερεό και άκαμπτο σύστημα πλατφόρμας συμμετρικής κινητικότητας με μειωμένους ανεπιθύμητους κραδασμούς, κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από μέταλλο και αλουμίνιο.
- Συμπαγής και μικρού μεγέθους κατασκευή με άμεσα προσβάσιμα τα εξαρτήματα που μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν ή να αναβαθμιστούν.

Μια αντιπροσωπευτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας και των εμπορικών προϊόντων των λύσεων σχεδίασης ηλιοστάτων για εφαρμογές συστημάτων φ.φ. σε κτίρια, όσο και μια λεπτομερή παρουσίαση των κύριων στοιχείων ενός ηλιοστάτη/ηλιακού ιχνηλάτη διεξήχθη. Η επισκόπηση δίνει έμφαση στα εμπορικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται σήμερα και παρέχει μερικά σημαντικά παραδείγματα εφαρμογών συστημάτων ηλιοστατών.

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας και της απόδοσης του αναπτυγμένου συστήματος ηλιοστάτη (ΜΑΚv1) διεξήχθη πειραματικός έλεγχος. Οι δοκιμές μας υποδεικνύουν ότι το σύστημα παρέχει ακριβή και επαναλαμβανόμενη στόχευση στο σημείο της οροφής. Ο ηλιοστάτης είχε εντολή από το λογισμικό ελέγχου να δείχνει στο στόχο και παρατηρήθηκε ότι κινήθηκε εντός της ακρίβειας που μπορούσε να μετρηθεί η θέση του ηλιακού ίχνους, και δεν υπήρχε απόκλιση από το αρχικό σημείο.

Η επίδραση της κίνησης ιχνηλάτησης από τους βηματικούς κινητήρες αναφορικά με το σχήμα του ηλιακού ίχνους και την θέση της δέσμης είναι ελάχιστη. Όταν ενεργοποιείται ένας βηματικός κινητήρας για να διατηρηθεί το σημείο στόχευσης του ηλιοστάτη σταθερό στον προκαθορισμένο στόχο, υπάρχει μια ταλάντωση της θέσης της δέσμης με αρχικό μέγεθος μικρότερο από  $\pm 1$  cm (μικρότερο από  $0.1^\circ$ ) - η ταλάντωση σταματάει μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα μέχρι το σημείο όπου δεν είναι ορατή η μετατόπιση. Δεν υπάρχει καμία ορατή αλλαγή στο σχήμα της δέσμης στο στόχο όταν εμφανίζεται ένας παλμός κινητήρα ιχνηλάτησης. Οι βηματικοί κινητήρες ενεργοποιούνται κανονικά σε διαστήματα περίπου 30 δευτερολέπτων. Η μετρούμενη μέση ένταση φωτισμού για το σενάριο LIGHTSHELF CASE (LS) ήταν 227 lx και 178 lx για τα σημεία που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις, ενώ η ένταση φωτισμού στα σημεία που μετρήθηκαν από τη λειτουργία των συστημάτων (SUNLIGHT CASE B (SS)) ήταν 240 lx και 256 lx αντίστοιχα.

–κενή–