



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών  
και Βιώσιμου Σχεδιασμού  
ΠΜΣ Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού  
Περιβάλλοντος Κτιρίων

Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία

Παραμετρική αξιολόγηση δυναμικού συστήματος σκίασης για Κτίρια Γραφείων:  
Ανάλυση και βελτιστοποίηση Οπτικής Άνεσης με βάση το πρότυπο WELL  
Building Standard

Κρανιάς Γιάννης

Επιβλέπων καθηγητής

Αντώνης Κονταδάκης

Αθήνα, «Ιούλιος » «2026»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Παραμετρική αξιολόγηση δυναμικού συστήματος σκίασης για Κτίρια Γραφείων:  
Ανάλυση και βελτιστοποίηση Οπτικής Άνεσης με βάση το πρότυπο WELL  
Building Standard

Κρανιάς Γιάννης

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής/Επιβλέπουσα  
Καθηγήτρια:

Αντώνης Κονταδάκης

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής/Συν-Επιβλέπουσα  
Καθηγήτρια:

Χριστίνα Σκανδάλη

Αθήνα, «Ιούλιος » «2026»

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές, τον κύριο Λάμπρο Δούλο για τη συμβολή του στο προπαρασκευαστικό στάδιο της διπλωματικής και τον επιβλέποντα κύριο Αντώνη Κονταδάκη που με τις απαραίτητες οδηγίες, κατευθύνσεις και διορθώσεις βοήθησε στην υλοποίηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης σε χώρους εργασίας μέσω της χρήσης δυναμικών και παραμετρικά ελεγχόμενων συστημάτων σκίασης. Η σχέση μεταξύ του φυσικού φωτός και της ανθρώπινης άνεσης είναι καθοριστική, καθώς η κυρίαρχη τάση για μεγάλες γυάλινες επιφάνειες οδηγεί συχνά σε ανεξέλεγκτη εισροή ηλιακής ακτινοβολίας, προκαλώντας φαινόμενα θάμβωσης (glare) και υπερθέρμανσης. Τα στατικά συστήματα σκίασης αδυνατούν να ανταποκριθούν στη δυναμική φύση του ήλιου, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη μετάβαση από τον απλό γεωμετρικό σχεδιασμό στον ενεργό προγραμματισμό της λειτουργίας του κτιριακού κελύφους.

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίζεται σε μια αυστηρά δομημένη υπολογιστική προσέγγιση, αξιοποιώντας τα λογισμικά Rhinoceros 3D και Grasshopper για τη δημιουργία παραμετρικών μορφών σκίασης. Για την περιβαλλοντική ανάλυση χρησιμοποιούνται τα Ladybug Tools και η μηχανή Radiance, η οποία εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στον υπολογισμό της διανομής φωτεινότητας μέσω της μεθόδου ray-tracing. Κεντρικό στοιχείο αποτελεί η χρήση γενετικών αλγορίθμων μέσω του Galapagos για τη βελτιστοποίηση μεταβλητών όπως η γωνία κλίσης και το ποσοστό ανοίγματος, με στόχο τη μεγιστοποίηση της αυτονομίας φυσικού φωτισμού (sDA) και την ελαχιστοποίηση της θάμβωσης (DGP).

Η καινοτομία της μελέτης εντοπίζεται στην εφαρμογή της στρατηγικής «Split-Blinds», η οποία διαχωρίζει το παράθυρο σε δύο λειτουργικές ζώνες για τη βέλτιστη διαχείριση φωτός και θέας. Η άνω ζώνη (Daylight Zone) είναι υπεύθυνη για τη βαθιά διείσδυση του φωτός στο εσωτερικό, ενώ η κάτω ζώνη (View Zone) προστατεύει την επιφάνεια εργασίας από τη θάμβωση, διασφαλίζοντας παράλληλα την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην κάλυψη του ερευνητικού κενού που αφορά την ενσωμάτωση ανθρωποκεντρικών απαιτήσεων, όπως αυτές ορίζονται από το πρότυπο WELL v2, σε συνδυασμό με τα ενεργειακά κριτήρια του προτύπου LEED v4.1.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη συγκριτική υπεροχή των δυναμικών και αυτοματοποιημένων συστημάτων έναντι των στατικών, επιτυγχάνοντας την ιδανική ισορροπία μεταξύ οπτικής άνεσης και φωτιστικής επάρκειας. Η εργασία προσφέρει ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο (workflow) που μπορεί να αξιοποιηθεί για τον σχεδιασμό κτιρίων υψηλής περιβαλλοντικής ποιότητας, προάγοντας την υγεία και την ευεξία των εργαζομένων. Συνολικά, η μελέτη αποδεικνύει ότι η χρήση βελτιστοποιημένων παραμετρικών συστημάτων μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τους κερκάρδιους ρυθμούς και την παραγωγικότητα, υπερβαίνοντας την απλή εξοικονόμηση ενέργειας.

## Λέξεις – Κλειδιά

Παραμετρικός σχεδιασμός, Οπτική άνεση, Φυσικός φωτισμός, Στρατηγική "Split-Blinds"

## Abstract

This thesis focuses on optimizing natural lighting and visual comfort in workspaces through the use of dynamic and parametrically controlled shading systems. The relationship between natural light and human comfort is critical, as the prevailing trend for large glass surfaces often leads to uncontrolled solar radiation ingress, causing glare and overheating. Static shading systems are unable to respond to the dynamic nature of the sun, making the transition from simple geometric design to active programming of the building envelope's operation necessary.

The research methodology is based on a rigorously structured computational approach, utilizing Rhinoceros 3D and Grasshopper software for the creation of parametric shading forms. For environmental analysis, Ladybug Tools and the Radiance engine are used, ensuring high accuracy in calculating luminance distribution through the ray-tracing method. Central to the study is the use of genetic algorithms via Galapagos to optimize variables such as tilt angle and opening percentage, with the aim of maximizing Spatial Daylight Autonomy (sDA) and minimizing glare (DGP).

The innovation of the study lies in the application of the "Split-Blinds" strategy, which divides the window into two functional zones for optimal light and view management. The upper zone (Daylight Zone) is responsible for deep light penetration into the interior, while the lower zone (View Zone) protects the work surface from glare while maintaining visual contact with the external environment. This approach aims to address the research gap concerning the integration of human-centric requirements, as defined by the WELL v2 standard, in combination with the energy criteria of the LEED v4.1 standard.

The anticipated results highlight the comparative superiority of dynamic and automated systems over static ones, achieving the ideal balance between visual comfort and lighting adequacy. The work offers a comprehensive methodological framework (workflow) that can be utilized for the design of buildings of high environmental quality, promoting the health and well-being of workers. Overall, the study demonstrates that the use of optimized parametric systems can significantly enhance circadian rhythms and productivity, going beyond simple energy savings.

## Keywords

Parametric design ,Visual comfort , Daylight , glare probability, Split-blinds strategy, WELL Building Standard

## Περιεχόμενα

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Περίληψη .....</b>                                                               | <b>5</b>  |
| <b>Abstract.....</b>                                                                | <b>6</b>  |
| <b>Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων .....</b>                                           | <b>9</b>  |
| <b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>                                                      | <b>10</b> |
| <b>Συντομογραφίες &amp; Ακρωνύμια .....</b>                                         | <b>11</b> |
| <b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....</b>                                                    | <b>13</b> |
| 1.1. Εισαγωγή.....                                                                  | 13        |
| 1.2. Αντικείμενο και Στόχοι της Έρευνας .....                                       | 15        |
| 1.3. Ερευνητικά Ερωτήματα.....                                                      | 16        |
| 1.4. Δομή εργασίας .....                                                            | 17        |
| <b>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση σε κτίρια Γραφείων .....</b>                | <b>19</b> |
| 2.1 Σύγχρονες Έρευνες και Βιβλιογραφικές Πηγές για δυναμικά συστήματα σκίασης ..... | 19        |
| 2.2 Βιβλιογραφική αναφορά υλοποιημένων παραδειγμάτων .....                          | 22        |
| 2.2.1. Πύργοι Al-Bahar (2012).....                                                  | 23        |
| 2.2.2. Q1 ThyssenKrupp Headquarter (2010) .....                                     | 24        |
| 2.2.3. Triangle Cologne (2007) .....                                                | 25        |
| 2.3 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής έρευνας.....                                        | 26        |
| <b>Κεφάλαιο 3 : Θεωρητικό Υπόβαθρο και Κριτήρια Σχεδιασμού .....</b>                | <b>28</b> |
| 3.1. Φυσικός Φωτισμός και Ανθρώπινη Φυσιολογία.....                                 | 28        |
| 3.1.1. Οπτική Άνεση και Υγεία: Κιρκάδιοι ρυθμοί και παραγωγικότητα .....            | 28        |
| 3.1.2. Το φαινόμενο της Θάμβωσης (Glare): Ορισμοί και κατηγορίες .....              | 29        |
| 3.2. Μετρικά Συστήματα Αξιολόγησης (Metrics).....                                   | 30        |
| 3.2.1. Στατικά vs Δυναμικά Μετρικά (CBDM - Climate Based Daylight Metrics) .....    | 30        |
| 3.2.2. Spatial Daylight Autonomy (sDA): Ορισμός και στόχοι.....                     | 31        |
| 3.2.3. Annual Sunlight Exposure (ASE): Όρια και προστασία .....                     | 31        |
| 3.2.4. Daylight Glare Probability (DGP): Πιθανότητα θάμβωσης.....                   | 32        |
| 3.3. Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποιήσεις.....                                     | 32        |
| 3.3.1. LEED v4.1 EQ Credit: Απαιτήσεις για το φυσικό φως .....                      | 33        |
| 3.3.2. WELL v2 Building Standard.....                                               | 35        |
| 3.3.3. Συσχέτιση Μετρικών Δεικτών και Επιλογή Προτύπου .....                        | 38        |
| <b>Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Προσομοίωσης .....</b>                                   | <b>40</b> |
| 4.1. Ροή Εργασίας Παραμετρικού Σχεδιασμού (Workflow).....                           | 40        |
| 4.1.1 Περιβάλλον προσομοίωσης: Rhinoceros 3D & Grasshopper .....                    | 40        |
| 4.1.2. Διασύνδεση με κλιματικά δεδομένα: Ladybug Tools (EPW files) .....            | 41        |

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2 Πρότυπο μοντέλο προσομοίωσης .....                                              | 41        |
| 4.2.1. Πλαίσιο Έργου.....                                                           | 41        |
| 4.2.2. Δωμάτιο προσομοίωσης.....                                                    | 42        |
| 4.2.3 Καιρός και Κλίμα .....                                                        | 43        |
| 4.3. Μηχανή & παράμετροι Radiance.....                                              | 44        |
| 4.3.1. Η μηχανή Radiance και η μέθοδος Ray-Tracing .....                            | 44        |
| 4.3.2. Ορισμός υλικών και συντελεστές ανάκλασης (80/50/20) .....                    | 45        |
| 4.4. Αισθητήρες και Θέσεις παρατήρησης .....                                        | 46        |
| 4.4.1. Πλέγματα Ανάλυσης (Sensor Grids).....                                        | 46        |
| 4.4.2. Θέσεις παρατήρησης p1 και p2 .....                                           | 48        |
| 4.5. Σχεδιασμός Split-Blinds και γεωμετρίες G0/G1/G2 .....                          | 49        |
| 4.5.1. Διαχωρισμός ζωνών- Η στρατηγική Split-Blinds .....                           | 49        |
| 4.5.2. Επίδραση της στρατηγικής στον δείκτη View Factor (Πρότυπο WELL L06) .....    | 50        |
| 4.5.3. Γεωμετρίες G0/G1/G2.....                                                     | 51        |
| 4.6. Λογική Ελέγχου και Ορισμός Καταστάσεων Σκίασης .....                           | 52        |
| 4.6.1. Η μέθοδος "Detailed Dynamic Shading" (DDS) και οι Καταστάσεις (States) ..... | 52        |
| 4.6.2. Χρονοπρογραμματισμός (Scheduling) και Λειτουργική Ισορροπία .....            | 52        |
| 4.7. Σενάρια Προσομοίωσης.....                                                      | 53        |
| 4.7.1. Σενάριο Αναφοράς: Χωρίς Σκίαση (Baseline / No-Blinds) .....                  | 53        |
| 4.7.2. Σενάριο 2: static_open.....                                                  | 54        |
| 4.7.3. Σενάριο 3: dynamic_cutoff .....                                              | 54        |
| 4.7.4. Σενάριο 4: Βελτιστοποιημένη Στρατηγική "Split-Blinds"-Well_c.....            | 54        |
| 4.7.5. Ανάλυση των Καταστάσεων Λειτουργίας των Σεναρίων (Blind States) .....        | 55        |
| <b>Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Συζήτηση .....</b>                     | <b>57</b> |
| 5.1. Πίνακας Κύριων Δεικτών.....                                                    | 57        |
| 5.2. Απόδοση Φυσικού Φωτισμού και Θάμβωσης.....                                     | 60        |
| 5.3. Διάγραμμα Pareto (sDA έναντι ASE) .....                                        | 63        |
| <b>Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα .....</b>                         | <b>65</b> |
| 6.1. Συμπεράσματα.....                                                              | 65        |
| 6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....                                          | 67        |
| <b>Παράρτημα .....</b>                                                              | <b>68</b> |
| Α. Διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων με τη μηχανή Radiance .....                   | 68        |
| Β. Αναφορές grid_summary_combined.csv ανά περίπτωση .....                           | 74        |
| <b>Βιβλιογραφία .....</b>                                                           | <b>77</b> |

## Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

**Εικόνα 1:** Χαρτογράφηση κυριότερων επιστημονικών πηγών και δικτύου λέξεων-κλειδιών μέσω του λογισμικού VOSviewer.

**Εικόνα 2:** Πύργοι Al-Bahar.

**Εικόνα 3:** Q1 ThyssenKrupp Headquarter

**Εικόνα 4:** Triangle Cologne

**Εικόνα 5:** Κάτοψη κτιρίου ThyssenKrupp Q1 (Typical Office Floor Plan).

**Εικόνα 6:** Διαχωρισμός του παραθύρου

**Εικόνα 7 :** Πλέγμα Ανάλυσης

**Εικόνα 8:** Θέσεις παρατήρησης p1 και p2 για την αξιολόγηση της θάμβωσης στον χώρο του γραφείου

**Εικόνα 9:** Ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτός στην οροφή από τις περιστρεφόμενες περσίδες (Incident solar radiation).

**Εικόνα 10:** Χορδή και Βήμα πτερυγίου

**Εικόνα 11:** Τα 4 Σενάρια Προσομοίωσης

**Εικόνα 12 :** Ροή εργασίας Point-In-Time View-Based προσομοίωσης φυσικού φωτισμού και αξιολόγησης θάμβωσης (DGP) μέσω Honeybee-Radiance

**Γράφημα 1:** Επεξήγηση δεικτών ανά περίπτωση: sDA, ASE, ποσοστό DGP > 0.4, % ωρών σε ανοιχτή θέση.

**Γράφημα 2:** Ανάλυση UDI

**Γράφημα 3 :** Ετήσιες κατανομές μέσης έντασης φωτισμού ανά αισθητήρα κατά τις ώρες χρήσης και για τις 4 στρατηγικές.

**Γράφημα 4 :** Διάγραμμα Pareto μεταξύ sDA και ASE

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 1ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια Base και Dynamic Cutoff)

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 2ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια Static Open και Well C)

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 3ο):** Ψευδοχρωματική φωτεινότητα fisheye ( $cd/m^2$ ) (λογαριθμική κλίμακα) από τη σκοπιά του χρήστη με ενσωματωμένη τιμή DGP (Σενάρια Base και Dynamic Cutoff).

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 4ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια Static Open και Well C - Fisheye)

## Κατάλογος Πινάκων

**Πίνακας 1:** Συγκριτικός πίνακας βιβλιογραφικής αναφοράς υλοποιημένων παραδειγμάτων (Πύργοι Al-Bahar, Q1 ThyssenKrupp, Triangle Cologne).

**Πίνακας 2:** Στρατηγικές Σκίασης και Βασικοί Δείκτες Φυσικού Φωτισμού / Θάμβωσης.

**Πίνακας 3:** Κατηγορίες γεωμετρίας περσίδων.

**Πίνακας 4:** Καταστάσεις (States) και Ετήσιο Πρόγραμμα Λειτουργίας της στρατηγικής well\_c\_dual\_zone.

**Πίνακας 5:** Πίνακας Κύριων Δεικτών.

**Πίνακας 6:** Αποτελέσματα δείκτη DGP στη θέση p2 για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο.

**Πίνακας 7:** Αποτελέσματα δείκτη DGP στη θέση p1 για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο.

**Πίνακας 8:** Συγκριτική αξιολόγηση

## Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ASE (Annual Sunlight Exposure) Ετήσια Έκθεση σε Ηλιακό Φως

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Αμερικανική Ένωση Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού

BCMO (Balancing Composite Motion Optimization) Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Εξισορρόπησης Σύνθετης Κίνησης

CBDM (Climate Based Daylight Metrics) Δυναμικά Μετρικά Συστήματα Φυσικού Φωτισμού βάσει Κλίματος

DDS (Detailed Dynamic Shading) Μέθοδος Λεπτομερούς Δυναμικής Σκίασης

DF (Daylight Factor) Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού

DGI (Daylight Glare Index) Δείκτης Θάμβωσης Φυσικού Φωτός

DGP (Daylight Glare Probability) Πιθανότητα Θάμβωσης από Φυσικό Φως

EML (Equivalent Melanopic Lux) Ισοδύναμα Μελανοπικά Lux

EPW (EnergyPlus Weather file) Αρχείο Κλιματικών/Μετεωρολογικών Δεδομένων

EUI (Energy Use Intensity) Δείκτης Ενεργειακής Κατανάλωσης Κτιρίου

GMT (Greenwich Mean Time) Μέση Ώρα Γκρίνουιτς

IESNA / IES (Illuminating Engineering Society of North America) Εταιρεία Μηχανικών Φωτισμού της Βόρειας Αμερικής

ipRGC (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells) Φωτοευαίσθητα Γαγγλιακά Κύτταρα του Αμφιβληστροειδούς

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) Διεθνές Πρότυπο Πιστοποίησης Πράσινων Κτιρίων

m-EDI (Melanopic Equivalent Daylight Illuminance) Μελανοπικός Ισοδύναμος Φωτισμός Φυσικού Φωτός

MOO (Multi-Objective Optimization) Πολυ-αντικειμενική Βελτιστοποίηση / Πολυπαραγοντική Βελτιστοποίηση

PBM (Parametric Behavior Maps) Χάρτες Παραμετρικής Συμπεριφοράς

PV glass (Photovoltaic glass) Φωτοβολταϊκός Υαλοπίνακας

RGB (Red, Green, Blue) Χρωματικό Μοντέλο (Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε)

sDA (Spatial Daylight Autonomy) Χωρική Αυτονομία Φυσικού Φωτισμού

SMA (Shape Memory Alloys) Κράματα Μνήμης Σχήματος

SMP (Shape Memory Polymers) Πολυμερή Μνήμης Σχήματος

Tvis (Total Visible Transmittance) Ορατή Διαπερατότητα Υαλοπίνακα

UDI (Useful Daylight Illuminance) Ωφέλιμος / Χρήσιμος Φυσικός Φωτισμός

UGR (Unified Glare Rating) Ενιαίος Δείκτης Θάμβωσης (κυρίως για τεχνητό φωτισμό)

U-value Συντελεστής Θερμοπερατότητας

VDT (Video Display Terminals) Οθόνες Οπτικής Απεικόνισης / Υπολογιστών

WELL Building Standard Ανθρωποκεντρικό Πρότυπο Πιστοποίησης Κτιρίων για την Υγεία και την Ευεξία

WWR (Window-to-Wall Ratio) Ποσοστό Παραθύρων προς Συνολική Επιφάνεια Τοίχου

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1. Εισαγωγή

Η σχέση μεταξύ του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης στον χώρο εργασίας αποτελεί ένα από τα κρίσιμότερα ζητήματα στον σύγχρονο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Ενώ το φυσικό φως αποτελεί την σημαντικότερη πηγή φωτός για τον άνθρωπο, συμβάλλοντας στη σωματική και πνευματική ευεξία, η διαχείρισή του στα σύγχρονα κτίρια γραφείων παρουσιάζει σοβαρές προκλήσεις. Η κυρίαρχη τάση στην αρχιτεκτονική για κτίρια με μεγάλες γυάλινες προσόψεις, αν και αισθητικά επιθυμητή, οδηγεί συχνά σε ανεξέλεγκτη εισροή ηλιακής ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό μετατρέπει το φυσικό φως από πηγή ευεξίας σε πηγή σοβαρής δυσφορίας, προκαλώντας φαινόμενα θάμβωσης (glare) και υπερθέρμανσης (Edwards & Torcellini, 2002· Kokatnur et al., 2025). Ειδικότερα, η θάμβωση στα κτίρια γραφείων αποτελεί αιτία οπτικής κόπωσης και μείωσης της παραγωγικότητας, ιδιαίτερα λόγω της κάθετης θέσης των οθονών υπολογιστών. Το πρόβλημα επιτείνεται καθώς τα στατικά συστήματα σκίασης αδυνατούν να ανταποκριθούν στη δυναμική φύση του ηλιακού φωτός, οδηγώντας συχνά σε μόνιμο αποκλεισμό της θέας και του φωτός για την αποφυγή του ήλιου κατά τις ώρες αιχμής (Edwards & Torcellini, 2002· Kokatnur et al., 2025).

Σε επίπεδο τρέχουσας γνώσης, η βιβλιογραφία και η πρακτική έχουν στραφεί προς τα συστήματα δυναμικής σκίασης (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022· Le-Thanh et al., 2021). Διακρίνονται πλέον σαφώς κατηγορίες όπως οι προσαρμοστικές (adaptive), κινητικές (kinetic) και ανταποκρινόμενες (responsive) προσόψεις, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα μεταβολής της γεωμετρίας του κελύφους ως απόκριση στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η τεχνολογία έχει προχωρήσει από τα απλά μηχανικά συστήματα σε σύνθετες γεωμετρικές διαμορφώσεις (όπως origami και πτυχωτές δομές) και σε βιομιμητικές προσεγγίσεις που εμπνέονται από ναστικές κινήσεις φυτών (Kizilörenli & Orhon, 2025).

Παράλληλα, το κανονιστικό πλαίσιο έχει γίνει αυστηρότερο μέσω διεθνών προτύπων πιστοποίησης όπως το LEED και το WELL (Wu & Zhang, 2022). Τα πρότυπα αυτά έχουν μεταβεί από στατικές μετρήσεις σε δυναμικές προσομοιώσεις βάσει κλιματικών δεδομένων (CBDM), εισάγοντας δείκτες όπως η Χωρική Αυτονομία Φυσικού Φωτισμού (sDA) και η Ετήσια Έκθεση σε Ηλιακό Φως (ASE). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων απαιτεί πλέον εξειδικευμένα υπολογιστικά εργαλεία παραμετρικού σχεδιασμού (Grasshopper) και προσομοίωσης (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022· Le-Thanh et al., 2021).

Παρά την πρόοδο, εντοπίζονται σημαντικά κενά στη σημερινή κατάσταση, στην κάλυψη των οποίων στοχεύει η παρούσα εργασία. Πολλές μελέτες εστιάζουν μονομερώς στην ενεργειακή απόδοση, παραμελώντας την οπτική άνεση ή την ποιότητα της θέας. Υπάρχει έλλειψη έρευνας για την ενσωμάτωση των απαιτήσεων του ανθρωποκεντρικού προτύπου WELL (όπως ο κιρκάδιος φωτισμός και η ποιότητα θέας) στις παραμετρικές προσομοιώσεις. Επιπλέον, παρατηρείται κενό στη μετάβαση από τον σχεδιασμό της μορφής στον σχεδιασμό της «συμπεριφοράς». Συχνά απουσιάζει η ανάπτυξη έξυπνων στρατηγικών ελέγχου (control logic) που να εξισορροπούν αποτελεσματικά τις αντικρουόμενες απαιτήσεις μεταξύ επαρκούς φωτισμού (sDA) και αποφυγής θάμβωσης (ASE/DGP), χωρίς να καταφεύγουν σε πλήρη συσκότιση του χώρου. Η εργασία έρχεται να καλύψει αυτό το κενό, προτείνοντας μια μεθοδολογία για την παραμετρική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση δυναμικών συστημάτων σκίασης, με στόχο την ταυτόχρονη ικανοποίηση των προτύπων LEED και WELL (Lee et al., 2021· Wu & Zhang, 2022).

Η μεθοδολογία της έρευνας βασίζεται σε μια αυστηρά δομημένη υπολογιστική προσέγγιση, αξιοποιώντας σύγχρονα ψηφιακά εργαλεία. Ως κεντρικό εργαλείο σχεδιασμού χρησιμοποιείται το λογισμικό Rhinoceros 3D σε συνδυασμό με την πλατφόρμα οπτικού προγραμματισμού Grasshopper, επιτρέποντας τη δημιουργία παραμετρικών μορφών σκίασης.

Για την περιβαλλοντική ανάλυση χρησιμοποιείται η εργαλειοθήκη των Ladybug Tools. Το πρόσθετο Ladybug διαχειρίζεται τα κλιματικά δεδομένα, ενώ το Honeybee συνδέει το μοντέλο με τη μηχανή προσομοίωσης Radiance, η οποία εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στον υπολογισμό της διανομής φωτεινότητας και τον εντοπισμό φαινομένων θάμβωσης (backward ray-tracing) (Eltaweel et al., 2021· Samadi et al., 2020).

Μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, η εργασία προσδοκά να καταλήξει σε συγκεκριμένες στρατηγικές ελέγχου για δυναμικές προσόψεις που επιτυγχάνουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ οπτικής άνεσης και φωτιστικής επάρκειας. Αναμένεται η εύρεση σεναρίων σκίασης όπως τα «Split-Blinds», όπου το παράθυρο διαχωρίζεται σε ζώνες για βέλτιστη διαχείριση φωτός και θέας, που ικανοποιούν ταυτόχρονα τα αυστηρά κριτήρια των προτύπων LEED v4.1 και WELL v2. Συγκεκριμένα, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας και της λογικής κίνησης του σκιάστρου ανά χρονική στιγμή, ώστε να ελαχιστοποιείται η θάμβωση χωρίς να θυσιάζεται ο ωφέλιμος φυσικός φωτισμός και η επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Τέλος, η εργασία αναμένεται να αναδείξει τη συγκριτική υπεροχή των δυναμικών/ αυτοματοποιημένων συστημάτων έναντι των στατικών ως προς τους δείκτες sDA και ASE (Alsukkar et al., 2025· Do & Chan, 2020).

Η συνεισφορά της προτεινόμενης διπλωματικής εργασίας εντοπίζεται στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ της θεωρητικής έρευνας για τον παραμετρικό σχεδιασμό και της εφαρμογής βάσει κανονιστικών προτύπων. Προσφέρει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο (workflow) που μπορεί να αξιοποιηθεί από μελετητές για προσομοιώσεις- μελέτες φυσικού φωτισμού.

Επιπλέον, συνεισφέρει στην επιστήμη και την κοινωνία προάγοντας την έννοια της ανθρωποκεντρικής βιωσιμότητας. Αναδεικνύει πώς η τεχνολογία των δυναμικών προσόψεων μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά την υγεία και την ευεξία των εργαζομένων, μειώνοντας την οπτική δυσφορία και ενισχύοντας τους κερκάρδιους ρυθμούς, πέρα από την απλή εξοικονόμηση ενέργειας (Fang & Cho, 2019· Shi et al., 2020).

## **1.2. Αντικείμενο και Στόχοι της Έρευνας**

### **1.2.1. Μετάβαση από τον παθητικό σχεδιασμό στα δυναμικά συστήματα.**

Ο κεντρικός ερευνητικός στόχος της διατριβής είναι η μετάβαση από τον απλό σχεδιασμό της γεωμετρίας στον ενεργό «προγραμματισμό» της λειτουργίας του συστήματος. Η μελέτη δεν περιορίζεται μόνο στη μορφολογία των περσίδων, αλλά εστιάζει στην ανάπτυξη μιας εξελιγμένης «στρατηγικής ελέγχου» (control strategy/logic). Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, η μοντελοποίηση του συστήματος σκίασης βασίζεται στη μέθοδο «Detailed Dynamic Shading» (DDS). Αντί να χρησιμοποιούνται αφηρημένες έννοιες, το δυναμικό σύστημα ορίζεται μέσω συγκεκριμένων γεωμετρικών «καταστάσεων» (states). Για παράδειγμα, το λογισμικό εναλλάσσει τη γεωμετρία κατά τη διάρκεια της ετήσιας προσομοίωσης περνώντας από το State 0 (σκίαστρα ανεβασμένα και ανοιχτά) στο State 1 (σκίαστρα κατεβασμένα κατά 50% ή κλειστά), προσομοιώνοντας μια ευφυή και προσαρμοστική συμπεριφορά έναντι μιας στατικής τοποθέτησης (Lee et al., 2021· Wu & Zhang, 2022).

### **1.2.2. Η ανάγκη για "ευφυή" έλεγχο (Intelligent Control) και η στρατηγική Split-Blinds.**

Η προσομοίωση της ευφυούς συμπεριφοράς επιτυγχάνεται μέσω υπολογιστικών διαδικασιών (post-processing), όπου ορίζονται αλγόριθμοι που αποφασίζουν αυτόματα πότε και πώς θα αντιδράσει το σύστημα σκίασης βάσει αυστηρών κανόνων. Ένας τέτοιος κανόνας ελέγχου είναι, για παράδειγμα, η αυτόματη ενεργοποίηση της σκίασης όταν πάνω από το 2% των αισθητήρων του χώρου δεχθεί άμεσο φωτισμό μεγαλύτερο από 1000 lux. Ειδικότερος στόχος της έρευνας είναι η μελέτη συστημάτων «Split-Blinds», τα οποία διαχωρίζουν το παράθυρο σε δύο διακριτές λειτουργικές ζώνες (Alsukkar et al., 2025· Do & Chan, 2020).

### 1.3. Ερευνητικά Ερωτήματα

Στα σύγχρονα κτίρια γραφείων, η ανάγκη για μεγάλες και αποδοτικές κατόψεις οδηγεί συχνά στον σχεδιασμό χώρων με μεγάλο βάθος, το οποίο φτάνει ή και ξεπερνά τα 7,5 μέτρα. Ωστόσο, τα διεθνή πρότυπα πιστοποίησης, όπως το WELL Building Standard, θέτουν αυστηρούς περιορισμούς, απαιτώντας το 70% του χώρου εργασίας να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 7,5 μέτρων από παράθυρα με ανεμπόδιστη θέα. Αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα σχεδιασμού: οι ζώνες πέρα από το όριο των 7,5 μέτρων θεωρούνται «μη προνομιούχες» για μόνιμη εργασία λόγω ανεπαρκούς φυσικού φωτισμού, γεγονός που περιορίζει δραματικά την ωφέλιμη επιφάνεια του κτιρίου (International WELL Building Institute, 2020).

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, η απλή γεωμετρική μορφολογία των παραδοσιακών συστημάτων σκίασης δεν επαρκεί. Εδώ αναδεικνύεται η χρησιμότητα του παραμετρικού σχεδιασμού, ο οποίος επιτρέπει τη μετάβαση από το στατικό κέλυφος σε έναν δυναμικό, προσαρμοστικό οργανισμό, εξασφαλίζοντας τον ενεργό «προγραμματισμό» της λειτουργίας του. Μέσω της παραμετρικής μεθοδολογίας, καθίσταται εφικτή η μοντελοποίηση χιλιάδων εναλλακτικών σεναρίων και η ανάπτυξη «στρατηγικών ελέγχου» (control strategies). Έτσι, τα προσαρμοστικά και κινητικά συστήματα σκίασης μπορούν να βελτιστοποιηθούν υπολογιστικά, ώστε να εξισορροπούν τις αντικρουόμενες απαιτήσεις για ενεργειακή απόδοση, άπλετο φως και ψυχοφυσιολογική ευεξία, εξαλείφοντας την οπτική δυσφορία (Ibrahim et al., 2024· Samadi et al., 2020)

Με βάση τα παραπάνω, και εξετάζοντας πώς συστήματα όπως οι διαιρεμένες περσίδες (split louvers) μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση του φωτισμού σε μεγάλο βάθος, η διατριβή δομείται γύρω από τα ακόλουθα ερωτήματα:

#### Πρωταρχικό Ερευνητικό Ερώτημα

Πώς ακριβώς πρέπει να ρυθμίζεται/κινείται το δυναμικό σκίαστρο (ποια είναι η στρατηγική λειτουργίας του), ώστε να επιτυγχάνεται η αποτελεσματική αποφυγή της θάμβωσης στο εσωτερικό;

#### Κεντρικό Ερευνητικό Ερώτημα

Το κεντρικό ερώτημα της έρευνας συνοψίζεται στο ποια είναι η βέλτιστη στρατηγική ελέγχου (control logic) για ένα δυναμικό σύστημα σκίασης σε κτίρια γραφείων, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ισορροπία μεταξύ της επάρκειας φυσικού φωτισμού (sDA) και της αποφυγής της θάμβωσης (ASE/DGP), ικανοποιώντας παράλληλα τα αυστηρά πρότυπα LEED και WELL.

#### 1.4. Δομή εργασίας

Η διατριβή αναπτύσσεται σε μια αλληλουχία κεφαλαίων που υποστηρίζουν τη μετάβαση από τη θεωρία στον αλγοριθμικό σχεδιασμό:

##### **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

Το κεφάλαιο ορίζει το ερευνητικό πρόβλημα , προσδιορίζει το αντικείμενο και τους στόχους της έρευνας αναφορικά με τη μετάβαση στα δυναμικά συστήματα και την ανάγκη για ευφυή έλεγχο , ενώ θέτει και τα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα.

##### **Κεφάλαιο 2: : Βιβλιογραφική Ανασκόπηση σε κτίρια Γραφείων**

Περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, την επισκόπηση της σύγχρονης διεθνούς βιβλιογραφίας (2019-2025) , την ανάλυση υλοποιημένων μελετών περίπτωσης (Case Studies) για κινητικές όψεις και οπτικό προγραμματισμό και καταλήγει στα Συμπεράσματα της βιβλιογραφικής έρευνας.

##### **Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο και Κριτήρια Σχεδιασμού**

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η σχέση του φυσικού φωτισμού με την ανθρώπινη φυσιολογία, εξετάζοντας τους κυκλικούς ρυθμούς, την παραγωγικότητα, καθώς και το φαινόμενο και τις κατηγορίες της θάμβωσης (Glare). Ακολούθως, τεκμηριώνεται η μετάβαση από τα στατικά στα δυναμικά μετρικά συστήματα αξιολόγησης (Climate Based Daylight Metrics - CBDM), με αναλυτική παρουσίαση των δεικτών sDA, ASE και DGP. Τέλος, παρατίθεται το αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο, εξετάζοντας τις απαιτήσεις του LEED v4.1 (EQ Credit: Daylight) και του WELL v2 (Features L05 και L06).

##### **Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία και Υπολογιστικά Εργαλεία**

Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει συνολικά την μεθοδολογία της έρευνας και ξεκινά με την υπολογιστική ροή εργασίας (workflow) των 5 σταδίων—Σχεδιασμός, Προσομοίωση, Βελτιστοποίηση, Οπτικοποίηση, Αξιολόγηση—μέσω Rhinoceros 3D και Grasshopper. Περιγράφεται η διασύνδεση με τα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας (αρχεία EPW) μέσω των Ladybug Tools και η χρήση των μηχανών Radiance (για φυσικό φωτισμό με αντίστροφη ιχνηλάτηση και ορισμό υλικών 80/50/20). Καθορίζεται η γεωμετρία του πρότυπου γραφείου με νότιο προσανατολισμό, ο διαχωρισμός του παραθύρου σε Ζώνη Φωτισμού (1 m) και Ζώνη Θέας (2 m), καθώς και η τοποθέτηση οριζόντιων και κατακόρυφων πλεγμάτων αισθητήρων (θέσεις p1, p2). Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος "Detailed Dynamic Shading" (DDS) με τη διακριτοποίηση της κίνησης σε 361 γεωμετρικές καταστάσεις (states), η λογική αυτοματοποίησης και ο χρονοπρογραμματισμός (Scheduling) για τα τέσσερα εξεταζόμενα σενάρια προσομοίωσης (*base\_no\_blinds*, *static\_open*, *dynamic\_cutoff*, *well\_c\_dual\_zone*).

