



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών
και Βιώσιμου Σχεδιασμού

Βιώσιμος Σχεδιασμός Εσωτερικού
Περιβάλλοντος Κτιρίων

Διπλωματική Εργασία

**Παραμετρική Βελτιστοποίηση Δυναμικού Συστήματος Σκίασης
για Εξισορρόπηση Φυσικού Φωτισμού, Διατήρηση Οπτικής
Επαφής και Ενεργειακής Απόδοσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό
Πρότυπο EN 17037**

Λυδία Χατζηιωάννου

Επιβλέπων καθηγητής: *Κονταδάκης Αντώνιος*

Αθήνα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («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 Βελτιστοποίηση Δυναμικού Συστήματος Σκίασης
για Εξισορρόπηση Φυσικού Φωτισμού, Διατήρηση Οπτικής
Επαφής και Ενεργειακής Απόδοσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό
Πρότυπο EN 17037**

Λυδία Χατζιωάννου

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αντώνιος Κονταδάκης

ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χριστίνα Σκανδάλη

ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Αθήνα, Ιούνιος 2026

«Ευχαριστίες ή Αφιέρωση»

Περίληψη

Ο φυσικός φωτισμός, η ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και η προστασία από τη θάμβωση αποτελούν βασικές παραμέτρους της οπτικής άνεσης και της συνολικής ποιότητας των εσωτερικών χώρων. Ωστόσο, οι παράμετροι αυτές βρίσκονται συχνά σε σχέση ανταγωνισμού, καθώς η βελτίωση της μίας μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση κάποιας άλλης. Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037 εισάγει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού, της ποιότητας θέας και της προστασίας από τη θάμβωση, αναδεικνύοντας την ανάγκη ανάπτυξης ανθρωποκεντρικών και πολυκριτηριακών προσεγγίσεων σχεδιασμού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά πώς η παραμετρική γεωμετρία ενός εξωτερικού συστήματος σκίασης μπορεί να εξισορροπήσει ταυτόχρονα την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την ποιότητα της θέας και την προστασία από τη θάμβωση, με πλαίσιο αναφοράς το EN 17037. Αφετηρία της έρευνας αποτελεί το διαπιστωμένο κενό της βιβλιογραφίας ως προς την ταυτόχρονη αξιολόγηση των παραμέτρων φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας, καθώς και η περιορισμένη ενσωμάτωση της ποιότητας θέας ως ισότιμου κριτηρίου στη διαδικασία βελτιστοποίησης συστημάτων σκίασης.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό πλαίσιο στο περιβάλλον Rhinoceros 3D και Grasshopper, με αξιοποίηση των εργαλείων Ladybug Tools, Honeybee και του υπολογιστικού πυρήνα Radiance για την προσομοίωση φυσικού φωτισμού και θάμβωσης. Ως πεδίο εφαρμογής επιλέχθηκε ένας νότιος χώρος γραφείου, στον οποίο εφαρμόστηκε διάτρητο εξωτερικό σύστημα σκίασης με κυκλικά ανοίγματα. Οι μεταβλητές σχεδιασμού αφορούσαν την ακτίνα και την πυκνότητα των ανοιγμάτων, ενώ η αξιολόγηση βασίστηκε σε δείκτες φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και θάμβωσης. Η θάμβωση αξιολογήθηκε μέσω του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP), ενώ ως χρονική στιγμή προσομοίωσης επιλέχθηκε η 21η Μαρτίου στις 13:00, η οποία προσδιορίστηκε ως η δυσμενέστερη περίπτωση ως προς την εμφάνιση θάμβωσης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με τον εξελικτικό αλγόριθμο Galapagos.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βελτιστοποιημένη γεωμετρία του συστήματος σκίασης μπορεί να μειώσει σημαντικά τη θάμβωση σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς χωρίς σκίαση, διατηρώντας παράλληλα υψηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού και οπτικής επαφής με

το εξωτερικό περιβάλλον. Η περίπτωση αναφοράς χωρίς σκίαση παρουσίασε μέγιστη επίδοση ως προς τον φυσικό φωτισμό και τη θέα, αλλά μη αποδεκτές συνθήκες οπτικής άνεσης λόγω υψηλών τιμών DGP. Αντίθετα, οι βέλτιστες λύσεις πέτυχαν την άρση της συνθήκης οπτικής δυσφορίας με περιορισμένες μόνο επιπτώσεις στους υπόλοιπους δείκτες απόδοσης.

Η εργασία καταδεικνύει ότι η παραμετρική βελτιστοποίηση μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο σχεδιασμού συστημάτων σκίασης, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πιο άνετων, ανθρωποκεντρικών και περιβαλλοντικά αποδοτικών κτιριακών περιβαλλόντων. Παράλληλα, προτείνει μια αναπαραγώγιμη μεθοδολογία αξιολόγησης και βελτιστοποίησης, πλήρως ευθυγραμμισμένη με τις αρχές του EN 17037.

Λέξεις – Κλειδιά

φυσικός φωτισμός, θάμβωση (DGP), ποιότητα θέας (View Out), EN 17037, παραμετρικός σχεδιασμός, παραμετρική βελτιστοποίηση, εξωτερικά διάτρητα συστήματα σκίασης, Galapagos.

Abstract

Daylighting, view quality, and glare protection are key components of visual comfort and overall indoor environmental quality. However, these parameters are often conflicting, as improving one may lead to the deterioration of another. The European Standard EN 17037 provides a comprehensive framework for the assessment of daylight provision, view out, and glare protection, highlighting the need for human-centered and multi-criteria design approaches.

This thesis investigates how the parametric geometry of an external shading system can simultaneously balance daylight availability, view quality, and glare protection within the framework of EN 17037. The study is motivated by an identified gap in the literature regarding the integrated assessment of daylight, glare, and view performance, as well as the limited incorporation of view quality as an explicit optimization objective in shading system design.

To address this challenge, an integrated computational workflow was developed using Rhinoceros 3D and Grasshopper, supported by Ladybug Tools, Honeybee, and the Radiance simulation engine for daylight and glare analysis. A south-facing office space was selected as the case study, incorporating a perforated external shading system with circular openings. The design variables consisted of the aperture radius and perforation density of the shading screen. Performance evaluation was based on daylight, view quality, and glare metrics. Glare conditions were assessed using the Daylight Glare Probability (DGP) index, while March 21st at 13:00 was identified and selected as the worst-case scenario for glare occurrence. The optimization process was conducted using the evolutionary solver Galapagos.

The results demonstrate that the optimized shading geometry can significantly reduce glare compared to the baseline case without shading, while maintaining high levels of daylight availability and visual connection with the outdoor environment. The reference case achieved maximum daylight and view performance but resulted in unacceptable glare conditions due to excessive DGP values. In contrast, the optimized solutions successfully eliminated visual discomfort with only minor reductions in the remaining performance indicators.

The findings confirm that parametric optimization can serve as an effective design tool for shading systems, contributing to the development of more comfortable, human-centered, and environmentally responsive buildings. Furthermore, the study proposes a reproducible methodology for the assessment and optimization of shading systems, fully aligned with the principles and performance criteria of EN 17037.

Keywords

daylighting, glare (DGP), view out, EN 17037, parametric design, parametric optimization, perforated external shading systems, Galapagos.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vii
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xiii
Εισαγωγή.....	1
1. Θεωρητικό πλαίσιο.....	1
1.1 Γενικό πλαίσιο: φυσικός φωτισμός, οπτική άνεση και ποιότητα θέας στα σύγχρονα κτίρια.....	1
1.2 Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037: Από τον Daylight Factor στις κλιματικά βασισμένες προσεγγίσεις φυσικού φωτισμού.....	2
1.3 Η σημασία της οπτικής άνεσης και της εξωτερικής θέας (View Out): Ανάλυση της ψυχολογικής και φυσιολογικής επίδρασης στους χρήστες.....	4
1.4 Διατύπωση του Προβλήματος: Η εξισορρόπηση μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας.....	5
1.5 Υφιστάμενη κατάσταση: Περιορισμοί των στατικών συστημάτων σκίασης και ανάγκη για δυναμικές λύσεις.....	6
1.6 Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα.....	7
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	9
2.1 Φυσικός Φωτισμός και Δείκτες Αξιολόγησης.....	9
2.1.1 Στατικοί και δυναμικοί δείκτες αξιολόγησης φυσικού φωτισμού.....	9
2.1.2 Μη οπτικές επιδράσεις του φωτός: Κιρκάδιος ρυθμός και melanopic φωτισμός.....	10
2.2 Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037 – Αναλυτική Προσέγγιση.....	11
2.2.1 Επαρκής φυσικός φωτισμός (Daylight Provision) και sDA.....	13
2.2.2 Ποιότητα θέας (View Out): κριτήρια βάθους και εύρους.....	14
2.2.3 Προστασία από Θάμβωση (Glare – DGP): όρια και κατηγοριοποίηση.....	15
2.2.4 Έκθεση σε άμεσο ηλιακό φως (Sunlight Exposure).....	17
2.3 Συστήματα σκίασης: Αρχές λειτουργίας και ταξινόμηση.....	18
2.3.1 Στατικά συστήματα σκίασης: Τυπολογίες και περιορισμοί.....	19
2.3.2 Δυναμικά συστήματα σκίασης (Adaptive Facades).....	20
2.4 Παραμετρικός σχεδιασμός και εργαλεία προσομοίωσης (Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Radiance και Galapagos).....	21
2.4.1 Διαλειτουργικότητα εργαλείων (Interoperability): επικοινωνία μεταξύ των λογισμικών.....	23
2.5 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (Genetic Algorithms – Galapagos).....	25
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	26
3.1 Επισκόπηση ερευνών: Εξελίξεις σε φυσικό φωτισμό και δυναμικά σκίαστρα.....	26
3.2 Εφαρμογές του προτύπου EN 17037 σε κτίρια γραφείων.....	28
3.3 Παραμετρική Βελτιστοποίηση Σκιάστρων: Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα.....	30
3.4 Σχέσεις Ανταγωνισμού (Trade-offs): Ανάλυση της βιβλιογραφίας για τη σύγκρουση μεταξύ Glare, View και Energy.....	32
3.5 Κενά γνώσης (Gap Analysis) και αναγκαιότητα νέας προσέγγισης.....	33
3.5.1 Προσδιορισμός των ερευνητικών κενών.....	35
3.5.2 Αναγκαιότητα νέας προσέγγισης.....	36
3.5.3 Πίνακας Συγκριτικής Αξιολόγησης Βιβλιογραφίας (Gap Analysis Table).....	37
4. Μεθοδολογία και Ερευνητικό Πλαίσιο.....	38

4.1 Περιγραφή Κτιρίου Αναφοράς.....	38
4.2 Παραμετρικό Σύστημα Διάτρητης Σκίασης.....	40
4.3 Δείκτες Αξιολόγησης Απόδοσης.....	41
4.3.1 Φυσικός Φωτισμός.....	41
4.3.2 Ποιότητα Θέασης.....	41
4.3.3 Οπτική Θάμβωση.....	43
4.4 Αξιολόγηση Οπτικής Θάμβωσης (DGP).....	44
4.4.1 Επιλογή δυσμενούς χρονικής στιγμής αξιολόγησης.....	44
4.5 Ενεργοποίηση και Έλεγχος του Περιορισμού Θάμβωσης.....	44
4.5.1 Το πρόβλημα του αδρανούς περιορισμού.....	45
4.5.2 Επαλήθευση Εφικτής Περιοχής.....	45
4.6 Διαδικασία Βελτιστοποίησης.....	46
4.7 Συνάρτηση Καταλληλότητας (Fitness Function).....	49
4.7.1 Λογική Δόμησης της Συνάρτησης Καταλληλότητας.....	50
4.7.2 Διαχείριση της Θάμβωσης ως Περιορισμού.....	51
4.8 Ανεξαρτησία των Παραμέτρων Σχεδιασμού.....	51
5. Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	53
5.1 Περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης.....	53
5.2 Πορεία και σύγκλιση της βελτιστοποίησης.....	56
5.3 Βέλτιστες λύσεις.....	58
5.4 Ανάλυση του βέλτιστου αποτελέσματος.....	59
5.4.1 Φυσικός φωτισμός και θέα.....	59
5.5 Σύγκριση περίπτωση αναφοράς και βέλτιστης λύσης.....	64
5.6 Ισοδυναμία των βέλτιστων λύσεων.....	65
5.7 Αξιολόγηση της σύγκλισης.....	67
5.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	68
6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα.....	68
6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων.....	68
6.2 Πρωτοτυπία και Συνεισφορά.....	69
6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	70
Βιβλιογραφία.....	72
Παράρτημα Α: Μεθοδολογική Τεκμηρίωση Αξιολόγηση Θάμβωσης.....	79

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

<u>Σχήμα 4.1. Παραμετρικός ορισμός του διάτρητου συστήματος σκίασης. Οι μεταβλητές cell_radius και cell_density καθορίζουν πλήρως τη γεωμετρία του σκιάστρου.....</u>	<u>41</u>
<u>Σχήμα 4.2. DGPmax των τεσσάρων ακραίων διατάξεων ως προς το όριο 0.45. Ο περιορισμός θάμβωσης ενεργοποιείται επιλεκτικά μόνο στη διάταξη #3, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη εφικτής ενδιάμεσης περιοχής.....</u>	<u>47</u>
<u>Σχήμα 4.3. Διάγραμμα ροής της αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης: από τις παραμέτρους, μέσω των δύο αλυσίδων αξιολόγησης και της fitness function, στον εξελικτικό βρόχο του Galapagos έως τη σύγκλιση.....</u>	<u>49</u>
<u>Σχήμα 4.4. Σύγκριση διατάξεων #3 και #4. Με ταυτόσημο cell_radius και daylight score, το cell_density μεταβάλλει αποκλειστικά τη θάμβωση (DGP), αποδεικνύοντας τη μη-συγγραμμικότητα των δύο παραμέτρων.....</u>	<u>54</u>
<u>Σχήμα 5.1. Γεωμετρία του μοντέλου αναφοράς (baseline) χωρίς εξωτερικό σύστημα σκίασης.....</u>	<u>56</u>
<u>Σχήμα 5.2. Αξιολόγηση της οπτικής θάμβωσης για την περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης (DGP = 0,631).....</u>	<u>57</u>
<u>Σχήμα 5.3. Περιβάλλον του επιλύτη Galapagos κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης.....</u>	<u>59</u>
<u>Σχήμα 5.4. Ιστορικό σύγκλισης του αλγορίθμου Galapagos και εξέλιξη της μέγιστης τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.....</u>	<u>60</u>
<u>Σχήμα 5.5. Θέση της βέλτιστης λύσης στον χώρο σχεδιασμού. Ο αλγόριθμος δεν κατέληξε στην πλέον ανοιχτή (μη-εφικτή) διάταξη #3, αλλά σε ενδιάμεση λύση οριακά εντός του ορίου θάμβωσης.....</u>	<u>63</u>
<u>Σχήμα 5.6. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 1 (cell_radius = 0.193 m, cell_density = 0.281 m).....</u>	<u>65</u>
<u>Σχήμα 5.7. Υπολογισμός του δείκτη οπτικής θάμβωσης (DGP) για τη Βέλτιστη Λύση 1 (DGPmax = 0,44801).....</u>	<u>66</u>
<u>Σχήμα 5.8. Αξιολόγηση της οπτικής διαπερατότητας (Visibility) μέσω raycasting από το σημείο παρατήρησης προς τα στρώματα θέας.....</u>	<u>67</u>
<u>Σχήμα 5.9. Υπολογιζόμενες τιμές των δεικτών θέας για τη Βέλτιστη Λύση 1 (HSA, View Layers και Visibility).....</u>	<u>68</u>
<u>Σχήμα 5.10. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 1 (Cell Radius = 0.193 m, Cell Density = 0.281 m).....</u>	<u>71</u>
<u>Σχήμα 5.11. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 2 (Cell Radius = 0.184 m, Cell Density = 0.213 m).....</u>	<u>71</u>

Κατάλογος Πινάκων

<u>Πίνακας 3.1. Συγκριτική αξιολόγηση αντιπροσωπευτικών ερευνητικών μελετών στον τομέα του φυσικού φωτισμού και των συστημάτων σκίασης.....</u>	<u>39</u>
<u>Πίνακας 4.1. Όρια μεταβολής των παραμετρικών μεταβλητών του συστήματος διάτρητης σκίασης.....</u>	<u>42</u>
<u>Πίνακας 4.2. Μέγιστη τιμή DGP (DGPmax) για τις τέσσερις ακραίες διαμορφώσεις του χώρου σχεδιασμού σε σχέση με το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης (DGP = 0.45).....</u>	<u>47</u>
<u>Πίνακας 4.3. Μεταβλητές, εύρη τιμών και βάρη της συνάρτησης καταλληλότητας (Fitness Function).....</u>	<u>51</u>
<u>Πίνακας 4.4. Σύγκριση των διατάξεων #3 και #4 για τη διερεύνηση της ανεξαρτησίας των παραμέτρων σχεδιασμού.....</u>	<u>53</u>
<u>Πίνακας 5.1. Δείκτες επίδοσης της περίπτωσης αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης.....</u>	<u>56</u>
<u>Πίνακας 5.2. Τιμές των δεικτών απόδοσης για την περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης (21 Μαρτίου, 13:00).....</u>	<u>57</u>
<u>Πίνακας 5.3. Μεταβλητές σχεδιασμού και δείκτες επίδοσης των δύο βέλτιστων λύσεων.....</u>	<u>59</u>
<u>Πίνακας 5.4. Σύγκριση των δεικτών απόδοσης μεταξύ της περίπτωσης αναφοράς και της βέλτιστης λύσης.....</u>	<u>65</u>

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

EN 17037	European Standard for Daylight in Buildings
DGP	Daylight Glare Probability
sDA	Spatial Daylight Autonomy
ASE	Annual Sunlight Exposure
UDI	Useful Daylight Illuminance
DF	Daylight Factor
CEN	European Committee for Standardization
IES	Illuminating Engineering Society
GA	Genetic Algorithm
HSA	Horizontal Sight Angle
FOV	Field of View
HDR	High Dynamic Range
EPW	EnergyPlus Weather File

Εισαγωγή

Ο φυσικός φωτισμός αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων. Η επαρκής αξιοποίησή του συμβάλλει στη βελτίωση της οπτικής άνεσης, της ευεξίας και της παραγωγικότητας των χρηστών, ενώ παράλληλα μειώνει την ανάγκη χρήσης τεχνητού φωτισμού. Επιπλέον, η δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον έχει συνδεθεί με θετικές ψυχολογικές και φυσιολογικές επιδράσεις, καθιστώντας τον φυσικό φωτισμό βασική παράμετρο του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού κτιρίων.

Παρά τα σημαντικά οφέλη του, η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού συνοδεύεται από προκλήσεις που σχετίζονται με την ανεξέλεγκτη είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους. Η υπερβολική έκθεση στο ηλιακό φως μπορεί να προκαλέσει συνθήκες θάμβωσης, να μειώσει την οπτική άνεση και να επηρεάσει αρνητικά την εμπειρία των χρηστών. Παράλληλα, η προσπάθεια περιορισμού της θάμβωσης μέσω συστημάτων σκίασης συχνά οδηγεί σε μείωση του φυσικού φωτισμού ή σε υποβάθμιση της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Επομένως, ο σχεδιασμός κτιρίων με υψηλή πρόσβαση σε φυσικό φως απαιτεί την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ επάρκειας φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση και διατήρησης ποιοτικής θέας.

Η ανάγκη αντιμετώπισης αυτών των συχνά αντικρουόμενων απαιτήσεων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων σκίασης και στην αξιοποίηση υπολογιστικών εργαλείων παραμετρικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης. Παράλληλα, η εφαρμογή σύγχρονων προτύπων αξιολόγησης, όπως το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037, επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη και ανθρωποκεντρική προσέγγιση του φυσικού φωτισμού, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την επάρκεια φωτός αλλά και την ποιότητα θέας και την προστασία από τη θάμβωση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα ανάπτυξης και βελτιστοποίησης ενός παραμετρικού συστήματος εξωτερικής σκίασης με κυκλικά ανοίγματα για χώρο γραφείου νότιου προσανατολισμού. Μέσω της αξιοποίησης εργαλείων παραμετρικού σχεδιασμού, προσομοιώσεων φυσικού φωτισμού, αξιολόγησης της οπτικής άνεσης και εξελικτικής βελτιστοποίησης, διερευνάται η δυνατότητα επίτευξης ισορροπίας μεταξύ φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και προστασίας από τη θάμβωση. Η έρευνα εντάσσεται στο πλαίσιο της

σύγχρονης προσπάθειας ανάπτυξης πιο αποδοτικών και ανθρωποκεντρικών συστημάτων σκίασης, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία ποιοτικότερων εσωτερικών περιβαλλόντων και να υποστηρίξουν τη λήψη τεκμηριωμένων σχεδιαστικών αποφάσεων κατά τα πρώτα στάδια του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της έρευνας. Αναλύεται η σημασία του φυσικού φωτισμού, της οπτικής άνεσης και της ποιότητας θέας στον σχεδιασμό σύγχρονων κτιρίων, παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037, διατυπώνεται το ερευνητικό πρόβλημα και τεκμηριώνεται η ανάγκη ανάπτυξης πιο αποδοτικών συστημάτων σκίασης. Παράλληλα, προσδιορίζονται ο σκοπός και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης. Παρουσιάζονται οι βασικοί δείκτες αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού, καθώς και οι μέθοδοι αξιολόγησης της ποιότητας θέας και της οπτικής θάμβωσης. Επιπλέον, αναλύονται οι απαιτήσεις του προτύπου EN 17037, εξετάζονται οι κατηγορίες συστημάτων σκίασης και παρουσιάζονται τα εργαλεία παραμετρικού σχεδιασμού, προσομοίωσης και εξελικτικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στη μελέτη.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τον φυσικό φωτισμό, την οπτική θάμβωση, την ποιότητα θέας, τα δυναμικά συστήματα σκίασης και τις εφαρμογές της παραμετρικής βελτιστοποίησης στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Μέσα από τη συγκριτική αξιολόγηση των προηγούμενων ερευνών αναδεικνύονται τα υφιστάμενα ερευνητικά κενά (gap analysis) και τεκμηριώνεται η αναγκαιότητα της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας. Περιγράφονται το κτίριο αναφοράς και το παραμετρικό σύστημα διάτρητης σκίασης, οι μεταβλητές σχεδιασμού και οι δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης, καθώς και η διαδικασία αξιολόγησης της οπτικής θάμβωσης. Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία βελτιστοποίησης, η διαμόρφωση της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function) και η εφαρμογή του εξελικτικού αλγορίθμου Galapagos για την παραμετρική βελτιστοποίηση του συστήματος σκίασης και την αναζήτηση των βέλτιστων γεωμετρικών λύσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της έρευνας. Αρχικά αξιολογείται η περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης και στη συνέχεια εξετάζεται η πορεία και η σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν, αναλύεται η απόδοσή τους ως προς τον φυσικό φωτισμό, την ποιότητα θέας και την οπτική θάμβωση, συγκρίνονται με την περίπτωση αναφοράς και τεκμηριώνεται η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρικής λύσης, καθώς και η αξιοπιστία της εξελικτικής διαδικασίας μέσω της ανάλυσης της σύγκλισης και της ισοδυναμίας των κορυφαίων λύσεων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα και τη διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, αναδεικνύεται η πρωτοτυπία και η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη της παραμετρικής βελτιστοποίησης συστημάτων σκίασης.

Μέσα από την εφαρμογή παραμετρικού σχεδιασμού, προσομοιώσεων και εξελικτικής βελτιστοποίησης, η εργασία διερευνά κατά πόσο είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός συστήματος εξωτερικής σκίασης που να επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και προστασίας από τη θάμβωση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037.

1. Θεωρητικό πλαίσιο

1.1 Γενικό πλαίσιο: φυσικός φωτισμός, οπτική άνεση και ποιότητα θέας στα σύγχρονα κτίρια

Ο φυσικός φωτισμός αποτελεί βασικό παράγοντα της ποιότητας των εσωτερικών χώρων και επηρεάζει άμεσα την άνεση, την ευεξία και την παραγωγικότητα των χρηστών. Η επαρκής είσοδος φυσικού φωτός συμβάλλει στη δημιουργία ευχάριστων και λειτουργικών χώρων, ενώ παράλληλα μειώνει την ανάγκη χρήσης τεχνητού φωτισμού. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι χρήστες προτιμούν χώρους με υψηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού και αξιολογούν θετικότερα τους χώρους που προσφέρουν επαρκή πρόσβαση στο φως της ημέρας (Day et al., 2019).

Η ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα του φωτός, αλλά και από τη δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον. Η θέα προς το εξωτερικό προσφέρει οπτική ποικιλία, συμβάλλει στη μείωση του στρες και ενισχύει τη συνολική ικανοποίηση των χρηστών από τον χώρο. Για τον λόγο αυτό, η θέα θεωρείται σήμερα αναπόσπαστο στοιχείο της ποιότητας του φυσικού φωτισμού και του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού κτιρίων (Lee et al., 2022).

Παράλληλα, η αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για φωτισμό. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα υπερθέρμανσης και δυσμενείς συνθήκες για τους χρήστες, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη σωστή διαχείριση του φωτός μέσω κατάλληλων σχεδιαστικών στρατηγικών (Choi et al., 2017; Freewan, 2014).

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που σχετίζονται με τον φυσικό φωτισμό είναι η θάμβωση. Η άμεση έκθεση στον ήλιο ή οι μεγάλες αντιθέσεις φωτεινότητας μέσα στο οπτικό πεδίο μπορούν να προκαλέσουν οπτική δυσφορία, να μειώσουν την ορατότητα και να επηρεάσουν αρνητικά την εμπειρία των χρηστών (Goovaerts et al., 2017). Για την αξιολόγηση της θάμβωσης χρησιμοποιούνται δείκτες όπως ο Daylight Glare Probability (DGP), οι οποίοι επιτρέπουν την ποσοτική εκτίμηση της οπτικής άνεσης και υποστηρίζουν τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών σκίασης (Wienold & Christoffersen, 2006).

Η διαχείριση του φυσικού φωτισμού αποτελεί σύνθετη σχεδιαστική πρόκληση, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη εξισορρόπηση επαρκούς φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση

και διατήρησης ποιοτικής θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οι απαιτήσεις αυτές συχνά λειτουργούν ανταγωνιστικά, καθιστώντας δύσκολη την επίτευξη μιας ισορροπημένης λύσης μέσω συμβατικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων.

Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για προσαρμοζόμενα και παραμετρικά συστήματα σκίασης, τα οποία μπορούν να ανταποκρίνονται αποτελεσματικότερα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού και να συμβάλλουν στη βελτίωση της οπτικής άνεσης και της ποιότητας θέας (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Zhang et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, ο φυσικός φωτισμός δεν αντιμετωπίζεται πλέον μόνο ως τεχνικό ή ενεργειακό ζήτημα, αλλά ως βασική παράμετρος που επηρεάζει άμεσα την εμπειρία των χρηστών και την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η ανάγκη συνδυασμού φυσικού φωτισμού, οπτικής άνεσης και ποιοτικής θέας αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στον σχεδιασμό σύγχρονων κτιρίων και συστημάτων σκίασης.

1.2 Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037: Από τον Daylight Factor στις κλιματικά βασισμένες προσεγγίσεις φυσικού φωτισμού

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037:2018 αποτελεί το πρώτο ολοκληρωμένο ευρωπαϊκό πλαίσιο που αφορά αποκλειστικά τον φυσικό φωτισμό στα κτίρια. Η εισαγωγή του σηματοδότησε μια σημαντική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο αξιολογείται ο φυσικός φωτισμός, καθώς αντικατέστησε τις παραδοσιακές στατικές προσεγγίσεις με πιο ρεαλιστικές μεθόδους που λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες και τη μεταβολή του φωτός κατά τη διάρκεια του έτους (CEN, 2018).

Μέχρι πρόσφατα, η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού βασιζόταν κυρίως στον συντελεστή φυσικού φωτισμού (*Daylight Factor*), ο οποίος υπολογίζεται για μια τυποποιημένη συννεφιασμένη κατάσταση ουρανού. Παρότι η μέθοδος αυτή είναι απλή και εύκολη στην εφαρμογή, δεν λαμβάνει υπόψη τη θέση του ήλιου, τις εποχικές μεταβολές και τις πραγματικές συνθήκες φωτισμού που επικρατούν κατά τη χρήση ενός κτιρίου. Αντίθετα, το EN 17037 βασίζεται σε κλιματικά δεδομένα και ετήσιες αξιολογήσεις, προσφέροντας μια πιο αξιόπιστη εικόνα της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους (CEN, 2018).

Το πρότυπο αξιολογεί τον φυσικό φωτισμό μέσα από τέσσερις βασικούς άξονες: την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον, την προστασία από τη θάμβωση και την έκθεση των εσωτερικών χώρων σε άμεσο ηλιακό φως κατά τη χειμερινή περίοδο. Η προσέγγιση αυτή αναγνωρίζει ότι η ποιότητα ενός φωτεινού περιβάλλοντος δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα του φωτός, αλλά και από την οπτική άνεση και τη σχέση των χρηστών με το εξωτερικό περιβάλλον (CEN, 2018).

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό του EN 17037 είναι ότι δεν περιορίζεται στον καθορισμό ελάχιστων απαιτήσεων, αλλά εισάγει τρία επίπεδα ποιότητας (*minimum*, *medium* και *high*). Με τον τρόπο αυτό παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία στους μελετητές, επιτρέποντας την προσαρμογή των σχεδιαστικών στόχων ανάλογα με τη χρήση του χώρου και τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε έργου (CEN, 2018).

Η μετάβαση στις κλιματικά βασισμένες προσεγγίσεις συνοδεύτηκε από την ανάπτυξη δυναμικών δεικτών αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού. Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται συχνά δείκτες όπως οι Spatial Daylight Autonomy (sDA) και Annual Sunlight Exposure (ASE), οι οποίοι αξιολογούν την επάρκεια και την κατανομή του φυσικού φωτός σε ετήσια βάση (IES, 2012; Reinhart et al., 2006). Παράλληλα, για την αξιολόγηση της θάμβωσης χρησιμοποιείται ευρέως ο δείκτης Daylight Glare Probability (DGP), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη θέση και τη φωτεινότητα των πηγών θάμβωσης στο οπτικό πεδίο του χρήστη (Wienold & Christoffersen, 2006; Wienold, 2009).

Η εφαρμογή του EN 17037 επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό των συστημάτων σκίασης. Η επίτευξη επαρκούς φυσικού φωτισμού, η διατήρηση ποιοτικής θέας και η ταυτόχρονη προστασία από τη θάμβωση αποτελούν συχνά αντικρουόμενους στόχους. Για τον λόγο αυτό, τα προσαρμοζόμενα και δυναμικά συστήματα σκίασης αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και να εξισορροπούν αποτελεσματικότερα τις απαιτήσεις αυτές σε σχέση με τις συμβατικές στατικές λύσεις (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

Συνολικά, το EN 17037 εκφράζει τη μετάβαση από μια στατική και απλουστευμένη αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού σε μια δυναμική και ανθρωποκεντρική προσέγγιση.

