



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ενεργειακή προσομοίωση θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια

Δέτση Μιχαέλα-Παναγιώτα

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Φούντη Μαρία

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

Περίληψη

Το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα της σύγχρονης εποχής. Τα κτίρια, τόσο του οικιακού όσο και του τριτογενή τομέα, αποτελούν πλέον τον μεγαλύτερο ενεργειακό καταναλωτή και ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους και κυρίως με διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή. Ταυτόχρονα, ο κτιριακός τομέας διαθέτει υψηλό δυναμικό για ενεργειακή εξοικονόμηση. Τα τελευταία χρόνια γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, εξασφαλίζοντας παράλληλα συνθήκες άνεσης για τους ανθρώπους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο σχεδιασμό του κτιριακού κελύφους που θα αξιοποιεί σε βέλτιστο βαθμό τα στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος, προσφέροντας παράλληλα επαρκή θερμομόνωση από τις δυσμενείς κλιματικές συνθήκες.

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.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η εφαρμογή έξι διαφορετικών τύπων υαλοπινάκων σε ένα κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια στην περιοχή της Αθήνας και συγκρίνεται η ενεργειακή τους απόδοση σε σχέση με τους μονούς υαλοπίνακες που συναντώνται ακόμα σε πολλά ελληνικά κτίρια. Κάθε τύπος υαλοπίνακα εξετάζεται ως προς την επίδρασή του στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό, αλλά και ως προς τη μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας, τα θερμικά κέρδη και τις θερμικές απώλειες που επιτρέπει σε μηνιαία και ετήσια βάση. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση της συνολικής επιφάνειας των υαλοπινάκων στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου, η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και η επακόλουθη μείωση των εκπομπών CO₂ για κάθε τύπο υαλοπίνακα.

Ο σχεδιασμός του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού SketchUp 2016 και τη βοήθεια των εργαλείων σχεδίασης του Openstudio που ενσωματώθηκαν σε αυτό. Η ενεργειακή προσομοίωση έγινε με τη χρήση του λογισμικού EnergyPlus, ενώ οι διάφοροι τύποι παραθύρων επιλέχθηκαν από τις βιβλιοθήκες του λογισμικού WINDOW 7.6.

Abstract

The energy saving issue is one of the most pressing problems that concern the global community. Buildings, in both the residential and tertiary sector, constitute nowadays the largest energy consumer and are responsible at a great extent for air pollution, mainly with carbon dioxide (CO₂), that is responsible for the greenhouse effect and climate change. Simultaneously, the building sector has high potential for energy savings. In recent years many important efforts for energy savings in buildings have been made, while also ensuring comfort conditions for the residents. This can be achieved through an appropriate design of a building envelope that will exploit the elements of the external environment to an optimum level, while also providing sufficient thermal insulation from the external weather conditions.

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 the windows with more advanced, high-efficiency windows.

The present study examines the application of six different glazing types in an office building with a large external glazing area in the city of Athens and compares their energy efficiency to the efficiency of single glazing that can still be found in many greek buildings. Each glazing type is examined in terms of its effect on the building's energy needs for heating, cooling and artificial lighting, as well as its solar radiation transmission and its thermal gains and losses on a monthly and yearly basis. The effect of the total glazing area on the building's energy use and the primary energy and CO₂ emissions savings for every glazing type were also studied.

