ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΕΞΥΠΝΩΝ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΓΧΩΡΙΑ ΑΓΟΡΑ

Μιχαέλα-Παναγιώτα Δέτση

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Γεώργιος Ματσόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2022

Επιβλέπων: Καθηγητής ΕΜΠ Γ. Ματσόπουλος

Εγκρίθηκε από την επιτροπή την .....:

.....	.....	.....
Γ. ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ	Α. Δ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ	Σ. ΠΑΠΑΒΑΣΙΛΕΙΟΥ
Καθηγητής	Καθηγητής	Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα παράθυρα αποτελούν ένα αναπόσπαστο στοιχείο κάθε κτιριακού κελύφους, καθώς προσφέρουν φυσικό φωτισμό, οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και φυσικό αερισμό των εσωτερικών χώρων. Ωστόσο, από ενεργειακή άποψη, αποτελούν ένα αδύναμο σημείο του κτιριακού κελύφους, καθώς είναι υπεύθυνα για περίπου το 60% των συνολικών ενεργειακών απωλειών. Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, ένα σημαντικό βήμα είναι η αντικατάσταση των παραθύρων του με πιο εξελιγμένους τύπους παραθύρων υψηλής ενεργειακής απόδοσης που μπορούν να συμβάλλουν τόσο στην ενεργειακή εξοικονόμηση, όσο και στη βελτίωση των συνθηκών άνεσης.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εφαρμογή διαφορετικών πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων για την επιλογή του καταλληλότερου τύπου παραθύρων για διαμέρισμα στην περιοχή της Αθήνας. Ως εναλλακτικές εξετάζονται σύγχρονοι τύποι έξυπνων παραθύρων, όπως τα ηλεκτροχρωμικά και τα θερμοχρωμικά, συγκριτικά με τα συμβατικά παράθυρα με εσωτερική σκίαση που έχουν επικρατήσει στην ελληνική αγορά. Αρχικά περιγράφονται σε θεωρητικό επίπεδο οι κυριότεροι τύποι συμβατικών παραθύρων που χρησιμοποιούνται στον ελληνικό χώρο, καθώς και οι προτεινόμενοι τύποι έξυπνων παραθύρων και επεξηγείται η αρχή λειτουργίας τους. Αναλύονται σε θεωρητικό επίπεδο οι έννοιες της οπτικής και της θερμικής άνεσης και παρουσιάζονται κατάλληλοι δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίησή τους. Ακόμα, περιγράφονται οι πολυκριτήριες μέθοδοι λήψης αποφάσεων που εφαρμόζονται στα πλαίσια της εργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μελέτη περίπτωσης, το εξεταζόμενο πρόβλημα απόφασης και οι εναλλακτικές. Τα κριτήρια προσδιορίζονται από την οπτική γωνία ενός αποφασίζοντα-κατοίκου του διαμερίσματος που μελετάται, ενώ τα αντίστοιχα βάρη καθορίζονται με τη βοήθεια ερωτηματολογίου. Η επίδοση των εναλλακτικών υπολογίζεται μέσω ενεργειακής προσομοίωσης του εξεταζόμενου χώρου στο λογισμικό EnergyPlus.

Μέσω της εφαρμογής διαφορετικών πολυκριτηριακών μεθόδων, προκύπτει ότι η βέλτιστη εναλλακτική είναι η χρήση ηλεκτροχρωμικών παραθύρων, καθώς παρουσιάζουν πολύ καλές επιδόσεις στα κριτήρια με τους μεγαλύτερους συντελεστές βαρύτητας, εξασφαλίζοντας βελτίωση της θερμικής άνεσης και μείωση του ετήσιου κόστους ενέργειας.

ABSTRACT

Windows constitute an integral element of the building envelope, as they offer natural light, a view to the building's external environment and natural ventilation of the interior spaces. However, in terms of energy efficiency, windows are considered a weak part of the building envelope, as they are responsible for approximately 60% of the total energy loss. For the improvement of a building's energy efficiency, an important step is the replacement of its windows with more advanced, high-efficiency windows that can contribute to energy conservation, as well as the improvement of comfort conditions.

The aim of this master's thesis is the application of different Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods for the selection of the most suitable window type for an apartment in the city of Athens. Modern smart window types are considered as alternatives, such as electrochromic and thermochromic windows, compared to the conventional windows equipped with interior shading that have prevailed in the Greek market. Initially, the main types of conventional windows used in Greece, as well as the proposed smart window types and their principle of operation are described on a theoretical level. The concepts of visual and thermal comfort are analyzed on a theoretical level and appropriate indices for their quantification are presented. Also, the Multi-Criteria Decision Analysis methods that are applied in the frame of this work are described. Subsequently, the case study, the examined decision problem and the alternatives are presented. The criteria are determined from the point of view of a decision-maker who is a resident of the apartment under study, while the corresponding weighting factors are established with the help of a questionnaire. The performance of the alternatives is calculated through energy simulation of the examined space in the EnergyPlus software.

Through the application of different multi-criteria methods, it is shown that the optimal alternative is the use of electrochromic windows, as they present very good performance in terms of the criteria that correspond to the highest weighting factors, ensuring the improvement of thermal comfort and the reduction of the annual energy cost.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2021-2022, στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα». Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Γεώργιο Ματσόπουλο για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Μιχαέλα-Παναγιώτα Δέτση

Ιανουάριος 2022

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... **I**
ABSTRACT ..... **II**
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ..... **III**
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ..... **IV**
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... **V**
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... **VI**
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **1**
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 2
2. ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ **3**
2.1 ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ 3
2.1.1 Απλοί-μονοί υαλοπίνακες *3*
2.1.2 Διπλοί υαλοπίνακες *4*
2.1.3 Τριπλοί υαλοπίνακες *5*
2.1.4 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing) *5*
2.2 ΠΑΡΑΘΥΡΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ 7
2.2.1 Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες (Thermochromic glazing) *7*
2.2.2 Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες (Electrochromic glazing) *10*
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΝΕΣΗΣ **16**
3.1 ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΕΣΗ 16
3.1.1 Οπτική άνεση λόγω τεχνητού φωτισμού *16*
3.1.2 Δυσφορία λόγω θάμβωσης *18*
3.1.3 Οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον *22*
3.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΕΣΗ 23
3.2.1 Το μοντέλο του Fanger *24*
3.2.2 Δυναμικό Μοντέλο Ρουχισμού (Dynamic Clothing Model) *29*
4. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ **31**
4.1 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 31
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ 32
4.2.1 Η θεωρία χρησιμότητας *32*
4.2.2 Τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα *34*
4.2.3 Το μοντέλο ιεράρχησης *37*
4.2.4 Η θεωρία σχέσεων υπεροχής *40*
5. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ **45**
5.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ 45
5.1.1 Καθορισμός των εναλλακτικών *45*
5.1.2 Καθορισμός των κριτηρίων *47*
5.1.3 Το κτιριακό μοντέλο *49*
5.1.4 Προσδιορισμός της απόδοσης των εναλλακτικών *52*
5.1.5 Προσδιορισμός της βαρύτητας των κριτηρίων *53*
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ **56**
6.1 ΜΕΘΟΔΟΣ MAUT 56

6.2 ΜΕΘΟΔΟΣ TOPSIS 57
6.3 ΜΕΘΟΔΟΣ VIKOR 58
6.4 ΜΕΘΟΔΟΣ PROMETHEE 60
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 61
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 61
7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ 63
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 65

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Στάθμη γενικού (όχι ειδικού) φωτισμού ανά χρήση κτιρίου σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1:2011 [15] 17
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά εύρη τιμών του δείκτη DGI με βάση την κλίμακα Hopkinson [18] 20
Πίνακας 3.3: Μέγιστες αποδεκτές τιμές του δείκτη DGI ανά χρήση κτιρίου [17] ... 20
Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά εύρη τιμών του δείκτη DGP [13] 21
Πίνακας 3.5: Μέγιστες αποδεκτές τιμές του δείκτη UGR ανάλογα με τη χρήση του χώρου [15] 21
Πίνακας 3.6: Η επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης του δείκτη PMV 25
Πίνακας 3.7: Επιτρεπτό εύρος τιμών βασικών παραμέτρων για τον υπολογισμό του PMV [21] 27
Πίνακας 3.8: Τιμές μεταβολικού ρυθμού για τυπικές δραστηριότητες [21] 27
Πίνακας 3.9: Τυπικές τιμές θερμικής αντίστασης λόγω ρουχισμού [21] 27
Πίνακας 3.10: Παραδείγματα προτεινόμενων κατηγοριών θερμικής άνεσης για τον σχεδιασμό κτιρίων [22] 29
Πίνακας 3.11: Κατανομή των μεμονωμένων ψήφων για διαφορετικές τιμές του PMV [22] 29
Πίνακας 4.1: Η κλίμακα βαθμολόγησης των εναλλακτικών ανά ζεύγη της μεθόδου AHP 38
Πίνακας 4.2: Οι τιμές του δείκτη τυχαιότητας ανάλογα με το πλήθος των εξεταζόμενων εναλλακτικών N_A 40
Πίνακας 5.1: Περιγραφή των εναλλακτικών του προβλήματος 45
Πίνακας 5.2: Θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων εναλλακτικών 47
Πίνακας 5.3: Περιγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης του προβλήματος απόφασης 48
Πίνακας 5.4: Οι συντελεστές θερμοπερατότητας του κτιριακού κελύφους 50
Πίνακας 5.5: Τα εσωτερικά φορτία του κτιριακού μοντέλου 50
Πίνακας 5.6: Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για τις τρεις εναλλακτικές 52
Πίνακας 5.7: Οι επιδόσεις των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο 53
Πίνακας 5.8: Η εννιαβάθμια κλίμακα για τον προσδιορισμό της βαρύτητας των κριτηρίων 54
Πίνακας 5.9: Οι συντελεστές βαρύτητας με βάση τη μέθοδο AHP 54

Πίνακας 5.10: Ο πίνακας απόφασης του προβλήματος 55
Πίνακας 6.1: Ο πίνακας απόφασης και η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση σε κάθε κριτήριο για τη μέθοδο MAUT 56
Πίνακας 6.2: Ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου MAUT 56
Πίνακας 6.3: Η πολυκριτήρια χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής με βάση τη μέθοδο MAUT 57
Πίνακας 6.4: Ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου TOPSIS 57
Πίνακας 6.5: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS 57
Πίνακας 6.6: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS 58
Πίνακας 6.7: Ο πίνακας απόφασης και η καλύτερη και η χειρότερη επίδοση για τη μέθοδο VIKOR 58
Πίνακας 6.8: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR . 59
Πίνακας 6.9: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR 59
Πίνακας 6.10: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE 60
Πίνακας 6.11: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE 60

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής 6
Σχήμα 2.2: Η συμπεριφορά ενός θερμοχρωμικού παραθύρου 8
Σχήμα 2.3: Καμπύλη μεταβολής της διαπερατότητας συναρτήσει του μήκους κύματος πριν και μετά τη θερμοκρασία μετάβασης επίστρωσης VO_2 (αριστερά), τυπική μορφή της καμπύλης υστέρησης μίας θερμοχρωμικής επίστρωσης (δεξιά) 9
Σχήμα 2.4: Η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας και η ροή θερμότητας σε ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο 10
Σχήμα 2.5: Αρχή λειτουργίας μίας τυπικής ηλεκτροχρωμικής συσκευής 11
Σχήμα 2.6: Ηλεκτροχρωμικό φιλμ από WO_3 πριν (αριστερά) και μετά τον χρωματισμό (δεξιά) 12
Σχήμα 2.7: Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες στην αδιαφανή (αριστερά) και τη διάφανη (δεξιά) τους κατάσταση 13
Σχήμα 3.1: Ο δείκτης PPD ως συνάρτηση του PMV 28
Σχήμα 3.2: Γραφική απεικόνιση του δυναμικού μοντέλου ρουχισμού [17] 30
Σχήμα 4.1: Αποτέλεσμα αξιολόγησης εναλλακτικών στη θεωρία σχέσεων υπεροχής 41
Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση της εναλλακτικής A_1 46
Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση των εναλλακτικών A_2 και A_3 46

Σχήμα 5.3: α) Η νότια και β) η βόρεια πλευρά του κτιριακού μοντέλου στο λογισμικό SketchUp Pro 50
Σχήμα 5.4: Τα ημερήσια προγράμματα παρουσίας ατόμων και χρήσης τεχνητού φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 90.1-2019 [37]..... 51

1. Εισαγωγή

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα της σύγχρονης εποχής με πολλαπλές συνέπειες για το περιβάλλον και την ανθρώπινη ζωή. Συγκεκριμένα, ο κτιριακός τομέας έχει αναγνωριστεί ως η μεγαλύτερη πηγή ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση, καθώς 40% της τελικής ενέργειας δαπανάται για τη θέρμανση, τον κλιματισμό, τον αερισμό και τον τεχνητό φωτισμό των κτιρίων με σκοπό την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης [1]. Ταυτόχρονα, καθώς το 75% του κτιριακού αποθέματος χαρακτηρίζεται από μειωμένη ενεργειακή απόδοση, είναι φανερό ότι ο κτιριακός τομέας παρουσιάζει σημαντικό περιθώριο για εξοικονόμηση ενέργειας [2].

Τα τελευταία χρόνια, μελετάται η χρήση προηγμένων έξυπνων παραθύρων ως μέσο για την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων. Ο όρος αυτός αναφέρεται σε υαλοπίνακες μεταβλητών θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων που προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που διεισδύει στο εσωτερικό του κτιρίου. Από τις διάφορες κατηγορίες έξυπνων παραθύρων, τα περισσότερο διαδεδομένα στην παγκόσμια αγορά είναι τα ηλεκτροχρωμικά και τα θερμοχρωμικά συστήματα. Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα προσφέρουν τη δυνατότητα δυναμικού ελέγχου της διαπερατότητάς τους μέσω της εφαρμογής εξωτερικής τάσης, ενώ στα θερμοχρωμικά συστήματα η διαπερατότητα του παραθύρου καθορίζεται από τη θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατός ο περιορισμός των ανεπιθύμητων ηλιακών θερμικών κερδών που προκαλούν υπερθέρμανση και αυξάνουν τα ψυκτικά φορτία κατά τη θερινή περίοδο. Παράλληλα, επιτρέπεται η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του χειμώνα με σκοπό τη μείωση των αναγκών θέρμανσης και την εξασφάλιση φυσικού φωτισμού.

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων για την αξιολόγηση της καταλληλότητας της εφαρμογής σύγχρονων τύπων έξυπνων παραθύρων στον ελληνικό χώρο. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση βασιζόμενη στις βασικές οικογένειες πολυκριτηριακών μεθόδων, όπως είναι η θεωρία χρησιμότητας, τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα και η θεωρία σχέσεων υπεροχής. Ως μελέτη περίπτωσης εξετάζεται διαμέρισμα στην περιοχή της Αθήνας, με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου τύπου παραθύρου από την οπτική πλευρά ενός μέσου ενοίκου-αποφασίζοντα. Επιλέγονται κατάλληλα κριτήρια και προσδιορίζονται τα αντίστοιχα βάρη με τη βοήθεια ερωτηματολογίου. Η απόδοση των εναλλακτικών λύσεων που μελετώνται προσδιορίζεται μέσω ενεργειακής προσομοίωσης με τη βοήθεια του λογισμικού EnergyPlus. Ως εναλλακτικές λύσεις μελετώνται οι δύο πιο ευρέως διαδεδομένοι τύποι έξυπνων παραθύρων, τα ηλεκτροχρωμικά και τα θερμοχρωμικά παράθυρα, συγκριτικά με τα συμβατικά

παράθυρα με εσωτερική σκίαση που έχουν επικρατήσει μέχρι στιγμής στην ελληνική αγορά.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται συνολικά από 7 κεφάλαια. Η παρούσα εισαγωγή αποτελεί το 1ο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται ο σκοπός και η διάρθρωση της εργασίας. Στο 2ο κεφάλαιο αρχικά γίνεται μία σύντομη περιγραφή των συμβατικών υαλοπινάκων σταθερών ιδιοτήτων που έχουν επικρατήσει μέχρι στιγμής στην ελληνική αγορά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι έξυπνων υαλοπινάκων μεταβλητών ιδιοτήτων που θα εξεταστούν στη μελέτη περίπτωσης και επεξηγείται η αρχή λειτουργίας τους. Στο 3ο κεφάλαιο ορίζονται οι έννοιες της οπτικής και της θερμικής άνεσης και παρουσιάζονται κατάλληλοι δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίησή τους. Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζονται θεωρητικά οι πολυκριτήριες μέθοδοι λήψης αποφάσεων που θα εφαρμοστούν στα πλαίσια της εργασίας. Στο 5ο κεφάλαιο περιγράφεται η εξεταζόμενη μελέτη περίπτωσης και επεξηγούνται τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στο λογισμικό EnergyPlus για την πραγματοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης. Το πρόβλημα απόφασης καθορίζεται και προσδιορίζονται οι εναλλακτικές, τα κριτήρια και ο τρόπος υπολογισμού των αντίστοιχων βαρών. Στο 6ο κεφάλαιο αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μελέτη περίπτωσης από την εφαρμογή των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στο 4ο κεφάλαιο. Τέλος, στο 7ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και προτείνονται κάποιες μελλοντικές επεκτάσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο την παρούσα μελέτη.

2. Υαλοπίνακες σταθερών και μεταβλητών ιδιοτήτων

Τα υαλοστάσια, ανάλογα με την ικανότητά τους να προσαρμόζουν τις οπτικές τους ιδιότητες με ακρίβεια και αντιστρεπτά σε εξωτερικά ερεθίσματα μπορούν να διακριθούν σε υαλοστάσια σταθερών ή μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων. Οι οπτικές ιδιότητες των παραθύρων που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία είναι σταθερές και ανεξάρτητες από εποχιακές και θερμοκρασιακές μεταβολές και δεν υπάρχει δυνατότητα δυναμικού ελέγχου του ηλιακού θερμικού κέρδους ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του χρήστη [3].

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά γίνεται μία σύντομη περιγραφή των συμβατικών υαλοπινάκων σταθερών ιδιοτήτων που έχουν επικρατήσει μέχρι στιγμής στην ελληνική αγορά. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι έξυπνων υαλοπινάκων μεταβλητών ιδιοτήτων που θα εξεταστούν στη μελέτη περίπτωσης και επεξηγείται η αρχή λειτουργίας τους.

2.1 Υαλοπίνακες σταθερών ιδιοτήτων

Από άποψη δομής, τα πιο διαδεδομένα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα παραθύρων μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων γυαλιού που περιλαμβάνουν σε μονά, διπλά και τριπλά παράθυρα. Ακόμα, ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η ενσωμάτωση υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής στα σύγχρονα συστήματα παραθύρων, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς.

2.1.1 Απλοί-μονοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για την πιο απλή μορφή υαλοπινάκων που χρησιμοποιούνταν παλιότερα στις κατασκευές. Οι υαλοπίνακες αυτού του είδους που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές κουφωμάτων έχουν συνήθως πάχος από 4 mm έως 12 mm. Παρότι οι συγκεκριμένοι υαλοπίνακες χρησιμοποιούνται συχνά στην Ελλάδα, η θερμική τους συμπεριφορά δεν συμφωνεί με τον ελληνικό κανονισμό θερμομόνωσης κτιρίων. Σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους υαλοπινάκων παρουσιάζουν την υψηλότερη συναλλαγή ενέργειας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ επιτρέπουν τη μέγιστη εισχώρηση σε φυσικό φως [4].

Πολλά κτίρια στις μέρες μας έχουν ακόμα απλούς, διάφανους υαλοπίνακες. Όταν ανακαινίζονται συνήθως αντικαθίστανται με διπλούς συμβατικούς υαλοπίνακες ή σπανιότερα με υαλοπίνακες με βελτιωμένες οπτικές ιδιότητες.

2.1.2 Διπλοί υαλοπίνακες

Οι διπλοί υαλοπίνακες αποτελούνται από δύο φύλλα γυαλιού που διαχωρίζονται από ένα στρώμα αέρα ή κάποιου ευγενούς αερίου. Το αέριο που χρησιμοποιείται στο διάκενο θα πρέπει να είναι ξηρό, ώστε να αποφεύγονται υγροποιήσεις των υδρατμών. Το εσωτερικό φύλλο γυαλιού απορροφά και ανακλά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από το εξωτερικό φύλλο. Σε σύγκριση με τα συστήματα μονής υάλωσης, οι διπλοί υαλοπίνακες περιορίζουν σημαντικά τις θερμικές απώλειες λόγω της θερμομονωτικής ιδιότητας του αερίου στο διάκενο. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα σε φυσικό φως. Στους συμβατικούς διπλούς υαλοπίνακες τα 2/3 περίπου των θερμικών απωλειών οφείλονται σε θερμική ακτινοβολία, ενώ το υπόλοιπο 1/3 προέρχεται από μεταφορά θερμότητας διαμέσου του υαλοπίνακα με αγωγή ή με συναγωγή. Το πάχος του διακένου επηρεάζει τις θερμομονωτικές ικανότητες του υαλοπίνακα. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες μέσω του παραθύρου, ενός διπλού υαλοπίνακα μειώνεται με αύξηση του πάχους του διακένου για πάχη μέχρι 16 mm. Για διάκενα μεγαλύτερου πάχους παρατηρείται μικρή αύξηση του συντελεστή θερμοπερατότητας, καθώς επιτρέπεται η κίνηση του αέρα στο διάκενο, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμομονωτικής ικανότητας λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τον εσωτερικό στον εξωτερικό υαλοπίνακα κατά τη χειμερινή περίοδο και αντίστροφα κατά τη θερινή.

Στην Ελλάδα, με βάση τον Κανονισμό Θερμομόνωσης του 1979, είναι υποχρεωτική η χρήση διπλών υαλοπινάκων σε νέα κτίρια. Για τα παλαιά κτίρια, τα οποία κτίστηκαν εν γένει πριν το 1979, η αντικατάσταση των μονών υαλοπινάκων με διπλούς και η πιθανή αντικατάσταση των κουφωμάτων αποτελούν μία σημαντική τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας. Η αντικατάσταση των παλιών παραθύρων με νέα, ενεργειακά αποδοτικά διπλά παράθυρα, αν και παρουσιάζει κάποιο κόστος, μπορεί να ανατρέψει κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό την κακή ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, με πολλαπλά ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας λόγω των μειωμένων θερμικών συναλλαγών με το περιβάλλον, οι διπλοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν μία σειρά πλεονεκτημάτων, όπως:

- Μείωση της εκπομπής ακτινοβολίας από ή προς τον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, καθώς παρουσιάζουν επιφανειακή θερμοκρασία πλησιέστερη με αυτή των άλλων επιφανειών του χώρου.
- Περιορισμό των ρευμάτων αέρα κοντά στο παράθυρο, με αποτέλεσμα την εξασφάλιση βελτιωμένων συνθηκών θερμικής άνεσης.
- Αποτροπή της συμπύκνωσης υδρατμών στην επιφάνειά τους κατά τη χειμερινή περίοδο.
- Μείωση του θορύβου [4].

2.1.3 Τριπλοί υαλοπίνακες

Οι τριπλοί υαλοπίνακες αποτελούνται από ένα σύστημα τριών φύλλων γυαλιού, που διατηρούνται σε απόσταση μεταξύ τους μέσω μεταλλικής κατασκευής, με συνήθη απόσταση 12 mm. Όπως και στην περίπτωση των διπλών υαλοπινάκων, ο εγκλωβισμένος αέρας στα διάκενα βελτιώνει τη θερμομονωτική συμπεριφορά τους.

Ένας τριπλός υαλοπίνακας παρουσιάζει στη γενική περίπτωση μεγαλύτερη θερμομόνωση από έναν διπλό. Ωστόσο, υπάρχουν και εξαιρέσεις, καθώς ένας τριπλός υαλοπίνακας με το ίδιο πάχος στρωμάτων γυαλιού και το ίδιο συνολικό πάχος με έναν διπλό θα παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας και συνεπώς μεγαλύτερες θερμικές απώλειες συγκριτικά με τον διπλό. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αέρας, ο οποίος θα καταλαμβάνει μεγαλύτερο χώρο στην περίπτωση του διπλού υαλοπίνακα παρουσιάζει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με το γυαλί. Γενικά, το πάχος των τριπλών υαλοπινάκων είναι μεγαλύτερο από αυτό των διπλών. Οι τριπλοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν δυσκολίες στην εφαρμογή τους λόγω του αυξημένου τους βάρους. Συνιστώνται σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα, όπου απαιτείται υψηλή θερμομόνωση του κελύφους. Μπορούν να τοποθετηθούν σε ειδικές κατηγορίες κουφωμάτων με τη χρήση ειδικών μηχανισμών που είναι ανθεκτικοί σε μεγάλα βάρη. Ως προς τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί εύκολα τη διαφορά σε σχέση με τον μονό ή τον διπλό υαλοπίνακα.