## **Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Συζήτηση**

Το κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην παράθεση, ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Μέσω ενός συγκεντρωτικού πίνακα κύριων δεικτών, αποτιμάται η απόδοση του φυσικού φωτισμού και η προστασία από τη θάμβωση (Glare Performance) για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια. Παράλληλα, εξετάζεται η συμμόρφωση του χώρου με τις απαιτήσεις του ανθρωποκεντρικού προτύπου WELL L06, αναλύεται το διάγραμμα Pareto μέσω της αντιπαράβολής των δεικτών sDA έναντι του ASE, και μελετώνται οι ετήσιες κατανομές καθώς και η ωριαία συμπεριφορά του φωτός.

## **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα**

Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα της έρευνας καθώς και μια συζήτηση για μελλοντική έρευνα όσον αφορά την εφαρμογή της Μηχανικής Μάθησης.

## **Παράρτημα και Βιβλιογραφία**

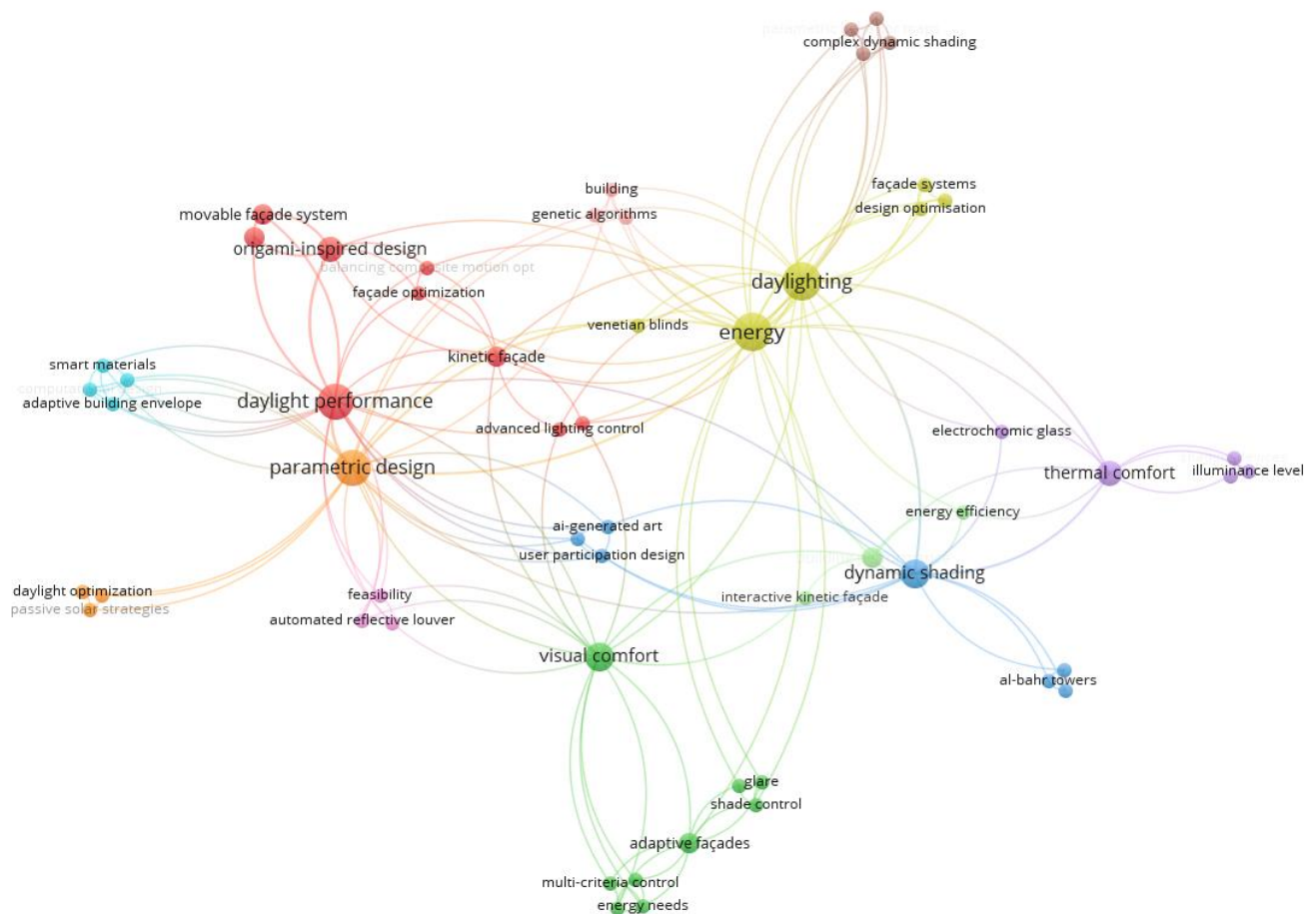
Η εργασία ολοκληρώνεται με το τελευταίο μέρος, το οποίο περιλαμβάνει το Παράρτημα με την Ροή εργασίας Point-In-Time View-Based προσομοίωσης φυσικού φωτισμού και αξιολόγησης θάμβωσης (DGP) μέσω Honeybee-Radiance. Στο τέλος καταγράφεται αναλυτικά η ελληνική και διεθνής Βιβλιογραφία που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την επιστημονική τεκμηρίωση της διατριβής.

## Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση σε κτίρια Γραφείων

### 2.1 Σύγχρονες Έρευνες και Βιβλιογραφικές Πηγές για δυναμικά συστήματα σκίασης

Η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα της τελευταίας πενταετίας στον τομέα των προσαρμοστικών και κινητικών προσώπων χαρακτηρίζεται από μια σαφή στροφή προς την πολυπαραγοντική βελτιστοποίηση, τη βιομημητική τεχνολογία και την ανθρωποκεντρική σχεδίαση (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022).

Για την ολοκληρωμένη κατανόηση του διεθνούς ερευνητικού πεδίου σχετικά με τα δυναμικά συστήματα σκίασης και τον παραμετρικό σχεδιασμό, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση και χαρτογράφηση των κυριότερων επιστημονικών πηγών. Με στόχο την αντικειμενική ανάδειξη των κυρίαρχων τάσεων και των θεματικών συσχετίσεων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **VOSviewer** για την οπτικοποίηση του δικτύου συν-εμφάνισης των λέξεων-κλειδιών, όπως αποτυπώνεται στην **εικόνα 1**.



Εικόνα 1: Χαρτογράφηση κυριότερων επιστημονικών πηγών και δικτύου λέξεων-κλειδιών μέσω του λογισμικού VOSviewer

Η οπτικοποίηση αυτή αναδεικνύει τις κύριες θεματικές ενότητες και τις μεταξύ τους διασυνδέσεις στον τομέα του προηγμένου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και της περιβαλλοντικής απόδοσης κτιρίων. Κεντρικό ρόλο στο δίκτυο κατέχουν οι έννοιες "parametric design", "daylight performance", "energy" και "dynamic shading", οι οποίες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα και λειτουργούν ως γέφυρες μεταξύ των επιμέρους ερευνητικών κατευθύνσεων. Το δίκτυο οργανώνεται σε διακριτές χρωματικές συστάδες (clusters) που αποτυπώνουν την πολυδιάστατη φύση του αντικειμένου και υπαγορεύουν τη δομή της υπάρχουσας ανασκόπησης.

Με βάση την εικόνα 1, χαρτογραφούνται ερευνητικά πεδία που συνθέτουν τον πυρήνα της σύγχρονης βιβλιογραφίας, με κεντρικό άξονα τον τομέα της Ενέργειας (**Energy**), ο οποίος λειτουργεί ως συνδετικός κόμβος που γεφυρώνει τον φυσικό φωτισμό, τη δυναμική σκίαση και τη θερμική άνεση. Η Απόδοση Φωτισμού (**Daylight Performance**) επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του φυσικού φωτός, αλληλεπιδρώντας άμεσα με τεχνικές όπως οι κινητικές προσόψεις (*kinetic facades*), ο προηγμένος έλεγχος φωτισμού (*advanced lighting control*) και το προσαρμοστικό κτιριακό περίβλημα (*adaptive building envelope*). Καθοριστικό μεθοδολογικό εργαλείο αποτελεί ο Παραμετρικός Σχεδιασμός (**Parametric Design**), ο οποίος συγκεντρώνει την υπολογιστική καινοτομία, τον σχεδιασμό origami, τις έξυπνες προσόψεις και τη μελέτη βιωσιμότητας (*design feasibility*), ενώ η Δυναμική Σκίαση (**Dynamic Shading**) εισάγει τεχνολογίες αιχμής, όπως το ηλεκτροχρωμικό γυαλί (*electrochromic glass*) και τις διαδραστικές κινητικές προσόψεις (*interactive kinetic facades*). Τέλος, η ανθρωποκεντρική διάσταση της έρευνας αποτυπώνεται στην Οπτική Άνεση (**Visual Comfort**)—η οποία ασχολείται με τον έλεγχο της **θάμβωσης (glare)**, τη διαχείριση σκίασης (*shade control*) και τις προσαρμοστικές προσόψεις (*adaptive facades*) με γνώμονα την εμπειρία του χρήστη. Η συνύπαρξη αυτών των όρων υπογραμμίζει μια σαφή ερευνητική τάση προς την εύρεση μιας ισορροπίας μεταξύ της ενεργειακής αποδοτικότητας, του βιοκλιματικού σχεδιασμού και της οπτικής/θερμικής άνεσης των χρηστών μέσω αυτοματοποιημένων και παραμετρικών λύσεων.

Πιο συγκεκριμένα, κυρίαρχη τάση της σύγχρονης βιβλιογραφίας αποτελεί η μετάβαση από τα συμβατικά μηχανικά συστήματα σκίασης προς προηγμένες γεωμετρικές διαμορφώσεις, όπως τα συστήματα που βασίζονται στην τέχνη του Origami και τις ψηφιδώσεις (tessellation) (Kizilörenli & Orhon, 2025). Πρόσφατες μελέτες προτείνουν κινητές προσόψεις βασισμένες σε μοτίβα ψηφιδώσεως που βελτιστοποιούν τον φυσικό φωτισμό και μειώνουν την υπερέκθεση στον ήλιο, επιτυγχάνοντας συμμόρφωση με αυστηρά πρότυπα όπως το LEED v4.1 (Le-Thanh et al., 2021; Kizilörenli & Orhon, 2025). Παράλληλα, η έρευνα εμβαθύνει στη σύγκριση μεταξύ δισδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) μετασχηματισμών, με τα ευρήματα να υποδεικνύουν ότι οι τρισδιάστατες μορφολογικές αλλαγές προσφέρουν ανώτερη απόδοση ως προς τον έλεγχο της θάμβωσης (DGP) και τη διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας, λειτουργώντας ως πολυλειτουργικά συστήματα (Hosseini et al., 2019). Η βελτιστοποίηση αυτών των σύνθετων γεωμετριών επιτυγχάνεται πλέον μέσω εξελιγμένων αλγορίθμων, όπως ο BCMO (Balancing Composite Motion Optimization), ο οποίος εξισορροπεί αποτελεσματικά τις αντικρουόμενες παραμέτρους της οπτικής άνεσης και της ενεργειακής απόδοσης (Le-Thanh et al., 2021).

Σημαντική εξέλιξη αποτελεί η ενσωμάτωση της βιομημητικής και των έξυπνων υλικών (smart materials) για την αντικατάσταση πολύπλοκων μηχανικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί σύστημα εμπνευσμένο από το λουλούδι Gazania, το οποίο χρησιμοποιεί φωτο-αποκριτικά πολυμερή μνήμης σχήματος (SMPs) για να αντιδρά αυτόματα στο φως χωρίς τη χρήση αισθητήρων ή κινητήρων, μιμούμενο τη κίνηση των φυτών (Sommese et al., 2024). Αυτή η προσέγγιση στοχεύει στη δημιουργία αυτόνομων συστημάτων που μειώνουν το κόστος συντήρησης και την πολυπλοκότητα κατασκευής,

γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ ψηφιακής προσομοίωσης και πρακτικής εφαρμογής (Sommese et al., 2024).

Σε μεθοδολογικό επίπεδο, η έρευνα έχει μετακινηθεί από την απλή ενεργειακή προσομοίωση στην πολυπαραγοντική βελτιστοποίηση (Multi-Objective Optimization) (Fang & Cho, 2019). Οι σύγχρονες μελέτες χρησιμοποιούν συνδυαστικά εργαλεία όπως το Grasshopper, το Ladybug/Honeybee και το Radiance για να δημιουργήσουν "Χάρτες Παραμετρικής Συμπεριφοράς" (Parametric Behavior Maps - PBM), οι οποίοι επιτρέπουν την αξιολόγηση χιλιάδων σεναρίων σε ετήσια βάση (Wu & Zhang, 2022). Στόχος δεν είναι πλέον μόνο η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας (EUI), αλλά η εύρεση της βέλτιστης ισορροπίας (trade-off) μεταξύ της ενεργειακής απόδοσης και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, με έμφαση στην οπτική άνεση και την αποφυγή της θάμβωσης (Wu & Zhang, 2022; Shi et al., 2020). Τέλος, αναδεικνύεται η έννοια της διαδραστικότητας (interactivity), όπου τα συστήματα σκίασης δεν αντιδρούν μόνο στις κλιματικές συνθήκες, αλλά και στη θέση και τις προτιμήσεις των χρηστών εντός του χώρου, προσφέροντας εξατομικευμένη άνεση (Hosseini et al., 2019; Tabadkani et al., 2021).

Αρχικά, παρατηρείται μια ισχυρή σύγκλιση στη βιβλιογραφία όσον αφορά τον βασικό στόχο και το αντικείμενο της έρευνας. Όλες οι πηγές συμφωνούν πως η ανάπτυξη συστημάτων πρόσοψης, και ειδικότερα των κινητικών ή προσαρμοστικών συστημάτων σκίασης, αποσκοπεί πρωτίστως στη βελτίωση της απόδοσης του φυσικού φωτισμού και τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (Lee et al., 2021).

Κεντρική επιδίωξη αποτελεί η βελτιστοποίηση του φυσικού φωτισμού με ταυτόχρονη πρόληψη της θάμβωσης, καθιστώντας την επίτευξη οπτικής άνεσης για τους χρήστες ως το βασικό μέτρο επιτυχίας (Eltaweel et al., 2021). Για την επίτευξη αυτών των στόχων, υπάρχει κοινή αποδοχή στη μεθοδολογία σχεδιασμού, η οποία βασίζεται σε υπολογιστικές και παραμετρικές προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται ευρέως λογισμικά όπως το Grasshopper και το Rhinoceros 3D για τη δημιουργία μορφών, σε συνδυασμό με πρόσθετα περιβαλλοντικής ανάλυσης όπως τα Ladybug και Honeybee, τα οποία συνδέονται με μηχανές προσομοίωσης όπως η Radiance για τον φωτισμό και το EnergyPlus για την ενέργεια (Shi et al., 2020; Wu & Zhang, 2022). Επιπλέον, η διαδικασία βελτιστοποίησης ενισχύεται από τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, όπως το Galapagos (Samadi et al., 2020). Η αξιολόγηση της απόδοσης γίνεται με κοινούς δείκτες που βασίζονται στο κλίμα (CBDM), συμπεριλαμβανομένων των Spatial Daylight Autonomy (sDA), Useful Daylight Illuminance (UDI) και δεικτών θάμβωσης όπως το Daylight Glare Probability (DGP) (Sommese et al., 2024; Kizilörenli & Orhon, 2025).

Η σύγχρονη έρευνα έχει εστιάσει με μεγάλη επιτυχία στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων σκίασης που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των παραδοσιακών περσίδων, χρησιμοποιώντας τον παραμετρικό σχεδιασμό ως βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης. Η χρήση συστημάτων **split louver** (διαιρεμένων περσίδων) επιτρέπει τον λειτουργικό διαχωρισμό της πρόσοψης, όπου το άνω τμήμα ανακατευθύνει το φυσικό φως προς την οροφή για βαθύτερη διείσδυση στο χώρο, ενώ το κάτω τμήμα ελέγχει την ένταση του φωτισμού και προστατεύει από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Alsukkar, Hu, Eltaweel & Su, 2022). Η παραμετρική ρύθμιση των γωνιών των περσίδων μπορεί να βελτιώσει θεαματικά την ομοιομορφία του φωτισμού, μειώνοντας την ανάγκη για τεχνητό φως έως και 70% κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Alsukkar, Hu, Eltaweel & Su, 2022).

Μια ιδιαίτερη πτυχή της επιτυχίας στην έρευνα αφορά τη γεωμετρία των ίδιων των περσίδων, καθώς διαπιστώθηκε ότι τα ειδικά σχήματα υπερέχουν σημαντικά των συμβατικών λύσεων. Οι περσίδες με ειδικό καμπυλωτό προφίλ (retro shape) στο επάνω τμήμα του split louver προσφέρουν την καλύτερη απόδοση, καλύπτοντας τις ανάγκες φωτισμού στο 90% του χώρου εργασίας εντός των προτεινόμενων

ορίων και εξαλείφοντας την ανάγκη για πρόσθετα εσωτερικά στόρια (Alsukkar, Hu, Alkhater & Su, 2023). Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών υλικών, όπως το φωτοβολταϊκό γυαλί (PV glass) στο κάτω τμήμα των split louvers, επιτρέπει την ταυτόχρονη παραγωγή καθαρής ενέργειας και τον έλεγχο της φωτεινότητας κοντά στο παράθυρο. Αυτή η προσέγγιση επιλύει αποτελεσματικά το πρόβλημα της οπτικής δυσφορίας, διατηρώντας την πιθανότητα θάμβωσης (DGP) σε επίπεδα κάτω του 0.35, γεγονός που θεωρείται "μη αισθητή θάμβωση" για τους χρήστες (Alsukkar, Alkhater, Su & Ibrahim, 2025). Τέλος, η εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης έχει επιτρέψει την ταυτόχρονη ικανοποίηση αντικρουόμενων στόχων μέσω της χρήσης τραπεζοειδών περσίδων και πολυ-αντικειμενικής βελτιστοποίησης (MOO). Η μεθοδολογία αυτή επιτυγχάνει κάλυψη του ωφέλιμου φυσικού φωτισμού (UDI) , διασφαλίζοντας ότι ο χώρος παραμένει φωτεινός χωρίς να προκαλείται υπερθέρμανση ή ενοχλητικές αντανάκλασεις (Ibrahim, Alsukkar, Dong & Hu, 2025).

## 2.2 Βιβλιογραφική αναφορά υλοποιημένων παραδειγμάτων

Το κεφάλαιο εστιάζει στην Ανάλυση Υλοποιημένων Παραδειγμάτων από την βιβλιογραφία, εξετάζοντας κτίρια γραφείων που ενσωματώνουν δυναμικές προσόψεις ή προηγμένα συστήματα σκίασης. Μέσω αυτών των παραδειγμάτων, αναδεικνύεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης στρατηγικών δυναμικής σκίασης σε κτίρια γραφείων για τη βελτιστοποίηση της οπτικής άνεσης και τη διαχείριση της θάμβωσης. Οι ακόλουθες μελέτες περίπτωσης διακρίνονται με βάση την καινοτόμο χρήση συστημάτων - είδος σκίασης .Ο συνολικός στόχος είναι να παρέχει μια ευρύτερη προοπτική στην ενσωμάτωση των αρχών σχεδιασμού σκίασης με πρωτοποριακά εργαλεία παραμετρικού σχεδιασμού.

**Πίνακας 1 : Συγκριτικός πίνακας βιβλιογραφικής αναφοράς υλοποιημένων παραδειγμάτων (Πύργοι Al-Bahar, Q1 ThyssenKrupp, Triangle Cologne)**

| Έργο (Project)              | Αρχιτέκτονας         | Τοποθεσία          | Έτος | Είδος Σκίασης                                                         | Υλικό είδους σκίασης                                           | Κλίμα                       |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Πύργοι Al-Bahar             | Aedas                | ΗΑΕ , Αμπού Ντάμπι | 2012 | μηχανική προσαρμοζόμενη πρόσοψη ( <b>mechanical adaptive facade</b> ) | Σύνθετο υλικό (τέντες/panels) / Fiberglass με επικάλυψη Teflon | Θερμό Ξηρό (Hot Arid)       |
| Q1 ThyssenKrupp Headquarter | JSWD Architects      | Έσσεν, Γερμανία    | 2010 | Περιστρεφόμενα <b>πετερύγια (Fins)</b> με οριζόντιες περσίδες         | Ανοξείδωτος χάλυβας (Nirosta 4404)                             | Κεντρικής Ευρώπης (Εύκρατο) |
| Triangle Cologne            | Gatermann + Schossig | Κολωνία, Γερμανία  | 2007 | Εσωτερικές <b>περσίδες (Louvers)</b> σε διπλή όψη (double facade)     | Γυαλί / Μέταλλο                                                | Κεντρικής Ευρώπης (Εύκρατο) |

## Al-Bahar Towers (Άμπου Ντάμπι, ΗΑΕ)



| Έργο (Project)  | Αρχιτέκτονας | Τοποθεσία          | Έτος | Είδος Σκίασης                                                | Υλικό είδους σκίασης                                           | Γραφείο     |
|-----------------|--------------|--------------------|------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------|
| Πύργοι Al-Bahar | Aedas        | ΗΑΕ , Άμπου Ντάμπι | 2012 | μηχανική προσαρμοζόμενη πρόσοψη (mechanical adaptive facade) | Σύνθετο υλικό (τέντες/panels) / Fiberglass με επικάλυψη Teflon | NAI Γραφεία |

Εικόνα 2: Πύργοι Al-Bahar

### 2.2.1. Πύργοι Al-Bahar (2012)

Οι Πύργοι Al-Bahar, οι οποίοι ολοκληρώθηκαν το 2012 στο Άμπου Ντάμπι των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων υπό τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του γραφείου Aedas, αποτελούν ένα από τα πιο χαρακτηριστικά και ευρέως μελετημένα παραδείγματα εφαρμογής κινητικής ανταποκρινόμενης πρόσοψης στην πραγματική κατασκευή κτιρίων γραφείων.

Όσον αφορά τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το σύστημα σκίασης αποτελεί μια μηχανική προσαρμοζόμενη πρόσοψη (mechanical adaptive facade), η οποία ενσωματώνει 1049 εξαγωνικά πάνελ. Τα πάνελ αυτά είναι κατασκευασμένα από ένα εξειδικευμένο σύνθετο υλικό (τέντες/panels) και συγκεκριμένα από fiberglass με εξωτερική επικάλυψη Teflon. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι άμεσα εμπνευσμένος από την παραδοσιακή τέχνη του Origami, αξιοποιώντας τεχνικές αναδίπλωσης (mountain and valley folding) που επιτρέπουν στα σκίαστρα να λειτουργούν με έναν μηχανισμό που προσομοιάζει τη λειτουργία ομπρέλας (Le-Thanh et al., 2021). Μια κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρος της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι ο αυστηρά συμμετρικός σχεδιασμός της, όπου όλα τα επιμέρους τμήματα της κινητής μονάδας εκτελούν την ίδια ακριβώς κίνηση (Le-Thanh et al., 2021).

Η στρατηγική ελέγχου και η διαχείριση της θάμβωσης βασίζονται στην ενεργή λειτουργία των πάνελ, τα οποία ελέγχουν τον φυσικό φωτισμό και ελαχιστοποιούν τη θάμβωση στο εσωτερικό του κτιρίου (Tabadkani et al., 2021). Λόγω της συμμετρικής φύσης του συστήματος, το άνοιγμα πραγματοποιείται ομοιόμορφα από όλες τις πλευρές της κάθε μονάδας, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα πολλαπλών και διαφορετικών διαμορφώσεων σε μικρο-κλίμακα (Le-Thanh et al., 2021). Παρόλα αυτά, το σύστημα παρουσιάζει μια ανομοιόμορφη κατανομή των λειτουργικών μονάδων του στο ίδιο βάθος της πρόσοψης, αλληλεπιδρώντας μορφολογικά με το περιβάλλον μέσω αισθητήρων και ενεργοποιητών με απώτερο σκοπό την ενίσχυση της οπτικής και θερμικής άνεσης (Hosseini et al., 2019; Sommesse et al., 2024).

Συμπερασματικά, από άποψη ενεργειακής απόδοσης και άνεσης των χρηστών, έχει αποδειχθεί ότι η συγκεκριμένη λύση σκίασης των Πύργων Al-Bahar επιτυγχάνει μείωση των θερμικών κερδών από την ηλιακή ακτινοβολία κατά 50%, βελτιώνοντας παράλληλα την ορατότητα προς το εξωτερικό περιβάλλον (Hosseini et al., 2019; Sommesse et al., 2024). Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζονται οι απαραίτητες συνθήκες οπτικής ποιότητας για τους εργαζόμενους, αναδεικνύοντας το έργο ως ορόσημο για τις σύγχρονες δυναμικές όψει

### Q1 ThyssenKrupp Headquarter



| Έργο (Project)              | Αρχιτέκτονας    | Τοποθεσία       | Έτος | Είδος Σκίασης                                         | Υλικό είδους σκίασης               | Γραφείο |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|---------|
| Q1 ThyssenKrupp Headquarter | JSWD Architects | Έσσεν, Γερμανία | 2010 | Περιστροφόμενα πτερύγια (Fins) με οριζόντιες περσίδες | Ανοξείδωτος χάλυβας (Nirosta 4404) | NAI     |

Εικόνα 3: Q1 ThyssenKrupp Headquarter

#### 2.2.2. Q1 ThyssenKrupp Headquarter (2010)

Το κτίριο διοίκησης Q1 της ThyssenKrupp, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2010 στο Έσσεν της Γερμανίας από το αρχιτεκτονικό γραφείο JSWD Architects, ξεχωρίζει στον τομέα των κτιρίων γραφείων για τον σχεδιασμό του που βασίζεται στη δυναμική σχέση «κελύφους και πυρήνα», όπου η εξωτερική πρόσοψη λειτουργεί ως ένα προστατευτικό κέλυφος.

Αναλύοντας τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τα υλικά του έργου, το σύστημα σκίασης αποτελείται από περιστρεφόμενα πτερύγια (fins) με οριζόντιες περσίδες (lamellas). Συνολικά, περίπου 400.000 οριζόντιες περσίδες συνθέτουν μεγαλύτερα τριγωνικά και τραπεζοειδή πτερύγια, τα οποία κατασκευάζονται από ειδικό ανοξείδωτο χάλυβα (Nirosta 4404) με ματ φινίρισμα (Böke et al., 2020). Η κίνηση και η περιστροφή των πτερυγίων αυτών πραγματοποιείται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα μέσω 1.600 μικρών ηλεκτρικών κινητήρων, ενώ η γεωμετρία και η διάταξή τους επιτρέπουν την εξαιρετικά αποτελεσματική διαχείριση του φωτός.

Η στρατηγική ελέγχου του συστήματος και η διαχείριση της θάμβωσης συνδυάζουν τον κεντρικό αυτοματισμό με τη δυνατότητα τοπικής παρέμβασης. Τα πτερύγια είναι προγραμματισμένα να ακολουθούν την τροχιά του ήλιου (sun-tracking) ώστε να παρέχουν τη μέγιστη δυνατή σκίαση και να αποτρέπουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προκαλεί θάμβωση. Σε αντίθεση όμως με άλλα αυστηρά αυτοματοποιημένα συστήματα, εδώ παρέχεται στους χρήστες η δυνατότητα χειροκίνητης παράκαμψης (manual override), επιτρέποντας στους εργαζόμενους να ρυθμίζουν τη θέα προς τα έξω ή τα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με τις προσωπικές τους προτιμήσεις, ενισχύοντας την αίσθηση ελέγχου και την οπτική τους άνεση (Böke et al., 2020).

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα του σχεδιασμού, το οποίο επιλύει βασικά πρακτικά ζητήματα των δυναμικών προσόψεων, αφορά την προσβασιμότητα για τη συντήρηση του κτιρίου. Μεταξύ του συστήματος σκίασης και του κυρίως κτιρίου έχει προβλεφθεί ένας ειδικός διάδρομος (catwalk), ο οποίος επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση στα μηχανικά μέρη και τις περσίδες για εργασίες καθαρισμού ή επισκευών (Böke et al., 2020). Τέλος, η εγκατάσταση μετεωρολογικού σταθμού στην οροφή διασφαλίζει ότι το σύστημα προσαρμόζεται άμεσα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, παρακάμπτοντας το πρόγραμμα ηλιακής παρακολούθησης όταν αυτό απαιτείται για λόγους ασφαλείας (Böke et al., 2020).

### Triangle Cologne



| Έργο (Project)   | Αρχιτέκτονας         | Τοποθεσία         | Έτος | Είδος Σκίασης                                              | Υλικό είδους σκίασης | Γραφείο |
|------------------|----------------------|-------------------|------|------------------------------------------------------------|----------------------|---------|
| Triangle Cologne | Gatermann + Schossig | Κολωνία, Γερμανία | 2007 | Εσωτερικές περσίδες (Louvres) σε διπλή όψη (double facade) | Γυαλί / Μέταλλο      | NAI     |

Εικόνα 4: Triangle Cologne

#### 2.2.3. Triangle Cologne (2007)

Ο ουρανοξύστης Triangle, ο οποίος κατασκευάστηκε το 2007 στην Κολωνία της Γερμανίας υπό τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των Gatermann + Schossig, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κτιρίου γραφείων που εφαρμόζει τη στρατηγική της διπλής όψης (double skin facade) για την επίτευξη οπτικής και θερμικής άνεσης.

Όσον αφορά τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τα χρησιμοποιούμενα υλικά, το σύστημα σκίασης του κτιρίου αποτελείται από εσωτερικές περσίδες (blinds/louvres) από γυαλί και μέταλλο, οι οποίες είναι τοποθετημένες προστατευμένες στο διάκενο της όψης ή στην εσωτερική πλευρά. Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει τη χρήση υλικών χαμηλότερης ανθεκτικότητας συγκριτικά με τις εξωτερικές περσίδες, καθώς αυτά προστατεύονται από τις άμεσες καιρικές συνθήκες, ενώ παράλληλα συμβάλλει ενεργά στην ηχομόνωση και τη θερμική μόνωση του κτιρίου (Böke et al., 2020).

Η στρατηγική ελέγχου και η διαχείριση της θάμβωσης βασίζονται σε ένα κεντρικό αυτοματοποιημένο σύστημα, το οποίο ρυθμίζει την κλίση των περσίδων ανάλογα με την εκάστοτε θέση του ήλιου. Ωστόσο, για την ενίσχυση της προσωπικής άνεσης των χρηστών, το σύστημα ενσωματώνει τη δυνατότητα χειροκίνητης παράκαμψης (manual override). Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στους εργαζόμενους να προσαρμόζουν αυτόνομα την κλίση ή τη θέση των περσίδων,

ελέγχοντας την εισροή του φωτός και την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον βάσει των ατομικών τους προτιμήσεων (Böke et al., 2020).

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αναδεικνύει τη σημασία της αποκεντρωμένης λειτουργίας σε ένα κεντρικά ελεγχόμενο σύστημα. Παρόλο που οι παράμετροι ρυθμίζονται κεντρικά για τη βελτιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης, η δυνατότητα τοπικής παρέμβασης διασφαλίζει την ικανοποίηση των χρηστών. Συνεπώς, το σύστημα διπλής όψης με ενσωματωμένη σκίαση αποτελεί μια δοκιμασμένη και αποδοτική λύση για κτίρια γραφείων υψηλών απαιτήσεων, προσφέροντας μια ισορροπημένη σχέση μεταξύ της προστασίας από τη θάμβωση και της διατήρησης της θέας (Böke et al., 2020)

### 2.3 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής έρευνας

Η ανάλυση της σύγχρονης βιβλιογραφίας και η αξιολόγηση των υλοποιημένων μελετών περίπτωσης αποκαλύπτουν μια σειρά από κρίσιμα ερευνητικά κενά που περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή των δυναμικών συστημάτων σκίασης. Αρχικά, παρατηρείται μια μονομερής εστίαση της βιβλιογραφίας στην ενεργειακή απόδοση και τα πρότυπα τύπου LEED, αφήνοντας σε δεύτερη μοίρα την ανθρωποκεντρική προσέγγιση που πρεσβεύουν νεότερα πρότυπα όπως το WELL. Ενώ οι μετρήσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι εκτενείς, υπάρχει ερευνητικό έλλειμμα όσον αφορά την ενσωμάτωση παραμέτρων που αφορούν τη βιολογική υγεία του χρήστη, όπως ο κirkάδιος φωτισμός και η ποιότητα της θέας (view clarity), στις παραμετρικές προσομοιώσεις. Η πλειονότητα των υφιστάμενων στρατηγικών ελέγχου αποτυγχάνει να συνδέσει τη δυναμική συμπεριφορά της πρόσοψης με την ψυχοφυσιολογική ευεξία του εργαζομένου, αντιμετωπίζοντας τη σκίαση κυρίως ως ένα μηχανικό πρόβλημα αποφυγής του ήλιου και όχι ως ένα εργαλείο βελτίωσης της ανθρώπινης υγείας (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022).

Ένα επιπλέον κρίσιμο κενό εντοπίζεται στη μετάβαση από τον σχεδιασμό της μορφής (form) στον σχεδιασμό της «συμπεριφοράς» (behavior) μέσω ευφυούς αλγοριθμικού ελέγχου. Στην τρέχουσα κατάσταση, συχνά απουσιάζουν στρατηγικές ελέγχου (control logic) που να επιτυγχάνουν μια δυναμική ισορροπία μεταξύ αντικρουόμενων στόχων: τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης του φωτός στο βάθος του χώρου ( $sDA > 55\%$ ) και την ταυτόχρονη αποτροπή της θάμβωσης ( $ASE < 10\%$  και  $DGP < 0.35-0.40$ ). Οι περισσότερες εφαρμογές καταλήγουν είτε σε πλήρη συσκότιση του χώρου είτε σε ανομοιόμορφη κατανομή φωτεινότητας που προκαλεί οπτική κόπωση.

Το λειτουργικό έλλειμμα που προκύπτει από την ενιαία και συμμετρική κίνηση των δυναμικών συστημάτων τεκμηριώνεται μέσα από την ανάλυση της κινητικής πρόσοψης των **Πύργων Al-Bahar** (Tabadkani et al., 2021). Ερευνητές αναφέρουν ότι η αυστηρά συμμετρική κίνηση των μονάδων origami περιορίζει τη δυνατότητα πολλαπλών διαμορφώσεων σε μικρο-κλίμακα (Le-Thanh et al., 2021). Όταν το σύστημα αναγκάζεται να κλείσει ομοιόμορφα για να αντιμετωπίσει τη θάμβωση, περιορίζει δραματικά τη διείσδυση του χρήσιμου φυσικού φωτός στο βάθος του χώρου και αποκόπτει την ορατότητα προς τα έξω (Hosseini et al., 2019; Sommesse et al., 2024). Αυτό το γεγονός αναδεικνύει την ανάγκη για συστήματα split louver (διαιρεμένων περσίδων), τα οποία επιτρέπουν τον λειτουργικό διαχωρισμό της πρόσοψης σε άνω ζώνη ανακατεύθυνσης του φωτός και κάτω ζώνη προστασίας (Alsukkar et al., 2022).

Η αποτυχία των τυπικών αυτοματισμών sun-tracking να εξασφαλίσουν την πραγματική ανθρώπινη άνεση επιβεβαιώνεται από την ανάλυση υλοποιημένων έργων, όπως το **ThyssenKrupp Q1** και το **Triangle Cologne** (Böke et al., 2020). Τα συστήματα αυτά καθοδηγούνται τυφλά από τη θέση του ήλιου, χωρίς καμία ανατροφοδότηση για την πραγματική κατάσταση ή τη θέση του εργαζομένου στο εσωτερικό. Η ανάγκη των συγκεκριμένων κτιρίων να εισαγάγουν δυνατότητες χειροκίνητης παράκαμψης του αυτοματισμού αποδεικνύει ότι η γεωμετρική και μόνο προσέγγιση αποτυγχάνει να εξασφαλίσει την ανθρώπινη ευεξία. Υπάρχει, επομένως, ένα κρίσιμο ερευνητικό έλλειμμα στη βιβλιογραφία και την πράξη, καθώς απουσιάζουν έξυπνες, πολυ-ζωνικές στρατηγικές ελέγχου που να εξισορροπούν τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης του φωτός στο βάθος του χώρου με την ταυτόχρονη προστασία από τη θάμβωση.