1.3 Η σημασία της οπτικής άνεσης και της εξωτερικής θέας (View Out): Ανάλυση της ψυχολογικής και φυσιολογικής επίδρασης στους χρήστες

Η οπτική άνεση και η δυνατότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον αποτελούν βασικές παραμέτρους της ποιότητας ενός εσωτερικού χώρου. Εκτός από την επάρκεια φυσικού φωτισμού, οι χρήστες επιθυμούν να διατηρούν οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς αυτό επηρεάζει θετικά τόσο την άνεση όσο και τη συνολική εμπειρία τους μέσα στο κτίριο. Για τον λόγο αυτό, το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037 ενσωματώνει την έννοια της εξωτερικής θέας (View Out) ως ξεχωριστό κριτήριο αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού (CEN, 2018).

Η ύπαρξη ποιοτικής θέας συμβάλλει στη μείωση της οπτικής κόπωσης, ιδιαίτερα σε χώρους γραφείων όπου οι χρήστες εργάζονται για πολλές ώρες μπροστά σε οθόνες. Η δυνατότητα εναλλαγής της εστίασης του βλέμματος από κοντινές σε μακρινές αποστάσεις βοηθά στη ξεκούραση του οπτικού συστήματος και βελτιώνει την οπτική άνεση. Παράλληλα, η σωστή διαχείριση του φυσικού φωτισμού και η αποφυγή έντονων αντιθέσεων φωτεινότητας συμβάλλουν στον περιορισμό της θάμβωσης και της οπτικής δυσφορίας (Wienold & Christoffersen, 2006; Wienold, 2009).

Πέρα από τη φυσιολογική λειτουργία της όρασης, η θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζει σημαντικά και την ψυχολογική κατάσταση των χρηστών. Η οπτική επαφή με τον ουρανό, τη βλάστηση ή το αστικό τοπίο έχει συσχετιστεί με μείωση του στρες, βελτίωση της διάθεσης και αύξηση της συγκέντρωσης. Για τον λόγο αυτό, η θέα δεν θεωρείται πλέον μόνο ένα αισθητικό χαρακτηριστικό ενός χώρου, αλλά στοιχείο που συμβάλλει ουσιαστικά στην ευεξία και την παραγωγικότητα των χρηστών (Lee et al., 2022).

Σύμφωνα με το EN 17037, η ποιότητα της θέας αξιολογείται με βάση το εύρος του ορατού πεδίου, την απόσταση θέασης και το περιεχόμενο της θέας, όπως η παρουσία φυσικών ή αστικών στοιχείων (CEN, 2018). Η προσέγγιση αυτή αναγνωρίζει ότι δεν αρκεί η ύπαρξη ενός μεγάλου ανοίγματος, αλλά απαιτείται και ουσιαστική οπτική σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον.

Συνεπώς, η οπτική άνεση και η ποιότητα της θέας αποτελούν βασικά στοιχεία του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού κτιρίων. Η ενσωμάτωσή τους στο EN 17037 αναδεικνύει τη σημασία της ταυτόχρονης αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού, της θάμβωσης και της

θέας στους εσωτερικούς χώρους. Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων αυτών αποτελεί σημαντικό ζήτημα στον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης και εξετάζεται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα.

1.4 Διατύπωση του Προβλήματος: Η εξισορρόπηση μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων κτιριακών όψεων καλείται να ικανοποιήσει ταυτόχρονα πολλαπλές και συχνά αντικρουόμενες απαιτήσεις. Η επάρκεια φυσικού φωτισμού, η ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και η προστασία από τη θάμβωση αποτελούν βασικούς στόχους του σχεδιασμού, οι οποίοι όμως δεν μπορούν πάντοτε να επιτευχθούν ταυτόχρονα. Η αλληλεπίδραση των παραμέτρων αυτών δημιουργεί ένα σύνθετο σχεδιαστικό δίλημμα (trade-off), το οποίο βρίσκεται στο επίκεντρο της σύγχρονης έρευνας για τα συστήματα σκίασης (Konstantoglou, 2013).

Η αύξηση του φυσικού φωτισμού συμβάλλει στη δημιουργία ευχάριστων και λειτουργικών εσωτερικών χώρων. Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει έντονη θάμβωση και οπτική δυσφορία, ιδιαίτερα σε χώρους γραφείων όπου οι χρήστες εργάζονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπροστά σε οθόνες (Goonaerts et al., 2017; Wienold & Christoffersen, 2006). Επομένως, η μεγιστοποίηση του φυσικού φωτισμού δεν οδηγεί απαραίτητα σε καλύτερες συνθήκες οπτικής άνεσης.

Παράλληλα, η διατήρηση ποιοτικής θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ευεξία και την ικανοποίηση των χρηστών. Ωστόσο, τα συστήματα σκίασης που εφαρμόζονται για τον περιορισμό της θάμβωσης συχνά μειώνουν την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι δημιουργείται ένα σαφές δίλημμα μεταξύ προστασίας από το φως και διατήρησης της θέας (Lee et al., 2022).

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται ακόμη περισσότερο λόγω της συνεχούς μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Οι συνθήκες φωτισμού που επικρατούν ένα χειμερινό πρωινό διαφέρουν σημαντικά από εκείνες ενός θερινού μεσημεριού. Για τον λόγο αυτό, οι στατικές λύσεις σκίασης συχνά αδυνατούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα, σύγχρονες παραμετρικές προσεγγίσεις σχεδιασμού σκίασης προσφέρουν μεγαλύτερη

ευελιξία, καθώς μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και στις ανάγκες των χρηστών (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

Το παραπάνω δίλημμα αποτυπώνεται και στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037, το οποίο απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση της επάρκειας φυσικού φωτισμού, της ποιότητας θέας, της προστασίας από τη θάμβωση και της έκθεσης σε ηλιακό φως. Η απαίτηση αυτή αναδεικνύει τη δυσκολία επίτευξης όλων των στόχων μέσω συμβατικών στατικών λύσεων και ενισχύει την ανάγκη για πιο ευέλικτες σχεδιαστικές προσεγγίσεις (CEN, 2018).

Η αποτελεσματική διαχείριση της σύγκρουσης μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας αποτελεί το βασικό ερευνητικό πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης ενός παραμετρικού συστήματος σκίασης και μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, με στόχο την επίτευξη μιας ισορροπημένης λύσης μεταξύ των παραπάνω κριτηρίων αξιολόγησης.

1.5 Υφιστάμενη κατάσταση: Περιορισμοί των στατικών συστημάτων σκίασης και ανάγκη για δυναμικές λύσεις

Τα στατικά συστήματα σκίασης αποτελούν διαχρονικά μία από τις πιο διαδεδομένες λύσεις για τον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας στα κτίρια. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται στοιχεία όπως πρόβολοι, σταθερές περσίδες, κατακόρυφα ή οριζόντια σκίαστρα και διάτρητες επιφάνειες. Η ευρεία εφαρμογή τους οφείλεται κυρίως στην απλότητα κατασκευής, στο χαμηλό κόστος και στις περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης. Ωστόσο, η σταθερή γεωμετρία τους δημιουργεί σημαντικούς περιορισμούς ως προς την προσαρμογή τους στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού.

Η βασική αδυναμία των στατικών συστημάτων είναι ότι σχεδιάζονται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιασμού, ενώ η θέση και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Ως αποτέλεσμα, ένα σκίαστρο που λειτουργεί ικανοποιητικά σε μία χρονική στιγμή μπορεί να αποδειχθεί λιγότερο αποτελεσματικό σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού (Freewan, 2014).

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός αφορά την επίδραση των στατικών συστημάτων στην ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η σταθερή γεωμετρία στοιχείων όπως οι

περσίδες ή οι πρόβολοι μπορεί να περιορίσει το οπτικό πεδίο των χρηστών και να μειώσει την οπτική σύνδεση με το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, η διατήρηση ποιοτικής θέας αποτελεί βασικό στοιχείο της οπτικής άνεσης και της συνολικής εμπειρίας των χρηστών μέσα στον χώρο (Lee et al., 2022).

Παράλληλα, τα στατικά συστήματα συχνά δυσκολεύονται να εξισορροπήσουν την επάρκεια φυσικού φωτισμού και την προστασία από τη θάμβωση. Η αύξηση της σκίασης μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τη θάμβωση, αλλά ταυτόχρονα να περιορίσει την είσοδο φυσικού φωτός και τη θέα προς το εξωτερικό. Αντίστροφα, η μείωση της σκίασης μπορεί να βελτιώσει τον φυσικό φωτισμό και τη θέα, αλλά να οδηγήσει σε συνθήκες οπτικής δυσφορίας λόγω θάμβωσης (Konstantoglou, 2013).

Η πολυπλοκότητα αυτού του προβλήματος έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη προσαρμοζόμενων συστημάτων σκίασης και παραμετρικών μεθόδων σχεδιασμού. Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν τη γεωμετρία ή τη λειτουργία τους ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση του φυσικού φωτισμού και της θάμβωσης. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι προσαρμοζόμενες όψεις μπορούν να επιτύχουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ φωτισμού, οπτικής άνεσης και ποιότητας θέας σε σχέση με τις συμβατικές στατικές λύσεις (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

Συνεπώς, οι περιορισμοί των στατικών συστημάτων σκίασης αναδεικνύουν την ανάγκη για πιο ευέλικτες σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Η διερεύνηση δυναμικών και παραμετρικά ελεγχόμενων συστημάτων σκίασης αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του φυσικού φωτισμού, της θάμβωσης και της ποιότητας θέας, που αποτελούν και τα βασικά αντικείμενα της παρούσας εργασίας.

1.6 Σκοπός και ερευνητικά ερωτήματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός παραμετρικού συστήματος εξωτερικής σκίασης με κυκλικά ανοίγματα, το οποίο επιδιώκει να εξισορροπήσει την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την ποιότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και την προστασία από τη θάμβωση σε χώρο γραφείου νότιου προσανατολισμού.

Η εργασία βασίζεται στις αρχές του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037 και διερευνά κατά πόσο η παραμετρική διαμόρφωση της γεωμετρίας ενός συστήματος σκίασης μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της οπτικής ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή αντιμετωπίζει το σύστημα σκίασης ως παραμετρικό σχεδιαστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να προσαρμόζεται μέσω ελεγχόμενων γεωμετρικών μεταβολών ώστε να ανταποκρίνεται αποτελεσματικότερα στις απαιτήσεις φυσικού φωτισμού, θέας και οπτικής άνεσης.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού αναπτύχθηκε παραμετρικό μοντέλο στο περιβάλλον Grasshopper, ενώ η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση των εργαλείων Ladybug Tools και του εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης Galapagos. Η διαδικασία βασίστηκε στη μεταβολή δύο κύριων παραμέτρων σχεδιασμού, της ακτίνας των ανοιγμάτων (*Cell Radius*) και της πυκνότητας των ανοιγμάτων (*Cell Density*), οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του συστήματος σκίασης.

Στο πλαίσιο αυτό διατυπώνονται τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Πώς επηρεάζουν η ακτίνα και η πυκνότητα των ανοιγμάτων την απόδοση του συστήματος σκίασης ως προς τον φυσικό φωτισμό, τη θάμβωση και την ποιότητα θέας;
2. Είναι δυνατόν να μειωθεί αποτελεσματικά η θάμβωση χωρίς σημαντική υποβάθμιση του φυσικού φωτισμού και της ποιότητας θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον;
3. Ποιες γεωμετρικές διαμορφώσεις του σκιάστρου οδηγούν στη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ των επιλεγμένων κριτηρίων αξιολόγησης;
4. Μπορεί η παραμετρική βελτιστοποίηση να υποστηρίξει αποτελεσματικά τον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του EN 17037 για φυσικό φωτισμό, θέα και οπτική άνεση;

Η διερεύνηση των παραπάνω ερωτημάτων αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ γεωμετρίας σκίασης και οπτικής απόδοσης, καθώς και στην αξιολόγηση της συμβολής των παραμετρικών εργαλείων και των μεθόδων βελτιστοποίησης στον σχεδιασμό σύγχρονων συστημάτων σκίασης. Μέσα από τη διαδικασία αυτή επιδιώκεται η διαμόρφωση ενός πλαισίου σχεδιασμού που να επιτρέπει την ισορροπημένη αντιμετώπιση του σύνθετου trade-off μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Φυσικός Φωτισμός και Δείκτες Αξιολόγησης

Η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού αποτελεί βασικό αντικείμενο της κτιριακής φυσικής και του φωτιστικού σχεδιασμού. Για την αντικειμενική αποτίμηση της απόδοσης ενός χώρου χρησιμοποιούνται ειδικοί δείκτες αξιολόγησης (daylight metrics), οι οποίοι επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της διαθεσιμότητας και της κατανομής του φυσικού φωτός στο εσωτερικό των κτιρίων.

Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται τόσο στην έρευνα όσο και στην επαγγελματική πρακτική, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων και αξιολόγησης της συμμόρφωσής τους με πρότυπα και κανονισμούς. Ανάλογα με τη μεθοδολογία υπολογισμού τους, διακρίνονται σε στατικούς και δυναμικούς δείκτες.

Οι στατικοί δείκτες βασίζονται σε συγκεκριμένες συνθήκες ουρανού και εξετάζουν την απόδοση του χώρου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Αντίθετα, οι δυναμικοί ή κλιματικά βασισμένοι δείκτες αξιοποιούν ετήσια κλιματικά δεδομένα και αποτυπώνουν τη μεταβολή του φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια του έτους, προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική εικόνα των πραγματικών συνθηκών χρήσης του χώρου (Reinhart et al., 2006; IES, 2012).

Η μετάβαση από τις στατικές στις κλιματικά βασισμένες μεθόδους αξιολόγησης αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα του daylighting και συνδέεται άμεσα με τη φιλοσοφία του προτύπου EN 17037, το οποίο βασίζεται σε δυναμικές προσεγγίσεις αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού (CEN, 2018).

2.1.1 Στατικοί και δυναμικοί δείκτες αξιολόγησης φυσικού φωτισμού

Η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού βασίζεται σε δείκτες οι οποίοι επιτρέπουν την ποσοτική αποτίμηση της απόδοσης ενός χώρου ως προς τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του φυσικού φωτός. Οι δείκτες αυτοί αποτελούν βασικό εργαλείο τόσο για την έρευνα όσο και για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, καθώς επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων και την αξιολόγησή τους με αντικειμενικά κριτήρια.

Παραδοσιακά, η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού βασιζόταν σε στατικούς δείκτες, με κυριότερο τον Συντελεστή Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor – DF). Ο δείκτης αυτός

υπολογίζεται για τυποποιημένες συνθήκες συνεφιασμένου ουρανού και εκφράζει τη σχέση μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής φωτεινότητας. Παρότι χρησιμοποιήθηκε ευρέως για πολλές δεκαετίες, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τη θέση του ήλιου, τον προσανατολισμό του κτιρίου, τις εποχικές μεταβολές και τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες (Reinhart et al., 2006).

Η ανάγκη για πιο ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών φωτισμού οδήγησε στην ανάπτυξη δυναμικών ή κλιματικά βασισμένων δεικτών (climate-based daylight metrics), οι οποίοι αξιοποιούν πραγματικά μετεωρολογικά δεδομένα και ετήσιες προσομοιώσεις. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του φυσικού φωτισμού σε βάθος χρόνου και αποτελούν τη βάση των σύγχρονων προσεγγίσεων daylighting (IES, 2012; CEN, 2018).

Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται ευρέως δείκτες όπως ο Spatial Daylight Autonomy (sDA), ο Useful Daylight Illuminance (UDI) και ο Annual Sunlight Exposure (ASE), οι οποίοι αξιολογούν διαφορετικές πτυχές της επάρκειας και της κατανομής του φυσικού φωτισμού (IES, 2012; Nabil & Mardaljevic, 2005). Παράλληλα, για την αξιολόγηση της οπτικής άνεσης και της πιθανότητας εμφάνισης θάμβωσης χρησιμοποιείται ο δείκτης Daylight Glare Probability (DGP), ο οποίος θεωρείται σήμερα ένας από τους πιο αξιόπιστους δείκτες πρόβλεψης οπτικής δυσφορίας από φυσικό φως (Wienold & Christoffersen, 2006; Wienold, 2009).

Η μετάβαση από τους στατικούς στους δυναμικούς δείκτες αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον τομέα του φυσικού φωτισμού και συνδέεται άμεσα με τη φιλοσοφία του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037, το οποίο βασίζεται σε κλιματικά δεδομένα και ανθρωποκεντρικές μεθόδους αξιολόγησης (CEN, 2018).

2.1.2 Μη οπτικές επιδράσεις του φωτός: Κιρκάδιος ρυθμός και melanopic φωτισμός

Πέρα από τις οπτικές του λειτουργίες, το φυσικό φως επηρεάζει και σημαντικές βιολογικές διεργασίες του ανθρώπινου οργανισμού. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει αναδείξει τον ρόλο του φωτός στη ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού, δηλαδή του εσωτερικού βιολογικού μηχανισμού που ελέγχει τον κύκλο ύπνου–εγρήγορσης και επηρεάζει λειτουργίες όπως η

εγρήγορση, η διάθεση, η συγκέντρωση και η συνολική ευεξία των χρηστών (Lockley, 2009; Knoorp et al., 2019).

Η έκθεση σε επαρκή επίπεδα φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας έχει συσχετιστεί με θετικές επιδράσεις στη σωματική και ψυχική υγεία, ενώ η ανεπαρκής ή ακατάλληλα χρονισμένη έκθεση στο φως μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργία του κιρκάδιου συστήματος. Για τον λόγο αυτό, οι μη οπτικές επιδράσεις του φωτός αποτελούν σήμερα σημαντικό πεδίο έρευνας στον ανθρωποκεντρικό σχεδιασμό κτιρίων και εσωτερικών χώρων (Wright et al., 2020).

Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί η έννοια του melanopic φωτισμού (melanopic illuminance), η οποία σχετίζεται με τη βιολογική απόκριση του οργανισμού στο φως. Ο melanopic φωτισμός βασίζεται στη διέγερση ειδικών φωτοευαίσθητων κυττάρων του αμφιβληστροειδούς, τα οποία συμμετέχουν στη ρύθμιση του κιρκάδιου ρυθμού και άλλων μη οπτικών αποκρίσεων του ανθρώπινου οργανισμού (CIE, 2018).

Η σημασία του melanopic φωτισμού έχει αναγνωριστεί διεθνώς μέσω του προτύπου CIE S 026:2018, το οποίο εισάγει μεθόδους και μετρικές για την αξιολόγηση των μη οπτικών επιδράσεων του φωτός στον άνθρωπο (CIE, 2018).

Συνεπώς, η σύγχρονη προσέγγιση του φυσικού φωτισμού δεν περιορίζεται μόνο στην επάρκεια φωτισμού, στην ποιότητα θέας και στην προστασία από τη θάμβωση, αλλά επεκτείνεται και στις ευρύτερες επιδράσεις του φωτός στην υγεία και την ευεξία των χρηστών. Η διάσταση αυτή ενισχύει ακόμη περισσότερο τη σημασία του φυσικού φωτισμού ως βασικού στοιχείου του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού των κτιρίων.

2.2 Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037 – Αναλυτική Προσέγγιση

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 17037:2018 αποτελεί το βασικό κανονιστικό πλαίσιο για την αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού στα κτίρια και εισάγει μια ολοκληρωμένη, κλιματικά βασισμένη προσέγγιση στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των εσωτερικών χώρων (CEN, 2018). Σε αντίθεση με παλαιότερες προσεγγίσεις που επικεντρώνονταν κυρίως στην ποσότητα του φυσικού φωτισμού, το EN 17037 αντιμετωπίζει τον φυσικό φωτισμό ως μια πολυδιάστατη παράμετρο που επηρεάζει την οπτική άνεση, την ποιότητα θέας και τη συνολική εμπειρία των χρηστών.

Η δομή του προτύπου οργανώνεται σε τέσσερις βασικούς άξονες αξιολόγησης:

- Daylight Provision (επάρκεια φυσικού φωτισμού)
- View Out (ποιότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον)
- Protection from Glare (προστασία από τη θάμβωση)
- Exposure to Sunlight (έκθεση σε άμεσο ηλιακό φως)

Οι τέσσερις αυτοί άξονες δεν εξετάζονται ανεξάρτητα, αλλά ως αλληλένδετα κριτήρια που επηρεάζουν συνολικά την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Στην πράξη, η βελτίωση μιας παραμέτρου μπορεί να οδηγήσει στην υποβάθμιση κάποιας άλλης, δημιουργώντας ένα σύνθετο σχεδιαστικό πρόβλημα εξισορρόπησης μεταξύ φυσικού φωτισμού, θέας, ηλιασμού και προστασίας από τη θάμβωση (CEN, 2018).

Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες του προτύπου είναι η ενσωμάτωση της ποιότητας θέας (View Out) ως ανεξάρτητου κριτηρίου αξιολόγησης. Για πρώτη φορά σε ευρωπαϊκό πρότυπο, η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον αναγνωρίζεται ως βασικός παράγοντας ψυχολογικής άνεσης και ευεξίας των χρηστών, ενισχύοντας τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα του σχεδιασμού (Lee et al., 2022).

Επιπλέον, το EN 17037 δεν περιορίζεται στον καθορισμό ελάχιστων απαιτήσεων, αλλά εισάγει τρία επίπεδα απόδοσης (minimum, medium και high), επιτρέποντας την προσαρμογή των σχεδιαστικών στόχων ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και τις απαιτήσεις κάθε έργου (CEN, 2018).

Η εφαρμογή του προτύπου βασίζεται σε ετήσιες και κλιματικά βασισμένες προσεγγίσεις αξιολόγησης, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή των συνθηκών φωτισμού κατά τη διάρκεια του έτους. Η φιλοσοφία αυτή είναι συμβατή με τη χρήση σύγχρονων δυναμικών δεικτών φυσικού φωτισμού και οπτικής άνεσης, οι οποίοι επιτρέπουν μια πιο ρεαλιστική αποτύπωση της εμπειρίας των χρηστών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (IES, 2012; Reinhart et al., 2006).

Για τον λόγο αυτό, το EN 17037 αποτελεί σήμερα βασικό εργαλείο αναφοράς για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση συστημάτων σκίασης. Η εφαρμογή του δεν στοχεύει απλώς στη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση ενός μεμονωμένου δείκτη, αλλά στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ επαρκούς φυσικού φωτισμού, οπτικής άνεσης, ποιοτικής θέας και πρόσβασης στο ηλιακό φως. (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

2.2.1 Επαρκής φυσικός φωτισμός (Daylight Provision) και sDA

Ο άξονας Daylight Provision αφορά την επάρκεια φυσικού φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους κατά τη διάρκεια του έτους, με στόχο την κάλυψη των οπτικών αναγκών των χρηστών και τη μείωση της εξάρτησης από τον τεχνητό φωτισμό. Σύμφωνα με το EN 17037, η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού βασίζεται σε κλιματικά δεδομένα και ετήσιες προσομοιώσεις, ώστε να αποτυπώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι πραγματικές συνθήκες φωτισμού που επικρατούν σε έναν χώρο (CEN, 2018).

Η προσέγγιση αυτή διαφοροποιείται από παλαιότερες στατικές μεθόδους, όπως ο Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor), ο οποίος αξιολογεί τον φωτισμό σε μία μόνο τυποποιημένη συνθήκη ουρανού. Αντίθετα, οι σύγχρονες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τη μεταβολή της θέσης του ήλιου, τις εποχικές αλλαγές και τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης ενός χώρου σε βάθος χρόνου (Reinhart et al., 2006).

Στο πλαίσιο αυτό, στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται ευρέως δυναμικοί δείκτες όπως ο Spatial Daylight Autonomy (sDA). Ο δείκτης αυτός εκφράζει το ποσοστό της επιφάνειας ενός χώρου που επιτυγχάνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο φωτισμού για ένα ελάχιστο ποσοστό των ετήσιων ωρών χρήσης, παρέχοντας μια αντιπροσωπευτική εικόνα της λειτουργικής επάρκειας του φυσικού φωτισμού (IES, 2012). Παρότι ο sDA δεν αποτελεί επίσημη μετρική του EN 17037, χρησιμοποιείται συχνά σε ερευνητικές εφαρμογές και συγκριτικές αξιολογήσεις λόγω της συμβατότητάς του με τη φιλοσοφία των κλιματικά βασισμένων προσεγγίσεων.

Η επίτευξη υψηλής απόδοσης ως προς το daylight provision επηρεάζεται από παράγοντες όπως το μέγεθος και η γεωμετρία των ανοιγμάτων, ο προσανατολισμός του κτιρίου, η πρόσβαση στον ουρανό, οι ανακλαστικές ιδιότητες των εσωτερικών επιφανειών και ο σχεδιασμός των συστημάτων σκίασης. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η σωστή διαχείριση των παραμέτρων αυτών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη διείσδυση και την κατανομή του φυσικού φωτός στο εσωτερικό του χώρου (Wright & Farmani, 2001).

Ωστόσο, η μεγιστοποίηση του φυσικού φωτισμού δεν οδηγεί πάντοτε σε βέλτιστο σχεδιασμό. Η υπερβολική είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα θάμβωσης και να επηρεάσει αρνητικά την οπτική άνεση των χρηστών. Για τον λόγο αυτό,

το EN 17037 αντιμετωπίζει το Daylight Provision ως μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου αξιολόγησης που περιλαμβάνει την ποιότητα θέας, την προστασία από τη θάμβωση και την έκθεση σε άμεσο ηλιακό φως (CEN, 2018).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αξιολόγηση της επάρκειας φυσικού φωτισμού αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους διερεύνησης του παραμετρικού συστήματος σκίασης, καθώς συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα επίτευξης ισορροπίας μεταξύ φυσικού φωτισμού, οπτικής άνεσης και ποιότητας θέας.

2.2.2 Ποιότητα θέας (View Out): κριτήρια βάθους και εύρους

Η ποιότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον (View Out) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037. Για πρώτη φορά, η θέα δεν αντιμετωπίζεται ως ένα δευτερεύον ή αποκλειστικά αισθητικό χαρακτηριστικό του κτιρίου, αλλά ως βασική παράμετρος της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και της ευεξίας των χρηστών (CEN, 2018).

Η σύγχρονη έρευνα έχει δείξει ότι η δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον συνδέεται με αυξημένη ικανοποίηση των χρηστών, μειωμένα επίπεδα στρες και βελτιωμένη γνωστική απόδοση, ιδιαίτερα σε χώρους παρατεταμένης παραμονής, όπως τα γραφεία και οι εκπαιδευτικοί χώροι (Lee et al., 2022). Για τον λόγο αυτό, το EN 17037 ενσωματώνει συγκεκριμένα κριτήρια αξιολόγησης της θέας, τα οποία επιτρέπουν μια πιο αντικειμενική εκτίμηση της ποιότητάς της.

Ένα από τα βασικότερα κριτήρια είναι το βάθος θέας (view distance), δηλαδή η δυνατότητα του χρήστη να παρατηρεί αντικείμενα και στοιχεία του περιβάλλοντος σε διαφορετικές αποστάσεις. Η ύπαρξη επαρκούς βάθους θέας συμβάλλει στην καλύτερη αντίληψη του εξωτερικού χώρου και ενισχύει την αίσθηση σύνδεσης με το περιβάλλον (CEN, 2018).

Εξίσου σημαντικό είναι το εύρος θέας (view width), το οποίο σχετίζεται με το οριζόντιο άνοιγμα του οπτικού πεδίου προς το εξωτερικό. Ένα μεγαλύτερο εύρος θέας επιτρέπει ευρύτερη οπτική αντίληψη του περιβάλλοντος και συμβάλλει στη δημιουργία μιας πιο ανοιχτής και ευχάριστης χωρικής εμπειρίας (CEN, 2018).

Πέρα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, το πρότυπο αναγνωρίζει και τη σημασία του περιεχομένου της θέας. Η παρουσία φυσικών στοιχείων, όπως ο ουρανός, η βλάστηση ή το τοπίο, καθώς και η οπτική ποικιλία του περιβάλλοντος, μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την ψυχολογική άνεση και τη συνολική εμπειρία των χρηστών (Lee et al., 2022).

Η διατήρηση ποιοτικής θέας αποτελεί συχνά πρόκληση κατά τον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης. Πολλές συμβατικές λύσεις περιορίζουν αποτελεσματικά την ηλιακή ακτινοβολία και τη θάμβωση, αλλά ταυτόχρονα μειώνουν το οπτικό πεδίο προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, η βελτίωση της οπτικής άνεσης μπορεί να συνοδεύεται από υποβάθμιση της ποιότητας θέας, δημιουργώντας ένα χαρακτηριστικό σχεδιαστικό trade-off (Lee et al., 2022).

Για τον λόγο αυτό, τα δυναμικά και παραμετρικά συστήματα σκίασης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς μπορούν να προσαρμόζουν τη γεωμετρία τους ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού, επιτρέποντας ταυτόχρονα τον έλεγχο της θάμβωσης και τη διατήρηση ικανοποιητικής οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Tzempelikos & Athienitis, 2007). Η παράμετρος του View Out αποτελεί επομένως βασικό κριτήριο αξιολόγησης στην παρούσα εργασία, καθώς συνδέεται άμεσα με τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου συστήματος σκίασης.

2.2.3 Προστασία από Θάμβωση (Glare – DGP): όρια και κατηγοριοποίηση

Η προστασία από τη θάμβωση αποτελεί έναν από τους τέσσερις βασικούς άξονες αξιολόγησης του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037, καθώς συνδέεται άμεσα με την οπτική άνεση και τη λειτουργικότητα των εσωτερικών χώρων (CEN, 2018). Η θάμβωση εμφανίζεται όταν στο οπτικό πεδίο του χρήστη υπάρχουν περιοχές υπερβολικής φωτεινότητας ή έντονες αντιθέσεις φωτισμού, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν οπτική δυσφορία, μείωση της ορατότητας και δυσκολία στην εκτέλεση εργασιών που απαιτούν συγκέντρωση.

Η αξιολόγηση της θάμβωσης έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία χρόνια και στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ευρέως ο δείκτης Daylight Glare Probability (DGP), ο οποίος εκτιμά την πιθανότητα εμφάνισης οπτικής δυσφορίας λόγω φυσικού φωτισμού (Wienold & Christoffersen, 2006). Ο δείκτης βασίζεται στην

κατακόρυφη φωτεινότητα στο επίπεδο του ματιού του χρήστη και στη χωρική κατανομή των φωτεινών πηγών μέσα στο οπτικό πεδίο, αποτυπώνοντας με πιο ρεαλιστικό τρόπο την πραγματική εμπειρία των χρηστών σε σχέση με απλούστερες μεθόδους αξιολόγησης.