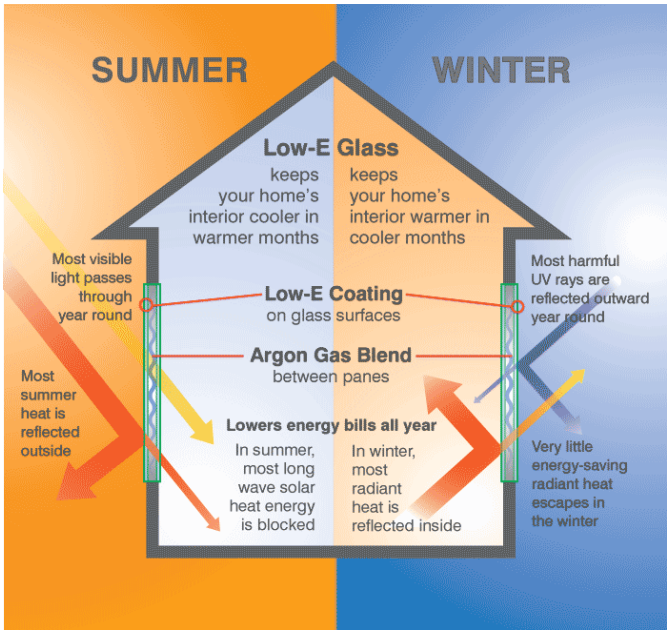
Σημειώνεται ότι στην αγορά υπάρχουν και συστήματα που περιλαμβάνουν περισσότερα στρώματα γυαλιού, όπως τετραπλά, πενταπλά ή ακόμα και εξαπλά παράθυρα, ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα και η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε ειδικές εφαρμογές ή για ερευνητικούς σκοπούς [4].

2.1.4 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing)

Οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής (low-e) αναπτύχθηκαν με σκοπό την ελαχιστοποίηση της υπέρυθρης και υπεριώδους ακτινοβολίας που διαπερνούν τους υαλοπίνακες, χωρίς ταυτόχρονα να μειώνεται η διερχόμενη ορατή ακτινοβολία. Όταν η θερμική ή η φωτεινή ενέργεια προσπίπτει σε έναν υαλοπίνακα μπορεί να ανακλαστεί προς το εξωτερικό περιβάλλον, να διέλθει μέσα από τη μάζα του υαλοπίνακα ή να απορροφηθεί από αυτήν. Η απορροφούμενη ακτινοβολία στη συνέχεια μπορεί να διεισδύσει στο παράθυρο μέσω της αγωγής στο γυαλί και το πλαίσιο, μέσω συναγωγής στο κενό αέρα μεταξύ των γυάλινων επιφανειών ή μέσω εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας από την επιφάνεια του γυαλιού. Στη γενική περίπτωση, τα υλικά με υψηλή τιμή συντελεστή ανάκλασης παρουσιάζουν χαμηλότερη ικανότητα εκπομπής, ενώ τα σκουρόχρωμα υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ικανότητα εκπομπής. Τα παράθυρα, όπως και όλα τα άλλα υλικά, εκπέμπουν θερμότητα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, ανάλογα με τον συντελεστή εκπομπής και τη θερμοκρασία των επιφανειών τους. Καθώς η ακτινοβολία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τρόπους μεταφοράς θερμότητας στα παράθυρα, η μείωση της

ακτινοβολίας που εκπέμπεται από μία ή περισσότερες από τις επιφάνειες των υαλοπινάκων βελτιώνει σημαντικά τις μονωτικές ικανότητες του παραθύρου και μειώνει τον συντελεστή θερμοπερατότητας του. Από άποψη μόνωσης εκτιμάται ότι η προσθήκη μίας επίστρωσης low-e είναι περίπου ισοδύναμη με την προσθήκη ενός επιπλέον υαλοπίνακα [5].

Το γυαλί low-e περιλαμβάνει μία λεπτή, διαφανή επίστρωση μετάλλου ή οξειδίου μετάλλου που ανακλά την υπεριώδη ακτινοβολία με μεγάλο μήκος κύματος και συχνά ενσωματώνεται σε άλλα συστήματα, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Ορισμένα γυαλιά low-e ανακλούν επίσης και σημαντικά ποσοστά υπέρυθρης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη διέλευση της ορατής ακτινοβολίας. Καθώς οι συγκεκριμένες επιστρώσεις παρουσιάζουν υψηλές τιμές συντελεστή ανάκλασης στην περιοχή του υπέρυθρου και επειδή το άθροισμα των συντελεστών απορρόφησης, ανάκλασης και διάβασης είναι ίσο με τη μονάδα, οι επιστρώσεις αυτές παρουσιάζουν μικρότερες τιμές συντελεστή απορρόφησης στα αντίστοιχα μήκη κύματος. Απόρροια της περιορισμένης απορρόφησης και της επιλεκτικής διαπερατότητας είναι η περιορισμένη ικανότητα εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας προς την ψυχρή πλευρά του παραθύρου. Στη γενική περίπτωση η μείωση του συντελεστή εκπομπής οδηγεί σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας υαλοπινάκων.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής

Οι επιστρώσεις low-e που σχεδιάζονται για ψυχρά κλίματα μειώνουν τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον, καθώς ανακλούν την ακτινοβολία στο εσωτερικό του κτιρίου και εκπέμπουν μικρό ποσοστό ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται στις επιστρώσεις που σχεδιάζονται για θερμά κλίματα, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου

που μπορεί να προκαλέσει δυσφορία. Εκτός από τη μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, οι επιστρώσεις low-e που σχεδιάζονται για θερμά κλίματα μειώνουν σημαντικά και τη διάβαση της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου του παραθύρου. Οι ιδιότητες των επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής ως προς την ανάκλαση μπορούν να τροποποιηθούν, ώστε να περιλαμβάνουν συγκεκριμένα μέρη του ορατού και του υπέρυθρου φάσματος. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατός ο σχεδιασμός ενός υαλοπίνακα που θα βελτιστοποιεί τις ροές ενέργειας ως προς την ηλιακή θέρμανση, τον φυσικό φωτισμό και την ψύξη. Οι υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της θερμομόνωσης σε σχέση με τους διπλούς υαλοπίνακες κατά περίπου 200 % και κατά περίπου 400 % σε σχέση με τους απλούς μονούς υαλοπίνακες [6].

2.2 Παράθυρα μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων

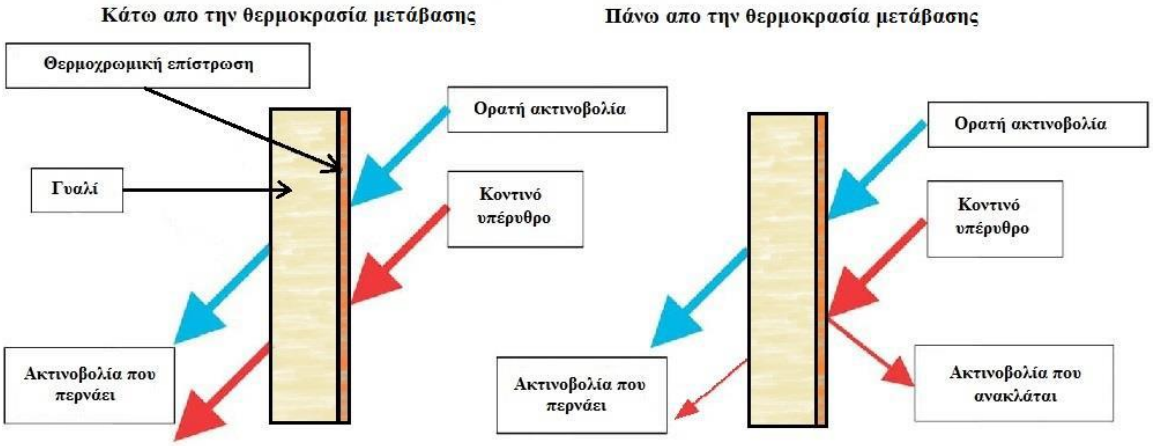
Στη σύγχρονη εποχή είναι αναγκαία η χρήση παραθύρων προηγμένης τεχνολογίας, τα οποία θα είναι σε θέση να αξιοποιούν τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων στον καλύτερο δυνατό βαθμό, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης για τους ενοίκους. Η επιλογή των παραθύρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο τύπος του κτιρίου και οι κλιματικές συνθήκες.

Ο όρος «έξυπνα παράθυρα» περιλαμβάνει υαλοπίνακες που διαθέτουν την ικανότητα μεταβολής των θερμικών και οπτικών τους χαρακτηριστικών, όπως είναι η θερμική τους διαπερατότητα ή η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, με σκοπό τον έλεγχο του επιπέδου φυσικού φωτισμού ή των ηλιακών θερμικών κερδών. Σε αυτή την κατηγορία παραθύρων ανήκουν και αυτά που περιλαμβάνουν χρωμογενετικά υλικά (chromogenic materials). Ο όρος αυτός αναφέρεται σε υλικά με μεταβλητές οπτικές ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται σύμφωνα με ένα εξωτερικό ερέθισμα. Από τα υλικά αυτά, τα περισσότερο διαδεδομένα σε εφαρμογές παραθύρων είναι τα θερμοχρωμικά και τα ηλεκτροχρωμικά, τα οποία και θα παρουσιαστούν εκτενώς στη συνέχεια.

2.2.1 Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες (Thermochromic glazing)

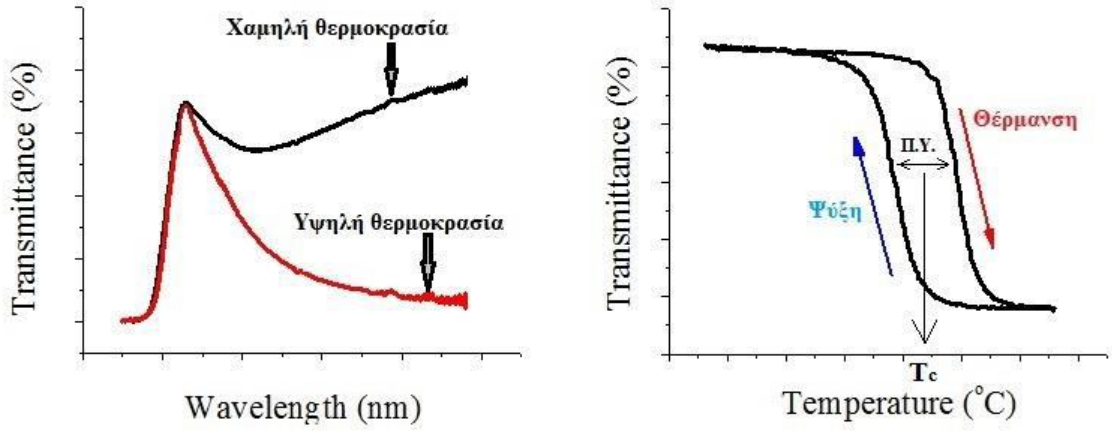
Τα θερμοχρωμικά παράθυρα αναπτύχθηκαν ως ένα παθητικό σύστημα βελτίωσης της θερμικής άνεσης και της εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα στη θέση των παραδοσιακών διάφανων υαλοστασίων. Τα θερμοχρωμικά παράθυρα έχουν μία σχετικά απλή δομή και μπορούν να ρυθμίζουν το εισερχόμενο φως και το ηλιακό θερμικό κέρδος μεταβάλλοντας τις οπτικές τους ιδιότητες ανάλογα με τη θερμοκρασία. Όταν η θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται πέρα από μία κρίσιμη τιμή, η οποία χαρακτηρίζεται ως κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία κορεσμού (Lower Critical Saturation Temperature-LCST) ή θερμοκρασία μετάβασης (TT-Transition Temperature), πραγματοποιείται αλλαγή της φάσης και της κρυσταλλικής δομής του υλικού, με αποτέλεσμα την μεταβολή του χρώματός του και τη μετατροπή του υλικού

από διαφανές σε γαλακτόχρωμο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να περιοριστεί η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο και συγκεκριμένα αυτή που ανήκει στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (NIR-Near Infrared Region) και είναι κυρίως υπεύθυνη για τη μεταφορά θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μείωση της υπερθέρμανσης τις ζεστές ημέρες του έτους [7].



Σχήμα 2.2: Η συμπεριφορά ενός θερμοχρωμικού παραθύρου

Ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα θερμοχρωμικά υλικά είναι το διοξείδιο του βαναδίου (VO_2), το οποίο αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1959 από τον F. J. Morin και χαρακτηρίζεται από θερμοκρασία μετάβασης 68 ^oC. Σε υψηλότερες από αυτή θερμοκρασίες λαμβάνει χώρα μία πλήρως αναστρέψιμη αλλαγή φάσης από μέταλλο σε ημιαγωγό (MST-Metallic to Semiconductor phase Transition), η οποία συνεπάγεται μεταβολή στις οπτικές ιδιότητες του υλικού στο εγγύς υπέρυθρο της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβολή της αγωγιμότητάς του κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Οι αλλαγές αυτές παρουσιάζουν σημαντική εξάρτηση από εξωτερικές παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση και οι προσμίξεις. Σε παχιές επιστρώσεις VO_2 το πλάτος υστέρησης είναι περίπου 1 ^oC, ενώ στην περίπτωση των λεπτών υμενίων και των νανοδομών μπορεί να πάρει τιμές (10-15) ^oC και (30-35) ^oC αντιστοίχως. Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται η τυπική μορφή της διαπερατότητας και του πλάτους υστέρησης για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις. Στην αριστερή πλευρά παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της διαπερατότητας μιας επίστρωσης VO_2 σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας σε θερμοκρασίες πάνω και κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης. Η μεταβολή της διαπερατότητας στην περιοχή των μεγαλύτερων μηκών κύματος, που αντιστοιχούν στην υπέρυθρη ακτινοβολία είναι εμφανής. Στη δεξιά πλευρά παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της διαπερατότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, θεωρώντας σταθερή τιμή μήκους κύματος 1500 nm. Η θερμοκρασία μετάβασης αποτελεί τη θερμοκρασία που βρίσκεται στο κέντρο της καμπύλης υστέρησης, ενώ το εύρος της καμπύλης αποτελεί το πλάτος υστέρησης [8].



Σχήμα 2.3: Καμπύλη μεταβολής της διαπερατότητας συναρτήσει του μήκους κύματος πριν και μετά τη θερμοκρασία μετάβασης επίστρωσης VO_2 (αριστερά), τυπική μορφή της καμπύλης υστέρησης μίας θερμοχρωμικής επίστρωσης (δεξιά)

Για την επιτυχή ενσωμάτωση οποιουδήποτε είδους θερμοχρωμικού υλικού σε υαλοπίνακες θα πρέπει το υλικό να παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

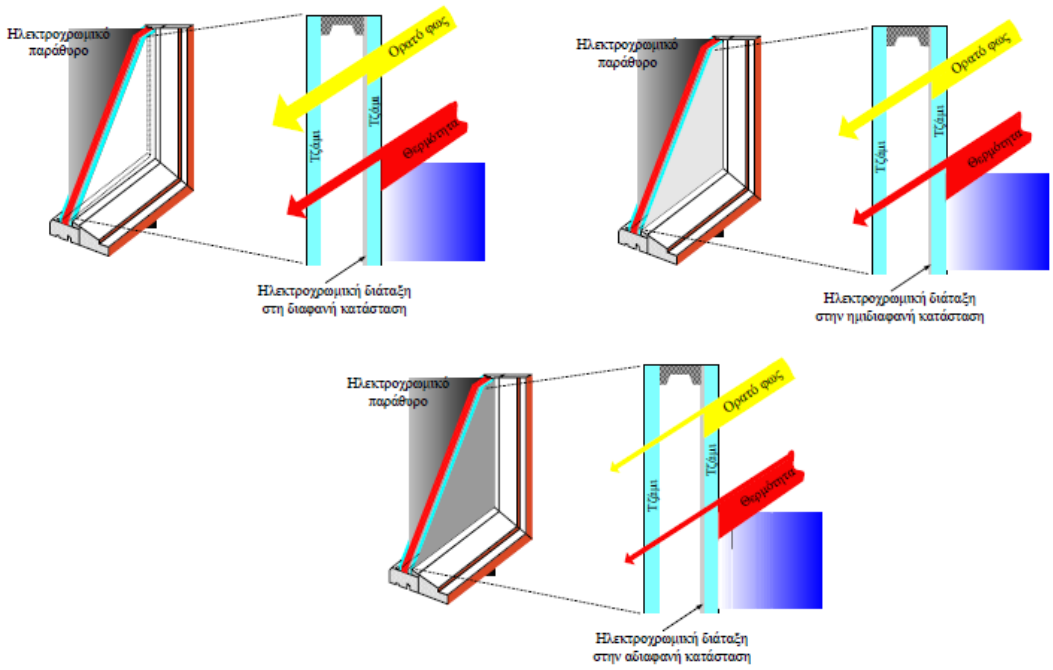
- Διαπερατότητα μεγαλύτερη του 85% σε διαφανή κατάσταση (κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης) και μικρότερη του 15% στην ημιδιαφανή κατάσταση (πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης).
- Μεγάλο ρυθμό αλλαγής κατάστασης σε θερμοκρασιακό εύρος 10 ^{o}C.
- Δυνατότητα μετάβασης στην αρχική διαφανή κατάσταση με μικρή υστέρηση, η οποία θα διατηρείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Ομοιομορφία στη δομή του υλικού στις δύο εναλλακτικές καταστάσεις του.
- Δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας μετάβασης σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής τόσο στις κλιματικές όσο και στις αρχιτεκτονικές ανάγκες του κτιρίου.
- Μακροχρόνια αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία.
- Κατά προτίμηση αδρανές υλικό που δεν παγώνει, δεν είναι τοξικό ούτε εύφλεκτο.
- Χαμηλό κόστος και δυνατότητα χρήσης σε κατασκευές που θα καταλαμβάνουν μεγάλη επιφάνεια [7].

Τις τελευταίες δεκαετίες ως οι πιο επιθυμητές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών για εφαρμογές σε παράθυρα θεωρήθηκαν η χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης (που περιορίζει τα ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη), η υψηλή διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, η οποία απαιτεί λεπτές διαπερατές επιστρώσεις και η υψηλή ικανότητα ρύθμισης της διαπερατότητας στο εγγύς υπέρυθρο μετά από την αλλαγή φάσης του υλικού. Σημειώνεται ότι μία χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης δεν είναι πάντα επιθυμητή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική μείωση της εισερχόμενης στον χώρο ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών και αύξηση των αναγκών θέρμανσης. Μέχρι στιγμής, οι υψηλές τιμές θερμοκρασίας μετάβασης, η

χαμηλή διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, τα μη ελκυστικά χρώματα και η περιορισμένη ικανότητα ρύθμισης αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα των θερμοχρωμικών παραθύρων.

2.2.2 Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες (Electrochromic glazing)

Ως ηλεκτροχρωμικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που αλλάζουν χρώμα σε ανταπόκριση με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μέσω οξείδωσης (απώλειας ηλεκτρονίων) και αναγωγής (απόκτηση ηλεκτρονίων). Όταν είναι επιθυμητή η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας τα παράθυρα αυτά λειτουργούν στη διαφανή τους φάση, ενώ όταν παρουσιάζεται ο κίνδυνος υπερθέρμανσης μεταβαίνουν σε κατάσταση χαμηλής διαπερατότητας. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ρυθμίζουν τη διαπερατότητα, την ανακλαστικότητα, την απορροφητικότητα και την ικανότητα εκπομπής τους μεταξύ δύο ακραίων τιμών.



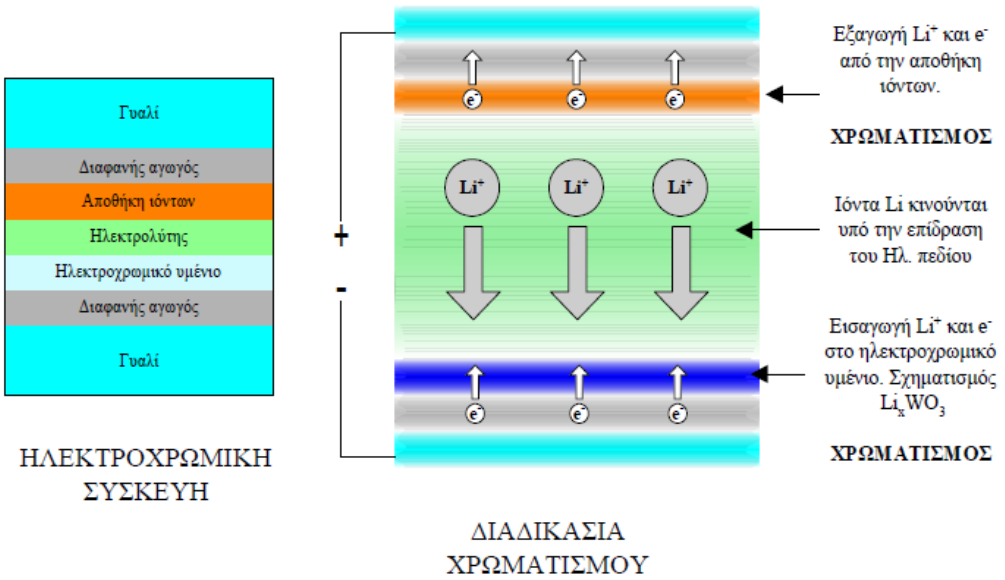
Σχήμα 2.4: Η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας και η ροή θερμότητας σε ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο

Το φαινόμενο του ηλεκτροχρωμισμού παρουσιάζεται σε πολλές οργανικές και ανόργανες χημικές ενώσεις. Καθώς τα οργανικά υλικά δεν έχουν σταθερή συμπεριφορά ως προς το φως, η εφαρμογή τους στην κατασκευή παραθύρων είναι περιορισμένη. Για τέτοιου είδους εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως ανόργανα οξείδια μετάλλων, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα οξείδια του βολφραμίου (WO_3), του μολυβδαινίου (MoO_3), του βαναδίου (V_2O_5) και του νικελίου (NiO_2). Τα οξείδια αυτά έχουν την ικανότητα να χρωματίζονται αντιστρεπτά μέσω της εισαγωγής

και εξαγωγής ευκίνητων ιόντων (H^+, Li^+, Na^+) στο πλέγμα τους. Με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού δυναμικού (περίπου 1-3 Volt DC) τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μεταβάλλουν αντιστρεπτά τη διαπερατότητά τους στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο [9].

Μία τυπική ηλεκτροχρωμική διάταξη αποτελείται από τα ακόλουθα 5 διαδοχικά λεπτά στρώματα, τοποθετημένα ανάμεσα σε δύο γυάλινα υποστρώματα ή, σπανιότερα, πάνω σε ένα μονό γυάλινο υπόστρωμα :

1. Ένα διαφανές και ηλεκτρικά αγώγιμο υμένιο (στις περισσότερες περιπτώσεις κάποιο οξείδιο του κασσίτερου με προσμίξεις ινδίου), με υπόστρωμα γυαλί
2. Ένα ηλεκτροχρωμικό υμένιο που αποτελεί το οπτικά ενεργό τμήμα της διάταξης και κατασκευάζεται συνήθως από WO_3
3. Έναν ηλεκτρολύτη (πολυμερή ή στερεό) με υψηλή ιοντική αγωγιμότητα
4. Ένα υμένιο αποθήκευσης ιόντων (συνήθως από V_2O_5 ή NiO_2)
5. Ένα δεύτερο διαφανές και ηλεκτρικά αγώγιμο υμένιο [10].

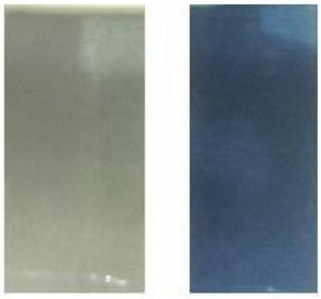


Σχήμα 2.5: Αρχή λειτουργίας μίας τυπικής ηλεκτροχρωμικής συσκευής

Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε μία διάταξη ανόδου – καθόδου που προκαλεί ροή ρεύματος από τη σύνδεση υλικών διαφορετικού δυναμικού. Πιο συγκεκριμένα, για το σύστημα στο **Σχήμα 2.5**, μέσω της εφαρμογής του κατάλληλου ηλεκτρικού δυναμικού δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον ηλεκτρολύτη, το ηλεκτροχρωμικό υμένιο από WO_3 πολώνεται αρνητικά και ιόντα Li^+ εξέρχονται από το υμένιο αποθήκευσης ιόντων. Τα ιόντα αυτά, σε συνδυασμό με τα ιόντα του ηλεκτρολύτη, εισέρχονται στο υμένιο WO_3, που είναι αρχικά διάφανο, υπό την επίδραση του πεδίου και σχηματίζουν την ένωση Li_xWO_3 που έχει βαθύ μπλε χρώμα. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παράθυρα κτιρίων για την αποκοπή σημαντικού μέρους της εισερχόμενης ηλιακής

ακτινοβολίας, μειώνοντας σημαντικά τα έξοδα φωτισμού και σκίασης. Τα κρυσταλλικά φιλμ παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη κινητικότητα ιόντων συγκριτικά με τα άμορφα, συνεπώς τα τελευταία έχουν πολύ πιο γρήγορη απόκριση στην αλλαγή του χρώματος. Σημειώνεται ότι για την ισοστάθμιση του φορτίου απαιτείται παράλληλη εισαγωγή ηλεκτρονίων από ένα εξωτερικό κύκλωμα στο ηλεκτροχρωμικό υλικό μέσω του διαφανούς και αγώγιμου υμενίου. Η διαδικασία αυτή είναι πλήρως αντιστρεπτή, δηλαδή αντιστρέφοντας την πολικότητα του ηλεκτρικού δυναμικού προκαλείται αντιστροφή της φοράς κίνησης των ιόντων, η οποία οδηγεί στο αποχρωματισμό της διάταξης [11]. Η αντίδραση οξειδοαναγωγής που περιγράφει τη διαδικασία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:

$$WO_3 + xLi+ + xe^- \leftrightarrow Li_xWO_3 \qquad (2.1)$$



Σχήμα 2.6: Ηλεκτροχρωμικό φιλμ από WO_3 πριν (αριστερά) και μετά τον χρωματισμό (δεξιά)

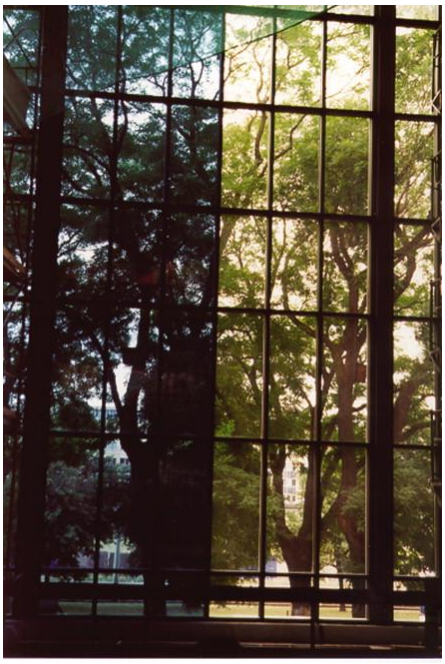
Γίνονται ακόμα πολλές μελέτες με σκοπό την εύρεση μίας ακριβούς εξήγησης σχετικά με την αιτία του χρωματισμού των ηλεκτροχρωμικών υλικών. Ωστόσο, είναι κοινώς αποδεκτό ότι στη διαδικασία του χρωματισμού εμπλέκεται η εισαγωγή ή η εξαγωγή ιόντων και ηλεκτρονίων μαζί. Η μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων των παραθύρων είναι σταδιακή, με ρυθμό περίπου 5 min/m^2 και ρυθμίζεται κατάλληλα, ώστε να διατηρείται η ομοιομορφία χρώματος του παραθύρου. Έχει παρατηρηθεί ότι η ταχύτητα αλλαγής κατάστασης μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που διέρχεται μέσω του παραθύρου μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με τη χρήση ειδικών επιστρώσεων με χαμηλό συντελεστή εκπομπής (low-e coatings) ως αγώγιμα υμένια.