#### Typical Office Floor Plan



Εικόνα 5: Κάτοψη κτιρίου ThyssenKrupp Q1

Αναδεικνύεται με σαφήνεια στην εικόνα 5 το κλασικό πρόβλημα των βαθιών κατόψεων γραφείων. Οι χώροι γραφείων (Offices) που αποτυπώνονται στην περίμετρο του κτιρίου έχουν άμεση πρόσβαση σε φυσικό φωτισμό μέσω των υαλοστασίων, ενώ οι κεντρικές ζώνες — όπου εντοπίζονται οι κυκλοφορίες, οι ανελκυστήρες (Elevators) και οι βοηθητικοί χώροι — παραμένουν σε μόνιμο υποφωτισμό. Σε κατόψεις μεγάλου βάθους, το φυσικό φως αδυνατεί να διεισδύσει πέραν των 5–7 μέτρων από την περίμετρο, δημιουργώντας εκτεταμένες σκοτεινές ζώνες που εξαρτώνται αποκλειστικά από τεχνητό φωτισμό.

Η εργασία έρχεται να καλύψει αυτά τα κενά προτείνοντας τη χρήση παραμετρικά βελτιστοποιημένων συστημάτων «Split-Blinds». Η προσέγγιση αυτή στοχεύει σε μια μεθοδολογία που εξασφαλίζει την οπτική επαφή με το περιβάλλον μέσω της κάτω ζώνης (View Zone) και τη βαθιά διείσδυση του φωτός μέσω της άνω ζώνης (Daylight Zone). Η έρευνα προσδοκά να αποδείξει ότι η βελτίωση της πρακτικότητας και της ομοιομορφίας του φωτισμού μπορεί να συμβαδίσει με την πλήρη συμμόρφωση στα αυστηρά πρότυπα LEED και WELL, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη λύση για τα σύγχρονα κτίρια γραφείων.

## Κεφάλαιο 3 : Θεωρητικό Υπόβαθρο και Κριτήρια Σχεδιασμού

### 3.1. Φυσικός Φωτισμός και Ανθρώπινη Φυσιολογία

#### 3.1.1. Οπτική Άνεση και Υγεία: Κιρκάδιοι ρυθμοί και παραγωγικότητα

Η όραση αποτελεί μια εξαιρετικά σύνθετη ψυχο-φυσιολογική λειτουργία, η οποία δεν περιορίζεται στην απλή μηχανική λήψη εικόνων, αλλά συνδέει άρρηκτα τον άνθρωπο με το περιβάλλον του και διαδραματίζει κεντρικό ρυθμιστικό ρόλο στη συνολική του φυσιολογία. Το σύστημα της όρασης συνδέεται με τον εγκέφαλο αφενός μέσω της οπτικής οδού για τη μηχανική απόδοση της εικόνας μέσω κωνίων και ραβδίων, και αφετέρου μέσω μιας δεύτερης, εξειδικευμένης νευρικής οδού. Αυτή η δεύτερη οδός επικοινωνίας βασίζεται στα ειδικά γαγγλιακά κύτταρα ipRGC, τα οποία συνδέονται απευθείας με το κεντρικό ρυθμιστικό κέντρο του εγκέφαλου, ελέγχοντας τους κιρκάδιους ρυθμούς, δηλαδή το βιολογικό μας ρολόι εικοσιτετράωρης περιόδου. Μέσω αυτής της διαδικασίας ελέγχεται άμεσα η έκκριση της ορμόνης μελατονίνης, η οποία επάγει τον ύπνο. Το φυσικό φως, όντας πλούσιο στα μικρά μήκη κύματος του μπλε φάσματος, καταστέλλει δραστικά τη μελατονίνη κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ αντίθετα, η ανεπαρκής έκθεση σε αυτό στους εσωτερικούς χώρους απορρυθμίζει το βιολογικό ρολόι, πλήττοντας σημαντικά την υγεία, την ευεξία και την παραγωγικότητα των εργαζομένων (Edwards & Torcellini, 2002).

Κεντρικό εύρημα της σύγχρονης έρευνας είναι ότι οι βιοφυσικές διεργασίες που διέπουν την κιρκάδια ρύθμιση διαφέρουν ουσιαστικά από εκείνες που διέπουν την όραση. Ενώ η οπτική απόδοση εξαντλείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα φωτισμού (περίπου 500 lux στην επιφάνεια εργασίας), το κιρκάδιο σύστημα απαιτεί σημαντικά υψηλότερα επίπεδα έντασης φωτός για να ενεργοποιηθεί επαρκώς. Συγκεκριμένα, μια έκθεση μίας ώρας στα 500 lux μόλις και μετά βίας διεγείρει το κιρκάδιο σύστημα, παρόλο που παρέχει πλήρως επαρκή φωτισμό για οπτική απόδοση. Τα τυπικά επίπεδα φωτισμού εσωτερικών χώρων (300–500 lux στην επιφάνεια εργασίας, ή περίπου 100–200 lux στον κόρνεα του ματιού) είναι, κατά συνέπεια, πιθανώς ανεπαρκή για την υποστήριξη της κιρκάδιας ρύθμισης, σε αντίθεση με τα επίπεδα φυσικού φωτισμού σε εξωτερικούς χώρους που κυμαίνονται από 2.000 έως 100.000 lux. Αυτό σημαίνει ότι άτομα που εργάζονται σε χώρους χωρίς επαρκή πρόσβαση σε φυσικό φωτισμό — ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες — ενδέχεται να βιώνουν κιρκάδια αποσύγχρονη με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία τους (Rea et al., 2002).

Το φυσικό φως, όντας πλούσιο στα μικρά μήκη κύματος του μπλε φάσματος (420–480 nm), καταστέλλει δραστικά τη μελατονίνη κατά τη διάρκεια της ημέρας, συμβάλλοντας στη διατήρηση της εγρήγορης και της παραγωγικότητας. Αντίθετα, η ανεπαρκής έκθεση σε φυσικό φωτισμό κατά τις ώρες εργασίας απορρυθμίζει το βιολογικό ρολόι, πλήττοντας σημαντικά την υγεία, την ευεξία και την παραγωγικότητα των εργαζομένων. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε βόρεια γεωγραφικά πλάτη, όπου έως και 9,4% του πληθυσμού εμφανίζει κάποιου βαθμού εποχιακή συναισθηματική διαταραχή κατά τους χειμερινούς μήνες (Rea et al., 2002).

Η οπτική άνεση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την υγεία των χρηστών ενός κτιρίου, καθώς συνδέεται άμεσα με τη ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού, δηλαδή του εσωτερικού βιολογικού ρολογιού που ελέγχει τον κύκλο ύπνου και εγρήγορης (Safranek et al., 2020). Η έκθεση σε κατάλληλο φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των φυσιολογικών ορμονικών επιπέδων, ενώ η έλλειψη οπτικών ερεθισμάτων ή ο κακός σχεδιασμός του φωτισμού μπορεί να διαταράξει αυτή τη βιολογική ισορροπία (Safranek et al., 2020).

Η ποιότητα του οπτικού περιβάλλοντος επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα των εργαζομένων, καθώς οι ακατάλληλες συνθήκες φωτισμού συνδέονται με την εμφάνιση οπτικής κόπωσης,

πονοκεφάλων και μειωμένης συγκέντρωσης (Hamadah et al., 2023). Αντίθετα, ένας σχεδιασμός που μεγιστοποιεί τη χρήση του φυσικού φωτός και εξασφαλίζει οπτική άνεση μπορεί να ενισχύσει την εγρήγορση και την αποδοτικότητα στο εργασιακό περιβάλλον (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007). Μελέτες έχουν δείξει ότι οι παρεμβάσεις που στοχεύουν στην ευεξία των χρηστών μέσω της βελτίωσης των εσωτερικών συνθηκών λειτουργούν ως αποτελεσματικό εργαλείο για την αύξηση της εργασιακής απόδοσης (Hamadah et al., 2023).

Επιπλέον, η διαχείριση της πρόσβασης στο φυσικό φως μέσω δυναμικών συστημάτων σκίασης είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει στους χρήστες να ρυθμίζουν το περιβάλλον τους ανάλογα με τις ανάγκες τους, προάγοντας τόσο την οπτική όσο και τη μη-οπτική υγεία (Rockcastle et al., 2023). Ο βιώσιμος σχεδιασμός οφείλει να ενσωματώνει αυτές τις παραμέτρους, διασφαλίζοντας ότι το κτίριο δεν παρέχει μόνο οπτική επάρκεια αλλά υποστηρίζει ενεργά τη βιολογική ευεξία των ενοίκων του (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007).

### 3.1.2. Το φαινόμενο της Θάμβωσης (Glare): Ορισμοί και κατηγορίες

Η θάμβωση ορίζεται ως η δυσμενής οπτική κατάσταση που προκύπτει από την παρουσία υπερβολικής φωτεινότητας εντός του οπτικού πεδίου, η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη φωτεινότητα στην οποία είναι προσαρμοσμένα τα μάτια. Σύμφωνα με τον ορισμό της IESNA (2000), πρόκειται για «την αίσθηση που προκαλείται όταν η λαμπρότητα στο οπτικό πεδίο είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα στην οποία είναι προσαρμοσμένα τα μάτια και προκαλεί ενόχληση, δυσφορία ή μείωση της απόδοσης ή/και της ορατότητας». Το φαινόμενο αυτό αποτελεί μία από τις κυριότερες αιτίες οπτικής δυσφορίας στους εργασιακούς χώρους, καθώς μπορεί να προκαλέσει τόσο άμεση ενόχληση όσο και μακροχρόνια απώλεια της οπτικής ικανότητας (Rockcastle et al., 2023). Στο πλαίσιο του προτύπου WELL v2, ο έλεγχος της θάμβωσης είναι υποχρεωτικός για τη διασφάλιση της άνεσης και της συγκέντρωσης των χρηστών (Kokatnur et al., 2025).

Στο εσωτερικό των κτηρίων παρατηρούνται κυρίως δύο είδη θάμβωσης. Η **Θάμβωση Αναπηρίας (Disability Glare)** εμποδίζει άμεσα την όραση από μία έντονη πηγή φωτός, η οποία εμποδίζει τον χρήστη να διακρίνει λεπτομέρειες ή αντικείμενα. Ο μηχανισμός ανάπτυξής της είναι γνωστός και αφορά τη σκέδαση φωτός στο υαλώδες σώμα του ματιού, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίθεσης στην εικόνα που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή. Η αντίδραση στη θάμβωση ανικανότητας είναι συνήθως άμεση, με τροποποίηση της θέσης εργασίας ή της κατεύθυνσης παρατήρησης (Safranek et al., 2020). Η **Θάμβωση Δυσφορίας (Discomfort Glare)** αναφέρεται στην αίσθηση ενόχλησης που βιώνει ο χρήστης χωρίς απαραίτητα να μειώνεται η ικανότητα όρασης· ωστόσο, παρόλο που δεν ανιχνεύεται πάντα άμεσα, έχει αποδειχθεί ότι συσσωρευτικά οδηγεί σε οπτική κόπωση και μειωμένη παραγωγικότητα, όπως πονοκεφάλους και μειωμένη απόδοση (Hamadah et al., 2023). Συχνά παρατηρούνται και τα δύο είδη ταυτόχρονα, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον διαχωρισμό της αιτίας.

Πέραν των δύο βασικών κατηγοριών, διακρίνεται επίσης η **Άμεση και η Ανακλώμενη Θάμβωση** ως προς την προέλευση της πηγής. Η **άμεση θάμβωση** προέρχεται από φωτεινές πηγές που βρίσκονται άμεσα στο οπτικό πεδίο του χρήστη, όπως ο ήλιος ή τα φωτιστικά σώματα, των οποίων η λαμπρότητα υπερβαίνει σημαντικά τη λαμπρότητα προσαρμογής του ματιού. Η ένταση της αίσθησης αυξάνεται όταν οι πηγές αυτές εμφανίζονται κεντρικά στο πεδίο όρασης και έχουν μεγάλες διαστάσεις, όπως συμβαίνει στην περίπτωση εκτεταμένων υαλοστασίων υψηλής διαπερατότητας (Τσαγκρασούλης, 2015).

Η εκτίμηση της θάμβωσης δυσφορίας βασίζεται σε τέσσερις βασικές παραμέτρους: τη λαμπρότητα της πηγής, τη λαμπρότητα του υποβάθρου, το μέγεθος και τον αριθμό των πηγών, καθώς και τη

σχετική τους θέση ως προς τον παρατηρητή. Για την ποσοτική αποτύπωση έχουν αναπτυχθεί ειδικοί δείκτες, όπως ο DGI (Daylight Glare Index), ο DGP (Daylight Glare Probability) και ο UGR (Unified Glare Rating), με τον UGR να χρησιμοποιείται κατεξοχήν για συστήματα τεχνητού φωτισμού (Τσαγκρασούλης, 2015).

Η αντιμετώπιση του φαινομένου απαιτεί συγκεκριμένες στρατηγικές σχεδιασμού, όπως η σωστή τοποθέτηση των θέσεων εργασίας σε σχέση με τα παράθυρα και η χρήση δυναμικών συστημάτων σκίασης (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007). Ο έλεγχος της θάμβωσης από τον ίδιο τον χρήστη μέσω χειροκίνητων ή αυτοματοποιημένων σκιάστρων είναι κρίσιμος, καθώς επιτρέπει τη διατήρηση της οπτικής υγείας χωρίς να αποκλείεται πλήρως η επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (Rockcastle et al., 2023). Επιπλέον, η επιλογή υλικών με χαμηλό δείκτη ανάκλασης στις εξωτερικές επιφάνειες συμβάλλει στη μείωση των δευτερογενών πηγών θάμβωσης, ενισχύοντας τη συνολική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Luo et al., 2021).

### 3.2. Μετρικά Συστήματα Αξιολόγησης (Metrics)

#### 3.2.1. Στατικά vs Δυναμικά Μετρικά (CBDM - Climate Based Daylight Metrics)

Η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού στα κτίρια έχει εξελιχθεί σημαντικά, περνώντας από τα παραδοσιακά στατικά μετρικά στα σύγχρονα δυναμικά μετρικά που βασίζονται στο κλίμα (Climate-Based Daylight Metrics - CBDM). Τα στατικά μετρικά, με κυριότερο τον Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor - DF), υπολογίζουν τη φωτεινότητα σε μια συγκεκριμένη στιγμή υπό συνθήκες εντελώς νεφελώδους ουρανού, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τον προσανατολισμό του κτιρίου, την ηλιακή ακτινοβολία ή τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (Safranek et al., 2020). Παρόλο που η χρήση τους είναι απλή, τα στατικά μετρικά αποτυγχάνουν να περιγράψουν τη μεταβλητότητα του φυσικού φωτός κατά τη διάρκεια του έτους, οδηγώντας συχνά σε υπερδιαστασιολόγηση των ανοιγμάτων και προβλήματα θάμβωσης (Rockcastle et al., 2023).

Αντίθετα, τα δυναμικά μετρικά (CBDM) βασίζονται σε ωριαίες προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν πραγματικά κλιματικά δεδομένα της περιοχής, προσφέροντας μια πολύ πιο ακριβή εικόνα της απόδοσης του φωτισμού (Luo et al., 2021). Τα μετρικά αυτά, όπως η Αυτονομία Φυσικού Φωτός (Daylight Autonomy) και η Χωρική Αυτονομία Φυσικού Φωτός (sDA), αξιολογούν την επάρκεια του φωτός καθ' όλη τη διάρκεια των ωρών λειτουργίας του κτιρίου ετησίως (Safranek et al., 2020). Η χρήση των CBDM είναι κρίσιμη για τον βιώσιμο σχεδιασμό, καθώς επιτρέπει στους μελετητές να μεγιστοποιήσουν τη χρήση του φυσικού φωτός για τη ρύθμιση των κερκάρδιων ρυθμών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την εξάρτηση από τον τεχνητό φωτισμό (Rockcastle et al., 2023).

Η υιοθέτηση των δυναμικών μετρικών συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της ευεξίας των ενοίκων. Η ακριβής πρόβλεψη της κατανομής του φωτός επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών περιβαλλόντων που προσαρμόζονται στις ανθρώπινες ανάγκες, μειώνοντας το φαινόμενο της οπτικής κόπωσης και ενισχύοντας την εργασιακή απόδοση (Hamadah et al., 2023). Επιπλέον, ο σχεδιασμός με βάση τα CBDM εξασφαλίζει ότι η οπτική άνεση επιτυγχάνεται με τον πλέον ενεργειακά αποδοτικό τρόπο, εξισορροπώντας τις ανάγκες για φως με την ανάγκη για προστασία από την ηλιακή θερμότητα (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007). Τελικά, η μετάβαση στα δυναμικά μετρικά αποτελεί τη βάση για την πιστοποίηση κτιρίων υψηλών προδιαγραφών που θέτουν την ανθρώπινη υγεία στο επίκεντρο (Kokatnur et al., 2025).

### 3.2.2. Spatial Daylight Autonomy (sDA): Ορισμός και στόχοι

Η Χωρική Αυτονομία Φυσικού Φωτός (Spatial Daylight Autonomy - sDA) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες δυναμικές μετρικές για την αξιολόγηση της επάρκειας του φυσικού φωτισμού σε έναν εσωτερικό χώρο (Safranek et al., 2020). Ορίζεται ως το ποσοστό της εξεταζόμενης επιφάνειας που δέχεται τουλάχιστον ένα ελάχιστο επίπεδο φωτεινότητας (συνήθως 300 lux) για ένα καθορισμένο ποσοστό των ωρών λειτουργίας του κτιρίου ετησίως (Luo et al., 2021). Σε αντίθεση με τις στατικές μετρικές, η sDA παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης του φυσικού φωτός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες (Rockcastle et al., 2023).

Ο κύριος στόχος της sDA είναι να προσδιορίσει εάν ένας χώρος μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά χωρίς τη χρήση τεχνητού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας, συμβάλλοντας έτσι στη σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (Luo et al., 2021). Παράλληλα, η υψηλή τιμή sDA διασφαλίζει ότι οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε επαρκές φυσικό φως, το οποίο είναι απαραίτητο για τη διατήρηση των κirkάδιων ρυθμών και τη συνολική ευεξία (Safranek et al., 2020). Στον σχεδιασμό γραφειακών χώρων, η επίτευξη των στόχων της sDA συνδέεται άμεσα με τη βελτίωση της παραγωγικότητας, καθώς το φυσικό φως δημιουργεί ένα πιο ευχάριστο και υγιεινό περιβάλλον εργασίας (Hamadah et al., 2023).

Ωστόσο, ο σχεδιασμός για υψηλή αυτονομία φυσικού φωτός πρέπει να γίνεται με προσοχή, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα θάμβωσης ή υπερβολικών θερμικών κερδών (Rockcastle et al., 2023). Η χρήση προηγμένων συστημάτων σκίασης και η βελτιστοποίηση των ανοιγμάτων αποτελούν βασικές στρατηγικές για την επίτευξη υψηλής sDA, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την οπτική άνεση των ενοίκων (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007). Τελικά, η sDA λειτουργεί ως ένας αξιόπιστος δείκτης για τη δημιουργία κτιρίων που είναι ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικά και επικεντρωμένα στην ανθρώπινη υγεία (Kokatnur et al., 2025).

### 3.2.3. Annual Sunlight Exposure (ASE): Όρια και προστασία

Η Ετήσια Έκθεση στο Ηλιακό Φως (Annual Sunlight Exposure - ASE) αποτελεί μια κρίσιμη μετρική του δυναμικού φωτισμού που περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας εργασίας που δέχεται άμεσο ηλιακό φως για περισσότερες από 250 ώρες ετησίως (Safranek et al., 2020). Ενώ η επάρκεια φυσικού φωτός είναι επιθυμητή για τη ρύθμιση των κirkάδιων ρυθμών και τη βελτίωση της διάθεσης, οι υψηλές τιμές ASE υποδηλώνουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης και υπερθέρμανσης των εσωτερικών χώρων (Rockcastle et al., 2023). Για τον λόγο αυτό, τα σύγχρονα πρότυπα σχεδιασμού θέτουν αυστηρά όρια στο ASE, επιδιώκοντας μια ισορροπία μεταξύ της οπτικής άνεσης και της ενεργειακής αποδοτικότητας (Luo et al., 2021).

Η υπέρβαση των ορίων του ASE σχετίζεται άμεσα με την οπτική δυσφορία, η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά την παραγωγικότητα των εργαζομένων προκαλώντας κόπωση και αδυναμία συγκέντρωσης (Hamadah et al., 2023). Για την προστασία από την υπερβολική έκθεση, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση στρατηγικών σκίασης, όπως εξωτερικές περσίδες ή εσωτερικά σκίαστρα ελεγχόμενα από τον χρήστη, τα οποία επιτρέπουν τη διαχείριση της άμεσης ακτινοβολίας χωρίς να αποκλείουν πλήρως τη θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον (Rockcastle et al., 2023). Ο σωστός προσανατολισμός του κτιρίου και η επιλογή υαλοπινάκων με κατάλληλους συντελεστές μετάδοσης φωτός αποτελούν συμπληρωματικά μέτρα για τον έλεγχο του ASE (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007).

Επιπλέον, η αποτελεσματική διαχείριση του ASE συμβάλλει στη μείωση των ενεργειακών φορτίων ψύξης, καθώς περιορίζει τα θερμικά κέρδη από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες (Luo et al., 2021). Μια ολιστική προσέγγιση στον σχεδιασμό των ανοιγμάτων διασφαλίζει ότι οι χώροι παραμένουν φωτεινοί και υγιεινοί, υποστηρίζοντας την ευεξία των ενοίκων, ενώ παράλληλα αποτρέπει τα αρνητικά φαινόμενα της θάμβωσης που υποβαθμίζουν το εργασιακό περιβάλλον (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007).

#### **3.2.4. Daylight Glare Probability (DGP): Πιθανότητα θάμβωσης.**

Η Πιθανότητα Θάμβωσης από το Φυσικό Φως (Daylight Glare Probability - DGP) αποτελεί μια εξελιγμένη μετρική που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της οπτικής δυσφορίας που προκαλείται από το φως της ημέρας σε εσωτερικούς χώρους (Rockcastle et al., 2023). Σε αντίθεση με παλαιότερους δείκτες, ο DGP λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τη φωτεινότητα μιας πηγής, αλλά και τη συνολική κατανομή του φωτός στο οπτικό πεδίο του χρήστη, καθώς και το μέγεθος και τη θέση της πηγής που προκαλεί τη θάμβωση (Safranek et al., 2020). Η μετρική αυτή εκφράζεται ως ποσοστό, το οποίο αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ένας μέσος χρήστης να βιώσει οπτική ενόχληση υπό συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (Rockcastle et al., 2023).

Η διαχείριση των τιμών του DGP είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της παραγωγικότητας, καθώς η υψηλή πιθανότητα θάμβωσης συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση οπτικής κόπωσης και τη μείωση της ικανότητας συγκέντρωσης των εργαζομένων (Hamadah et al., 2023). Στον βιώσιμο σχεδιασμό, η επίτευξη χαμηλών τιμών DGP απαιτεί τη χρήση δυναμικών συστημάτων ελέγχου του ηλιακού φωτός, όπως κινητά σκίαστρα και περσίδες, που επιτρέπουν τη μείωση της έντονης φωτεινότητας χωρίς να περιορίζουν την απαραίτητη έκθεση στο φυσικό φως για τη ρύθμιση των κirkάδιων ρυθμών (Rockcastle et al., 2023).

Επιπλέον, η πρόβλεψη του DGP κατά τη φάση του σχεδιασμού βοηθά στην αποφυγή δαπανηρών διορθωτικών παρεμβάσεων μετά την ολοκλήρωση του κτιρίου, διασφαλίζοντας ένα περιβάλλον που προάγει την ευεξία (Busby Perkins+Will & Stantec, 2007). Η σωστή επιλογή υλικών με χαμηλή ανακλαστικότητα και ο προσεκτικός προσανατολισμός των θέσεων εργασίας σε σχέση με τα ανοίγματα αποτελούν βασικές στρατηγικές για τον περιορισμό της πιθανότητας θάμβωσης (Luo et al., 2021). Τέλος, η ενσωμάτωση του DGP στις μελέτες φωτισμού επιτρέπει τη δημιουργία χώρων που εξισορροπούν την οπτική άνεση με την ενεργειακή απόδοση, αποφεύγοντας την υπερβολική χρήση τεχνητού φωτισμού λόγω κλειστών σκιάστρων (Safranek et al., 2020).

### **3.3. Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποιήσεις**

Η αξιολόγηση της απόδοσης του φυσικού φωτισμού στα σύγχρονα κτίρια γραφείων βασίζεται στην άμεση ενσωμάτωση των δυναμικών μετρικών, γνωστών ως CBDM, στις απαιτήσεις των διεθνών προτύπων βιώσιμης δόμησης. Η μετάβαση από τους παραδοσιακούς στατικούς δείκτες σε ετήσιες κλιματικές παραμέτρους επιτρέπει τόσο στο πρότυπο LEED όσο και στο WELL να αξιολογούν την επάρκεια και την ποιότητα του φωτός σε ετήσια βάση, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Mardaljevic, 2000; Reinhart et al., 2006).

### 3.3.1. LEED v4.1 EQ Credit: Απαιτήσεις για το φυσικό φως

Το πρότυπο LEED v4.1 BD+C (Building Design and Construction) δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος (Indoor Environmental Quality - EQ), αναγνωρίζοντας ότι ο φυσικός φωτισμός συνδέει τους χρήστες με το εξωτερικό περιβάλλον, ενισχύει τους κirkάδιους ρυθμούς και μειώνει τη χρήση ηλεκτρικού φωτισμού. Στο πλαίσιο της χρήσης δυναμικών συστημάτων σκίασης, το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην ενότητα EQ Credit: Daylight. Ο κύριος αρχιτεκτονικός και ανθρωποκεντρικός στόχος αυτής της ενότητας είναι η ουσιαστική σύνδεση των χρηστών του κτιρίου με το εξωτερικό περιβάλλον, η βιολογική ενίσχυση των κirkάδιων ρυθμών τους μέσω της έκθεσης στο φως της ημέρας, καθώς και η δραστική μείωση της ανάγκης για χρήση ηλεκτρικού τεχνητού φωτισμού. Για την επιτυχή ενσωμάτωση αυτών των απαιτήσεων, το πρότυπο εισάγει μια υποχρεωτική βασική προϋπόθεση (Prerequisite) που αφορά τον έλεγχο της θάμβωσης και, στη συνέχεια, προσφέρει τρεις διακριτές μεθοδολογικές επιλογές (Options) προκειμένου οι ομάδες έργου να υπολογίσουν την επάρκεια του φυσικού φωτός και να διεκδικήσουν από μία έως τρεις μονάδες (πόντους) (Grzegorzewska & Kirschke, 2021· U.S. Green Building Council, 2019).

Η βασική προϋπόθεση για την εκκίνηση της διαδικασίας είναι η διασφάλιση της οπτικής άνεσης των χρηστών μέσω της εγκατάστασης κατάλληλων συσκευών ελέγχου της θάμβωσης (glare-control devices). Αυτές οι συσκευές, όπως εσωτερικά ή εξωτερικά στόρια και σκίαστρα, πρέπει να είναι χειροκίνητες ή αυτόματες με δυνατότητα χειροκίνητης παράκαμψης και να εφαρμόζονται σε όλους τους χώρους τακτικής χρήσης (regularly occupied spaces). Αυτό το προπαρασκευαστικό στάδιο κρίνεται απαραίτητο, καθώς η ανεξέλεγκτη είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει έντονη οπτική δυσφορία και να ακυρώσει τα οφέλη του φυσικού φωτισμού, αναγκάζοντας τους χρήστες να αποκλείσουν εντελώς το φως της ημέρας (U.S. Green Building Council, 2019).

Η πρώτη μεθοδολογική επιλογή (Option 1) βασίζεται σε ετήσιες ηλεκτρονικές προσομοιώσεις υπολογιστή και εξετάζει τον συνδυασμό δύο εξελιγμένων δεικτών, της Χωρικής Αυτονομίας Φυσικού Φωτισμού (Spatial Daylight Autonomy - sDA) και της Ετήσιας Έκθεσης στο Ηλιακό Φως (Annual Sunlight Exposure - ASE). Ο δείκτης sDA μετρά το ποσοστό της επιφάνειας του δαπέδου που λαμβάνει τουλάχιστον 300 lux φυσικού φωτός για το μισό χρόνο των προγραμματισμένων ωρών λειτουργίας ετησίως, ενώ ο δείκτης ASE λειτουργεί προστατευτικά, καταγράφοντας τις περιοχές που κινδυνεύουν από υπερβολική άμεση ηλιακή έκθεση και θάμβωμα, δηλαδή εκείνες που δέχονται πάνω από 1.000 lux για περισσότερες από 250 ώρες το χρόνο. Το LEED v4.1 προσφέρει αυξημένη ευελιξία σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις, επιτρέποντας στους μελετητές να διαχειρίζονται τον δείκτη ASE με αρχιτεκτονικά στοιχεία, χωρίς να απορρίπτεται αυτόματα η πιστοποίηση του χώρου (U.S. Green Building Council, 2019).

Η δεύτερη επιλογή (Option 2) αποτελεί μια απλούστερη μορφή ψηφιακής προσομοίωσης, η οποία δεν εξετάζει ολόκληρο το έτος αλλά εστιάζει σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την απόδειξη μέσω υπολογιστικών μοντέλων ότι επιτυγχάνονται επίπεδα έντασης φωτισμού μεταξύ 300 lux και 3.000 lux σε μια καθορισμένη καθαρή ημέρα του έτους, συνήθως κοντά στην εαρινή ή φθινοπωρινή ισημερία, για ένα συγκεκριμένο και προκαθορισμένο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας τακτικής χρήσης (U.S. Green Building Council, 2019).

Η τρίτη και πιο πρακτική επιλογή (Option 3) αφορά την απευθείας φυσική μέτρηση των επιπέδων φωτισμού (Illuminance) μέσα στο ίδιο το κτίριο, αφού αυτό έχει ολοκληρωθεί κατασκευαστικά και έχει τοποθετηθεί ο απαραίτητος ξενοδοχειακός ή γραφειακός εξοπλισμός. Οι μετρήσεις

πραγματοποιούνται με φωτόμετρο στο ύψος της επιφάνειας εργασίας κατά τις μεσημβρινές ώρες, συγκεκριμένα μεταξύ 9 π.μ. και 3 μ.μ., και πρέπει να καταγράφουν τιμές εντός του αποδεκτού ορίου των 300 έως 3.000 lux. Για την απόκτηση ενός πόντου αρκεί μία μέτρηση σε οποιονδήποτε μήνα, ενώ για περισσότερους πόντους απαιτούνται δύο μετρήσεις σε διαφορετικές περιόδους του έτους, οι οποίες εκτελούνται πάνω σε ένα αυστηρά καθορισμένο πλέγμα (grid) μέγιστων διαστάσεων ανάλογα με το μέγεθος του εκάστοτε δωματίου. Αν ο χώρος διαθέτει αυτόματα συστήματα σκίασης που διατηρούν τη θέα προς τα έξω, το ανώτατο όριο των 3.000 lux παρακάμπτεται, προσφέροντας επιπλέον σχεδιαστική ελευθερία (U.S. Green Building Council, 2019).

Η τελική μοριοδότηση του κτιρίου εξαρτάται άμεσα από το συνολικό ποσοστό του δαπέδου που ικανοποιεί τις παραπάνω συνθήκες. Στα περισσότερα κτίρια, όπως γραφεία, σχολεία και εμπορικά καταστήματα, η επίτευξη των στόχων για το 55% της επιφάνειας εξασφαλίζει έναν πόντο, για το 75% δύο πόντους, ενώ αν το ποσοστό αγγίζει ή ξεπεράσει το 90%, το έργο επιβραβεύεται με το μέγιστο των τριών πόντων ή με εύφημο μνεία υποδειγματικής απόδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για ειδικές κατηγορίες κτιρίων, όπως οι εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης (Healthcare), οι απαιτήσεις αυτές εφαρμόζονται πιο στοχευμένα, περιορίζοντας τους υπολογισμούς αποκλειστικά στους χώρους τακτικής χρήσης που βρίσκονται στην περίμετρο του κτιριακού όγκου.

Η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού κατά το πρότυπο LEED v4.1 βασίζεται στον συνδυασμό δύο κρίσιμων δεικτών, οι οποίοι εξετάζουν την επάρκεια του φωτός σε συνάρτηση με την προστασία από την υπερέκθεση. Ο πρώτος είναι ο δείκτης χωρικής αυτονομίας φυσικού φωτισμού,  $sDA_{300/50\%}$  (Spatial Daylight Autonomy), ο οποίος αποτιμά το ποσοστό της επιφάνειας του τακτικά κατειλημμένου χώρου που δέχεται ένταση φωτισμού τουλάχιστον 300 lux για το 50% των ετήσιων ωρών λειτουργίας. Αντίρροπα, ο δείκτης ετήσιας έκθεσης στο ηλιακό φως,  $ASE_{1000,250}$  (Annual Sunlight Exposure), λειτουργεί ως προστατευτική δικλίδα ασφαλείας, καταγράφοντας το ποσοστό του χώρου που εκτίθεται σε άμεση ηλιακή ακτινοβολία έντασης άνω των 1000 lux για περισσότερες από 250 ώρες ετησίως. Ως σημείο αναφοράς (baseline) για τον αποτελεσματικό έλεγχο της θάμβωσης, το πρότυπο ορίζει ότι η τιμή του δείκτη ASE δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10%.

Η τελική βαθμολογία και η απόδοση πόντων στο πλαίσιο της πιστοποίησης καθορίζονται με βάση τη μέση τιμή του δείκτη  $sDA_{300/50\%}$  που επιτυγχάνεται στους τακτικά κατειλημμένους χώρους του κτιρίου. Συγκεκριμένα, η κάλυψη του 40% της επιφάνειας εξασφαλίζει στο έργο 1 πόντο, ενώ η αύξηση του ποσοστού αυτού στο 55% προσφέρει 2 πόντους. Η μέγιστη μοριοδότηση των 3 πόντων επιτυγχάνεται όταν η μέση τιμή της χωρικής αυτονομίας ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προτύπου στο 75% ή περισσότερο του συνολικού κατειλημμένου χώρου (U.S. Green Building Council, 2019).

### 3.3.2. WELL v2 Building Standard

Το πρότυπο **WELL Building Standard (v2)** αντιπροσωπεύει μια ριζική αλλαγή φιλοσοφίας στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, μετατοπίζοντας το ενδιαφέρον από την απλή περιβαλλοντική βιωσιμότητα των κτιρίων στην καθαρή ανθρωποκεντρικότητα. Ενώ παραδοσιακά πιστοποιητικά εστιάζουν στην εξοικονόμηση πόρων, το WELL v2 θέτει ως απόλυτη προτεραιότητα την υγεία, την ευεξία και την παραγωγικότητα των χρηστών, οργανώνοντας τις στρατηγικές του γύρω από δέκα θεμελιώδεις έννοιες. Μέσα από επιστημονικές μελέτες αξιολόγησης πριν και μετά την εγκατάσταση (pre- και post-occupancy evaluations), αποδεικνύεται ότι η μετάβαση σε χώρους εργασίας που ακολουθούν αυτό το ανθρωποκεντρικό μοντέλο επιφέρει θεαματική βελτίωση στην υποκειμενική αντίληψη των εργαζομένων για τη σωματική και την ψυχική τους κατάσταση. Οι παρεμβάσεις αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλα μεγέθη επίδρασης στην ικανοποίηση των χρηστών, με τον σωστά σχεδιασμένο φωτισμό να αναδεικνύεται σταθερά σε έναν από τους ισχυρότερους παράγοντες θετικής αξιολόγησης του εσωτερικού περιβάλλοντος (Ildiri et al., 2022).