The building envelope design was carried out with the use of the SketchUp 2016 software with the help of an Openstudio plug-in. The energy simulation was carried out through the EnergyPlus software, while the different glazing types were selected from the libraries of the WINDOW 7.6 software.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την καθηγήτρια κα Μαρία Φούντη για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία και για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δόκτορα κ. Γιάννη Μανδηλαρά και τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Άρη Μανωλίτη για τη βοήθειά τους και τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις τους που ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Βεβαίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλα τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης για τη βοήθειά τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα που μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση στον κτιριακό τομέα	1
1.2 Η ελληνική πραγματικότητα	2
1.3 Νομοθεσία σχετικά με την ενεργειακή απόδοση κτιρίων	2
1.3.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία	2
1.3.2 Ελληνική νομοθεσία	3
1.4 Ο ρόλος των παραθύρων στην ενεργειακή εξοικονόμηση	4
2 Στοιχεία μεταφοράς θερμότητας σε υαλοπίνακες	5
2.1 Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας	5
2.2 Μεταφορά θερμότητας σε υαλοπίνακες.....	6
2.2.1 Μεταφορά θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (Temperature driven heat transfer).....	7
2.2.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή	8
2.2.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή	8
2.2.1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.....	9
2.3 Επίδραση των διαστάσεων των υαλοπινάκων-WWR	10
2.4 Θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων.....	11
2.4.1 Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U (U-factor).....	11
2.4.1.1 Περιφερειακά φαινόμενα (edge effects).....	12
2.4.1.2 Πλαίσιο και παραθυρόφυλλα	13
2.4.1.3 Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας	13
2.4.2 Ηλιακό θερμικό κέρδος και διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία	13
2.5 Οπτικές ιδιότητες υαλοπινάκων	16
2.5.1 Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance-VT).....	16
2.5.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance).....	17
2.5.3 Απορροφητικότητα (Absorptance).....	18
2.5.4 Συσχέτιση των οπτικών ιδιοτήτων της επιφάνειας ενός υαλοπίνακα..	19
2.5.5 Εκπομπή (Emittance)	20
3 Τεχνολογίες παραθύρων με σταθερές οπτικές ιδιότητες.....	21
3.1 Απλοί-μονοί υαλοπίνακες.....	21
3.2 Διπλοί υαλοπίνακες	22
3.3 Τριπλοί υαλοπίνακες.....	23

3.4	Επιστρώσεις υαλοπινάκων	23
3.5	Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing)	24
3.5.1	Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον σκοπό χρήσης	26
3.5.2	Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής	27
3.5.3	Ενεργειακή απόδοση	28
3.5.4	Θέσεις τοποθέτησης των επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής	29
3.5.5	Πλεονεκτήματα	30
3.6	Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με πλήρωση αερίων (Gas filled glazing)	30
3.7	Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με κενό αέρος (Vacuum glazing)	31
3.8	Υαλοπίνακες με αεροτζέλ (Aerogel glazing)	32
3.9	Ανακλαστικοί υαλοπίνακες (Reflective glazing)	34
3.10	Υαλοπίνακες με αντιανακλαστικές επιστρώσεις (Anti-reflective coated glazing)	37
3.11	Απορροφητικοί υαλοπίνακες (Heat absorbing glazing)	37
3.12	Έγχρωμοι υαλοπίνακες (Tinted glazing)	38
3.13	Φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες (Photovoltaic glazing)	40
3.14	Υαλοπίνακες με υλικά αλλαγής φάσης (PCM glazing)	41
3.15	Αυτοκαθαριζόμενοι υαλοπίνακες (Self-cleaning glazing)	42
3.16	Πρισματικοί υαλοπίνακες (Prismatic glazing)	42
3.17	Ολογραφικοί υαλοπίνακες (Holographic glazing)	44
3.18	Διαφανή μονωτικά υλικά (TIM-Transparent Insulation Materials)	45
3.19	Υαλοπίνακες με μεμβράνες μεταβλητής διαπερατότητας	46
4	Παράθυρα μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων	47
4.1	Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες (Electrochromic glazing)	47
4.1.1	Αρχή λειτουργίας	48
4.1.2	Σημαντικές ιδιότητες	51
4.1.3	Ανάλυση της δομής ενός ηλεκτροχρωμικού παραθύρου	52
4.1.4	Κατηγοριοποίηση ηλεκτροχρωμικών παραθύρων	54
4.1.4.1	NIR-switching electrochromic glazing (NEC)	55
4.1.4.2	Dual-band electrochromic glazings (DBEC)	55
4.1.4.3	Σύγκριση των παραπάνω διατάξεων	57
4.1.5	Εμπορικά διαθέσιμοι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες και εφαρμογές	58
4.1.6	Στρατηγικές ελέγχου	59
4.1.7	Ενεργειακή απόδοση	60
4.1.8	Αντοχή	61
4.1.9	Κόστος	63