Στη διεθνή πρακτική, ο DGP συνδέεται με συγκεκριμένες κατηγορίες οπτικής δυσφορίας, επιτρέποντας την ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τρόπο κατανοητό και λειτουργικό. Ενδεικτικά, τιμές μικρότερες από 0,35 θεωρούνται συνήθως μη αντιληπτές, τιμές μεταξύ 0,35 και 0,40 αντιστοιχούν σε αντιληπτή θάμβωση, τιμές μεταξύ 0,40 και 0,45 σε ενοχλητική θάμβωση, ενώ τιμές μεγαλύτερες από 0,45 θεωρούνται γενικά μη αποδεκτές για χώρους καθημερινής χρήσης (Wienold, 2009).

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση της θάμβωσης αποτελεί σύνθετο σχεδιαστικό πρόβλημα, καθώς η μείωσή της συχνά επηρεάζει άλλες παραμέτρους του φυσικού φωτισμού. Η υπερβολική σκίαση μπορεί να περιορίσει τη θάμβωση, αλλά ταυτόχρονα να μειώσει την επάρκεια φυσικού φωτισμού και την ποιότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα, η μεγιστοποίηση της εισόδου φυσικού φωτός μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης οπτικής δυσφορίας. Η θάμβωση αποτελεί επομένως μέρος ενός ευρύτερου σχεδιαστικού trade-off μεταξύ daylight provision, view out και visual comfort (Goonaerts et al., 2017).

Οι δυσκολίες αυτές γίνονται ακόμη πιο έντονες στα στατικά συστήματα σκίασης, τα οποία αδυνατούν να ανταποκριθούν στις συνεχείς μεταβολές της ηλιακής θέσης κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Αντίθετα, τα δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης μπορούν να μεταβάλλουν τη γεωμετρία ή τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού, περιορίζοντας τη θάμβωση χωρίς να αποκλείουν πλήρως την είσοδο φυσικού φωτός ή την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Elzeyadi, 2017).

Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της θάμβωσης μέσω του δείκτη DGP αποτελεί βασικό στοιχείο της παρούσας εργασίας, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου παραμετρικού συστήματος σκίασης ως προς την επίτευξη συνθηκών οπτικής άνεσης στους χώρους γραφείων.

2.2.4 Έκθεση σε άμεσο ηλιακό φως (Sunlight Exposure)

Η έκθεση των εσωτερικών χώρων σε άμεσο ηλιακό φως αποτελεί τον τέταρτο άξονα αξιολόγησης του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037. Η συγκεκριμένη παράμετρος διαφοροποιεί σημαντικά το πρότυπο από παλαιότερες προσεγγίσεις, καθώς αναγνωρίζει ότι η παρουσία του άμεσου ηλιακού φωτός δεν αποτελεί αποκλειστικά πηγή προβλημάτων, αλλά μπορεί να συμβάλει θετικά στην ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος και στην εμπειρία των χρηστών (CEN, 2018).

Για τον λόγο αυτό, το EN 17037 δεν επιδιώκει ούτε τη μέγιστη δυνατή έκθεση στον ήλιο ούτε την πλήρη αποκοπή του, αλλά την επίτευξη μιας ισορροπημένης σχέσης μεταξύ πρόσβασης στο ηλιακό φως και προστασίας από τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις του. Στο πλαίσιο αυτό, το πρότυπο καθορίζει ελάχιστες απαιτήσεις έκθεσης σε άμεσο ηλιακό φως κατά τη χειμερινή περίοδο, αναγνωρίζοντας τη συμβολή του στην ποιότητα του εσωτερικού χώρου και στη σύνδεση των χρηστών με το εξωτερικό περιβάλλον (CEN, 2018).

Η παρουσία άμεσου ηλιακού φωτός μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως αυξημένη αίσθηση φωτεινότητας, ενίσχυση της χωρικής αντίληψης και βελτίωση της συνολικής εμπειρίας των χρηστών. Παράλληλα, η έκθεση στο φυσικό φως συνδέεται με θετικές ψυχολογικές και βιολογικές επιδράσεις, οι οποίες έχουν αναδειχθεί από τη σύγχρονη έρευνα στον τομέα του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού (Lockley, 2009; Wright et al., 2020).

Ωστόσο, η ανεξέλεγκτη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, όπως αυξημένη πιθανότητα θάμβωσης, υπερβολικές φωτεινότητες στο οπτικό πεδίο και συνθήκες οπτικής δυσφορίας για τους χρήστες (Goonaerts et al., 2017). Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της έκθεσης σε άμεσο ηλιακό φως πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους άξονες του προτύπου, ιδιαίτερα με την προστασία από τη θάμβωση και την επάρκεια φυσικού φωτισμού.

Η διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί βασική λειτουργία των συστημάτων σκίασης. Στατικά συστήματα συχνά αδυνατούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικά στις μεταβολές της ηλιακής θέσης κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, με αποτέλεσμα είτε την υπερβολική σκίαση είτε την ανεπαρκή προστασία από τον ήλιο. Αντίθετα, τα δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης μπορούν να μεταβάλλουν τη γεωμετρία

ή τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική διαχείριση της ηλιακής ακτινοβολίας και καλύτερη ισορροπία μεταξύ ηλιασμού, οπτικής άνεσης και ποιότητας θέας (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

2.3 Συστήματα σκίασης: Αρχές λειτουργίας και ταξινόμηση

Τα συστήματα σκίασης αποτελούν βασικό στοιχείο του σχεδιασμού των κτιριακών όψεων, καθώς συμβάλλουν στον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας και στη διαμόρφωση των συνθηκών φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων. Η σημασία τους έχει αυξηθεί ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της εκτεταμένης χρήσης μεγάλων υαλοστασίων και διαφανών όψεων, τα οποία ενισχύουν την πρόσβαση στο φυσικό φως αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης και ανεπιθύμητης ηλιακής έκθεσης (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

Βασικός στόχος των συστημάτων σκίασης είναι η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ επαρκούς φυσικού φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση και διατήρησης ικανοποιητικής θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Παράλληλα, τα συστήματα αυτά επηρεάζουν τη συνολική συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους, καθώς ελέγχουν τον τρόπο με τον οποίο το ηλιακό φως εισέρχεται και κατανέμεται στον εσωτερικό χώρο (Favoino et al., 2022).

Η λειτουργία των συστημάτων σκίασης βασίζεται κυρίως σε τέσσερις μηχανισμούς: τον περιορισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, τη ρύθμιση του διάχυτου φωτισμού, τον έλεγχο της φωτεινότητας στο οπτικό πεδίο του χρήστη και τη διαχείριση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον. Ανάλογα με τη γεωμετρία, τα υλικά κατασκευής και τη θέση τοποθέτησής τους, τα συστήματα σκίασης μπορούν είτε να μειώνουν είτε να ανακατευθύνουν το εισερχόμενο φως, βελτιώνοντας την κατανομή του φωτισμού στον χώρο (Loonen et al., 2013).

Η σημασία των συστημάτων σκίασης γίνεται ακόμη μεγαλύτερη στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037, το οποίο απαιτεί την ταυτόχρονη αξιολόγηση της επάρκειας φυσικού φωτισμού, της ποιότητας θέας, της προστασίας από τη θάμβωση και της έκθεσης σε άμεσο ηλιακό φως. Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ αυτών των παραμέτρων αποτελεί ένα σύνθετο σχεδιαστικό πρόβλημα, στο οποίο τα συστήματα σκίασης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο (CEN, 2018).

Με βάση τον βαθμό προσαρμοστικότητάς τους, τα συστήματα σκίασης διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στατικά και δυναμικά (adaptive) συστήματα. Η διάκριση αυτή αντανακλά τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιασμού και φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους.

2.3.1 Στατικά συστήματα σκίασης: Τυπολογίες και περιορισμοί

Τα στατικά συστήματα σκίασης αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία συστημάτων ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας στα κτίρια. Χαρακτηρίζονται από σταθερή γεωμετρία και λειτουργία, χωρίς δυνατότητα προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του έτους. Η ευρεία εφαρμογή τους οφείλεται στην κατασκευαστική απλότητα, στο χαμηλό κόστος και στη μικρή ανάγκη συντήρησης (Loonen et al., 2013).

Οι βασικότερες τυπολογίες στατικών συστημάτων σκίασης περιλαμβάνουν τα οριζόντια στοιχεία σκίασης (πρόβολοι και οριζόντιες περσίδες), τα κατακόρυφα στοιχεία σκίασης (vertical fins), τα συνδυαστικά συστήματα τύπου *egg-crate* ή *brise-soleil*, καθώς και τις διάτρητες επιφάνειες και τα μεταλλικά πλέγματα. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ως προς τον έλεγχο του φυσικού φωτισμού και της ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη γεωμετρία του κτιρίου (Freewan, 2014).

Τα οριζόντια στοιχεία σκίασης είναι συνήθως αποτελεσματικότερα σε νότιους προσανατολισμούς, όπου μπορούν να περιορίσουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες. Αντίστοιχα, τα κατακόρυφα στοιχεία χρησιμοποιούνται συχνότερα σε ανατολικές και δυτικές όψεις, όπου ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλότερες γωνίες. Οι διάτρητες επιφάνειες και τα μεταλλικά πλέγματα λειτουργούν ως φίλτρα φωτός, επιτρέποντας ταυτόχρονα έναν βαθμό οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον (Hammad & Abu-Hijleh, 2010).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα στατικά συστήματα παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς. Ο σημαντικότερος είναι η αδυναμία προσαρμογής στη συνεχή μεταβολή της ηλιακής τροχιάς. Ένα σύστημα που λειτουργεί αποτελεσματικά σε συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να προκαλεί υπερβολική σκίαση σε άλλες χρονικές περιόδους, μειώνοντας την

πρόσβαση στο φυσικό φως και επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος (Freewan, 2014).

Παράλληλα, η σταθερή γεωμετρία των στοιχείων σκίασης συχνά περιορίζει το εύρος και το βάθος της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η μείωση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την εμπειρία των χρηστών, ακόμη και όταν τα επίπεδα φωτισμού παραμένουν επαρκή (Lee et al., 2022). Επιπλέον, τα στατικά συστήματα δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά φαινόμενα θάμβωσης σε περιόδους χαμηλού ηλιακού ύψους, ιδιαίτερα σε ανατολικούς και δυτικούς προσανατολισμούς (Goovaerts et al., 2017).

Οι περιορισμοί αυτοί καθιστούν δύσκολη την ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων του EN 17037 σχετικά με την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την προστασία από τη θάμβωση και τη διατήρηση ποιοτικής θέας. Για τον λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια αυξάνεται το ενδιαφέρον για δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης, τα οποία μπορούν να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και να επιτυγχάνουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών κριτηρίων σχεδιασμού (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

2.3.2 Δυναμικά συστήματα σκίασης (Adaptive Facades)

Τα δυναμικά συστήματα σκίασης αναπτύχθηκαν ως απάντηση στους περιορισμούς των στατικών λύσεων, με στόχο την προσαρμογή της όψης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιασμού και φωτισμού. Σε αντίθεση με τα στατικά συστήματα, τα οποία διατηρούν σταθερή γεωμετρία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, τα δυναμικά συστήματα μπορούν να μεταβάλλουν τη μορφή ή τη λειτουργία τους ώστε να ανταποκρίνονται στις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

Η βασική αρχή λειτουργίας των δυναμικών συστημάτων είναι η προσαρμογή της σκίασης με σκοπό την καλύτερη ισορροπία μεταξύ φυσικού φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση και διατήρησης της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ανταποκριθούν αποτελεσματικότερα στις απαιτήσεις σύγχρονων προτύπων, όπως το EN 17037, τα οποία βασίζονται σε ετήσια και κλιματικά δεδομένα αξιολόγησης (CEN, 2018).

Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες μορφές δυναμικών συστημάτων σκίασης. Οι συνηθέστερες περιλαμβάνουν περιστρεφόμενες περσίδες, αναδιπλούμενα ή συρόμενα στοιχεία, μεταβαλλόμενες διατρήσεις και παραμετρικά διαμορφωμένες επιφάνειες, οι οποίες μπορούν να προσαρμόζουν το ποσοστό σκίασης ανάλογα με τη θέση του ήλιου και τις ανάγκες των χρηστών (Favoino et al., 2022).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα παραμετρικά συστήματα σκίασης, καθώς η γεωμετρία τους μπορεί να περιγραφεί και να ελεγχθεί μέσω συγκεκριμένων μεταβλητών σχεδιασμού. Παράμετροι όπως το μέγεθος, η πυκνότητα, η διάταξη ή η μορφή των ανοιγμάτων μπορούν να τροποποιούνται και να αξιολογούνται υπολογιστικά, επιτρέποντας τη διερεύνηση πολλών εναλλακτικών λύσεων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους (Attia et al., 2020).

Η λειτουργία των δυναμικών συστημάτων συνδέεται συχνά με μηχανισμούς κίνησης ή αλγόριθμους ελέγχου, οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Οι στρατηγικές αυτές μπορεί να βασίζονται σε αισθητήρες, σε προγραμματισμένα σενάρια λειτουργίας ή σε υπολογιστικά μοντέλα που αξιολογούν ταυτόχρονα πολλαπλά κριτήρια, όπως η επάρκεια φυσικού φωτισμού, η θάμβωση και η ποιότητα της θέας (Tzempelikos & Athienitis, 2007).

Πλήθος ερευνητικών μελετών έχει δείξει ότι τα δυναμικά συστήματα σκίασης μπορούν να επιτύχουν καλύτερη συνολική απόδοση σε σχέση με τις στατικές λύσεις, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με υψηλή μεταβλητότητα ηλιασμού. Η δυνατότητα προσαρμογής τους επιτρέπει αποτελεσματικότερο έλεγχο της θάμβωσης, διατήρηση υψηλότερων επιπέδων φυσικού φωτισμού και καλύτερη ποιότητα θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

2.4 Παραμετρικός σχεδιασμός και εργαλεία προσομοίωσης (Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Radiance και Galapagos)

Ο παραμετρικός σχεδιασμός έχει μεταβάλει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζεται ο σχεδιασμός κτιριακών όψεων και συστημάτων σκίασης. Μέσω της χρήσης παραμέτρων και αλγοριθμικών διαδικασιών, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας και αξιολόγησης πολλαπλών σχεδιαστικών εναλλακτικών, επιτρέποντας τη διερεύνηση

σύνθετων προβλημάτων που περιλαμβάνουν περισσότερα από ένα κριτήρια απόδοσης (Turrin et al., 2011). Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης, όπου μικρές μεταβολές στη γεωμετρία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον φυσικό φωτισμό, τη θάμβωση και την ποιότητα της θέας.

Βασικό εργαλείο παραμετρικού σχεδιασμού στην παρούσα εργασία αποτελεί το Grasshopper, το οποίο λειτουργεί ως οπτικό περιβάλλον προγραμματισμού στο λογισμικό Rhinoceros 3D. Μέσω του Grasshopper είναι δυνατός ο ορισμός γεωμετρικών παραμέτρων και σχέσεων μεταξύ τους, επιτρέποντας την παραγωγή πολλαπλών εναλλακτικών μορφών και τη γρήγορη διερεύνηση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για παραμετρικά συστήματα σκίασης, στα οποία η γεωμετρία αποτελεί βασικό παράγοντα απόδοσης (Menges & Ahlquist, 2011).

Για την ενσωμάτωση κλιματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το Ladybug Tools, το οποίο επιτρέπει την ανάγνωση και αξιοποίηση μετεωρολογικών αρχείων τύπου EPW (EnergyPlus Weather Files). Μέσω των αρχείων αυτών είναι δυνατή η περιγραφή των πραγματικών κλιματικών συνθηκών της περιοχής μελέτης, παρέχοντας δεδομένα όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία αέρα και η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους. Η χρήση πραγματικών κλιματικών δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή κλιματικά βασισμένων (climate-based) προσεγγίσεων αξιολόγησης φυσικού φωτισμού (Roudsari & Pak, 2013).

Οι προσομοιώσεις φυσικού φωτισμού πραγματοποιήθηκαν μέσω του Honeybee, το οποίο λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ του Grasshopper και εξειδικευμένων μηχανών υπολογισμού. Το Honeybee επιτρέπει τη μεταφορά της παραμετρικής γεωμετρίας σε περιβάλλοντα προσομοίωσης και την αξιολόγηση δεικτών φυσικού φωτισμού και οπτικής άνεσης με βάση πραγματικά κλιματικά δεδομένα (Roudsari & Pak, 2013).

Για τον υπολογισμό των συνθηκών φυσικού φωτισμού χρησιμοποιήθηκε η μηχανή προσομοίωσης Radiance, η οποία αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόπιστα και ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία στον τομέα της προσομοίωσης φωτισμού. Το Radiance βασίζεται σε τεχνικές ray-tracing και επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της διάδοσης του φωτός στον χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των υλικών, τις ανακλάσεις και τη γεωμετρία του περιβάλλοντος (Ward, 1994). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται εκτεταμένα

τόσο στην ερευνητική βιβλιογραφία όσο και στην επαγγελματική πρακτική για την αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης.

Τέλος, για τη διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το Galapagos, το οποίο αποτελεί ενσωματωμένο εργαλείο εξελικτικής βελτιστοποίησης του Grasshopper. Το Galapagos αξιοποιεί γενετικούς αλγορίθμους ώστε να διερευνά μεγάλο αριθμό εναλλακτικών λύσεων και να εντοπίζει γεωμετρικές διαμορφώσεις που βελτιστοποιούν τα επιλεγμένα κριτήρια αξιολόγησης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση διαφορετικών συνδυασμών γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος σκίασης και τον εντοπισμό λύσεων που επιτυγχάνουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ φυσικού φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση και ποιότητας θέας (Rutten, 2013).

Συνολικά, ο συνδυασμός των εργαλείων Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Radiance και Galapagos διαμορφώνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο παραμετρικού σχεδιασμού, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων σκίασης και την αξιολόγησή τους με βάση αντικειμενικούς δείκτες απόδοσης, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων σχεδιαστικών αποφάσεων.

2.4.1 Διαλειτουργικότητα εργαλείων (Interoperability): επικοινωνία μεταξύ των λογισμικών

Η διαλειτουργικότητα (interoperability) αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό των σύγχρονων παραμετρικών διαδικασιών σχεδιασμού, καθώς επιτρέπει την άμεση ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών εργαλείων μοντελοποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Μέσω της διαλειτουργικότητας, οι γεωμετρικές μεταβολές που πραγματοποιούνται στο παραμετρικό μοντέλο μπορούν να αξιολογούνται άμεσα ως προς την απόδοσή τους, χωρίς να απαιτείται επαναδημιουργία του μοντέλου σε διαφορετικά λογισμικά (Turrin et al., 2011).

Στην παρούσα εργασία, το Grasshopper αποτελεί το κεντρικό περιβάλλον ανάπτυξης του παραμετρικού μοντέλου. Η γεωμετρία του χώρου και του συστήματος σκίασης ορίζεται μέσω παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να μεταβάλλονται δυναμικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Το Ladybug αξιοποιεί τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης μέσω αρχείων EPW και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή τροχιά, την ηλιακή ακτινοβολία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό, το παραμετρικό μοντέλο συνδέεται με πραγματικά κλιματικά δεδομένα και η αξιολόγηση πραγματοποιείται σε συνθήκες που προσεγγίζουν τη λειτουργία του κτιρίου σε ετήσια βάση (Roudsari & Pak, 2013).

Το Honeybee λειτουργεί ως ενδιάμεσο εργαλείο που συνδέει το παραμετρικό μοντέλο με τη μηχανή προσομοίωσης Radiance. Μέσω του Honeybee μεταφέρονται η γεωμετρία, οι ιδιότητες των υλικών και οι παράμετροι της προσομοίωσης, ώστε να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί φυσικού φωτισμού και οπτικής άνεσης. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εξαγωγή δεικτών όπως οι sDA, UDI, ASE και DGP, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σκίασης (Ward, 1994).

Η διαλειτουργικότητα των εργαλείων επιτρέπει την αυτόματη ενημέρωση των αποτελεσμάτων κάθε φορά που μεταβάλλεται κάποια γεωμετρική παράμετρος, όπως το μέγεθος των ανοιγμάτων, η πυκνότητα της διάτρησης ή η διάταξη των στοιχείων σκίασης. Έτσι δημιουργείται μια συνεχής διαδικασία σχεδιασμού, προσομοίωσης και αξιολόγησης, όπου κάθε νέα γεωμετρική εκδοχή μπορεί να εξετάζεται άμεσα ως προς την απόδοσή της.

Η διαδικασία αυτή συνδέεται άμεσα με το Galapagos, το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του παραμετρικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται ως κριτήρια αξιολόγησης (fitness values), επιτρέποντας στον αλγόριθμο να αναζητά αυτόματα γεωμετρικές λύσεις με καλύτερη απόδοση ως προς τον φυσικό φωτισμό, την προστασία από τη θάμβωση και την ποιότητα θέας. Με τον τρόπο αυτό, η γεωμετρία δεν αντιμετωπίζεται ως ένα στατικό σχεδιαστικό αποτέλεσμα, αλλά ως ένα δυναμικό σύστημα που εξελίσσεται μέσα από συνεχείς κύκλους σχεδιασμού, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

Συνολικά, η διασύνδεση των Grasshopper, Ladybug, Honeybee, Radiance και Galapagos δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό περιβάλλον, το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση παραμετρικών συστημάτων σκίασης με βάση αντικειμενικά κριτήρια απόδοσης και πραγματικά κλιματικά δεδομένα.

2.5 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (Genetic Algorithms – Galapagos)

Η βελτιστοποίηση αποτελεί βασικό εργαλείο στον παραμετρικό σχεδιασμό, ιδιαίτερα σε προβλήματα όπου πολλές σχεδιαστικές παράμετροι επηρεάζουν ταυτόχρονα την απόδοση ενός συστήματος. Στην περίπτωση των συστημάτων σκίασης, μεταβολές στη γεωμετρία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον φυσικό φωτισμό, τη θάμβωση και την ποιότητα της θέας, δημιουργώντας ένα σύνθετο πρόβλημα με αλληλεξαρτώμενες μεταβλητές. Για τον λόγο αυτό, η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών λύσεων και την αναζήτηση διαμορφώσεων με βελτιωμένη απόδοση (Turrin et al., 2011).

Μία από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GA). Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στις αρχές της φυσικής εξέλιξης και της φυσικής επιλογής. Αρχικά δημιουργείται ένας πληθυσμός πιθανών λύσεων, οι οποίες αξιολογούνται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης. Στη συνέχεια εφαρμόζονται διαδικασίες επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης, παράγοντας νέες γενιές λύσεων με σταδιακά βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Μέσω αυτής της διαδικασίας ο αλγόριθμος μπορεί να εντοπίσει αποδοτικές λύσεις μέσα σε έναν μεγάλο και πολύπλοκο σχεδιαστικό χώρο (Goldberg, 1989).

Στο περιβάλλον του Grasshopper, η πιο διαδεδομένη εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου είναι το Galapagos, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Το Galapagos επιτρέπει τη σύνδεση παραμετρικών μεταβλητών με μία συνάρτηση αξιολόγησης (fitness function), ώστε να αναζητεί αυτόματα συνδυασμούς παραμέτρων που οδηγούν σε καλύτερη απόδοση. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε παραμετρικά συστήματα σκίασης, όπου μεταβλητές όπως το μέγεθος των ανοιγμάτων, η πυκνότητα της διάτρησης ή άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά του συστήματος.

Η λειτουργία του Galapagos βασίζεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους παραγωγής και αξιολόγησης λύσεων. Για κάθε νέα γεωμετρική παραλλαγή εκτελούνται οι αντίστοιχες προσομοιώσεις φυσικού φωτισμού και οπτικής άνεσης, ενώ τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης της λύσης. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος οδηγείται σταδιακά προς γεωμετρίες που ικανοποιούν καλύτερα τους επιλεγμένους στόχους σχεδιασμού.

Η χρήση γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση πολύ περισσότερων εναλλακτικών λύσεων από όσες θα μπορούσαν να εξεταστούν μέσω συμβατικών δοκιμών. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα στον μελετητή να κατανοήσει καλύτερα τη σχέση μεταξύ γεωμετρικών παραμέτρων και απόδοσης του συστήματος, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων σχεδιαστικών αποφάσεων.

Συνολικά, η αξιοποίηση του Galapagos στο πλαίσιο της παραμετρικής διαδικασίας επιτρέπει τη συστηματική αναζήτηση αποδοτικών γεωμετρικών λύσεων και ενισχύει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης συστημάτων σκίασης με βάση αντικειμενικά κριτήρια αξιολόγησης. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τη σύγχρονη τάση για σχεδιασμό βασισμένο σε δεδομένα και υποστηρίζει την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και τεκμηριωμένων αρχιτεκτονικών λύσεων.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1 Επισκόπηση ερευνών: Εξελίξεις σε φυσικό φωτισμό και δυναμικά σκιάστρα

Η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα του φυσικού φωτισμού και των συστημάτων σκίασης έχει ενταθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα μετά την ανάπτυξη κλιματικά βασισμένων προσεγγίσεων αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού και τη διάδοση των παραμετρικών εργαλείων σχεδιασμού. Η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και της οπτικής άνεσης των χρηστών έχει αναδείξει τον φυσικό φωτισμό ως βασικό αντικείμενο της σύγχρονης αρχιτεκτονικής και περιβαλλοντικής έρευνας. Παράλληλα, η αυξανόμενη χρήση εκτεταμένων υαλοστασίων στα σύγχρονα κτίρια έχει ενισχύσει τη σημασία της αποτελεσματικής διαχείρισης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω συστημάτων σκίασης.

Οι πρώτες ερευνητικές προσεγγίσεις επικεντρώθηκαν κυρίως στην ανάπτυξη μεθόδων αξιολόγησης του φυσικού φωτισμού και στη βελτίωση της ακρίβειας των υπολογιστικών

εργαλείων προσομοίωσης. Η μετάβαση από στατικές μεθόδους, όπως ο Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού (Daylight Factor), σε δυναμικές και κλιματικά βασισμένες προσεγγίσεις αποτέλεσε σημαντικό βήμα για την ακριβέστερη αποτύπωση των πραγματικών συνθηκών φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους. Παράλληλα, η ανάπτυξη λογισμικών όπως το Radiance επέτρεψε τη λεπτομερή προσομοίωση της συμπεριφοράς του φωτός και την αξιολόγηση σύνθετων γεωμετριών και συστημάτων σκίασης.

Στο πλαίσιο αυτό, μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας έχει ασχοληθεί με τη μελέτη στατικών και δυναμικών συστημάτων σκίασης. Οι έρευνες σχετικά με τα στατικά συστήματα αναδεικνύουν την απλότητα και την αξιοπιστία τους, αλλά επισημαίνουν και τους περιορισμούς που προκύπτουν από την αδυναμία προσαρμογής τους στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιασμού. Ως αποτέλεσμα, το ενδιαφέρον της έρευνας στράφηκε σταδιακά προς δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης, τα οποία μπορούν να μεταβάλλουν τη γεωμετρία ή τη λειτουργία τους ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις ανάγκες των χρηστών (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

Οι ανασκοπήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών δυναμικής σκίασης, όπως κινητικές περσίδες, αναδιπλούμενες όψεις, μεταβαλλόμενα διατρητά συστήματα και υλικά με προσαρμοζόμενες οπτικές ιδιότητες. Παράλληλα, πολλές μελέτες εξετάζουν την επίδραση διαφορετικών μορφών κίνησης και γεωμετρικών μετασχηματισμών στην κατανομή του φυσικού φωτός, στον έλεγχο της θάμβωσης και στη διατήρηση της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωμάτωση παραμετρικών εργαλείων σχεδιασμού και προσομοίωσης στη διαδικασία ανάπτυξης συστημάτων σκίασης. Η χρήση περιβαλλόντων όπως το Grasshopper, σε συνδυασμό με εργαλεία όπως τα Ladybug Tools και το Honeybee, επέτρεψε τη συστηματική διερεύνηση μεγάλου αριθμού γεωμετρικών παραλλαγών και την αξιολόγησή τους με βάση δείκτες φυσικού φωτισμού και οπτικής άνεσης. Παράλληλα, η εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, όπως το Galapagos, διευκόλυνε την αναζήτηση γεωμετρικών λύσεων που επιτυγχάνουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ διαφορετικών κριτηρίων απόδοσης.

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο έρευνας αφορά τις διάτρητες επιφάνειες σκίασης. Οι μελέτες δείχνουν ότι η γεωμετρία, η πυκνότητα και η κατανομή των ανοιγμάτων επηρεάζουν σημαντικά τόσο την ποσότητα του φυσικού φωτισμού όσο και την ποιότητα της θέας και

τον έλεγχο της θάμβωσης. Για τον λόγο αυτό, τα διατηρητά συστήματα αποτελούν αντικείμενο αυξανόμενου ερευνητικού ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με παραμετρικές μεθόδους σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Συνολικά, η βιβλιογραφία καταδεικνύει μια σαφή μετάβαση από τη συμβατική αντιμετώπιση της σκίασης ως μέσου αποκλεισμού της ηλιακής ακτινοβολίας προς μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση, όπου τα συστήματα σκίασης λειτουργούν ως ενεργά στοιχεία περιβαλλοντικού σχεδιασμού. Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, παραμένει περιορισμένος ο αριθμός των μελετών που εξετάζουν ταυτόχρονα την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την προστασία από τη θάμβωση και την ποιότητα της θέας μέσα από μια ενιαία διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης. Το ερευνητικό αυτό κενό αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία αναπτύσσεται η παρούσα εργασία.

3.2 Εφαρμογές του προτύπου EN 17037 σε κτίρια γραφείων

Η εφαρμογή του προτύπου EN 17037 σε κτίρια γραφείων έχει αποτελέσει αντικείμενο αυξανόμενου ερευνητικού ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια. Οι χώροι γραφείων χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις σε φυσικό φωτισμό, οπτική άνεση και ποιότητα θέας, καθώς οι χρήστες παραμένουν σε αυτούς για μεγάλα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των συνθηκών φωτισμού σύμφωνα με τα κριτήρια του EN 17037 θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για τη δημιουργία ποιοτικών εργασιακών περιβαλλόντων (CEN, 2018).