Για την επιτυχή ενσωμάτωση των κινδύνων δεικτών φυσικού φωτισμού, καθίσταται απαραίτητη η χρήση προηγμένων αρχιτεκτονικών στρατηγικών και δυναμικών συστημάτων ελέγχου της σκίασης (Sommese et al., 2024). Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν τη συνεχή προσαρμογή και τη διείσδυση του φυσικού φωτός ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την κίνηση του ήλιου, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη θερμική και οπτική άνεση (Tabadkani et al., 2021). Με αυτόν τον τρόπο, το εσωτερικό περιβάλλον ακολουθεί τις φυσικές μεταβολές του ηλιακού κύκλου, προσφέροντας υψηλή ποιότητα φωτός και βιολογική υποστήριξη (Rea et al., 2002), επιβεβαιώνοντας ότι ο σύγχρονος ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός οφείλει να υπηρετεί πρωτίστως τις θεμελιώδεις ανάγκες της ανθρώπινης φύσης (Ildiri et al., 2022).

Η κατηγορία του Φωτισμού (Light) στο πρότυπο **WELL Building Standard v2 (WELL v2)** εστιάζει στην παροχή περιβαλλόντων που ευθυγραμμίζουν τους βιολογικούς ρυθμούς των ανθρώπων, μειώνουν την οπτική κόπωση και βελτιώνουν τη διάθεση, τη γενικότερη υγεία και την παραγωγικότητα των ενοίκων. Καθώς οι άνθρωποι περνούν το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας τους σε εσωτερικούς χώρους, η έλλειψη σωστού φωτισμού μπορεί να διαταράξει τον κινδύνος ρυθμό και να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα του ύπνου. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, το πρότυπο WELL v2 περιλαμβάνει μια σειρά από προϋποθέσεις (Preconditions) και στρατηγικές βελτιστοποίησης (Optimizations), οι οποίες εξετάζουν τόσο τον φυσικό όσο και τον τεχνητό φωτισμό από την πλευρά της ποιότητας, της έντασης και του ελέγχου (International WELL Building Institute, 2020).

Το **Feature L01: Light Exposure** αποτελεί την πρώτη υποχρεωτική προϋπόθεση (Precondition) και τη βάση ολόκληρης της κατηγορίας. Ο πρωταρχικός του σκοπός είναι να διασφαλίσει ότι όλοι οι ένοικοι ενός κτιρίου έχουν επαρκή πρόσβαση σε εσωτερικό φωτισμό, είτε αυτός προέρχεται από φυσικές είτε από τεχνητές πηγές. Καθώς η έλλειψη φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας συνδέεται άμεσα με τη διατάραξη του ύπνου, την κατάθλιψη και τη μειωμένη παραγωγικότητα, το L01 απαιτεί από τα έργα να σχεδιάζουν τους χώρους με τέτοιο τρόπο ώστε οι τακτικά κατειλημμένες θέσεις να λαμβάνουν επαρκή επίπεδα φωτεινότητας. Επιπλέον, περιλαμβάνει μια σημαντική παράμετρο ενημέρωσης, απαιτώντας την παροχή εκπαιδευτικού υλικού στους χρήστες σχετικά με τον κρίσιμο ρόλο που παίζει το φως στην υγεία, την ευεξία και τη ρύθμιση του ανθρώπινου οργανισμού.

Το Feature L01 αποτελεί τη βάση της κατηγορίας και θέτει τα ελάχιστα υποχρεωτικά όρια για την πρόσβαση στο φυσικό φως, χρησιμοποιώντας χαμηλότερο κατώφλι φωτεινότητας (200 lux) προκειμένου να διασφαλίσει η βασική βιολογική διέγερση των χρηστών. Για τους τακτικά κατειλημμένους χώρους (Regularly Occupied Spaces), επιβάλλεται η επίτευξη του δείκτη  $sDA_{200,40\%} \geq 30\%$ , που σημαίνει ότι τουλάχιστον το 30% της επιφάνειας εργασίας πρέπει να δέχεται κατώτατο

όριο φωτισμού 200 lux για τουλάχιστον το 40% του ετήσιου χρόνου λειτουργίας. Για τους κοινόχρηστους χώρους (Common Spaces), η απαίτηση γίνεται αυστηρότερη ως προς τα επίπεδα φωτισμού, ορίζοντας ότι ο δείκτης  $sDA_{300,50\%}$  πρέπει να είναι  $\geq 70\%$ , δηλαδή 300 lux στο 70% της επιφάνειας για το 50% του χρόνου.

Το **Feature L02: Visual Lighting Design** αποτελεί τη δεύτερη και τελευταία υποχρεωτική προϋπόθεση (Precondition) της ενότητας. Αυτό το χαρακτηριστικό μετατοπίζει την εστίαση στην οπτική άνεση και την εκτέλεση των καθημερινών εργασιών χωρίς καταπόνηση των ματιών. Ορίζει ότι ο τεχνητός φωτισμός πρέπει να σχεδιάζεται με ακρίβεια, ώστε να παρέχει τα κατάλληλα επίπεδα φωτισμού (illuminance) πάνω στις επιφάνειες εργασίας, ακολουθώντας αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα όπως αυτά των IES ή EN 12464-1. Ο σχεδιασμός επιβάλλεται να λαμβάνει υπόψη του τόσο τη φύση των εργασιών που εκτελούνται στον χώρο όσο και την ηλικία των ενοίκων, καθώς οι μεγαλύτεροι σε ηλικία εργαζόμενοι απαιτούν συχνά υψηλότερη ένταση φωτός για να φέρουν εις πέρας τις ίδιες οπτικές διαδικασίες με την ίδια άνεση.

Το **Feature L03: Circadian Lighting Design** εισάγει την έννοια του βιολογικού φωτισμού, στοχεύοντας στον συντονισμό του εσωτερικού περιβάλλοντος με τον φυσικό 24ώρο ρυθμό του ανθρώπου. Για να επιτευχθεί αυτό, το L03 δεν εξετάζει το φως που πέφτει οριζόντια στα γραφεία, αλλά την ένταση του φωτός που φτάνει στο κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή απευθείας στα μάτια των ενοίκων. Η απαίτηση αυτή μετρείται σε Equivalent Melanopic Lux (EML) ή Melanopic Equivalent Daylight Illuminance (m-EDI). Στόχος είναι η παροχή υψηλών επιπέδων μελανοπικού φωτισμού κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού της ημέρας για την τόνωση της ενέργειας, την καταστολή της μελατονίνης και την ενίσχυση της εγρήγορσης, και η σταδιακή μείωσή του το απόγευμα ώστε να διευκολυνθεί ο μετέπειτα βραδινός ύπνος.

Το **Feature L04: Electric Light Glare Control** λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας για την προστασία των χρηστών από την οπτική δυσφορία που προκαλεί ο τεχνητός φωτισμός. Η θάμβωση (glare) εμφανίζεται όταν μια πηγή φωτός είναι υπερβολικά λαμπρή σε σχέση με το υπόλοιπο περιβάλλον, προκαλώντας ερεθισμό, οφθαλμική κόπωση και πονοκεφάλους. Το χαρακτηριστικό αυτό απαιτεί την προσεκτική επιλογή φωτιστικών σωμάτων με κατάλληλα οπτικά συστήματα, διαχύτες ή πλέγματα, καθώς και τη σωστή χωροθέτησή τους. Η συμμόρφωση επιτυγχάνεται μέσω της τήρησης αυστηρών ορίων στον δείκτη Unified Glare Rating (UGR), διασφαλίζοντας ότι τα φωτιστικά σώματα δεν εκπέμπουν ενοχλητική άμεση ή έμμεση λαμπρότητα προς τα μάτια των εργαζομένων.

Το Feature L04 λειτουργεί ως ασπίδα προστασίας από την οπτική δυσφορία και την ηλιακή θάμβωση, περιορίζοντας την απευθείας έκθεση στο έντονο ηλιακό φως. Το Feature L04 λειτουργεί ως ασπίδα προστασίας από την οπτική δυσφορία και την ηλιακή θάμβωση, περιορίζοντας την απευθείας έκθεση στο έντονο ηλιακό φως. Όσον αφορά το Ανώτατο Επιτρεπτό Όριο ASE, απαιτείται ρητά ο δείκτης  $ASE_{1000,250}$  να διατηρείται μικρότερος ή ίσος του 10% ( $\leq 10\%$ ) για το σύνολο του τακτικά κατειλημμένου χώρου. Αναφέρεται ότι δεν επιτρέπεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% της επιφάνειας του δαπέδου να εισέρχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία έντασης άνω των 1000 lux για περισσότερες από 250 ώρες το έτος, ενώ για τη συμμόρφωση είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση χειροκίνητων ή αυτόματων συστημάτων σκίασης/ηλιοπροστασίας

Το **Feature L05: Daylight Design Strategies** συνδυάζει την αρχιτεκτονική προσέγγιση με την ψυχολογική και βιολογική ανάγκη του ανθρώπου για επαφή με τη φύση. Το L05 επικεντρώνεται στη

μεγιστοποίηση της χρήσης του φυσικού φωτός και στη διασφάλιση της εξωτερικής θέας μέσω του δείκτη View Factor. Απαιτεί οι σταθμοί εργασίας να τοποθετούνται κοντά σε μεγάλα υαλοστάσια με υψηλή διαπερατότητα φωτός, ενώ παράλληλα επιβάλλει τη χρήση εσωτερικών ή εξωτερικών συστημάτων ηλιοπροστασίας για τον έλεγχο των τυφλωτικών ακτίνων του ήλιου. Μέσω της επίτευξης ενός υψηλού View Factor (ίσου με 3 ή μεγαλύτερου), εξασφαλίζεται ότι οι εργαζόμενοι έχουν άμεση οπτική πρόσβαση στο έδαφος, τον ουρανό ή το αστικό τοπίο, γεγονός που μειώνει το στρες και ενισχύει την αίσθηση ευεξίας στον χώρο εργασίας.

Στο πλαίσιο των στρατηγικών φυσικού φωτισμού, το **Feature L05: Daylight Design Strategies** επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση του εξωτερικού φωτός στην αρχιτεκτονική του κτιρίου, με στόχο την υποστήριξη της βιολογικής και ψυχολογικής ευεξίας. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό απαιτεί την εφαρμογή ενός ενισχυμένου πλάνου φυσικού φωτισμού που προωθεί τη χωροθέτηση των σταθμών εργασίας κοντά σε παράθυρα και τη διασφάλιση ελάχιστης επιφάνειας υαλοστασίων με υψηλή διαπερατότητα φωτός. Παράλληλα, για την αποφυγή της οπτικής δυσφορίας, επιβάλλεται η ενσωμάτωση συστημάτων ηλιοπροστασίας, όπως εσωτερικά ή εξωτερικά σκίαστρα, τα οποία μπορεί να είναι χειροκίνητα ή αυτοματοποιημένα για την πρόληψη της θάμβωσης.

Το Feature L05 επιβραβεύει τα κτίρια που επιτυγχάνουν βέλτιστη αρχιτεκτονική ενσωμάτωση του φυσικού φωτός, προσφέροντας επιπλέον πόντους (credits) στην τελική βαθμολογία της πιστοποίησης ανάλογα με την απόδοση του δείκτη  $sDA_{300,50\%}$ . Αναφορικά με τη **Βαθμονόμηση Μοριοδότησης (sDA)**, ο **1 Πόντος** επιτυγχάνεται όταν η επίδοση του δείκτη  $sDA_{300,50\%}$  είναι **άνω του 55%** ( $> 55\%$ ) του χώρου, ενώ οι **2 Πόντοι** επιτυγχάνονται όταν η επίδοση του ίδιου δείκτη είναι **άνω του 75%** ( $> 75\%$ ) του χώρου.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διασφάλιση της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον για το μεγαλύτερο ποσοστό των ενοίκων μέσω του δείκτη **View Factor**. Ο δείκτης αυτός αξιολογεί την ποιότητα της θέας με βάση την εγγύτητα στα παράθυρα, το μέγεθος των ανοιγμάτων και την ορατότητα του εδάφους, του ουρανού ή του φυσικού τοπίου. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων, ο δείκτης View Factor πρέπει να είναι ίσος με 3 ή μεγαλύτερος, εξασφαλίζοντας ότι οι εργαζόμενοι διατηρούν μια ουσιαστική οπτική σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον και επαρκή κατακόρυφη γωνία θέασης που αποτρέπει το αίσθημα του εγκλωβισμού.

Το **Feature L06: Daylight Simulation** εισάγει τη χρήση ψηφιακών προσομοιώσεων για την ακριβή αποτύπωση και τον έλεγχο του φυσικού φωτός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούν παραμέτρους όπως η Χωρική Αυτονομία Φυσικού Φωτισμού (sDA) και η Ετήσια Έκθεση στο Ηλιακό Φως (ASE). Με τον τρόπο αυτό, αποδεικνύεται επιστημονικά ότι το κτίριο επιτυγχάνει επαρκή επίπεδα φωτισμού σε ένα μεγάλο ποσοστό της κατειλημμένης επιφάνειας για τις ώρες λειτουργίας του, ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται η υπερβολική έκθεση στο άμεσο ηλιακό φως, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει θερμικά προβλήματα ή έντονη θάμβωση.

Όσον αφορά την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος, το **Feature L07: Visual Balance** στοχεύει στη δημιουργία ενός ισορροπημένου φωτιστικού τοπίου που ελαχιστοποιεί τις ενοχλητικές μεταβολές λαμπρότητας ανάμεσα στις διάφορες επιφάνειες. Οι έντονες αντιθέσεις φωτός και σκιάς αναγκάζουν το ανθρώπινο μάτι σε συνεχή προσαρμογή, γεγονός που προκαλεί κόπωση, πονοκεφάλους και διάσπαση της προσοχής. Για την επίτευξη οπτικής ισορροπίας, το πρότυπο ορίζει συγκεκριμένες μέγιστες αναλογίες λαμπρότητας (luminance ratios) μεταξύ παρακείμενων ή απομακρυσμένων επιφανειών στον ίδιο χώρο, καθώς και μεταξύ κύριων και βοηθητικών δωματίων. Επιπλέον, απαιτείται υψηλή ομοιομορφία φωτισμού πάνω στις επιφάνειες εργασίας και ομαλή, σταδιακή μετάβαση κατά τις προγραμματισμένες αλλαγές της έντασης του τεχνητού φωτισμού.

Συνολικά, η έννοια του Φωτισμού στο WELL v2 ολοκληρώνεται μέσα από εννέα συνολικά χαρακτηριστικά. Τα Feature L01 και L02 αποτελούν τις βασικές και υποχρεωτικές προϋποθέσεις που καθορίζουν την ελάχιστη έκθεση στο φως και τον ορθό οπτικό σχεδιασμό των επιπέδων φωτεινότητας. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά λειτουργούν ως προαιρετικές στρατηγικές βελτιστοποίησης που αποδίδουν επιπλέον πόντους στην πιστοποίηση. Αυτά περιλαμβάνουν τον κirkάδιο σχεδιασμό φωτισμού για τη βιολογική διέγερση, τον έλεγχο της θάμβωσης από τα φωτιστικά σώματα, την ποιότητα του τεχνητού φωτός μέσω του περιορισμού του τρεμοπαίγματος (flicker) και της υψηλής χρωματικής απόδοσης, καθώς και την παροχή προσωπικού ελέγχου στους ίδιους τους χρήστες. (International WELL Building Institute, 2020)

### 3.3.3. Συσχέτιση Μετρικών Δεικτών και Επιλογή Προτύπου

Η συγκριτική ανάλυση του τρόπου με τον οποίο τα δύο πρότυπα LEED και WELL διαχειρίζονται και συσχετίζουν τους εν λόγω δείκτες αναδεικνύει τις δομικές τους διαφορές και αποτελεί το θεμέλιο για την επιλογή του WELL v2 ως του κεντρικού άξονα της παρούσας παραμετρικής μελέτης.

#### Spatial Daylight Autonomy (sDA)

Βάσει του προτύπου WELL v2 (Feature L01), η απαίτηση ως προαπαιτούμενο (precondition) προσαρμόζεται στο  $sDA_{200,40\%} \geq 30\%$  για τους τακτικά κατειλημμένους χώρους, και στο  $sDA_{300,50\%} \geq 70\%$  για τους κοινόχρηστους χώρους. Για επιπλέον πόντους βελτιστοποίησης (Feature L05), το WELL v2 επιβραβεύει επιδόσεις  $sDA_{300,50\%}$  άνω του 55% (1 πόντος) ή άνω του 75% (2 πόντοι). Στο πρότυπο LEED v4.1, ο δείκτης  $sDA_{300,50\%}$  χρησιμοποιείται στην Επιλογή 1 (Simulation) για τον υπολογισμό της βαθμολογίας. Ένα έργο μπορεί να κερδίσει 1 πόντο αν η μέση τιμή του sDA καλύπτει το 40% του τακτικά κατειλημμένου χώρου, 2 πόντους αν καλύπτει το 55%, και 3 πόντους εάν φτάσει το 75% (International WELL Building Institute, 2020; U.S. Green Building Council, 2019).

#### Annual Sunlight Exposure (ASE)

Το πρότυπο WELL v2 (Feature L04 - Glare control) απαιτούν ρητά ο δείκτης  $ASE_{1000,250}$  να διατηρείται μικρότερος ή ίσος του 10% του τακτικά κατειλημμένου χώρου. Το LEED v4.1 χρησιμοποιεί το ίδιο ποσοστό ως σημείο αναφοράς, αλλά προσφέρει μια ευελιξία: εάν σε οποιονδήποτε τακτικά κατειλημμένο χώρο το  $ASE_{1000,250}$  ξεπερνά το 10%, η σχεδιαστική ομάδα υποχρεούται απλώς να προσδιορίσει και να τεκμηριώσει τον τρόπο με τον οποίο ο χώρος έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει τη θάμβωση (International WELL Building Institute, 2020; U.S. Green Building Council, 2019).

Οι δείκτες sDA και ASE δεν πρέπει να εξετάζονται μεμονωμένα, καθώς παρουσιάζουν μια αντίρροπη σχέση (trade-off). Η επιδίωξη μεγιστοποίησης της χωρικής αυτονομίας ( $sDA_{300,50\%} > 55\%$ ) για την εξασφάλιση επαρκούς φωτισμού μπορεί να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αύξηση της ετήσιας έκθεσης στο άμεσο ηλιακό φως ( $ASE_{1000,250} > 10\%$ ), προκαλώντας φαινόμενα οπτικής δυσφορίας και θάμβωσης. Η ταυτόχρονη ικανοποίηση των δύο αυτών αυστηρών ορίων αποτελεί το βασικό κριτήριο βελτιστοποίησης της συγκεκριμένης μελέτης.

### Daylight Glare Probability (DGP)

Αν και ο DGP είναι ένας καθιερωμένος δείκτης στην επιστημονική βιβλιογραφία, τα πρότυπα LEED και WELL εστιάζουν πρακτικά στην ύπαρξη λειτουργικών συστημάτων ελέγχου (International WELL Building Institute, 2020; U.S. Green Building Council, 2019). Συγκεκριμένα, το WELL v2 στο χαρακτηριστικό L04 (Glare Control) απαιτεί σκίαση που να ελέγχεται από τους χρήστες ή να είναι αυτοματοποιημένη για την αποτροπή της θάμβωσης. Το LEED v4.1 ορίζει ρητά την υποχρέωση παροχής συσκευών ελέγχου θάμβωσης (χειροκίνητων ή αυτόματων με δυνατότητα παράκαμψης) σε όλους τους χώρους. Μάλιστα, η ύπαρξη "αυτόματων συσκευών ελέγχου θάμβωσης που διατηρούν τη θέα" επιτρέπει εξαιρέσεις από τα ανώτατα όρια φωτεινότητας (3.000 lux), αναγνωρίζοντας ότι τα δυναμικά συστήματα μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά την πιθανότητα θάμβωσης χωρίς να αποκλείουν το φυσικό φως (U.S. Green Building Council, 2019). Συνεπώς, η εκτίμηση της οπτικής άνεσης στα πρότυπα βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ επαρκούς sDA και περιορισμένου ASE, με τα δυναμικά συστήματα να αποτελούν το κλειδί για τη βελτιστοποίηση αυτής της σχέσης.

Η συγκριτική αυτή συσχέτιση των απαιτήσεων αναδεικνύει τις βαθιές δομικές διαφορές των δύο προτύπων και αποτελεί το θεμέλιο για την επιλογή του WELL v2 ως του κεντρικού άξονα της παρούσας παραμετρικής μελέτης. Η πρωταρχική τεχνική διαφοροποίηση εντοπίζεται στον δείκτη υπερέκθεσης Annual Sunlight Exposure (ASE). Το πρότυπο LEED v4.1 εισάγει μια σημαντική σχεδιαστική ευελιξία, καθώς στην περίπτωση που ο δείκτης ASE1000,250 υπερβαίνει το 10% σε κάποιον τακτικά κατειλημμένο χώρο, το έργο δεν απορρίπτεται αυτόματα (U.S. Green Building Council, 2019). Η σχεδιαστική ομάδα υποχρεούται απλώς να προσδιορίσει και να τεκμηριώσει με γραπτή αναφορά τον τρόπο με τον οποίο ο χώρος έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει τη θάμβωση, χρησιμοποιώντας στοιχεία όπως αρχιτεκτονικές προεξοχές ή χειροκίνητες περσίδες (U.S. Green Building Council, 2019). Αντίθετα, το πρότυπο WELL v2 στο χαρακτηριστικό L04 υιοθετεί μια απόλυτη και αυστηρή στάση, απορρίπτοντας κατηγορηματικά τη συμμόρφωση του κτιρίου εάν ο δείκτης ASE ξεπεράσει το όριο του 10% χωρίς ενεργό και λειτουργικό σύστημα προστασίας (International WELL Building Institute, 2020).

Αυτή ακριβώς η αυστηρότητα του προτύπου WELL v2 αναδεικνύει την ανάγκη και δικαιολογεί την εκπόνηση της παραμετρικής προσομοίωσης δυναμικού συστήματος σκίασης. Επειδή το WELL δεν αποδέχεται θεωρητικές εκπτώσεις ή ονομαστικές αναφορές προθέσεων, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης των ελάχιστων ορίων sDA και των αυστηρών περιορισμών του ASE καθιστά τη χρήση στατικών μέσων ανεπαρκή (Al-Sallal, 2010).

Επιπλέον, η καθαρά ανθρωποκεντρική προσέγγιση του WELL v2, η οποία εξετάζει τον φυσικό φωτισμό ως τον κύριο ρυθμιστή του βιολογικού ρολογιού του ανθρώπου, προσφέρει το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο για την αξιολόγηση της οπτικής ευεξίας των εργαζομένων. Η κατάλληλη έκθεση στο φυσικό φως κατά τη διάρκεια της ημέρας βελτιώνει αποδεδειγμένα τη διάθεση και την ποιότητα του μετέπειτα νυχτερινού ύπνου, ενώ η έλλειψή του προκαλεί καταστολή της μελατονίνης και απορρυθμίζει τις βιολογικές λειτουργίες. Η εισαγωγή ενός δυναμικού συστήματος σκίασης επιτρέπει τη συνεχή προσαρμογή και τη διείσδυση του φυσικού φωτός ανάλογα με την κίνηση του ήλιου, εξασφαλίζοντας παράλληλα την οπτική άνεση. Συνεπώς, το WELL v2 επιλέγεται έναντι του LEED διότι παρέχει τα κατάλληλα μεθοδολογικά εργαλεία, όπως οι μετρήσεις Equivalent Melanopic Lux (EML) στο Feature L03, για να αποτιμηθεί πώς αυτή η δυναμική μεταβολή της σκίασης προστατεύει τον χρήστη από τη θάμβωση, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη βιολογική του διέγερση και την οπτική ισορροπία στο περιβάλλον εργασίας (Ildiri et al., 2022).

## Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Προσομοίωσης

### 4.1. Ροή Εργασίας Παραμετρικού Σχεδιασμού (Workflow)

Η μεθοδολογία για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση συστημάτων σκίασης προτείνει μια ολοκληρωμένη ροή εργασίας (workflow), η οποία γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ της αρχιτεκτονικής δημιουργίας και της ανάλυσης περιβαλλοντικής απόδοσης (Sommese et al., 2024). Η διαδικασία αυτή χωρίζεται σε 5 αλληλένδετα στάδια: τον Σχεδιασμό (Design), την Προσομοίωση (Simulation), την Βελτιστοποίηση, την Οπτικοποίηση (Visualization) και την Αξιολόγηση (Assessment) (Samadi et al., 2020). Στο πρώτο στάδιο, δημιουργείται το παραμετρικό μοντέλο και ορίζονται οι βασικές αρχές της σκίασης, ενώ στη συνέχεια το μοντέλο τροφοδοτείται με οπτικές και φυσικές ιδιότητες για προσομοίωση. Τα αποτελέσματα περνούν από πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για την εξεύρεση των ιδανικών λύσεων, οι οποίες τελικά οπτικοποιούνται (Visualization) (Wu & Zhang, 2022).

#### 4.1.1 Περιβάλλον προσομοίωσης: Rhinoceros 3D & Grasshopper

Ο πυρήνας αυτής της ροής εργασίας βασίζεται στο Rhinoceros 3D και την πλατφόρμα παραμετρικού σχεδιασμού Grasshopper. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στους αρχιτέκτονες να προσεγγίσουν τον σχεδιασμό με έναν ολιστικό τρόπο, ενσωματώνοντας παραμέτρους περιβαλλοντικής απόδοσης από τα πολύ αρχικά στάδια της σύλληψης (Tabadkani et al., 2021). Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σχεδιαστικά εργαλεία, το Grasshopper επιτρέπει την ενσωμάτωση εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών στα μοντέλα ενεργειακής ανάλυσης (Samadi et al., 2020).

Η παραμετροποίηση προχωρά πλέον πέρα από τη στατική αναπαράσταση, εστιάζοντας σε μια διαδικασία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης βάσει δεδομένων (**data-driven performance**) (Samadi et al., 2020). Οι κατευθυντήριες γραμμές της σχεδιαστικής πρόθεσης δεν συλλέγονται από αυθαίρετους κανόνες, αλλά από σύνολα δεδομένων που συλλέγονται από το περιβάλλον (Tabadkani et al., 2021). Η μορφή καθοδηγείται και διαμορφώνεται από περιβαλλοντικά δεδομένα εισόδου (input data) (Wu & Zhang, 2022; Sommese et al., 2024). Στο πλαίσιο αυτό, η διαδικασία ξεκινά με την ανάλυση και αποδόμηση της ογκοπλασίας (massing) του κτιρίου στα επιμέρους δομικά του στοιχεία, όπως είναι το κέλυφος, οι πλάκες και οι υποδιαίρέσεις των ανοιγμάτων (Wu & Zhang, 2022).

Στη συνέχεια, το σύστημα σκίασης αναπτύσσεται ως ένα δυναμικό παραμετρικό μοντέλο με μεταβλητές ιδιότητες, όπως το μήκος, η γωνία κλίσης, η περιστροφή και η αναδίπλωση (Samadi et al., 2020; Le-Thanh et al., 2021). Αυτές οι ιδιότητες δεν ελέγχονται με τον παραδοσιακό τρόπο, αλλά τροφοδοτούνται και μεταβάλλονται από αριθμητικά δεδομένα και μαθηματικές συναρτήσεις. Μέσα από αυτόν τον αλγοριθμικό έλεγχο, το λογισμικό παράγει εκατοντάδες διαφορετικές παραλλαγές του συστήματος σκίασης. Αυτή η στρατηγική επιτρέπει την αποφυγή της επιβολής προκαθορισμένων μορφών και εισάγει έναν σχεδιασμό που καθοδηγείται αποκλειστικά από την απόδοση (performance-driven design). Οι παραλλαγές που προκύπτουν είναι έτοιμες να δοκιμαστούν και να αξιολογηθούν αυτόματα ως προς την απόδοσή τους στο φως και την ενέργεια, επιτρέποντας στα ίδια τα δεδομένα να υπαγορεύσουν την τελική, βέλτιστη αρχιτεκτονική λύση (Shi et al., 2020).

Στην υπό εξέταση υπολογιστική μελέτη, το Rhinoceros 3D και το Grasshopper αποτέλεσαν το κεντρικό περιβάλλον σχεδιασμού και αυτοματοποίησης της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, το παραμετρικό μοντέλο του χώρου γραφείου αναπτύχθηκε εξ αρχής στο Grasshopper, επιτρέποντας την αυτόματη σύνδεσή τους με τις μηχανές προσομοίωσης Radiance μέσω των Ladybug Tools.

#### 4.1.2. Διασύνδεση με κλιματικά δεδομένα: Ladybug Tools (EPW files)

Για να αποκτήσει το γεωμετρικό μοντέλο περιβαλλοντική υπόσταση, απαιτείται η διασύνδεσή του με ακριβή τοπικά κλιματικά δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των πρόσθετων εργαλείων (plug-ins) Ladybug και Honeybee για το Grasshopper (Samadi et al., 2019). Τα εργαλεία αυτά αξιοποιούν τα αρχεία **EPW (EnergyPlus Weather files)**, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν είτε από διαδικτυακές βιβλιοθήκες είτε από τοπικά αρχεία, προσφέροντας στον σχεδιαστή τη δυνατότητα να δοκιμάσει το κτίριο σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και συνθήκες (Sommese et al., 2024).

Το **Ladybug** αναλαμβάνει την οπτικοποίηση των καιρικών δεδομένων μέσα στο σχεδιαστικό περιβάλλον. Διαβάζοντας το αρχείο EPW, αντλεί πληροφορίες για το υψόμετρο, το αζιμούθιο και τη συντεταγμένη του ήλιου, δημιουργώντας διαγράμματα ηλιακής πορείας (sun-path) υπό μορφή διανυσμάτων (vectors) που προβάλλονται απευθείας στο 3D μοντέλο του Rhinoceros (Samadi et al., 2020). Επιπλέον, παρέχει αναλύσεις ηλιακής ακτινοβολίας, ωρών ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας, βοηθώντας στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης του κτιρίου με το κλίμα πριν καν ξεκινήσει η προσομοίωση (Sommese et al., 2024).

Το **Honeybee**, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί ως η γέφυρα που ενώνει την παραμετρική γεωμετρία του Grasshopper με ισχυρές, επικυρωμένες μηχανές προσομοίωσης όπως το Radiance (για τον φυσικό φωτισμό) και το EnergyPlus (για την ενέργεια/θερμότητα) (Samadi et al., 2020; Shi et al., 2020). Μέσω του Honeybee, το μοντέλο οργανώνεται σε ενεργειακές ζώνες (zones) και αποδίδονται σε κάθε επιφάνεια τα κατάλληλα υλικά. Για τον φωτισμό (Radiance) εισάγονται υλικά με συγκεκριμένες οπτικές και χρωματικές ιδιότητες (όπως ορατή διαπερατότητα - Tvis), ενώ για την ενέργεια (EnergyPlus) τα υλικά αποκτούν φυσικές και θερμικές ιδιότητες βασισμένες σε διεθνή πρότυπα, όπως οι κλιματικές ζώνες της ASHRAE (Wu & Zhang, 2022). Με αυτόν τον τρόπο, το παραμετρικό μοντέλο γίνεται ένας "ζωντανός" οργανισμός που αντιδρά επιστημονικά στο φως και τη θερμότητα, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα (όπως τον δείκτη Daylight Factor και το G-Value) για την τελική βελτιστοποίηση (Samadi et al., 2020).

### 4.2 Πρότυπο μοντέλο προσομοίωσης

#### 4.2.1. Πλαίσιο Έργου

Για την αξιολόγηση συστημάτων σκίασης απαιτείται ο ορισμός ενός ελεγχόμενου πλαισίου αναφοράς, το οποίο περιλαμβάνει συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες, τύπους στρατηγικών σκίασης και δείκτες αξιολόγησης (Samadi et al., 2020). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, επιλέχθηκε χώρος γραφείου στην Αθήνα με τις εξής γεωγραφικές συντεταγμένες:

- **Γεωγραφικό Πλάτος (Latitude):** 38° 01' Βόρεια (38.0167°)
- **Γεωγραφικό Μήκος (Longitude):** 23° 48' Ανατολικά (23.8000°)

Η μελέτη συγκρίνει τέσσερις στρατηγικές σκίασης για έναν χώρο γραφείου στην Αθήνα με βάση μετρήσεις φυσικού φωτισμού και θάμβωσης. Οι τέσσερις στρατηγικές επιλέχθηκαν για να καλύψουν το εύρος σχεδιασμού: μια αναφορά χωρίς σκίαση, μια πλήρως ανοιχτή στατική βάση, μια δυναμική αποκοπή που ακολουθεί τον ήλιο και τον βέλτιστο διαφοροποιημένο έλεγχο δύο ζωνών.

Συγκεκριμένα:

- `base_no_blinds` — Αναφορά ανώτατου ορίου για τον φυσικό φωτισμό και κατώτατου ορίου για τον έλεγχο θάμβωσης
- `static_open` — Η απλούστερη παθητική βάση (περσίδες πάντα ακίνητες).
- `dynamic_cutoff` — αναλυτικός έλεγχος (καθοδηγούμενος από τη θέση του ήλιου, ανεξάρτητα από τον καιρό).
- `well_c_dual_zone` — Ο έλεγχος με την καλύτερη απόδοση (το επάνω μέρος ακολουθεί τον ήλιο, το κάτω παραμένει ανοιχτό)

**Πίνακας 2: Στρατηγικές Σκίασης και Βασικοί Δείκτες Φυσικού Φωτισμού / Θάμβωσης**

| Στρατηγική                    | sDA300/50 (%) | ASE1000,250 (%) | WELL L06 |
|-------------------------------|---------------|-----------------|----------|
| <code>base_no_blinds</code>   | 100.00        | 33.33           | No       |
| <code>static_open</code>      | 100.00        | 0.00            | Yes      |
| <code>dynamic_cutoff</code>   | 100.00        | 0.00            | Yes      |
| <code>well_c_dual_zone</code> | 100.00        | 0.00            | Yes      |
|                               |               |                 |          |

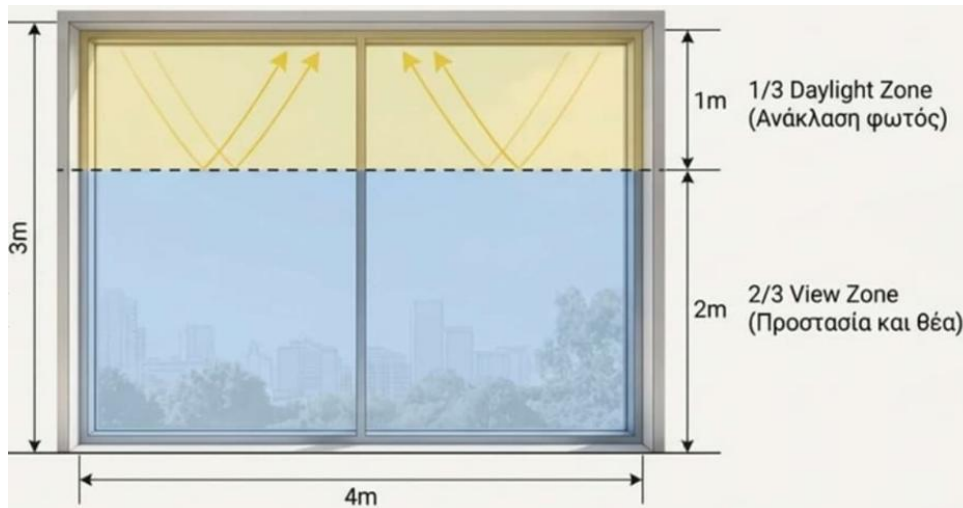
#### 4.2.2. Δωμάτιο προσομοίωσης

##### Γεωμετρία δωματίου

Το ορθογώνιο δωμάτιο με διαστάσεις 4 m×7 m×3 m (ύψος), με την πρόσοψη στον νότιο τοίχο ( $Y = 0$ ), έχει διαστάσεις παραθύρου 3.90 m×2.90 (WWR  $\approx$  94.25%). Και οι τέσσερις περιπτώσεις μοιράζονται την ίδια γεωμετρία δωματίου.