4.1.10	Πλεονεκτήματα.....	63
4.2	Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες (Thermochromic glazing).....	64
4.2.1	Το διοξείδιο του βαναδίου.....	65
4.2.2	Αρχή λειτουργίας.....	66
4.2.3	Ταξινόμηση θερμοχρωμικών υλικών.....	67
4.2.4	Επιθυμητές ιδιότητες.....	68
4.2.5	Ενεργειακή απόδοση.....	69
4.2.6	Εφαρμογές.....	70
4.3	Αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες (Gasochromic glazing).....	70
4.4	Φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες (Photochromic glazing).....	72
4.5	Υαλοστάσια με στοιχεία υγρών κρυστάλλων (Liquid crystal windows-LCWs) 73	
4.6	Συσκευές αιωρούμενων σωματιδίων (Suspended particle devices-SPDs) ..	74
5	Ενεργειακή μοντελοποίηση και προσομοίωση κτιρίων.....	76
5.1	Μέθοδοι προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων.....	76
5.2	Το λογισμικό EnergyPlus.....	77
5.3	Το λογισμικό WINDOW.....	80
5.4	Το λογισμικό SketchUp.....	81
5.5	Μοντελοποίηση και έλεγχος της μεταφοράς θερμότητας στα κτίρια.....	82
5.5.1	Η έννοια της θερμικής ζώνης.....	82
5.5.2	Συστήματα για την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης-Χωρικό φορτίο κτιρίου 83	
6	Διαδικασία κατασκευής του κτιριακού μοντέλου.....	85
6.1	Το υπό μελέτη κτίριο.....	85
6.2	Διαδικασία σχεδιασμού του κτιριακού μοντέλου στο SketchUp 2016.....	86
6.2.1	Διαχωρισμός του κτιρίου σε θερμικές ζώνες.....	86
6.2.2	Σχεδιασμός του κτιριακού κελύφους.....	88
6.2.3	Καθορισμός οριακών συνθηκών στοιχείων κτιριακού κελύφους.....	90
6.3	Καθορισμός των απαραίτητων δεδομένων εισόδου.....	90
6.3.1	Τοποθεσία.....	90
6.3.2	Προγράμματα λειτουργίας.....	91
6.3.3	Σύσταση δομικών στοιχείων κτιρίου.....	93
6.3.4	Υλικά κατασκευής υαλοπινάκων.....	93
6.3.5	Κατασκευή θερμοχρωμικών υαλοπινάκων.....	94
6.3.6	Αέριο διακένου.....	95

6.3.7	Δομή βασικών επιφανειών του κτιριακού κελύφους	95
6.3.8	Έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων.....	99
6.3.9	Φορτία ατόμων.....	99
6.3.10	Φορτία τεχνητού φωτισμού	100
6.3.11	Φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού	101
6.3.12	Εξασφάλιση φυσικού φωτισμού	102
6.3.13	Φορτία ανανέωσης αέρα.....	103
6.3.14	Σύστημα θέρμανσης και ψύξης.....	104
7	Αποτελέσματα ενεργειακής προσομοίωσης.....	106
7.1	Συντελεστής θερμοπερατότητας και ηλιακό θερμικό κέρδος	106
7.2	Όρες χρωματισμού θερμοχρωμικών υαλοπινάκων	108
7.3	Όρες χρωματισμού ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων	109
7.4	Σύγκριση ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων για διάφορους τύπους παραθύρων.....	110
7.4.1	Σύγκριση ετήσιων φορτίων θέρμανσης	110
7.4.2	Σύγκριση ετήσιων φορτίων ψύξης	111
7.4.3	Σύγκριση ετήσιων συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης	112
7.4.4	Σύγκριση ετήσιων φορτίων φωτισμού	113
7.4.5	Μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων	114
7.4.6	Θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων	116
7.4.7	Θερμικές απώλειες μέσω των υαλοπινάκων	117
7.5	Μηνιαία κατανομή φορτίων.....	117
7.5.1	Φορτία θέρμανσης	117
7.5.2	Φορτία ψύξης	119
7.5.3	Συνολικά φορτία συστημάτων θέρμανσης και ψύξης	119
7.5.4	Φορτία φωτισμού	120
7.5.5	Θερμικά φορτία ατόμων και ηλεκτρικού εξοπλισμού	121
7.5.6	Μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων	123
7.5.7	Θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων	123
7.5.8	Θερμικές απώλειες μέσω των υαλοπινάκων	125
7.6	Σύγκριση ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων για διάφορες τιμές WWR...	126
7.7	Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και μείωση εκπομπών CO ₂	131
8	Συμπεράσματα.....	133

8.1	Συμπεράσματα ενεργειακής προσομοίωσης υαλοπινάκων	133
8.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	135
9	Βιβλιογραφία	137
9.1	Ελληνική	137
9.2	Ξενόγλωσση	138