Πολλές πρόσφατες μελέτες έχουν αξιοποιήσει κλιματικά βασισμένες προσομοιώσεις φυσικού φωτισμού για την αξιολόγηση των τεσσάρων βασικών αξόνων του προτύπου: επάρκεια φυσικού φωτισμού (daylight provision), ποιότητα θέας προς το εξωτερικό (view out), προστασία από τη θάμβωση (glare protection) και έκθεση σε άμεσο ηλιακό φως (sunlight exposure). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συμμόρφωση με ένα μόνο κριτήριο δεν εξασφαλίζει απαραίτητα την επίτευξη των υπόλοιπων, γεγονός που αναδεικνύει τη σύνθετη φύση του σχεδιασμού φυσικού φωτισμού (CEN, 2018).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μελέτες που εξετάζουν την επάρκεια φυσικού φωτισμού σε κτίρια γραφείων με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες. Αν και οι χώροι αυτοί δέχονται συνήθως άφθονο φυσικό φως κοντά στα παράθυρα, η κατανομή του φωτισμού

στο εσωτερικό δεν είναι πάντοτε ομοιόμορφη. Συχνά παρατηρούνται υψηλά επίπεδα φωτισμού κοντά στα ανοίγματα και χαμηλότερα επίπεδα στο βάθος του χώρου, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την οπτική άνεση των χρηστών. Για τον λόγο αυτό, η επίτευξη των απαιτήσεων του EN 17037 εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό της όψης και την αποτελεσματική διαχείριση του φυσικού φωτισμού μέσω κατάλληλων συστημάτων σκίασης (Reinhart et al., 2006).

Παράλληλα, αρκετές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην παράμετρο της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η ποιότητα της θέας συνδέεται με αυξημένη ικανοποίηση των χρηστών, βελτιωμένη συγκέντρωση και μειωμένα επίπεδα στρες. Ωστόσο, η διατήρηση ποιοτικής θέας συχνά συγκρούεται με την ανάγκη ελέγχου της θάμβωσης, ιδιαίτερα σε κτίρια με εκτεταμένες γυάλινες επιφάνειες (Lee et al., 2022).

Η προστασία από τη θάμβωση αναδεικνύεται ως ένα από τα δυσκολότερα κριτήρια εφαρμογής του προτύπου. Μελέτες σε κτίρια γραφείων έχουν δείξει ότι ακόμη και όταν επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού και επαρκής θέα, οι συνθήκες οπτικής άνεσης μπορεί να μην είναι αποδεκτές λόγω αυξημένων τιμών του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP). Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο σε ανατολικούς και δυτικούς προσανατολισμούς, όπου η χαμηλή γωνία του ήλιου αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα θάμβωσης (Wienold & Christoffersen, 2006).

Αντίστοιχα, η παράμετρος της έκθεσης σε άμεσο ηλιακό φως (sunlight exposure) έχει μελετηθεί ως στοιχείο που συμβάλλει στη συνολική ποιότητα του εσωτερικού περιβάλλοντος. Οι ερευνητές επισημαίνουν ότι η πλήρης αποκοπή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αποτελεί πάντοτε βέλτιστη λύση, καθώς η παρουσία άμεσου ηλιακού φωτός μπορεί να βελτιώσει την αντίληψη του χώρου και την εμπειρία των χρηστών. Για τον λόγο αυτό, το EN 17037 προτείνει μια ισορροπημένη προσέγγιση, η οποία επιδιώκει τον έλεγχο και όχι την πλήρη αποφυγή της ηλιακής ακτινοβολίας (CEN, 2018).

Ένα κοινό συμπέρασμα των περισσότερων μελετών είναι ότι τα συμβατικά στατικά συστήματα σκίασης δυσκολεύονται να ανταποκριθούν ταυτόχρονα σε όλα τα κριτήρια του προτύπου. Αντίθετα, τα δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης εμφανίζουν μεγαλύτερη δυνατότητα εξισορρόπησης μεταξύ φυσικού φωτισμού, προστασίας από τη θάμβωση, διατήρησης της θέας και ελεγχόμενης έκθεσης στον ήλιο (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019; Favoino et al., 2022).

Συνολικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η εφαρμογή του EN 17037 στα κτίρια γραφείων απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σχεδιασμού, η οποία λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ φωτισμού, θέας, θάμβωσης και ηλιασμού.

3.3 Παραμετρική Βελτιστοποίηση Σκιάστρων: Τι έχει γίνει μέχρι σήμερα

Η παραμετρική βελτιστοποίηση συστημάτων σκίασης αποτελεί ένα από τα πλέον ενεργά ερευνητικά πεδία στον τομέα του φυσικού φωτισμού και του περιβαλλοντικού σχεδιασμού. Η ανάπτυξη παραμετρικών εργαλείων, όπως το Grasshopper, σε συνδυασμό με λογισμικά προσομοίωσης φυσικού φωτισμού και αλγορίθμους βελτιστοποίησης, επέτρεψε τη συστηματική διερεύνηση μεγάλου αριθμού σχεδιαστικών εναλλακτικών λύσεων και την αξιολόγησή τους με βάση ποσοτικούς δείκτες απόδοσης (Eltaweel & Su, 2017; Eltaweel et al., 2021).

Οι πρώτες εφαρμογές της παραμετρικής βελτιστοποίησης επικεντρώθηκαν κυρίως σε στατικά συστήματα σκίασης, όπως πρόβολοι, περσίδες και διάτρητες επιφάνειες. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι παράμετροι όπως η γωνία κλίσης, το βάθος και η πυκνότητα των στοιχείων σκίασης επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή του φυσικού φωτισμού και την απόδοση του κελύφους. Ως αποτέλεσμα, η γεωμετρία του σκιάστρου αναδείχθηκε ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος σκίασης (Manzan, 2014; Fang & Cho, 2019).

Στη συνέχεια, η έρευνα στράφηκε προς πολυκριτηριακές προσεγγίσεις, στις οποίες αξιολογούνται ταυτόχρονα περισσότεροι από ένας δείκτες απόδοσης. Μελέτες που συνδυάζουν δείκτες φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ενεργειακής συμπεριφοράς έδειξαν ότι η βελτιστοποίηση των συστημάτων σκίασης δεν οδηγεί σε μία μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά σε ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων συμβιβασμού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των σχέσεων αλληλεξάρτησης μεταξύ των διαφορετικών σχεδιαστικών στόχων και έχει καθιερωθεί στη σύγχρονη έρευνα ως βασική μεθοδολογία αξιολόγησης (Kirimtat et al., 2019; De Luca et al., 2022).

Παράλληλα, σημαντικό μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στα δυναμικά συστήματα σκίασης και στις προσαρμοζόμενες όψεις. Σε αντίθεση με τις στατικές λύσεις, τα

συστήματα αυτά μπορούν να μεταβάλλουν τη γεωμετρία ή τη θέση τους κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανταποκρινόμενα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιασμού. Οι σχετικές μελέτες δείχνουν ότι η δυνατότητα προσαρμογής συμβάλλει στη βελτίωση της οπτικής άνεσης, στον αποτελεσματικότερο έλεγχο της θάμβωσης και στη διατήρηση υψηλότερων επιπέδων φυσικού φωτισμού σε σχέση με συμβατικές λύσεις (Nagy et al., 2016; Hosseini et al., 2019; Zhang et al., 2022).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι έρευνες που αφορούν διάτρητα συστήματα σκίασης. Στις περιπτώσεις αυτές, η παραμετρική βελτιστοποίηση εφαρμόζεται σε χαρακτηριστικά όπως το ποσοστό διάτρησης, το σχήμα και η κατανομή των ανοιγμάτων, καθώς και ο προσανατολισμός της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατάλληλη διαμόρφωση των διατρήσεων μπορεί να περιορίσει τη θάμβωση, να επιτρέψει την είσοδο επαρκούς φυσικού φωτισμού και ταυτόχρονα να διατηρήσει ικανοποιητική οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, τα διάτρητα συστήματα αποτελούν ένα από τα πιο ενεργά πεδία έρευνας στον σχεδιασμό όψεων και συστημάτων σκίασης (Sherif et al., 2012a; Sherif et al., 2012b; Chi et al., 2017; Khidmat et al., 2022).

Επιπλέον, η βιβλιογραφία καταγράφει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση προηγμένων υλικών και τεχνολογιών στα συστήματα σκίασης. Ενδεικτικά, έχουν μελετηθεί συστήματα με μεταβαλλόμενες οπτικές ιδιότητες, προσαρμοζόμενες επιφάνειες και φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία επιδιώκουν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του κελύφους μέσω του συνδυασμού ελέγχου φωτισμού, σκίασης και ενεργειακής λειτουργίας (Taveres-Cachat et al., 2019; Vanaga et al., 2018; Bui et al., 2020).

Συνολικά, οι προηγούμενες μελέτες καταδεικνύουν ότι η παραμετρική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο για τη διερεύνηση γεωμετρικών και υλικών παραμέτρων των συστημάτων σκίασης. Ωστόσο, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί, μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας εξακολουθεί να επικεντρώνεται σε επιμέρους πτυχές της απόδοσης ή σε περιορισμένο αριθμό δεικτών. Η ταυτόχρονη αξιολόγηση της επάρκειας φυσικού φωτισμού, της προστασίας από τη θάμβωση, της ποιότητας θέας και της έκθεσης σε ηλιακό φως, σύμφωνα με τη φιλοσοφία του EN 17037, παραμένει σχετικά περιορισμένη. Η διαπίστωση αυτή αναδεικνύει την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένες και πολυκριτηριακές προσεγγίσεις σχεδιασμού, όπως αυτή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

3.4 Σχέσεις Ανταγωνισμού (Trade-offs): Ανάλυση της βιβλιογραφίας για τη σύγκρουση μεταξύ Glare, View και Energy

Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι ο σχεδιασμός κτιριακών όψεων και συστημάτων σκίασης χαρακτηρίζεται από έντονες σχέσεις αλληλεξάρτησης και ανταγωνισμού μεταξύ διαφορετικών δεικτών απόδοσης. Η επάρκεια φυσικού φωτισμού, η προστασία από τη θάμβωση, η ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και η ενεργειακή συμπεριφορά δεν μπορούν συνήθως να μεγιστοποιηθούν ταυτόχρονα, καθώς η βελτίωση ενός κριτηρίου συχνά οδηγεί σε υποβάθμιση κάποιου άλλου. Για τον λόγο αυτό, η έννοια των trade-offs αποτελεί κεντρικό αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας στον τομέα του daylighting και των συστημάτων σκίασης (De Luca et al., 2022).

Ένας από τους συχνότερα μελετημένους άξονες ανταγωνισμού είναι η σχέση μεταξύ φυσικού φωτισμού και θάμβωσης. Η αύξηση της εισόδου φυσικού φωτός μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την επάρκεια φωτισμού ενός χώρου, όμως συχνά συνοδεύεται από αυξημένη πιθανότητα οπτικής δυσφορίας λόγω θάμβωσης. Μελέτες που αξιολογούν ταυτόχρονα δείκτες daylight και DGP δείχνουν ότι υψηλές τιμές daylight provision δεν συνεπάγονται απαραίτητα και υψηλή οπτική άνεση, ιδιαίτερα σε χώρους με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες και έντονη ηλιακή έκθεση (Goovaerts et al., 2017; Day et al., 2019).

Αντίστοιχα, η βιβλιογραφία αναδεικνύει τη σύγκρουση μεταξύ προστασίας από τη θάμβωση και ποιότητας θέας. Συστήματα σκίασης που μειώνουν αποτελεσματικά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και περιορίζουν τον δείκτη DGP συχνά επηρεάζουν αρνητικά την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, η θέα θεωρείται πλέον βασικό στοιχείο της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος και έχει συνδεθεί με αυξημένη ικανοποίηση, μειωμένο στρες και βελτιωμένη γνωστική λειτουργία των χρηστών (Lee et al., 2022). Η μελέτη των Konstantoglou et al. (2013) έδειξε ότι η στρατηγική ελέγχου ενός συστήματος σκίασης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ισορροπία μεταξύ daylight, glare και view out, αναδεικνύοντας την ανάγκη για πιο σύνθετες προσεγγίσεις σχεδιασμού.

Σχέσεις ανταγωνισμού παρατηρούνται επίσης μεταξύ θέας και ενεργειακής συμπεριφοράς. Η αυξημένη διαφάνεια των όψεων ευνοεί την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και την είσοδο φυσικού φωτός, όμως ταυτόχρονα μπορεί να αυξήσει τα ηλιακά θερμικά

κέρδη και τις απαιτήσεις ψύξης. Αντίθετα, πιο έντονες στρατηγικές σκίασης περιορίζουν την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά συχνά μειώνουν την ποιότητα της θέας και τη φωτεινότητα του εσωτερικού χώρου (Freewan, 2014; Choi et al., 2017).

Παρόμοιος ανταγωνισμός εμφανίζεται και μεταξύ φυσικού φωτισμού και ενεργειακής απόδοσης. Αν και η αξιοποίηση του daylight μπορεί να μειώσει τη χρήση τεχνητού φωτισμού, η αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία ενδέχεται να επιβαρύνει το κτίριο με υψηλότερα ψυκτικά φορτία. Ως αποτέλεσμα, η συνολική επίδοση ενός συστήματος δεν μπορεί να αξιολογηθεί με βάση έναν μόνο δείκτη, αλλά απαιτεί ταυτόχρονη εξέταση πολλαπλών παραμέτρων (Choi et al., 2017; Xiong & Tzempelikos, 2016).

Η πολυπλοκότητα των παραπάνω σχέσεων εξηγεί γιατί τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί προς δυναμικά και παραμετρικά συστήματα σκίασης. Μελέτες δείχνουν ότι τα συστήματα αυτά μπορούν να προσαρμόζονται τη γεωμετρία ή τη λειτουργία τους στις μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού και ηλιασμού, επιτυγχάνοντας καλύτερη ισορροπία μεταξύ daylight provision, glare protection και view out σε σχέση με τις συμβατικές στατικές λύσεις (Hosseini et al., 2019; Shi et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Συνολικά, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η βελτιστοποίηση ενός συστήματος σκίασης δεν αφορά τη μεγιστοποίηση ενός μεμονωμένου δείκτη, αλλά τη διαχείριση των σχέσεων ανταγωνισμού μεταξύ πολλαπλών κριτηρίων. Η ανάγκη κατανόησης και ποσοτικοποίησης αυτών των trade-offs αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη αποτελεσματικών παραμετρικών μεθοδολογιών σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, γεγονός που οδηγεί στο επόμενο τμήμα της παρούσας εργασίας, όπου παρουσιάζονται τα ερευνητικά κενά που εξακολουθούν να υφίστανται στη διεθνή βιβλιογραφία.

3.5 Κενά γνώσης (Gap Analysis) και αναγκαιότητα νέας προσέγγισης

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε σημαντική πρόοδο στον τομέα του φυσικού φωτισμού, των συστημάτων σκίασης και των παραμετρικών μεθοδολογιών σχεδιασμού. Η ανάπτυξη κλιματικά βασισμένων προσομοιώσεων, η καθιέρωση σύγχρονων δεικτών αξιολόγησης και η ευρεία χρήση παραμετρικών εργαλείων έχουν συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της κατανόησης της σχέσης μεταξύ φυσικού φωτισμού, οπτικής άνεσης και σχεδιασμού όψεων. Παράλληλα, η εισαγωγή του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 17037

δημιούργησε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αξιολόγησης που συνδυάζει την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την ποιότητα θέας, την προστασία από τη θάμβωση και την έκθεση σε ηλιακό φως (CEN, 2018).

Παρά την πρόοδο αυτή, η διεθνής βιβλιογραφία εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς. Πολλές μελέτες εξετάζουν μεμονωμένες παραμέτρους, όπως τον φυσικό φωτισμό ή τη θάμβωση, χωρίς να αξιολογούν συστηματικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών κριτηρίων απόδοσης. Αντίστοιχα, αρκετές έρευνες εστιάζουν στη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ή της οπτικής άνεσης, χωρίς να ενσωματώνουν ισότιμα την ποιότητα θέας και τις απαιτήσεις του EN 17037 στο πλαίσιο της ανάλυσης (De Luca et al., 2022).

Επιπλέον, παρότι η σημασία της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η παράμετρος αυτή παραμένει σχετικά περιορισμένη σε διαδικασίες παραμετρικής αξιολόγησης και βελτιστοποίησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θέα εξετάζεται ποιοτικά ή χρησιμοποιείται ως δευτερεύον κριτήριο σε σχέση με τον φυσικό φωτισμό και τη θάμβωση. Ωστόσο, έρευνες εφαρμογής του EN 17037 σε κτίρια γραφείων δείχνουν ότι η αντίληψη των χρηστών για την ποιότητα της θέας δεν ταυτίζεται πάντα με τις ποσοτικές αξιολογήσεις των προτύπων, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της συγκεκριμένης παραμέτρου (Sepúlveda et al., 2022).

Παράλληλα, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι τα δυναμικά και προσαρμοζόμενα συστήματα σκίασης διαθέτουν σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης της απόδοσης των κτιρίων. Ωστόσο, η αξιολόγησή τους πραγματοποιείται συχνά με έμφαση σε συγκεκριμένους δείκτες, χωρίς ολοκληρωμένη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και θέας. Η ανάγκη ανάπτυξης μεθοδολογιών που να επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλαπλών παραμέτρων παραμένει ιδιαίτερα έντονη, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία του συστήματος μεταβάλλεται και επηρεάζει άμεσα την οπτική εμπειρία του χρήστη (Samadi et al., 2020).

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη για μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση που να συνδυάζει παραμετρικό σχεδιασμό, προσομοίωση φυσικού φωτισμού και αξιολόγηση σύμφωνα με το πλαίσιο του EN 17037. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει προς αυτή την κατεύθυνση, διερευνώντας τη σχέση μεταξύ γεωμετρίας σκίασης, φυσικού

φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας μέσω μιας παραμετρικής διαδικασίας ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των παραπάνω παραμέτρων και στην υποστήριξη τεκμηριωμένων σχεδιαστικών αποφάσεων για συστήματα σκίασης που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του EN 17037.

3.5.1 Προσδιορισμός των ερευνητικών κενών

Με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των προηγούμενων ενοτήτων, προκύπτουν ορισμένα βασικά ερευνητικά κενά που δικαιολογούν την ανάπτυξη της παρούσας μελέτης.

(G1) Περιορισμένη ολοκληρωμένη αξιολόγηση των κριτηρίων του EN 17037. Παρότι η βιβλιογραφία εξετάζει εκτενώς επιμέρους παραμέτρους, όπως η επάρκεια φυσικού φωτισμού ή η προστασία από τη θάμβωση, η ταυτόχρονη αξιολόγηση όλων των βασικών αξόνων του EN 17037 παραμένει σχετικά περιορισμένη. Πολλές μελέτες επικεντρώνονται σε μεμονωμένους δείκτες, χωρίς να διερευνούν συστηματικά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ daylight provision, glare protection και view out (Sepúlveda et al., 2022; De Luca et al., 2022).

(G2) Περιορισμένη σύνδεση του EN 17037 με διαδικασίες παραμετρικής βελτιστοποίησης.

Παρότι οι παραμετρικές μέθοδοι και οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό συστημάτων σκίασης, λίγες μελέτες ενσωματώνουν ρητά τα κριτήρια και τα επίπεδα αξιολόγησης του EN 17037 ως βασικούς στόχους της διαδικασίας βελτιστοποίησης (Samadi et al., 2020).

(G3) Περιορισμένη ποσοτικοποίηση της ποιότητας θέας (View Out). Η ποιότητα θέας αναγνωρίζεται ως σημαντικός παράγοντας οπτικής και ψυχολογικής άνεσης, ωστόσο εξακολουθεί να αποτελεί το λιγότερο ποσοτικοποιημένο κριτήριο στη σχετική βιβλιογραφία. Στις περισσότερες περιπτώσεις αξιολογείται ποιοτικά ή αντιμετωπίζεται ως δευτερεύουσα παράμετρος σε σχέση με τον φυσικό φωτισμό και τη θάμβωση (Sepúlveda et al., 2022).

(G4) Περιορισμένη διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας σκίασης στα trade-offs μεταξύ daylight, glare και view.

Παρότι έχει αποδειχθεί ότι η γεωμετρία των σκιάστρων επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμένες μελέτες που εξετάζουν συστηματικά πώς διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις μεταβάλλουν ταυτόχρονα την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την πιθανότητα θάμβωσης και την ποιότητα θέας (De Luca et al., 2022).

(G5) Ανάγκη για ένα ενιαίο και συγκρίσιμο πλαίσιο αξιολόγησης.

Η χρήση διαφορετικών δεικτών, μεθόδων και παραδοχών δυσκολεύει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ μελετών. Παρότι το EN 17037 προσφέρει ένα κοινό πλαίσιο αξιολόγησης, η πλήρης αξιοποίησή του ως ενιαίας μεθοδολογικής βάσης δεν έχει ακόμη εδραιωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία (Sepúlveda et al., 2022).

Συνεπώς, η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη των παραπάνω κενών, διερευνώντας μέσω παραμετρικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης τη σχέση μεταξύ φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ποιότητας θέας σε σύστημα σκίασης, με σημείο αναφοράς το πλαίσιο αξιολόγησης του EN 17037.

3.5.2 Αναγκαιότητα νέας προσέγγισης

Με βάση τα παραπάνω ερευνητικά κενά, προκύπτει η ανάγκη για μια μεθοδολογία που:

1. Αξιολογεί ταυτόχρονα την επάρκεια φυσικού φωτισμού, την προστασία από τη θάμβωση και την ποιότητα θέας, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις ανταγωνισμού μεταξύ των παραμέτρων αυτών.
2. Ευθυγραμμίζεται με το πλαίσιο αξιολόγησης του EN 17037, αξιοποιώντας δείκτες και κριτήρια που συνδέονται άμεσα με τις απαιτήσεις του προτύπου.
3. Ενσωματώνει την ποιότητα θέας (View Out) ως ισότιμο κριτήριο αξιολόγησης, αναγνωρίζοντας τη σημασία της για την οπτική και ψυχολογική άνεση των χρηστών.
4. Διερευνά συστηματικά την επίδραση της γεωμετρίας του συστήματος σκίασης στην απόδοση του χώρου ως προς τον φυσικό φωτισμό, τη θάμβωση και τη θέα.
5. Βασίζεται σε μια αναπαραγώγιμη παραμετρική διαδικασία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, η οποία επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών γεωμετρικών λύσεων και την τεκμηριωμένη λήψη σχεδιαστικών αποφάσεων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία τοποθετείται στο σημείο τομής των παραπάνω ζητημάτων, προτείνοντας μια παραμετρική μεθοδολογία αξιολόγησης και βελτιστοποίησης συστήματος σκίασης με βάση τους άξονες του EN 17037. Μέσω της χρήσης εργαλείων προσομοίωσης φυσικού φωτισμού και γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, διερευνάται η επίδραση της γεωμετρίας του σκιάστρου στην επάρκεια φυσικού φωτισμού, στην προστασία από τη θάμβωση και στην ποιότητα θέας, με στόχο την καλύτερη κατανόηση των σχέσεων ανταγωνισμού μεταξύ των παραμέτρων αυτών και την υποστήριξη τεκμηριωμένων σχεδιαστικών επιλογών.

3.5.3 Πίνακας Συγκριτικής Αξιολόγησης Βιβλιογραφίας (Gap Analysis Table)

Για τη συστηματική αποτύπωση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και την τεκμηρίωση των ερευνητικών κενών, καταρτίστηκε πίνακας συγκριτικής αξιολόγησης αντιπροσωπευτικών ερευνητικών μελετών. Ο πίνακας συγκρίνει τις επιλεγμένες έρευνες ως προς το είδος του συστήματος σκίασης, τη χρήση παραμετρικού σχεδιασμού, τους δείκτες αξιολόγησης φυσικού φωτισμού και θάμβωσης, την ενσωμάτωση της ποιότητας θέας (View Out), την εξέταση ενεργειακών παραμέτρων, καθώς και τον βαθμό συσχέτισης με το πρότυπο EN 17037.

Μελέτη	Σύστημα	Daylight	Glare	View Out	EN 17037	Κύριο κενό
Eltaweel & Su (2017)	Δυναμικό	DA, UDI	–	–	–	Δεν εξετάζεται η θέα
Kinetic Shading Systems (2019)	Δυναμικό	sDA	✓	–	–	View Out μη ποσοτικοποιημένο
Adaptive Facades Review (2016)	Μικτό	✓	✓	–	–	Θεωρητική προσέγγιση
Design Optimization of Building Geometry (2018)	Στατικό	DA, UDI	–	–	–	Έλλειψη δυναμικής λειτουργίας
Multi-performance Optimization (2020)	Στατικό	✓	✓	Μερικώς	–	Μη πλήρης ευθυγράμμιση με EN 17037
Automated Adaptive Facades (2021)	Δυναμικό	✓	✓	–	–	Περιορισμένη αξιολόγηση θέας

Πίνακας 3.1. Συγκριτική αξιολόγηση αντιπροσωπευτικών ερευνητικών μελετών στον τομέα του φυσικού φωτισμού και των συστημάτων σκίασης.

Από τη συγκριτική ανάλυση προκύπτει ότι η πλειονότητα των μελετών δίνει έμφαση στην επάρκεια φυσικού φωτισμού, στον έλεγχο της θάμβωσης και στην ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων. Αντίθετα, η ποιότητα θέας (View Out) εξετάζεται περιορισμένα και συχνά δεν ποσοτικοποιείται ως ανεξάρτητο κριτήριο αξιολόγησης. Παράλληλα, παρατηρείται ότι σχετικά λίγες μελέτες συνδέουν άμεσα τις διαδικασίες παραμετρικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης με το πλαίσιο αξιολόγησης του EN 17037.

Επιπλέον, ακόμη και στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζονται πολυκριτηριακές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, η αξιολόγηση επικεντρώνεται συνήθως σε συνδυασμούς δεικτών φυσικού φωτισμού, θάμβωσης και ενεργειακής απόδοσης, χωρίς να ενσωματώνεται ισότιμα η παράμετρος της θέας. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη για ερευνητικές προσεγγίσεις που να αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα και ισόρροπα τις παραμέτρους daylight, glare και view στο πλαίσιο των απαιτήσεων του EN 17037.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού, διερευνώντας την επίδραση της γεωμετρίας ενός παραμετρικού συστήματος σκίασης στην επάρκεια φυσικού φωτισμού, στην προστασία από τη θάμβωση και στην ποιότητα θέας, αξιοποιώντας διαδικασίες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη λογική αξιολόγησης του EN 17037.

4. Μεθοδολογία και Ερευνητικό Πλαίσιο

4.1 Περιγραφή Κτιρίου Αναφοράς

Η παρούσα έρευνα εξετάζει την επίδραση ενός παραμετρικού συστήματος εξωτερικής σκίασης στις συνθήκες φυσικού φωτισμού, στην ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και στην οπτική άνεση των χρηστών ενός χώρου γραφείων.

Ως κτίριο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο γραφειακού χώρου μονής ζώνης με ορθογωνική γεωμετρία διαστάσεων 7,00 m × 4,00 m και καθαρό ύψος 3,00 m. Η νότια πλευρά του χώρου, πλάτους 4,00 m και ύψους 3,00 m, διαμορφώθηκε ως πλήρως υαλοπερατή επιφάνεια, προσομοιώνοντας μία εκτεταμένη υαλοστάσια πρόσοψη

γραφειακού κτιρίου. Στην εξωτερική πλευρά του υαλοστασίου τοποθετήθηκε το παραμετρικό διάτρητο σύστημα σκίασης, το οποίο αποτέλεσε το αντικείμενο της παρούσας έρευνας.

Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου χώρου βασίστηκε στο γεγονός ότι οι χώροι γραφείων παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις τόσο ως προς την επάρκεια φυσικού φωτισμού όσο και ως προς τη διατήρηση ποιοτικής θέας και αποδεκτών συνθηκών οπτικής άνεσης για τους χρήστες.

Ο νότιος προσανατολισμός επιλέχθηκε λόγω της αυξημένης έκθεσής του στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα κρίσιμη την αποτελεσματική λειτουργία των εξωτερικών συστημάτων σκίασης. Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης του συστήματος σκίασης στον φυσικό φωτισμό, την ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και την πιθανότητα εμφάνισης οπτικής θάμβωσης, δηλαδή στα τρία κριτήρια απόδοσης που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η γεωμετρία του μοντέλου αναπτύχθηκε στο λογισμικό Rhinoceros 3D, ενώ η παραμετρική διαχείριση, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις και η διαδικασία βελτιστοποίησης υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον Grasshopper. Για την αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού, της ποιότητας θέας και της οπτικής άνεσης χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία Ladybug Tools και Honeybee, τα οποία συνδέονται με τον υπολογιστικό πυρήνα Radiance και επιτρέπουν την εκτέλεση εξειδικευμένων προσομοιώσεων φωτισμού και θάμβωσης.

Για την περιγραφή των κλιματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε αρχείο EPW (EnergyPlus Weather File) της Αθήνας. Τα κλιματικά δεδομένα αξιοποιήθηκαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος σκίασης υπό πραγματικές κλιματικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση της ποιότητας θέας πραγματοποιήθηκε μέσω σημείων αναφοράς (reference points) τοποθετημένων σε ύψος 1,20 m από το δάπεδο, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του προτύπου BS EN 17037 για καθιστούς χρήστες. Για την αξιολόγηση της οπτικής θάμβωσης χρησιμοποιήθηκε σημείο παρατήρησης τοποθετημένο σε απόσταση 1,40 m από την υαλοπερατή πρόσοψη.

Η επιλογή των παραπάνω παραμέτρων επέτρεψε τη δημιουργία ενός ελεγχόμενου περιβάλλοντος προσομοίωσης, μέσα στο οποίο διερευνήθηκε συστηματικά η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος σκίασης στις συνθήκες φυσικού φωτισμού, στην ποιότητα της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον και στην οπτική άνεση των χρηστών.

4.2 Παραμετρικό Σύστημα Διάτρητης Σκίασης

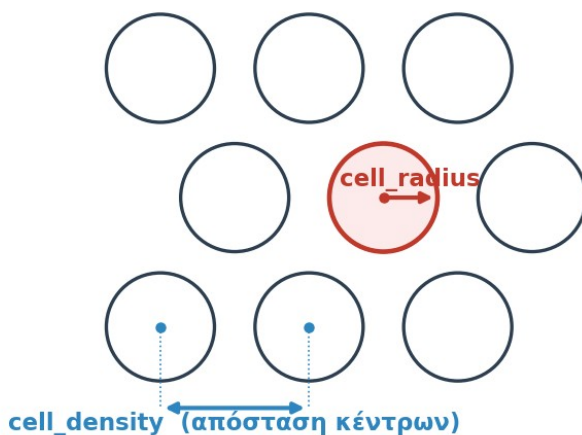
Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελείται από μία εξωτερική διάτρητη επιφάνεια τοποθετημένη μπροστά από την υαλοπερατή νότια όψη. Η γεωμετρία της επιφάνειας δημιουργήθηκε μέσω κανονικού ορθογωνικού πλέγματος στο οποίο εγγράφονται κυκλικά ανοίγματα μεταβλητής διαμέτρου. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ένα παραμετρικό σύστημα σκίασης του οποίου η διαπερατότητα μπορεί να μεταβάλλεται δυναμικά.