Η διάρκεια ζωής δείχνει για πόσους κύκλους λειτουργίας αντέχει η ηλεκτροχρωμική διάταξη, δηλαδή πόσες φορές είναι δυνατή η εισαγωγή και η αποβολή φορτίου, πριν υποστεί γήρανση. Πλέον, εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 20-30 ετών, θεωρώντας ότι παρουσιάζουν περίπου 5 κύκλους λειτουργίας ημερησίως.

Από άποψη μορφής τα ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια είναι σχεδόν πανομοιότυπα με τα συμβατικά παράθυρα, με μοναδική διαφορά την ύπαρξη ενός καλωδίου που εξέρχεται από το υαλοστάσιο και χρησιμοποιείται για ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Παρότι πολλές λειτουργίες που σχετίζονται με τον φωτισμό και τον έλεγχο των ηλεκτρομηχανικών

συστημάτων (HVAC) εξακολουθούν να ρυθμίζονται χειροκίνητα, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα προσφέρουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα που θα λειτουργεί βάσει δεδομένων που θα συλλέγονται από θερμικούς αισθητήρες και αισθητήρες φωτισμού (Building Management System-BMS). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία των υαλοπινάκων, σύμφωνα με τις συνθήκες φωτισμού και τα σημεία ρύθμισης (set points) των επιμέρους συστημάτων HVAC.

Η παραγωγή ηλεκτροχρωμικών παραθύρων έχει ήδη ξεκινήσει από πολλές πολυεθνικές εταιρείες (π.χ. Pilkington, Sage), ενώ άλλες προβαίνουν σε επενδύσεις σε αυτόν τον τομέα. Τέτοιου είδους συστήματα μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε μεγάλα κτίρια με ενσωμάτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στο σύστημα κεντρικού ελέγχου του κτιρίου, σε βιοκλιματικούς χώρους, αλλά και από ιδιώτες, με σκοπό τη μείωση των αναγκών κλιματισμού το καλοκαίρι, των αναγκών θέρμανσης τον χειμώνα και των αναγκών τεχνητού φωτισμού σε ετήσια βάση.



Σχήμα 2.7: Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες στην αδιαφανή (αριστερά) και τη διάφανη (δεξιά) τους κατάσταση

Την πρώτη εφαρμογή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων σε μεγάλη κλίμακα αποτέλεσε το μουσείο Seto στην Ιαπωνία το 1988 από την εταιρεία Asahi. Τα παράθυρα αυτά είναι ενεργά ακόμα και σήμερα και περιλαμβάνουν οργανικούς ηλεκτρολύτες. Μία άλλη εφαρμογή αποτέλεσε η εγκατάσταση της πρώτης πρόσοψης από ηλεκτροχρωμικά παράθυρα στην Ευρώπη στη τράπεζα Dresden Stadtsparkasse στη Δρέσδη το 1999 από την εταιρεία Pilkington. Η πρόσοψη αυτή έχει επιφάνεια μεγαλύτερη από 200 m^2 και τα οπτικά χαρακτηριστικά των παραθύρων ελέγχονται αυτόματα από το κεντρικό σύστημα ελέγχου και βελτιστοποίησης της ενεργειακής

κατανάλωσης του κτιρίου. Ηλεκτροχρωμικά παράθυρα E-Control έχουν επίσης εγκατασταθεί σε πολλές εφαρμογές μικρής κλίμακας, κυρίως σε κτίρια γραφείων.

Μέχρι στιγμής, οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες δεν έχουν διαδοθεί ευρέως στην αγορά λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής (≈ 500 €/m^2) και της μειωμένης διαθεσιμότητας. Ωστόσο, είναι πιθανό ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων θα μπορέσει να αντισταθμίσει σε ένα βαθμό το υψηλό τους κόστος, οδηγώντας στη χρήση τους σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας. Ταυτόχρονα, μέσω της ωρίμανσης της τεχνολογίας, καθώς και νέων, περισσότερο οικονομικών διαδικασιών παραγωγής, αναμένεται σημαντική μείωση του κόστους τους που σταδιακά θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησής τους σε νέα ή ανακαινιζόμενα κτίρια.

Η λειτουργία ενός ηλεκτροχρωμικού παραθύρου απαιτεί μια αποτελεσματική μέθοδο ελέγχου για τη ρύθμιση της μετάβασής του από τη διαφανή στη χρωματισμένη του κατάσταση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βασιστεί σε διάφορες παραμέτρους, όπως είναι οι προτιμήσεις των ενοίκων, οι οποίες, ωστόσο, είναι συνήθως απρόβλεπτες. Η ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης δεν είναι απαραίτητα ο βασικός στόχος των ατόμων που βρίσκονται στο κτίριο. Γενικά, σε ένα κτίριο γραφείων ο πιο σημαντικός παράγοντας για άτομα που δουλεύουν σε υπολογιστές θα μπορούσε να είναι ο περιορισμός των αντανακλάσεων ή της θάμβωσης, ενώ για τους υπόλοιπους εργαζομένους η εσωτερική θερμοκρασία παίζει συνήθως καθοριστικό ρόλο. Οι συνήθεις παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η εξωτερική ή εσωτερική θερμοκρασία, το επίπεδο φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου, η συμπεριφορά των ατόμων, η ώρα της ημέρας ή η εποχή του χρόνου.

Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων θα πρέπει να γίνεται με μικρή συχνότητα μετάβασης, ώστε να αποφεύγεται η γρήγορη αλλοίωση των χαρακτηριστικών του γυαλιού. Τα ηλεκτροχρωμικά συστήματα θα πρέπει να αντιδρούν με μία υστέρηση για την αποφυγή της αλλαγής της κατάστασής τους εξαιτίας κάποιου προσωρινού ερεθίσματος (για παράδειγμα εξαιτίας της προσωρινής εμφάνισης ενός σύννεφου). Άλλωστε, η μεταβολή των συνθηκών στο εσωτερικό ενός κτιρίου συνήθως πραγματοποιείται με αρκετά αργό ρυθμό [12].

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν μία πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Ενεργό έλεγχο της εισερχόμενης στο κτίριο ηλιακής ακτινοβολίας με αυτόματο τρόπο, μέσω του κεντρικού συστήματος ελέγχου του κτιρίου, με μικρή ενεργειακή κατανάλωση.
- Συμβολή στην εξασφάλιση κατάλληλου μικροκλίματος στο εσωτερικό των κτιρίων.
- Παρεμπόδιση της εισόδου τόσο της άμεσης, όσο και της διάχυτης ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τα παθητικά συστήματα σκίασης.

- Εξοικονόμηση ενέργειας σε θερμά κλίματα μέσω της μείωσης των αναγκών ψύξης και αποφυγή του κινδύνου της υπερθέρμανσης είτε απευθείας, είτε μέσω του συνδυασμού με διαφανή μονωτικά υλικά. Συνεπώς, η τεχνολογία αυτή συμβάλλει στη μείωση του μεγέθους του ψυκτικού εξοπλισμού, ενώ επειδή οδηγεί σε μια πιο επίπεδη καμπύλη μεταβατικών φορτίων συνεπάγεται ότι ο ψυκτικός εξοπλισμός θα λειτουργεί πιο συχνά στην περιοχή με την υψηλότερη τιμή COP, μειώνοντας ακόμα περισσότερο την ενεργειακή κατανάλωση.
- Αποτελεσματικό έλεγχο της εισερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας και περιορισμός της θάμβωσης, χωρίς ταυτόχρονα να παρεμποδίζεται η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον.
- Μηδαμινό κόστος συντήρησης λόγω της έλλειψης κινητών μερών.
- Δυνατότητα επίτευξης όλων των ενδιάμεσων καταστάσεων ανάμεσα στην πλήρως διαφανή και την πλήρως χρωματισμένη κατάσταση.
- Αισθητικά οφέλη λόγω της δυναμικής αλλαγής της όψης του κτιρίου.
- Ενίσχυση της ιδιωτικότητας.
- Προώθηση καινοτόμων ιδεών στον κτιριακό τομέα και συμβολή στην προσπάθεια δημιουργίας κτιρίων μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης.

Τέτοιου είδους υαλοπίνακες αποτελούν μία καλή εναλλακτική λύση σε περιπτώσεις ανακαίνισης κτιρίων, όπου φυσικοί και αρχιτεκτονικοί περιορισμοί δεν επιτρέπουν τη χρήση συμβατικών μεθόδων σκίασης. Ταυτόχρονα, τα έξυπνα παράθυρα μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης πολλών κτιρίων με ιστορική σημασία, χωρίς αισθητικές παρεμβάσεις στη μορφή τους. Ωστόσο, σημειώνεται ότι οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες δεν είναι ικανοί να προσφέρουν πλήρη έλεγχο των ανεπιθύμητων επιδράσεων από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, όπως είναι η θάμβωση και η ύπαρξη σημείων με πολύ υψηλή φωτεινότητα [9].

3. Στοιχεία οπτικής και θερμικής άνεσης

Τα παράθυρα και οι φεγγίτες προσφέρουν θέα προς το εξωτερικό περιβάλλον και συμβάλλουν στην ευεξία και την ψυχική υγεία των ατόμων, ενώ ταυτόχρονα αποτελούν πηγή φυσικού φωτισμού. Ωστόσο, η υπερβολική έκθεση ενός χώρου σε φυσικό φως μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, ανεπιθύμητη φωτεινότητα και, κατά συνέπεια, δυσφορία των ενοίκων [13].

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η έννοια της οπτικής άνεσης και θα αναλυθούν οι διάφορες συνιστώσες που την αποτελούν. Επίσης, θα περιγραφούν οι ευρύτερα διαδεδομένοι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της οπτικής δυσφορίας λόγω θάμβωσης. Στη συνέχεια, θα οριστεί η έννοια της θερμικής άνεσης και θα παρουσιαστεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο θερμικής άνεσης, γνωστό και ως μοντέλο του Fanger. Στα πλαίσια του μοντέλου αυτού θα αναλυθούν οι δείκτες Predicted Mean Vote (PMV) και Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) για την ποσοτικοποίηση της θερμικής άνεσης. Τέλος, θα παρουσιαστεί το δυναμικό μοντέλο ρουχισμού (dynamic clothing model), το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό την πιο λεπτομερή μοντελοποίηση της μονωτικής ικανότητας του ρουχισμού κατά τη διενέργεια υπολογισμών θερμικής άνεσης.

3.1 Οπτική άνεση

Σε κάθε χώρο πρέπει να παρέχεται ο φωτισμός που εξασφαλίζει στους χρήστες οπτική άνεση, δηλαδή ένα περιβάλλον με την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φωτισμού, που επιτρέπει την ευχάριστη διαμονή και την άσκηση της προβλεπόμενης δραστηριότητάς τους, χωρίς φαινόμενα που να οδηγούν στην οπτική δυσφορία ή/και κόπωση [14]. Η οπτική άνεση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ικανοποίησης των τριών παρακάτω συνιστωσών:

1. Εξασφάλιση της αναγκαίας στάθμης τεχνητού φωτισμού με βάση τη χρήση του χώρου.
2. Αποφυγή της θάμβωσης λόγω φυσικού ή τεχνητού φωτισμού που προκαλεί δυσφορία.
3. Εξασφάλιση οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον του κτιρίου.

Οι συνιστώσες αυτές θα αναλυθούν περαιτέρω στις επόμενες παραγράφους.

3.1.1 Οπτική άνεση λόγω τεχνητού φωτισμού

Το διεθνές πρότυπο EN 12464-1:2011 [15] ορίζει τις απαιτήσεις σε τεχνητό φωτισμό ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου ή της αντίστοιχης ζώνης του κτιρίου. Οι απαιτήσεις σε τεχνητό φωτισμό καθορίζονται με σκοπό την ικανοποίηση τριών βασικών ανθρώπινων αναγκών:

1. Την εξασφάλιση οπτικής άνεσης που δημιουργεί στα άτομα ένα αίσθημα ευεξίας. Σε εργασιακά περιβάλλοντα, η οπτική άνεση συμβάλλει επίσης με έμμεσο τρόπο στην υψηλότερη παραγωγικότητα και τη βελτίωση της ποιότητας εργασίας.
2. Την οπτική απόδοση (visual performance) που εξασφαλίζει ότι οι εργαζόμενοι θα είναι σε θέση να εκτελούν τις αναγκαίες οπτικές εργασίες, ακόμα και υπό δύσκολες συνθήκες και για μεγάλες χρονικές περιόδους.
3. Την ασφάλεια.

Ο **Πίνακας 3.1** παρουσιάζει τις βασικότερες προτεινόμενες στάθμες γενικού φωτισμού σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο EN 12464-1:2011 και με βάση τον τύπο κτιρίου.

Πίνακας 3.1: Στάθμη γενικού (όχι ειδικού) φωτισμού ανά χρήση κτιρίου σύμφωνα με το πρότυπο EN 12464-1:2011 [15]

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Στάθμη φωτισμού [lux]**	**Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]**
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	200	0.8
Ξενοδοχείο, ξενώνας, οικοτροφείο και κοιτώνας	300	0.8
Υπνοδωμάτιο ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.	250	0.8
Κοινόχρηστος χώρος ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.	100	0.5
Εστιατόριο	200	0.8
Ζαχαροπλαστείο, καφενείο	250	0.8
Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης, μουσική σκηνή	100	0.8
Θέατρο, κινηματογράφος	100	0.8
Χώρος συναυλιών	100	0.8
Εκθεσιακός χώρος, μουσείο	200	0.8
Χώρος συνεδρίων, αμφιθέατρο, αίθουσα δικαστηρίων	500	0.8
Τράπεζα	500	0.8
Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων	300	0.8
Κλειστό γυμναστήριο ή κολυμβητήριο	300	0.5
Διάδρομοι και άλλοι κοινόχρηστοι βοηθητικοί χώροι	100	0
Λουτρό (κοινόχρηστο)	200	0.8
Νηπιαγωγείο, πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση	300	0.8
Τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας	500	0.8
Φροντιστήριο, ωδείο	500	0.8
Κλινική νοσοκομείου	300	0.8
Αίθουσα ασθενών (δωμάτιο)	100	0.8
Χειρουργείο (τακτικό)	1000	0.8

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Στάθμη φωτισμού [lux]**	**Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]**
Εξωτερικό ιατρείο	500	0.8
Αίθουσα αναμονής	200	0.8
Αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο	500	0.8
Ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομεία	300	0.8
Βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός	300	0.8
Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή	300	0.8
Αστυνομική διεύθυνση	500	0.8
Εμπορικό κέντρο, αγορά και υπεραγορά	300	0.8
Κατάστημα, φαρμακείο	500	0.8
Ινστιτούτο γυμναστικής	400	0.8
Κουρείο, κομμωτήριο	400	0.8
Γραφείο	500	0.8
Βιβλιοθήκη	500	0.8

3.1.2 Δυσφορία λόγω θάμβωσης

Ως θάμβωση (glare) ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία παρατηρείται οπτική δυσφορία ή μείωση της ικανότητας του ατόμου να δει λεπτομέρειες ή και ολόκληρα αντικείμενα, η οποία προκαλείται από ακατάλληλη κατανομή ή ακατάλληλο εύρος φωτεινότητας ή από υπερβολικά υψηλές τιμές αντίθεσης (contrast). Η θάμβωση μπορεί να προκληθεί επίσης από ανακλάσεις σε οθόνες ή άλλα υλικά (π.χ. χαρτί) λόγω της παρουσίας μία έντονης φωτεινής πηγής (π.χ. ενός παραθύρου) [13].

Αναγνωρίζονται δύο διαφορετικοί τύποι θάμβωσης. Η θάμβωση που προκαλεί δυσφορία (discomfort glare) ορίζεται ως το επίπεδο ενόχλησης που προκαλείται από υπερβολικά υψηλές τιμές φωτεινότητας στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή. Αυτός ο τύπος θάμβωσης προκαλεί δυσφορία, αλλά δεν μειώνει απαραίτητα την ικανότητα όρασης των ατόμων. Αντίθετα, ο δεύτερος τύπος θάμβωσης μπορεί να δυσχεραίνει την όραση ενός αντικειμένου, χωρίς απαραίτητα να προκαλεί δυσφορία (disability glare) [16].

Ο τρόπος με τον οποίο κάθε άτομο αντιλαμβάνεται τη θάμβωση εξαρτάται από την κατανομή της φωτεινότητας στο πεδίο όρασής του και συνεπώς εξαρτάται έντονα από τη θέση του ατόμου στον χώρο και τη γραμμή όρασής του. Η θάμβωση εξαρτάται, ωστόσο, και από τη μεμονωμένη αντίληψη κάθε ατόμου και μπορεί να προκαλέσει συνέπειες όπως πονοκεφάλους ή κόπωση σε μεταγενέστερο χρόνο.

Για να ληφθεί υπόψη η πολύπλοκη κατανομή της φωτεινότητας σε έναν χώρο, το μέγεθος, η ένταση και η θέση της πηγής που προκαλεί θάμβωση σε σχέση με τη γραμμή όρασης του παρατηρητή θα πρέπει να συμπεριληφθούν στον υπολογισμό της θάμβωσης. Η ποσοτικοποίηση της θάμβωσης γίνεται μέσω διάφορων δεικτών που λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω [13]. Οι πιο γνωστοί δείκτες για την ποσοτικοποίηση της θάμβωσης λόγω του φυσικού φωτισμού είναι οι δείκτες Daylight Glare Index και Daylight Glare Probability, ενώ στην περίπτωση της θάμβωσης από τεχνητό φωτισμό χρησιμοποιείται ο δείκτης Unified Glare Rating. Οι δείκτες αυτοί θα αναλυθούν στη συνέχεια.

3.1.2.1 Daylight Glare Index (DGI)

Η θάμβωση σε ένα συγκεκριμένο σημείο αναφοράς λόγω της αντίθεσης ανάμεσα στη φωτεινότητα μίας φωτεινής πηγής (στη συγκεκριμένη περίπτωση ενός παραθύρου) και των εσωτερικών επιφανειών που την περιβάλλουν μπορεί να εκφραστεί μέσω του δείκτη DGI. Ο δείκτης αυτός αποτελεί τον περισσότερο ευρέως γνωστό δείκτη για την αξιολόγηση της έντασης της δυσφορίας που προκαλείται λόγω της θάμβωσης από ένα παράθυρο και εκφράζεται από τη σχέση:

$$G = \frac{L_w^{1.6} \cdot \Omega^{0.8}}{L_b + 0.07 \cdot \omega^{0.5} \cdot L_w} \qquad (3.1)$$

Όπου:

- G είναι ο δείκτης που εκφράζει τη δυσφορία λόγω θάμβωσης
- L_w είναι η μέση φωτεινότητα του παραθύρου (window luminance), όπως φαίνεται από το σημείο αναφοράς, εκφρασμένη σε cd/m^2
- Ω είναι η στερεά γωνία του παραθύρου που έχει τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό του θεατή εκφρασμένη σε sr
- L_b είναι η φωτεινότητα του χώρου που περιβάλλει την φωτεινή πηγή (background luminance) σε cd/m^2

Στην περίπτωση της συνύπαρξης περισσότερων του ενός παραθύρων στον ίδιο χώρο, ο δείκτης θάμβωσης σε ένα σημείο αναφοράς λόγω όλων των παραθύρων του χώρου υπολογίζεται ως εξής:

$$DGI = 10 \cdot \log_{10}\left(0.478 \cdot \sum_{i=1}^{N} G_i\right) \qquad (3.2)$$

Όπου G_i είναι ο δείκτης θάμβωσης στο σημείο αναφοράς λόγω του i-οστού παραθύρου και N είναι το συνολικό πλήθος των παραθύρων του χώρου [17]. Ο **Πίνακας 3.2** παρουσιάζει την ερμηνεία των διαφορετικών τιμών του δείκτη DGI για γενικές εργασίες σε γραφεία, ενώ ο **Πίνακας 3.3** τις προτεινόμενες μέγιστες αποδεκτές τιμές ανάλογα με τον τύπο του χώρου.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά εύρη τιμών του δείκτη DGI με βάση την κλίμακα Hopkinson [18]

Χαρακτηρισμός θάμβωσης	Daylight Glare Index
Ανυπόφορη	> 28
Οριακά ανυπόφορη	28
Άβολη	26
Οριακά άβολη	24
Αποδεκτή	22
Οριακά αποδεκτή	20
Αντιληπτή	18
Οριακά αντιληπτή	≤ 16

Πίνακας 3.3: Μέγιστες αποδεκτές τιμές του δείκτη DGI ανά χρήση κτιρίου [17]

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Μέγιστη αποδεκτή τιμή DGI
Εκθεσιακός χώρος	16
Εργοστάσιο: χειρωνακτική εργασία	28
Εργοστάσιο: συναρμολόγηση μηχανών	26
Εργοστάσιο: λεπτές δουλειές κατά τη συναρμολόγηση	24
Εργοστάσιο: συναρμολόγηση οργάνων	22
Πτέρυγες νοσοκομείου	18
Εργαστήρια	22
Μουσεία	20
Γραφεία	22
Σχολικές τάξεις	20

3.1.2.2 Daylight Glare Probability (DGP)

Ο δείκτης DGP λαμβάνει υπόψη τον φωτισμό στο επίπεδο των ματιών του παρατηρητή, καθώς και τις επιμέρους πηγές θάμβωσης με υψηλή φωτεινότητα για να εκτιμήσει το ποσοστό των ατόμων που θα ένιωθαν δυσφορία. Ο δείκτης DGP είναι μέχρι στιγμής ο μόνος δείκτης που αναπτύχθηκε υπό πραγματικές συνθήκες φυσικού φωτισμού και ορίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\mathrm{DGP} = 5.87 \cdot 10^{-5} \cdot \mathrm{E_v} + 9.18 \cdot 10^{-2} \cdot \log_{10}\left(1 + \sum_{i=1}^{N} \frac{L_{w,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} \cdot P_i^2}\right) + 0.16 \quad (3.3)$$

Όπου:

- E_v είναι η φωτεινότητα στο επίπεδο των ματιών του παρατηρητή εκφρασμένη σε lux, όταν αυτή μετριέται σε επίπεδο κάθετο στη γραμμή όρασής του
- $L_{w,i}$ είναι η φωτεινότητα του i-οστού παραθύρου εκφρασμένη σε cd/m^2
- P είναι ο αδιάστατος δείκτης θέσης που ορίζεται ως η γωνιακή μετατόπιση της πηγής σε σχέση με τη γραμμή όρασης του παρατηρητή. Ο δείκτης θέσης

μειώνεται όσο η θέση της φωτεινής πηγής απομακρύνεται από το κέντρο του πεδίου όρασης του παρατηρητή.

- $\omega_{s,i}$ είναι η στερεά γωνία του i-οστού παραθύρου σε sr [13].