##### Παράθυρο

Στην πρόσοψη, πραγματοποιείται διαχωρισμός του παραθύρου στα 2μ κατώτερη ζώνη και 1μ ανώτερη ζώνη προκειμένου να εξασφαλίζεται απόλυτα η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (View Clarity) σε απόλυτη ισορροπία με την οπτική άνεση του χρήστη. Αυτό ισχύει για όλες τις Στρατηγικές Σκίασης εκτός από το `base_no_blinds` σενάριο αναφοράς.



Εικόνα 6: διαχωρισμός του παραθύρου

#### 4.2.3 Καιρός και Κλίμα Σύνοψη EPW Αθήνας

Τα κλιματικά δεδομένα της προσομοίωσης προέρχονται από το αρχείο Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (EPW) για την Αθήνα (37,9°B, 23,7°A, GMT+2), το οποίο καλύπτει το σύνολο των 8.760 ωρών του έτους. Το αρχείο παρέχει ωριαίες τιμές άμεσης κανονικής και οριζόντιας διάχυτης ακτινοβολίας, που αξιοποιούνται τόσο στις ετήσιες προσομοιώσεις φωτισμού όσο και στις αναλύσεις στιγμιαίων συνθηκών κατά τα ηλιοστάσια.

##### Ετήσιες ώρες ανατολής ηλίου και γωνία προφίλ

Η Αθήνα έχει περίπου 4.380 ώρες ανατολής ηλίου/έτος. Η γωνία προφίλ στη νότια πρόσοψη κυμαίνεται από ~28° στο χειμερινό ηλιοστάσιο έως ~75° στο θερινό, καθορίζοντας το εύρος γωνίας αποκοπής που χρησιμοποιεί το `dynamic_cutoff`.

##### Το κλίμα της Αθήνας

Το κλίμα της Αθήνας συνδυάζει υψηλή άμεση κανονική ακτινοβολία με κυρίως αίθριο ουρανό. Μια νοτιοπρόσωπη πρόσοψη με 94% WWR δέχεται περισσότερη άμεση δέσμη παρά διάχυτη κατά τις κατειλημμένες ώρες, οπότε οποιοδήποτε ανεξέλεγκτο υαλοστάσιο παράγει υπερβολικό ASE. Αποτελεσματικοί έλεγχοι πρέπει να αποκλείουν ή να ανακατευθύνουν επιθετικά τον άμεσο ήλιο διατηρώντας παράλληλα χρήσιμο φυσικό φωτισμό.

#### 4.3. Μηχανή & παράμετροι Radiance

Η φιλοσοφία του Radiance εστιάζει στη γνήσια οπτικοποίηση του φωτισμού μέσω του υπολογισμού φυσικών μεγεθών, όπως η ακτινοβολία και η λαμπρότητα, διαφοροποιούμενο από συμβατικά προγράμματα που στοχεύουν απλώς στον φωτορεαλισμό. Ως ένα εργαλείο καθολικού φωτισμού (global illumination), επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικών εικόνων που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, αποτελώντας ένα αξιόπιστο πεδίο δοκιμών για προηγμένους αλγόριθμους απόδοσης. Η μηχανή χρησιμοποιεί τη μέθοδο light-backwards ray-tracing, όπου οι ακτίνες ιχνηλατούνται από το σημείο μέτρησης προς τις πηγές φωτός για τη βελτιστοποίηση του υπολογισμού. (Larson, G. W. et al., 1998)

##### 4.3.1. Η μηχανή Radiance και η μέθοδος Ray-Tracing

Για την επίλυση της εξίσωσης του φωτισμού, το Radiance διαχωρίζει τον υπολογισμό σε **Άμεσο (Direct)** και **Έμμεσο (Indirect)** φωτισμό, εφαρμόζοντας μια υβριδική ντετερμινιστική-στοχαστική μέθοδο (Larson, G. W. et al., 1998)

**Light-backwards Ray-Tracing:** Το Radiance χρησιμοποιεί την "αντίστροφη ιχνηλάτηση ακτίνων". Οι ακτίνες ξεκινούν από το σημείο μέτρησης (κάμερα ή φωτόμετρο) και ιχνηλατούνται προς τα πίσω, προς τις πηγές. Αν η ιχνηλάτηση γινόταν κανονικά (από την πηγή προς το χώρο), ο υπολογισμός μιας απλής λάμπας σε ένα δωμάτιο θα απαιτούσε μήνες στον πιο γρήγορο υπερυπολογιστή, επειδή το μεγαλύτερο μέρος του φωτός δεν φτάνει ποτέ στο σημείο ενδιαφέροντος. Με την αντίστροφη ιχνηλάτηση, ο χρόνος μειώνεται σε δευτερόλεπτα

**Άμεσος Φωτισμός (Direct Calculation):** Για τον άμεσο φωτισμό, το σύστημα αφαιρεί τον μεγάλο όγκο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ελέγχοντας έξυπνα τις πηγές. Εφαρμόζει:

Επιλεκτικό έλεγχο σκιών (Selective Shadow Testing): Ταξινομεί και ελέγχει πρώτα τις πιο σημαντικές πηγές φωτός και σταματά όταν το υπόλοιπο ποσοστό σφάλματος είναι κάτω από το επιτρεπτό όριο, προσεγγίζοντας στατιστικά τα υπόλοιπα.

Προσαρμοστική υποδιαίρεση πηγών (Adaptive Source Subdivision): Υποδιαίρει τις μεγάλες πηγές φωτός (π.χ. παράθυρα ή μεγάλα φωτιστικά) μέχρι ο λόγος πλάτους/απόστασης να είναι επαρκώς μικρός για την αποφυγή σφαλμάτων (ελέγχεται από την παράμετρο -ds).

**Έμμεσος Φωτισμός (Indirect Calculation / Global Illumination):** Το κλασικό ray-tracing αποτυγχάνει στις πολλαπλές διάχυτες ανακλάσεις. Το Radiance λύνει το πρόβλημα εφαρμόζοντας "**Indirect Irradiance Caching**". Στέλνει στοχαστικές ακτίνες (samples) σε όλο το ημισφαίριο για να υπολογίσει την έμμεση ακτινοβολία σε συγκεκριμένα σημεία και αποθηκεύει προσωρινά (caching) αυτές τις τιμές πάνω στη γεωμετρία, ώστε να τις επαναχρησιμοποιήσει μέσω παρεμβολής (interpolation) για τα γειτονικά σημεία.

**Παράμετροι Ελέγχου Ακρίβειας (Ambient Parameters):** Η ποιότητα αυτού του αλγορίθμου ελέγχεται αυστηρά από παραμέτρους :

**-ab (Ambient Bounces):** Ο μέγιστος αριθμός διάχυτων ανακλάσεων. Τιμή 0 σημαίνει απουσία έμμεσου φωτισμού. Για αξιόπιστες μελέτες φυσικού φωτισμού απαιτούνται συνήθως 5-7 ανακλάσεις.

**-ad (Ambient Divisions):** Ο αριθμός των αρχικών ακτίνων που στέλνονται από ένα σημείο για να δειγματοληψούν το ημισφαίριο (π.χ. 1024 ή 2048).s

**-as (Ambient Super-samples):** Επιπλέον ακτίνες δειγματοληψίας που αποστέλλονται μόνο σε περιοχές με υψηλή διακύμανση, για εξομάλυνση του "θορύβου".

**-ar (Ambient Resolution) & -aa (Ambient Accuracy):** Ελέγχουν την πυκνότητα των αποθηκευμένων τιμών και το επιτρεπτό σφάλμα κατά την παρεμβολή. Μικρότερο -aa (π.χ. 0.08) σημαίνει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά αυξημένο χρόνο υπολογισμού. (Larson, G. W. et al., 1998, "Rendering with Radiance: A Practical Tool for Global Illumination") (McNeil, A. & Lee, E. S., 2013)

Με βάση τις παραπάνω αρχές λειτουργίας, ορίστηκαν για την υπό εξέταση προσομοίωση οι ακόλουθοι παράμετροι ακρίβειας, κοινές και για τις τέσσερις εξεταζόμενες στρατηγικές σκίασης:

-ab 5 -ad 4096 -as 2048 -ar 512 -aa 0.05

#### 4.3.2. Ορισμός υλικών και συντελεστές ανάκλασης (80/50/20)

Ο **ορισμός των υλικών** στο Radiance (αρχεία .mat) καθορίζει τις οπτικές ιδιότητες των επιφανειών, όπως η αντανάκλαση, η μετάδοση ή η εκπομπή του φωτός, βασιζόμενος σε μετρήσιμα φυσικά δεδομένα αντίθετα με άλλα λογισμικά. Η σύνταξη για την περιγραφή ενός υλικού είναι αυστηρή και ακολουθεί τη δομή modifier type identifier N S1... 0 M R1.... Σε αυτή τη δομή, ο τύπος (type) καθορίζει το μαθηματικό μοντέλο, ενώ τα πραγματικά ορίσματα (M R1...) προσδιορίζουν τις τιμές ανάκλασης RGB, την κατοπτρικότητα και άλλες ιδιότητες.

Το Radiance υποστηρίζει διάφορους βασικούς τύπους υλικών (Types) για διαφορετικές εφαρμογές. Το plastic αποτελεί το πιο κοινό υλικό και χρησιμοποιείται για επιφάνειες με διάχυτη ανάκλαση όπου οι γυαλάδες (highlights) δεν χρωματίζονται, όπως συμβαίνει με τους βαμμένους τοίχους, το πλαστικό και το ξύλο. Το υλικό metal είναι παρόμοιο με το plastic, με τη διαφορά ότι οι κατοπτρικές ανακλάσεις (γυαλάδες) τροποποιούνται από το χρώμα του ίδιου του υλικού. Το glass είναι ένα βελτιστοποιημένο υλικό για λεπτές γυάλινες επιφάνειες, όπως τα τζάμια των παραθύρων, το οποίο υπολογίζει πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις χωρίς να απαιτείται η ξεχωριστή ιχνηλάτηση ακτίνων, εξοικονομώντας έτσι χρόνο. Τέλος, το trans χρησιμοποιείται για ημιδιαφανείς επιφάνειες που διαχέουν το φως το οποίο διέρχεται από αυτές, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το αμμοβολισμένο γυαλί και τα υφάσματα (Larson, G. W. et al., 1998)

Για την απόδοση των τυπικών συντελεστών αρχιτεκτονικού φωτισμού, γνωστοί ως ορισμός συντελεστών 80/50/20 (80% ανακλαστικότητα για την οροφή, 50% ανακλαστικότητα για τους τοίχους, 20% ανακλαστικότητα για το δάπεδο) καθορίζονται τα τρία δεκαδικά ορίσματα RGB της παραμέτρου plastic. Η συνολική ανάκλαση υπολογίζεται από το λογισμικό βάσει της συνάρτησης φωτεινής αποτελεσματικότητας:  $0.265 * R + 0.670 * G + 0.065 * B$ . (McNeil, A. & Lee, E. S., 2013)

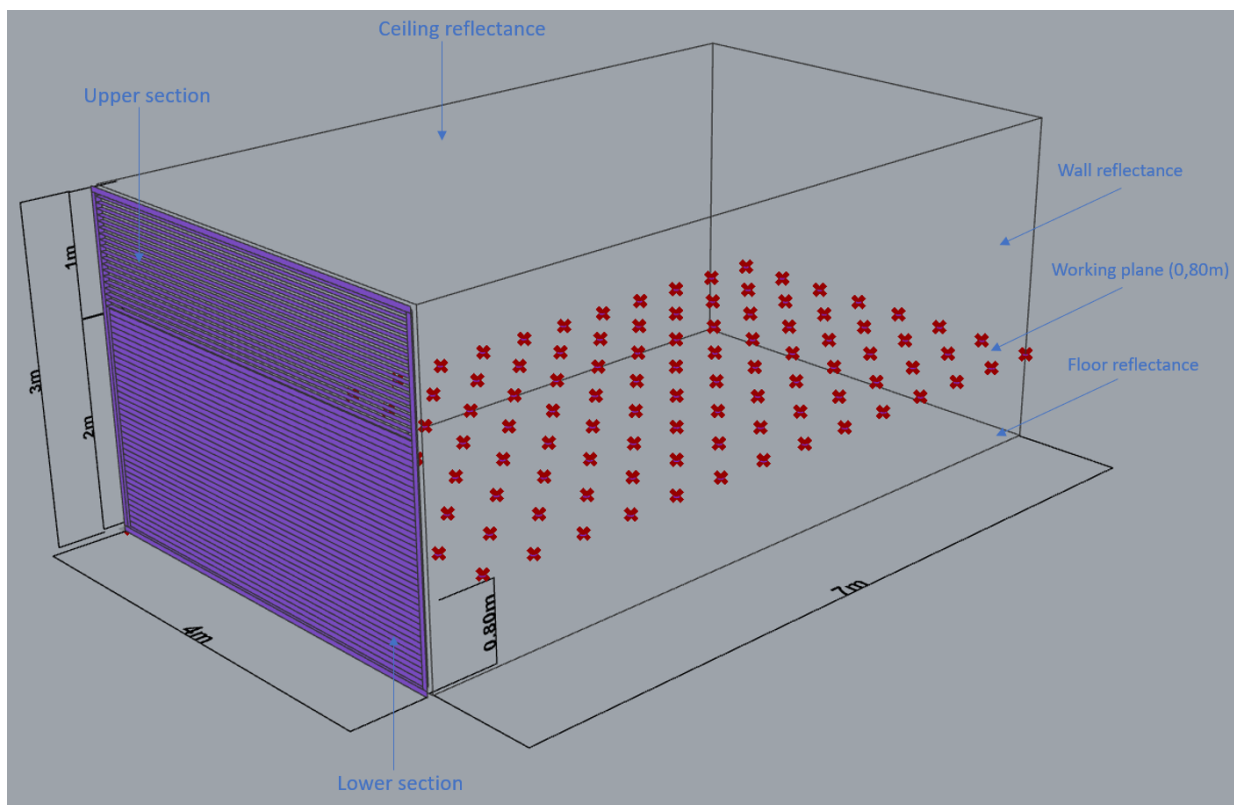
Όσον αφορά τους φυσικούς περιορισμούς και την οπτική ακρίβεια, η φύση δεν διαθέτει απόλυτους ανακλαστές, επομένως αν εισαχθούν τιμές RGB μεγαλύτερες από 1, το Radiance θα προκαλέσει λανθασμένη συμπεριφορά στο αντικείμενο, κάνοντάς το να "λάμπει" (εκπομπή). Σχετικά με την κατοπτρικότητα και την τραχύτητα, αναφέρεται ρητά ότι για την παράμετρο plastic, τιμές κατοπτρικής ανάκλασης (specularity) μεγαλύτερες από 0.1 και τιμές τραχύτητας (roughness) μεγαλύτερες από 0.2 είναι σπάνιες έως ρεαλιστικά ανέφικτες στη φύση. Επιφάνειες όπως οι ματ βαμμένοι τοίχοι έχουν συνήθως μηδενική κατοπτρικότητα και μηδενική τραχύτητα. Επιπλέον, για τον καθορισμό των παραθύρων με τη χρήση του υλικού glass απαιτείται τεράστια προσοχή, καθώς το υλικό αυτό δεν

δέχεται ως όρισμα τη διαπερατότητα (Transmittance -  $T_n$ ) που δίνουν συνήθως οι κατασκευαστές, αλλά την εσωτερική διαπερατότητα του υλικού (Transmissivity -  $tn$ ). (McNeil, A. & Lee, E. S., 2013 )

#### 4.4. Αισθητήρες και Θέσεις παρατήρησης

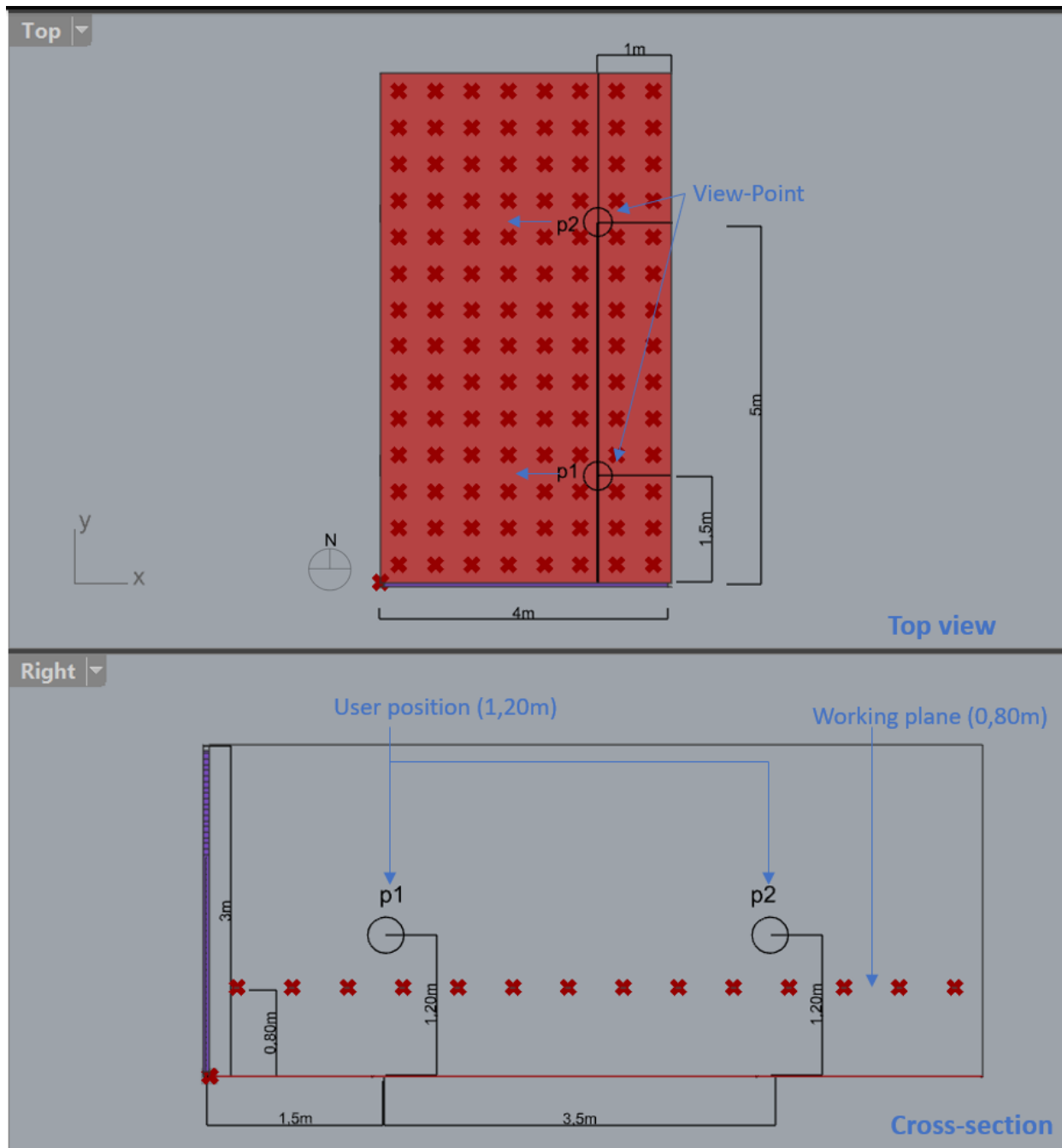
Η ακριβής προσομοίωση της συμπεριφοράς του φυσικού φωτισμού και των ενεργειακών φορτίων απαιτεί τον αυστηρό καθορισμό της γεωμετρίας του υπό εξέταση χώρου, καθώς και την ορθή τοποθέτηση των σημείων μέτρησης. Στη μεθοδολογία του παραμετρικού σχεδιασμού, η διαμόρφωση ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος δοκιμών και η στρατηγική τοποθέτηση εικονικών αισθητήρων είναι τα στοιχεία που επιτρέπουν στον σχεδιαστή να συλλέξει αξιόπιστα ποσοτικά δεδομένα. Στοιχεία όπως ο δείκτης φυσικού φωτισμού (Daylight Factor), η φωτεινότητα στις επιφάνειες εργασίας και τα επίπεδα θάμβωσης (glare), εξαρτώνται άμεσα από το πώς και πού μετρώνται μέσα στο ψηφιακό μοντέλο, εξάγοντας έτσι ασφαλή συμπεράσματα για την απόδοση των συστημάτων σκίασης.

##### 4.4.1. Πλέγματα Ανάλυσης (Sensor Grids)



Εικόνα 7 : Πλέγμα Ανάλυσης

Η αξιολόγηση του φωτισμού και της οπτικής άνεσης επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας πλεγμάτων ανάλυσης (Sensor Grids) (Eltaweel et al., 2021). Πρόκειται για κάρναβους σημείων οι οποίοι ορίζονται από τρισδιάστατες συντεταγμένες ( $x, y, z$ ) και διανύσματα κατεύθυνσης ( $dx, dy, dz$ ). Αυτά τα αρχεία σημείων διαβάζονται από μηχανές προσομοίωσης όπως το πρόγραμμα rtrace του Radiance, προκειμένου να υπολογιστεί η ακτινοβολία και η λαμπρότητα στο εκάστοτε σημείο (Wu & Zhang, 2022) Για την αναπαράσταση της επιρροής του φωτός στον χώρο, το μέγεθος του κανάβου των αισθητήρων πρέπει να είναι αυστηρά ανάλογο και προσαρμοσμένο στις διαστάσεις του δωματίου (Shi et al., 2020). Με σκοπό την επίτευξη των στόχων της έρευνας, χρησιμοποιήθηκε Πλέγμα  $8 \times 14$ , δηλαδή με 112 αισθητήρες.



Εικόνα 8 : Θέσεις παρατήρησης p1 και p2 για την αξιολόγηση της θάμβωσης στον χώρο του γραφείου.

**Πλέγμα επιπέδου εργασίας** (DA, UDI, φωτισμός): οριζόντιο σε ύψος 0,8μ.

Το πρώτο και βασικότερο επίπεδο μέτρησης είναι το οριζόντιο πλέγμα (Working plane), το οποίο τοποθετείται στο ύψος των 0.80 μέτρων (Wu & Zhang, 2022; Shi et al., 2020). Αυτό το ύψος αναπαριστά την τυπική επιφάνεια εργασίας (όπως το ύψος ενός γραφείου) (Eltaweel et al., 2021). Στο πλέγμα αυτό, οι εικονικοί "αισθητήρες" έχουν κατεύθυνση αυστηρά προς τα πάνω ( $dx=0$ ,  $dy=0$ ,  $dz=1$ ) για να υπολογίσουν την οριζόντια φωτεινότητα (horizontal illuminance). Η ανάλυση σε αυτό το ύψος επιτρέπει τον υπολογισμό του δείκτη Daylight Factor (DF) σε όλη την κάτοψη, υποδεικνύοντας την "Ωφέλιμη Επιφάνεια" (Useful Area) – δηλαδή τα τετραγωνικά μέτρα του δαπέδου που δέχονται επαρκή, αλλά όχι εκτυφλωτικό, φυσικό φωτισμό (ιδανικά 2% έως 5% DF) για την εκτέλεση εργασιών γραφείου (Samadi et al., 2020).

**Πλέγμα θάμβωσης** (DGP): σημεία παρατήρησης σε ύψος ματιών 1,2μ.

Το δεύτερο επίπεδο μέτρησης είναι το κατακόρυφο πλέγμα (View/Glare), το οποίο τοποθετείται στο τυπικό ύψος του ματιού ενός καθημένου χρήστη, δηλαδή στο 1.2 μέτρα από το δάπεδο (Eltaweel et al., 2021). Στόχος αυτού του κατακόρυφου πλέγματος είναι η αυστηρή αξιολόγηση της οπτικής άνεσης μέσα από το άμεσο πεδίο όρασης (field of view) του χρήστη (Sommese et al., 2024). Μέσω των αισθητήρων αυτών μετρώνται οι απόλυτες τιμές λαμπρότητας (absolute luminance) στο κατακόρυφο επίπεδο και αναλύονται οι λόγοι αντίθεσης (luminance ratios) ανάμεσα στην επιφάνεια εργασίας (π.χ. ένα χαρτί), τους περιμετρικούς τοίχους και τις οθόνες υπολογιστών (Video Display Terminals - VDT) (Lee et al., 2021). Η ανάλυση στο 1.2m είναι απολύτως καθοριστική για τον εντοπισμό και την αποτροπή προβλημάτων θάμβωσης (discomfort και visibility glare), τα οποία συχνά προκαλούνται από την άμεση οπτική επαφή του ματιού με τον ουράνιο θόλο μέσω του παραθύρου ή από φωτεινές επιφάνειες που δέχονται ισχυρή άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Eltaweel et al., 2021; Sommese et al., 2024).

#### 4.4.2. Θέσεις παρατήρησης p1 και p2

Με βάση την εικόνα 8, ορίζονται οι θέσεις p1 και p2, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις δύο χαρακτηριστικές θέσεις παρατήρησης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της θάμβωσης (glare evaluation) στον χώρο του πρότυπου γραφείου.

Όπως φαίνεται στην τομή (Cross-section), και οι δύο χρήστες βρίσκονται σε ύψος εργασίας 0,8 m από το δάπεδο, με τα μάτια τους στο ύψος των 1,2 m. Η θέση p1 εντοπίζεται σε απόσταση 1,5 m από την πρόσοψη, αντιστοιχώντας στον χρήστη που κάθεται πλησιέστερα στο παράθυρο και εκτίθεται περισσότερο στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η θέση p2 εντοπίζεται σε απόσταση 3,5 m από την πρόσοψη, αντιστοιχώντας στον χρήστη που βρίσκεται στο βάθος του δωματίου, σε συνθήκες μειωμένης άμεσης έκθεσης. Οι θέσεις p1 και p2 τοποθετούνται κεντρικά ως προς το πλάτος του δωματίου, εξασφαλίζοντας αντιπροσωπευτικές συνθήκες παρατήρησης για την εκτίμηση του δείκτη DGP (Daylight Glare Probability) σε διαφορετικές αποστάσεις από την πρόσοψη.

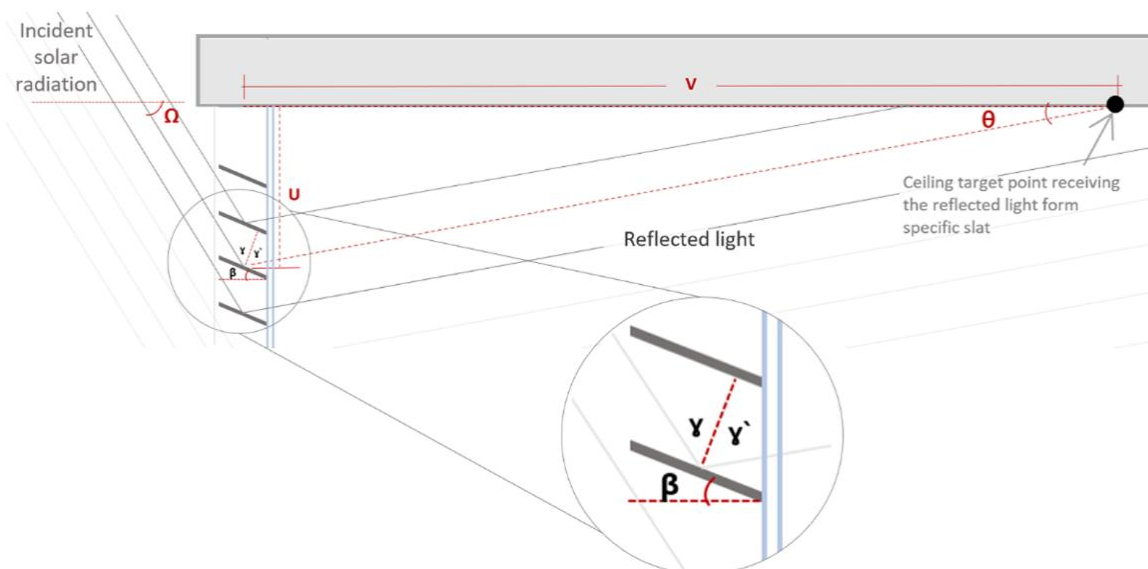
#### 4.5. Σχεδιασμός Split-Blinds και γεωμετρίες G0/G1/G2

##### 4.5.1. Διαχωρισμός ζωνών- Η στρατηγική Split-Blinds

Η παραμετρική διαδικασία προσαρμογής της γωνίας της περσίδας εξαρτάται από την ηλιακή γωνία προφίλ  $\Omega$ , επιπρόσθετα με την κατακόρυφη και οριζόντια απόσταση μεταξύ μιας περσίδας και ενός σημείου στην οροφή,  $V$  και  $U$  αντίστοιχα. Η γωνία κλίσης της περσίδας  $\beta$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την **Εξίσωση (1)** παραμετρικά από το Grasshopper όταν η ώρα και η ημερομηνία αλλάζουν χειροκίνητα. Η γωνία της περσίδας καθορίζεται διασφαλίζοντας ότι οι δύο απέναντι γωνίες  $\gamma$  και  $\gamma'$  πάνω από την περσίδα είναι πανομοιότυπες, όπου η πρώτη γωνία είναι η γωνία πρόσπτωσης ως προς την κάθετο της περσίδας και η άλλη γωνία είναι η τομή του ανακλώμενου φωτός και της καθέτου της περσίδας, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ήλιου. Το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο, επιπλέον του προσανατολισμού της επιφάνειας, επηρεάζουν όλα την ηλιακή γωνία προφίλ  $\Omega$ , η οποία είναι η κατακόρυφη γωνία μεταξύ της καθέτου στο παράθυρο και των ηλιακών ακτίνων κάθετα στο επίπεδο του παραθύρου. Η Εικόνα 9 δείχνει την ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτός στην οροφή από τις περιστρεφόμενες περσίδες με τις αναφερόμενες γωνίες. Η κλίση αυτή υπολογίζεται βάσει του τύπου της Εξίσωσης (1) ώστε να επιτυγχάνεται η ιδανική ανάκλαση της ακτινοβολίας προς την οροφή του χώρου (Alsukkar, M., Hu, M., et al., 2022)

$$\beta = (\Omega - \tan^{-1}(U/V)) / 2 \quad \text{Εξίσωση (1)}$$

Στην προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση, η Εξίσωση (1) υλοποιήθηκε παραμετρικά εντός του Grasshopper, υπολογίζοντας σε πραγματικό χρόνο τη γωνία κλίσης  $\beta$  για κάθε περσίδα της Άνω Ζώνης, με βάση τα ωριαία κλιματικά δεδομένα του αρχείου EPW της Αθήνας.



Εικόνα 9: Ανακατεύθυνση του ηλιακού φωτός στην οροφή από τις περιστρεφόμενες περσίδες (Incident solar radiation)

Οι περσίδες στην **Άνω Ζώνη (Daylighting)** ρυθμίζονται έτσι ώστε να ανακατευθύνουν το ηλιακό φως προς την οροφή (redirection), επιτρέποντάς του να διεισδύσει βαθύτερα στον χώρο.

Ο κώδικας του Grasshopper χρησιμοποιεί τα κλιματικά δεδομένα (.epw) για να υπολογίσει ανά πάσα στιγμή τη **Ηλιακή Γωνία Προφίλ (Solar Profile Angle)**. Αυτή είναι η «κλασική» γεωμετρική βάση που καθορίζει αν οι περσίδες πρέπει να είναι ανοιχτές ή κλειστές.

Γενικά η στρατηγική Split-Blinds είναι η πλέον εξελιγμένη απάντηση στο πρόβλημα της ανομοιογενούς κατανομής του φωτός. Αντί η πρόσοψη να αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο φράγμα, διασπάται λειτουργικά και μηχανολογικά σε δύο τμήματα. Το άνω τμήμα (Daylight Zone) είναι αποκλειστικά υπεύθυνο για την «έγχυση» και την ανακατεύθυνση του φυσικού φωτός. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι οι επίπεδες περσίδες σε αυτή τη ζώνη συχνά εστιάζουν το φως σε λάθος σημεία. Αντιθέτως, η χρήση παραμετρικά σχεδιασμένων περσίδων με κυρτή επιφάνεια (convex slats) ή ειδικών πρισματικών υαλοπινάκων στο άνω τμήμα, διασκορπίζει ομοιόμορφα τις ηλιακές ακτίνες προς τη φωτεινή επιφάνεια της οροφής. Έτσι, το ταβάνι μετατρέπεται σε ένα μεγάλο, έμμεσο φωτιστικό σώμα (Alsukkar et al ,2023; Ibrahim et al , 2024)

#### 4.5.2. Επίδραση της στρατηγικής στον δείκτη View Factor (Πρότυπο WELL L06)

Η σημασία του διαχωρισμού των ζωνών υπερβαίνει την απλή φωτομετρία και εισέρχεται στη σφαίρα της βιολογικής ευεξίας, στοχεύοντας στην ικανοποίηση κριτηρίων όπως ο δείκτης View Factor του προτύπου WELL (Tabadkani et al., 2021; Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022). Το τυπικό πρόβλημα με τα παραδοσιακά συστήματα σκίασης (ενιαία στόρια) είναι ο ανθρώπινος παράγοντας: όταν ο ήλιος τυφλώνει έναν εργαζόμενο, εκείνος κατεβάζει πλήρως τα στόρια και συχνά τα αφήνει κλειστά για όλη την υπόλοιπη ημέρα, αποκόπτοντας κάθε οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και ακυρώνοντας την περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου (Tabadkani et al., 2021; Lee et al., 2021) Η λογική Split-Blinds εξασφαλίζει ότι το κάτω τμήμα των περσίδων θα ρυθμιστεί στην ακριβή οριακή γωνία (cut-off angle) που κόβει τον άμεσο ήλιο, διατηρώντας τα οριζόντια διάκενα ανοιχτά (Wu & Zhang, 2022; Lee et al., 2021). Έτσι, ο εργαζόμενος δεν νιώθει ποτέ κλειστοφοβία, η όρασή του έχει σημεία φυγής (οπτική ξεκούραση) και η επαφή με τον καιρό και τη φύση παραμένει αδιατάρακτη, αυξάνοντας μετρήσιμα την παραγωγικότητα και την οπτική άνεση (Eltaweel et al., 2021; Tabadkani et al., 2021).

Κατά την υπολογιστική ροή εργασίας, η συμμόρφωση με το πρότυπο WELL L06 αποτελεί ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης των τεσσάρων στρατηγικών σκίασης, όπως παρουσιάζεται συγκριτικά στον Πίνακα 2

#### 4.5.3. Γεωμετρίες G0/G1/G2

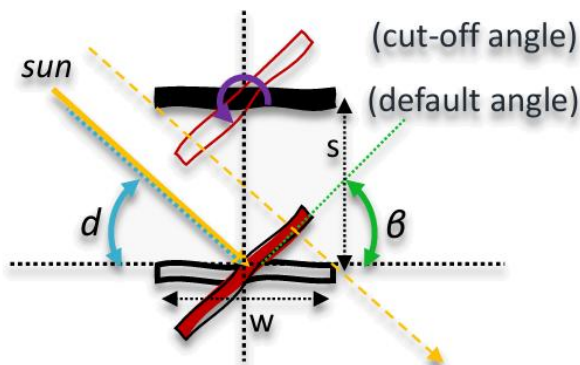
«Στο περιβάλλον της προσομοίωσης, οι γεωμετρίες των περσίδων κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους — G0, G1 και G2 — ανάλογα με τη σχέση μεταξύ χορδής ( $w$ ) και βήματος πτερυγίου ( $s$ ). Η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας για κάθε σενάριο δεν είναι τυχαία, αλλά υπαγορεύεται από τη στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζει το κάθε σενάριο: η G0 αντιστοιχεί στην πλήρη απουσία περσίδων, η G1 σε περσίδες όπου η χορδή ισούται με το βήμα επιτρέποντας πλήρη σκίαση σε κλίση  $\pm 90^\circ$ , και η G2 σε περσίδες με μικρότερη χορδή από το βήμα, οι οποίες διατηρούν συνειδητά σχισμές 15,27 χλστ. ακόμα και σε πλήρως κλειστή θέση, εξυπηρετώντας έτσι τη στρατηγική αποκοπής του `dynamic_cutoff`.