Η γεωμετρία του συστήματος περιγράφεται πλήρως από δύο παραμετρικές μεταβλητές (design variables), οι οποίες αποτελούν και τις μεταβλητές σχεδιασμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η πρώτη μεταβλητή (cell_radius) καθορίζει το μέγεθος των κυκλικών ανοιγμάτων και επηρεάζει την ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτισμού. Η δεύτερη μεταβλητή (cell_density) καθορίζει την πυκνότητα, δηλαδή την αμοιβαία απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων, επηρεάζοντας την κατανομή τους και, κατά συνέπεια, τη διέλευση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και τις συνθήκες οπτικής θάμβωσης.

Παραμετρικός ορισμός του κυψελωτού σκιάστρου

Δύο παράμετροι ελέγχουν πλήρως τη γεωμετρία:

$cell_radius$ = μέγεθος ανοίγματος (ποσότητα φωτός) · $cell_density$ = πυκνότητα διάταξης (κατανομή / θάμβωση)



Σχήμα 4.1. Παραμετρικός ορισμός του διάτρητου συστήματος σκίασης. Οι μεταβλητές $cell_radius$ και $cell_density$ καθορίζουν πλήρως τη γεωμετρία του σκιάστρου.

Οι δύο αυτές μεταβλητές αποτέλεσαν τα «γονίδια» (*genomes*) της διαδικασίας εξελικτικής βελτιστοποίησης. Οι τιμές τους μεταβάλλονταν εντός των ορίων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Παράμετρος	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
$cell_radius$	0.025 m	0.20 m
$cell_density$	0.20	0.60

Πίνακας 4.1. Όρια μεταβολής των παραμετρικών μεταβλητών του συστήματος διάτρητης σκίασης.

Η ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των ανοιγμάτων ορίστηκε από τη σχέση:

$$\text{Spacing} = \max(\text{cell_density}, 2.2 \cdot \text{cell_radius})$$

Η παραπάνω σχέση εξασφαλίζει ότι τα ανοίγματα δεν αλληλοεπικαλύπτονται, επιτρέποντας την ανεξάρτητη μεταβολή των δύο παραμέτρων και τη δημιουργία γεωμετρικά έγκυρων λύσεων.

Κάθε διαφορετικός συνδυασμός των μεταβλητών $cell_radius$ και $cell_density$ δημιουργεί μία διαφορετική γεωμετρία σκιάστρου. Καθώς υπάρχουν πάρα πολλοί πιθανοί συνδυασμοί των δύο παραμέτρων, δεν είναι πρακτικά εφικτό να δοκιμαστούν και να αξιολογηθούν όλοι χειροκίνητα. Για τον λόγο αυτό, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιήθηκε μέσω

εξελικτικής βελτιστοποίησης, η οποία επιτρέπει την αυτόματη διερεύνηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών γεωμετρικών διαμορφώσεων.

4.3 Δείκτες Αξιολόγησης Απόδοσης

4.3.1 Φυσικός Φωτισμός

Η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 17037.

Ως βασικός δείκτης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Spatial Daylight Autonomy sDA300/50%.

Αρχικά υπολογίστηκε το Daylight Autonomy (DA) για κάθε σημείο του πλέγματος αισθητήρων. Στη συνέχεια ελέγχθηκε ποια σημεία επιτυγχάνουν φωτισμό τουλάχιστον 300 lux για το 50% των ετήσιων ωρών φυσικού φωτισμού.

Το τελικό daylight score υπολογίστηκε ως:

$$DaylightScore = \frac{N_{DA \geq 50\%}}{N_{total}}$$

όπου:

$N_{DA \geq 50\%}$ είναι ο αριθμός των σημείων που ικανοποιούν το κριτήριο και

N_{total} ο συνολικός αριθμός σημείων του πλέγματος.

Η τιμή κανονικοποιήθηκε στο διάστημα 0–1 ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

4.3.2 Ποιότητα Θέας

Η αξιολόγηση της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία του BS EN 17037.

Η διαδικασία βασίστηκε σε ημισφαιρική εκπομπή ακτίνων από τα σημεία παρατήρησης και στην καταγραφή των ακτίνων που διέρχονται μέσα από το σύστημα σκίασης.

Για την αναπαράσταση των διαφορετικών στρωμάτων θέας δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες γεωμετρικών proxy επιφανειών:

- Sky Layer
- Landscape Layer
- Ground Layer

Τα παραπάνω επίπεδα χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των ακτίνων που εξέρχονται από το άνοιγμα και την αξιολόγηση της ποιότητας θέας σύμφωνα με τη μεθοδολογία του προτύπου BS EN 17037.

Το Sky Layer αναπαριστά το τμήμα του ουρανού που είναι ορατό από το εσωτερικό του χώρου, το Ground Layer αντιστοιχεί στο επίπεδο του εδάφους, ενώ το Landscape Layer αναπαριστά το ενδιάμεσο οριζόντιο περιβάλλον (κτίρια, βλάστηση και λοιπά στοιχεία του αστικού τοπίου).

Το Landscape Layer μοντελοποιήθηκε ως κυλινδρική επιφάνεια μεγάλης ακτίνας γύρω από το κτίριο. Η επιλογή αυτή προέκυψε έπειτα από δοκιμές με επίπεδες επιφάνειες αναφοράς, οι οποίες οδηγούσαν σε υποεκτίμηση του landscape layer για ορισμένες θέσεις παρατηρητή.

Η κυλινδρική αναπαράσταση επιτρέπει τη συνεχή περιγραφή του εξωτερικού περιβάλλοντος σε όλες τις οριζόντιες διευθύνσεις γύρω από το κτίριο και διευκολύνει την αξιολόγηση των δεικτών θέας μέσω της διαδικασίας raycasting.

Η ποιότητα θέας αξιολογήθηκε μέσω τριών δεικτών:

Horizontal Sight Angle (HSA)

Ο δείκτης HSA εκφράζει το διαθέσιμο οριζόντιο εύρος θέασης προς το εξωτερικό περιβάλλον.

View Layers

Ο δείκτης αξιολογεί εάν είναι ορατά τα τρία βασικά επίπεδα του εξωτερικού περιβάλλοντος (ουρανός, τοπίο και έδαφος).

Visibility

Ο δείκτης Visibility εκφράζει το ποσοστό των ακτίνων που διέρχονται επιτυχώς μέσα από το σύστημα σκίασης.

$$\text{Visibility} = \frac{\text{Passing Rays}}{\text{Total Rays}}$$

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για όλα τα σημεία του πλέγματος και στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο κανόνας του 75% που προβλέπεται από το BS EN 17037.

4.3.3 Οπτική Θάμβωση

Η αξιολόγηση της οπτικής άνεσης πραγματοποιήθηκε μέσω του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης οπτικής θάμβωσης σε εσωτερικούς χώρους που φωτίζονται με φυσικό φως.

Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν με χρήση των εργαλείων Honeybee και Radiance, μέσω προσομοιώσεων στιγμιαίας αξιολόγησης (*point-in-time simulations*). Η διαδικασία βασίστηκε σε συγκεκριμένο σημείο παρατήρησης τοποθετημένο σε απόσταση 1,40 m από την υαλοπερατή πρόσοψη, το οποίο αντιπροσωπεύει τη θέση ενός καθιστού χρήστη εντός του χώρου.

Για κάθε υποψήφια γεωμετρία του συστήματος σκίασης υπολογιζόταν μία τιμή DGP, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της οπτικής άνεσης και τον έλεγχο του περιορισμού θάμβωσης κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ως όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης υιοθετήθηκε η τιμή:

$$DGP \leq 0.45$$

σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης του προτύπου BS EN 17037. Τιμές μεγαλύτερες από το όριο αυτό θεωρήθηκαν μη αποδεκτές και χρησιμοποιήθηκαν για την ενεργοποίηση του όρου ποινής της συνάρτησης καταλληλότητας.

Η διαδικασία επιλογής της χρονικής στιγμής αξιολόγησης του DGP παρουσιάζεται στην Ενότητα 4.4, ενώ η πλήρης μεθοδολογική τεκμηρίωση παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

4.4 Αξιολόγηση Οπτικής Θάμβωσης (DGP)

4.4.1 Επιλογή δυσμενούς χρονικής στιγμής αξιολόγησης

Η ενεργοποίηση του περιορισμού θάμβωσης εξαρτάται άμεσα από τη χρονική στιγμή αξιολόγησης του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP). Για νότιο προσανατολισμό, η ανάλυση του κλιματικού αρχείου GRC_Athens IWEC έδειξε ότι η δυσμενέστερη συνθήκη θάμβωσης δεν εμφανίζεται κατά το θερινό μεσημέρι, όταν ο ήλιος βρίσκεται σε μεγάλο ύψος και αναχαιτίζεται ευκολότερα από το σύστημα σκίασης, αλλά κατά τις χειμερινές και ισημερινές μεσημβρινές ώρες, όταν ο χαμηλός ήλιος εισέρχεται πιο άμεσα στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή.

Για τον εντοπισμό της δυσμενέστερης συνθήκης αξιολογήθηκαν αρχικά τρεις χρονικές στιγμές με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης:

- 17 Ιανουαρίου, 13:00
- 21 Μαρτίου, 13:00
- 27 Δεκεμβρίου, 14:00

Η συγκριτική αξιολόγηση των ακραίων διαμορφώσεων του συστήματος σκίασης έδειξε ότι η μέγιστη τιμή DGP εμφανιζόταν σταθερά στις 21 Μαρτίου και ώρα 13:00, γεγονός που επέτρεψε τον χαρακτηρισμό της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής ως της δυσμενέστερης περίπτωσης (*worst-case scenario*).

Κατά συνέπεια, η χρονική στιγμή 21 Μαρτίου, 13:00 χρησιμοποιήθηκε ως μοναδική περίπτωση αξιολόγησης της θάμβωσης κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η επιλογή αυτή μείωσε σημαντικά τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο, χωρίς να επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς αντιστοιχούσε στη δυσμενέστερη συνθήκη που εντοπίστηκε κατά την προκαταρκτική διερεύνηση.

Η πλήρης τεκμηρίωση της ανάλυσης της ηλιακής γεωμετρίας και της διαδικασίας προσδιορισμού της δυσμενέστερης χρονικής στιγμής παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

4.5 Ενεργοποίηση και Έλεγχος του Περιορισμού Θάμβωσης

4.5.1 Το πρόβλημα του αδρανούς περιορισμού

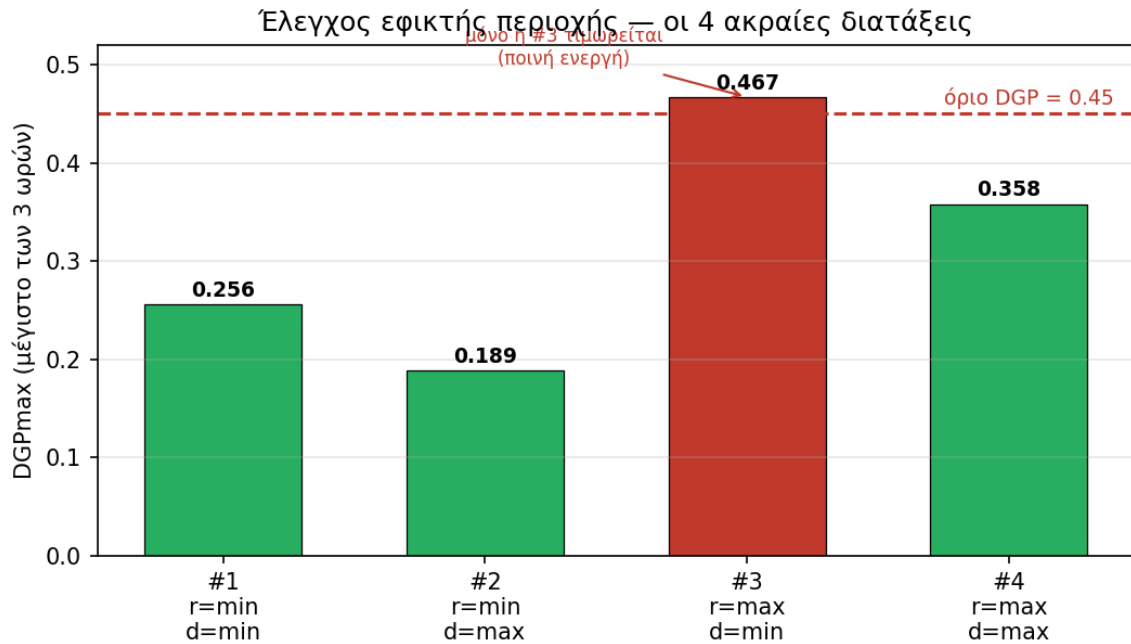
Ένας όρος ποινής έχει νόημα μόνο εφόσον είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί. Αν ο δείκτης DGP παραμένει χαμηλός σε ολόκληρο τον χώρο σχεδιασμού, ο όρος $-1000 \cdot w$ παραμένει διαρκώς μηδενικός και ο περιορισμός καθίσταται αδρανής. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία βελτιστοποίησης εκφυλίζεται σε μονοδιάστατη μεγιστοποίηση του φυσικού φωτισμού και της θέας, οδηγώντας τετριμμένα στην πλέον ανοιχτή γεωμετρία σκίασης. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα θα καθιστούσε το σύστημα σκίασης ουσιαστικά περιττό, καθώς η βέλτιστη λύση θα ταυτιζόταν πρακτικά με την απουσία σκίασης.

4.5.2 Επαλήθευση Εφικτής Περιοχής

Για να διερευνηθεί η λειτουργία του περιορισμού θάμβωσης και να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη εφικτών λύσεων εντός του χώρου σχεδιασμού, αξιολογήθηκαν οι τέσσερις ακραίοι συνδυασμοί των παραμέτρων *cell_radius* και *cell_density*. Οι διαμορφώσεις αυτές αντιστοιχούν στις τέσσερις «γωνίες» του χώρου αναζήτησης και επιτρέπουν την προκαταρκτική διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος πριν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

# διάταξη	radius	density	DGPmax	Κατάσταση
1	0.025 (min)	0.20 (min)	0.256	εφικτή (< 0.45)
2	0.025 (min)	0.60 (max)	0.189	εφικτή (< 0.45)
3	0.20 (max)	0.20 (min)	0.467	μη-εφικτή (> 0.45) — ποινή ενεργή
4	0.20 (max)	0.60 (max)	0.358	εφικτή (< 0.45)

Πίνακας 4.2. Μέγιστη τιμή DGP (DGPmax) για τις τέσσερις ακραίες διαμορφώσεις του χώρου σχεδιασμού σε σχέση με το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης (DGP = 0.45).



Σχήμα 4.2. DGPmax των τεσσάρων ακραίων διατάξεων ως προς το όριο 0.45. Ο περιορισμός θάμβωσης ενεργοποιείται επιλεκτικά μόνο στη διάταξη #3, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη εφικτής ενδιάμεσης περιοχής.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο περιορισμός θάμβωσης δεν παραμένει αδρανής, καθώς ενεργοποιείται μόνο στη διάταξη #3, όπου η τιμή DGPmax υπερβαίνει το όριο των 0.45, ενώ οι υπόλοιπες τρεις διαμορφώσεις παραμένουν εφικτές. Η επιλεκτική αυτή ενεργοποίηση επιβεβαιώνει την ύπαρξη πραγματικής ενδιάμεσης εφικτής περιοχής εντός του χώρου σχεδιασμού, στην οποία ο περιορισμός θάμβωσης επηρεάζει ουσιαστικά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ουσιαστικό και μη τετριμμένο, καθώς η βέλτιστη λύση δεν προκύπτει από κάποια ακραία διαμόρφωση αλλά από την εξισορρόπηση των απαιτήσεων φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης.

4.6 Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Η παρούσα έρευνα αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά αντικρουόμενα κριτήρια, το οποίο επιλύεται ως μονοκριτηριακό μέσω σταθμισμένου αθροίσματος (single-objective scalarization), με στόχο την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ενός παραμετρικού διάτρητου συστήματος σκίασης με κυκλικά ανοίγματα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στην ταυτόχρονη ικανοποίηση τριών απαιτήσεων οι οποίες, εκ φύσεως, συγκρούονται μεταξύ τους:

- Φυσικός φωτισμός — επαρκής διείσδυση φυσικού φωτός στο εσωτερικό του χώρου, η οποία αξιολογείται μέσω του δείκτη daylight score (sDA300/50%), σύμφωνα με το BS EN 17037 (§5.1).
- Θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον — διατήρηση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, η οποία αξιολογείται μέσω των δεικτών Horizontal Sight Angle (HSA), View Layers και Visibility, σύμφωνα με τα κριτήρια του Πίνακα A.5 του BS EN 17037.
- Αποφυγή θάμβωσης — περιορισμός της πιθανότητας εμφάνισης οπτικής δυσφορίας λόγω υπερβολικής φωτεινότητας, η οποία αξιολογείται μέσω του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP), σύμφωνα με τα κριτήρια του Πίνακα A.7.

Η σύγκρουση μεταξύ των παραπάνω κριτηρίων είναι θεμελιώδης. Ένα περισσότερο ανοιχτό σύστημα σκίασης επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση φυσικού φωτισμού και βελτιώνει την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, αυξάνει όμως παράλληλα την πιθανότητα εμφάνισης θάμβωσης. Αντίθετα, ένα πυκνότερο και λιγότερο διαπερατό σύστημα σκίασης μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τη θάμβωση, περιορίζοντας όμως τόσο τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού όσο και την ποιότητα της θέας.

Κατά συνέπεια, το ζητούμενο της διαδικασίας δεν είναι η μεγιστοποίηση ενός μεμονωμένου δείκτη απόδοσης, αλλά η εύρεση ενός σημείου ισορροπίας μεταξύ αντικρουόμενων απαιτήσεων. Η βέλτιστη λύση ορίζεται ως εκείνη που επιτυγχάνει τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης.

Για την αξιολόγηση κάθε υποψήφιας γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες υπολογιστικές αλυσίδες, οι οποίες συνδυάζονταν αποκλειστικά μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας.

- Αλυσίδα Α – Φυσικός Φωτισμός και Οπτική Θάμβωση (Radiance/Honeybee)

Η πρώτη αλυσίδα βασιζόταν σε προσομοιώσεις φωτισμού μέσω των εργαλείων Honeybee και του υπολογιστικού πυρήνα Radiance. Μέσω αυτής υπολογίζονταν ο δείκτης daylight score (sDA300/50%) και ο δείκτης Daylight Glare Probability (DGP), οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού και της οπτικής άνεσης.

- Αλυσίδα Β – Ποιότητα Θέας (Geometric Raycasting)

Η δεύτερη αλυσίδα βασιζόταν σε γεωμετρικό raycasting και χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της ποιότητας της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον. Μέσω αυτής υπολογίζονταν οι δείκτες Horizontal Sight Angle (HSA), View Layers και Visibility.

Ο διαχωρισμός των δύο αλυσίδων ήταν ουσιώδης. Τα γεωμετρικά proxy στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της θέας (Sky Layer, Landscape Layer και Ground Layer) λειτουργούσαν αποκλειστικά ως επιφάνειες αναφοράς για το raycasting και δεν συμμετείχαν στο υπολογιστικό μοντέλο Radiance. Με τον τρόπο αυτό αποφεύχθηκε η παρεμπόδιση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους υπολογισμούς φυσικού φωτισμού και οπτικής θάμβωσης.

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου Galapagos. Η συνολική διαδικασία της παραμετρικής βελτιστοποίησης παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα ροής της αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης: από τις παραμέτρους, μέσω των δύο αλυσίδων αξιολόγησης και της fitness function, στον εξελικτικό βρόχο του Galapagos έως τη σύγκλιση.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινά από τον ορισμό των δύο παραμετρικών μεταβλητών (cell_radius και cell_density), οι οποίες αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού (design variables) της εξελικτικής διαδικασίας. Στο πλαίσιο του Galapagos, οι δύο αυτές μεταβλητές αντιστοιχούν στα γονίδια (genes) κάθε υποψήφιας λύσης. Κάθε διαφορετικός συνδυασμός των τιμών τους δημιουργεί μία νέα γεωμετρία του συστήματος σκίασης, η οποία στη συνέχεια αξιολογείται αυτόματα ως προς τον φυσικό φωτισμό, την οπτική θάμβωση και την ποιότητα θέας μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function). Στη συνέχεια, ο εξελικτικός αλγόριθμος Galapagos δημιουργεί νέους συνδυασμούς των παραμέτρων και επαναλαμβάνει τη διαδικασία έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Βασικός περιορισμός του Galapagos είναι ότι δέχεται μία και μόνο τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness value) για κάθε υποψήφια λύση και δεν διαθέτει ανεξάρτητο μηχανισμό επιβολής περιορισμών (constraints). Για τον λόγο αυτό όλα τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς και οι απαιτούμενοι περιορισμοί, ενσωματώθηκαν σε μία ενιαία συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία παρουσιάζεται στην Ενότητα 4.7.

Οι βασικές ρυθμίσεις του αλγορίθμου ήταν:

- Evolutionary Solver
- Population = 50
- Initial Boost = 2
- Inbreeding = 75%
- Objective = Maximize

Η διαδικασία αναζήτησης στόχευε στον εντοπισμό των συνδυασμών των παραμέτρων που επιτυγχάνουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης.

Η πορεία της βελτιστοποίησης καθορίζεται από δύο αλληλοσυμπληρούμενους παράγοντες. Ο μελετητής δεν επιλέγει άμεσα τις βέλτιστες λύσεις, αλλά ορίζει τα κριτήρια αξιολόγησης, τα βάρη τους και τους περιορισμούς μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας. Ο αλγόριθμος Galapagos χρησιμοποιεί αυτά τα κριτήρια για να επιλέγει και να εξελίσσει αυτόματα τις γεωμετρίες με την καλύτερη απόδοση σε κάθε γενιά. Με άλλα λόγια, ο μελετητής καθορίζει τι θεωρείται βέλτιστη λύση, ενώ ο Galapagos αναλαμβάνει την αναζήτησή της.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εκτελέστηκαν 30 γενιές με πληθυσμό 50 λύσεων ανά γενιά, με αποτέλεσμα να αξιολογηθούν περίπου 1.500 διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η αυτοματοποιημένη διερεύνηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών λύσεων, χωρίς να απαιτείται η χειροκίνητη δημιουργία και αξιολόγηση όλων των εναλλακτικών γεωμετρικών λύσεων.

4.7 Συνάρτηση Καταλληλότητας (Fitness Function)

Η διαδικασία βελτιστοποίησης βασίστηκε σε μία ενιαία συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function), η οποία συνδυάζει τους δείκτες φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης σε μία συνολική τιμή απόδοσης.

Η συνάρτηση καταλληλότητας διαμορφώθηκε με βάση τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης του προτύπου BS EN 17037 για τον φυσικό φωτισμό και την ποιότητα θέας. Οι επιμέρους όροι της συνάρτησης αντιστοιχούν σε δείκτες που προκύπτουν άμεσα από τη μεθοδολογία του προτύπου, όπως η διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού (daylight availability), το οριζόντιο εύρος θέας (Horizontal Sight Angle – HSA) και η ορατότητα των στρωμάτων θέας (View Layers), ενώ συμπληρώνονται από τον δείκτη Visibility και τον περιορισμό οπτικής θάμβωσης (Daylight Glare Probability – DGP), ώστε να αποτυπώνεται συνολικά η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος σκίασης.

Η τελική συνάρτηση καταλληλότητας ορίστηκε ως:

$$F = 0.40 \cdot x + 0.25 \cdot u + 0.15 \cdot y + 0.20 \cdot z - 1000 \cdot w$$

όπου:

Σύμβολο	Μέγεθος	Εύρος	Βάρος
x	daylight score (sDA / 100)	0–1	0.40
u	visibility (transmittance θέας)	0–1	0.25
y	view width (HSA / 54, με όριο 1)	0–1	0.15
z	view layers (στρώματα θέας)	0–1	0.20
w	glare penalty = max(0, DGP – 0.45)	≥ 0	–1000

Πίνακας 4.3. Μεταβλητές, εύρη τιμών και βάρη της συνάρτησης καταλληλότητας (Fitness Function).

Η παραπάνω διατύπωση επιτρέπει την ταυτόχρονη αξιολόγηση των βασικών κριτηρίων περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος σκίασης μέσω μίας ενιαίας τιμής καταλληλότητας. Οι δείκτες φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας συνεισφέρουν θετικά στη συνάρτηση, ενώ η οπτική θάμβωση εισάγεται ως όρος ποινής όταν παραβιάζεται το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία βελτιστοποίησης επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του φυσικού φωτισμού και της ποιότητας θέας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι τελικές λύσεις παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων θάμβωσης.

4.7.1 Λογική Δόμησης της Συνάρτησης Καταλληλότητας

Η συνάρτηση καταλληλότητας δεν αποτελεί ένα απλό άθροισμα δεικτών, αλλά διαμορφώνεται από δύο εννοιολογικά διακριτές κατηγορίες όρων.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους θετικούς σταθμισμένους όρους, οι οποίοι αντιστοιχούν στα επιθυμητά χαρακτηριστικά του εσωτερικού περιβάλλοντος και μεγιστοποιούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο φυσικός φωτισμός (daylight score), η ορατότητα προς το εξωτερικό περιβάλλον (visibility), το οριζόντιο εύρος θέας (HSA) και τα στρώματα θέας (view layers).

Τα βάρη των τεσσάρων αυτών όρων αθροίζουν σε 1.0 ($0.40 + 0.25 + 0.15 + 0.20$), ώστε το θετικό τμήμα της συνάρτησης να παραμένει κανονικοποιημένο στο διάστημα $[0,1]$. Η κατανομή των βαρών αντανακλά τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου. Ο φυσικός φωτισμός λαμβάνει το μεγαλύτερο βάρος (0.40), καθώς αποτελεί το βασικό κριτήριο επάρκειας ενός χώρου εργασίας. Ο δείκτης Visibility λαμβάνει βάρος 0.25, καθώς εκφράζει τον βαθμό ανεμπόδιστης οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον. Οι δείκτες View Layers και HSA λαμβάνουν βάρη 0.20 και 0.15 αντίστοιχα, καθώς αντιπροσωπεύουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της θέας σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 17037.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τον όρο ποινής που σχετίζεται με την οπτική θάμβωση. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους δείκτες, ο δείκτης DGP δεν επιδιώκεται να μεγιστοποιηθεί αλλά να παραμένει κάτω από το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης. Για τον λόγο αυτό εισάγεται στη συνάρτηση ως αρνητικός όρος ποινής, ο οποίος ενεργοποιείται μόνο όταν η τιμή του DGP υπερβαίνει το όριο των 0.45.

4.7.2 Διαχείριση της Θάμβωσης ως Περιορισμού

Η θάμβωση αντιμετωπίστηκε ως ο μοναδικός αυστηρός περιορισμός (hard constraint) της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος Galapagos δεν διαθέτει ανεξάρτητο μηχανισμό επιβολής περιορισμών (constraints), αλλά δέχεται αποκλειστικά μία αριθμητική τιμή καταλληλότητας για κάθε υποψήφια λύση.

Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος εξωτερικής ποινής (penalty method), η οποία αποτελεί καθιερωμένη προσέγγιση για την ενσωμάτωση περιορισμών σε εξελικτικούς αλγορίθμους που λειτουργούν με μία μόνο τιμή fitness. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η παραβίαση του ορίου αποδεκτής οπτικής άνεσης μετατρέπεται σε αρνητικό όρο της συνάρτησης καταλληλότητας.

Η μεταβλητή ποινής ορίστηκε ως:

$$w = \max(0, DGP - 0.45)$$

Η τιμή της μεταβλητής παραμένει μηδενική όταν ο δείκτης DGP βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων και γίνεται θετική μόνο όταν αυτά παραβιάζονται. Ως όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης υιοθετήθηκε η τιμή $DGP = 0.45$, σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης του προτύπου BS EN 17037.

Ο συντελεστής ποινής 1000 επιλέχθηκε ώστε ακόμη και μικρές υπερβάσεις του ορίου να οδηγούν σε σημαντική μείωση της συνολικής τιμής fitness, καθιστώντας τις αντίστοιχες λύσεις πρακτικά μη αποδεκτές κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Με τον τρόπο αυτό η θάμβωση λειτουργεί ως ο μοναδικός αυστηρός περιορισμός της διαδικασίας, ενώ οι δείκτες φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας ενσωματώνονται ως θετικοί σταθμισμένοι όροι που βελτιστοποιούνται ταυτόχρονα.

Η διατύπωση αυτή επιτρέπει στον αλγόριθμο να μεγιστοποιεί τον φυσικό φωτισμό και την ποιότητα θέας υπό τον περιορισμό της μη υπέρβασης του ορίου θάμβωσης.

4.8 Ανεξαρτησία των Παραμέτρων Σχεδιασμού

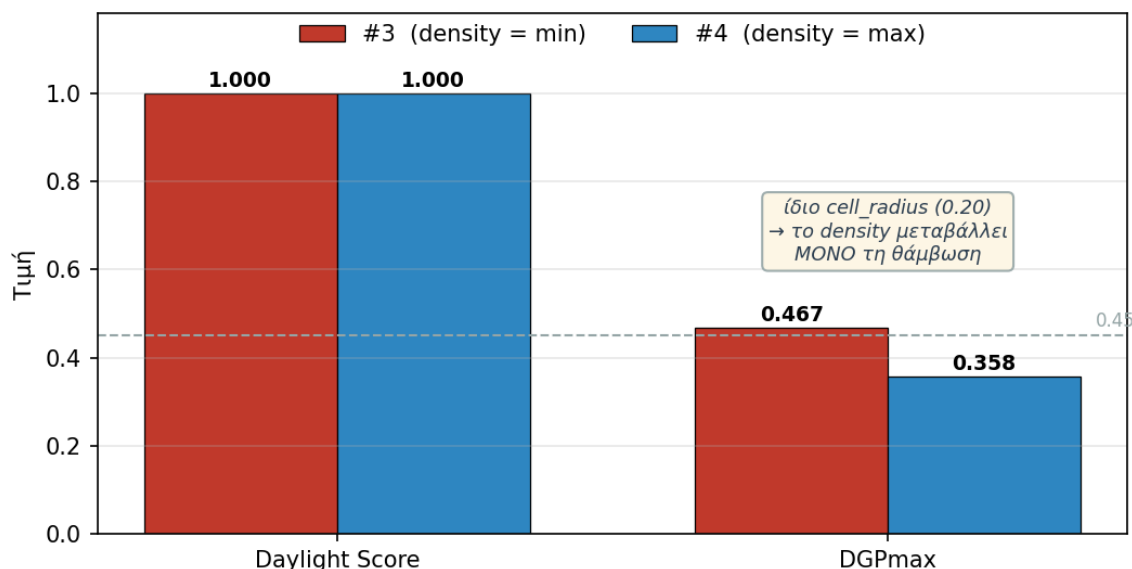
Ένα ουσιώδες μεθοδολογικό ζήτημα είναι κατά πόσον οι δύο παράμετροι (radius, density) ελέγχουν ανεξάρτητες ιδιότητες του σκιάστρου ή απλώς διαφορετικές εκφράσεις του ίδιου μεγέθους (της συνολικής «διαφάνειας»). Στη δεύτερη περίπτωση, το πρόβλημα θα ήταν ουσιαστικά μονοδιάστατο (collinear) και η χρήση εξελικτικού αλγορίθμου δύο παραμέτρων δεν θα είχε νόημα.