Οι τιμές του δείκτη DGP μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά εύρη τιμών του δείκτη DGP [13]

Χαρακτηρισμός θάμβωσης	Daylight Glare Probability
Μη αντιληπτή	DGP ≤ 0.35
Αντιληπτή, όμως όχι ενοχλητική	0.35 < DGP ≤ 0.40
Αντιληπτή και συχνά ενοχλητική	0.40 < DGP ≤ 0.45
Αντιληπτή και ανυπόφορη	DGP ≥ 0.45

3.1.2.3 Unified Glare Rating (UGR)

Η αξιολόγηση της θάμβωσης λόγω των φωτιστικών γίνεται μέσω του δείκτη UGR που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathrm{UGR} = 8 \cdot \log_{10}\left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{L_i^2 \cdot \omega_i}{p_i^2}\right) \tag{3.4}$$

Όπου:

- L_b είναι η φωτεινότητα του περιβάλλοντα χώρου σε cd/m^2
- L_i είναι η φωτεινότητα των φωτεινών τμημάτων κάθε φωτιστικού i στην κατεύθυνση των ματιών του παρατηρητή εκφρασμένη σε cd/m^2
- ω_i είναι η στερεά γωνία των φωτεινών τμημάτων κάθε φωτιστικού i στην κατεύθυνση των ματιών του παρατηρητή εκφρασμένη σε sr
- p_i είναι ο αδιάστατος δείκτης θέσης κάθε φωτιστικού i που εξαρτάται από τη γωνιακή μετατόπισή του από τη γραμμή όρασης του παρατηρητή [15].

Οι μέγιστες αποδεκτές τιμές του δείκτη UGR ανάλογα με τη χρήση του χώρου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.5: Μέγιστες αποδεκτές τιμές του δείκτη UGR ανάλογα με τη χρήση του χώρου [15]

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Μέγιστη αποδεκτή τιμή UGR
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	-
Ξενοδοχείο, ξενώνας, οικοτροφείο και κοιτώνας	22
Υπνοδωμάτιο ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.	-
Κοινόχρηστος χώρος ξενοδοχείου, οικοτροφείου κ.ά.	28
Εστιατόριο	-
Ζαχαροπλαστείο, καφενείο	-

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Μέγιστη αποδεκτή τιμή UGR**
Νυχτερινό κέντρο διασκέδασης, μουσική σκηνή	-
Θέατρο, κινηματογράφος	25
Χώρος συναυλιών	25
Εκθεσιακός χώρος, μουσείο	22
Χώρος συνεδρίων, αμφιθέατρο, αίθουσα δικαστηρίων	19
Τράπεζα	19
Αίθουσα πολλαπλών χρήσεων	19
Κλειστό γυμναστήριο ή κολυμβητήριο	22
Διάδρομοι και άλλοι κοινόχρηστοι βοηθητικοί χώροι	28
Λουτρό (κοινόχρηστο)	25
Νηπιαγωγείο, πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση	19
Τριτοβάθμια εκπαίδευση, αίθουσα διδασκαλίας	19
Φροντιστήριο, ωδείο	19
Κλινική νοσοκομείου	19
Αίθουσα ασθενών (δωμάτιο)	19
Χειρουργείο (τακτικό)	19
Εξωτερικό ιατρείο	19
Αίθουσα αναμονής	22
Αγροτικό ιατρείο, υγειονομικός σταθμός, κέντρο υγείας, ιατρείο	19
Ψυχιατρείο, ίδρυμα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ίδρυμα χρονίως πασχόντων, οίκος ευγηρίας, βρεφοκομεία	19
Βρεφικός σταθμός, παιδικός σταθμός	22
Κρατητήριο, αναμορφωτήριο, φυλακή	22
Αστυνομική διεύθυνση	19
Εμπορικό κέντρο, αγορά και υπεραγορά	22
Κατάστημα, φαρμακείο	19
Ινστιτούτο γυμναστικής	22
Κουρείο, κομμωτήριο	19
Γραφείο	19
Βιβλιοθήκη	19

3.1.3 Οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον

Τα παράθυρα επιτρέπουν στους ενοίκους να διατηρούν οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον του κτιρίου, προσφέροντας πληροφορίες για τον προσανατολισμό ή τις αλλαγές του καιρού και επιτρέποντας στους ενοίκους να παρακολουθούν την εξέλιξη της ημέρας. Η πληθώρα πληροφοριών από το εξωτερικό περιβάλλον λειτουργεί ως αντισταθμιστικός παράγοντας της μονοτονίας που προκαλεί κόπωση (ειδικά σε επαγγελματικά κτίρια) και ανακουφίζει το αίσθημα της κλειστοφοβίας από ψυχολογική

άποψη. Ταυτόχρονα, λειτουργεί ευεργετικά και σε σωματικό επίπεδο, αφού επιτρέπει στο οπτικό σύστημα να χαλαρώσει.

Στην ιδανική περίπτωση, η θέα που έχει ο κάθε ένοικος πρέπει να συνδυάζει ένα τμήμα ουρανού, ένα τμήμα πόλης ή κάποιου φυσικού τοπίου και ένα τμήμα εδάφους. Η θέα σε ένα φυσικό τοπίο είναι προτιμότερη από ένα τεχνητό περιβάλλον, ενώ η θέα σε μεγάλη απόσταση ή εύρος προτιμάται από τις περισσότερο περιορισμένες εναλλακτικές. Η θέα επίσης προσελκύει πιο εύκολα το ανθρώπινο ενδιαφέρον όταν παρουσιάζει ποικιλία και μεταβάλλεται δυναμικά με τον χρόνο. Για την εξασφάλιση κατάλληλης θέας προς το εξωτερικό περιβάλλον είναι απαραίτητο τα παράθυρα να περιλαμβάνουν διάφανους υαλοπίνακες με ουδέτερο χρώμα που δεν προκαλούν κανενός είδους παραμόρφωση [13].

3.2 Θερμική άνεση

Ο όρος θερμική άνεση εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης των ατόμων σχετικά με τις συνθήκες που βιώνουν στο θερμικό τους περιβάλλον. Ως θερμική άνεση ορίζεται η κατάσταση του μυαλού κατά την οποία ένα άτομο δεν επιθυμεί καμία θερμική αλλαγή του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός χώρου και εκφράζει ικανοποίηση με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες. Όπως είναι προφανές η κατάσταση στην οποία ένα άτομο αισθάνεται θερμικά άνετα έχει υποκειμενικό χαρακτήρα. Έτσι, στον ίδιο χώρο είναι δυνατόν ένα άτομο να είναι πλήρως ικανοποιημένο με τις θερμικές συνθήκες, ενώ κάποιο άλλο άτομο να είναι δυσαρεστημένο.

Οι κύριοι παρόντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση είναι:

1. Φυσικές παράμετροι, όπως:

- Η θερμοκρασία του αέρα
- Η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία των επιφανειών (Mean radiant temperature)
- Η υγρασία του αέρα
- Η ταχύτητα του εσωτερικού αέρα

2. Βιολογικές παράμετροι, όπως:

- Το φύλο των χρηστών του χώρου
- Η ηλικία των χρηστών του χώρου
- Ανθρώπινοι παράγοντες (π.χ. το βάρος)

3. Εξωτερικές παράμετροι, όπως:

- Το είδος των δραστηριοτήτων των χρηστών στο χώρο
- Ο τύπος του ρουχισμού των χρηστών του χώρου [19].

3.2.1 Το μοντέλο του Fanger

Το πρώτο μοντέλο θερμικής άνεσης για τον άνθρωπο που προτάθηκε ήταν αυτό του Fanger [20]. Το μοντέλο του Fanger είναι το πιο γνωστό μοντέλο θερμικής άνεσης, αλλά και το πιο εύκολο στη χρήση, αφού μπορεί να παρουσιαστεί και σε διαγραμματική μορφή.

Ο Fanger χρησιμοποίησε μία επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης βασισμένη σε πολυάριθμα πειράματα, με σκοπό την μελέτη της επίδρασης διαφορετικών θερμικών συνθηκών στον άνθρωπο. Το μοντέλο του Fanger βασίζεται σε ένα ενεργειακό ισοζύγιο που λαμβάνει υπόψη όλες τις μορφές ενεργειακών απωλειών (L) από το ανθρώπινο σώμα.

Η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος γίνεται με τους παρακάτω τρόπους:

1. Με **αγωγή** από το ανθρώπινο σώμα στα ρούχα και συνέχεια με **συναγωγή** στον αέρα, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σώματος.
2. Με **συναγωγή** από το ανθρώπινο σώμα στον αέρα με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή το δέρμα.
3. Με **ακτινοβολία** από το ανθρώπινο σώμα προς τις επιφάνειες που το περιβάλλουν και αντίστροφα, ως συνάρτηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του σώματος και των γύρω επιφανειών.
4. Με **εξάτμιση**, η οποία πραγματοποιείται μέσω της αναπνοής ή από την επιδερμίδα μέσω της άδηλης διαπνοής και του ιδρώτα.

Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, το θερμικό ισοζύγιο μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\mathrm{H_M} - \mathrm{W} = \mathrm{H_r} + \mathrm{H_c} + \mathrm{H_e} + (\mathrm{H_{ld}} + \mathrm{H_{lr}})\ [\mathrm{W}] \qquad (3.5)$$

Όπου:

- $\mathrm{H_M}$ είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας λόγω του μεταβολισμού
- W είναι το εξωτερικό μηχανικό έργο
- $\mathrm{H_r}$ είναι η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία
- $\mathrm{H_c}$ είναι η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή
- $\mathrm{H_e}$ είναι η απώλεια θερμότητας εξαιτίας της εξάτμισης του ιδρώτα από την επιφάνεια του δέρματος
- $\mathrm{H_{ld}}$ είναι η απώλεια αισθητής θερμότητας δια μέσου της αναπνοής (λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς του εισερχόμενου και εξερχόμενου αέρα)
- $\mathrm{H_{lr}}$ είναι η απώλεια λανθάνουσας θερμότητας δια μέσου της αναπνοής (λόγω της εξάτμισης του νερού)

Ο ρυθμός παραγωγής και απώλειας θερμότητας διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Αυτή η μεταβλητότητα μπορεί να προσδιοριστεί εκφράζοντας τις μεταβλητές ανά μονάδα εμβαδού επιφάνειας.

Το εμβαδόν της επιφάνειας του σώματος μπορεί να εκτιμηθεί από τον τύπο:

$$A_N = 0.202 \cdot W_b^{0.425} B_h^{0.725} \quad (3.6)$$

Όπου:

- W_b είναι το βάρος του σώματος και
- B_h είναι το αντίστοιχο ύψος.

Ενδεικτικά, η επιφάνεια του σώματος για μία μέση γυναίκα είναι 1.6 m^2 και για έναν μέσο άντρα 1.8 m^2 [17].

Το κλάσμα του ρυθμού του μεταβολισμού που μετατρέπεται σε έργο (μηχανική ενέργεια) W/H_M ονομάζεται ικανότητα έργου (work efficiency). Για φυσιολογικές δραστηριότητες σε κατοικίες και γραφεία η ικανότητα έργου είναι μικρή.

Με βάση το παραπάνω μοντέλο προκύπτουν οι δείκτες Predicted Mean Vote και Predicted Percentage Dissatisfied που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της θερμικής άνεσης, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

3.2.1.1 Predicted Mean Vote (PMV)

Ο τρόπος με τον οποίο ένα άτομο αντιλαμβάνεται το θερμικό του περιβάλλον σχετίζεται με τη θερμική ισορροπία στο σώμα του. Η ισορροπία αυτή επηρεάζεται από παράγοντες που αφορούν το ίδιο το άτομο (σωματική δραστηριότητα και ρουχισμός), αλλά και από περιβαλλοντικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα αέρα και μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία). Όταν αυτοί οι παράγοντες μπορούν να εκτιμηθούν ή να μετρηθούν, η θερμική άνεση μπορεί να υπολογιστεί μέσω του δείκτη Predicted Mean Vote (PMV).

Ο δείκτης PMV προβλέπει τη μέση τιμή των «ψήφων» μίας μεγάλης ομάδας ατόμων σε μία επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης, με βάση την εξίσωση θερμικής ισορροπίας στο ανθρώπινο σώμα. Η μηδενική τιμή είναι η τιμή στην οποία το άτομο αισθάνεται άνετα με τις θερμικές συνθήκες.

Η θερμική ισορροπία επιτυγχάνεται όταν η εσωτερική παραγωγή θερμότητας στο σώμα εξισώνεται με τις απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Σε ένα ενδιάμεσο (moderate) θερμικό περιβάλλον, το ανθρώπινο σώμα ρυθμίζει αυτόματα τη θερμοκρασία του δέρματος και την έκκριση ιδρώτα με σκοπό να διατηρήσει τη θερμική του ισορροπία.

Πίνακας 3.6: Η επταβάθμια κλίμακα θερμικής άνεσης του δείκτη PMV

PMV [-]	Ερμηνεία
+3	Υπερβολικά ζεστό (Hot)
+2	Θερμό (Warm)
+1	Ελαφρώς θερμό (Slightly warm)

PMV [-]	Ερμηνεία
0	Ουδέτερο (Neutral)
-1	Ελαφρώς ψυχρό (Slightly cool)
-2	Ψυχρό (Cool)
-3	Υπερβολικά κρύο (Cold)

Ο υπολογισμός του δείκτη PMV γίνεται μέσω του ακόλουθου συνόλου εξισώσεων:

$$\mathrm{PMV} = [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot \mathrm{M}) + 0.028] \cdot \{(\mathrm{M} - \mathrm{W}) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (\mathrm{M} - \mathrm{W}) - \mathrm{p_a}] - 0.42 \cdot [(\mathrm{M} - \mathrm{W}) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot \mathrm{M} \cdot (5867 - \mathrm{p_a}) - 0.0014 \cdot \mathrm{M} \cdot (34 - \mathrm{t_a}) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot \mathrm{f_{cl}} \cdot [(\mathrm{t_{cl}} + 273)^4 - (\bar{\mathrm{t}}_\mathrm{r} + 273)^4] - \mathrm{f_{cl}} \cdot \mathrm{h_c} \cdot (\mathrm{t_{cl}} - \mathrm{t_a})\} \quad (3.7)$$

$$\mathrm{t_{cl}} = 35.7 - 0.028 \cdot (\mathrm{M} - \mathrm{W}) - \mathrm{I_{cl}} \cdot \{3.96 \cdot 10^{-8} \cdot \mathrm{f_{cl}} \cdot [(\mathrm{t_{cl}} + 273)^4 - (\bar{\mathrm{t}}_\mathrm{r} + 273)^4] + \mathrm{f_{cl}} \cdot \mathrm{h_c} \cdot (\mathrm{t_{cl}} - \mathrm{t_a})\} \quad (3.8)$$

$$\mathrm{h_c} = \begin{cases} 2.38 \cdot |\mathrm{t_{cl}} - \mathrm{t_a}|^{0.25} & \text{όταν} \quad 2.38 \cdot |\mathrm{t_{cl}} - \mathrm{t_a}|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{\mathrm{v_{ar}}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{\mathrm{v_{ar}}} & \text{όταν} \quad 2.38 \cdot |\mathrm{t_{cl}} - \mathrm{t_a}|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{\mathrm{v_{ar}}} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\mathrm{f_{cl}} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot \mathrm{I_{cl}} & \text{όταν} \quad \mathrm{I_{cl}} \leq 0.078 \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}} \\ 1.05 + 0.645 \cdot \mathrm{I_{cl}} & \text{όταν} \quad \mathrm{I_{cl}} > 0.078 \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}} \end{cases} \quad (3.10)$$

Όπου:

- M είναι ο μεταβολικός ρυθμός του ατόμου σε W/m^2
- W είναι η αποτελεσματική μηχανική ισχύς (effective mechanical power) σε W/m^2
- I_{cl} είναι η μονωτική ικανότητα που προσφέρεται από την ένδυση του ατόμου σε $m^2 \cdot K/W$
- f_{cl} είναι ένας αδιάστατος παράγοντας που εκφράζει την επιφάνεια των ρούχων
- t_a είναι η θερμοκρασία του αέρα σε ^oC
- $\bar{t}_r$ είναι η μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία σε ^oC
- v_{ar} είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα σε m/s
- p_a είναι η μερική πίεση των υδρατμών σε Pa
- h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε $W/(m^2 \cdot K)$
- t_{cl} είναι η επιφανειακή θερμοκρασία των ρουχισμού σε ^oC.

Οι εξισώσεις που αφορούν τα t_{cl} και h_c μπορούν να λυθούν επαναληπτικά [21]. Ο δείκτης PMV μπορεί να υπολογιστεί όταν οι τιμές των προαναφερθέντων παραμέτρων βρίσκονται εντός των ακόλουθων ορίων:

Πίνακας 3.7: Επιτρεπτό εύρος τιμών βασικών παραμέτρων για τον υπολογισμό του PMV [21]

Παράμετρος	Κάτω όριο	Άνω όριο
Μεταβολικός ρυθμός M	46 W/m^2	232 W/m^2
Μονωτική ικανότητα ρουχισμού I_{cl}	0	0.310 m^2·K/W
Θερμοκρασία αέρα t_a	10 ºC	30 ºC
Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία $\bar{t}_r$	10 ºC	40 ºC
Ταχύτητα αέρα v_{ar}	0	1 m/s
Μερική πίεση υδρατμών p_a	0	2700 Pa

Ο ρυθμός μεταβολισμού μπορεί να εκφραστεί σε W/m^2 εμβαδού επιφανείας σώματος ή σε met (1 met = 58 W/m^2). Ο **Πίνακας 3.8** παρουσιάζει τις τιμές του ρυθμού μεταβολισμού για τυπικές δραστηριότητες:

Πίνακας 3.8: Τιμές μεταβολικού ρυθμού για τυπικές δραστηριότητες [21]

Δραστηριότητα	Ρυθμός μεταβολισμού	
	W/m^2	met
Ξαπλωμένος	46	0.8
Καθισμένος, χαλαρός	58	1.0
Χαλαρός σε όρθια στάση	70	1.2
Καθιστική δραστηριότητα (γραφείο, κατοικία, σχολείο)	70	1.2
Όρθια δραστηριότητα (ψώνια, εργαστήριο)	93	1.6
Όρθια δραστηριότητα (εμποροϋπάλληλος)	116	2.0
Ενδιάμεση δραστηριότητα (επίμονη μηχανική εργασία)	165	2.8

Η ενδυμασία παίζει σημαντικό ρόλο στη διεργασία μεταφοράς θερμότητας. Η επίδραση της ενδυμασίας ερμηνεύεται με την έννοια της θερμικής αντίστασης και εκφράζεται με τη μονάδα «clo» (1 clo = 0.155 m^{2}K/W). Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικές τυπικές τιμές ενδυμασίας:

Πίνακας 3.9: Τυπικές τιμές θερμικής αντίστασης λόγω ρουχισμού [21]

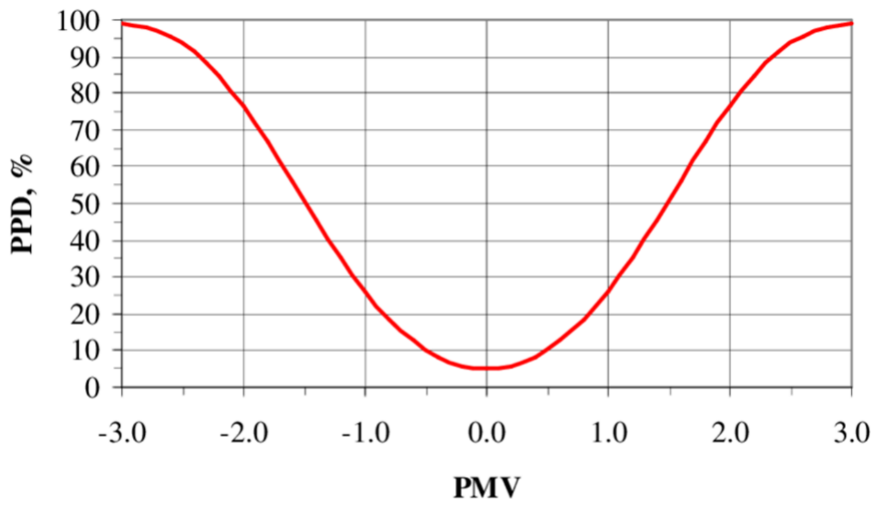
Είδος ενδυμασίας	Θερμική αντίσταση	
	m^{2}K/W	clo
Γυμνός άνθρωπος	0	0
Σορτς	0.015	0.1
Ελαφριά καλοκαιρινή ενδυμασία	0.08	0.5
Ελαφριά ενδυμασία εργασίας	0.11	0.7
Μέτρια ενδυμασία άνοιξης	0.16	1.0
Χειμερινή ενδυμασία	0.23	1.5

3.2.1.2 Predicted Percentage Dissatisfied (PPD)

Όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης PMV εκφράζει τη μέση τιμή των «ψήφων» μίας μεγάλης ομάδας ατόμων που έχουν εκτεθεί στο ίδιο θερμικό περιβάλλον. Ωστόσο, οι μεμονωμένες ψήφοι παρουσιάζουν διασπορά γύρω από αυτή τη μέση τιμή. Η ποσοτικοποίηση αυτής της διασποράς είναι σημαντική, καθώς είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη του πλήθους των ατόμων που είναι πιθανό να νιώθουν δυσφορία λόγω υπερβολικής ζέστης ή κρύου.

Ο δείκτης Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) παρέχει πληροφορίες για την έλλειψη θερμικής άνεσης, υπολογίζοντας το ποσοστό των ατόμων που είναι πιθανό να θεωρούν ένα συγκεκριμένο θερμικό περιβάλλον ως υπερβολικά θερμό ή ψυχρό. Ο υπολογισμός αυτού του δείκτη γίνεται μέσω της τιμής του PMV, με βάση την ακόλουθη εξίσωση [21]:

$$\mathrm{PPD} = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot \mathrm{PMV}^4 - 0.217 \cdot \mathrm{PMV}^2) \qquad (3.11)$$



Σχήμα 3.1: Ο δείκτης PPD ως συνάρτηση του PMV

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, ακόμη και αν ο δείκτης PMV είναι ίσος με το μηδέν, δηλαδή βρισκόμαστε σε κατάσταση θερμικής άνεσης, θα υπάρχει πάντα ένα ποσοστό PPD = 5% των ατόμων του εξεταζόμενου χώρου που θα είναι δυσαρεστημένοι με τις θερμικές συνθήκες. Αντίθετα, για τις ακραίες τιμές PMV = +3 ή -3, ο δείκτης PPD = 99,12%, που σημαίνει ότι ακόμη και σε υπερβολικά θερμές ή ψυχρές συνθήκες θα υπάρχει πάντα ένα ποσοστό ατόμων, περίπου 1%, που θα νιώθουν ικανοποιημένα. Σε πολλές χώρες όπου έχει γίνει αποδεκτή η θεωρία του Fanger, θεωρείται ότι η κατάσταση που επικρατεί σε έναν χώρο είναι ικανοποιητική, όταν το ποσοστό των δυσαρεστημένων (PPD) δεν θα ξεπερνά το 10% [19].

Ο Ευρωπαϊκός κανονισμός EN 15251 [22] ορίζει τέσσερις κατηγορίες θερμικής άνεσης με βάση τα εύρη τιμών των δεικτών PMV και PPD, που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.10: Παραδείγματα προτεινόμενων κατηγοριών θερμικής άνεσης για τον σχεδιασμό κτιρίων [22]

Κατηγορία	PPD [%]	PMV [-]
I	<6	-0.2<PMV<+0.2
II	<10	-0.5<PMV<+0.5
III	<15	-0.7<PMV<+0.7
IV	>15	PMV<-0.7 ή +0.7<PMV

Ο **Πίνακας 3.11** παρουσιάζει την κατανομή των ψήφων για διάφορες τιμές του δείκτη PMV, βασισμένη σε πειράματα με 1300 άτομα:

Πίνακας 3.11: Κατανομή των μεμονωμένων ψήφων για διαφορετικές τιμές του PMV [22]

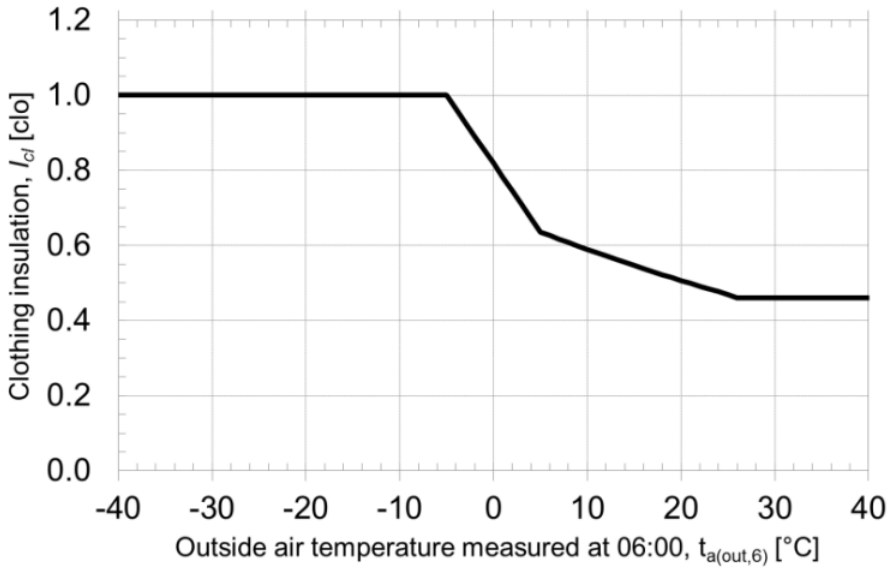
PMV	PPD	Πλήθος ατόμων που αναμένεται να ψηφίσουν [%]		
		0	-1, 0 ή +1	-2, -1, 0, +1 ή +2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0.5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0.5	10	55	90	98
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	70

3.2.2 Δυναμικό Μοντέλο Ρουχισμού (Dynamic Clothing Model)

Μέχρι στιγμής τα διεθνή πρότυπα δεν περιλαμβάνουν κάποια τυποποιημένη μέθοδο για την πρόβλεψη της μονωτικής ικανότητας της ενδυμασίας των ατόμων κατά τη διάρκεια του έτους. Στις περισσότερες ενεργειακές προσομοιώσεις κτιρίων οι συνθήκες θερμικής άνεσης υπολογίζονται με βάση την παραδοχή ότι η μονωτική ικανότητα του ρουχισμού έχει μία σταθερή τιμή ίση με 0.5 κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης και 1.0 κατά την περίοδο θέρμανσης, ενώ η μετάβαση από τη μία τιμή στην άλλη γίνεται ακαριαία. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, τα άτομα προσαρμόζουν συχνά τα ρούχα τους ανάλογα με το θερμικό τους περιβάλλον. Για να ξεπεραστεί ο περιορισμός αυτός, οι Schiavon και Lee [23] ανέπτυξαν τρία προληπτικά μοντέλα βασιζόμενοι σε 6333 παρατηρήσεις. Από αυτά, το μοντέλο που προτείνεται από το πρότυπο ASHRAE 55 [24] για τον υπολογισμό της θερμικής άνεσης είναι το ακόλουθο:

$$I_{cl} = \begin{cases} 1.00 \text{ όταν } t_{a(out,6)} < -5\ ^{o}C \\ 0.818 - 0.0364 \cdot t_{a(out,6)} \text{ όταν } -5\ ^{o}C \le t_{a(out,6)} < 5\ ^{o}C \\ 10^{(-0.1635-0.0066 \cdot t_{a(out,6)})} \text{ όταν } 5\ ^{o}C \le t_{a(out,6)} < 26\ ^{o}C \\ 0.46 \text{ όταν } t_{a(out,6)} \ge 26\ ^{o}C \end{cases} \quad (3.12)$$

Όπου $t_{a(out,6)}$ είναι η εξωτερική θερμοκρασία αέρα στις 06:00 το πρωί. Μία γραφική απεικόνιση του μοντέλου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2.**



Σχήμα 3.2: Γραφική απεικόνιση του δυναμικού μοντέλου ρουχισμού [17]

4. Πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων

Η λήψη απόφασης για σημαντικά και πολύπλοκα προβλήματα δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ακολουθώντας μια μονόπλευρη και μονοδιάστατη ανάλυση. Για το λόγο αυτό, η ανάπτυξη της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο λήψης απόφασης, αφού μπορεί και συνθέτει ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών, διατηρώντας τους στόχους και τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα–μελετητή.