**Πίνακας 3: Κατηγορίες γεωμετρίας περσίδων**

| Κατηγορία         | Χρησιμοποιείται από           | Χορδή πτερυγίου ( $w$ ) | Βήμα πτερυγίου ( $s$ ) | Πλήθος       |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|
| G0 (χωρίς)        | base_no_blinds                | —                       | —                      | 0            |
| G1 (χορδή = βήμα) | static_open, well_c_dual_zone | 50.877 mm               | 50.877 mm              | 57 (38 + 19) |
| G2 (χορδή < βήμα) | dynamic_cutoff                | 35.60 mm                | 50.877 mm              | 57 (38 + 19) |

**Βήμα Πτερυγίου ( $s$ ) :** Είναι η απόσταση από το κέντρο μιας περσίδας μέχρι το αντίστοιχο σημείο της ακριβώς από πάνω ή από κάτω περσίδας.

**Χορδή Πτερυγίου ( $w$ ) :** Είναι η απόσταση από τη μία άκρη της περσίδας έως την άλλη άκρη της



- $\beta$ : Blind cut-off slat angle.
- $d$ : Blind slat profile angle.
- $s$ : Slat separation distance.
- $w$ : Slat width.

**Εικόνα 10:** Χορδή και Βήμα πτερυγίου

#### 4.6. Λογική Ελέγχου και Ορισμός Καταστάσεων Σκίασης

##### 4.6.1. Η μέθοδος "Detailed Dynamic Shading" (DDS) και οι Καταστάσεις (States)

Η ενσωμάτωση δυναμικών και πολύπλοκων συστημάτων σκίασης σε λογισμικά προσομοίωσης, όπως το Radiance και το EnergyPlus, αποτελεί μια σημαντική υπολογιστική πρόκληση, καθώς απαιτείται η ταυτόχρονη μοντελοποίηση της μετάδοσης του φωτός μέσω περίπλοκων συστημάτων και των προσαρμοσμένων στρατηγικών ελέγχου τους. Επειδή η κίνηση μιας δυναμικής πρόσοψης είναι μια συνεχής διαδικασία με άπειρες ενδιάμεσες θέσεις, τα υπολογιστικά εργαλεία αδυνατούν να υπολογίσουν την απόδοση του φωτισμού σε πραγματικό χρόνο για κάθε χιλιοστό της κίνησης.

Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τη διακριτοποίηση (discretization) της συνεχούς κίνησης του σκιάστρου σε ένα πεπερασμένο σύνολο στατικών γεωμετρικών «Καταστάσεων» (Shade States) (Do, C.T., Chan, Y.-C., 2020).

Για παράδειγμα, ένα παραμετρικό σύστημα περσίδων δεν αναλύεται εν κινήσει, αλλά μοντελοποιείται σε συγκεκριμένα βήματα (π.χ. State 0: πλήρως ανοιχτό, State 1: κλειστό κατά 30°, State 2: κλειστό κατά 60°, κ.ο.κ.) (Hu, J., Olbina, S., 2011). Οι αλγόριθμοι ιχνηλασίας ακτίνων (όπως για παράδειγμα η μέθοδος τριών φάσεων - three-phase method - του Radiance) εκτελούνται ξεχωριστά για την κάθε κατάσταση, παράγοντας διαφορετικά δεδομένα και χάρτες φωτισμού για την καθεμία (Do, C.T., Chan, Y.-C., 2020). Στη συνέχεια, το υπολογιστικό μοντέλο, λαμβάνοντας τα ωριαία κλιματικά δεδομένα από τα αρχεία EPW (EnergyPlus Weather data), σαρώνει μέσω ενός εξωτερικού αλγορίθμου όλες τις διαθέσιμες καταστάσεις και επιλέγει (ή συνδυάζει) για τη συγκεκριμένη ώρα εκείνο το State που ικανοποιεί βέλτιστα τα κριτήρια οπτικής άνεσης και αποφυγής θάμβωσης (Do, C.T., Chan, Y.-C., 2020). Αυτή η παραμετρική διακριτοποίηση είναι το κλειδί που γεφυρώνει τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό (π.χ. μέσω των Rhinoceros και Grasshopper) με την πολύπλοκη ανάλυση ενεργειακής απόδοσης (Alsukkar, M., Hu, M., et al., 2023)

Για τις ανάγκες της δυναμικής προσομοίωσης, κατασκευάστηκε εκ των προτέρων μια κοινή βάση δεδομένων φωτισμού, η οποία προέκυψε από την εκτέλεση ξεχωριστής προσομοίωσης Radiance για κάθε έναν από τους 361 δυνατούς συνδυασμούς γωνιών κλίσης των δύο ζωνών (19 θέσεις άνω ζώνης × 19 θέσεις κάτω ζώνης, με βήμα 10° από -90° έως +90°). Η βάση αυτή είναι κοινή και για τα δύο δυναμικά σενάρια — η διαφορά τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο ανατρέχουν σε αυτήν: το σενάριο `dynamic_cutoff` επιλέγει ανά κατελημμένη ώρα εκείνο τον συνδυασμό όπου οι δύο ζώνες κινούνται ταυτόχρονα με την ίδια γωνία αποκοπής που υπαγορεύει η γεωμετρία του ήλιου, καταλήγοντας σε 48 μοναδικές καταστάσεις κατά τη διάρκεια του έτους· το σενάριο `well_c_dual_zone`, αντίθετα, επιλέγει ανεξάρτητα τη γωνία κάθε ζώνης με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του sDA και τον περιορισμό του DGP κάτω από 0,4, καταλήγοντας σε 13 μοναδικά ζεύγη γωνιών για ολόκληρο το έτος (Do & Chan, 2020). Στις επόμενες ενότητες (4.7.1–4.7.4) παρουσιάζεται αναλυτικά το σύνολο των καταστάσεων που υιοθετεί κάθε σενάριο ξεχωριστά, καθώς και το ετήσιο πρόγραμμα λειτουργίας τους.

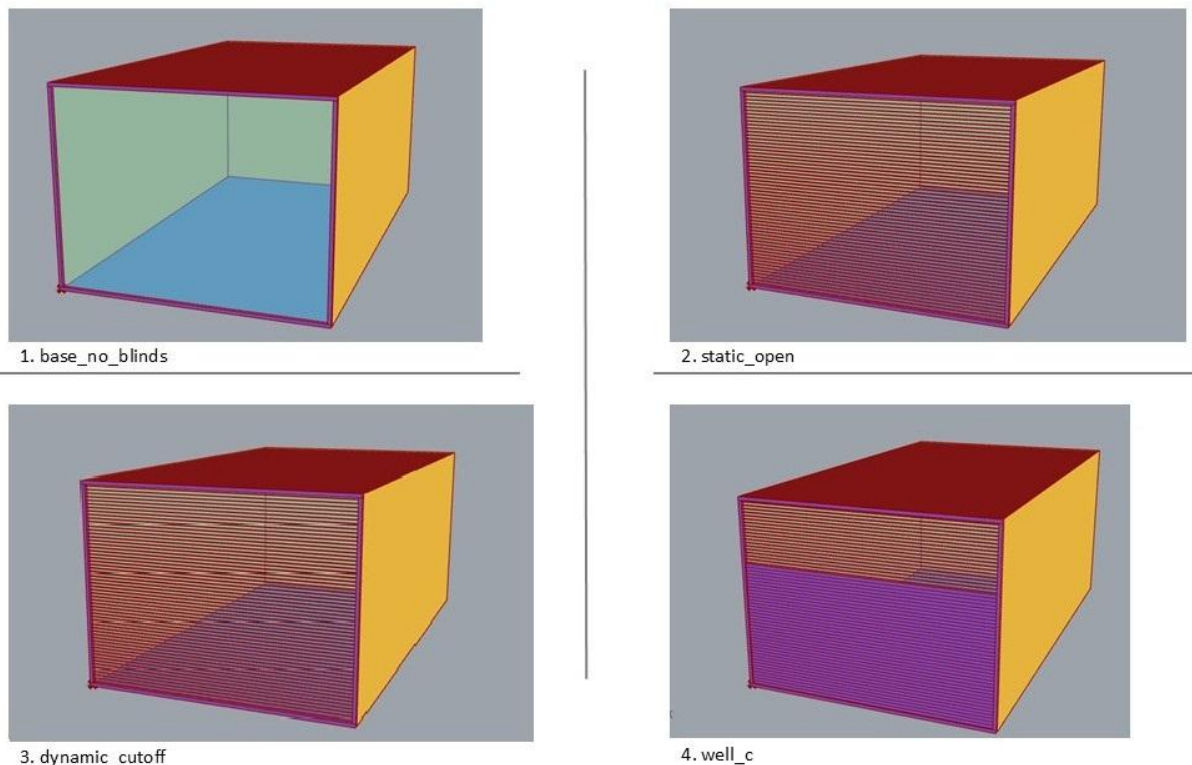
##### 4.6.2. Χρονοπρογραμματισμός (Scheduling) και Λειτουργική Ισορροπία

Ο χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας (Scheduling) εναρμονίζει την κίνηση της πρόσοψης με το ωράριο κατοίκησης (occupancy schedule) του κτιρίου γραφείων (Wu & Zhang, 2022).

Στην συγκεκριμένη ανάλυση, ο αλγόριθμος ελέγχου εφαρμόζεται αποκλειστικά κατά τις κατελημμένες ώρες του κτιρίου, με βάση το τυπικό ωράριο γραφείου. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση καλύπτει τις καθημερινές (Δευτέρα έως Παρασκευή) από τις 08:00 έως τις 17:00, αντιστοιχώντας σε 2.600 κατελημμένες ώρες ανά έτος, όπως ορίζονται στο αρχείο `occupancy_8to17_weekdays.csv`, το οποίο περιλαμβάνει 8.760 εγγραφές με συνολικό άθροισμα 2.600 ωρών παρουσίας.

#### 4.7. Σενάρια Προσομοίωσης

Η μετάβαση από τον θεωρητικό σχεδιασμό στην πρακτική αξιολόγηση ενός δυναμικού συστήματος σκίασης απαιτεί τη συγκριτική του ανάλυση έναντι συμβατικών καταστάσεων. Για την ακριβή ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς του παραμετρικού σχεδιασμού στην οπτική άνεση και την ενεργειακή συμπεριφορά, η μεθοδολογία επιβάλλει την εκτέλεση διακριτών σεναρίων προσομοίωσης (Case Studies). Μέσω εργαλείων όπως το Rhino/Grasshopper και οι μηχανές Radiance, τα σενάρια αυτά αξιολογούν τον χώρο αναφοράς υπό διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης της όψης, επιτρέποντας την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων βάσει των δεικτών SDA (Spatial Daylight Autonomy), ASE (Annual Sunlight Exposure) και DGP (Daylight Glare Probability). Τα εξεταζόμενα σενάρια δομούνται κλιμακωτά, από την πλήρη απουσία προστασίας έως τον απόλυτο αλγοριθμικό διαχωρισμό, με σκοπό τη διερεύνηση της βέλτιστης υπολογιστικής προσέγγισης και της ευφυούς συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους (Fattahi Tabasi & Banihashemi, 2022; Samadi et al., 2020).



Εικόνα 11: Τα 4 Σενάρια Προσομοίωσης

##### 4.7.1. Σενάριο Αναφοράς: Χωρίς Σκίαση (Baseline / No-Blinds)

Το πρώτο σενάριο (base\_no\_blinds) αποτελεί το απαραίτητο σημείο αναφοράς (benchmark) για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας όλων των υπόλοιπων στρατηγικών και δεν αποτελεί πρόταση σχεδιασμού. Ο χώρος προσομοιούται με πλήρως ελεύθερο υαλοστάσιο (γεωμετρική κλάση G0), επιτρέποντας την ανεμπόδιση και άμεση είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στον εσωτερικό χώρο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και της ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφονται οι μέγιστες δυνατές τιμές φυσικού φωτισμού, αλλά ταυτόχρονα και οι χειρότερες συνθήκες θάμβωσης, ορίζοντας τα δύο ακραία όρια του προβλήματος. Η απουσία οποιουδήποτε στοιχείου σκίασης οδηγεί σε ακραίο ετήσιο υπερφωτισμό ( $UDI > 2000 \text{ lx}$ ) και έντονη οπτική δυσφορία για τον χρήστη,

με τις τιμές της πιθανότητας θάμβωσης (DGP) κατά το θερινό ηλιοστάσιο να χαρακτηρίζονται επιστημονικά ως προβληματικές, καθιστώντας τον χώρο ακατάλληλο για μόνιμη εργασία γραφείου χωρίς πρόσθετα μέτρα προστασίας (Edwards & Torcellini, 2002; Kokatnur et al., 2025).

#### 4.7.2. Σενάριο 2: static\_open.

Το δεύτερο σενάριο (static\_open) εξετάζει την απλούστερη και πιο διαδεδομένη παθητική λύση που εφαρμόζεται στα σύγχρονα κτίρια γραφείων, λειτουργώντας ως το σημείο σύγκρισης των δυναμικών συστημάτων έναντι των στατικών. Εισάγονται οριζόντιες περσίδες (γεωμετρική κλάση G1) όπου η χορδή του περυγίου ισούται ακριβώς με το βήμα της διάταξης, εξασφαλίζοντας θεωρητικά τη δυνατότητα πλήρους απόφραξης. Στο σενάριο αυτό, οι περσίδες παραμένουν μόνιμα σταθεροποιημένες στις μηδέν μοίρες (οριζόντιες) για όλες τις ώρες του έτους, χωρίς κανένα σύστημα μηχανικού ή ηλεκτρονικού ελέγχου. Λόγω της γεωμετρίας της, η στρατηγική αυτή αποκλείει μερικώς την άμεση ηλιακή δέσμη όταν ο ήλιος βρίσκεται σε υψηλές γωνίες, όπως το μεσημέρι κατά τους θερινούς μήνες, αλλά αποτυγχάνει να προστατεύσει τον χρήστη όταν ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλές γωνίες και οι ακτίνες προσπίπτουν απευθείας στο επίπεδο των ματιών του (Samadi et al., 2020)

#### 4.7.3. Σενάριο 3: dynamic\_cutoff

Το τρίτο σενάριο (dynamic\_cutoff) εισάγει την έννοια του αυτοματοποιημένου γεωμετρικού ελέγχου, όπου η όψη αντιδρά σε ωριαία βάση αποκλειστικά με βάση τη θέση του ήλιου. Χρησιμοποιείται η γεωμετρική κλάση G2, όπου η χορδή του περυγίου είναι μικρότερη από το βήμα, διατηρώντας συνειδητά μόνιμες σχισμές ( 15,3 mm )ακόμα και στην πλήρως κλειστή θέση προκειμένου να επιτρέπεται μια ελάχιστη διέλευση διάχυτου φωτός. Ο αλγόριθμος υπολογίζει ωριαία την ηλιακή τροχιά και στρέφει αυτόματα τις περσίδες στην ιδανική γωνία αποκομής (cutoff angle), η οποία μπλοκάρει πλήρως την άμεση ηλιακή ακτινοβολία επιτρέποντας τη διέλευση μόνο του διάχυτου φωτός του ουρανού (Alsukkar et al., 2022). Κρίσιμο χαρακτηριστικό του σεναρίου είναι η ενιαία και συμμετρική κίνηση, καθώς και οι δύο ζώνες (άνω και κάτω) κινούνται ταυτόχρονα με την ίδια ακριβώς γωνία, χωρίς διαχωρισμό λειτουργιών και χωρίς ανατροφοδότηση από αισθητήρες (Do & Chan, 2020). Αν και το σύστημα προσφέρει τον χαμηλότερο ετήσιο δείκτη θάμβωσης ετησίως, η ενιαία κίνηση προκαλεί ένα σοβαρό λειτουργικό έλλειμμα, καθώς κατά τις ώρες αιχμής το σύστημα "σφραγίζει" ομοιόμορφα ολόκληρο το παράθυρο, περιορίζοντας σημαντικά τον φυσικό φωτισμό στο βάθος του χώρου και αποκόπτοντας πλήρως την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.

#### 4.7.4. Σενάριο 4: Βελτιστοποιημένη Στρατηγική "Split-Blinds"-Well\_c

Το τελικό και πιο κρίσιμο στάδιο της προσομοίωσης εξετάζει τη Βελτιστοποιημένη Στρατηγική "Split-Blinds" (ή Dual-Zone Strategy). Το συγκεκριμένο σενάριο εισάγει μια έξυπνη, πολυζωνική στρατηγική ελέγχου, σχεδιασμένη να επιλύει την εγγενή αντίθεση μεταξύ της φωτιστικής επάρκειας και της αποφυγής θάμβωσης. Ενώ στην υποενότητα 4.5.1 αναλύθηκε το θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο της ανεξάρτητης κίνησης των περσίδων με βάση την ηλιακή γωνία προφίλ, στο Σενάριο 4 η γεωμετρία αυτή ενσωματώνεται σε έναν ευφυή αλγόριθμο ελέγχου ετήσιας κλίμακας. Χρησιμοποιείται η γεωμετρία κλάσης G1, αλλά οι περσίδες διαχωρίζονται αλγοριθμικά και μηχανολογικά σε δύο αυτόνομες λειτουργικές ζώνες: την άνω ζώνη φυσικού φωτισμού (Daylight Zone) που καταλαμβάνει το άνω ένα τρίτο του ύψους του παραθύρου και την κάτω ζώνη θέας (View

Zone) που καταλαμβάνει τα κάτω δύο τρίτα. Στόχος της στρατηγικής είναι η πλήρης αποσύνδεση του ελέγχου της θάμβωσης από τη διατήρηση της θέας, όπου η άνω ζώνη ανακατευθύνει το φως βαθιά προς την οροφή μετατρέποντάς την σε έμμεση πηγή φωτισμού, ενώ η κάτω ζώνη προστατεύει το επίπεδο των ματιών του χρήστη διατηρώντας, όσο το δυνατόν, τα οριζόντια διάκενα ανοιχτά για οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (Alsukkar et al., 2022; Wu & Zhang, 2022).

#### 4.7.5. Ανάλυση των Καταστάσεων Λειτουργίας των Σεναρίων (Blind States)

Η στρατηγική ελέγχου που αναπτύσσεται στην παρούσα ενότητα συνδέεται άμεσα με την ανάλυση της ενότητας 4.6.1, όπου τεκμηριώθηκε η ανάγκη μετατροπής της συνεχούς κίνησης των σκιάστρων σε συγκεκριμένες, στατικές γεωμετρικές θέσεις, τις λεγόμενες Blind States. Η διακριτοποίηση αυτή κρίνεται αναγκαία διότι η διαχείριση ενός δυναμικού συστήματος σκίασης σε ετήσιο οριζόντα απαιτεί τη μετάβαση από ένα θεωρητικά άπειρο φάσμα θέσεων σε ένα πεπερασμένο, ψηφιακά ελεγχόμενο σύνολο προκαθορισμένων επιλογών. Ο τρόπος με τον οποίο καταγράφονται και μαθηματικά οργανώνονται αυτές οι καταστάσεις διαφέρει ριζικά μεταξύ των τριών εξεταζόμενων σεναρίων, αντικατοπτρίζοντας το επίπεδο αυτοματοποίησης και αλγοριθμικής ευφυΐας της κάθε προσέγγισης (Do & Chan, 2020).

Στο δεύτερο σενάριο παθητικής λειτουργίας (static\_open), οι περσίδες παραμένουν μόνιμα στη θέση των 0° (State 1) για το σύνολο των ωρών του έτους, χωρίς καμία ψηφιακή ή μηχανική παρέμβαση. Η σταθερή αυτή διάταξη απλουστεύει τη λειτουργία της όψης, αλλά αδυνατεί να ανταποκριθεί στη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας, αφήνοντας το σύστημα εκτεθειμένο στη διείσδυση άμεσης ηλιακής δέσμης καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου (Samadi et al., 2020).

Στο τρίτο σενάριο αλγοριθμικής λειτουργίας (dynamic\_cutoff), η συνεχής κίνηση διακριτοποιείται σε 48 γεωμετρικές θέσεις — την οριζόντια θέση και όλες τις ακέραιες γωνίες κλίσης από 44° έως 90°. Οι περσίδες κινούνται ενιαία, ακολουθώντας ωριαία την αναλυτική γωνία αποκομής του ήλιου, με αποκλειστικό κριτήριο τον γεωμετρικό αποκλεισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικές τιμές κλίσης καταγράφονται κατά την ισημερία (77,7°), το καλοκαίρι στις 9:00 π.μ. (88,0°), στο μεσημέρι (85,6°) και στις 3:00 μ.μ. (88,2°) (Do & Chan, 2020).

Στο βελτιστοποιημένο σενάριο (well\_c\_dual\_zone), η διαδικασία επεκτείνεται μέσω παραμετρικής σάρωσης που εξετάζει συνδυαστικά τις θέσεις των δύο αυτόνομων ζωνών του παραθύρου. Για κάθε ζώνη ορίζονται 19 πιθανές θέσεις με βήμα 10° (από -90° έως +90°), διαμορφώνοντας ένα μητρώο 19×19 με συνολικά 361 εναλλακτικούς συνδυασμούς. Από αυτό το σύνολο, ο αλγόριθμος post-processing απομονώνει τελικά 13 μοναδικά ζεύγη καταστάσεων, τα οποία συγκροτούν το οριστικό ετήσιο πρόγραμμα λειτουργίας της όψης (Do & Chan, 2020).

Η επιλογή των καταστάσεων διέπεται από μια ανθρωποκεντρική λογική ελέγχου. Το σύστημα δεν κλείνει ποτέ και τις δύο ζώνες ταυτόχρονα, εξασφαλίζοντας ότι πάντα μία από αυτές παραμένει πλήρως ανοιχτή (0°) για τη διατήρηση της θέας και την αποφυγή αίσθησης εγκλωβισμού, με βάση τον πίνακα 4. Σύμφωνα με αυτή τη λογική, η πλήρως ανοιχτή θέση (State 1: 0°/0°) επιλέγεται για το 59,67% του έτους (5.227 ώρες). Όταν οι εξωτερικές συνθήκες απαιτούν ηλιοπροστασία, ο αλγόριθμος επεμβαίνει στοχευμένα, κινώντας ανεξάρτητα είτε μόνο την άνω ζώνη — όπως στο State 2 (-10°/0°), που εφαρμόζεται για το 25,69% του έτους — είτε μόνο την κάτω ζώνη, όπως στο State 3 (0°/-10°), για το 5,59% του έτους. Με τον τρόπο αυτό, η όψη προσαρμόζεται προγνωστικά στις κλιματικές συνθήκες, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ οπτικής άνεσης και επάρκειας φωτισμού, εντός των απαιτήσεων του προτύπου WELL v2 (Wu & Zhang, 2022).

**Πίνακας 4: Καταστάσεις (States) και Ετήσιο Πρόγραμμα Λειτουργίας της στρατηγικής well\_c\_**

| Κατάσταση (State) | Κλίση Άνω Ζώνης (Upper) | Κλίση Κάτω Ζώνης (Lower) | Ώρες Εμφάνισης στο Έτος (8.760 ώρες) | Ποσοστό (%) του Έτους |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| <b>State 1</b>    | 0.0°                    | 0.0°                     | 5.227                                | 59,67%                |
| <b>State 2</b>    | -10.0°                  | 0.0°                     | 2.250                                | 25,69%                |
| <b>State 3</b>    | 0.0°                    | -10.0°                   | 490                                  | 5,59%                 |
| <b>State 4</b>    | -90.0°                  | 0.0°                     | 369                                  | 4,21%                 |
| <b>State 5</b>    | 0.0°                    | -90.0°                   | 251                                  | 2,87%                 |
| <b>State 6</b>    | -80.0°                  | 0.0°                     | 57                                   | 0,65%                 |
| <b>State 7</b>    | 0.0°                    | -80.0°                   | 39                                   | 0,45%                 |
| <b>State 8</b>    | 0.0°                    | -70.0°                   | 25                                   | 0,29%                 |
| <b>State 9</b>    | -70.0°                  | 0.0°                     | 22                                   | 0,25%                 |
| <b>State 10</b>   | 0.0°                    | -60.0°                   | 18                                   | 0,21%                 |
| <b>State 11</b>   | 0.0°                    | -50.0°                   | 6                                    | 0,07%                 |
| <b>State 12</b>   | -60.0°                  | 0.0°                     | 4                                    | 0,05%                 |
| <b>State 13</b>   | 0.0°                    | -40.0°                   | 2                                    | 0,02%                 |

Τα ποσοστά και οι ώρες εμφάνισης των καταστάσεων (States) στον Πίνακα 4 υπολογίζονται με βάση το συνολικό ετήσιο χρονικό διάστημα (8.760 ώρες) προκειμένου να αποτυπωθεί η πλήρης ετήσια λειτουργία της στρατηγικής well\_c. Για τον λόγο αυτό, η βάση υπολογισμού διαφέρει από τα υπόλοιπα τμήματα του κειμένου, όπου τα αποτελέσματα απομονώνονται και αναλύονται αποκλειστικά για τις 2.600 κατειλημμένες ώρες λειτουργίας του κτιρίου.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δεικτών για κάθε σενάριο παρουσιάζονται συγκριτικά στον Πίνακα 5 του Κεφαλαίου 5.

## Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Συζήτηση

### 5.1. Πίνακας Κύριων Δεικτών

Ο πίνακας 5 αποτυπώνει συνολικά την απόδοση κάθε στρατηγικής σε ξεχωριστές διαστάσεις, αναδεικνύοντας τις αντισταθμίσεις μεταξύ τους. Ως προς το **sDA<sub>300,50</sub>** όλες οι στρατηγικές εμφανίζουν τιμή 100%, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι το συγκεκριμένο δωμάτιο— επιτυγχάνει επάρκεια φυσικού φωτισμού ανεξαρτήτως σεναρίου σκίασης. Ο δείκτης **ASE<sub>1000,250</sub>** αποκαλύπτει όμως την κρίσιμη διαφορά: μόνο η **base\_no\_blinds** παρουσιάζει υψηλό ASE (~33%), ενώ οι υπόλοιπες τρεις τον μηδενίζουν πρακτικά, υποδηλώνοντας αποτελεσματικό έλεγχο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

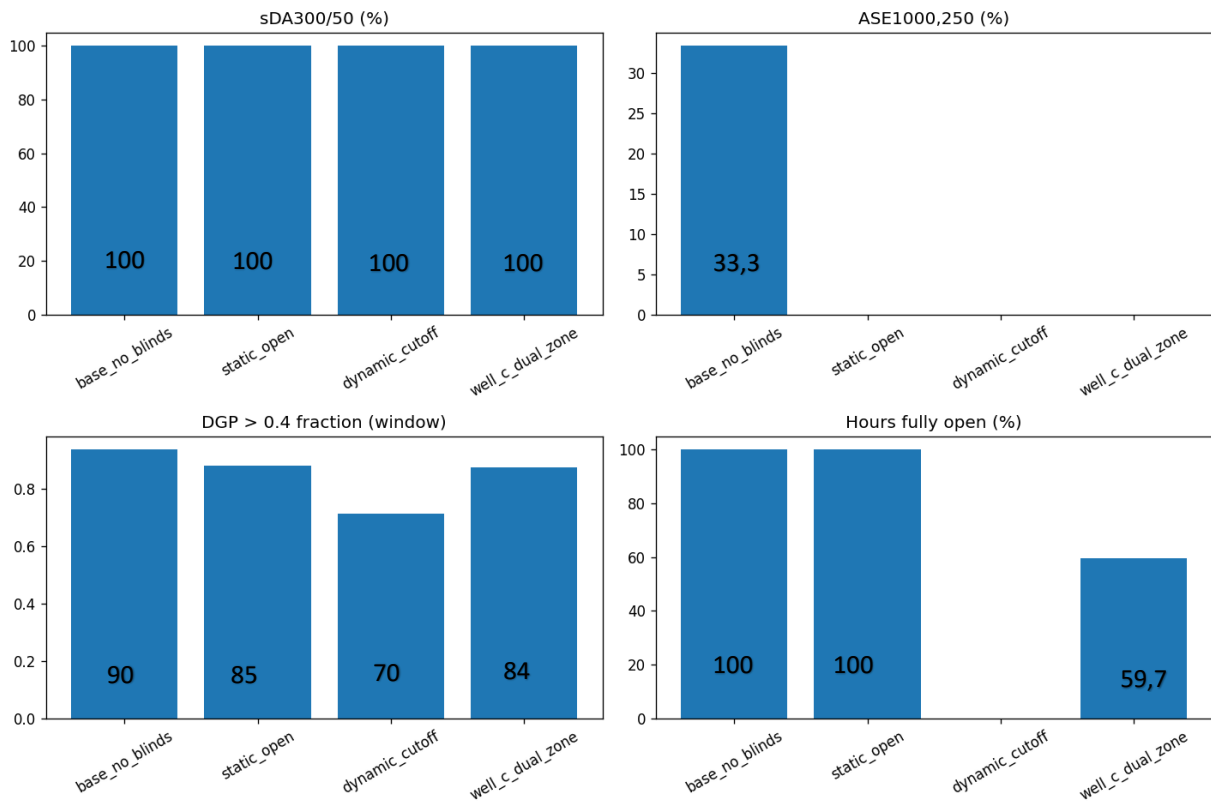
Η ετήσια αξιολόγηση της θάμβωσης μέσω του δείκτη ετήσιου κλάσματος (**DGP > 0.4**) αποτυπώνει τη συχνότητα έκθεσης του εργαζομένου σε οπτική δυσφορία κατά τις 2.600 ώρες χρήσης του χώρου. Ενώ η απουσία σκίασης (**base\_no\_blinds**) και η στατική βάση (**static\_open**) οδηγούν σε ενοχλητική θάμβωση για το 90% και 85% του έτους αντίστοιχα, η βελτιστοποιημένη στρατηγική **well\_c\_dual\_zone** παρουσιάζει παρόμοια ετήσια συχνότητα (84%). Η τιμή αυτή προκύπτει από τη συνειδητή απόφαση του αλγορίθμου να κρατά την κάτω ζώνη (**View Zone**) πλήρως ανοιχτή στο 59.7% του έτους για τη διασφάλιση της θέας, επιλέγοντας μια ελεγχόμενη σχεδιαστική συμβιβαστική λύση (**trade-off**). Το σύστημα θυσιάζει την απόλυτη ετήσια συσκότιση προκειμένου να ικανοποιήσει τις αυστηρές ανθρωποκεντρικές απαιτήσεις του προτύπου WELL για οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίθετα, η **dynamic\_cutoff** παρουσιάζει θάμβωση στο 70% των ωρών, καθώς η ενιαία κλίση των περσίδων σφραγίζει αποτελεσματικά την όψη έναντι του ήλιου.

Ο δείκτης «**Hours fully open**» (Ώρες ανοιχτό ) αναδεικνύει το πραγματικό κόστος της δυναμικής διαχείρισης: η **well\_c\_dual\_zone** μόνο 59,7% ανοιχτή επιβεβαιώνει ότι η επίτευξη της ισορροπίας sDA/ASE εντός της WELL L06 ζώνης απαιτεί παρέμβαση του συστήματος σκίασης.

**Πίνακας 5: Πίνακας Κύριων Δεικτών**

| Δείκτης                   | Τιμή<br>"Split-Blinds" | Τιμή<br><i>dynamic_cutoff</i> | Τιμή<br><i>static_open</i> | Τιμή<br><i>Baseline / No-Blinds</i> |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| sDA300/50 (%)             | 100.00                 | 100.00                        | 100.00                     | 100.00                              |
| ASE1000,250 (%)           | 0.00                   | 0.00                          | 0.00                       | 33.33                               |
| DA300 mean (%)            | 90.03                  | 85.61                         | 89.82                      | 92.97                               |
| UDI mean (%)              | 78.81                  | 82.12                         | 81.81                      | 64.18                               |
| UDI_LOWER (%)             | 4.74                   | 5.68                          | 4.97                       | 3.82                                |
| UDI_UPPER (%)             | 16.45                  | 12.19                         | 13.23                      | 32.00                               |
| WELL L06                  | Yes                    | Yes                           | Yes                        | No                                  |
| Διαφορετικές κλίσεις/έτος | 13                     | 1                             | 1                          | 1                                   |
| Μέσες μεταβάσεις/ημέρα    | 2.7                    | 0.0                           | 0.0                        | 0.0                                 |
| Ώρες ανοιχτό (%)          | 59.7                   | 0.0                           | 100.0                      | 100.0                               |

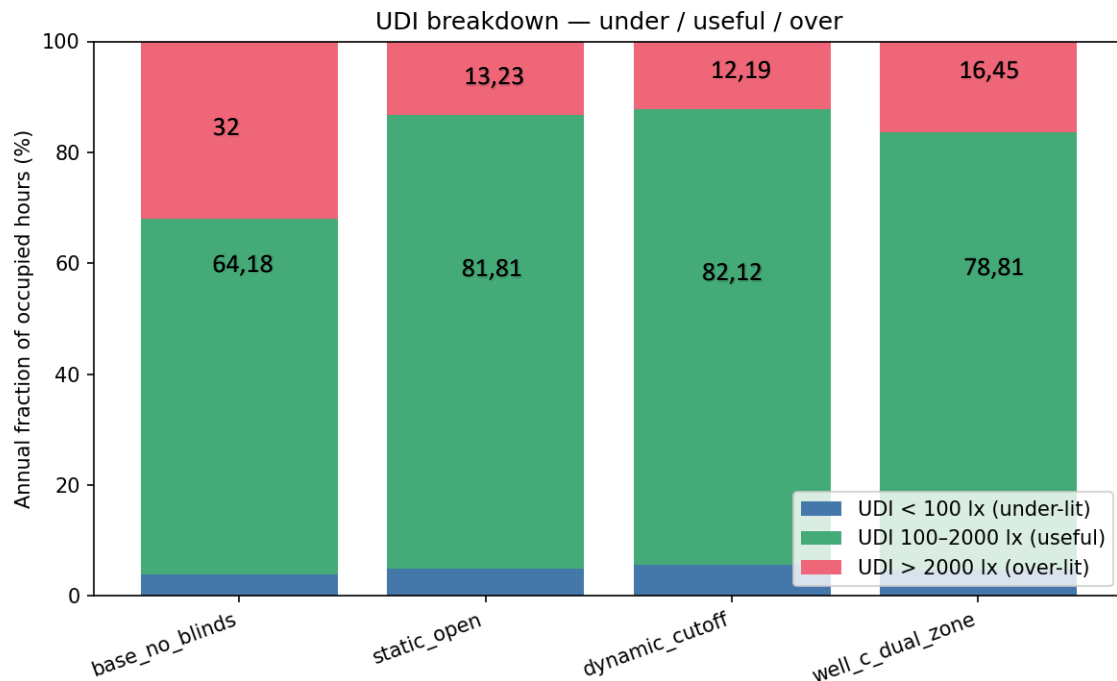
**Γράφημα 1: Επεξήγηση δεικτών ανά περίπτωση:  $sDA$ ,  $ASE$ , ποσοστό  $DGP > 0.4$ , % ωρών σε ανοιχτή θέση.**



Η αξιολόγηση της συμβατότητας των εξεταζόμενων σεναρίων με τις απαιτήσεις του ανθρωποκεντρικού προτύπου **WELL v2 (Feature L06)** πραγματοποιείται μέσω του ταυτόχρονου ελέγχου δύο βασικών κλιματικών δεικτών φυσικού φωτισμού: της Χωρικής Αυτονομίας Φυσικού Φωτισμού ( $sDA_{300/50} \geq 55\%$ ) και της Ετήσιας Έκθεσης σε Ηλιακό Φως ( $ASE_{1000,250} \leq 10\%$ ). Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των ετήσιων προσομοιώσεων, και οι τέσσερις στρατηγικές επιτυγχάνουν το μέγιστο ποσοστό χωρικής αυτονομίας ( $sDA = 100\%$ ), διασφαλίζοντας ότι ολόκληρη η επιφάνεια εργασίας του πρότυπου γραφείου λαμβάνει επαρκή φωτισμό για το 50% των κατειλημμένων ωρών του έτους. Η στρατηγική αναφοράς χωρίς σκίαση (base\_no\_blinds) αποτυγχάνει να συμμορφωθεί με το πρότυπο WELL L06, καθώς η απουσία περσίδων επιτρέπει την ανεμπόδιστη διείσδυση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα ο δείκτης  $ASE$  να εκτιναχθεί στο 33,33%, ξεπερνώντας κατά πολύ το ανώτατο επιτρεπτό όριο του 10%. Αντίθετα, οι υπόλοιπες τρεις στρατηγικές (static\_open, dynamic\_cutoff και well\_c\_dual\_zone) επιτυγχάνουν πλήρη συμμόρφωση (σήμανση Yes) με το πρότυπο WELL L06, καθώς εκμηδενίζουν πρακτικά την τιμή του δείκτη  $ASE$  (0,00%), αποδεικνύοντας ότι ο γεωμετρικός ή ο αλγοριθμικός έλεγχος των περσίδων αποκλείει αποτελεσματικά την ενοχλητική άμεση ηλιακή δέσμη χωρίς να υποβαθμίζει την απαιτούμενη φωτιστική επάρκεια στο βάθος του χώρου.