Η σύγκριση των διατάξεων #3 και #4 απαντά στο ερώτημα. Και οι δύο έχουν ταυτόσημο cell_radius (0.20) και ταυτόσημο daylight score (1.0)· διαφέρουν μόνο ως προς το cell_density:

διάταξη	radius	density	daylight	DGPmax
#3	0.20	0.20 (min)	1.0	0.467
#4	0.20	0.60 (max)	1.0	0.358

Πίνακας 4.4. Σύγκριση των διατάξεων #3 και #4 για τη διερεύνηση της ανεξαρτησίας των παραμέτρων σχεδιασμού.

Ανεξαρτησία παραμέτρων: ίδιο radius & daylight, διαφορετικό DGP



Σχήμα 4.4. Σύγκριση διατάξεων #3 και #4. Με ταυτόσημο cell_radius και daylight score, το cell_density μεταβάλλει αποκλειστικά τη θάμβωση (DGP), αποδεικνύοντας τη μη-συγγραμμικότητα των δύο παραμέτρων.

Παρά την ταυτότητα radius και φωτισμού, το DGP μεταβάλλεται σημαντικά (0.467 έναντι 0.358). Αυτό αποδεικνύει ότι το cell_density επηρεάζει τη θάμβωση ανεξάρτητα από το άνοιγμα και τον φωτισμό: μεταβάλλει την κατανομή και τη διάταξη των ανοιγμάτων με

τρόπο που τροποποιεί τη δίοδο του άμεσου ηλιακού φωτός προς τον παρατηρητή, χωρίς να μεταβάλλει τη συνολική ποσότητα φωτός.

Η συνέπεια είναι θεμελιώδης για τη μεθοδολογία: οι δύο παράμετροι δεν είναι συγγραμμικές. Το πρόβλημα είναι γνήσια δισδιάστατο, και ο εξελικτικός αλγόριθμος έχει πραγματικό δισδιάστατο χώρο να εξερευνήσει — όχι μια απλή μονοδιάστατη σάρωση.

Η μετατόπιση του βέλτιστου το επιβεβαιώνει με τον πιο άμεσο τρόπο. Πριν την ορθή ενεργοποίηση του περιορισμού θάμβωσης, βέλτιστη ήταν τετριμμένα η πλέον ανοιχτή διάταξη #3 (μέγιστος φωτισμός & visibility). Μετά την ενεργοποίηση, η #3 τιμωρείται και το βέλτιστο μετατοπίζεται στη #4 — δηλαδή σε μια διάταξη που διατηρεί τον μέγιστο φωτισμό αλλά ρυθμίζει την πυκνότητα ώστε να παραμείνει εντός του ορίου θάμβωσης. Αυτή η μετατόπιση εκφράζει ακριβώς τον στόχο του σχεδιασμού σκιάστρου:

«Άνοιξε όσο το δυνατόν περισσότερο για φωτισμό και θέα, χωρίς όμως να ξεπεραστεί το όριο της οπτικής δυσφορίας.»

Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι το `cell_density` λειτουργεί ως ανεξάρτητος μηχανισμός ελέγχου της θάμβωσης και ότι οι δύο παράμετροι δεν είναι συγγραμμικές. Συνεπώς, το πρόβλημα είναι γνήσια δισδιάστατο και δικαιολογεί τη χρήση δισδιάστατης παραμετρικής βελτιστοποίησης.

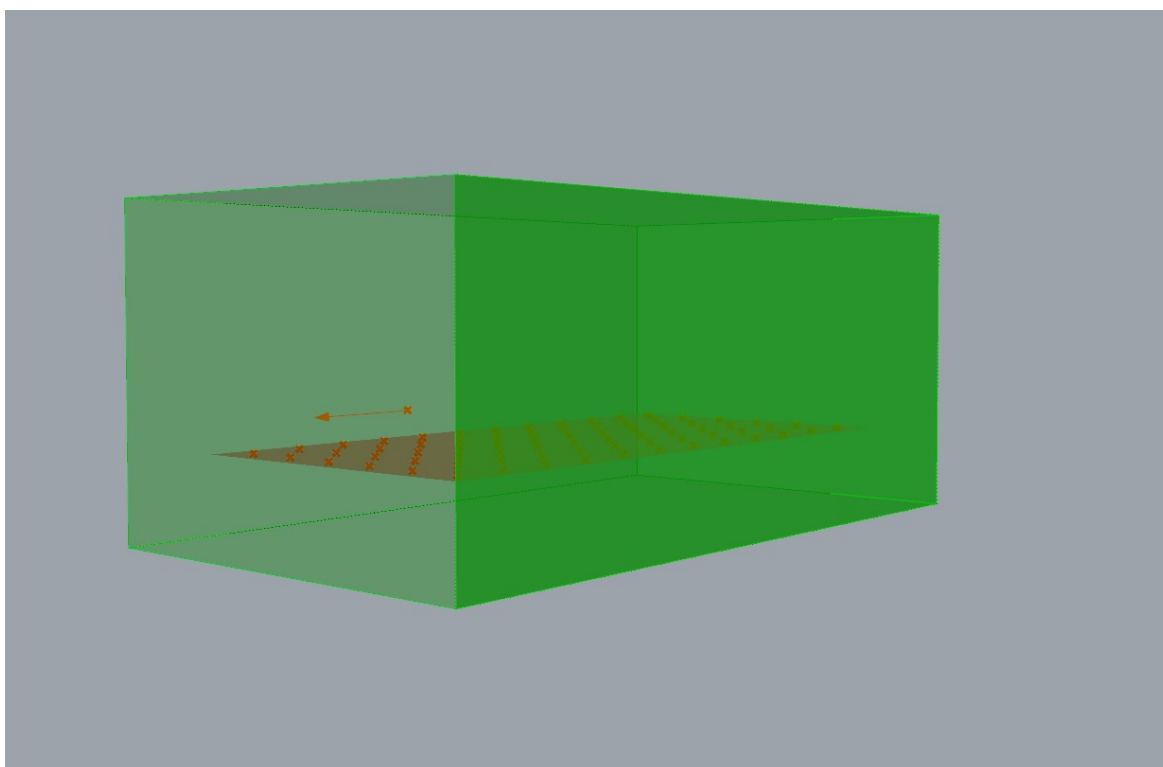
Η πλήρης μεθοδολογική τεκμηρίωση και τα συγκριτικά αποτελέσματα που τεκμηριώνουν την ανεξαρτησία των παραμέτρων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

5. Αποτελέσματα και Συζήτηση

5.1 Περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης

Πριν από την εφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αξιολογήθηκε μία περίπτωση αναφοράς (baseline) χωρίς σύστημα σκίασης, ώστε να αποτελέσει τη βάση σύγκρισης για τις βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν στη συνέχεια. Η περίπτωση αυτή επιτρέπει την απομόνωση της συνεισφοράς του συστήματος σκίασης και τη σαφή κατανόηση του προβλήματος που καλείται να επιλύσει η διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για τις ίδιες συνθήκες προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στη βελτιστοποίηση, δηλαδή για την ίδια γεωμετρία χώρου ($7 \times 4 \times 3$ m), τον ίδιο νότιο προσανατολισμό, την ίδια θέση παρατηρητή, το ίδιο πλέγμα αισθητήρων και τα ίδια κλιματικά δεδομένα της Αθήνας. Ως χρονική στιγμή αξιολόγησης επιλέχθηκε η 21η Μαρτίου στις 13:00, η οποία είχε προσδιοριστεί κατά την προκαταρκτική διερεύνηση ως η δυσμενέστερη περίπτωση (worst-case scenario) ως προς τη θάμβωση.



Σχήμα 5.1. Γεωμετρία του μοντέλου αναφοράς (baseline) χωρίς εξωτερικό σύστημα σκίασης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η απουσία συστήματος σκίασης επιτρέπει τη μέγιστη δυνατή οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ο δείκτης Visibility λαμβάνει την τιμή 1, γεγονός που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο μεταξύ του παρατηρητή και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παράλληλα, οι δείκτες View Width και View Layers ικανοποιούνται πλήρως, υποδηλώνοντας ότι η ποιότητα της θέας παραμένει στο μέγιστο δυνατό επίπεδο.

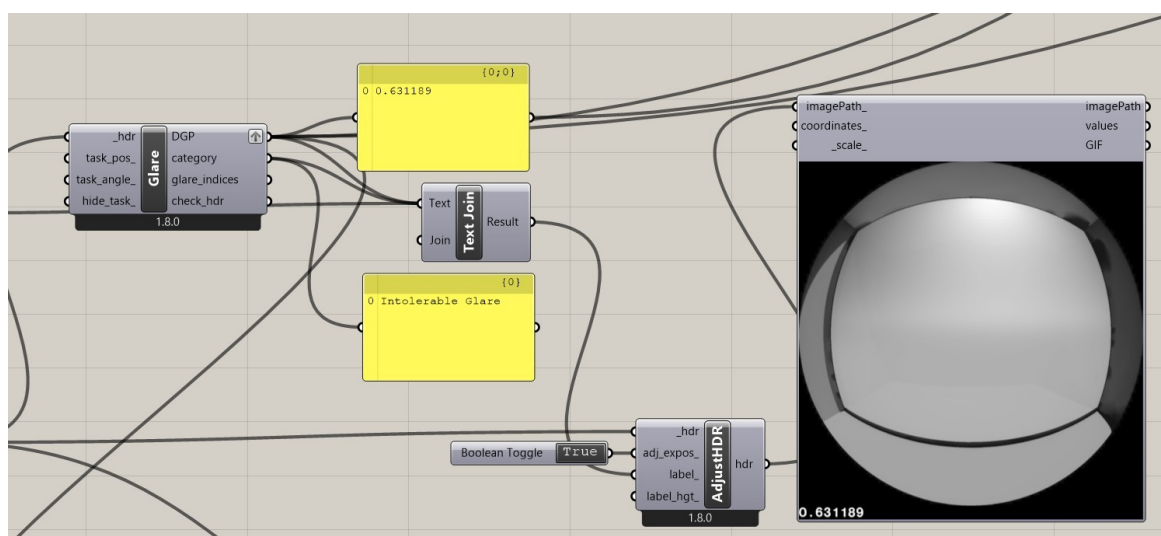
Αντίστοιχα, η αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού έδειξε ιδιαίτερα υψηλές τιμές Daylight Autonomy σε όλα τα σημεία του πλέγματος αισθητήρων. Οι επιμέρους τιμές κυμάνθηκαν

μεταξύ 91,69% και 97,38%, με μέση τιμή 95,39%, γεγονός που οδήγησε στην πλήρη ικανοποίηση του δείκτη Daylight (Daylight score = 1). Ως εκ τούτου, η περίπτωση αναφοράς μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει το άνω όριο επίδοσης ως προς τον φυσικό φωτισμό και την ποιότητα θέας.

Ωστόσο, η αξιολόγηση της οπτικής άνεσης ανέδειξε σημαντικά προβλήματα θάμβωσης. Η μέγιστη τιμή του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP) υπολογίστηκε ίση με 0,631, υπερβαίνοντας σημαντικά το όριο $DGP = 0,45$ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ως ανώτατο αποδεκτό όριο οπτικής άνεσης. Σύμφωνα με το BS EN 17037 η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην κατηγορία «Μη Ανεκτή Θάμβωση» (Intolerable Glare), γεγονός που υποδηλώνει ότι η άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες για τον χρήστη του χώρου.

Δείκτης επίδοσης	Περίπτωση Αναφοράς (χωρίς σκίαση)
Daylight score	1,00
Μέση τιμή Daylight Autonomy	95,39%
View Width	1,00
View Layers	1,00
Visibility	1,00
DGPmax (21/03, 13:00)	0,631
Κατηγορία θάμβωσης	Μη ανεκτή (Intolerable Glare)
Όρος ποινης θάμβωσης	Ενεργός – μη αποδεκτή λύση

Πίνακας 5.1. Δείκτες επίδοσης της περίπτωσης αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης.



Σχήμα 5.2. Αξιολόγηση της οπτικής θάμβωσης για την περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης (DGP = 0,631).

Τα αποτελέσματα της περίπτωσης αναφοράς συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Δείκτης	Τιμή
DGP	0,63
Visibility	1
View Width	1
View Layers	1
Daylight score	1

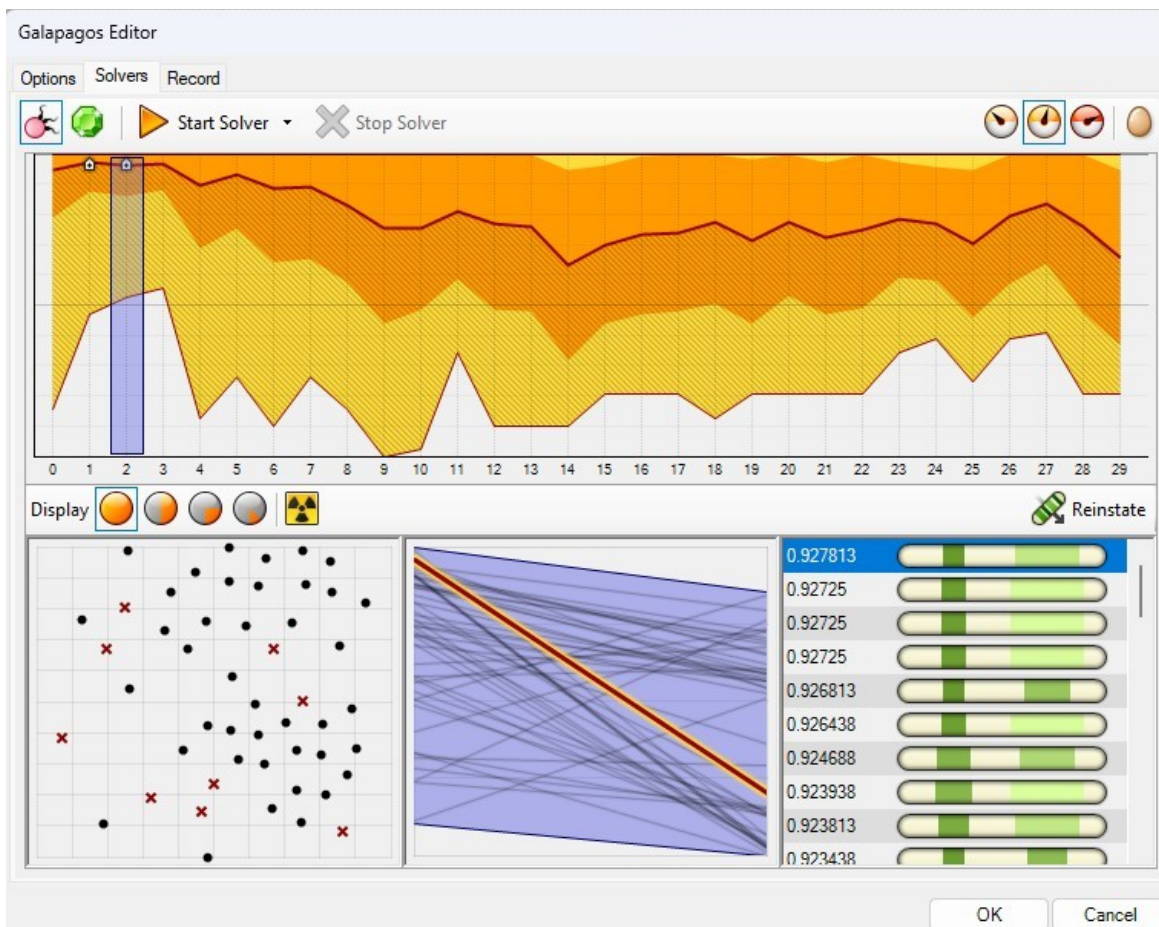
Πίνακας 5.2. Τιμές των δεικτών απόδοσης για την περίπτωση αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης (21 Μαρτίου, 13:00).

Η περίπτωση αναφοράς αναδεικνύει με σαφήνεια τη μη τετριμμένη φύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Χωρίς σκίαση, ο φυσικός φωτισμός και η ποιότητα θέας βρίσκονται ήδη στο μέγιστο δυνατό επίπεδο, όμως η θάμβωση καθιστά τον χώρο οπτικά μη αποδεκτό. Συνεπώς, ο στόχος της βελτιστοποίησης δεν είναι η περαιτέρω αύξηση του daylight ή της θέας, αλλά η διατήρηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μέρους τους, μειώνοντας ταυτόχρονα τη θάμβωση κάτω από το όριο $DGP = 0,45$. Με άλλα λόγια, η περίπτωση αναφοράς ορίζει ταυτόχρονα το άνω όριο επίδοσης για daylight και view και τη συνθήκη αστοχίας ως προς την οπτική άνεση, την οποία καλείται να διορθώσει το βελτιστοποιημένο σύστημα σκίασης.

5.2 Πορεία και σύγκλιση της βελτιστοποίησης

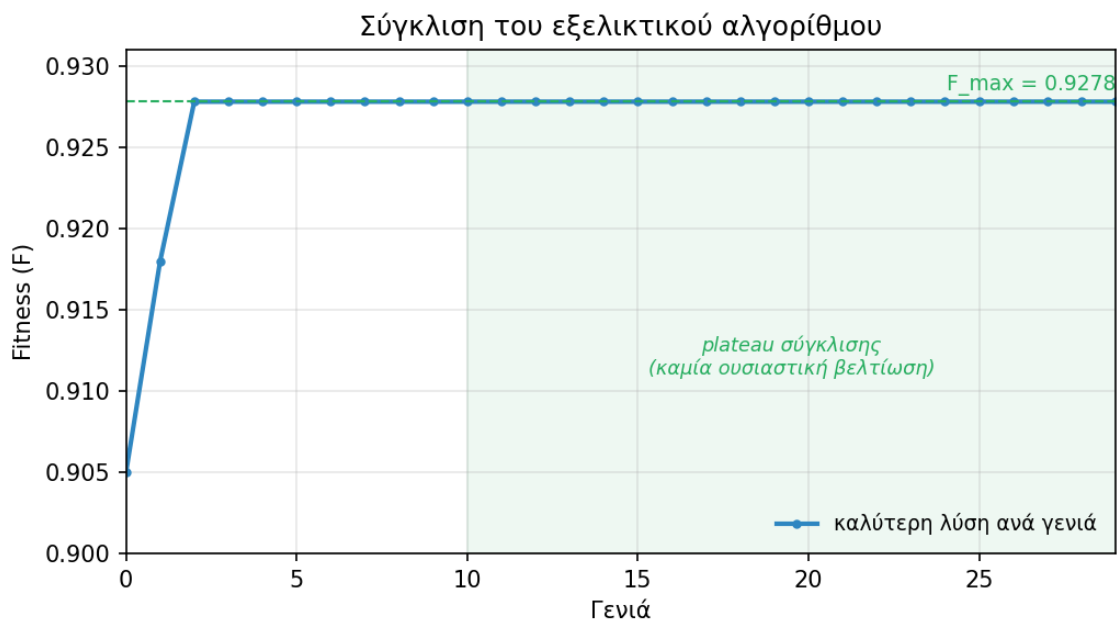
Η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εξελικτικού επιλύτη Galapagos, ο οποίος αναζητά επαναληπτικά συνδυασμούς των μεταβλητών σχεδιασμού με στόχο τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, κάθε υποψήφια λύση αξιολογείται ως προς τους δείκτες φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης, ενώ οι αποδοτικότερες λύσεις διατηρούνται και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέων γενεών.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εκτελέστηκαν 30 γενιές με πληθυσμό 50 λύσεων ανά γενιά, με αποτέλεσμα να αξιολογηθούν περίπου 1.500 διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις. Ο εξελικτικός αλγόριθμος εκτελέστηκε για επαρκή αριθμό γενεών, ώστε να διασφαλιστεί ότι η αναζήτηση δεν τερματίστηκε πρόωρα και ότι το τελικό αποτέλεσμα αντιστοιχεί σε σταθεροποιημένη λύση του σχεδιαστικού χώρου.



Σχήμα 5.3. Περιβάλλον του επιλύτη Galapagos κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει το περιβάλλον του εξελικτικού επιλύτη Galapagos κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Σε κάθε γενιά ο αλγόριθμος δημιουργεί νέους συνδυασμούς των παραμέτρων σχεδιασμού, αξιολογεί την απόδοσή τους μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας και διατηρεί τις λύσεις με τη μεγαλύτερη τιμή fitness για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς.



Σχήμα 5.4. Ιστορικό σύγκλισης του αλγορίθμου Galapagos και εξέλιξη της μέγιστης τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4, κατά τις πρώτες γενεές παρατηρείται ταχεία βελτίωση της τιμής καταλληλότητας, καθώς ο αλγόριθμος εξερευνά τον χώρο αναζήτησης και απομακρύνεται από λιγότερο αποδοτικές διαμορφώσεις. Στη συνέχεια, ο ρυθμός βελτίωσης μειώνεται σημαντικά και η μέγιστη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας σταθεροποιείται. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί χαρακτηριστική ένδειξη σύγκλισης ενός εξελικτικού αλγορίθμου και υποδηλώνει ότι η διαδικασία έχει εντοπίσει την περιοχή του βέλτιστου σχεδιασμού.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι δύο υψηλότερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας αντιστοιχούσαν σε δύο διαφορετικές γεωμετρικές λύσεις. Οι αντίστοιχες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness) ήταν 0,927813 και 0,927250 αντίστοιχα, με διαφορά μόλις 0,000563 (περίπου 0,06%), γεγονός που δείχνει ότι, παρότι οι γεωμετρίες διαφέρουν, παρουσιάζουν πρακτικά την ίδια συνολική απόδοση. Επιπλέον, μετά την εμφάνιση των συγκεκριμένων λύσεων δεν παρατηρήθηκε περαιτέρω βελτίωση της μέγιστης τιμής fitness, παρά τη δημιουργία πρόσθετων γενεών και την αξιολόγηση νέων συνδυασμών παραμέτρων.

Ο συνδυασμός της σταθεροποίησης της καλύτερης τιμής καταλληλότητας, της εμφάνισης περισσότερων της μίας σχεδόν ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων και της απουσίας περαιτέρω βελτίωσης στις επόμενες γενεές αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης

έχει συγκλίνει. Συνεπώς, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά του βέλτιστου ή σχεδόν βέλτιστου σημείου του εξεταζόμενου χώρου σχεδιασμού.

5.3 Βέλτιστες λύσεις

Η διαδικασία βελτιστοποίησης οδήγησε σε δύο σχεδόν ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις, οι οποίες παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας μεταξύ όλων των εξεταζόμενων διαμορφώσεων. Παρότι οι γεωμετρικές τους παράμετροι δεν είναι ταυτόσημες, οι δύο λύσεις εμφανίζουν πολύ παρόμοια συνολική απόδοση, γεγονός που υποδηλώνει ότι βρίσκονται στην ίδια περιοχή του βέλτιστου σχεδιαστικού χώρου.

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού (cell radius και cell density), καθώς και οι αντίστοιχες τιμές των δεικτών που συμμετέχουν στη συνάρτηση καταλληλότητας.

Παράμετρος	Λύση 1	Λύση 2
Fitness	0,928	0,927
Cell radius (m)	0,193	0,184
Cell density	0,281	0,213
DGPmax	0,448	0,449
Daylight	1	1
View width	1	1
View layers	1	1
Glare penalty	0	0
Visibility	0,711	0,709

Πίνακας 5.3. Μεταβλητές σχεδιασμού και δείκτες επίδοσης των δύο βέλτιστων λύσεων.

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις οι δείκτες φυσικού φωτισμού (Daylight), εύρους θέας (View Width) και στρωμάτων θέας (View Layers) λαμβάνουν τη μέγιστη δυνατή τιμή. Παράλληλα, η τιμή του δείκτη θάμβωσης DGPmax παραμένει οριακά χαμηλότερη από το όριο των 0,45, με αποτέλεσμα ο όρος ποινής να είναι μηδενικός και στις δύο λύσεις. Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στη συνολική τιμή fitness οφείλονται κυρίως στις διαφορές του δείκτη Visibility και στις αντίστοιχες γεωμετρικές παραμέτρους του σκιάστρου.

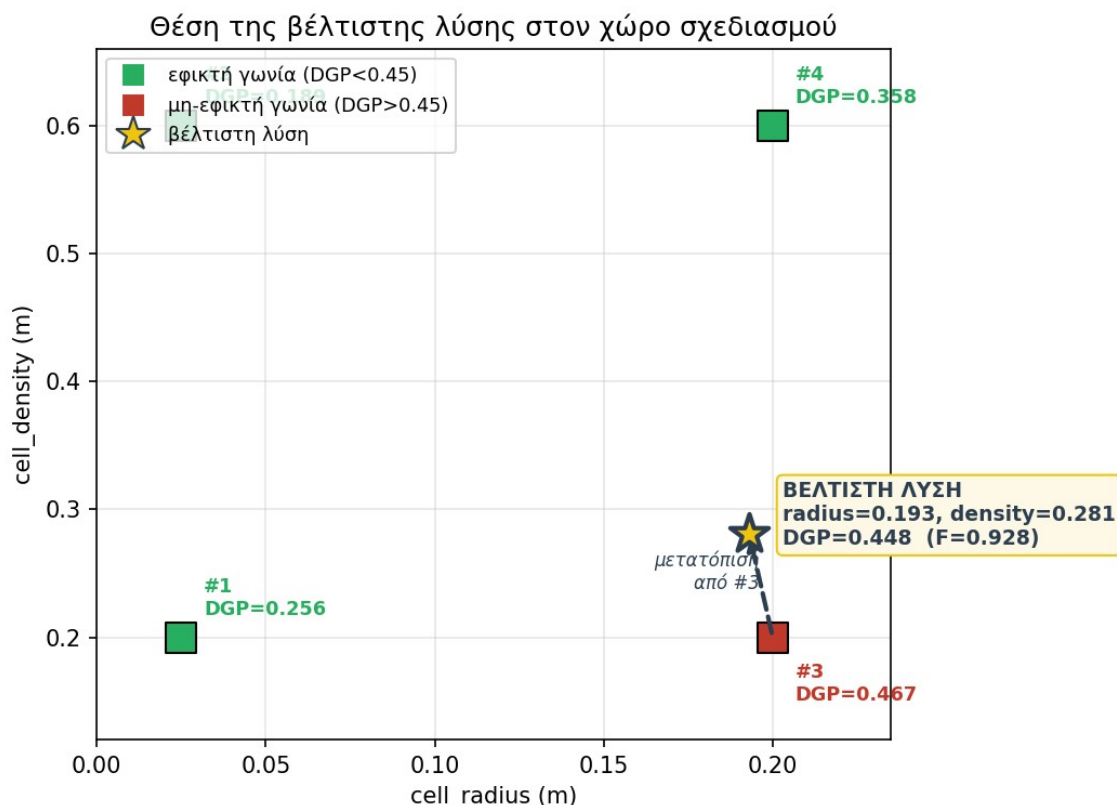
Η ανάλυση της συμβολής των επιμέρους δεικτών και η ερμηνεία των διαφορών μεταξύ των δύο λύσεων παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

5.4 Ανάλυση του βέλτιστου αποτελέσματος

Από τις γεωμετρικές διαμορφώσεις που αξιολογήθηκαν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, ως τελική βέλτιστη λύση επιλέχθηκε εκείνη που παρουσίασε τη μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Η λύση αυτή αντιστοιχεί σε τιμές $cell_radius = 0,193\text{ m}$ και $cell_density = 0,281\text{ m}$, με μέγιστη τιμή οπτικής θάμβωσης $DGP_{max} = 0,448$ και συνολική τιμή καταλληλότητας $F = 0,9278$. Η επιλογή της δεν βασίστηκε στη μεγιστοποίηση ενός μόνο δείκτη, αλλά στον καλύτερο συνδυασμό φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και προστασίας από τη θάμβωση.

5.4.1 Επιλογή και θέση της βέλτιστης λύσης στον χώρο σχεδιασμού

Για την καλύτερη ερμηνεία του αποτελέσματος, η θέση της βέλτιστης λύσης εξετάστηκε σε σχέση με τις ακραίες διαμορφώσεις του χώρου σχεδιασμού. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5, η βέλτιστη λύση δεν ταυτίζεται με την πλέον ανοιχτή γεωμετρική διάταξη, αλλά βρίσκεται σε ενδιάμεση θέση μεταξύ των εφικτών και μη εφικτών διαμορφώσεων.



Σχήμα 5.5. Θέση της βέλτιστης λύσης στον χώρο σχεδιασμού. Ο αλγόριθμος δεν κατέληξε στην πλέον ανοιχτή (μη-εφικτή) διάταξη #3, αλλά σε ενδιαμέση λύση οριακά εντός του ορίου θάμβωσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, η ακραία διάταξη #3, με cell_radius = 0,20 m και cell_density = 0,20 m, αντιστοιχεί στην περισσότερη ανοιχτή γεωμετρία του εξεταζόμενου χώρου σχεδιασμού. Παρότι η συγκεκριμένη διάταξη ευνοεί την είσοδο φυσικού φωτισμού και τη διατήρηση της θέας, παρουσιάζει τιμή $DGP = 0,467$, η οποία υπερβαίνει το αποδεκτό όριο των 0,45 και επομένως χαρακτηρίζεται ως μη εφικτή.

Αντίθετα, η βέλτιστη λύση χαρακτηρίζεται από ελαφρώς μικρότερη ακτίνα ανοιγμάτων και μεγαλύτερη μεταξύ τους απόσταση, με τιμές cell_radius = 0,193 m και cell_density = 0,281 m. Η μεταβολή αυτή μειώνει την άμεση διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιορίζει τη μέγιστη τιμή του δείκτη θάμβωσης σε $DGP_{max} = 0,448$, δηλαδή μόλις κάτω από το επιτρεπτό όριο.

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο αλγόριθμος δεν οδηγήθηκε απλώς στη γεωμετρία με τη μεγαλύτερη δυνατή διαπερατότητα. Αντίθετα, εντόπισε μια ενδιαμέση λύση που διατηρεί υψηλή απόδοση ως προς τον φυσικό φωτισμό και την ποιότητα θέας, χωρίς να παραβιάζει τον περιορισμό της οπτικής θάμβωσης. Επομένως, η θάμβωση λειτούργησε ως ενεργός

περιορισμός της διαδικασίας βελτιστοποίησης, επηρεάζοντας ουσιαστικά την επιλογή της τελικής γεωμετρίας.