4.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Ο βασικός στόχος της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι να δημιουργήσει σχέσεις προτίμησης μεταξύ των εναλλακτικών έχοντας ως βάση ένα σύνολο στόχων, οι οποίοι έχουν σαφώς καθοριστεί από τον αποφασίζοντα, μέσω μετρήσιμων κριτηρίων, ώστε να αξιολογηθεί ο βαθμός επίτευξής τους. Η διαδικασία εντοπισμού των στόχων και των κριτηρίων είναι μια διαδικασία που μπορεί από μόνη της να παρέχει αρκετές πληροφορίες στον αποφασίζοντα – μελετητή. Από την άλλη, όμως, στην περίπτωση που απαιτείται ένα επίπεδο λεπτομέρειας παραπάνω, η πολυκριτηριακή ανάλυση παρέχει κατάλληλους δείκτες για τη συνολική απόδοση των εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία για κάθε κριτήριο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κύριο χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η υποκειμενικότητα που χαρακτηρίζει τον καθορισμό των στόχων, των κριτηρίων, αλλά και της σημαντικότητας των κριτηρίων (βάρη). Πρόκειται, δηλαδή, για προσωπικές επιλογές του αποφασίζοντα – μελετητή, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μη επιθυμητά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, όμως, συγκριτικά με την ανεπίσημη κρίση, στην οποία δεν υπάρχει κάποια ανάλυση, η πολυκριτηριακή ανάλυση δίνει την ευελιξία στον αποφασίζοντα – μελετητή:

- Να αναλύσει περαιτέρω ή και να αλλάξει, αν κρίνει απαραίτητο, τους στόχους και τα κριτήρια.
- Να αναλύσει και να διαμορφώσει τις αξίες των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο και τα βάρη των κριτηρίων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο καθορισμός της αξίας των εναλλακτικών πρέπει να γίνει από ειδικούς και όχι από τον αποφασίζοντα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των πολυκριτηριακών μεθοδολογιών είναι:

- **Οι εναλλακτικές**: Οι εναλλακτικές αποτελούν τις διάφορες επιλογές που διαθέτει ο αποφασίζων για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης, ο αποφασίζων αξιολογεί την κάθε μια εναλλακτική.

- **Τα κριτήρια**: Τα κριτήρια αποτελούν τους περιορισμούς ή τις τιμές με τις οποίες γίνεται η αξιολόγηση των εναλλακτικών.
- **Τα βάρη**: Τα βάρη εκφράζουν τη σημαντικότητα που δίνει ο αποφασίζων σε κάθε κριτήριο.

4.2 Βασικές πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων

Οι κυριότερες κατηγορίες πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων είναι οι ακόλουθες:

- Η θεωρία χρησιμότητας
- Τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα
- Το μοντέλο ιεράρχησης
- Η θεωρία σχέσεων υπεροχής [25].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε μιας κατηγορίας. Για κάθε μια κατηγορία παρουσιάζονται συγκεκριμένες μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος λήψης απόφασης που μελετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

4.2.1 Η θεωρία χρησιμότητας

4.2.1.1 Η μέθοδος MAUT

Η μέθοδος MAUT (Multi-Attribute Utility Theory ή αλλιώς πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας) [26] είναι μία μέθοδος λήψης απόφασης η οποία χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει και να αναπαραστήσει το σύστημα αξιών που συνειδητά ή ασυνείδητα ακολουθεί ο αποφασίζων. Το παραπάνω γίνεται μέσω μιας συνάρτησης αξιών/χρησιμότητας U(**g**), η οποία εκφράζεται βάσει του συνόλου των κριτηρίων αξιολόγησης, **g**={g_1,g_2,…,g_n}, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζουν το αποτέλεσμα της αξιολόγησης, δηλαδή:

$$\mathrm{U}(\mathbf{g}) = \mathrm{U}(\mathrm{g}_1, \mathrm{g}_2, \dots, \mathrm{g}_n) \tag{4.1}$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συναρτήσεις αξιών/χρησιμότητας U είναι μη γραμμικές αύξουσες συναρτήσεις, οι οποίες ορίζονται στο πεδίο τιμών των κριτηρίων **g**. Οι δύο βασικές ιδιότητες των συναρτήσεων αξιών/χρησιμότητας είναι:

$$\mathrm{U}(\mathbf{g_x}) > \mathrm{U}(\mathbf{g_y}) \Leftrightarrow \mathrm{x} \succ \mathrm{y} \tag{4.2}$$

$$\mathrm{U}(\mathbf{g_x}) = \mathrm{U}(\mathbf{g_y}) \Leftrightarrow \mathrm{x} \sim \mathrm{y} \tag{4.3}$$

Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση, όπου η συνάρτηση αξιών/χρησιμότητας της εναλλακτικής x είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης συνάρτησης αξιών/χρησιμότητας της

εναλλακτικής y, αυτό σημαίνει ότι η εναλλακτική x προτιμάται της εναλλακτικής y. Αντίθετα, ισότητα μεταξύ των συναρτήσεων αξιών/χρησιμότητας των δύο εναλλακτικών συνεπάγεται ισοδυναμία μεταξύ των εναλλακτικών x και y.

Η πιο ευρέως διαδεδομένη μορφή της συνάρτησης αξιών/χρησιμότητας, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους απλότητας, είναι η προσθετική:

$$U(\mathbf{g}) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k u_k \tag{4.4}$$

Όπου N_C είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων, u_k είναι οι συναρτήσεις μερικών αξιών/χρησιμοτήτων των κριτηρίων αξιολόγησης και w_k είναι οι σταθερές που υποδηλώνουν τη σημαντικότητα (βαρύτητα) του εκάστοτε κριτηρίου. Οι συντελεστές βαρύτητας ορίζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα, δηλαδή:

$$\sum_{k=1}^{N_C} w_k = 1 \tag{4.5}$$

Στο πλαίσιο της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας κάθε επίπεδο σημαντικότητας w_k υποδεικνύει την παραχώρηση που είναι διατεθειμένος να κάνει ο αποφασίζων σε ένα κριτήριο αναφοράς, προκειμένου να επιτύχει αύξηση μίας μονάδας στο κριτήριο g_k.

Στη περίπτωση που οι αξίες των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο είναι διαφορετικής κλίμακας τότε η συνάρτηση αξιών/χρησιμότητας εκφράζεται με βάση την κανονικοποιημένες αξίες, όπως φαίνεται στη σχέση:

$$U\big(\hat{\mathbf{g}}(A_i)\big) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot u_k\big(\hat{g}_k(A_i)\big) \tag{4.6}$$

Όπου $\hat{g}_k(A_i)$ είναι η κανονικοποιημένη αξία του κριτηρίου k για την εναλλακτική A_i, η οποία προσδιορίζεται ανάλογα με το αν το κριτήριο k είναι προς μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\hat{g}_k(A_i) = \begin{cases} \frac{g_k(A_i) - g_k(A_i)|_{min}}{g_k(A_i)|_{max} - g_k(A_i)|_{min}}, \text{όταν } k \to \max \\ \frac{g_k(A_i)|_{max} - g_k(A_i)}{g_k(A_i)|_{max} - g_k(A_i)|_{min}}, \text{όταν } k \to \min \end{cases} \tag{4.7}$$

Όπου $g_k(A_i)|_{max}$ και $g_k(A_i)|_{min}$ είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή, αντίστοιχα, της αξίας της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k.

Όπως φαίνεται από τη μορφή της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας, αυτή αποτελεί μία γενίκευση της μεθόδου του σταθμισμένου μέσου (Weighted Sum Method – WSM), ο οποίος δεν είναι παρά μία προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας, στην οποία όλες οι συναρτήσεις μερικών χρησιμοτήτων είναι γραμμικές:

$$WSM(\mathbf{g}) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot u_k\big(\hat{g}_k(A_i)\big) \tag{4.8}$$

Η μέθοδος MAUT εκφυλίζεται στη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου, εφόσον ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Όλα τα κριτήρια παρουσιάζουν μονοτονία

- Οι μονοκριτήριες συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γραμμικές
- Η συνάρτηση πολυκριτήριας χρησιμότητας είναι η προσθετική.

4.2.2 Τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα

Το απλό γραμμικό προσθετικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις που μπορεί να αποδειχθεί ή να θεωρηθεί με βάση τη λογική ότι τα κριτήρια είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, καθώς επίσης και όταν η αβεβαιότητα δεν λαμβάνεται υπόψη από την πολυκριτηριακή ανάλυση. Η βασική αρχή λειτουργίας των γραμμικών προσθετικών μοντέλων είναι το γεγονός ότι οι επιδόσεις μιας εναλλακτικής στα διάφορα κριτήρια μπορούν να συνδυαστούν σε μια συνολική τιμή. Η τιμή αυτή προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την επίδοση μιας εναλλακτικής για κάθε κριτήριο με το αντίστοιχο βάρος του κριτηρίου και στη συνέχεια προσθέτοντας όλα τα σταθμισμένα αποτελέσματα μεταξύ τους. Γενικά, τα γραμμικά προσθετικά μοντέλα, έχουν ένα αρκετά καλό και εδραιωμένο ιστορικό αποτελεσματικής παροχής λήψης απόφασης για ένα ευρύ πεδίο περιστάσεων [25].

4.2.2.1 Η μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS αναπτύχθηκε από τους Huang και Yoon [27] ως μια εναλλακτική των μεθόδων ELECTRE. Η βασική της αρχή στηρίζεται στην υπόθεση ότι η επιλεγμένη εναλλακτική λύση πρέπει να έχει την πιο μικρή ευκλείδεια απόσταση από μία θετική ιδεατή λύση. Για τον λόγο αυτό, κάθε ιδιότητα αναπαρίσταται από μια μονότονα αυξανόμενη ή μειούμενη συνάρτηση, γεγονός που διευκολύνει τον εντοπισμό της θετικής ιδεατής και της αρνητικής ιδεατής λύσης. Ως εκ τούτου, η διάταξη προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων παράγεται συγκρίνοντας τις ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στη κάθε εναλλακτική και στη θετική και αρνητική ιδεατή λύση.

Η κανονικοποιημένη και σταθμισμένη απόδοση μιας εναλλακτικής σε ένα κριτήριο δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\hat{u}_k(A_i) = w_k \cdot \hat{g}_k(A_i) \tag{4.9}$$

Όπου η κανονικοποιημένη απόδοση $\hat{g}_k(A_i)$, μιας εναλλακτικής A_i σε ένα κριτήριο k, δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{g}_k(A_i) = \frac{g_k(A_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_A}\{g_k(A_i)\}^2}} \tag{4.10}$$

Μετά την κανονικοποίηση και τη στάθμιση των αξιών της κάθε εναλλακτικής στο κάθε κριτήριο, προσδιορίζεται η θετική ιδεατή λύση ($\hat{U}^+$), και η αρνητική ιδεατή λύση ($\hat{U}^-$), οι οποίες υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις στην περίπτωση που επιθυμείται η μεγιστοποίηση του κριτηρίου k:

$$\widehat{U}^{+} = \left\{\max_{i}[\hat{u}_k(A_i)]\right\} = \left\{\hat{u}_1^{+}, \hat{u}_2^{+}, \dots, \hat{u}_{N_C}^{+}\right\} \quad (4.11)$$

$$\widehat{U}^{-} = \left\{\min_{i}[\hat{u}_k(A_i)]\right\} = \left\{\hat{u}_1^{-}, \hat{u}_2^{-}, \dots, \hat{u}_{N_C}^{-}\right\} \quad (4.12)$$

Όταν είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου k, η θετική και η αρνητική ιδεατή λύση δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\widehat{U}^{+} = \left\{\min_{i}[\hat{u}_k(A_i)]\right\} = \left\{\hat{u}_1^{+}, \hat{u}_2^{+}, \dots, \hat{u}_{N_C}^{+}\right\} \quad (4.13)$$

$$\widehat{U}^{-} = \left\{\max_{i}[\hat{u}_k(A_i)]\right\} = \left\{\hat{u}_1^{-}, \hat{u}_2^{-}, \dots, \hat{u}_{N_C}^{-}\right\} \quad (4.14)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση κάθε εναλλακτικής από τη θετική ιδεατή, S^{+}_{i}, και την αρνητική ιδεατή, S^{-}_{i}, λύση:

$$S_i^{+} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_C}\left(\hat{u}_k(A_i) - \hat{u}_k^{+}\right)^2} \quad (4.15)$$

$$S_i^{-} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_C}(\hat{u}_k(A_i) - \hat{u}_k^{-})^2} \quad (4.16)$$

Τέλος, υπολογίζεται η σχετική εγγύτητα D_i και ακολουθεί κατάταξη με βάση τη τιμή αυτή:

$$D_i = \frac{S_i^{-}}{S_i^{+} + S_i^{-}} \quad (4.17)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της σχετικής εγγύτητας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Όσο η τιμή, D_i, της σχετικής εγγύτητας τείνει προς το 1, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός προτεραιότητας της εναλλακτικής i, ενώ ως βέλτιστη εναλλακτική επιλέγεται αυτή που έχει τη μικρότερη απόσταση από τη θετική ιδεατή λύση και τη μεγαλύτερη απόσταση από την αρνητική ιδεατή λύση, δηλαδή η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή D_i.

4.2.2.2 Η μέθοδος VIKOR

Αρκετά πρακτικά προβλήματα απόφασης συχνά χαρακτηρίζονται από αντικρουόμενα και διαφορετικής κλίμακας κριτήρια, ενώ είναι πιθανό να μην υπάρχει λύση που να τα ικανοποιεί όλα ταυτόχρονα. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης, όπως η μέθοδος VIKOR.

Η VIKOR [28],[29],[30] αποσκοπεί στην κατάταξη και την επιλογή από ένα σύνολο διαθέσιμων εναλλακτικών και τον προσδιορισμό μίας λύσης συμβιβασμού (compromise solution). Για τον σκοπό αυτό, η λύση προκύπτει βάσει της απόστασης από μία ιδεατή βέλτιστη λύση, χρησιμοποιώντας ως μέσο αξιολόγησης τη μετρική L^p με τη μορφή μίας συνάρτησης συνάθροισης:

$$L_p = \left(\sum_{k=1}^{N_C} \left|\frac{g_k{}^* - g_k(A_i)}{g_k{}^* - g_k{}^-}\right|^p\right)^{\frac{1}{p}}, \text{όπου } 1 \leq p \leq \infty \tag{4.18}$$

Στην παραπάνω σχέση, τα $g_k{}^*$ και $g_k{}^-$ αντιστοιχούν στην καλύτερη και τη χειρότερη επίδοση για κάθε κριτήριο k=1,…,N_C. Στην περίπτωση κριτηρίου οφέλους ισχύει:

$$g_k{}^* = \left\{\max_i[g_k(A_i)]\right\} = \left\{g_1^*, g_2^*, \dots, g_{N_C}^*\right\} \tag{4.19}$$

$$g_k{}^- = \left\{\min_i[g_k(A_i)]\right\} = \left\{g_1^-, g_2^-, \dots, g_{N_C}^-\right\} \tag{4.20}$$

Αντίστοιχα, για κριτήριο κόστους ισχύει:

$$g_k{}^* = \left\{\min_i[g_k(A_i)]\right\} = \left\{g_1^*, g_2^*, \dots, g_{N_C}^*\right\} \tag{4.21}$$

$$g_k{}^- = \left\{\max_i[g_k(A_i)]\right\} = \left\{g_1^-, g_2^-, \dots, g_{N_C}^-\right\} \tag{4.22}$$

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα αντιστάθμισης μεταξύ δύο διαφορετικών οπτικών, ανάλογα με το αν η στρατηγική θέλει να επιτύχει μία καλή επίδοση στο σύνολο των κριτηρίων (p=1) σύμφωνα με την αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας (group utility) ή με το αν θέλει να διατηρήσει τον βαθμό δυσαρέσκειας σε κάθε κριτήριο χωριστά σε χαμηλό επίπεδο (p=∞) με βάση την αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας (individual regret).

Για την εφαρμογή της μεθόδου υπολογίζονται οι τιμές των S_i και R_i για κάθε εναλλακτική i=1,...,N_A ως εξής:

$$S_i = \sum_{k=1}^{N_C} w_k \cdot \left|\frac{g_k{}^* - g_k(A_i)}{g_k{}^* - g_k{}^-}\right| \tag{4.23}$$

$$R_i = \max_k \left[w_k \cdot \left|\frac{g_k{}^* - g_k(A_i)}{g_k{}^* - g_k{}^-}\right|\right] \tag{4.24}$$

Η ποσότητα S_i σχετίζεται με τη σταθμισμένη L^1-μετρική και εκφράζει τη σταθμισμένη, κανονικοποιημένη απόσταση από τη θετική ιδεατή λύση, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια. Συνεπώς, η ποσότητα αυτή εκφράζει την αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας. Αντίστοιχα, η R_i σχετίζεται με την L^∞-μετρική, εκφράζει τη μέγιστη δυσαρέσκεια για κάθε εναλλακτική και αντιπροσωπεύει την αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας. Και για τις δύο ποσότητες είναι επιθυμητή η ελάχιστη δυνατή τιμή.

Οι ποσότητες S_i και R_i λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα υπολογίζοντας την ποσότητα Q_i για κάθε εναλλακτική:

$$Q_i = v \cdot \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \cdot \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \tag{4.25}$$

Όπου:

$$S^* = \min_i S_i, \quad S^- = \max_i S_i \tag{4.26}$$

$$R^* = \min_i R_i, \quad R^- = \max_i R_i \tag{4.27}$$

Η παράμετρος $0 \leq \nu \leq 1$ εκφράζει την οπτική του αποφασίζοντα και χρησιμοποιείται για τη στάθμιση της στρατηγικής της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας (ν=1) έναντι της στρατηγικής της μεμονωμένης δυσαρέσκειας (ν=0). Συνήθως επιλέγεται ν=0.5.

Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται τρεις λίστες κατάταξης με βάση τις τιμές S_i, R_i και Q_i, στοχεύοντας στην ελάχιστη τιμή. Για να εξασφαλιστεί ότι υπάρχει μοναδική βέλτιστη εναλλακτική, πρέπει να ελεγχθεί η ισχύς των ακόλουθων συνθηκών:

1. Συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος

   Αν A' είναι η εναλλακτική με την καλύτερη επίδοση ως προς το μέτρο Q, A'' η αμέσως επόμενη καλύτερη εναλλακτική ως προς Q και N_A το συνολικό πλήθος των εναλλακτικών, θα πρέπει να ελεγχθεί αν ισχύει:

$$Q(A'') - Q(A') \geq \frac{1}{N_A - 1} \tag{4.28}$$

2. Συνθήκη της ευστάθειας
   Η εναλλακτική A' που είναι καλύτερη ως προς Q θα πρέπει να είναι καλύτερη ως προς S ή/και R.

Αν κάποια από τις παραπάνω συνθήκες δεν ικανοποιείται, προκύπτει σύνολο λύσεων συμβιβασμού (compromise solution set). Συγκεκριμένα, αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη της ευστάθειας, ως βέλτιστες λύσεις επιλέγονται οι A' και A'', ενώ αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος, ως λύση θεωρείται το σύνολο $\{A', A'', \dots, A^{(M)}\}$, όπου η εναλλακτική $A^{(M)}$ προσδιορίζεται βρίσκοντας το μέγιστο M που ικανοποιεί τη σχέση:

$$Q\left(A^{(M)}\right) - Q(A') < \frac{1}{N_A - 1} \tag{4.29}$$

Σε πολλές εφαρμογές, η μέθοδος αυτή συγκρίνεται με την TOPSIS, παρότι χρησιμοποιεί διαφορετική συνάρτηση συνάθροισης και διαφορετική μέθοδο κανονικοποίησης. Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι η TOPSIS λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση, ενώ η VIKOR εστιάζει μόνο στη θετική ιδεατή λύση, στοχεύοντας μόνο στη μεγιστοποίηση του οφέλους και θεωρώντας τον κίνδυνο λιγότερο σημαντικό. Γι' αυτόν τον λόγο, η μέθοδος VIKOR θεωρείται καταλληλότερη για πιο ριψοκίνδυνους αποφασίζοντες.

4.2.3 Το μοντέλο ιεράρχησης

Η διαδικασία λήψης σύνθετων αποφάσεων είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία από τη φύση της και για το λόγο αυτό απαιτούνται κοινές, εύκολα κατανοητές και εφαρμόσιμες μέθοδοι για να την υποστηρίξουν. Μια τέτοια μέθοδος είναι η AHP (Analytical Hierarchy Process) η οποία αναπτύχθηκε από τον Tomas Saaty [31] και

έχει βρει απήχηση λόγω της απλότητας και της ευκολίας στην χρήση της, κυρίως σε τομείς όπου η λήψη απόφασης βασίζεται στην επιλογή, την προτεραιότητα και την πρόβλεψη (π.χ. επιχειρήσεις, έρευνα και ανάπτυξη, κυβερνητικές αποφάσεις κ.α.).

4.2.3.1 Η μέθοδος AHP

Η μέθοδος AHP είναι μια μέθοδος που βασίζεται στην σύγκριση, με βάση μια προκαθορισμένη κλίμακα αξιολόγησης, των επί μέρους εναλλακτικών ανά δύο σε κάθε κριτήριο ενδιαφέροντος, με στόχο να προκύψουν τα βάρη και οι αξίες των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο. Στην ουσία, η μέθοδος AHP αποσυνθέτει το πρόβλημα σε επιμέρους υπό-προβλήματα, τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν ευκολότερα και με καλύτερη ακρίβεια. Η αξιολόγηση των επί μέρους υπό-προβλημάτων μετατρέπεται σε αριθμητικές τιμές με βάση προκαθορισμένη κλίμακα, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ώστε να γίνει η κατάταξη κάθε εναλλακτικής. Η μεγάλη χρησιμότητα της συγκεκριμένης μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι ο αποφασίζων – αναλυτής μπορεί να πραγματοποιήσει την πολυκριτήρια μελέτη του ακόμα και αν δεν γνωρίζει τις αξίες των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο ή τη σημασία των κριτηρίων (δηλαδή τα βάρη).

Η μέθοδος AHP αποτελείται από τέσσερα κύρια βήματα [32]:

1. Αποσύνθεση προβλήματος και ιεράρχηση στόχων
2. Σύγκριση ανά ζεύγη
3. Έλεγχος συνέπειας συγκρίσεων
4. Συγκέντρωση συγκρίσεων.

Η σύγκριση ανά ζεύγη των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο (αλλά και των κριτηρίων μεταξύ τους) γίνεται με βάση μια ενιαία κλίμακα (**Πίνακας 4.1**). Για κάθε κριτήριο, κάθε εναλλακτική συγκρίνεται με τις υπόλοιπες και ο αποφασίζων εκφράζει την προτίμησή του με βάση την ενιαία κλίμακα, δίνοντας και την αντίστοιχη τιμή. Στην περίπτωση που ο αποφασίζων συγκρίνει τις εναλλακτικές A_i και A_j για ένα συγκεκριμένο κριτήριο k και εκφράζει την προτίμησή του για την A_i, δίνει και την αντίστοιχη τιμή, $u^{(k)}_{i,j}$, η οποία καταγράφεται στον αντίστοιχο πίνακα βαθμολόγησης. Από τη στιγμή που ο αποφασίζων εκφράσει την προτίμησή του μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j, τότε η τιμή της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών A_j και A_i ισούται με $u^{(k)}_{j,i} = 1/u^{(k)}_{i,j}$.