## Ανάλυση UDI

**Γράφημα 2: Ανάλυση UDI**



**Ανάλυση UDI :** ανεπαρκής φωτισμός (<100 lx) / ωφέλιμος φωτισμός (100–2000 lx) / υπερβολικός φωτισμός (>2000 lx).

Το διάγραμμα UDI (Useful Daylight Illuminance) αναλύει την ετήσια κατανομή των ωρών κατοχής σε τρεις ζώνες φωτισμού για κάθε στρατηγική σκίασης: υποφωτισμός (<100 lux), χρήσιμος φωτισμός (100–2000 lux) και υπερφωτισμός (>2000 lux). Η στρατηγική base\_no\_blinds εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό υπερφωτισμού, αντανakλώντας την ανεξέλεγκτη είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας απουσία σκίασης, ενώ το χρήσιμο εύρος καλύπτει 64,18% των ωρών. Η static\_open και η dynamic\_cutoff βελτιώνουν αισθητά το ποσοστό χρήσιμου φωτισμού (UDI= 81.81, UDI=82.12), με τη διαφορά ότι η dynamic\_cutoff εμφανίζει το υψηλότερο ποσοστό υποφωτισμού μεταξύ όλων των στρατηγικών.

Η στρατηγική well\_c\_dual\_zone επιτυγχάνει την πιο ισορροπημένη κατανομή, με υψηλό χρήσιμο UDI (78.81%) περιορισμένο υπερφωτισμό και χαμηλό υποφωτισμό, επιβεβαιώνοντας τη συνολική της υπεροχή ως βέλτιστης λύσης. Αυτό γιατί αν και η well\_c\_dual\_zone έχει ελαφρώς χαμηλότερο ωφέλιμο UDI (78.81%) - ένα μέρος των ωρών της «ξεφεύγει» προς τον υπερφωτισμό (UDI\_upper= 16.45%) - κρατάει την κάτω ζώνη ανοιχτή στο 59.7% του έτους για τη θέα (Ωρες ανοιχτό). Το μεγάλο της πλεονέκτημα όμως είναι ότι κρατά χαμηλά τον υποφωτισμό (UDI\_lower= 4.74%), κρατώντας το δωμάτιο ζωντανό και φωτεινό.

## 5.2. Απόδοση Φυσικού Φωτισμού και Θάμβωσης

**Πίνακας 6: Αποτελέσματα δείκτη DGP στη θέση p2 για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο**

| Σενάριο                   | Περιγραφή            | Ιούνιος<br>(Θερινό<br>Ηλιοστάσιο) | Δεκέμβριος<br>(Χειμερινό<br>Ηλιοστάσιο) | Δ<br>(μείωση) | Αποτελεσματικότητα<br>Θέρους |
|---------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|---------------|------------------------------|
| <b>Base</b>               | Χωρίς<br>περσίδες    | 0.383                             | 0.202                                   | <b>-0.181</b> | Προβληματικό                 |
| <b>Static<br/>Open</b>    | Στατικές<br>ανοιχτές | 0.294                             | 0.215                                   | <b>-0.079</b> | Αποδεκτό                     |
| <b>Dynamic<br/>Cutoff</b> | Δυναμικό<br>cutoff   | 0.277                             | 0.213                                   | <b>-0.064</b> | Καλύτερο θέρους              |
| <b>Well C</b>             | Διαμόρφωση<br>well   | 0.307                             | 0.136                                   | <b>-0.171</b> | Καλύτερο χειμώνα             |

Ο πίνακας 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μελέτης στη θέση p2 σχετικά με την **Πιθανότητα Θαμβώματος από Φυσικό Φως (Daylight Glare Probability - DGP)**. Η ανάλυση εξετάζει τέσσερα διαφορετικά σενάρια σκίασης/διαμόρφωσης κατά τη διάρκεια του θερινού και του χειμερινού ηλιοστασίου.

### 1. Θερινό Ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου)

Κατά την περίοδο αυτή, η οποία παρουσιάζει και τις μεγαλύτερες προκλήσεις λόγω της έντονης ηλιοφάνειας, το βασικό σενάριο (**Base**) χωρίς περσίδες αποτυγχάνει πλήρως, σημειώνοντας τιμή 0.383, η οποία χαρακτηρίζεται ως αντληπτή (σχεδόν ενοχλητική). Αντίθετα, όλες οι υπόλοιπες εναλλακτικές λύσεις καταφέρνουν να ρίξουν τον δείκτη κάτω από το 0.30, καθιστώντας το θάμβωμα μη αντληπτό. Το σενάριο **Dynamic Cutoff** επιτυγχάνει την καλύτερη επίδοση το καλοκαίρι με τιμή 0.277, ακολουθούμενο από το **Static Open** (0.294) και τη διαμόρφωση **Well C** (0.307).

### 2. Χειμερινό Ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου)

Κατά τη διάρκεια του χειμερινού ηλιοστασίου, η χαμηλότερη τροχιά του ήλιου αλλάζει τα δεδομένα, όμως όλες οι επιλογές παραμένουν με ασφάλεια εντός των επιθυμητών ορίων (κάτω από 0.30), εξασφαλίζοντας μη αισθητό θάμβωμα. Το βασικό σενάριο (**Base**) πέφτει στο 0.202, ενώ τα σενάρια **Static Open** και **Dynamic Cutoff** κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα (0.215 και 0.213 αντίστοιχα). Η διαμόρφωση **Well C** ξεχωρίζει εδώ, επιτυγχάνοντας την εξαιρετικά χαμηλή τιμή 0.136.

### 3. Σύγκριση Μεταβολής και Αποτελεσματικότητα (Ιούνιος - Δεκέμβριος)

Ο τελικός πίνακας συνοψίζει τη μείωση του δείκτη DGP από το καλοκαίρι προς τον χειμώνα και αξιολογεί τη συνολική αποτελεσματικότητα κάθε σεναρίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, το σενάριο **Base** παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση (-47%), αλλά χαρακτηρίζεται ως «Προβληματικό» λόγω της αποτυχίας του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Από την άλλη πλευρά, η στρατηγική **Static Open** προσφέρει μια πιο ισορροπημένη μείωση (-27%) και κρίνεται ως «Αποδεκτό», ενώ το **Dynamic Cutoff** σημειώνει τη μικρότερη μεταβολή (-23%). Τέλος, η διαμόρφωση **Well C** εμφανίζει τη μέγιστη βελτίωση με κατακόρυφη πτώση του δείκτη κατά 56%.

**Πίνακας 7: Αποτελέσματα δείκτη DGP στη θέση p1 για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο**

| Σενάριο           | Περιγραφή            | Ιούνιος<br>(Θερινό<br>Ηλιοστάσιο) | Δεκέμβριος<br>(Χειμερινό<br>Ηλιοστάσιο) | Δ<br>(μείωση) | Αποτελεσματικότητα<br>Θέρους |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|---------------|------------------------------|
| Base              | Χωρίς<br>περσίδες    | 0.264                             | 0.189                                   | -0.075        | Αποδεκτό                     |
| Static<br>Open    | Στατικές<br>ανοιχτές | 0.249                             | 0.181                                   | -0.068        | Αποδεκτό                     |
| Dynamic<br>Cutoff | Δυναμικό<br>cutoff   | 0.266                             | 0.153                                   | -0.113        | Καλύτερο θέρους              |
| Well C            | Διαμόρφωση<br>well   | 0.257                             | 0.136                                   | -0.121        | Καλύτερο χειμώνα             |

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μελέτης στη θέση p1 μιας παρόμοιας προσομοίωσης ηλιασμού (daylight simulation) για τις ίδιες ημερομηνίες-κλειδιά και τα ίδια τέσσερα σενάρια σκίασης, αλλά με διαφορετικές τιμές DGP και μια αναλυτική επεξήγηση της κλίμακας αξιολόγησης. Σημειώνεται ότι όσο χαμηλότερος είναι ο δείκτης DGP, τόσο καλύτερο είναι το αποτέλεσμα (μικρότερος κίνδυνος θάμβωσης).

### 1. Επεξήγηση Μεθοδολογίας και Κλίμακας DGP

Η προσομοίωση μελετά τη συμπεριφορά του φωτός στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου). Χρησιμοποιεί ψευδοχρωματική απεικόνιση (falsecolor) για τη μετατροπή των επιπέδων φωτεινότητας σε χρώματα (μπλε/μωβ για χαμηλή ένταση, πράσινο/κίτρινο για μέτρια, κόκκινο/πορτοκαλί για υψηλή).

Η κατάταξη του κινδύνου ενόχλησης από θάμβωμα (DGP) χωρίζεται σε τέσσερις επίσημες κατηγορίες: μη αντιληπτή,  $DGP < 0.35$ / αντιληπτή,  $0.35 - 0.40$ / συχνά ενοχλητική,  $0.40 - 0.45$  και μη ανεκτή,  $DGP > 0.45$ ) (TOTEE 20701-7, 2021)

### 2. Ανάλυση Θερινού Ηλιοστασίου (21 Ιουνίου)

Κατά το θερινό ηλιοστάσιο (κίτρινες μπάρες), οι τιμές του δείκτη DGP είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους για όλα τα σενάρια και κυμαίνονται εντός της κατηγορίας μη αντιληπτή. Το σενάριο **Static Open** (στατικές ανοιχτές περσίδες) παρουσιάζει την καλύτερη (χαμηλότερη) τιμή με **0.249**, ακολουθούμενο από τη διαμόρφωση **Well C** με **0.257** και το βασικό σενάριο **Base** (χωρίς περσίδες) με **0.264**. Το σενάριο **Dynamic Cutoff** καταγράφει την υψηλότερη τιμή το καλοκαίρι με **0.266**.

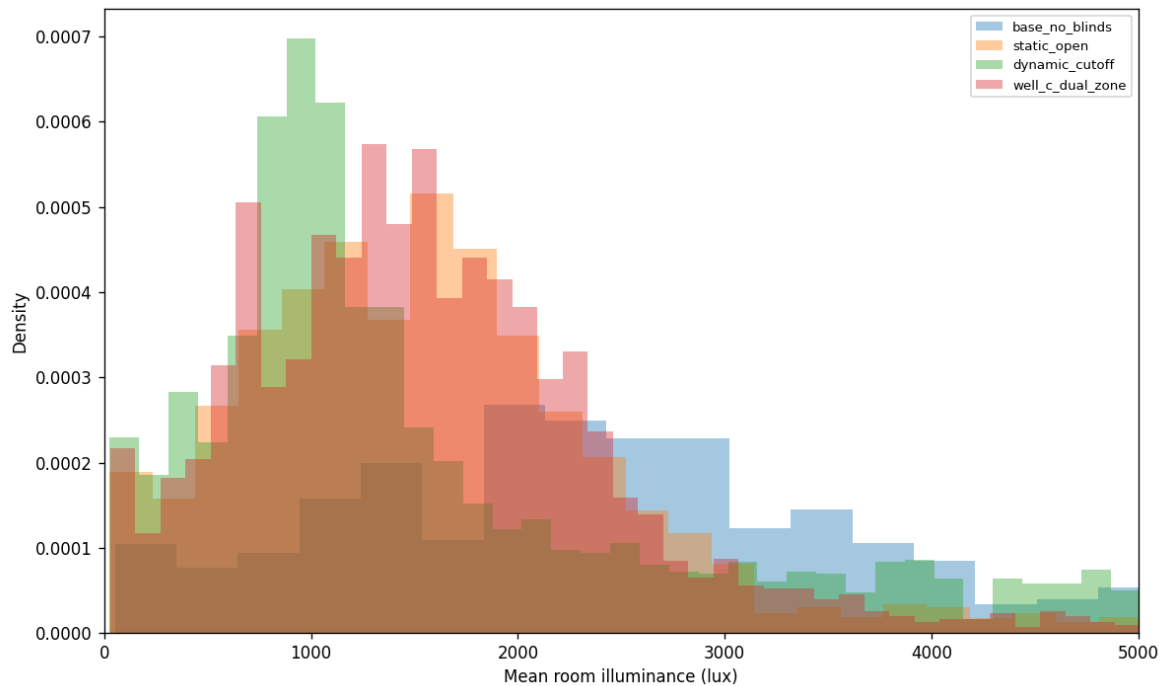
### 3. Ανάλυση Χειμερινού Ηλιοστασίου (21 Δεκεμβρίου)

Κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (μπλε μπάρες), παρατηρείται σημαντική πτώση των τιμών DGP σε όλα τα σενάρια, με αποτέλεσμα να περνούν όλα εντός της κατηγορίας μη αντιληπτή. Το σενάριο **Base** έχει τιμή **0.189** και το **Static Open** ακολουθεί με **0.181**. Το **Dynamic Cutoff** βελτιώνει αισθητά την επίδοσή του πέφτοντας στο **0.153**, ενώ η διαμόρφωση **Well C** επιτυγχάνει αποτέλεσμα προσομοίωσης με χαμηλή τιμή 0.136.

Αναλυτικά στο παράρτημα Α. Διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων με τη μηχανή Radiance επεξηγείται η διαδικασία παραγωγής των αποτελεσμάτων δεικτών DGP στη θέση p2 και p1. Στους

περιορισμούς της έρευνας επισημαίνεται το σημαντικό υπολογιστικό κόστος και ο μεγάλος χρόνος παραγωγής των αποτελεσμάτων μέσω των εργαλείων Ladybugs tools - Radiance .

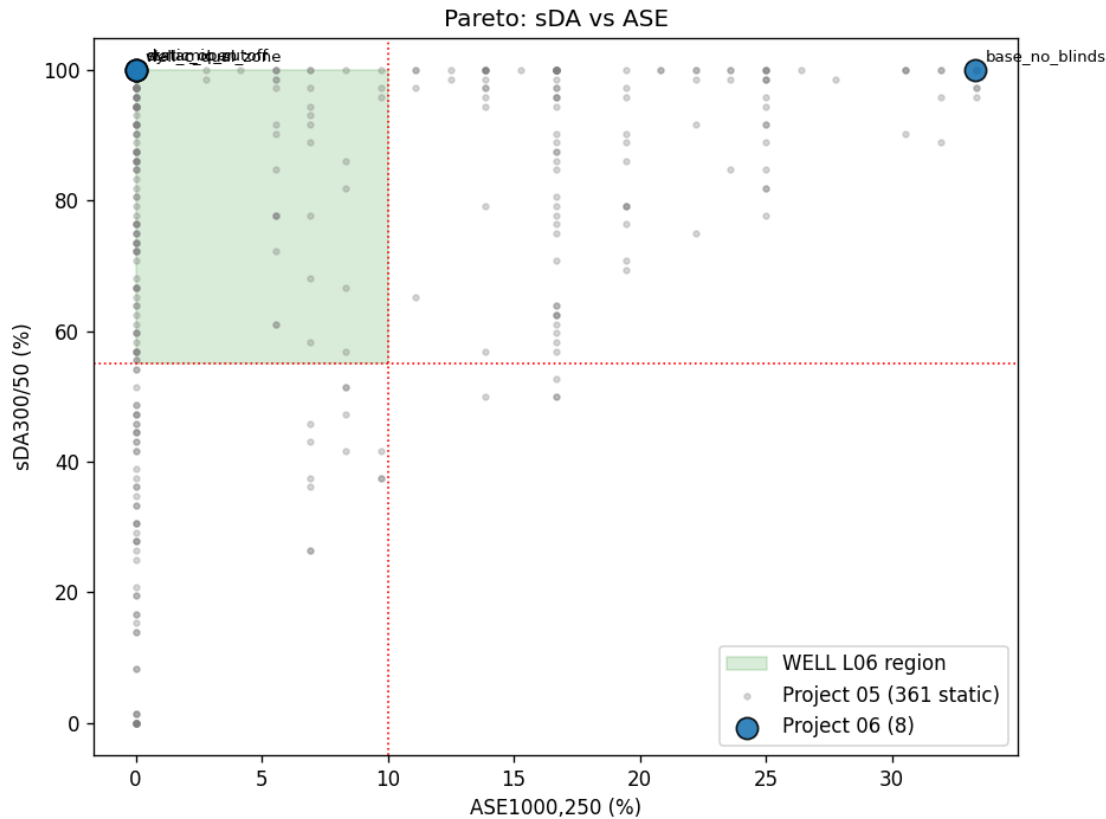
**Γράφημα 3 : Ετήσιες κατανομές μέσης έντασης φωτισμού ανά αισθητήρα κατά τις ώρες χρήσης και για τις 4 στρατηγικές.**



Το σενάριο αναφοράς χωρίς περσίδες (base\_no\_blinds) στο **Γράφημα 3** παρουσιάζει μια εξαιρετικά ευρεία κατανομή που εκτείνεται βαθιά σε υψηλές τιμές φωτεινότητας (άνω των 3.000 lux), επιβεβαιώνοντας την ανεξέλεγκτη εισροή ηλιακού φωτός που οδηγεί σε υπερφωτισμό και οπτική δυσφορία. Αντίθετα, η στρατηγική dynamic\_cutoff εμφανίζει την πιο στενή και συγκεντρωμένη καμπύλη με τη μέγιστη πυκνότητα (density) γύρω στα 1.000 lux, γεγονός που αποδεικνύει την τάση να περιορίζει το φως για την εξάλειψη της θάμβωσης, αυξάνοντας όμως το ποσοστό υποφωτισμού του δωματίου. Στην ιδανική μέση οδό, οι στρατηγικές static\_open και well\_c\_dual\_zone καταφέρνουν να εξομαλύνουν τις ακραίες τιμές και να μετατοπίσουν τον κύριο όγκο των μετρήσεων στο απόλυτα ωφέλιμο και σταθερό εύρος (1.000 έως 2.000 lux). Ιδιαίτερα η βελτιστοποιημένη στρατηγική διπλής ζώνης (well\_c\_dual\_zone) πετυχαίνει μια ισορροπημένη, ομοιόμορφη κατανομή που εξασφαλίζει οπτική άνεση χωρίς να στερεί από το βάθος του γραφείου τον πολύτιμο φυσικό φωτισμό.

### 5.3. Διάγραμμα Pareto (sDA έναντι ASE).

Γράφημα 4 :Διάγραμμα Pareto μεταξύ sDA και ASE



Η σκιασμένη πράσινη περιοχή σημειώνει το εύρος συμβατότητας με το πρότυπο **WELL L06**, ενώ οι μικρές γκριζες κουκκίδες στο υπόβαθρο αντιπροσωπεύουν τις 361 στατικές περιπτώσεις.

Το διάγραμμα Pareto sDA έναντι ASE αναδεικνύει με σαφήνεια την ανταγωνιστική σχέση μεταξύ επάρκειας φυσικού φωτισμού και υπερβολικής ηλιακής έκθεσης για τέσσερις εναλλακτικές στρατηγικές σκίασης (Wu & Zhang, 2022). Στον οριζόντιο άξονα αποτυπώνεται το ASE1000,250 (%) ως δείκτης ανεπιθύμητης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στον κατακόρυφο ο sDA300,50 (%) ως δείκτης επάρκειας φυσικού φωτισμού (Safranek et al., 2020). Η πράσινη σκιασμένη περιοχή ορίζει το εφικτό παράθυρο πιστοποίησης WELL L06, με sDA > 55% και ASE < 10% ταυτόχρονα.

Οι δύο ακραίες στρατηγικές, base\_no\_blinds και static\_open, επιτυγχάνουν μέγιστο sDA (~100%) αλλά με ASE που ξεπερνά το 30%, τοποθετούμενες έτσι εκτός της αποδεκτής ζώνης λόγω υπερβολικής θάμβωσης (Rockcastle et al., 2023). Οι στρατηγικές base\_no\_blinds και static\_open επιτυγχάνουν sDA ~100%, αλλά με ASE άνω του 30%, εκτός των ορίων WELL L06. Η dynamic\_cutoff μηδενίζει το ASE, ωστόσο κατά τις ώρες αιχμής οι περσίδες κλείνουν ομοιόμορφα, περιορίζοντας δραστικά τον φυσικό φωτισμό (DA300 mean = 85,61%, UDI\_lower = 5,68%) — ένα γνωστό λειτουργικό έλλειμμα των συστημάτων ενιαίας κλίσης. (Sommese et al., 2024). Μόνο η στρατηγική well\_c\_dual\_zone (σύστημα διαιρεμένων περσίδων) επιτυγχάνει την ταυτόχρονη ικανοποίηση και των δύο κριτηρίων (Alsukkar et al., 2022; Ibrahim et al., 2025).

Το συγκεκριμένο διάγραμμα διασποράς αποτελεί απόδειξη της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, τεκμηριώνοντας πώς επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της ιδανικής λύσης (Wu & Zhang, 2022). Στο γράφημα αυτό, κάθε μία από τις 361 κουκκίδες αντιπροσωπεύει έναν προ-υπολογισμένο γεωμετρικό συνδυασμό κλίσης των περσίδων της άνω και της κάτω ζώνης (Alsukkar et al., 2022; Ibrahim et al., 2025), ο οποίος έχει ήδη αξιολογηθεί ετησίως μέσω της μεθόδου Detailed Dynamic Shading (Do & Chan, 2020).

Μέσα από το πλήθος των πράσινων, έγκυρων σεναρίων, ο αλγόριθμος απομονώνει για τη δεδομένη χρονική στιγμή εκείνον ακριβώς τον συνδυασμό που βρίσκεται στο ακρότατο δεξί και κάτω σημείο της κατανομής στο μέτωπο Pareto (Wu & Zhang, 2022). Με αυτόν τον τρόπο, επιλέγεται η γεωμετρία που προσφέρει τη μέγιστη δυνατή διείσδυση χρήσιμου φωτός στο βάθος του γραφείου, εξασφαλίζοντας παράλληλα τη μικρότερη δυνατή ηλιακή έκθεση (Alsukkar et al., 2022; Ibrahim et al., 2025). Αυτή η μεθοδολογία του υπολογισμού μέσω μητρώων επιτρέπει την εξαγωγή των 13 βέλτιστων καταστάσεων της στρατηγικής well\_c\_dual\_zone ("Bin-and-Stitch" / Three-Phase Method) (Sommese et al., 2024)

Στο παράρτημα Β υπάρχει το αρχείο **comparison\_summary.csv**, το οποίο είναι ο συγκεντρωτικός πίνακας που χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί το **Γράφημα 4** - διάγραμμα Pareto (σύγκριση των 361 στατικών περιπτώσεων με τις δυναμικές/βέλτιστες λύσεις ). Το **Γράφημα 4** είναι η **οπτικοποίηση (διάγραμμα βελτιστοποίησης)** των δεδομένων που περιγράφονται στο παράρτημα Β.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

### 6.1. Συμπεράσματα

Τα ποσοτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις έρχονται να επαληθεύσουν και να ποσοτικοποιήσουν τις θεωρητικές αρχές σχετικά με τη βιολογική επίδραση του φυσικού φωτισμού στον ανθρώπινο οργανισμό. Όπως αναλύθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο, η διασφάλιση της υγείας και της ευεξίας των εργαζομένων σε χώρους γραφείων εξαρτάται άμεσα από τη μη οπτική απόκριση του οφθαλμού, η οποία ρυθμίζει τους κirkάδιους ρυθμούς, την έκκριση μελατονίνης και τους κύκλους ύπνου-αφύπνισης (Kokatnur et al., 2025)

Όσον αφορά την επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής σκίασης, η επιλογή αυτή εξαρτάται από την ιεράρχηση των αναγκών του σχεδιασμού, με τις τρεις συγκεκριμένες προσεγγίσεις να ξεχωρίζουν για την απόδοσή τους σε διαφορετικούς τομείς.

Στον τομέα του ελέγχου της θάμβωσης, η στρατηγική **dynamic\_cutoff** επιβεβαιώνει το **Πρωταρχικό Ερευνητικό Ερώτημα** και αναδεικνύεται ως η πλέον αποτελεσματική, ιδιαίτερα κατά το θερινό ηλιοστάσιο όπου οι συνθήκες είναι πιο απαιτητικές ( $DGP = 0.266$ ). Πρόκειται για μια αναλυτική προσέγγιση που δεν απαιτεί βαθμονόμηση και καταφέρνει να διατηρεί τον δείκτη ASE στο μηδέν. Η συγκεκριμένη γεωμετρία επιτρέπει την είσοδο χρήσιμου φωτισμού μέσα από τις σχισμές των περσίδων ακόμα και σε μεγάλες κλίσεις, επιτυγχάνοντας την καλύτερη επίδοση  $DGP (0,277)$  το καλοκαίρι και προσφέροντας τη μέγιστη προστασία από την οπτική δυσφορία.

Για τη μέγιστη εισαγωγή φυσικού φωτός, η στρατηγική **well\_c\_dual\_zone (Split-Blinds)** αποτελεί την καλύτερη επιλογή, καθώς επιτυγχάνει χωρική αυτονομία (sDA) που βρίσκεται εντός μόλις μίας ποσοστιαίας μονάδας από την περίπτωση του κτιρίου χωρίς καθόλου σκίαση. Η επιτυχία της αποτελεί την άμεση απάντηση στο **Κεντρικό Ερευνητικό Ερώτημα** που τέθηκε στην αρχή της μελέτης. Βασίζεται στη διαφοροποιημένη κλίση των περσίδων, η οποία επιτρέπει στην άνω ζώνη να ανακατευθύνει το φως βαθιά προς την οροφή και το εσωτερικό του γραφείου, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα πλήρη συμμόρφωση με το πρότυπο WELL L06 μέσω του εκμηδενισμού της υπερβολικής έκθεσης (ASE).

Η στρατηγική **dynamic\_cutoff** (δυναμική αποκοπή) πέτυχε το χαμηλότερο ετήσιο κλάσμα θάμβωσης, περιορίζοντας τον δείκτη  $DGP > 0.4$  στο 70% των ωρών του έτους. Η επίδοση αυτή συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία του αλγορίθμου (sun-tracking), ο οποίος υπολογίζει ωριαία την ηλιακή τροχιά και στρέφει ενιαία τις περσίδες στην ακριβή γωνία που αποκλείει την άμεση ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί το συγκεκριμένο σενάριο καταγράφει 0% ώρες σε πλήρως ανοιχτή θέση, λειτουργώντας ως ένας μόνιμος γεωμετρικός φραγμός που προτάσσει την απόλυτη προστασία έναντι της οπτικής επαφής με το περιβάλλον.

Αντίθετα, η προτεινόμενη στρατηγική **well\_c\_dual\_zone** κατέγραψε υψηλότερο ετήσιο κλάσμα θάμβωσης DGP (~84%), το οποίο όμως αποτελεί μια συνειδητή υπολογιστική επιλογή του αλγορίθμου. Εφαρμόζοντας τη φιλοσοφία των Split-Blinds, το σύστημα διαχωρίζει το κούφωμα σε δύο αυτόνομες λειτουργικές ζώνες, επιτρέποντας στην κάτω ζώνη να παραμείνει πλήρως ανοιχτή (0°) στο 59,7% του χρόνου κατοχής. Η στρατηγική αυτή επιλέγει να μειονεκτεί στον ετήσιο περιορισμό της θάμβωσης DGP, προκειμένου να εξασφαλίσει ανεμπόδιση θέα προς τα έξω και επαρκή φυσικό φωτισμό (χαμηλά τον υποφωτισμό -  $UDI_{lower} = 4.74\%$  και υψηλό χρήσιμο  $UDI - 78.81\%$ ), ικανοποιώντας τις αυστηρές προδιαγραφές του προτύπου WELL v2 (Γράφημα 1 *Επεξήγηση δεικτών ποσοστό DGP > 0.4, % ωρών σε ανοιχτή θέση. + Γράφημα 2 Ανάλυση UDI*).

Όσον αφορά την απλότητα και την αξιοπιστία, η στρατηγική **static\_open** (περσίδες μόνιμα σε ανοιχτή θέση 0°) αποτελεί την πιο οικονομική και πρακτική λύση. Χαρακτηρίζεται ως η «πρακτική ελάχιστη βιώσιμη επιλογή», καθώς επιτυγχάνει τη συμμόρφωση με το ανθρωποκεντρικό πρότυπο WELL L06 χωρίς την ανάγκη για μηχανικά συστήματα ελέγχου. Παρά τον παθητικό της χαρακτήρα, η απόδοσή της στη φωτιστική επάρκεια υπολείπεται μόλις κατά 3 ποσοστιαίες μονάδες sDA σε σχέση με τη βελτιστοποιημένη στρατηγική διπλής ζώνης. Μια θεωρητικά «ιδανική» σταθερή κλίση για το παθητικό σενάριο **static\_open** θα βρισκόταν πιθανόν κοντά στις 45°. Μια τέτοια θετική κλίση (προς τα κάτω) θα λειτουργούσε ως μόνιμη προστασία απέναντι στις υψηλές καλοκαιρινές γωνίες προφίλ της Αθήνας, ρίχνοντας το ετήσιο κλάσμα θάμβωσης κοντά στο 50% και μετατρέποντας τον ενοχλητικό υπερφωτισμό  $UDI_{over}$  σε ωφέλιμο  $UDI_{useful}$ , χωρίς να υποβαθμίσει τη χωρική αυτονομία (sDA=100%).

Η στρατηγική **well\_c\_dual\_zone** επιτυγχάνει την πιο ισορροπημένη κατανομή, με υψηλό χρήσιμο  $UDI (78.81\%)$  περιορισμένο υπερφωτισμό και χαμηλό υποφωτισμό, επιβεβαιώνοντας τη συνολική της υπεροχή ως βέλτιστης λύσης. Αυτό γιατί αν και η **well\_c\_dual\_zone** έχει ελαφρώς χαμηλότερο ωφέλιμο  $UDI (78.81\%)$ , επειδή ένα μέρος των ωρών της «ξεφεύγει» προς τον υπερφωτισμό ( $UDI_{upper} = 16.45\%$ ), κρατάει την κάτω ζώνη ανοιχτή στο 59.7% του έτους για τη θέα (Ωρες ανοιχτό). Το μεγάλο της πλεονέκτημα όμως είναι ότι κρατά χαμηλά τον υποφωτισμό ( $UDI_{lower} = 4.74\%$ ), κρατώντας το δωμάτιο ζωντανό και φωτεινό. Αυτή η γεωμετρική στρατηγική εξασφαλίζει τα απαραίτητα επίπεδα κατακόρυφης έντασης φωτισμού στο επίπεδο των ματιών των χρηστών, ικανοποιώντας άμεσα τις απαιτήσεις του προτύπου WELL v2 για τον κερκτικό φωτισμό, χωρίς να προκαλείται οπτική δυσφορία.

Συνολικά, η έρευνα καταλήγει στο ότι ενώ η στρατηγική **well\_c\_dual\_zone** παραμένει η βέλτιστη ανθρωποκεντρική λύση λόγω της ισορροπίας που προσφέρει, οι εναλλακτικές **dynamic\_cutoff** και **static\_open** αποτελούν έγκυρες επιλογές όταν η προτεραιότητα είναι ο απόλυτος έλεγχος της ηλιακής ακτινοβολίας ή η μείωση της κατασκευαστικής πολυπλοκότητας αντίστοιχα.

## 6.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου **Detailed Dynamic Shading** για την προσομοίωση 361 διακριτών καταστάσεων απέδειξε ότι ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός μπορεί να μεταβεί με ακρίβεια από τη μελέτη της στατικής μορφής στον προγραμματισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους. Ωστόσο, η **Point-In-Time** και η ετήσια ιχνηλάτηση ακτίνων μέσω Honeybee-Radiance, παρά την υψηλή της ακρίβεια, συνοδεύεται από σημαντικό υπολογιστικό κόστος και μεγάλο χρόνο εκτέλεσης. Αυτό το γεγονός αναδεικνύει την ανάγκη για τη μελλοντική εξέλιξη της παρούσας έρευνας, η οποία ευθυγραμμίζεται με τη σύγχρονη επιστημονική τάση που εισάγει το **Machine Learning** ως μοντέλο αντικατάστασης (surrogate model) των παραδοσιακών φυσικών προσομοιώσεων (Pacheco Diéguez, Chronis et al., 2025).

Παράλληλα, η βάση δεδομένων των fisheye renders και των ψευδοχρωματικών αναλύσεων φωτεινότητας που παρήχθησαν από τη μηχανή Radiance μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκπαίδευση εικονοκεντρικών μοντέλων. Ένα μοντέλο Generative AI, όπως το δίκτυο Pix2Pix (cGAN), μπορεί να εκπαιδευτεί ώστε να «διαβάζει» τη γεωμετρία της όψης και να παράγει ακαριαία την τελική εικόνα της κατανομής του φωτός και την τιμή DGP, παρακάμπτοντας τις χρονοβόρες διαδικασίες ray-tracing. Η μελλοντική ενσωμάτωση αυτών των αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης στις πολυζωνικές στρατηγικές Split-Blinds θα επιτρέψει στις προσόψεις να αυτο-ρυθμίζονται προγνωστικά και διαδραστικά, ενισχύοντας σημαντικά τους κερκάρδιους ρυθμούς και την παραγωγικότητα των εργαζομένων, προάγοντας την έννοια της ανθρωποκεντρικής βιωσιμότητας πέρα από την απλή εξοικονόμηση ενέργειας (Pacheco Diéguez, Chronis et al., 2025).

Η εφαρμογή της Μηχανικής Μάθησης δεν περιορίζεται μόνο στην πρόβλεψη των δεικτών φωτισμού, αλλά επεκτείνεται και στην άμεση διαχείριση της ηλιακής έκθεσης. Η χρήση deep learning μοντέλων επιτρέπει την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (Solar Radiation) σε πραγματικό χρόνο πάνω στο κτιριακό κέλυφος. Ενσωματώνοντας μια τέτοια προσέγγιση στη ροή εργασίας των Split-Blinds, το υπολογιστικό σύστημα θα μπορεί να αξιολογεί ακαριαία το θερμικό και οπτικό φορτίο που δέχεται η όψη ανά ώρα. Η μελλοντική σύγκλιση αυτών των αλγορίθμων πρόβλεψης ακτινοβολίας και φωτισμού θα επιτρέψει στις δυναμικές προσόψεις να αυτο-ρυθμίζονται προγνωστικά και διαδραστικά, ενισχύοντας σημαντικά τους κερκάρδιους ρυθμούς και την παραγωγικότητα των εργαζομένων, προάγοντας την έννοια της ανθρωποκεντρικής βιωσιμότητας πέρα από τα στενά όρια της απλής εξοικονόμησης ενέργειας (Galanos, Chronis, 2021).

## Παράρτημα

### A. Διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων με τη μηχανή Radiance

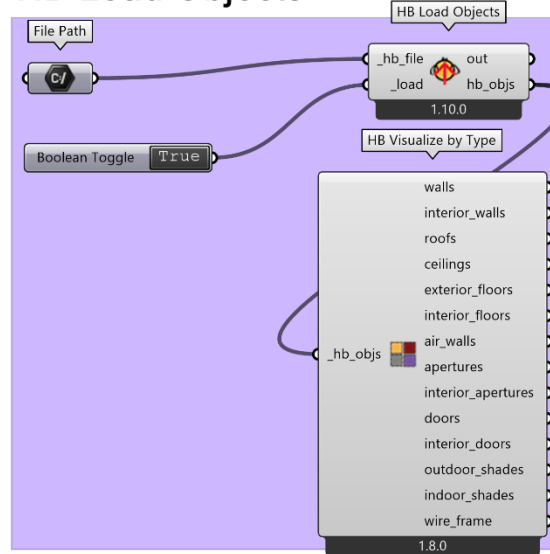
Η διαδικασία παραγωγής αποτελεσμάτων με τη μηχανή Radiance μέσω των Ladybugs Tools (Εικόνα 8 ) ξεκινά με τον ορισμό της θέσης παρατηρητή και της κατεύθυνσης όρασης στο Grasshopper. Μέσω του εργαλείου Vector 2Pt ορίζονται δύο σημεία (Point A και Point B) που καθορίζουν το διάνυσμα όρασης, το οποίο στη συνέχεια τροφοδοτείται στο HB View component. Εκεί ορίζεται `view_type = 4` (fisheye προβολή) με οριζόντια και κατακόρυφη γωνία  $180^\circ$ , που είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό θάμβωσης. Παράλληλα, το **HB Sensor Grid** ορίζει το πλέγμα σημείων υπολογισμού πάνω στο επίπεδο εργασίας για τις τιμές φωτισμού.