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 6.1:	Βασικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας	91
Πίνακας 6.2:	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των επί μέρους δομικών στοιχείων για την κλιματική ζώνη Β σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτιρίου	96
Πίνακας 6.3:	Τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων υλικού των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους	97
Πίνακας 6.4:	Τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων υλικού των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους που υπολογίστηκαν από το EnergyPlus	98
Πίνακας 6.5:	Εκλυόμενη θερμότητα από άτομα	100
Πίνακας 6.6:	Στάθμη γενικού φωτισμού κτιρίου αναφοράς σύμφωνα με το EN 12464-1 2011	100
Πίνακας 6.7:	Εκτιμώμενη θερμική ισχύς ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού....	101
Πίνακας 6.8:	Απαιτούμενος νωπός αέρας (για χώρους μη καπνιζόντων)	103
Πίνακας 7.1:	Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας, ηλιακού θερμικού κέρδους και διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων	106
Πίνακας 7.2:	Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας, ηλιακού θερμικού κέρδους και διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία για τις διαφορετικές καταστάσεις των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων	107
Πίνακας 7.3:	Ώρες χρωματισμού θερμοχρωμικών υαλοπινάκων ανάλογα με τον προσανατολισμό.....	108
Πίνακας 7.4:	Ώρες χρωματισμού ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων ανάλογα με τον προσανατολισμό.....	109
Πίνακας 7.5:	Αριθμητικά αποτελέσματα των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τις τρεις διαφορετικές τιμές WWR	130
Πίνακας 7.6:	Ετήσιες απαιτήσεις πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου και ετήσια εξοικονόμηση εκπομπών CO ₂ για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων	132

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εγχώρια κατανάλωση ενέργειας για το έτος 2012	1
Σχήμα 2.1: Η ανάκλαση (reflection), απορρόφηση (absorption) και διάβαση (transmission) της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός υαλοπίνακα.....	15
Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής	26
Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση της πυρολυτικής διαδικασίας για την κατασκευή γυαλιού χαμηλής εκπομπής	27
Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση της διαδικασίας MSVD για την κατασκευή γυαλιού χαμηλής εκπομπής	28
Σχήμα 3.4: Υαλοπίνακας με αεροτζέλ που έχει ενσωματωθεί στην πρόσοψη του κτιρίου της ZAE στο Wurzburg.....	32
Σχήμα 3.5: Η εσωτερική δομή του μονολιθικού αεροτζέλ	33
Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της δομής διπλού υαλοπίνακα με κοκκώδες αεροτζέλ.....	34
Σχήμα 3.7: Παραδείγματα ανακλαστικών υαλοπινάκων με διαφορετικούς χρωματισμούς.....	35
Σχήμα 3.8: Σύγκριση της συμπεριφοράς ενός ανακλαστικού διπλού υαλοπίνακα (δεξιά) με έναν συμβατικό διαφανή (αριστερά).....	36
Σχήμα 3.9: Παράδειγμα εφαρμογής υαλοπινάκων με αντιανακλαστικές επιστρώσεις	37
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα διαθέσιμων στο εμπόριο πράσινων υαλοπινάκων	39
Σχήμα 3.11: Παράδειγμα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων σε κτίριο ...	40
Σχήμα 3.12: Αλλαγή φάσης στον υαλοπίνακα με υλικό αλλαγής φάσης GlassX Crystal	41
Σχήμα 3.13: Αλλαγή της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε πρισματικό υαλοπίνακα (αριστερά) και παράδειγμα πρισματικού γυαλιού (δεξιά)	43
Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των πρισματικών στοιχείων	43
Σχήμα 3.15: Σχηματική αναπαράσταση των διάφορων τύπων διαφανών μονωτικών υλικών	45
Σχήμα 4.1: Η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας και η ροή θερμότητας σε ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο	48
Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας μίας τυπικής ηλεκτροχρωμικής συσκευής.....	50
Σχήμα 4.3: Ηλεκτροχρωμικό φιλμ από WO ₃ πριν (αριστερά) και μετά τον χρωματισμό (δεξιά)	51
Σχήμα 4.4: Μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων και πιθανές μεταβάσεις κάθε κατάστασης για έναν υαλοπίνακα DBEC.....	56
Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός DBEC υαλοπίνακα στις τρεις διαφορετικές του καταστάσεις	57