Πίνακας 4.1: Η κλίμακα βαθμολόγησης των εναλλακτικών ανά ζεύγη της μεθόδου AHP

Τιμή	Προτίμηση (Preference)
1	Εξίσου προτιμητέο (Equally preferred)
2	Εξίσου με μετρίως προτιμητέο (Equally to moderately preferred)
3	Μετρίως προτιμητέο (Moderately preferred)
4	Μετρίως με έντονα προτιμητέο (Moderately to strongly preferred)

Τιμή	Προτίμηση (Preference)
5	Έντονα προτιμητέο (Strongly preferred)
6	Έντονα με πολύ έντονα προτιμητέο (Strongly to very strongly preferred)
7	Πολύ έντονα προτιμητέο (Very strongly preferred)
8	Πολύ έντονα με εξαιρετικά προτιμητέο (Very strongly to extremely preferred)
9	Εξαιρετικά προτιμητέο (Extremely preferred)

Από τη στιγμή που ο αποφασίζων βαθμολογήσει τις εναλλακτικές μεταξύ τους για κάθε κριτήριο, δηλαδή καθορίσει τις τιμές $u^{(k)}_{i,j}$, ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα για τον υπολογισμό της αξίας της κάθε εναλλακτικής.

Αρχικά, κανονικοποιούνται οι τιμές αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j για το κριτήριο k με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\hat{u}^{(k)}_{i,j} = \frac{u^{(k)}_{i,j}}{\sum_{i=1}^{N_A} u^{(k)}_{i,j}} \tag{4.30}$$

Όπου $\hat{u}^{(k)}_{i,j}$ είναι η κανονικοποιημένη τιμή αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j για το κριτήριο k.

Η αξία της εναλλακτικής A_i για το κριτήριο k δίνεται από τη σχέση:

$$g_k(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} \hat{u}^{(k)}_{i,j}}{N_A} \tag{4.31}$$

Όπου $g_k(A_i)$ είναι η αξία της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k και N_A είναι ο συνολικός αριθμός εναλλακτικών.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το μέτρο συνέπειας $CM_k(A_i)$ της εναλλακτικής A_i στο κριτήριο k και ο μέσος όρος του μέτρου συνέπειας λ_k, για το κριτήριο k, για όλες τις εναλλακτικές με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$CM_k(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N_A}\left[u^{(k)}_{i,j} \cdot g_k(A_j)\right]}{g_k(A_i)} \tag{4.32}$$

$$\lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} CM_k(A_i)}{N_A} \tag{4.33}$$

Στην εξίσωση (4.32) θα πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η αρχική τιμή αξιολόγησης μεταξύ των εναλλακτικών A_i και A_j και όχι η κανονικοποιημένη.

Έπειτα, προσδιορίζεται ο δείκτης συνέπειας (consistency index), CI_k, του κριτηρίου k, με βάση τη σχέση:

$$CI_k = \frac{\lambda_k - N_A}{N_A - 1} \tag{4.34}$$

Τέλος, προσδιορίζεται ο λόγος συνέπειας (consistency ratio), CR_k, του κριτηρίου k, με βάση τη σχέση:

$$CR_k = \frac{CI_k}{RI} \tag{4.35}$$

Ο δείκτης RI είναι ένας δείκτης τυχαιότητας ο οποίος λαμβάνει διάφορες τιμές, ανάλογα με τον αριθμό των εναλλακτικών (**Πίνακας 4.2**).

Πίνακας 4.2: Οι τιμές του δείκτη τυχαιότητας ανάλογα με το πλήθος των εξεταζόμενων εναλλακτικών N_A

N_A	RI
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος συνέπειας CR_k θα πρέπει να λαμβάνει τιμές μικρότερες του 0.1, ώστε να θεωρηθεί ότι οι αρχικές τιμές αξιολόγησης που δόθηκαν από τον αποφασίζοντα έχουν συνέπεια.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για την περίπτωση που είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός της αξίας των εναλλακτικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων, όπως και έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

4.2.4 Η θεωρία σχέσεων υπεροχής

Η θεωρία των σχέσεων υπεροχής (Outranking Relation Theory – ORT) αναπτύχθηκε από τον Roy [33],[34] και βασίζεται στη θεωρία της κοινωνικής επιλογής (social choice theory) [35]. Ο βασικός στόχος της θεωρίας σχέσεων υπεροχής είναι η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου το οποίο επιτρέπει την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων (pair wise comparisons) μεταξύ των εναλλακτικών του προβλήματος. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν τόσο τη διάταξη των εναλλακτικών όσο και τη μη συγκρισιμότητα μεταξύ των εναλλακτικών ανά ζεύγη όταν δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για να γίνει η διάκρισή τους. Αντίθετα, στις περιπτώσεις της πολυκριτήριας θεωρίας χρησιμότητας (MAUT) και της ιεράρχησης (AHP), αναπτύσσεται μια συνάρτηση βαθμολόγησης των εναλλακτικών δραστηριοτήτων, ενώ απαιτείται όλες οι εναλλακτικές να είναι άμεσα συγκρίσιμες, ακόμα και στις περιπτώσεις που κάτι τέτοιο είναι αμφισβητήσιμο λόγω έλλειψης κατάλληλων στοιχείων.

Η μέθοδος των σχέσεων υπεροχής δημιουργεί μια διμερή σχέση υπεροχής S, η οποία επιτρέπει την εκτίμηση της υπεροχής μιας εναλλακτικής A_i έναντι μιας άλλης εναλλακτικής A_j. Η γενική ιδέα της σχέσης υπεροχής βασίζεται στην ισχύ των

ενδείξεων που υποστηρίζουν τον ισχυρισμό ότι «η εναλλακτική A_i είναι τουλάχιστον εξίσου καλή όσο η A_j» (συμφωνία κριτηρίων / θετικές ενδείξεις), αλλά και την ισχύ των ενδείξεων κατά του παραπάνω ισχυρισμού (ασυμφωνία κριτηρίων / αρνητικές ενδείξεις). Στην περίπτωση που η ισχύς της συμφωνίας των κριτηρίων είναι υψηλή και ταυτόχρονα η ισχύς της ασυμφωνίας είναι χαμηλή, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι δικαιολογείται η σχέση υπεροχής A_i S A_j.

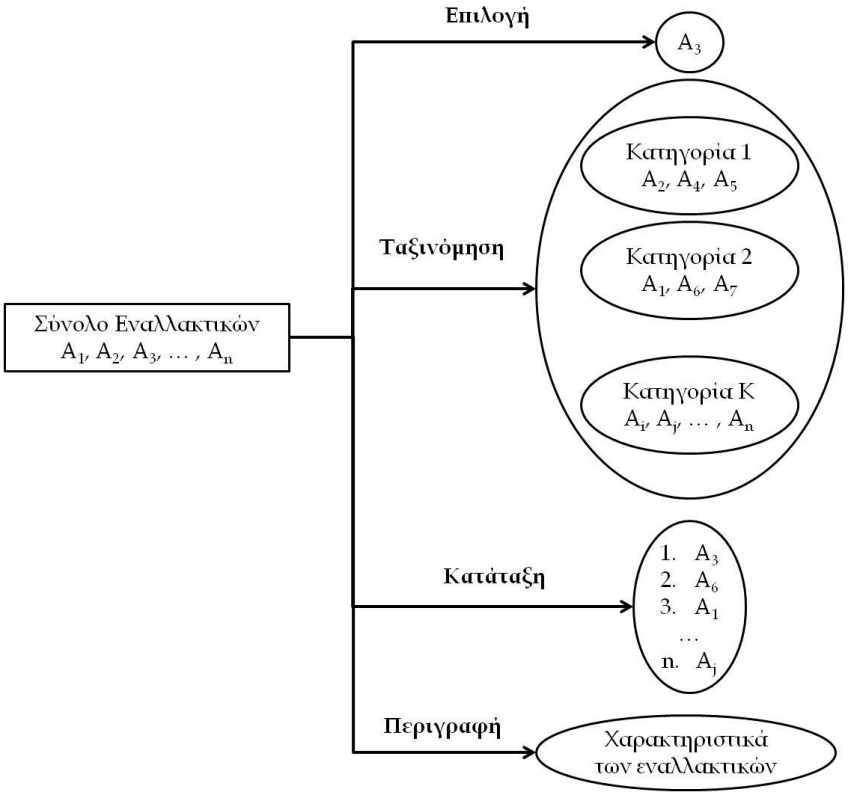
Όλες οι μεθοδολογίες που βασίζονται στη θεωρία των σχέσεων υπεροχής λειτουργούν σε δύο βασικά βήματα:

- Πραγματοποίηση της σχέσης υπεροχής S μεταξύ των εναλλακτικών
- Εκμετάλλευση της σχέσης υπεροχής.

Στο δεύτερο βήμα εξάγεται και το αποτέλεσμα της αξιολόγησης των εναλλακτικών, το οποίο μπορεί να λάβει τις παρακάτω μορφές:

- Επιλογή (choice)
- Ταξινόμηση (classification)
- Κατάταξη (ranking)
- Περιγραφή (description).

Στο **Σχήμα 4.1** απεικονίζονται όλες οι μορφές του αποτελέσματος αξιολόγησης των εναλλακτικών ενός προβλήματος στη θεωρία των σχέσεων υπεροχής.



Σχήμα 4.1: Αποτέλεσμα αξιολόγησης εναλλακτικών στη θεωρία σχέσεων υπεροχής

4.2.4.1 Η μέθοδος PROMETHEE

Οι μέθοδοι PROMETHEE αναπτύχθηκαν από τους Brans, Mareschal και Vincke [36] ως μια ευκολότερα κατανοητή πολυκριτήρια μεθοδολογία. Ο βασικός της στόχος είναι η επίτευξη μιας ευέλικτης αντιμετώπισης της αδυναμίας καθορισμού της υποκειμενικότητας στο εκάστοτε πρόβλημα αξιολόγησης. Έτσι, καθορίζεται μια συνάρτηση προτίμησης για κάθε κριτήριο, η οποία χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο βαθμός προτίμησης μεταξύ δύο εναλλακτικών στην περίπτωση των διμερών συγκρίσεων.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στις συγκεκριμένες μεθόδους αποτελείται από τον υπολογισμό θετικών και αρνητικών ροών προτίμησης για κάθε εναλλακτική. Οι θετικές ροές προτίμησης εκφράζουν την κυριαρχία μιας εναλλακτικής έναντι των υπολοίπων, ενώ οι αρνητικές ροές εκφράζουν το κατά πόσο μια εναλλακτική κυριαρχείται από τις υπόλοιπες. Η οικογένεια των μεθόδων PROMETHEE αποτελείται από την PROMETHEE I και την PROMETHEE II. Η μεν PROMETHEE I βασίζεται στις θετικές και αρνητικές ροές που οδηγούν σε μια μερική κατάταξη, ενώ η PROMETHEE II δίνει μια πλήρη κατάταξη με βάση την εξισορρόπηση των παραπάνω ροών.

Η σχέση υπεροχής μεταξύ δύο εναλλακτικών A_i και A_j καθορίζεται από τον δείκτη προτίμησης (preference index) $\pi(A_i,A_j)$, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\pi(A_i, A_j) = \sum_{k=1}^{N_C} w_k p_k \left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) \tag{4.36}$$

Όπου w_k το βάρος του κριτηρίου k, N_C ο αριθμός των κριτηρίων και p_k η συνάρτηση προτίμησης για το κριτήριο k.

Υπάρχουν έξι (6) διαφορετικές μορφές της συνάρτησης p_k, ανάλογα με την αυστηρότητα ή την ευελιξία που θέλει να εφαρμόσει ο αποφασίζων.

4.2.4.1.1 Το κοινό κριτήριο (Usual criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j αν η αξία της εναλλακτικής A_i είναι μεγαλύτερη της αξίας της εναλλακτικής A_j. Στην περίπτωση που οι αξίες είναι ίσες τότε θεωρείται ότι υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των δύο εναλλακτικών στο συγκεκριμένο κριτήριο. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = \begin{cases} 0, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) \le \hat{g}_k(A_j) \\ 1, & \text{όταν } \hat{g}_k(A_i) > \hat{g}_k(A_j) \end{cases} \tag{4.37}$$

4.2.4.1.2 Το κριτήριο U-καμπύλης

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j αν η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι

μεγαλύτερη από ένα κατώφλι αδιαφορίας, q. Αλλιώς θεωρείται ότι υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των δύο εναλλακτικών. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = \begin{cases} 0, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ 1, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > q \end{cases} \tag{4.38}$$

4.2.4.1.3 Το κριτήριο V-καμπύλης

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι στην περίπτωση που η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j δεν υπερβαίνει ένα κατώφλι προτίμησης p, τότε ο βαθμός προτίμησης της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j αυξάνει γραμμικά συναρτήσει της διαφοράς των αξιών των δύο εναλλακτικών. Στην περίπτωση που η παραπάνω διαφορά των αξιών ξεπεράσει το κατώφλι προτίμησης τότε υπάρχει σαφής προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = \begin{cases} 0, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq 0 \\ \frac{\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j)}{p}, \text{ όταν } 0 < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \tag{4.39}$$

4.2.4.1.4 Το κριτήριο επιπέδων (Level criterion)

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη τόσο το κατώφλι αδιαφορίας όσο και το κατώφλι προτίμησης. Στην περίπτωση που η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι ανάμεσα στο κατώφλι αδιαφορίας και προτίμησης τότε θεωρείται ότι υπάρχει ελαφριά προτίμηση της εναλλακτικής A_i έναντι της εναλλακτικής A_j. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, ισχύουν οι παρατηρήσεις των προηγούμενων δύο κριτηρίων. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = \begin{cases} 0, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ 0.5, \text{ όταν } q < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \tag{4.40}$$

4.2.4.1.5 Το κριτήριο V-καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας (Linear criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι ο βαθμός προτίμησης της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j αυξάνεται από το μηδέν μέχρι το ένα, όταν η διαφορά της αξίας της A_i μείον την αξία της A_j είναι ανάμεσα των κατωφλιών αδιαφορίας και προτίμησης. Η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = \begin{cases} 0, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq q \\ \frac{\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) - q}{p-q}, \text{ όταν } q < \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) \leq p \\ 1, \text{ όταν } \hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j) > p \end{cases} \quad (4.41)$$

4.2.4.1.6 Το κριτήριο Gauss (Gaussian criterion)

Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι ο βαθμός προτίμησης είναι μια συνεχή συνάρτηση μορφής Gauss, όπου η συνάρτηση p_k δίνεται από τη σχέση:

$$p_k\left(\hat{g}_k(A_i), \hat{g}_k(A_j)\right) = 1 - e^{-\frac{\left(\hat{g}_k(A_i) - \hat{g}_k(A_j)\right)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.42)$$

Η μεταβλητή σ συμβολίζει την παράμετρο που καθορίζει το σημείο καμπής της συνάρτησης.

4.2.4.1.7 Ο υπολογισμός των ροών

Για τον προσδιορισμό των σχέσεων υπεροχής πρέπει να υπολογιστούν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι θετικές (ροές εξόδου), αρνητικές (ροές εισόδου) και καθαρές ροές.

Η ροή εξόδου (leaving flow), που δείχνει την υπεροχή της εναλλακτικής A_i έναντι της A_j, δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^+(A_i) = \frac{1}{N_A - 1} \sum_{j=1}^{N_A} \pi(A_i, A_j) \quad (4.43)$$

Η ροή εισόδου (entering flow), που δείχνει την υπεροχή όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών έναντι της A_i, δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi^-(A_i) = \frac{1}{N_A - 1} \sum_{j=1}^{N_A} \pi(A_j, A_i) \quad (4.44)$$

Η καθαρή ροή (net flow) δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi(A_i) = \varphi^+(A_i) - \varphi^-(A_i) \quad (4.45)$$

Η τελική κατάταξη δίνεται από τη σχέση:

$$A_i \succ A_j \Leftrightarrow \Phi(A_i) > \Phi(A_j) \quad (4.46)$$

$$A_i \sim A_j \Leftrightarrow \Phi(A_i) = \Phi(A_j) \quad (4.47)$$

5. Μελέτη περίπτωσης

5.1 Καθορισμός προβλήματος απόφασης

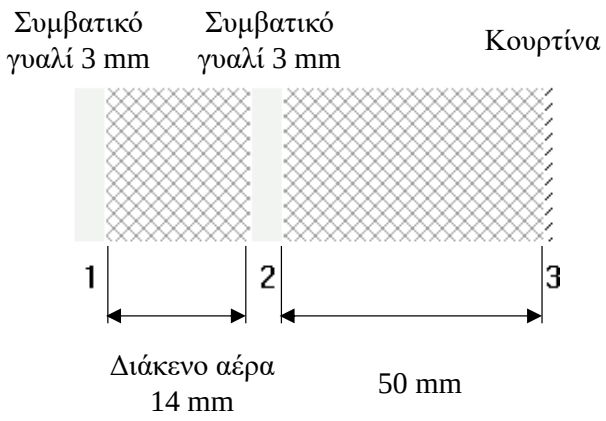
Όπως αναφέρθηκε στα εισαγωγικά κεφάλαια, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση του κτιριακού τομέα δημιουργεί την ανάγκη για βελτίωση της ενεργειακής του απόδοσης. Μία ενδιαφέρουσα λύση για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η χρήση έξυπνων παραθύρων που προσφέρουν τη δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων τους στις συνεχώς μεταβαλλόμενες εξωτερικές συνθήκες, αλλά και στις προτιμήσεις των ατόμων στο εσωτερικό του κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου, ιδιαίτερα κατά την περίοδο ψύξης, εξασφαλίζοντας ή και βελτιώνοντας ταυτόχρονα τις συνθήκες άνεσης στο εσωτερικό του. Για να είναι δυνατή η εισαγωγή και η διάδοση αυτών των καινοτόμων τύπων υαλοπινάκων στην ελληνική αγορά, θα πρέπει να αξιολογηθεί κατά πόσο αυτή η λύση είναι προτιμητέα σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα παραθύρων, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εμπλεκόμενα κριτήρια, καθώς και τη βαρύτητα που θα πρέπει να δοθεί σε κάθε κριτήριο. Για τον σκοπό αυτό, το πρόβλημα απόφασης που εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι η επιλογή του βέλτιστου συστήματος παραθύρων για ένα αντιπροσωπευτικό διαμέρισμα στην περιοχή της Αθήνας, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, καθώς και κριτήρια που αφορούν τις συνθήκες άνεσης των κατοίκων.

5.1.1 Καθορισμός των εναλλακτικών

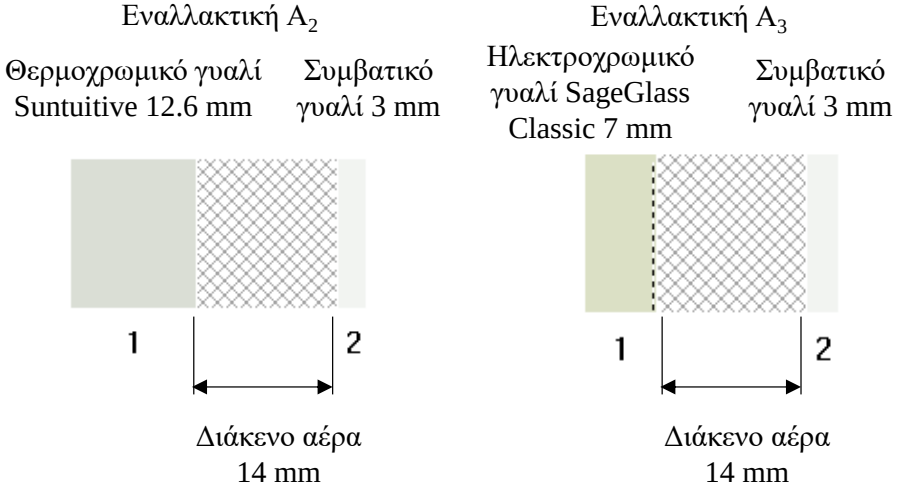
Για την ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, θα πρέπει η καινοτόμα λύση που προτείνεται να συγκριθεί με τις υπάρχουσες εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες αφορούν τα συμβατικά παράθυρα σταθερών ιδιοτήτων. Ο **Πίνακας 5.1** παρουσιάζει τις εξεταζόμενες εναλλακτικές, ενώ μία σχηματική αναπαράσταση κάθε εναλλακτικής παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.1** και το **Σχήμα 5.2**. Σημειώνεται ότι ως εναλλακτικές εξετάστηκαν εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα, τα χαρακτηριστικά των οποίων βρέθηκαν στη διεθνή βάση δεδομένων υαλοπινάκων (International Glazing DataBase - IGDB) του λογισμικού WINDOW 7.8.

Πίνακας 5.1: Περιγραφή των εναλλακτικών του προβλήματος

Κωδικός	Εναλλακτική
A_1	Συμβατικό διπλό παράθυρο με εσωτερική σκίαση από κουρτίνα
A_2	Διπλό θερμοχρωμικό παράθυρο (εύρος χρωματισμού 5 - 95 ^oC)
A_3	Διπλό ηλεκτροχρωμικό παράθυρο



Σχήμα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση της εναλλακτικής A_1



Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση των εναλλακτικών A_2 και A_3

Ως συμβατική εναλλακτική (A_1) επιλέχθηκε ένα διπλό παράθυρο με πλήρωση αέρα, καθώς αποτελεί ένα πολύ διαδεδομένο σύστημα παραθύρου στα ελληνικά κτίρια κατοικιών. Οι εναλλακτικές A_2 και A_3 αφορούν επίσης διπλά παράθυρα με πλήρωση αέρα, ώστε η σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών να επικεντρωθεί στη δυνατότητα μεταβολής των θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων των έξυπνων παραθύρων και να μην επηρεάζεται από άλλους παράγοντες. Επίσης, καθώς τα έξυπνα παράθυρα προσφέρουν τη δυνατότητα σκίασης μέσω της λειτουργίας τους, στην εναλλακτική A_1 συμπεριλήφθηκε εσωτερική σκίαση με κουρτίνα. Τα θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των εναλλακτικών στη διάφανη/χωρίς σκίαση και στην πλήρως χρωματισμένη/σκιασμένη τους κατάσταση υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού WINDOW (**Πίνακας 5.2**).

Πίνακας 5.2: Θερμικά και οπτικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων εναλλακτικών

Εναλλακτική	**Θερμοπερατότητα U [W/(m^2·K)]**	**Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους g [-]**	**Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία τ_{vis} [-]**
A_1	2.8 | 1.7	0.76 | 0.29	0.81 | 0.05
A_2	2.7	0.64 | 0.29	0.66 | 0.01
A_3	1.7	0.45 | 0.09	0.66 | 0.01

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι το ηλεκτροχρωμικό παράθυρο (εναλλακτική A_3) παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή θερμοπερατότητας, και συνεπώς καλύτερη μονωτική ικανότητα, σε σχέση με τις άλλες δύο εναλλακτικές, καθώς διαθέτει επίστρωση χαμηλής εκπομπής στον εξωτερικό υαλοπίνακα (φαινόμενο σύνηθες για τα εμπορικά ηλεκτροχρωμικά παράθυρα). Στην περίπτωση του συμβατικού παραθύρου, η θερμοπερατότητα βελτιώνεται με το κλείσιμο της κουρτίνας. Ως προς τον συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους παρατηρείται ότι το ηλεκτροχρωμικό παράθυρο εμποδίζει πιο αποτελεσματικά την είσοδο του θερμικού κέρδους από την ηλιακή ακτινοβολία, τόσο στη χρωματισμένη, όσο και στην αποχρωματισμένη του κατάσταση. Στην περίπτωση της διαπερατότητας σε ορατό φως, το συμβατικό παράθυρο επιτρέπει τη διέλευση περισσότερου φυσικού φωτός όταν δεν είναι σκιασμένο, ενώ στη σκιασμένη/πλήρως χρωματισμένη κατάσταση η διαπερατότητα έχει παρόμοια τιμή και για τις τρεις εναλλακτικές. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το θερμοχρωμικό παράθυρο (εναλλακτική A_2) που μελετάται αρχίζει να χρωματίζεται σταδιακά από τους 5 ^oC και φτάνει στην πλήρως χρωματισμένη του κατάσταση στους 95 ^oC. Συνεπώς, καθώς δεν αναμένεται η θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης να φτάσει σε τόσο υψηλές τιμές, το θερμοχρωμικό παράθυρο δε θα φτάσει ποτέ την πλήρως χρωματισμένη του κατάσταση.

5.1.2 Καθορισμός των κριτηρίων

Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από διαφορετικά κριτήρια τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες:

- **Οικονομικά:** Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν τον οικονομικό αντίκτυπο κάθε εναλλακτικής.
- **Οπτικής άνεσης:** Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν την επίδραση κάθε εναλλακτικής στην οπτική άνεση των ατόμων που βρίσκονται στον χώρο.
- **Θερμικής άνεσης:** Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν την επίδραση κάθε εναλλακτικής στη θερμική άνεση των ατόμων που βρίσκονται στον χώρο.