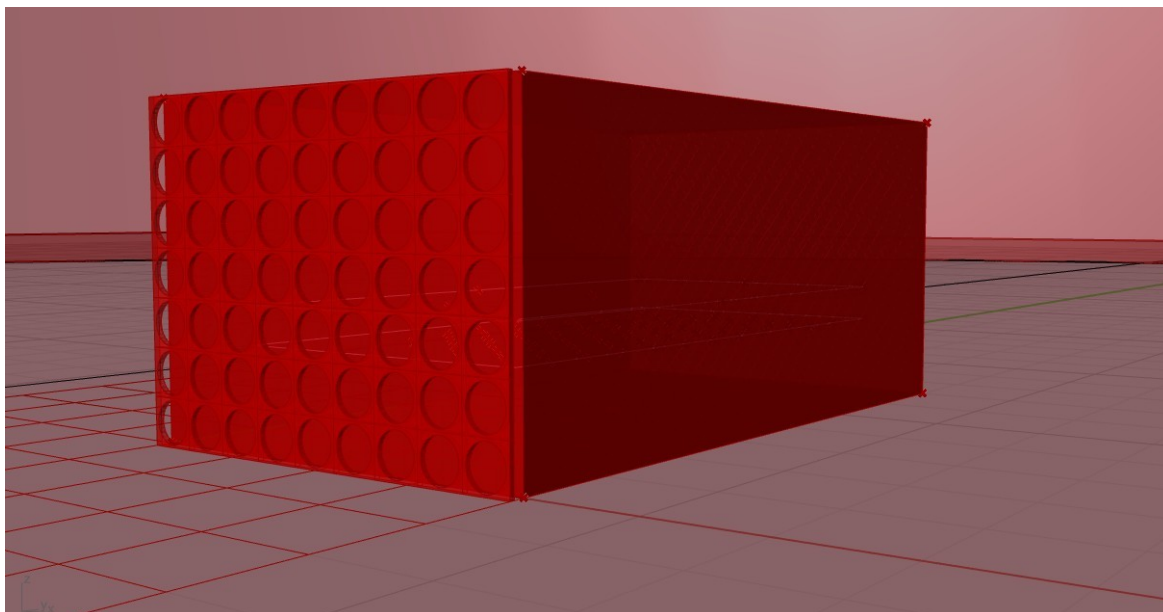
Με απλούστερους όρους, η βέλτιστη λύση εκφράζει την αρχή του μεγαλύτερου δυνατού ανοίγματος για φυσικό φως και θέα, χωρίς υπέρβαση του ορίου θάμβωσης. Για τον λόγο αυτό δεν επιλέχθηκε η πλέον ανοιχτή διάταξη, αλλά η γεωμετρία με τη μεγαλύτερη συνολική τιμή καταλληλότητας εντός της αποδεκτής περιοχής σχεδιασμού.

5.4.2 Φυσικός φωτισμός και θέα

Και οι δύο βέλτιστες λύσεις επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή επίδοση ως προς τους δείκτες φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας που ενσωματώθηκαν στη συνάρτηση καταλληλότητας. Συγκεκριμένα, οι δείκτες Daylight, View Width και View Layers λαμβάνουν την τιμή 1 και στις δύο περιπτώσεις.

Η επίδοση αυτή υποδηλώνει ότι οι προτεινόμενες γεωμετρίες του συστήματος σκίασης επιτρέπουν επαρκή διείσδυση φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του χώρου, ενώ παράλληλα διατηρούν πλήρως τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας θέας, όπως αυτά ορίζονται από το πρότυπο BS EN 17037. Το οριζόντιο εύρος θέας (View Width) ικανοποιεί πλήρως το απαιτούμενο κριτήριο, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η ορατότητα όλων των επιθυμητών στρωμάτων θέας (ουρανός, τοπίο και έδαφος).

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η βελτιστοποίηση δεν απαιτούσε συμβιβασμό μεταξύ φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας. Αντίθετα, ο αλγόριθμος εντόπισε διαμορφώσεις του σκιάστρου που επιτυγχάνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη επίδοση και στους τρεις αυτούς δείκτες.



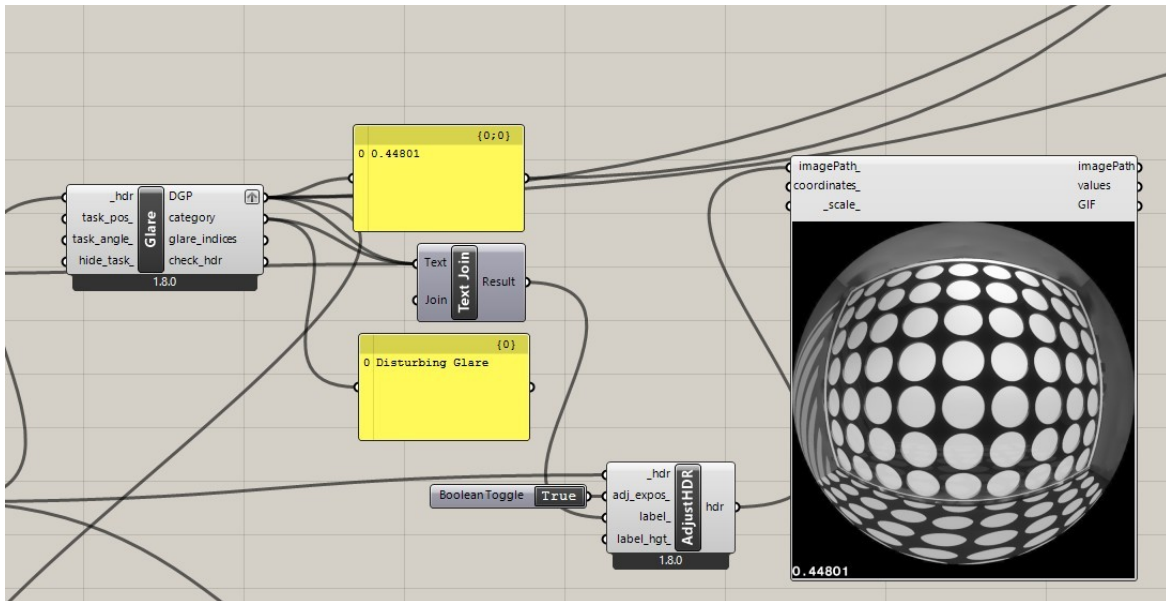
Σχήμα 5.6. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 1 (cell_radius = 0.193 m, cell_density = 0.281 m).

Δεδομένου ότι οι τιμές των δεικτών Daylight, View Width και View Layers είναι ίδιες και μέγιστες για αμφότερες τις βέλτιστες λύσεις, οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στη συνολική τιμή καταλληλότητας δεν οφείλονται στους συγκεκριμένους δείκτες, αλλά σχετίζονται με τους δείκτες Visibility και DGP, οι οποίοι αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

5.4.3. Θάμβωση ως ενεργός περιορισμός

Οι δύο βέλτιστες λύσεις παρουσιάζουν τιμές μέγιστης πιθανότητας θάμβωσης (DGP_{max}) ίσες με 0,44801 και 0,44895 αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις οι τιμές παραμένουν οριακά χαμηλότερες από το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης (DGP = 0,45), με αποτέλεσμα ο όρος ποινής της συνάρτησης καταλληλότητας να παραμένει μηδενικός.

Η διαδικασία αξιολόγησης του δείκτη Visibility μέσω raycasting παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.7. Υπολογισμός του δείκτη οπτικής θάμβωσης (DGP) για τη Βέλτιστη Λύση 1 (DGPmax = 0,44801).

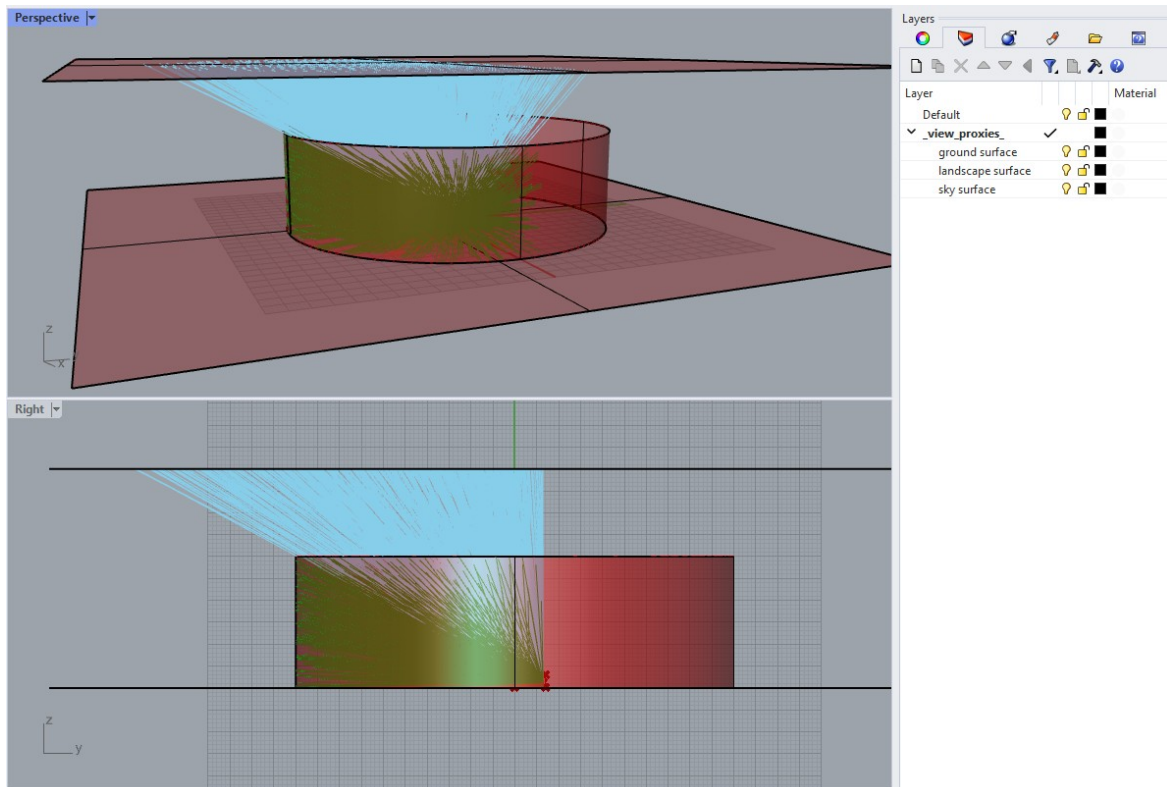
Το αποτέλεσμα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς δείχνει ότι ο περιορισμός θάμβωσης λειτούργησε ως ενεργός περιορισμός (active constraint) κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Εάν η θάμβωση δεν επηρέαζε ουσιαστικά τη διαδικασία αναζήτησης, ο αλγόριθμος θα οδηγούνταν στην πλέον ανοιχτή γεωμετρία του χώρου σχεδιασμού, επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση του φυσικού φωτισμού και της θέας. Αντίθετα, οι τελικές λύσεις σταθεροποιούνται ακριβώς πριν από το σημείο ενεργοποίησης της ποινής.

Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος αξιοποίησε πλήρως το διαθέσιμο περιθώριο βελτίωσης των υπόλοιπων δεικτών, αυξάνοντας τη διαφάνεια του συστήματος σκίασης μέχρι το σημείο όπου η πιθανότητα θάμβωσης προσεγγίζει το επιτρεπτό όριο. Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του ανοίγματος ή της οπτικής διαπερατότητας θα οδηγούσε σε υπέρβαση του ορίου $DGP = 0,45$ και συνεπώς σε σημαντική μείωση της τιμής καταλληλότητας λόγω ενεργοποίησης της ποινής.

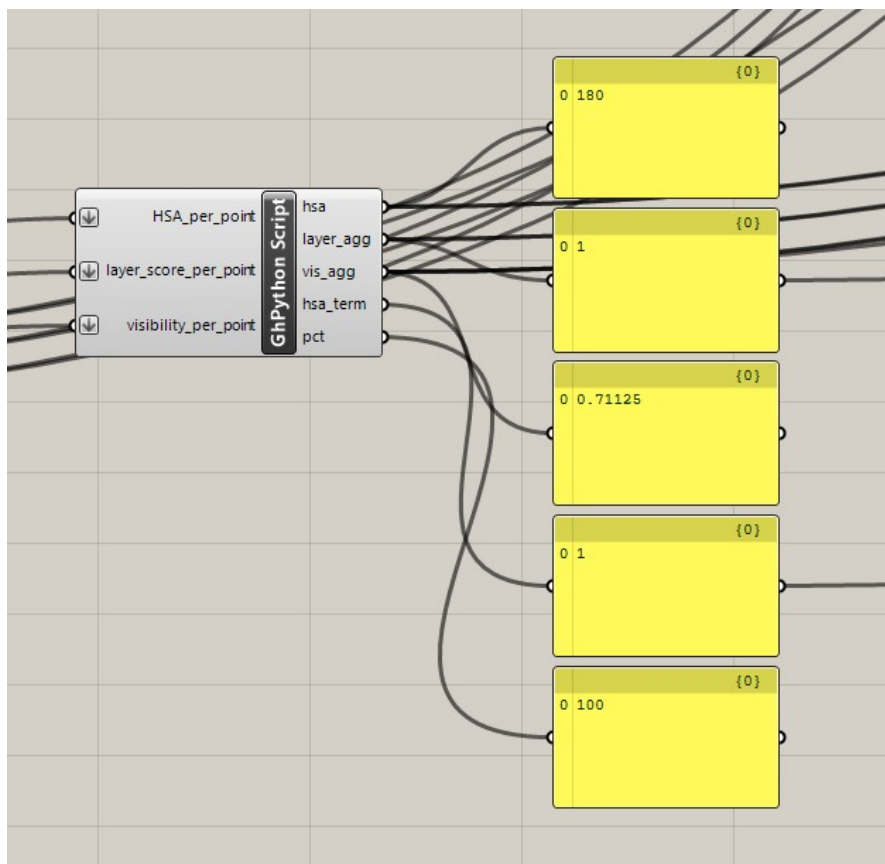
Το γεγονός ότι και οι δύο βέλτιστες λύσεις εμφανίζουν τιμές DGP_{max} εξαιρετικά κοντά στο όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι η θάμβωση είναι ο δεσμευτικός περιορισμός (binding constraint) του προβλήματος. Με άλλα λόγια, η τελική θέση του βέλτιστου σημείου στον χώρο σχεδιασμού δεν καθορίζεται από την αδυναμία βελτίωσης του φυσικού φωτισμού ή της θέας, αλλά από την ανάγκη διατήρησης της θάμβωσης εντός των αποδεκτών ορίων.

5.4.4. Visibility

Ο δείκτης Visibility λαμβάνει τιμές 0,71125 για τη Λύση 1 και 0,709 για τη Λύση 2. Οι τιμές αυτές είναι ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός που υποδηλώνει ότι και οι δύο διαμορφώσεις διατηρούν σημαντικό ποσοστό ανεμπόδιστης οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, παρά την παρουσία του συστήματος σκίασης.



Σχήμα 5.8. Αξιολόγηση της οπτικής διαπερατότητας (Visibility) μέσω raycasting από το σημείο παρατήρησης προς τα στρώματα θέας.



Σχήμα 5.9. Υπολογιζόμενες τιμές των δεικτών θέας για τη Βέλτιστη Λύση 1 (HSA, View Layers και Visibility).

Σε αντίθεση με τους δείκτες Daylight, View Width και View Layers, οι οποίοι έχουν ήδη φτάσει στη μέγιστη τιμή τους, ο δείκτης Visibility παραμένει χαμηλότερος της μονάδας. Το γεγονός αυτό δεν οφείλεται σε αδυναμία της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αλλά στην ύπαρξη του περιορισμού θάμβωσης. Η αύξηση του Visibility προϋποθέτει μεγαλύτερη διαφάνεια του συστήματος σκίασης και συνεπώς αυξημένη οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, μεγαλύτερη διαφάνεια συνεπάγεται ταυτόχρονα αυξημένη πιθανότητα εισόδου άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο οπτικό πεδίο του χρήστη, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες τιμές DGP.

Όπως προέκυψε στην προηγούμενη ενότητα, οι δύο βέλτιστες λύσεις βρίσκονται ήδη οριακά κάτω από το επιτρεπτό όριο θάμβωσης. Συνεπώς, οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση του δείκτη Visibility θα οδηγούσε πιθανότατα σε υπέρβαση του ορίου $DGP = 0,45$ και σε ενεργοποίηση της ποινής της συνάρτησης καταλληλότητας.

Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η τελική τιμή του Visibility δεν αποτελεί ανεξάρτητο περιορισμό του προβλήματος, αλλά προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της επιθυμίας για μέγιστη διαφάνεια και της ανάγκης διατήρησης αποδεκτών συνθηκών οπτικής άνεσης. Για τον λόγο αυτό, οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στις τελικές τιμές fitness των δύο βέλτιστων λύσεων οφείλονται κυρίως στις αντίστοιχες διαφορές του δείκτη Visibility.

5.5 Σύγκριση περίπτωση αναφοράς και βέλτιστης λύσης

Η σύγκριση της περίπτωσης αναφοράς χωρίς σύστημα σκίασης με τη βέλτιστη λύση που προέκυψε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης επιτρέπει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου συστήματος σκίασης ως προς τους βασικούς δείκτες απόδοσης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Δείκτης	Χωρίς σκίαση	Βέλτιστη λύση
DGP	0,631	0,448
Visibility	1,000	0,711
View Width	1	1
View Layers	1	1
Daylight score	1	1

Πίνακας 5.4. Σύγκριση των δεικτών απόδοσης μεταξύ της περίπτωσης αναφοράς και της βέλτιστης λύσης.

Παρατηρείται ότι η εφαρμογή του συστήματος σκίασης οδήγησε σε σημαντική μείωση της πιθανότητας θάμβωσης. Η τιμή του δείκτη DGP μειώθηκε από 0,631 σε 0,448, δηλαδή κατά περίπου 29%, επιτρέποντας τη μετάβαση από μη αποδεκτές συνθήκες οπτικής άνεσης σε συνθήκες που βρίσκονται εντός του αποδεκτού ορίου που τέθηκε στη διαδικασία βελτιστοποίησης ($DGP = 0,45$).

Η βελτίωση αυτή επιτεύχθηκε χωρίς να επηρεαστούν οι δείκτες φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας. Οι δείκτες Daylight, View Width και View Layers διατηρήθηκαν στη μέγιστη τιμή τους και στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι η εισαγωγή του συστήματος σκίασης δεν υποβάθμισε ούτε την πρόσβαση σε φυσικό φως ούτε τα βασικά χαρακτηριστικά της θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Η μοναδική αισθητή διαφοροποίηση παρατηρείται στον δείκτη Visibility, ο οποίος μειώνεται από 1,00 σε 0,711. Η μείωση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η παρουσία του συστήματος σκίασης περιορίζει μέρος της ανεμπόδιστης οπτικής επαφής με το εξωτερικό

περιβάλλον. Ωστόσο, η μείωση αυτή κρίνεται αποδεκτή, δεδομένου ότι συνοδεύεται από σημαντική βελτίωση της οπτικής άνεσης και ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας θέας.

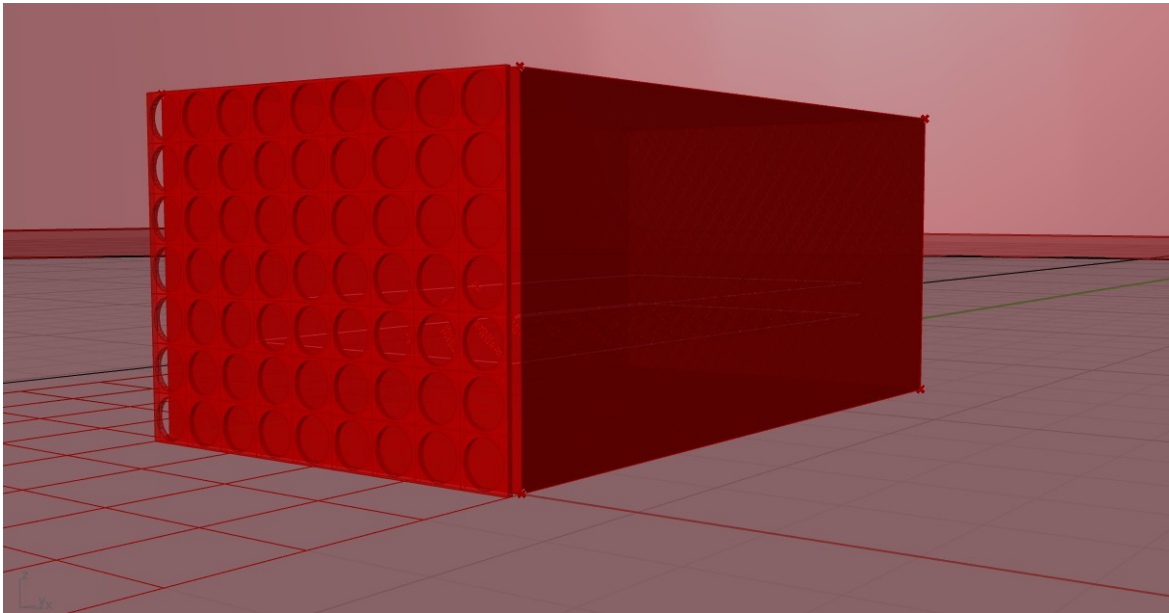
Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το βελτιστοποιημένο σύστημα σκίασης επιτυγχάνει αποτελεσματική εξισορρόπηση μεταξύ φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης. Η σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς δείχνει ότι η κύρια συνεισφορά του συστήματος είναι η δραστική μείωση της θάμβωσης, χωρίς ουσιαστική απώλεια στους υπόλοιπους δείκτες περιβαλλοντικής απόδοσης.

5.6 Ισοδυναμία των βέλτιστων λύσεων

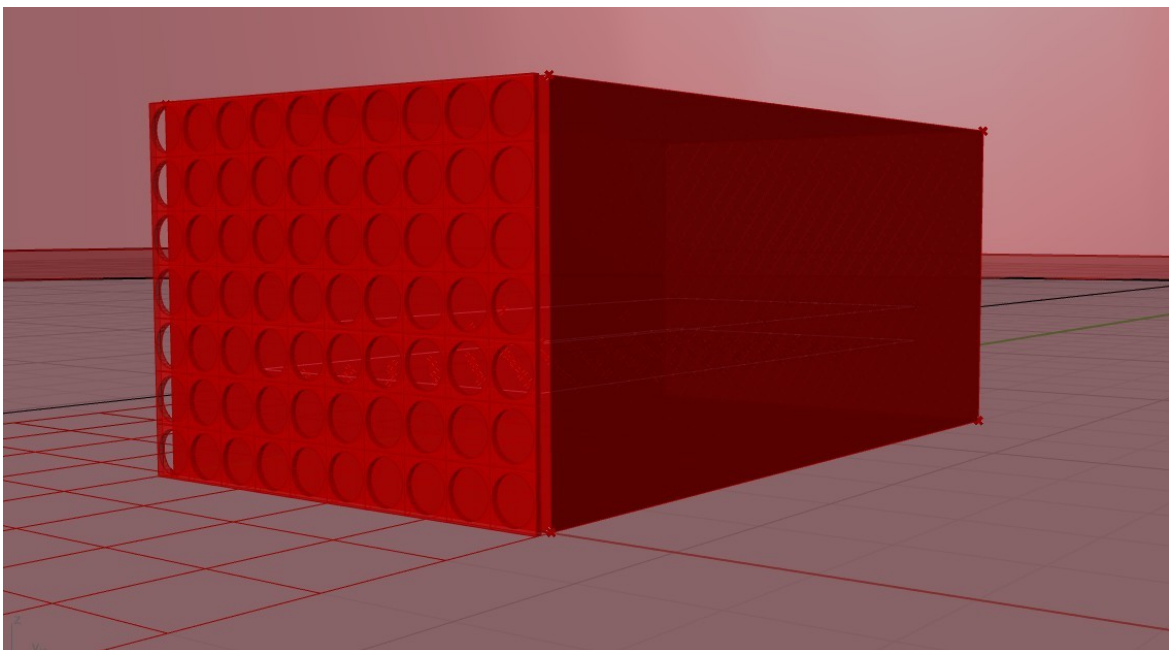
Παρότι οι δύο βέλτιστες λύσεις παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, η συνολική τους επίδοση είναι πρακτικά ταυτόσημη. Η διαφορά στην τιμή καταλληλότητας είναι μόλις 0,000563 (περίπου 0,06%), γεγονός που επιτρέπει να θεωρηθούν ουσιαστικά ισοδύναμες από πλευράς περιβαλλοντικής απόδοσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβλητή Cell Density, η οποία εμφανίζει αισθητή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο λύσεων (0,281 m έναντι 0,213 m). Παρά τη διαφορά αυτή, οι επιμέρους δείκτες και η συνολική τιμή καταλληλότητας παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι, στην περιοχή του σχεδιαστικού χώρου όπου εντοπίστηκε το βέλτιστο, υπάρχει ένα εύρος τιμών της παραμέτρου Cell Density που οδηγεί σε ουσιαστικά ισοδύναμη συνολική επίδοση.

Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική, καθώς δείχνει ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα δεν αντιστοιχεί σε μία μοναδική γεωμετρική λύση αλλά σε μία μικρή περιοχή του χώρου σχεδιασμού, στην οποία διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων μπορούν να επιτύχουν σχεδόν το ίδιο επίπεδο απόδοσης.



Σχήμα 5.10. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 1 (Cell Radius = 0.193 m, Cell Density = 0.281 m).



Σχήμα 5.11. Γεωμετρία της Βέλτιστης Λύσης 2 (Cell Radius = 0.184 m, Cell Density = 0.213 m).

Η ιδιότητα αυτή αποτελεί ένδειξη ευρωστίας (robustness) της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Από σχεδιαστική άποψη, παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς επιτρέπει την επιλογή μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικών διαμορφώσεων χωρίς ουσιαστική απώλεια στην περιβαλλοντική επίδοση. Έτσι, η τελική επιλογή μπορεί να βασιστεί και σε πρόσθετα κριτήρια, όπως κατασκευαστικοί περιορισμοί, αισθητικές προτιμήσεις ή ζητήματα κόστους.

Παράλληλα, παρατηρείται ότι οι δείκτες που σχετίζονται άμεσα με την οπτική άνεση και τη διαφάνεια του συστήματος (DGP_{max} και Visibility) παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο λύσεων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες αποτελούν τους κυρίαρχους παράγοντες που καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης.

5.7 Αξιολόγηση της σύγκλισης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης θεωρείται ότι συγκλίνει ικανοποιητικά προς μία βέλτιστη περιοχή του χώρου σχεδιασμού. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται τόσο στη συμπεριφορά του εξελικτικού αλγορίθμου κατά τη διάρκεια της αναζήτησης όσο και στα χαρακτηριστικά των τελικών λύσεων που προέκυψαν.

Πρώτον, οι δύο κορυφαίες λύσεις παρουσιάζουν πρακτικά ταυτόσημη τιμή καταλληλότητας (0,927813 και 0,927250 αντίστοιχα), με σχετική διαφορά μικρότερη από 0,06%. Η πολύ μικρή αυτή απόκλιση υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος εντόπισε μία περιοχή υψηλής απόδοσης αντί για ένα απομονωμένο σημείο του χώρου σχεδιασμού.

Δεύτερον, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.2, μετά την εμφάνιση των βέλτιστων λύσεων η τιμή της καταλληλότητας παρέμεινε ουσιαστικά αμετάβλητη για μεγάλο αριθμό γενεών, χωρίς να εντοπιστούν καλύτερες διαμορφώσεις. Η σταθεροποίηση αυτή (plateau) αποτελεί χαρακτηριστική ένδειξη σύγκλισης των εξελικτικών αλγορίθμων.

Τρίτον, η ανάλυση των επιμέρους δεικτών έδειξε ότι οι δείκτες Daylight, View Width και View Layers έχουν ήδη φτάσει στη μέγιστη δυνατή τιμή τους. Παράλληλα, ο δείκτης Visibility έχει βελτιστοποιηθεί μέχρι το σημείο όπου ενεργοποιείται ο περιορισμός θάμβωσης. Επομένως, δεν υφίσταται ουσιαστικό περιθώριο περαιτέρω βελτίωσης της συνολικής καταλληλότητας χωρίς παραβίαση του ορίου οπτικής άνεσης.

Με βάση τα παραπάνω, οι δύο βέλτιστες λύσεις θεωρούνται αντιπροσωπευτικές της βέλτιστης περιοχής του χώρου σχεδιασμού και υιοθετούνται ως τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

5.8 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης οδήγησε στον εντοπισμό δύο σχεδόν ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων, οι οποίες παρουσιάζουν πρακτικά ταυτόσημη συνολική καταλληλότητα και πολύ παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Και οι δύο λύσεις επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή επίδοση ως προς τον φυσικό φωτισμό και την ποιότητα θέας, ικανοποιώντας πλήρως τους δείκτες Daylight, View Width και View Layers.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η θάμβωση αποτελεί τον ενεργό και δεσμευτικό περιορισμό του προβλήματος. Οι βέλτιστες λύσεις διαμορφώνονται οριακά κάτω από το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης ($DGP = 0,45$), γεγονός που υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος αξιοποίησε πλήρως το διαθέσιμο περιθώριο βελτίωσης χωρίς να παραβιάσει τον περιορισμό θάμβωσης.

Παράλληλα, η ύπαρξη δύο σχεδόν ισοδύναμων λύσεων με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Cell Density υποδεικνύει ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα δεν αντιστοιχεί σε μία μοναδική γεωμετρία, αλλά σε μία μικρή περιοχή υψηλής απόδοσης εντός του χώρου σχεδιασμού. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει ευρωστία στη διαδικασία βελτιστοποίησης και παρέχει μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία κατά την επιλογή της τελικής διαμόρφωσης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι σε θέση να εντοπίσει λύσεις που επιτυγχάνουν αποτελεσματική ισορροπία μεταξύ φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης, αναδεικνύοντας τον καθοριστικό ρόλο της θάμβωσης στη διαμόρφωση της βέλτιστης γεωμετρίας του συστήματος σκίασης.

6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων

Η παρούσα εργασία διερεύνησε τη δυνατότητα βελτιστοποίησης ενός παραμετρικού εξωτερικού συστήματος σκίασης με κυκλικά ανοίγματα, με στόχο την ταυτόχρονη ικανοποίηση απαιτήσεων φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης. Η διαδικασία βασίστηκε στη διαμόρφωση ενός υπολογιστικού πλαισίου στο περιβάλλον Rhino/Grasshopper, με χρήση των εργαλείων Ladybug Tools, Honeybee και Radiance για

την αξιολόγηση του φυσικού φωτισμού και της θάμβωσης, καθώς και γεωμετρικού raycasting για την αξιολόγηση της θέας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εντοπίσει λύσεις που επιτυγχάνουν ταυτόχρονα υψηλά επίπεδα φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας, χωρίς να παραβιάζουν το όριο αποδεκτής οπτικής άνεσης. Οι δύο βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν παρουσίασαν σχεδόν ταυτόσημη τιμή καταλληλότητας, πλήρη επίδοση ως προς τους δείκτες φυσικού φωτισμού και ποιότητας θέας, και τιμές DGP οριακά χαμηλότερες από το όριο των 0,45.

Κεντρικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η θάμβωση αποτέλεσε τον ενεργό και δεσμευτικό περιορισμό της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος αύξησε τη διαφάνεια του συστήματος σκίασης μέχρι το σημείο όπου η πιθανότητα θάμβωσης πλησίασε το επιτρεπτό όριο, χωρίς όμως να το υπερβεί. Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώθηκε ότι ο περιορισμός θάμβωσης δεν λειτούργησε ως δευτερεύων δείκτης, αλλά ως καθοριστικός παράγοντας στη διαμόρφωση της τελικής γεωμετρίας.

Παράλληλα, η εμφάνιση δύο σχεδόν ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων ανέδειξε ότι το βέλτιστο αποτέλεσμα δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε μία μοναδική γεωμετρική διαμόρφωση, αλλά σε μία μικρή περιοχή υψηλής απόδοσης εντός του χώρου σχεδιασμού. Το εύρημα αυτό προσδίδει ευρωστία στη διαδικασία βελτιστοποίησης και παρέχει σχεδιαστική ευελιξία για την τελική επιλογή της γεωμετρίας του σκιάστρου.

Συνολικά, η εργασία επιβεβαίωσε ότι η συνδυαστική αξιολόγηση φυσικού φωτισμού, θέας και θάμβωσης μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματικό εργαλείο υποστήριξης του παραμετρικού σχεδιασμού συστημάτων σκίασης, οδηγώντας σε λύσεις που ισορροπούν μεταξύ περιβαλλοντικής απόδοσης και οπτικής άνεσης.

6.2 Πρωτοτυπία και Συνεισφορά

Η πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας έγκειται κυρίως στην ανάπτυξη και εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης παραμετρικής μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση εξωτερικών συστημάτων σκίασης, η οποία συνδυάζει ταυτόχρονα κριτήρια φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης.

Σε αντίθεση με προσεγγίσεις που επικεντρώνονται αποκλειστικά στον φυσικό φωτισμό ή στη σκίαση, η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως ζήτημα εξισορρόπησης πολλαπλών και συχνά αντικρουόμενων απαιτήσεων. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μία ενιαία συνάρτηση καταλληλότητας, η οποία ενσωματώνει δείκτες που προέρχονται από το πρότυπο BS EN 17037, σε συνδυασμό με περιορισμό οπτικής θάμβωσης μέσω του δείκτη Daylight Glare Probability (DGP).

Επιπλέον, η εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα αξιοποίησης εξελικτικών αλγορίθμων στον αρχιτεκτονικό και περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Η χρήση του Galapagos σε συνδυασμό με εργαλεία προσομοίωσης φωτισμού (Honeybee–Radiance) και γεωμετρικής αξιολόγησης θέας κατέδειξε ότι είναι δυνατή η αυτοματοποιημένη διερεύνηση μεγάλου αριθμού εναλλακτικών γεωμετρικών διαμορφώσεων και ο εντοπισμός λύσεων υψηλής απόδοσης.

Τέλος, η εργασία ανέδειξε τη δυνατότητα παραμετρικής διερεύνησης συστημάτων σκίασης με κυκλικά ανοίγματα, δείχνοντας ότι διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις μπορούν να επιτύχουν παρόμοια επίπεδα φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της βελτιστοποίησης ως εργαλείου υποστήριξης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Η βασική συνεισφορά της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που συνδυάζει την αξιολόγηση φυσικού φωτισμού, ποιότητας θέας και οπτικής άνεσης με διαδικασίες παραμετρικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις σχεδιασμού συστημάτων σκίασης, επιτρέποντας τη συστηματική διερεύνηση εναλλακτικών γεωμετρικών λύσεων.

6.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Παρότι η παρούσα εργασία κατέδειξε τη δυνατότητα αποτελεσματικής βελτιστοποίησης ενός παραμετρικού συστήματος σκίασης με κυκλικά ανοίγματα, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης και επέκτασης της μεθοδολογίας.

Μία πρώτη κατεύθυνση αφορά τη διερεύνηση επιπλέον γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος σκίασης. Στην παρούσα εργασία η βελτιστοποίηση βασίστηκε σε δύο μεταβλητές σχεδιασμού, την ακτίνα των ανοιγμάτων (Cell Radius) και την πυκνότητα των ανοιγμάτων (Cell Density). Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν επιπλέον

παραμέτρους, όπως διαφορετικά σχήματα ανοιγμάτων, μεταβλητό πάχος στοιχείων ή μη ομοιόμορφες κατανομές των ανοιγμάτων στην επιφάνεια του σκιάστρου.

Επιπλέον, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε για νότιο προσανατολισμό και για συγκεκριμένο μοντέλο χώρου. Μελλοντικές εφαρμογές της μεθοδολογίας σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, κλιματικές ζώνες ή τύπους κτιρίων θα μπορούσαν να διευρύνουν το πεδίο εφαρμογής των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας.

Μία ακόμη ενδιαφέρουσα κατεύθυνση αφορά τη χρήση πιο προηγμένων αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος Galapagos, ο οποίος απαιτεί τη συνένωση όλων των κριτηρίων σε μία ενιαία συνάρτηση καταλληλότητας. Η αξιοποίηση αλγορίθμων που υποστηρίζουν άμεσα πολλαπλούς στόχους θα μπορούσε να επιτρέψει την παραγωγή συνόλων Pareto βέλτιστων λύσεων και τη λεπτομερέστερη διερεύνηση των συμβιβασμών μεταξύ φωτισμού, θέας και οπτικής άνεσης.

Η παρούσα αξιολόγηση βασίστηκε στη δυσμενέστερη χρονική στιγμή ως προς τη θάμβωση (21 Μαρτίου, 13:00), η οποία προέκυψε από την προκαταρκτική διερεύνηση των συνθηκών φωτισμού. Παρότι η προσέγγιση αυτή επέτρεψε τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου και την αποτελεσματική διερεύνηση του προβλήματος, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει τη μεθοδολογία σε ετήσια βάση, αξιοποιώντας ολόκληρο το κλιματικό αρχείο της περιοχής μελέτης. Μια τέτοια προσέγγιση θα επέτρεπε την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος σκίασης κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους και θα παρείχε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της συνολικής του απόδοσης.

Τέλος, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει το πλαίσιο αξιολόγησης με την ενσωμάτωση πρόσθετων κριτηρίων, όπως η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του χώρου, η θερμική άνεση και οι μελανοπικές επιδράσεις του φυσικού φωτισμού. Η ενσωμάτωση των παραμέτρων αυτών θα επέτρεπε την αξιολόγηση του συστήματος σκίασης όχι μόνο ως προς την οπτική άνεση και την ποιότητα θέας, αλλά και ως προς τη συνολική ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου.

Βιβλιογραφία

Ακολουθούν οι βιβλιογραφικές αναφορές (πηγές) της Εργασίας.

1. Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in Construction*, 102, 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
2. 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>
3. Bui, D. K., Nguyen, T. N., Ghazlan, A., Ngo, N. T., & Ngo, T. D. (2020). Enhancing building energy efficiency by adaptive façade: A computational optimization approach. *Applied Energy*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114797>
4. Chi, D. A., Moreno, D., & Navarro, J. (2017). Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance. *Building and Environment*, 125, 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.007>
5. Choi, S. J., Lee, D. S., & Jo, J. H. (2017). Lighting and cooling energy assessment of multi-purpose control strategies for external movable shading devices by using shaded fraction. *Energy and Buildings*, 150, 328–338. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.030>
6. Day, J. K., Futrell, B., Cox, R., & Ruiz, S. N. (2019). Blinded by the light: Occupant perceptions and visual comfort assessments of three dynamic daylight control systems and shading strategies. *Building and Environment*, 154, 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.037>
7. De Luca, F., Sepúlveda, A., & Varjas, T. (2022). Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. *Building and Environment*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109110>

8. Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1086–1103. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>
9. Eltaweel, A., Su, Y., Mandour, M. A., & Elrawy, O. O. (2021). A novel automated louver with parametrically-angled reflective slats; design evaluation for better practicality and daylighting uniformity. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102438>
10. Eltaweel, A., & Yuehong, S. (2017). Using integrated parametric control to achieve better daylighting uniformity in an office room: A multi-Step comparison study. *Energy and Buildings*, 152, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.033>
11. 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>
12. Freewan, A. A. Y. (2014). Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. *Solar Energy*, 102, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.009>
13. Giovannini, L., Favoino, F., Lo Verso, V. R. M., Serra, V., & Pellegrino, A. (2020). GLANCE (GLare ANnual Classes Evaluation): An approach for a simplified spatial glare evaluation. *Building and Environment*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107375>
14. Goovaerts, C., Descamps, F., & Jacobs, V. A. (2017). Shading control strategy to avoid visual discomfort by using a low-cost camera: A field study of two cases. *Building and Environment*, 125, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.030>
15. 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>

16. Jain, S., & Garg, V. (2018). A review of open loop control strategies for shades, blinds and integrated lighting by use of real-time daylight prediction methods. *Building and Environment*, 135, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.018>
17. Karlsen, L., Heiselberg, P., Bryn, I., & Johra, H. (2016). Solar shading control strategy for office buildings in cold climate. *Energy and Buildings*, 118, 316–328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.014>
18. Khidmat, R. P., Fukuda, H., Kustiani, Paramita, B., Qingsong, M., & Hariyadi, A. (2022). Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. *Journal of Building Engineering*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104241>
19. Kirmat, A., Krejcar, O., Ekici, B., & Fatih Tasgetiren, M. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy*, 185, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048>
20. Konstantoglou, M., Kontadakis, A., & Tsangrassoulis, A. (2013). *Counterbalancing daylighting, glare and view out: The role of an external shading system control strategy*. In *Proceedings of CLIMA 2013*. Prague, Czech Republic.
21. Konstantoglou, M., & Tsangrassoulis, A. (2016). Dynamic operation of daylighting and shading systems: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.246>
22. 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>
23. Lee, E. S., Matusiak, B. S., Geisler-Moroder, D., Selkowitz, S. E., & Hescong, L. (2022). Advocating for view and daylight in buildings: Next steps. *Energy and Buildings*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112079>
24. 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>
25. Li, L., Ma, Q., Gao, W., & Wei, X. (2023). Incorporating users' adaptive behaviors into multi-objective optimization of shading devices: A case study of an office room in Qingdao. *Energy and Buildings*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113683>
26. Manzan, M. (2014). Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, 72, 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.007>
27. Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Willmann, A., & Schlueter, A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.03.002>
28. Powell, D., Hischer, I., Jayathissa, P., Svetozarevic, B., & Schlüter, A. (2018). A reflective adaptive solar façade for multi-building energy and comfort management. *Energy and Buildings*, 177, 303–315. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.040>
29. 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>
30. Sepúlveda, A., De Luca, F., Thalfeldt, M., & Kurnitski, J. (2020). Analyzing the fulfillment of daylight and overheating requirements in residential and office buildings in Estonia. *Building and Environment*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107036>
31. Sepúlveda, A., De Luca, F., Varjas, T., & Kurnitski, J. (2022). Assessing the applicability of the European standard EN 17037:2018 for office spaces in a cold climate. *Building and Environment*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109602>

32. Sherif, A., El-Zafarany, A., & Arafa, R. (2012). External perforated window solar screens: The effect of screen depth and perforation ratio on energy performance in extreme desert environments. *Energy and Buildings*, 52, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.025>
33. Sherif, A., Sabry, H., & Rakha, T. (2012). External perforated solar screens for daylighting in residential desert buildings: Identification of minimum perforation percentages. *Solar Energy*, 86(6), 1929–1940. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.029>
34. 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>
35. Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>
36. Tabadkani, A., Valinejad Shoubi, M., Soflaei, F., & Banihashemi, S. (2019). Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort. *Automation in Construction*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>
37. Taveres-Cachat, E., Lobaccaro, G., Goia, F., & Chaudhary, G. (2019). A methodology to improve the performance of PV integrated shading devices using multi-objective optimization. *Applied Energy*, 247, 731–744. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.033>
38. Vanaga, R., Blumberga, A., Freimanis, R., Mols, T., & Blumberga, D. (2018). Solar facade module for nearly zero energy building. *Energy*, 157, 1025–1034. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.167>
39. Wagdy, A., & Fathy, F. (2015). A parametric approach for achieving optimum daylighting performance through solar screens in desert climates. *Journal of Building Engineering*, 3, 155–170. <https://doi.org/10.1016/j.job.2015.07.007>

40. 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>
41. Wu, Y., Kämpf, J. H., & Scartezzini, J. L. (2019). Automated ‘Eye-sight’ Venetian blinds based on an embedded photometric device with real-time daylighting computing. *Applied Energy*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113317>
42. Xiong, J., & Tzempelikos, A. (2016). Model-based shading and lighting controls considering visual comfort and energy use. *Solar Energy*, 134, 416–428. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.026>
43. Yi, Y. K., Yin, J., & Tang, Y. (2018). Developing an advanced daylight model for building energy tool to simulate dynamic shading device. *Solar Energy*, 163, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.082>
44. Zhang, X., Zhang, H., Wang, Y., & Shi, X. (2022). Adaptive façades: Review of designs, performance evaluation, and control systems. *Buildings*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/buildings12122112>
45. CEN (2018). *EN 17037:2018 – Daylight in buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
46. IES (2012). *LM-83-12: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. New York: Illuminating Engineering Society.
47. Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41–59.
48. Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, 3(1), 7–31.
49. Roudsari, M. S., & Pak, M. (2013). Ladybug: A parametric environmental plugin for Grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. *Proceedings of the 13th International IBPSA Conference (Building Simulation 2013)*, Chambéry, France, 3128–3135.
50. Rutten, D. (2013). Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers. *Architectural Design*, 83(2), 132–135.

51. Ward, G. J. (1994). The RADIANCE lighting simulation and rendering system. *Proceedings of SIGGRAPH '94*, 459–472. New York: ACM.
52. Wienold, J. (2009). Dynamic daylight glare evaluation. *Proceedings of the 11th International IBPSA Conference (Building Simulation 2009)*, Glasgow, UK, 944–951.
53. Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38(7), 743–757.
54. CIE. (2018). *CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light (CIE S 026/E:2018)*. Vienna, Austria: International Commission on Illumination. <https://doi.org/10.25039/S026.2018>
55. Robert McNeel & Associates. (2023). *Rhinoceros 3D* (Version 7) [Computer software]. <https://www.rhino3d.com>

Παράρτημα Α: Μεθοδολογική Τεκμηρίωση Αξιολόγησης Θάμβωσης

Α.1 Επιλογή δυσμενούς χρονικής στιγμής αξιολόγησης (worst-case)

Α.1.1 Το ζήτημα

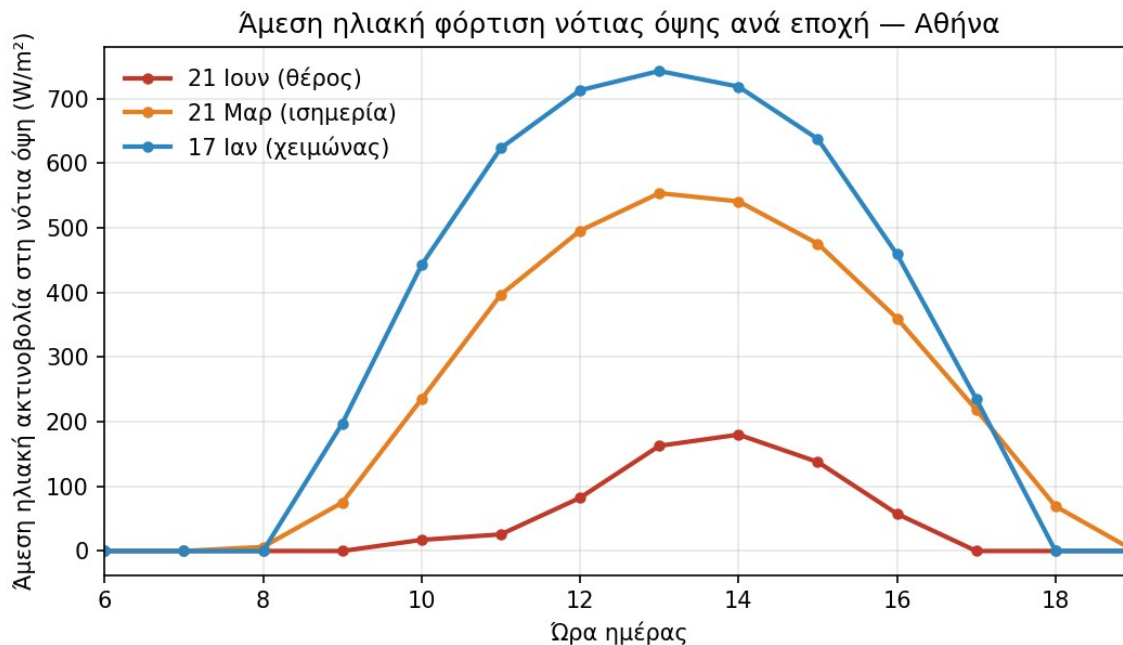
Η αξιολόγηση της θάμβωσης μέσω του δείκτη DGP σε επίπεδο στιγμιαίας ανάλυσης (point-in-time) απαιτεί την επιλογή συγκεκριμένης χρονικής στιγμής. Η επιλογή αυτή δεν είναι ουδέτερη: καθορίζει αν ο περιορισμός θάμβωσης ενεργοποιείται και, κατ' επέκταση, αν η βελτιστοποίηση έχει νόημα. Μια λανθασμένη (ακίνδυνη) στιγμή υποεκτιμά συστηματικά τη θάμβωση και ακυρώνει τον ρόλο του σκιάστρου. Η ορθή αρχή είναι η επιλογή της δυσμενέστερης ρεαλιστικής στιγμής (worst-case).

Α.1.2 Γεωμετρική τεκμηρίωση για νότιο προσανατολισμό

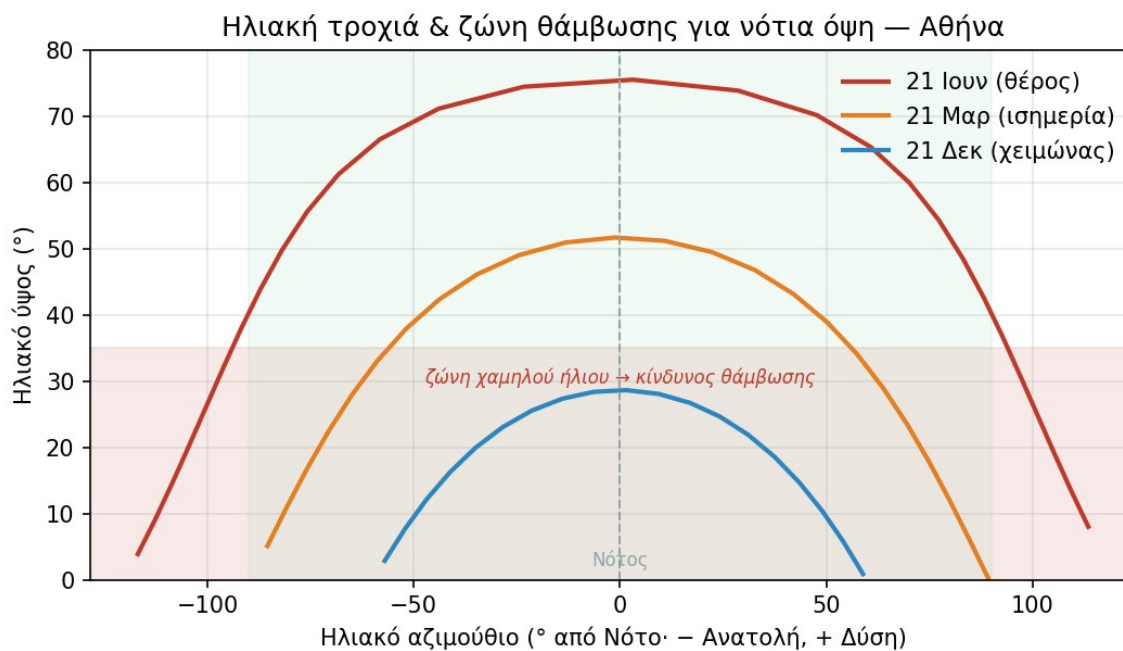
Για το εξεταζόμενο άνοιγμα νότιου προσανατολισμού, η διαισθητική παραδοχή ότι η θάμβωση μεγιστοποιείται το θερινό μεσημέρι είναι εσφαλμένη. Η ανάλυση της ηλιακής γεωμετρίας για την Αθήνα ($\varphi \approx 37.9^\circ$) δείχνει το αντίθετο:

Χρονική στιγμή	Ηλιακό ύψος	Άμεση ακτινοβολία στη νότια όψη*
Θερινό μεσημέρι (20–22 Ιουν, ~13:00)	~76°	~180–206 W/m ²
Χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκ, 13:00)	29°	396 W/m ²
Εαρινή ισημερία (21 Μαρ, 13:00)	52°	553 W/m ²
Χειμώνας (17 Ιαν, 13:00)	31°	742 W/m ²

*Συνιστώσα άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας κάθετα στο επίπεδο της όψης, υπολογισμένη από τα δεδομένα DNI του κλιματικού αρχείου GRC_Athens.167160_IWEC.epw.



Σχήμα Μ.1 — Άμεση ηλιακή ακτινοβολία στη νότια όψη κατά τη διάρκεια της ημέρας, για τρεις εποχές. Η χειμερινή καμπύλη (μπλε) υπερτερεί σαφώς της θερινής (κόκκινη), αντιστρέφοντας τη διαισθητική προσδοκία.



Σχήμα Μ.2 — Ηλιακή τροχιά (ύψος–αζιμούθιο) για τρεις εποχές. Η ζώνη χαμηλού ήλιου (κόκκινη) συγκεντρώνει τον κίνδυνο θάμβωσης· ο θερινός ήλιος τη διασχίζει μόνο όταν βρίσκεται πίσω από τη νότια όψη.

Η ερμηνεία είναι καθαρά γεωμετρική:

- Θέρος: ο ήλιος βρίσκεται ψηλά ($\sim 76^\circ$) και προσπίπτει στην κατακόρυφη όψη με μεγάλη γωνία πρόσπτωσης· η άμεση συνιστώσα στην όψη είναι μικρή και αναχαιτίζεται εύκολα από το κατακόρυφο κυψελωτό σκίαστρο. Επιπλέον, τις πρωινές και απογευματινές ώρες ο ήλιος ανατέλλει/δύει βορειότερα της γραμμής Ανατολής–Δύσης, οπότε βρίσκεται πίσω από τη νότια όψη και δεν την προσβάλλει καθόλου.
- Χειμώνας/ισημερία: ο χαμηλός ήλιος ($29\text{--}52^\circ$) εισέρχεται σχεδόν οριζόντια, απευθείας στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή, με υψηλή άμεση συνιστώσα στην όψη — συνθήκη μέγιστου κινδύνου θάμβωσης.

Το εύρημα επιβεβαιώνει τον καθιερωμένο κανόνα της βιοκλιματικής: οι νότιες όψεις είναι οι «εύκολες» ως προς την ηλιοπροστασία (αυτο-προστατεύονται το θέρος από ένα οριζόντιο/κυψελωτό στοιχείο), ενώ η πραγματική πρόκληση είναι ο χαμηλός χειμερινός ήλιος.

A.1.3 Στρατηγική πολλαπλών στιγμών (max-of-three)

Η επιλογή μεμονωμένης ημερομηνίας ενέχει έναν επιπλέον κίνδυνο: η νεφοκάλυψη μιας συγκεκριμένης ημέρας στο κλιματικό αρχείο μπορεί να εξουδετερώσει την άμεση ακτινοβολία, ακόμη και υπό ιδανική ηλιακή γεωμετρία. Η ευαισθησία αυτή είναι δραματική: για ταυτόσημο ηλιακό ύψος ($\approx 28.6^\circ$) στις 13:00, η άμεση ακτινοβολία στη νότια όψη μεταβάλλεται ως εξής μεταξύ γειτονικών ημερών:

Ημέρα (13:00)	Άμεση στη νότια όψη
19 Δεκ	735 W/m ²
20 Δεκ	0 W/m ² (νεφοκάλυψη)
21 Δεκ	396 W/m ²
22 Δεκ	31 W/m ² (νεφοκάλυψη)

27 Δεκ

739 W/m²

Η διακύμανση (0 έως 739 W/m² για ίδια γεωμετρία) καθιστά σαφές ότι η επιλογή ημέρας δεν πρέπει να βασίζεται στο ημερολόγιο, αλλά στα πραγματικά κλιματικά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό, υιοθετείται η αξιολόγηση σε τρεις αντιπροσωπευτικές δυσμενείς στιγμές και η λήψη της μέγιστης τιμής:

$$DGP_{\max} = \max \{ DGP(17/1 \ 13:00), DGP(21/3 \ 13:00), DGP(27/12 \ 14:00) \}$$

Η προσέγγιση max-of-three εξασφαλίζει ότι η αξιολόγηση αντανakλά τη δυσμενέστερη συνθήκη μεταξύ χειμώνα και ισημερίας, ανεξάρτητα από τη νεφοκάλυψη οποιασδήποτε μεμονωμένης ημέρας, και είναι μεθοδολογικά αμυντικότερη από κάθε μονή στιγμή.

A.1.4 Επαληθευμένο αποτέλεσμα

Η εφαρμογή έδωσε, για την πλέον ανοιχτή διάταξη, τις εξής τιμές:

Στιγμή	DGP	Χαρακτηρισμός
17 Ιαν 13:00	0.450	Intolerable
21 Μαρ 13:00	0.467	Intolerable (δυσμενέστερη)
27 Δεκ 14:00	0.446	Disturbing

Αξιοσημείωτο είναι ότι η δυσμενέστερη στιγμή προκύπτει η εαρινή ισημερία (0.467) και όχι το χειμερινό ηλιοστάσιο — γεγονός που δικαιολογεί εκ των υστέρων τη στρατηγική πολλαπλών στιγμών: μια αξιολόγηση βασισμένη αποκλειστικά στο ηλιοστάσιο θα είχε χάσει το πραγματικό μέγιστο.

A.2 Το cell_density ως ανεξάρτητος μηχανισμός ελέγχου της θάμβωσης

A.2.1 Το ζήτημα της συγγραμμικότητας

Προϋπόθεση για τη χρήση εξελικτικού αλγορίθμου δύο παραμέτρων είναι οι παράμετροι να ελέγχουν ανεξάρτητες ιδιότητες. Αν η ακτίνα ανοίγματος (cell_radius) και η πυκνότητα

κυψελών (cell_density) ήταν απλώς δύο εκφράσεις του ίδιου μεγέθους — της συνολικής διαφάνειας — το πρόβλημα θα ήταν ουσιαστικά μονοδιάστατο (collinear), και η βελτιστοποίηση θα ανάγονταν σε απλή μονοπαραμετρική σάρωση.

A.2.2 Πειραματική απόδειξη ανεξαρτησίας

Η σύγκριση δύο διατάξεων που διαφέρουν μόνο ως προς το cell_density απομονώνει την επίδρασή του:

Διάταξη	cell_radius	cell_density	Daylight Score	DGPmax
#3	0.20 m	0.20 m (min)	1.0	0.467
#4	0.20 m	0.60 m (max)	1.0	0.358

Οι δύο διατάξεις έχουν ταυτόσημη ακτίνα ανοίγματος και ταυτόσημο δείκτη φωτισμού (daylight = 1.0), δηλαδή την ίδια συνολική ποσότητα εισερχόμενου φωτός. Παρ' όλα αυτά, το DGP διαφοροποιείται σημαντικά (0.467 έναντι 0.358 — διαφορά 0.109, που αντιστοιχεί σε μετάβαση από «Intolerable» σε «Perceptible»).

A.2.3 Φυσική ερμηνεία και μεθοδολογική συνέπεια

Το εύρημα αποδεικνύει ότι το cell_density επηρεάζει τη θάμβωση μέσω διαφορετικού μηχανισμού από τον φωτισμό:

- cell_radius: ελέγχει κυρίως τη συνολική ποσότητα φωτός (μέγεθος ανοιγμάτων → φωτισμός).
- cell_density: ελέγχει την κατανομή και τη διάταξη των ανοιγμάτων, άρα τη γεωμετρία διέλευσης του άμεσου ηλιακού φωτός προς τον παρατηρητή — δηλαδή τη θάμβωση — χωρίς να μεταβάλλει τη συνολική ποσότητα φωτός.

Με άλλα λόγια, οι δύο παράμετροι δεν είναι συγγραμμικές: ελέγχουν δύο διαφορετικές φυσικές ιδιότητες (ποσότητα φωτός vs. κατανομή/θάμβωση). Το πρόβλημα είναι επομένως γνήσια δισδιάστατο, και ο εξελκτικός αλγόριθμος διαθέτει πραγματικό δισδιάστατο χώρο αναζήτησης.

A.2.4 Επιβεβαίωση μέσω μετατόπισης του βέλτιστου

Η ανεξαρτησία αυτή έχει άμεση πρακτική συνέπεια στο αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Όταν ο περιορισμός θάμβωσης τέθηκε ορθά σε ισχύ:

- η διάταξη #3 (μέγιστο άνοιγμα, ελάχιστη πυκνότητα) — που πριν ήταν τετριμμένα βέλτιστη — τιμωρείται πλέον ($DGP\ 0.467 > 0.45$).
- το βέλτιστο μετατοπίζεται στη διάταξη #4, η οποία διατηρεί τον μέγιστο φωτισμό ($daylight = 1.0$) ρυθμίζοντας όμως την πυκνότητα ώστε η θάμβωση να παραμείνει εντός ορίου ($DGP\ 0.358 < 0.45$).

Η μετατόπιση αυτή εκφράζει με ακρίβεια τον στόχο του σχεδιασμού σκιάστρου: ο αλγόριθμος αξιοποιεί το `cell_density` ως ανεξάρτητο μοχλό για να επιτύχει την αρχή «μέγιστο άνοιγμα για φωτισμό και θέα, υπό τον περιορισμό της μη υπέρβασης του ορίου θάμβωσης».

Αν οι παράμετροι ήταν συγγραμμικές, μια τέτοια λύση δεν θα ήταν δυνατή — κάθε μείωση της θάμβωσης θα συνεπαγόταν αναπόφευκτα μείωση του φωτισμού. Η ύπαρξη της #4 ως βέλτιστης αποδεικνύει εμπράκτως την προστιθέμενη αξία της δισδιάστατης διατύπωσης.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.