Σχήμα 4.6: Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες στην αδιαφανή (αριστερά) και τη διάφανη (δεξιά) τους κατάσταση	58
Σχήμα 4.7: Εφαρμογή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων E-Control της Pilkington σε κτίριο γραφείων.....	59
Σχήμα 4.8: Η συμπεριφορά ενός θερμοχρωμικού παραθύρου.....	65
Σχήμα 4.9: Καμπύλη μεταβολής της διαπερατότητας συναρτήσεως του μήκους κύματος πριν και μετά τη θερμοκρασία μετάβασης επίστρωσης VO ₂ (αριστερά), τυπική μορφή της καμπύλης υστέρησης μίας θερμοχρωμικής επίστρωσης (δεξιά)	66
Σχήμα 4.10: Η δομή ενός αεριοχρωμικού υαλοπίνακα	71
Σχήμα 4.11: Παράθυρα με στοιχεία υγρών κρυστάλλων στη διαφανή (αριστερά) και αδιαφανή (δεξιά) τους κατάσταση	73
Σχήμα 4.12: Δομή και λειτουργία ενός παραθύρου υγρών κρυστάλλων.....	74
Σχήμα 4.13: Δομή και λειτουργία ενός παραθύρου αιωρούμενων σωματιδίων	75
Σχήμα 5.1: Παράδειγμα σχεδιασμού ενός συστήματος παραθύρου στο περιβάλλον του WINDOW	80
Σχήμα 5.2: Τα εργαλεία που προσφέρει στο σχεδιαστικό περιβάλλον του SketchUp το Openstudio 1.13.0 plug-in	81
Σχήμα 5.3: Η μεταφορά ενέργειας στο εσωτερικό ενός κτιρίου με τη βοήθεια ενός συστήματος HVAC.....	84
Σχήμα 6.1: Το Urban Glass House στη Νέα Υόρκη.....	85
Σχήμα 6.2: Το κτιριακό μοντέλο που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SketchUp	85
Σχήμα 6.3: Οι πέντε θερμικές ζώνες του υπό μελέτη κτιρίου.....	86
Σχήμα 6.4: Η νότια (αριστερά) και βόρεια (δεξιά) θερμική ζώνη	87
Σχήμα 6.5: Η ανατολική (αριστερά) και δυτική (δεξιά) θερμική ζώνη	87
Σχήμα 6.6: Η κεντρική θερμική ζώνη στο συνολικό κτίριο (αριστερά) και χωρίς τις υπόλοιπες ζώνες (δεξιά).....	87
Σχήμα 6.7: Κάτοψη του πρώτου και δεύτερου ορόφου	88
Σχήμα 6.8: Κάτοψη του τρίτου και τέταρτου ορόφου	88
Σχήμα 6.9: Κάτοψη του πέμπτου ορόφου.....	89
Σχήμα 6.10: Κάτοψη του έκτου ορόφου	89
Σχήμα 6.11: Ρυθμίσεις τοποθεσίας στο EnergyPlus.....	91
Σχήμα 6.12: Πρόγραμμα λειτουργίας του φωτισμού και του ηλεκτρικού εξοπλισμού	91
Σχήμα 6.13: Πρόγραμμα παρουσίας ατόμων στο εσωτερικό του κτιρίου	92
Σχήμα 6.14: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων στο EnergyPlus	93
Σχήμα 6.15: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών των στρώσεων γυαλιού των παραθύρων στο EnergyPlus	94
Σχήμα 6.16: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών του θερμοχρωμικού στρώματος γυαλιού στο EnergyPlus	94