- **Ελεγξιμότητα:** Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν το κατά πόσο κάθε εναλλακτική μπορεί να προσαρμοστεί στις επιθυμίες του χρήστη, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση των κατοίκων του διαμερίσματος.
- **Ενεργειακά-Περιβαλλοντικά:** Τα κριτήρια που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία αφορούν τον αντίκτυπο κάθε εναλλακτικής ως προς την πρωτογενή ενέργεια που καταναλώνεται ετησίως λόγω του εξεταζόμενου κτίριου και τις αντίστοιχες εκπομπές CO_2.

Ο **Πίνακας 5.3** συνοψίζει τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Πίνακας 5.3: Περιγραφή των κριτηρίων αξιολόγησης του προβλήματος απόφασης

Κωδικός	Κριτήριο	Κατηγορία	Μονάδες	Στόχος
C_1	Αρχικό κόστος	Οικονομικό	€/m^2	Ελαχιστοποίηση
C_2	Ετήσιο κόστος ενέργειας	Οικονομικό	€/έτος	Ελαχιστοποίηση
C_3	Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση	Θερμικής άνεσης	h/έτος	Ελαχιστοποίηση
C_4	Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε προστασία από θάμβωση	Οπτικής άνεσης	h/έτος	Ελαχιστοποίηση
C_5	Ώρες που δεν υπήρχε οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον	Οπτικής άνεσης	h/έτος	Ελαχιστοποίηση
C_6	Δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου	Ελεγξιμότητα	-	Μεγιστοποίηση
C_7	Ετήσιες εκπομπές CO_2	Ενεργειακό - Περιβαλλοντικό	kg/έτος	Ελαχιστοποίηση

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του εκάστοτε κριτηρίου:

- **Κριτήριο C_1 – Αρχικό Κόστος:** Το κριτήριο αυτό περιγράφει το αρχικό κόστος κάθε συστήματος παραθύρου. Στο κόστος αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψη το κόστος του πλαισίου, καθώς δεν αναμένεται να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των τριών εναλλακτικών.

- **Κριτήριο C_2 – Ετήσιο κόστος ενέργειας:** Το κριτήριο αυτό περιγράφει το συνολικό οικονομικό κόστος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του εξεταζόμενου διαμερίσματος για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό για ένα έτος. Οι υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου (ηλεκτρική ενέργεια για τη

χρήση συσκευών ή ζεστό νερό χρήσης) δε συνυπολογίστηκαν, καθώς δε διαφέρουν για τις τρεις εξεταζόμενες εναλλακτικές.

- **Κριτήριο C_3 – Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε θερμική άνεση:** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στο πλήθος των ωρών του έτους για τις οποίες η τιμή του δείκτη PPD ξεπερνά το 10%, σύμφωνα με όσο αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.1.2.

- **Κριτήριο C_4 – Ώρες που δεν εξασφαλίστηκε προστασία από θάμβωση:** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στο πλήθος των ωρών του έτους κατά τις οποίες ο δείκτης DGI ξεπέρασε την οριακή τιμή 22 που αντιστοιχεί στο αποδεκτό όριο θάμβωσης σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.1.2.1.

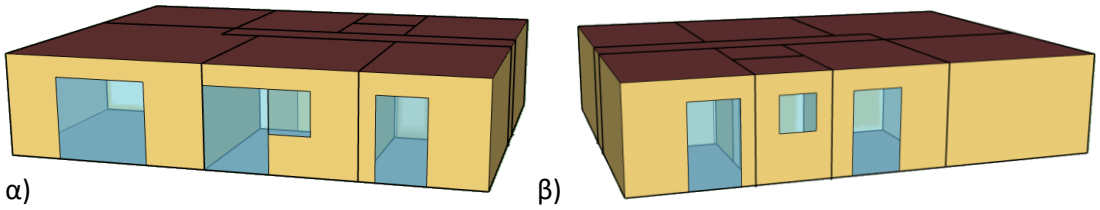
- **Κριτήριο C_5 – Ώρες που δεν υπήρχε οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον:** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στο πλήθος των ωρών του έτους κατά τις οποίες οι κάτοικοι του διαμερίσματος δεν είναι σε θέση να δουν το εξωτερικό περιβάλλον μέσω του παραθύρου. Στην περίπτωση της εναλλακτικής A_1, οι ώρες αυτές αντιστοιχούν στις ώρες που η κουρτίνα είναι η κλειστή. Για τις εναλλακτικές A_2 και A_3 θεωρείται ότι η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον χάνεται όταν η συνολική διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία του παραθύρου γίνεται μικρότερη από 10%.

- **Κριτήριο C_6 – Δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου:** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στο κατά πόσο οι κάτοικοι του διαμερίσματος έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την κατάσταση του παραθύρου με βάση τις προσωπικές τους προτιμήσεις.

- **Κριτήριο C_7 – Ετήσιες εκπομπές CO_2:** Το κριτήριο αυτό αναφέρεται στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του διαμερίσματος, δηλαδή στις ετήσιες εκπομπές CO_2 που προκύπτουν κατά την παραγωγή της ενέργειας που καταναλώνεται από το διαμέρισμα για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό. Όπως και στην περίπτωση του κριτηρίου C_2, οι καταναλώσεις που δε διαφέρουν για τις τρεις εξεταζόμενες εναλλακτικές δε λήφθηκαν υπόψη.

5.1.3 Το κτιριακό μοντέλο

Για τον υπολογισμό της απόδοσης των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο μελετήθηκε ένα διαμέρισμα περίπου 104 m^2 που κατασκευάστηκε το 1991 και βρίσκεται στον πέμπτο όροφο πολυκατοικίας στην περιοχή της Αθήνας. Το κτιριακό μοντέλο, το οποίο απεικονίζεται στο **Σχήμα 5.3** διαθέτει τρεις μπαλκονόπορτες και ένα παράθυρο στη νότια πλευρά και δύο μπαλκονόπορτες και ένα παράθυρο στη βόρεια.



Σχήμα 5.3: α) Η νότια και β) η βόρεια πλευρά του κτιριακού μοντέλου στο λογισμικό SketchUp Pro

Ο **Πίνακας 5.4** παρουσιάζει τους συντελεστές θερμοπερατότητας των στοιχείων του κτιριακού κελύφους.

Πίνακας 5.4: Οι συντελεστές θερμοπερατότητας του κτιριακού κελύφους

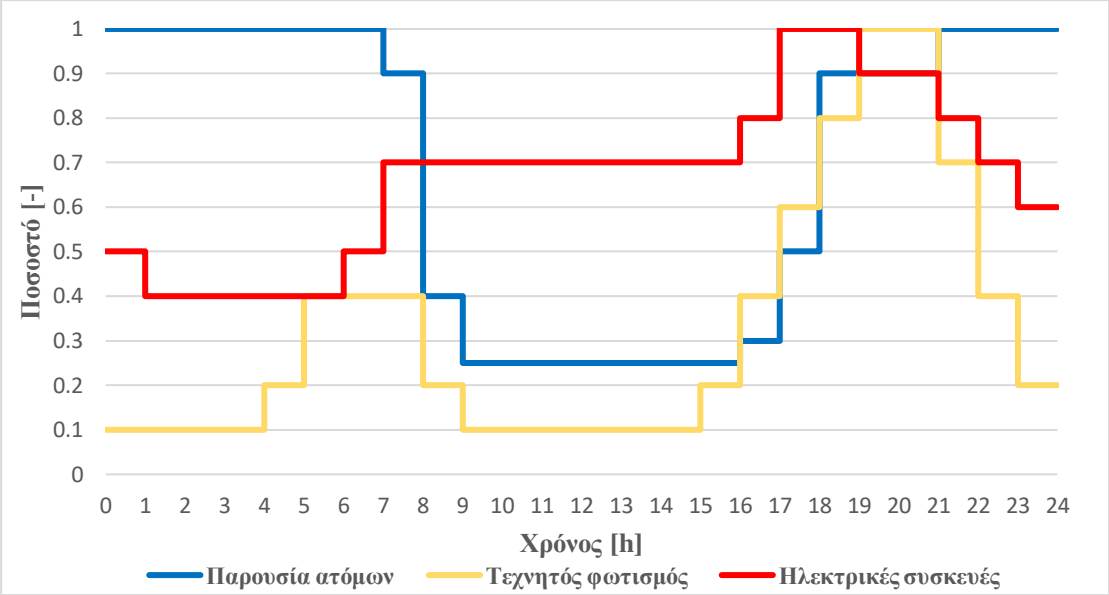
Δομικό στοιχείο	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/(m^2·K)]
Εξωτερικοί τοίχοι	0.7
Εσωτερικοί τοίχοι	2.0
Οροφή	0.5
Πάτωμα	2.0

Ο **Πίνακας 5.5** συνοψίζει τα εσωτερικά φορτία του διαμερίσματος, τα οποία ορίστηκαν με βάση τον ελληνικό Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) [14].

Πίνακας 5.5: Τα εσωτερικά φορτία του κτιριακού μοντέλου

Εσωτερικό φορτίο	Τιμή
Φορτία ατόμων	0.05 άτομα/m^2, 120 W/άτομο
Φορτία ηλεκτρικών συσκευών	4 W/m^2, μέσος συντελεστής λειτουργίας 0.75
Φορτία τεχνητού φωτισμού	5 W/m^2 (200 lux) για τα δωμάτια και 2.5 W/m^2 (100 lux) για τον διάδρομο και τους κοινόχρηστους χώρους
Φυσικός αερισμός	0.75 m^3/(h·m^2)

Για την παρουσία των ατόμων στον χώρο και τη λειτουργία του τεχνητού φωτισμού και των ηλεκτρικών συσκευών χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια προγράμματα από το πρότυπο ASHRAE 90.1-2019 [37], τα οποία απεικονίζονται στο **Σχήμα 5.4**.



Σχήμα 5.4: Τα ημερήσια προγράμματα παρουσίας ατόμων και χρήσης τεχνητού φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών σύμφωνα με το πρότυπο ASHRAE 90.1-2019 [37]

Η επιθυμητή θερμοκρασία των θερμαινόμενων χώρων ορίστηκε στους 22 ^{o}C για τη θέρμανση και στους 26 ^{o}C για την ψύξη. Η θέρμανση πραγματοποιείται μέσω λέβητα φυσικού αερίου με βαθμό απόδοσης 0.8, ενώ η ψύξη γίνεται μέσω αντλίας θερμότητας με εποχιακό βαθμό απόδοσης (SEER) 2.2 [14]. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων θερμικής άνεσης, η ταχύτητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 0.1 m/s, ενώ η μονωτική ικανότητα του ρουχισμού θεωρήθηκε ίση με 1 clo για την περίοδο θέρμανσης και 0.5 clo για την περίοδο ψύξης.

Ο έλεγχος της κατάστασης του παραθύρου πραγματοποιείται με διαφορετικό τρόπο για κάθε εναλλακτική. Στην περίπτωση της εναλλακτικής A_1, η κουρτίνα παραμένει ανοικτή όσο η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του παραθύρου δεν ξεπερνά την οριακή τιμή των 150 W/m^2 και κλείνει μόλις ξεπεραστεί η τιμή αυτή [38]. Επίσης, εφαρμόζεται και έλεγχος θάμβωσης (glare control) και συνεπώς η κουρτίνα κλείνει όταν ο δείκτης DGI του χώρου ξεπεράσει την οριακή τιμή 22 που αντιστοιχεί στο αποδεκτό επίπεδο θάμβωσης. Για τον υπολογισμό του DGI, θεωρήθηκε ότι ο προσανατολισμός των ατόμων είναι προς τη Δύση, λόγω της εσωτερικής διαρρύθμισης του διαμερίσματος. Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων, ο έλεγχος της κατάστασης του παραθύρου γίνεται με βάση το επίπεδο του φυσικού φωτισμού σε ένα σημείο αναφοράς που βρίσκεται στο κέντρο κάθε δωματίου και σε ύψος 0.8 m από το έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο, η κατάσταση του παραθύρου ελέγχεται δυναμικά, ώστε σε κάθε χρονικό βήμα να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού στο σημείο αναφοράς (200 lux για τα δωμάτια και 100 lux για τον διάδρομο και τους κοινόχρηστους χώρους [15]). Αυτή η μέθοδος ελέγχου έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο αποδοτική για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα, καθώς επιτρέπει την εξοικονόμηση ενέργειας, αξιοποιώντας ταυτόχρονα σε μέγιστο βαθμό τον διαθέσιμο φυσικό φωτισμό [39]. Τέλος, ο έλεγχος θάμβωσης εφαρμόζεται και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων. Δηλαδή, όταν ο δείκτης DGI του χώρου ξεπεράσει την

οριακή τιμή 22, τα παράθυρα σκουραίνουν μέχρι η τιμή του DGI να επιστρέψει στα αποδεκτά του όρια. Στην περίπτωση των θερμοχρωμικών παραθύρων δε χρησιμοποιείται κάποια στρατηγική ελέγχου, αφού τα συστήματα αυτά είναι παθητικά και προσαρμόζουν τις ιδιότητές τους με βάση τη θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης.

5.1.4 Προσδιορισμός της απόδοσης των εναλλακτικών

Μέσω της ενεργειακής προσομοίωσης του κτιριακού μοντέλου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο με τη χρήση του λογισμικό EnergyPlus, αλλά και με βάση τη βιβλιογραφία, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόδοσης των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο.

- **Κριτήριο C_1 – Αρχικό Κόστος:** Μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης προσδιορίστηκε το αρχικό κόστος κάθε εναλλακτικής [40]-[45].
- **Κριτήριο C_2 – Ετήσιο κόστος ενέργειας:** Μέσω της ενεργειακής προσομοίωσης προσδιορίστηκαν οι ετήσιες απαιτήσεις του διαμερίσματος σε θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό για τις τρεις εναλλακτικές (**Πίνακας 5.6**). Με βάση τις τιμές αυτές, λαμβάνοντας υπόψη τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης και θεωρώντας ως τιμή φυσικού αερίου 0.062696 €/kWh [46] και τιμή ηλεκτρικής ενέργειας 0.190 €/kWh [47], είναι δυνατός ο υπολογισμός του ετήσιου κόστους ενέργειας.

Πίνακας 5.6: Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για τις τρεις εναλλακτικές

Εναλλακτική	A_1	A_2	A_3
Θέρμανση [kWh/m^2]	23.90	18.81	31.03
Ψύξη [kWh/m^2]	49.36	51.30	31.53
Φωτισμός [kWh/m^2]	11.95	11.21	11.13

- **Κριτήρια C_3 – C_5:** Οι ώρες του έτους κατά τις οποίες δεν ικανοποιούνται πλήρως οι συνθήκες άνεσης προσδιορίστηκαν μέσω της ενεργειακής προσομοίωσης. Η τελική τιμή υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των τιμών για όλες τις θερμικές ζώνες.
- **Κριτήριο C_6 – Δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου:** Το κριτήριο αυτό είναι δυαδικό, εφόσον αναφέρεται στο κατά πόσο προσφέρεται η δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου στους κατοίκους του διαμερίσματος. Συνεπώς, στην περίπτωση των εναλλακτικών A_1 και A_3, όπου οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόσουν τη θέση της κουρτίνας ή την ένταση του χρωματισμού του ηλεκτροχρωμικού παραθύρου, η απόδοση παίρνει την τιμή 1. Αντίθετα, η απόδοση της εναλλακτικής A_2 παίρνει την τιμή 0, αφού τα θερμοχρωμικά συστήματα είναι παθητικά και δεν προσφέρουν καμία δυνατότητα ελέγχου.

- **Κριτήριο C_7 – Ετήσιες εκπομπές CO_2:** Χρησιμοποιώντας τις ενεργειακές απαιτήσεις που υπολογίστηκαν (**Πίνακας 5.6**), διαιρώντας με τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης (0.8 για τον λέβητα φυσικού αερίου και εποχιακός βαθμός απόδοσης 2.2 για την αντλία θερμότητας) και πολλαπλασιάζοντας με τους αντίστοιχους συντελεστές (1.05 για φυσικό αέριο και 2.9 για ηλεκτρική ενέργεια) [14] είναι δυνατός ο υπολογισμός της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας που καταναλώνεται από το διαμέρισμα. Στη συνέχεια, οι ετήσιες εκπομπές CO_2 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τους συντελεστές 0.196 kg/kWh για φυσικό αέριο και 0.989 kg/kWh για ηλεκτρική ενέργεια [14].

Ο **Πίνακας 5.7** συνοψίζει **τ**α τελικά αποτελέσματα αναφορικά με την επίδοση των τριών εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο.

Πίνακας 5.7: Οι επιδόσεις των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$	$g_5(A_i)$	$g_6(A_i)$	$g_7(A_i)$
A_1	135	875.32	1662.83	77.33	1898.38	1	10909.02
A_2	300	836.47	2622.43	161.47	0	0	10813.818
A_3	500	756.83	932.17	162.53	580.71	1	8433.77
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min

5.1.5 Προσδιορισμός της βαρύτητας των κριτηρίων

Η βαρύτητα των κριτηρίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό συμπέρασμα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό, ο προσδιορισμός της βαρύτητας του εκάστοτε κριτηρίου είναι υψίστης σημασίας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος AHP, η οποία βασίζεται στις διμερείς συγκρίσεις μεταξύ των κριτηρίων με σκοπό τον καθορισμό του επιπέδου σημαντικότητας κάθε κριτηρίου έναντι των άλλων.

Για τον προσδιορισμό της βαρύτητας κάθε κριτηρίου δημιουργήθηκε ερωτηματολόγιο με σκοπό την εξαγωγή μίας αντιπροσωπευτικής μέσης τιμής αναφορικά με τη βαρύτητα που θα έδινε ένας μέσος κάτοικος της Αθήνας σε κάθε κριτήριο. Το ερωτηματολόγιο δημιουργήθηκε με βάση τη λογική των διμερών συγκρίσεων μεταξύ των κριτηρίων. Συγκεκριμένα, σε κάθε συμμετέχοντα ζητήθηκε, για κάθε δυνατό συνδυασμό μεταξύ των κριτηρίων, να επιλέξει ποιο από τα δύο κριτήρια θεωρεί πιο σημαντικό. Στη συνέχεια, ανάλογα με την απάντησή του, κλήθηκε να αξιολογήσει το επίπεδο σημαντικότητας του κριτηρίου που επέλεξε συγκριτικά με το άλλο με βάση την ακόλουθη εννιαβάθμια κλίμακα:

Πίνακας 5.8: Η εννιαβάθμια κλίμακα για τον προσδιορισμό της βαρύτητας των κριτηρίων

Ένταση σχετικής σημασίας	Ερμηνεία
1	Ίση σπουδαιότητα
2	
3	Μέτρια σπουδαιότητα
4	
5	Σημαντική σπουδαιότητα
6	
7	Πολύ ισχυρή σπουδαιότητα
8	
9	Μέγιστη σπουδαιότητα

Οι ενδιάμεσες τιμές (2, 4, 6, 8) του παραπάνω πίνακα χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβιβασμός, ενώ κάθε φορά που σε ένα κριτήριο δίνεται μία από τις παραπάνω τιμές όταν συγκρίνεται με ένα δεύτερο κριτήριο, τότε στο δεύτερο κριτήριο δίνεται η αντίστροφη τιμή όταν συγκρίνεται με το πρώτο.

Συνολικά συμπληρώθηκαν 57 ερωτηματολόγια, από τα οποία προέκυψαν οι συντελεστές βαρύτητας του παρακάτω πίνακα μέσω της μεθόδου AHP.

Πίνακας 5.9: Οι συντελεστές βαρύτητας με βάση τη μέθοδο AHP

Κριτήριο	Συντελεστής βαρύτητας
C_1	0.08
C_2	0.20
C_3	0.21
C_4	0.07
C_5	0.15
C_6	0.13
C_7	0.15

Με βάση τα ερωτηματολόγια που συμπληρώθηκαν, τα ερωτηθέντα άτομα θεωρούν ως τα πιο σημαντικό κριτήρια την εξασφάλιση της θερμικής άνεσης στον χώρο και το ετήσιο κόστος της ενέργειας, με συντελεστές βαρύτητας 0.21 και 0.20 αντίστοιχα. Στη συνέχεια κατατάσσονται η δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον και οι ετήσιες εκπομπές CO_2 με συντελεστή βαρύτητας περίπου 0.15, καθώς και η δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου, με βαρύτητα 0.13. Τέλος, λιγότερα σημαντικά κριτήρια θεωρούνται το αρχικό κόστος του παραθύρου, με βαρύτητα 0.08, και η δυνατότητα προστασίας από θάμβωση, με βαρύτητα 0.07.

Ο τελικός πίνακας απόφασης, που αποτελεί το σημείο έναρξης για την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων του επόμενου κεφαλαίου, είναι ο ακόλουθος:

Πίνακας 5.10: Ο πίνακας απόφασης του προβλήματος

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$	$g_5(A_i)$	$g_6(A_i)$	$g_7(A_i)$
A_1	135	875.32	1662.83	77.33	1898.38	1	10909.02
A_2	300	836.47	2622.43	161.47	0	0	10813.82
A_3	500	756.83	932.17	162.53	580.71	1	8433.77
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min
Βάρος w_k	0.08	0.20	0.21	0.07	0.15	0.13	0.15

6. Αποτελέσματα

6.1 Μέθοδος MAUT

Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινά από τη δημιουργία του πίνακα απόφασης (**Πίνακας 5.10)**. Εφόσον οι αξίες των εναλλακτικών είναι εκφρασμένες σε διαφορετικές κλίμακες, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου πίνακα απόφασης. Για τον σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Ο πίνακας απόφασης και η μέγιστη και η ελάχιστη απόδοση σε κάθε κριτήριο για τη μέθοδο MAUT

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$	$g_5(A_i)$	$g_6(A_i)$	$g_7(A_i)$
A_1	135	875.32	1662.83	77.33	1898.38	1	10909.02
A_2	300	836.47	2622.43	161.47	0	0	10813.82
A_3	500	756.83	932.17	162.53	580.71	1	8433.77
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min
Βάρος w_k	0.08	0.20	0.21	0.07	0.15	0.13	0.15
Max	500	875.32	2622.43	162.53	1898.38	1	10909.02
Min	135	756.83	932.17	77.33	0	0	8433.77

Στη συνέχεια προκύπτει ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης σύμφωνα με τη σχέση (4.7):

Πίνακας 6.2: Ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου MAUT

	$\hat{g}_1(A_i)$	$\hat{g}_2(A_i)$	$\hat{g}_3(A_i)$	$\hat{g}_4(A_i)$	$\hat{g}_5(A_i)$	$\hat{g}_6(A_i)$	$\hat{g}_7(A_i)$
A_1	1.0000	0.0000	0.5677	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
A_2	0.5479	0.3279	0.0000	0.0124	1.0000	0.0000	0.0385
A_3	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.6941	1.0000	1.0000
Στόχος	min	min	min	min	min	max	Min
Βάρος w_k	0.08	0.20	0.21	0.07	0.15	0.13	0.15

Με βάση τις τιμές μονοκριτήριας χρησιμότητας του παραπάνω πίνακα, υπολογίζεται η πολυκριτήρια χρησιμότητα για κάθε εναλλακτική, σύμφωνα με την προσθετική σχέση (4.6):

Πίνακας 6.3: Η πολυκριτήρια χρησιμότητα κάθε εναλλακτικής με βάση τη μέθοδο MAUT

Εναλλακτική	$\mathbf{U}(\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{A_i}))$	**Κατάταξη**
$\mathbf{A_1}$	40.36%	2
$\mathbf{A_2}$	26.78%	3
$\mathbf{A_3}$	80.02%	1

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα**,** με βάση τη μέθοδο MAUT επιλέγεται η εναλλακτική A_3, αφού παρουσιάζει τη μέγιστη χρησιμότητα. Στη δεύτερη θέση κατατάσσεται η εναλλακτική A_1 που αντιστοιχεί στα συμβατικά παράθυρα με κουρτίνα, ενώ στην τρίτη θέση κατατάσσονται τα θερμοχρωμικά παράθυρα (εναλλακτική A_2).