Η γεωγραφική τοποθεσία εισάγεται μέσω του **LB Construct Location** με συντεταγμένες `latitude = 38° 01' Βόρεια` και `longitude = 23° 48' Ανατολικά`, που αντιστοιχούν στην Αθήνα. Αυτές οι πληροφορίες τροφοδοτούν το HB CIE Standard Sky, όπου ορίζεται η ημερομηνία και ώρα προσομοίωσης .

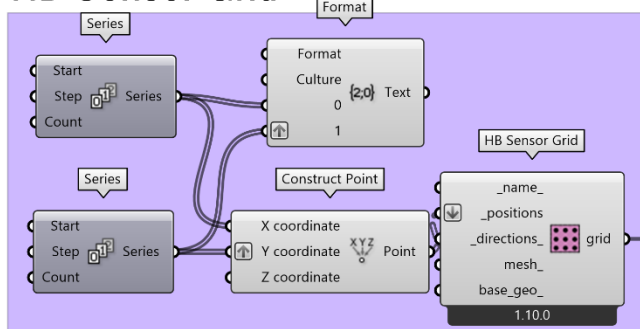
Στη συνέχεια, το **HB Assign Grids and Views** συνδυάζει το μοντέλο της γεωμετρίας με το sensor grid και το view που ορίστηκαν προηγουμένως, και το αποτέλεσμα τροφοδοτείται στο **HB Point-In-Time View-Based simulation** component. Εκεί εισάγονται επίσης οι παράμετροι Radiance (`-aa 0.1 -ab 5 -ad 2048 -ar 512 -as 512 -dc 0.75 -dj 1.0 -dp 512 -dr 3 -ds 0.05 -dt 0.15 -lr 8 -lw 0.005 -pj 0.9 -ps 2 -pt 0.05 -ss 1.0 -st 0.15`), καθώς και η ανάλυση εικόνας `resolution = 1500` και `metric = 2`.

Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση, τα αποτελέσματα κατευθύνονται σε δύο παράλληλες διαδρομές post-processing. Η πρώτη οδηγεί στο **HB False Color component**, το οποίο παράγει τις ψευδοχρωματικές εικόνες φωτεινότητας σε λογαριθμική κλίμακα  $\text{cd/m}^2$  που βλέπουμε στα fisheye renders. Η δεύτερη οδηγεί στο **HB Glare Postprocess**, το οποίο επεξεργάζεται το HDR αρχείο μέσω του evalglare και εξάγει την τιμή DGP για κάθε θέση παρατηρητή και σενάριο σκίασης.

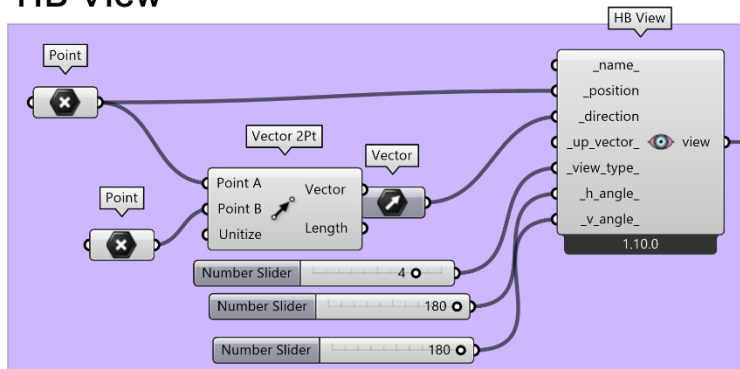
## HB Load Objects



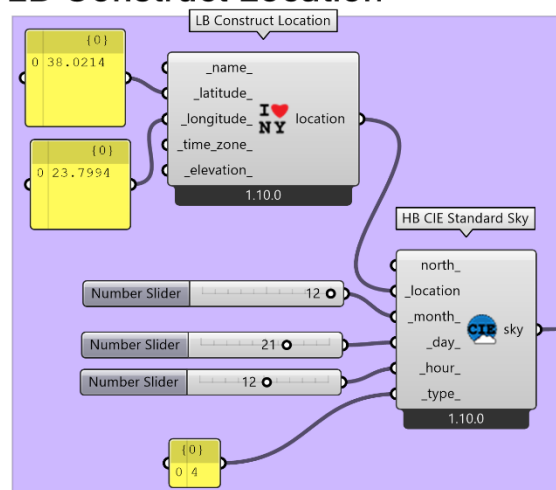
## HB Sensor Grid

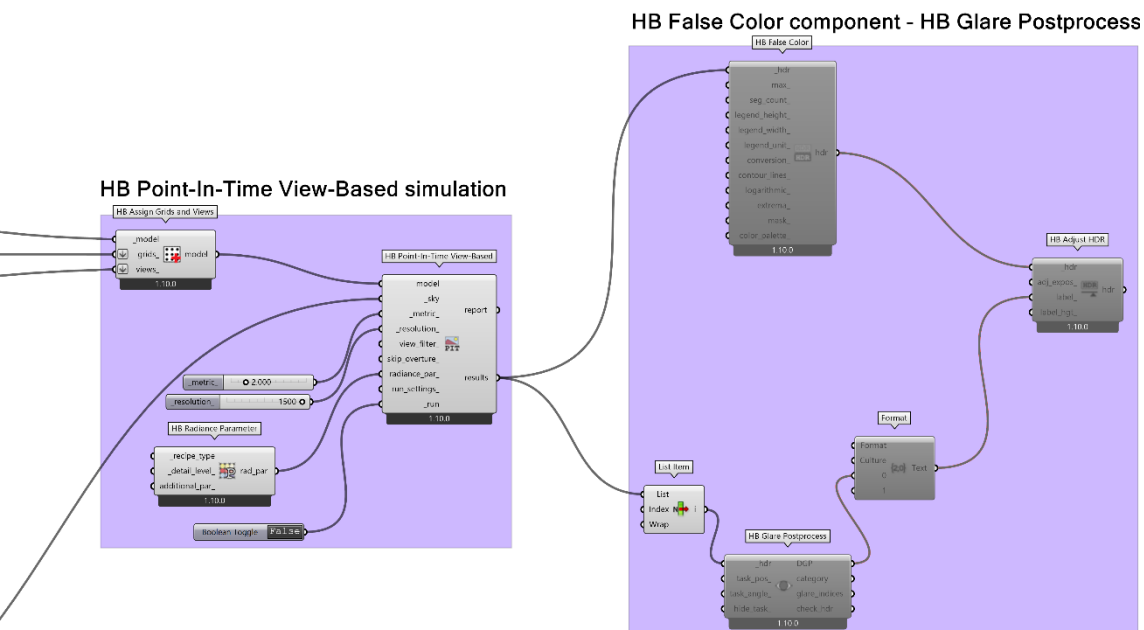


## HB View



## LB Construct Location

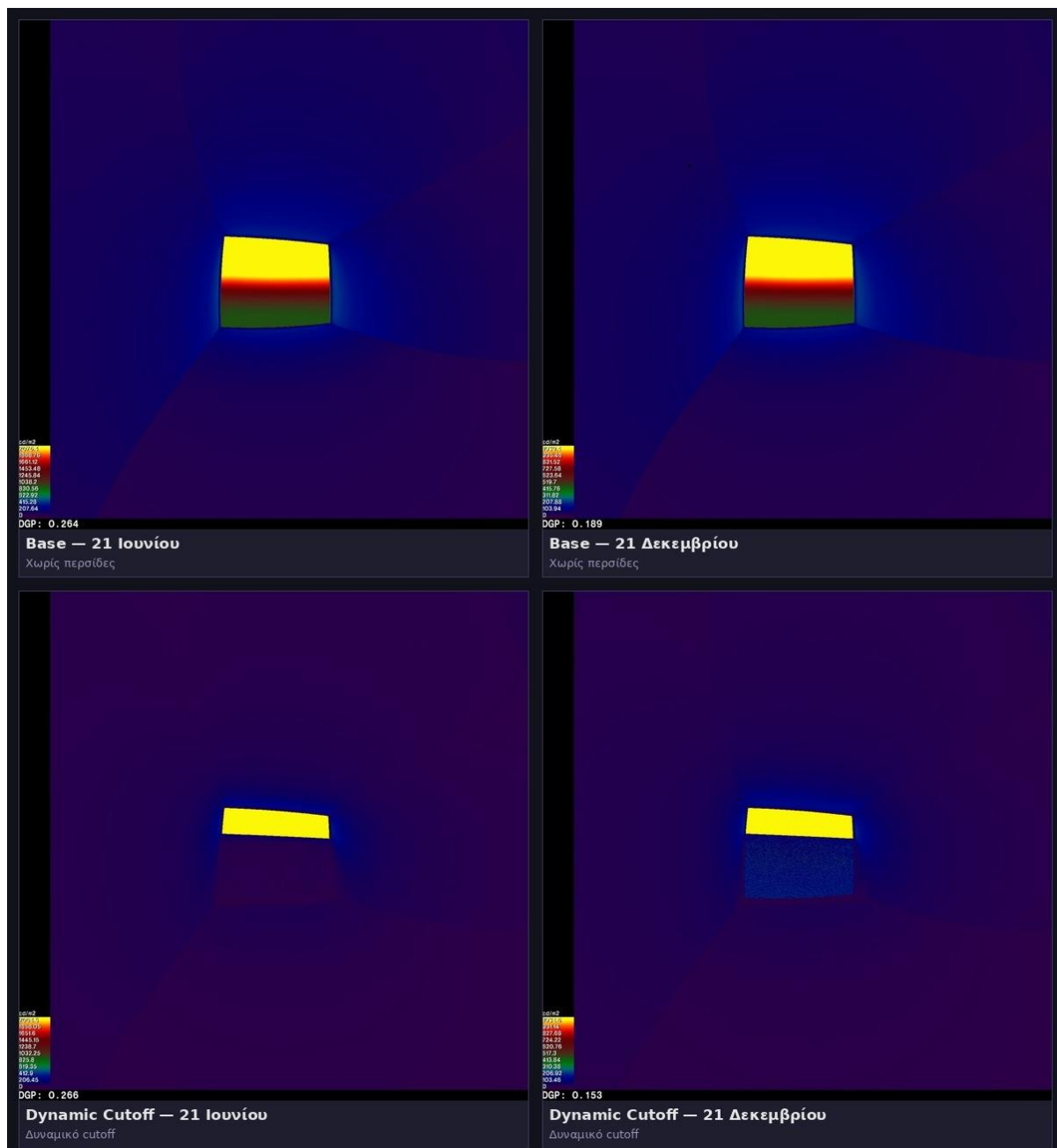




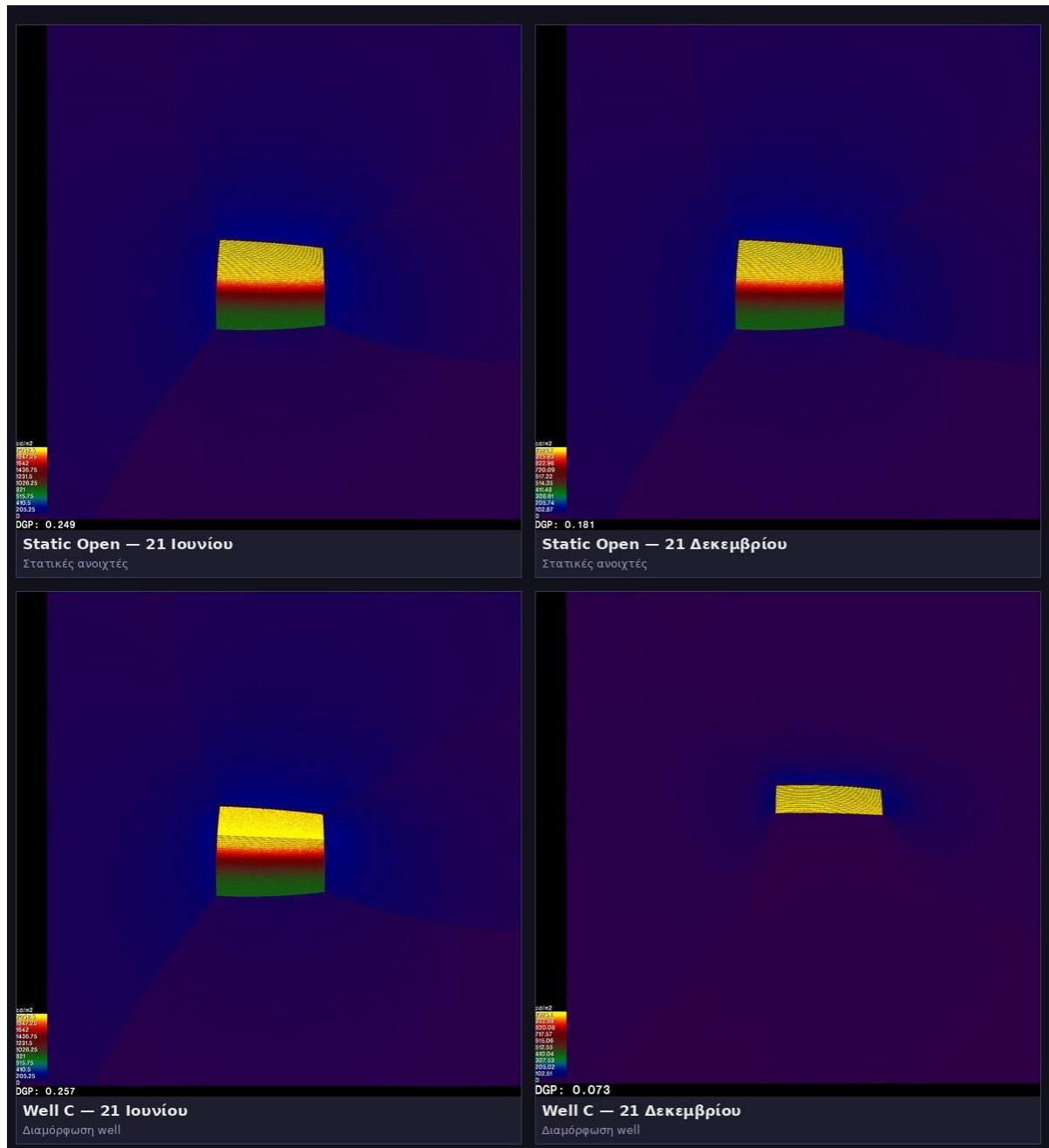
Εικόνα 12 : Ροή εργασίας Point-In-Time View-Based προσομοίωσης φυσικού φωτισμού και αξιολόγησης θάμβωσης (DGP) μέσω Honeybee-Radiance

Το παρακάτω σχήμα δείχνει ψευδοχρωματικό φωτισμό εσωτερικής προοπτικής (lux, κλίμακα 0–3.000) για μεσημβρία 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου για κάθε στρατηγική.

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 1ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια Base και Dynamic Cutoff)

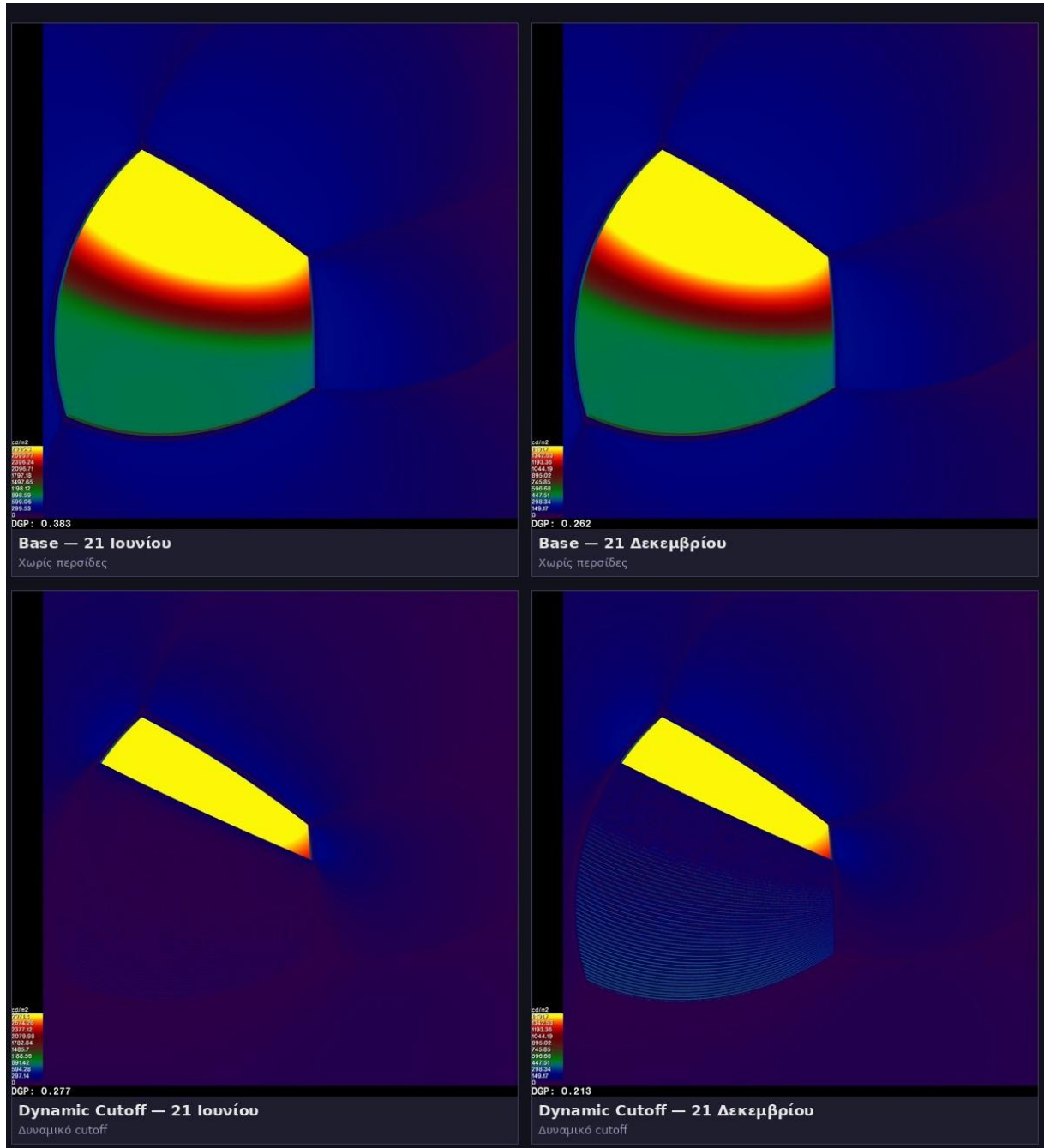


**Σχήμα (Παράρτημα Α - 2ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια *Static Open* και *Well C*)

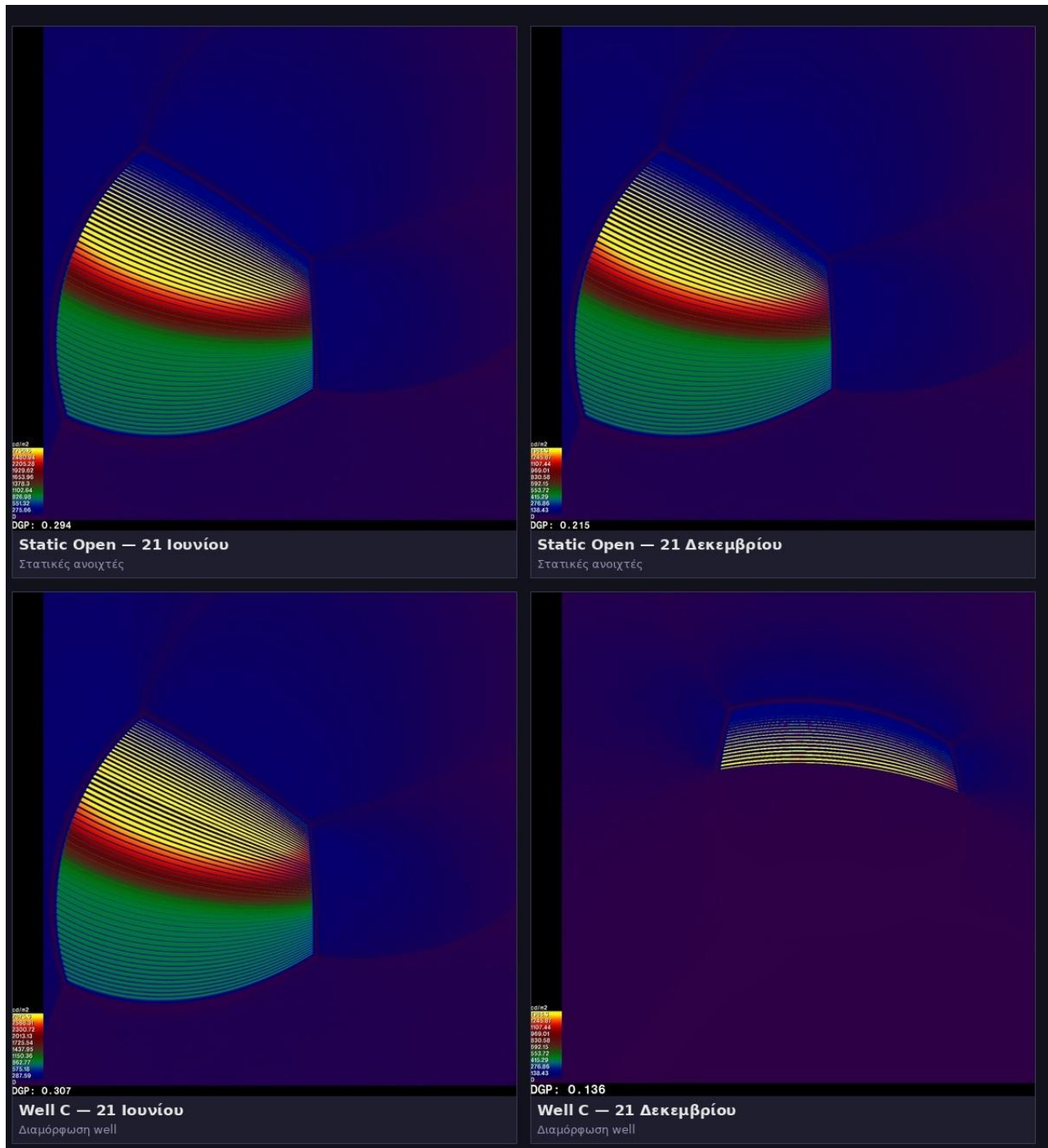


Το παρακάτω σχήμα δείχνει ψευδοχρωματική φωτεινότητα fisheye ( $\text{cd}/\text{m}^2$ , λογαριθμική κλίμακα) από τη σκοπιά του χρήστη με ενσωματωμένη τιμή DGP. Το `base_no_blinds` εμφανίζει  $\text{DGP} > 0,45$  και στα δύο ηλιοστάσια· οι στρατηγικές `dynamic` και `well_c` παραμένουν κοντά ή κάτω από 0,35

**Σχήμα (Παράρτημα Α - 3ο):** Ψευδοχρωματική φωτεινότητα fisheye ( $\text{cd/m}^2$ ) (λογαριθμική κλίμακα) από τη σκοπιά του χρήστη με ενσωματωμένη τιμή DGP (Σενάρια Base και Dynamic Cutoff).



**Σχήμα (Παράρτημα Α - 4ο):** Απόδοση φυσικού φωτισμού – προοπτική απεικόνιση ψευδοχρώματος σε lux, 21 Ιουνίου μεσημέρι έναντι 21 Δεκεμβρίου μεσημέρι ανά στρατηγική (Σενάρια *Static Open* και *Well C - Fisheye*)



## B. Αναφορές grid\_summary\_combined.csv ανά περίπτωση

- cases/base\_no\_blinds/grid\_summary\_combined.csv
- cases/static\_open/grid\_summary\_combined.csv

- cases/dynamic\_cutoff/grid\_summary\_combined.csv
- cases/well\_c\_dual\_zone/grid\_summary\_combined.csv

Full comparison\_summary.csv

Πίνακας 8: Συγκριτική αξιολόγηση

| case_id          | constr_strategy  | source       | DA3000_mean | DA3000_min | DA3000_max | UDI1-LEW | UDI1-UPER | UDI1-UPER_mean | CDA3000_50 | SA3000_250 | ASE1_max | DGP1_max | DGP1_max | DGP1_max | DGP1_max | fraction_hours_DGP4_window_facing | fraction_hours_DGP4_window_facing | well_ill06_compliance | selection_transitions_per_day_mean | selection_transitions_per_day_mean | selection_transitions_per_day_mean | notes            |
|------------------|------------------|--------------|-------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------|
| base_unoblivious | base_unoblivious | G0_sim_fresh | 92.9700     | 83.9200    | 97.3500    | 64.1800  | 32.0000   | 32.0000        | 94.8400    | 13.3000    | 25.3472  | 1.0000   | 1.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.9354                            | 0.9361                            | Fails                 | 1.0000                             | 1.0000                             | 1.0000                             | base_unoblivious |
| static           | static           | G1_copy_fro  | 89.8200     | 79.6000    | 94.7000    | 81.7000  | 43.2000   | 13.2000        | 91.1400    | 10.0000    | 7.1372   | 1.0000   | 1.0000   | 0.0000   | 0.0000   | 0.8810                            | 0.8825                            | True                  | 1.0000                             | 1.0000                             | 1.0000                             | static           |

|                                                                              |                                                                              |        |                                                                                                  |                                                     |                                                |                                      |                                      |                                           |                                      |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                       |                |                       |                  |                       |                       |                            |                  |                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| o<br>p<br>e<br>n                                                             | o<br>p<br>e<br>n                                                             |        | m<br>-<br>0<br>5                                                                                 |                                                     |                                                |                                      |                                      |                                           |                                      |                                 | 0<br>0                          |                                 |                                 |                                 |                                 |                       |                |                       |                  |                       |                       |                            | o<br>p<br>e<br>n |                                                                              |
| d<br>y<br>n<br>a<br>m<br>i<br>c<br>-<br>c<br>u<br>t<br>o<br>f<br>f           | d<br>y<br>n<br>a<br>m<br>i<br>c<br>-<br>c<br>u<br>t<br>o<br>f<br>f           | G<br>2 | s<br>t<br>i<br>t<br>c<br>h<br>e<br>d<br>-<br>f<br>r<br>o<br>m<br>-<br>b<br>i<br>n<br>s           | 8<br>5<br>9<br>8<br>5<br>1<br>8<br>1<br>0<br>0<br>0 | 5<br>7<br>4<br>2<br>6<br>0<br>7<br>0<br>0<br>0 | 9<br>4<br>1<br>8<br>0<br>0<br>0<br>0 | 8<br>2<br>1<br>8<br>0<br>0<br>0<br>0 | 5<br>6<br>1<br>4<br>9<br>1<br>0<br>0<br>0 | 1<br>2<br>1<br>4<br>1<br>0<br>0<br>0 | 8<br>9<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 0<br>3<br>5<br>3<br>8<br>0      | 0<br>2<br>3<br>6<br>9 | 0.7<br>12<br>7 | 0<br>7<br>6<br>2<br>7 | T<br>r<br>u<br>e | 1<br>0<br>0<br>0<br>0 | 0<br>0<br>0<br>0<br>0 | 0<br>0<br>0<br>0<br>0      | -                | d<br>y<br>n<br>a<br>m<br>i<br>c<br>-<br>c<br>u<br>t<br>o<br>f<br>f           |
| w<br>e<br>l<br>l<br>-<br>c<br>-<br>d<br>u<br>a<br>l<br>-<br>z<br>o<br>n<br>e | w<br>e<br>l<br>l<br>-<br>c<br>-<br>d<br>u<br>a<br>l<br>-<br>z<br>o<br>n<br>e | G<br>1 | s<br>t<br>i<br>t<br>c<br>h<br>e<br>d<br>-<br>f<br>r<br>o<br>m<br>-<br>p<br>r<br>o<br>j<br>0<br>5 | 9<br>0<br>3<br>0<br>0<br>0                          | 7<br>5<br>6<br>9<br>0<br>0                     | 9<br>5<br>4<br>6<br>0<br>0           | 7<br>8<br>1<br>0<br>0                | 4<br>7<br>4<br>0<br>0                     | 1<br>6<br>4<br>5<br>0<br>0           | 9<br>1<br>0<br>8<br>0<br>0<br>0 | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0      | 2<br>9<br>0<br>0<br>0<br>0      | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0      | 1<br>0<br>0<br>0<br>0<br>0      | 0<br>4<br>2<br>7<br>6<br>4<br>6 | 0<br>2<br>6<br>4<br>6 | 0.8<br>72<br>7 | 0<br>8<br>7<br>6<br>2 | T<br>r<br>u<br>e | 1<br>3<br>0<br>0<br>0 | 2<br>69<br>44         | 5<br>9<br>6<br>6<br>8<br>9 | -                | w<br>e<br>l<br>l<br>-<br>c<br>-<br>d<br>u<br>a<br>l<br>-<br>z<br>o<br>n<br>e |

Πρόκειται για ένα αρχείο κειμένου (CSV) που εξαγεται αυτόματα από τον κώδικα της προσομοίωσης και συγκεντρώνει τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων που εξετάστηκαν.

## Βιβλιογραφία

- Al-Sallal, K. A. (2010). Testing daylighting performance of automated dynamic vs. static shading systems in office buildings. *Energy and Buildings*, 42(5).
- Alsukkar, M., Hu, M., Eltaweel, A., & Su, Y. (2022). Daylighting performance improvements using of split louver with parametrically incremental slat angle control.
- Alsukkar, M., Hu, M., Gadi, M., & Su, Y. (2022). A study on daylighting performance of split louver with simplified parametric control. *Buildings*, 12(5), 594.  
<https://doi.org/10.3390/buildings12050594>
- Alsukkar, M., Hu, M., Alkhater, M., & Su, Y. (2023). Daylighting performance assessment of a split louver with parametrically incremental slat angles: effect of slat shapes and PV glass transmittance. *Solar Energy*, 264, 112069.
- Alsukkar, M., Alkhater, M., Su, Y., & Ibrahim, A. (2025). Optimizing daylighting performance and energy efficiency through the integration of parametric split louvers in office buildings. *Energy and Built Environment*.
- Böke, J., Knaack, U., & Hemmerling, M. (2020). Automated adaptive façade functions in practice - Case studies on office buildings. *Automation in Construction*, 113.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103113>
- Busby Perkins + Will and Stantec Consulting. (2007). Integrated design overview: Roadmap for the integrated design process.
- Do, C. T., & Chan, Y.-C. (2020). Evaluation of the effectiveness of a multi-sectional facade with Venetian blinds and roller shades with automated shading control strategies. *Solar Energy*, 212, 241–257.
- Edwards, L., & Torcellini, P. (2002). A literature review of the effects of natural light on luminous environment, occupant comfort, and productivity. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Report No. NREL/TP-550-30769.
- Eltaweel, A., Su, Y., Hafez, M., & Eltaweel, W. (2021). An automated louver with innovative parametrically-angled reflective slats: Prototyping and validation via using parametric control in Grasshopper along with Arduino board. *Energy & Buildings*, 231, 110614.
- Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, 191, 7–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>

- Fattahi Tabasi, S., & Banihashemi, S. (2022). Design and mechanism of building responsive skins: State-of-the-art and systematic analysis. In *Frontiers of Architectural Research* (Vol. 11, No. 6, pp. 1151–1176). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.05.006>
- Galanos, T., & Chronis, A. (2021). A deep-learning approach to real-time solar radiation prediction. In A. Chang & M. R. Thomsen (Eds.), *The Routledge Companion to Artificial Intelligence in Architecture* (pp. 224–231). Routledge.
- Grzegorzewska, M., & Kirschke, M. (2021). The impact of daylighting on human health and well-being in office buildings. *Sustainability*, 13(9), 4728.
- Hamadah, M., ElSeragy, A., & ElDeeb, S. (2023). Well-being as a tool to improve productivity in existing office space: Case study in Alexandria, Egypt. *F1000Research*, 12, 639. <https://doi.org/10.12688/f1000research.133199.1>
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106396>
- Ibrahim, A., Alsukkar, M., Dong, Y., & Hu, P. (2024). Improvements in energy savings and daylighting using trapezoid profile louver shading devices. *Energy and Buildings*, 114649.
- Ildiri, N., Bazille, H., Lou, Y., Hinkelman, K., Gray, W. A., & Zuo, W. (2022). Impact of WELL certification on occupant satisfaction and perceived health, well-being, and productivity: A multi-office pre- versus post-occupancy evaluation.
- International WELL Building Institute. (2020). *WELL Building Standard v2 (Q4 2020)*. International WELL Building Institute.
- Kızılörenli, E., & Orhon, A. V. (2025). Tessellation-Based Origami-Inspired Movable Façade for Daylighting and Exposure Optimization: Assessing Different Movement Approaches. *Journal of Daylighting*, 12(2), 252–264. <https://doi.org/10.15627/jd.2025.17>
- Kokatnur, S., Mohan, N., & Shwetha, M. (2025). Daylighting performance and visual comfort analysis of office buildings: A review. *Journal of Building Engineering*, 92, 109723.
- Köster, H. (2004). *Dynamic daylighting architecture: Basics, systems, projects*. Birkhäuser.
- Larson, G. W. et al. (1998). "Rendering with Radiance: A Practical Tool for Global Illumination".
- Lee, D., Cho, Y. H., & Jo, J. H. (2021). Assessment of control strategy of adaptive façades for heating, cooling, lighting energy conservation and glare prevention. *Energy and Buildings*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110739>
- Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H., & Nguyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119557>
- Luo, J., Mcibse, C., Idzikowski, I., Anis, R., & Zaki, A. (2021). *Impact of WELL Building Standard v2 on the Office Building Energy Performance*. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org)

- Mardaljevic, J. (2000). Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *Lighting Research & Technology*, 32(3), 111–118.
- McNeil, A. (2013). "The Three-Phase Method for Simulating Complex Fenestration with Radiance".
- McNeil, A., & Lee, E. S. (2013). "Five-Phase Method Simulation Steps for Illuminance".
- Pacheco Diéguez, A., Pacheco, L., Karataş, H., Drożdż, D., Chronis, A., & Rossi, G. (2025). Daylight factor prediction using machine learning: A two-way study using numerical encoding and regression models, versus image encoding and pix2pix. *Building and Environment*, 274, 112743. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112743>
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., & Bullough, J. D. (2002). Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research. *Lighting Research & Technology*, 34(3).
- Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS*, 3(1).
- Rockcastle, S., Chamilothoni, K., & Andersen, M. (2023). An approach to quantify the human perception of daylight composition and visual dynamics in architecture. *Building and Environment*, 242, 110512.
- Safranek, S., Collier, J. M., Wilkerson, A., & Davis, R. G. (2020). Energy impact of human health and wellness lighting recommendations for office and classroom applications. *Energy and Buildings*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110365>
- Samadi, S., Noorzai, E., Beltrán, L. O., & Abbasi, S. (2020). A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 335–349. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.004>
- Shi, X., Abel, T., & Wang, L. (2020). Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic façades. *Solar Energy*, 201, 561–580. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.017>
- Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., Ambrogio, V., & Ausiello, G. (2024). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111052>
- Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. In *Automation in Construction* (Vol. 121). Elsevier B.V.
- U.S. Green Building Council. (2019). *LEED v4.1 Building Design and Construction Guide*. U.S. Green Building Council.
- Wu, H., & Zhang, T. (2022). Optimal design of complex dynamic shadings: Towards sustainable built environment. *Sustainable Cities and Society*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104109>
- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2021). Τεχνική Οδηγία ΤΕΕ TOTEE 20701-7/2021: Τεχνητός και Φυσικός Φωτισμός των Κτιρίων. Αθήνα: ΤΕΕ.
- Τσαγκρασούλης, Α. (2015). Φυσικός φωτισμός. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Βόλος.