6.2 Μέθοδος TOPSIS

Η εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS ξεκινά από τη δημιουργία του πίνακα απόφασης (**Πίνακας 5.10**). Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης, σύμφωνα με τη σχέση (4.10):

Πίνακας 6.4: Ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης της μεθόδου TOPSIS

	$\hat{\mathbf{g}}_1(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_2(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_3(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_4(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_5(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_6(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{g}}_7(\mathbf{A_i})$
$\mathbf{A_1}$	0.2256	0.6130	0.5129	0.3198	0.9563	0.7071	0.6225
$\mathbf{A_2}$	0.5012	0.5858	0.8089	0.6678	0.0000	0.0000	0.6171
$\mathbf{A_3}$	0.8354	0.5301	0.2875	0.6722	0.2925	0.7071	0.4813
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min

Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τις τιμές κάθε στήλης του παραπάνω πίνακα με το αντίστοιχο βάρος, σύμφωνα με την εξίσωση (4.9). Στη συνέχεια, υπολογίζονται η θετική ($\hat{U}^+$) και η αρνητική ιδεατή λύση ($\hat{U}^-$) για κάθε κριτήριο. Ο **Πίνακας 6.5** παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.5: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης και η θετική και αρνητική ιδεατή λύση της μεθόδου TOPSIS

	$\hat{\mathbf{u}}_1(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_2(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_3(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_4(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_5(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_6(\mathbf{A_i})$	$\hat{\mathbf{u}}_7(\mathbf{A_i})$
$\mathbf{A_1}$	0.0179	0.1254	0.1091	0.0238	0.1441	0.0913	0.0929
$\mathbf{A_2}$	0.0397	0.1198	0.1721	0.0497	0.0000	0.0000	0.0921
$\mathbf{A_3}$	0.0662	0.1084	0.0612	0.0500	0.0441	0.0913	0.0718
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min
$\hat{\mathbf{U}}^+$	0.0179	0.1084	0.0612	0.0238	0.0000	0.0913	0.0718
$\hat{\mathbf{U}}^-$	0.0662	0.1254	0.1721	0.0500	0.1441	0.0000	0.0929

Στη συνέχεια υπολογίζονται για κάθε εναλλακτική οι αποστάσεις S^+_i και S^-_i από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση αντίστοιχα σύμφωνα με τις σχέσεις (4.15) και (4.16), καθώς και η σχετική εγγύτητα, σύμφωνα με τη σχέση (4.17):

Πίνακας 6.6: Οι αποστάσεις από τη θετική και την αρνητική ιδεατή λύση και η σχετική εγγύτητα της μεθόδου TOPSIS

Εναλλακτική	S^+_i	S^-_i	D_i	**Κατάταξη**
A_1	0.1543	0.1238	0.4452	3
A_2	0.1494	0.1466	0.4953	2
A_3	0.0705	0.1771	0.7154	1

Επομένως, με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, ως βέλτιστη εναλλακτική επιλέγεται η A_3. Ακόμα, στην περίπτωση της μεθόδου TOPSIS παρατηρείται ότι η εναλλακτική A_2 κατατάσσεται στη δεύτερη θέση, σε αντίθεση με την περίπτωση της μεθόδου MAUT. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των τιμών σχετικής εγγύτητας των εναλλακτικών A_1 και A_2 δεν είναι πολύ μεγάλη, γεγονός που σημαίνει ότι η εναλλακτική A_2 δε θεωρείται σημαντικά καλύτερη συγκριτικά με την A_1.

6.3 Μέθοδος VIKOR

Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινά από τον πίνακα απόφασης (**Πίνακας 5.10**) και την εύρεση της καλύτερης (g_k^*) και της χειρότερης επίδοσης (g_k^-) για κάθε κριτήριο σύμφωνα με τις σχέσεις (4.19)-(4.22), οι οποίες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.7: Ο πίνακας απόφασης και η καλύτερη και η χειρότερη επίδοση για τη μέθοδο VIKOR

	$g_1(A_i)$	$g_2(A_i)$	$g_3(A_i)$	$g_4(A_i)$	$g_5(A_i)$	$g_6(A_i)$	$g_7(A_i)$
A_1	135	875.32	1662.83	77.33	1898.38	1	10909.02
A_2	300	836.47	2622.43	161.47	0	0	10813.82
A_3	500	756.83	932.17	162.53	580.71	1	8433.77
Στόχος	min	min	min	min	min	max	min
g_k^*	135	756.83	932.17	77.33	0	1	8433.77
g_k^-	500	875.32	2622.43	162.53	1898.38	0	10909.02

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ποσότητες S_i και R_i με βάση τις εξισώσεις (4.23) και (4.24).

Πίνακας 6.8: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά S και R για τη μέθοδο VIKOR

Εναλλακτική	S_i	R_i	Κατάταξη
A_1	0.5964	0.2045	2
A_2	0.7322	0.2128	3
A_3	0.1998	0.0792	1

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι $S^* = 0.1998$, $S^- = 0.7322$, $R^* = 0.0792$ και $R^- = 0.2128$. Για τον υπολογισμό των Q_i, σύμφωνα με την εξίσωση (4.25), χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου ν (0, 0.5 και 1). Ο **Πίνακας 6.9** παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.9: Η κατάταξη των εναλλακτικών κατά Q για τη μέθοδο VIKOR

Εναλλακτική	Q_i			Κατάταξη
	ν=0	ν=0.5	ν=1	
A_1	0.9382	0.8416	0.7451	2
A_2	1.0000	1.0000	1.0000	3
A_3	0.0000	0.0000	0.0000	1

Στη μέθοδο VIKOR, είναι επιθυμητές οι ελάχιστες δυνατές τιμές κατά S, R και Q. Καθώς η εναλλακτική A_3 προκύπτει βέλτιστη ως προς S, R και Q, η συνθήκη της ευστάθειας ικανοποιείται. Για τη συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος ισχύει:

$$Q(A_1) - Q(A_3) \geq \frac{1}{N_A - 1} = 0.5$$

και για τις τρεις τιμές της παραμέτρου ν που εξετάστηκαν. Συνεπώς και η συνθήκη του συγκριτικού πλεονεκτήματος ικανοποιείται και προκύπτει ως μοναδική βέλτιστη εναλλακτική η A_3. Στην περίπτωση κατάταξης των εναλλακτικών, όπως και στην περίπτωση της MAUT, η A_1 κατατάσσεται δεύτερη, ενώ η A_2 τρίτη.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της εναλλακτικής A_1, που κατατάσσεται στη δεύτερη θέση, η τιμή της ποσότητας Q βελτιώνεται με αύξηση της παραμέτρου ν. Αυτό σημαίνει ότι η εναλλακτική του συμβατικού παραθύρου με κουρτίνα (A_1) παρουσιάζει καλύτερη επίδοση όταν είναι επιθυμητή μία καλή επίδοση στο σύνολο των κριτηρίων (αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας). Αντίθετα, στην περίπτωση που είναι επιθυμητό να διατηρηθεί ο βαθμός δυσαρέσκειας κάθε κριτηρίου χωριστά σε χαμηλό επίπεδο (αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας), η τελική βαθμολογία της εναλλακτικής A_1 παρουσιάζει μικρή διαφορά συγκριτικά με την A_2, που κατατάσσεται στην τελευταία θέση.

6.4 Μέθοδος PROMETHEE

Στα πλαίσια της εργασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος PROMETHEE II που οδηγεί σε πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών. Αρχικά, η κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης πραγματοποιήθηκε μέσω της εξίσωσης (4.7), όπως στην περίπτωση της μεθόδου MAUT. Στη συνέχεια, για κάθε ζεύγος εναλλακτικών A_i και A_j υπολογίστηκε ο δείκτης προτίμησης $\pi(A_i,A_j)$, θεωρώντας ως συνάρτηση προτίμησης το κριτήριο V-καμπύλης με κατώφλι αδιαφορίας. Ως κατώφλι προτίμησης θεωρήθηκε p=0.15 και ως κατώφλι αδιαφορίας q=0.05. Ο **Πίνακας 6.10** παρουσιάζει τα αποτελέσματα του δείκτη προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών.

Πίνακας 6.10: Ο δείκτης προτίμησης για κάθε ζεύγος εναλλακτικών για τη μέθοδο PROMETHEE

	A_1	A_2	A_3
A_1	-	0.4955	0.1537
A_2	0.3552	-	0.2299
A_3	0.7172	0.6956	-

Ακολουθεί ο υπολογισμός της θετικής ροής φ^+, της αρνητικής ροής φ^- και της καθαρής ροής φ για κάθε εναλλακτική, ώστε να πραγματοποιηθεί η τελική τους κατάταξη, η οποία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.11: Οι ροές υπεροχής και η τελική κατάταξη με βάση τη μέθοδο PROMETHEE

	φ^+	φ^-	φ	Κατάταξη
A_1	0.3246	0.5362	-0.2116	2
A_2	0.2926	0.5956	-0.3030	3
A_3	0.7064	0.1918	0.5146	1

Συνεπώς, εφόσον ως βέλτιστη εναλλακτική θεωρείται αυτή με τη μεγαλύτερη καθαρή ροή, και στην περίπτωση της μεθόδου PROMETHEE επιλέγεται ως βέλτιστη εναλλακτική η A_3 που αντιστοιχεί στο ηλεκτροχρωμικό παράθυρο. Στη δεύτερη θέση κατατάσσεται η εναλλακτική A_1 και στην τρίτη η A_2.

7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το κατά πόσο σύγχρονοι τύποι έξυπνων παραθύρων, όπως είναι τα ηλεκτροχρωμικά και θερμοχρωμικά παράθυρα, τα οποία αποτελούν καινοτόμα λύση για την εξασφάλιση σκίασης και τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του κτιριακού τομέα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ελληνικά κτίρια κατοικιών, με σκοπό την εισαγωγή και τη διάδοσή τους στην ελληνική αγορά. Για τον σκοπό αυτό, τα ηλεκτροχρωμικά (εναλλακτική A_3) και τα θερμοχρωμικά παράθυρα (εναλλακτική A_2) συγκρίθηκαν με τη βοήθεια διάφορων πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων με τα ήδη υπάρχοντα συμβατικά παράθυρα με εσωτερική σκίαση (εναλλακτική A_1) που συναντώνται στα περισσότερα κτίρια κατοικιών. Ως μελέτη περίπτωσης εξετάστηκε ένα διαμέρισμα περίπου 104 m^2 στην περιοχή της Αθήνας που διαθέτει τρεις μπαλκονόπορτες και ένα παράθυρο στη νότια πλευρά και δύο μπαλκονόπορτες και ένα παράθυρο στη βόρεια. Για την αξιολόγηση των εναλλακτικών χρησιμοποιήθηκαν οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, καθώς και κριτήρια που αφορούν τη δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου και την επίδρασή του στη θερμική και οπτική άνεση των κατοίκων. Οι επιδόσεις των τριών εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο υπολογίστηκαν μέσω της μοντελοποίησης του προαναφερθέντος διαμερίσματος στο λογισμικό SketchUp Pro και την ενεργειακή του προσομοίωση στο λογισμικό EnergyPlus. Οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο AHP από την οπτική γωνία ενός αποφασίζοντα-κατοίκου του διαμερίσματος, με τη βοήθεια ερωτηματολογίου που βασίστηκε στις διμερείς συγκρίσεις μεταξύ των κριτηρίων σύμφωνα με μία προκαθορισμένη εννιαβάθμια κλίμακα. Για την κατάταξη των εναλλακτικών και την επιλογή της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιήθηκαν οι πολυκριτήριες μέθοδοι MAUT, TOPSIS, VIKOR και PROMETHEE II.

Αρχικά, ως προς τη σημαντικότητα των κριτηρίων, διαπιστώθηκε ότι η εξασφάλιση της θερμικής άνεσης των κατοίκων και το ετήσιο κόστος της ενέργειας αποτελούν τους δύο σημαντικότερους παράγοντες για την αξιολόγηση των εναλλακτικών. Στη συνέχεια κατατάχθηκαν η εξασφάλιση οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, οι ετήσιες εκπομπές CO_2 που προκύπτουν κατά την παραγωγή της ενέργειας που καταναλώνεται από το διαμέρισμα και η δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου. Τέλος, ως λιγότερο σημαντικά κριτήρια κατατάσσονται το αρχικό κόστος του παραθύρου και η προστασία από θάμβωση.

Από τις τέσσερις πολυκριτηριακές μεθόδους που εφαρμόστηκαν φαίνεται ξεκάθαρα ότι η εναλλακτική A_3, που αντιστοιχεί στα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα, αποτελεί τη βέλτιστη λύση για την εξεταζόμενη μελέτη περίπτωσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς η εναλλακτική αυτή σημειώνει σημαντικά καλύτερη επίδοση στα δύο σημαντικότερα κριτήρια, μειώνοντας το σύνολο των ωρών στο έτος που δεν εξασφαλίζεται θερμική άνεση, καθώς και το ετήσιο ενεργειακό κόστος συγκριτικά με

τις υπόλοιπες δύο εναλλακτικές. Ως προς τα κριτήρια μέτριας σημαντικότητας, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν επίσης καλές επιδόσεις, οδηγώντας σε αξιοσημείωτη μείωση των ετήσιων εκπομπών CO_2 και προσφέροντας τη δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου. Στην περίπτωση της οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, η επίδοση της εναλλακτικής αυτής δεν είναι τόσο καλή όσο των θερμοχρωμικών παραθύρων (εναλλακτική A_2), ωστόσο παρουσιάζει σημαντική βελτίωση συγκριτικά με τα συμβατικά παράθυρα με κουρτίνα (εναλλακτική A_1). Ως κυριότερα μειονεκτήματα των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων αναγνωρίζονται το υψηλό αρχικό τους κόστος συγκριτικά με τις άλλες δύο εναλλακτικές και η αδυναμία τους να μειώσουν αποτελεσματικά τη θάμβωση σε σύγκριση με τα συμβατικά παράθυρα με κουρτίνα. Ωστόσο, καθώς στα κριτήρια αυτά αντιστοιχούν οι μικρότεροι συντελεστές βαρύτητας, δεν είναι σε θέση να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα του προβλήματος απόφασης.

Ως προς την κατάταξη των υπόλοιπων δύο εναλλακτικών, οι μέθοδοι MAUT, VIKOR και PROMETHEE κατέταξαν στη δεύτερη θέση την εναλλακτική A_1 και στην τρίτη θέση την A_2. Στην περίπτωση της TOPSIS, οι εναλλακτικές αυτές κατατάχθηκαν αντίστροφα, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι η τιμή της σχετικής εγγύτητας της εναλλακτικής A_2 δεν προέκυψε σημαντικά μεγαλύτερη συγκριτικά με της A_1, συνεπώς η A_2 δε μπορεί να θεωρηθεί σημαντικά καλύτερη της A_1. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και των τεσσάρων μεθόδων, ως δεύτερη καλύτερη εναλλακτική θεωρείται η A_1, ενώ στην τελευταία θέση κατατάσσεται η A_2.

Η παραπάνω κατάταξη δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των συντελεστών βαρύτητας που προσδιορίστηκαν για κάθε κριτήριο. Η εναλλακτική A_1, που αντιστοιχεί στα υπάρχοντα συμβατικά παράθυρα με εσωτερική σκίαση από κουρτίνα, παρουσιάζει μέτρια επίδοση ως προς το κριτήριο της θερμικής άνεσης, που έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα, ωστόσο η επίδοση αυτή είναι σημαντικά καλύτερη συγκριτικά με της εναλλακτικής A_2 (θερμοχρωμικό παράθυρο). Ως προς το κριτήριο του ετήσιου κόστους ενέργειας, που αντιστοιχεί στον δεύτερο μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας, και οι δύο εναλλακτικές παρουσιάζουν χειρότερη επίδοση συγκριτικά με την A_3, με την A_1 να παρουσιάζει τη χειρότερη τιμή. Ωστόσο, η βελτίωση που προσφέρει η A_2 σε σχέση με την A_1 δεν είναι αρκετά σημαντική, ώστε να την κατατάξει σε υψηλότερη θέση. Στην περίπτωση των κριτηρίων μέτριας σημαντικότητας, η A_2 παρουσιάζει βέλτιστη επίδοση ως προς τη δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς αυτή δεν παρεμποδίζεται για καμία ώρα μέσα στο έτος, σε αντίθεση με την A_1 που καταργεί την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον για τις περισσότερες ώρες ετησίως. Η αντίστροφη κατάσταση παρουσιάζεται στην περίπτωση της δυνατότητας ελέγχου της κατάστασης του παραθύρου, όπου η A_1 προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου και οδηγεί σε βέλτιστη επίδοση, ενώ η A_2 παρουσιάζει τη χειρότερη επίδοση, αφού αποτελεί παθητικό σύστημα. Ως προς τις ετήσιες εκπομπές CO_2 και οι δύο εναλλακτικές παρουσιάζουν κακή επίδοση συγκριτικά με την A_3, με λίγο χειρότερη τιμή στην περίπτωση της A_1. Τέλος, ως προς τα κριτήρια χαμηλής σημαντικότητας, η εναλλακτική A_2 αντιστοιχεί σε μία ενδιάμεση τιμή αρχικού κόστους συγκριτικά με τις άλλες δύο εναλλακτικές, αλλά παρουσιάζει κακή επίδοση ως προς την προστασία από

θάμβωση. Αντίθετα, η εναλλακτική A_1 εξασφαλίζει βέλτιστη επίδοση για τα δύο παραπάνω κριτήρια.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της μεθόδου VIKOR, η διαφορά μεταξύ των τελικών επιδόσεων των εναλλακτικών A_1 και A_2 αυξάνεται με αύξηση της παραμέτρου ν, δηλαδή στην περίπτωση που δίνεται περισσότερη έμφαση στην επίτευξη καλής επίδοσης στο σύνολο των κριτηρίων με βάση την αρχή της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας. Αντίθετα, όταν δίνεται έμφαση στην αρχή της μεμονωμένης δυσαρέσκειας, που αποσκοπεί στη διατήρηση του βαθμού δυσαρέσκειας κάθε κριτηρίου χωριστά σε χαμηλό επίπεδο, η βελτίωση που προσφέρει η εναλλακτική A_1 σε σχέση με την A_2 δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Με βάση όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι η χρήση έξυπνων παραθύρων στα σύγχρονα ελληνικά κτίρια κατοικιών μπορεί να παρουσιάσει σημαντικά οφέλη και, συνεπώς, θα πρέπει να προτιμηθεί σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα συμβατικά παράθυρα. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή, καθώς προσφέρουν σημαντική βελτίωση της αίσθησης θερμικής άνεσης των ατόμων και συμβάλλουν στη μείωση του ετήσιου κόστους ενέργειας, που αποτελούν τα πιο σημαντικά κριτήρια επιλογής τύπου παραθύρων. Ταυτόχρονα, μειώνουν τις ετήσιες εκπομπές CO_2 και δεν περιορίζουν για σημαντικό χρονικό διάστημα την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, προσφέροντας παράλληλα στον χρήστη τη δυνατότητα προσαρμογής του χρωματισμού του παραθύρου στις προτιμήσεις του. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης η επίδοση των θερμοχρωμικών παραθύρων δεν κατάφερε να ξεπεράσει τα ήδη υπάρχοντα συμβατικά παράθυρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία πιθανή αιτία που συνέβαλε σε αυτό το αποτέλεσμα είναι η έλλειψη ποικιλίας εμπορικά διαθέσιμων θερμοχρωμικών συστημάτων στην αγορά, που περιόρισε σημαντικά τη δυνατότητα επιλογής ενός κατάλληλου συστήματος που πιθανώς να οδηγούσε σε περισσότερο ευνοϊκά αποτελέσματα.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται προτάσεις για την πιθανή επέκταση και περαιτέρω βελτίωση της μελέτης των έξυπνων παραθύρων με τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων.

Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πέντε ομάδες κριτηρίων για την αξιολόγηση της συνολικής επίδοσης των εναλλακτικών. Συνεπώς, προτείνεται η περαιτέρω επέκταση των κριτηρίων αξιολόγησης, λαμβάνοντας υπόψη ποιοτικούς ή αισθητικούς παράγοντες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απόχρωση των παραθύρων κατά τον χρωματισμό τους, η οποία μπορεί να αλλοιώσει την αντίληψη των χρωμάτων μέσω του παραθύρου και πιθανώς να προδιαθέσει θετικά ή αρνητικά τους χρήστες του χώρου. Μία άλλη πιθανή επέκταση είναι η μελέτη της εφαρμογής αυτών των τύπων έξυπνων παραθύρων σε άλλους τύπους κτιρίων, όπως είναι οι επαγγελματικοί χώροι, όπου τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας αναμένονται αρκετά διαφορετικά ή υπό διαφορετικές

κλιματολογικές συνθήκες (π.χ. σε διαφορετικές περιοχές του ελληνικού χώρου). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των εξεταζόμενων τύπων παραθύρων σε κτίρια με μεγάλο ποσοστό εξωτερικής γυάλινης επιφάνειας, καθώς η επίδραση των υαλοπινάκων στην ενεργειακή συμπεριφορά και τις συνθήκες άνεσης του κτιρίου αναμένεται πιο έντονη. Τέλος, για την πραγματοποίηση των ενεργειακών προσομοιώσεων και την εύρεση των επιδόσεων των εναλλακτικών σε κάθε κριτήριο χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από εμπορικά διαθέσιμα συστήματα παραθύρων. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οδήγησε σε δυσμενή αποτελέσματα στην περίπτωση των θερμοχρωμικών παραθύρων, καθώς προς το παρόν υπάρχει πολύ περιορισμένος αριθμός εμπορικά διαθέσιμων προϊόντων και δεν υπήρχε η δυνατότητα μελέτης ενός συστήματος που πιθανώς να είναι καλύτερα προσαρμοσμένο στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμο η περίπτωση αυτή να επανεξεταστεί στο μέλλον, όταν θα υπάρχουν περισσότερες επιλογές διαθέσιμες στην αγορά.

8. Βιβλιογραφία

[1] Eurostat, Simplified energy balances - annual data, Last update: 08-06-2017.

[2] Commission welcomes final vote on energy performance of buildings. Brussels, 2018.

[3] Άρτεμη Σπανάκη, Υαλοστάσια προηγμένης τεχνολογίας, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης-Σ.Τ.Ε.Φ., Τμήμα μηχανολογίας, Ενεργειακή διαχείριση κτιρίων.

[4] https://www.eurodomica.gr/proionta/yalopinakes/

[5] Rissman J. and Kennan H., Case studies on the government's role in energy technology innovation: Low-Emissivity Windows, American Energy Innovation Council, March 2013 (διαθέσιμο στο: http://americanenergyinnovation.org/wp-content/uploads/2013/03/Case-Low-e-Windows.pdf).

[6] http://glassed.vitroglazings.com/topics/how-Low-e-glass-works/

[7] Allen K., Connelly K., Rutherford P., Wu Y., Smart windows-Dynamic control of building energy performance, Energy and Buildings 139 (2017) 535-546.

[8] Λουλουδάκης Δ., Ανάπτυξη και Μελέτη Καινοτόμων Χρωμικών Επιστρώσεων και Διατάξεων για Εφαρμογή σε «Έξυπνα Παράθυρα», Πανεπιστήμιο Κρήτης, Σχολή θετικών και τεχνολογικών επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Κρήτη, 2016.

[9] Παπαευθυμίου Σπ., Διερεύνηση των φυσικών παραμέτρων λειτουργίας και βελτιστοποίησης ηλεκτροχρωμικών διατάξεων, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2001.

[10] Sbar N.L., Podbelski L., Yang H.M., Pease B., Electrochromic dynamic windows for office buildings, International Journal of Sustainable Built Environment 1 (2012) 125-139.

[11] Συρράκου Ε., Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογίας περιβαλλοντικής αξιολόγησης σε ηλεκτροχρωμικά παράθυρα, Πανεπιστήμιο Πατρών, Εργαστήριο ενέργειας και περιβάλλοντος, Τμήμα Φυσικής, 2005.

[12] Tavares P., Bernardo H., Gaspar A., Martins A., Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in Mediterranean buildings refurbishment, Solar Energy 134 (2016) 236-250.

[13] EN 17037:2018 – Daylight in buildings.

[14] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, Αναλυτικές εθνικές προδιγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης.

[15] EN 12464-1:2011 – Light and lighting – Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.

[16] International Lighting Vocabulary, 2011.

[17] EnergyPlus Version 9.4.0 Documentation, Engineering Reference, U.S. Department of Energy, 2020.

[18] Piccolo A., Simone F., Effect of switchable glazing on discomfort glare from windows. Build. Environ. 44 (2009) 1171–1180.

[19] Παπαδόπουλος Ι., Διερεύνηση συνθηκών θερμικής άνεσης και ποιότητας αέρα σε αίθουσες διδασκαλίας πανεπιστημίου, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Κοζάνη, 2019.

[20] Fanger P.O., Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

[21] EN ISO 7730:2005 – Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and the PPD indices and local thermal comfort criteria.

[22] EN 15251:2007 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.

[23] Schiavon S., Lee K.H., Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. Building and Environment 59 (2013) 250-260.

[24] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010, Thermal environmental conditions for human occupancy.

[25] Φενέρη Α.Μ., Εφαρμογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης στη χωροθέτηση λειτουργιών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Βέροια, 2012.

[26] Keeney R.L., Raiffa H., Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs. Cambridge university press, 1993.

[27] Hwang C. L., Yoon K., Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer, Berlin, 1981.

[28] Opricovic S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2 (1), 5–21.

[29] Opricovic, S., Tzeng G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research 156 (2), 445–455.

[30] Opricovic S., Tzeng G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. European Journal of Operational Research, 178 (2), 514–529.

[31] Saaty T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York.

[32] Naumann F., Data Fusion and Data Quality, Proceedings of the New Techniques and Technologies for Statistics Seminar, Sorrento, Italy, 1998, pp. 147-154.

[33] Roy B., The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, Theory and Decision 31 (1991) 49-73.

[34] Roy B., Multicriteria Methodology for Decision Aiding, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.

[35] Arrow K.J. and Raynaud H., Social Choice and Multicriterion Decision-Making, MIT Press, Cambridge, 1986.

[36] Brans J.P., Vincke P., Mareschal B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European journal of operational research, 24(2), 228-238.

[37] ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019, Energy standard for buildings except low-rise residential buildings.

[38] Atzeri A., Cappelletti F., Gasparella A., Internal versus external shading devices performance in office buildings, Energy Procedia 45 (2014) 463-472.

[39] Sullivan R., Lee E.S., Papamichael K., Rubin M., Selkowitz S., Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows, Proceedings of SPIE International Symposium on Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII, Friedrichsbau, Freiburg, Federal Republic of Germany,1994.

[40] https://loftera.co.uk/

[41] https://www.diydoubleglaze.com.au/

[42] https://www.canstar.com.au/

[43] https://www.homeadvisor.com/

[44] https://modernize.com/

[45] http://e3tnw.org/

[46] https://www.fysikoaerioellados.gr/

[47] https://gr.globalpetrolprices.com/