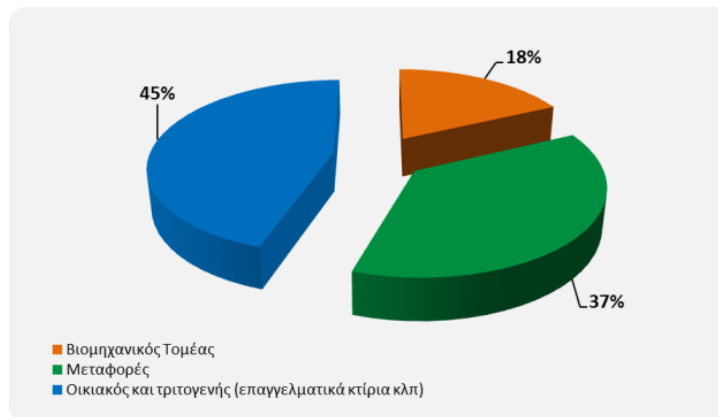
Σχήμα 6.17: Ρυθμίσεις αερίων διακένου στο EnergyPlus	95
Σχήμα 6.18: Ρυθμίσεις των στρωμάτων υλικού των επιφανειών του κτιριακού κελύφους στο EnergyPlus	98
Σχήμα 6.19: Ρυθμίσεις για τον έλεγχο του χρωματισμού των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων στο EnergyPlus	99
Σχήμα 6.20: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία ατόμων στο EnergyPlus	100
Σχήμα 6.21: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία τεχνητού φωτισμού στο EnergyPlus	101
Σχήμα 6.22: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού στο EnergyPlus ..	102
Σχήμα 6.23: Οι ρυθμίσεις για τον έλεγχο των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο EnergyPlus.....	103
Σχήμα 6.24: Οι ρυθμίσεις για τις συντεταγμένες των σημείων αναφοράς φυσικού φωτισμού στο EnergyPlus.....	103
Σχήμα 6.25: : Οι ρυθμίσεις για την ανανέωση αέρα στο περιβάλλον του EnergyPlus	104
Σχήμα 6.26: : Οι ρυθμίσεις του θερμοστάτη στο περιβάλλον του EnergyPlus.....	104
Σχήμα 6.27: Οι ρυθμίσεις των ιδανικών συστημάτων HVAC στο περιβάλλον του EnergyPlus.....	105
Σχήμα 7.1: Σύγκριση των ετήσιων φορτίων θέρμανσης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων	110
Σχήμα 7.2: Σύγκριση των ετήσιων φορτίων ψύξης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων	112
Σχήμα 7.3: Σύγκριση των ετησίων συνολικών φορτίων των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων	113
Σχήμα 7.4: Σύγκριση των ετήσιων απαιτήσεων φωτισμού για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων	114
Σχήμα 7.5: Συνολική ετήσια μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα.....	115
Σχήμα 7.6: Συνολικά ετήσια θερμικά κέρδη μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα.....	116
Σχήμα 7.7: Συνολικές ετήσιες θερμικές απώλειες μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα.....	117
Σχήμα 7.8: Μηνιαία κατανομή των φορτίων θέρμανσης του κτιρίου	118
Σχήμα 7.9: Μηνιαία κατανομή των φορτίων ψύξης του κτιρίου.....	119
Σχήμα 7.10: Μηνιαία κατανομή των συνολικών φορτίων των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου.....	120
Σχήμα 7.11: Μηνιαία κατανομή της ηλεκτρικής κατανάλωσης λόγω του τεχνητού φωτισμού του κτιρίου	121
Σχήμα 7.12: Μηνιαία κατανομή των θερμικών φορτίων ατόμων	122
Σχήμα 7.13: Μηνιαία κατανομή των θερμικών φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού ..	122
Σχήμα 7.14: Μηνιαία κατανομή της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα	123

Σχήμα 7.15: Μηνιαία κατανομή του θερμικού κέρδους μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα.....	124
Σχήμα 7.16: Μηνιαία κατανομή των θερμικών απωλειών μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα.....	125
Σχήμα 7.17: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους μονούς υαλοπίνακες.	127
Σχήμα 7.18: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους διπλούς υαλοπίνακες	127
Σχήμα 7.19: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους διπλούς low-e υαλοπίνακες	128
Σχήμα 7.20: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς υαλοπίνακες	128
Σχήμα 7.21: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες	128
Σχήμα 7.22: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες.....	129
Σχήμα 7.23: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες.....	129

1 Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση στον κτιριακό τομέα

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρήθηκε μία σημαντική ενίσχυση της ευαισθητοποίησης του κοινού αναφορικά με τη σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας και της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος για την υγεία και την άνεση των κατοίκων. Τα κτίρια, τόσο του οικιακού όσο και του τριτογενή τομέα, παίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη τόσο των εθνικών, όσο και των ευρωπαϊκών στόχων. Σύμφωνα με το άρθρο 4 της οδηγίας 27/2012/ΕΕ του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ο κτιριακός τομέας αντιπροσώπευε το 45% της εγχώριας κατανάλωσης ενέργειας για το έτος 2012. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η κατανάλωση ενέργειας στα πλαίσια των κτιρίων αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 40% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας.



Σχήμα 1.1: Εγχώρια κατανάλωση ενέργειας για το έτος 2012

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προέρχονται από την ενεργειακή κατανάλωση σε κτίρια αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Συνεπώς, η εξοικονόμηση ενέργειας θα πρέπει να αποτελεί το επίκεντρο τόσο των ενεργειακών πολιτικών, όσο και των αποφάσεων που λαμβάνονται αναφορικά με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των σύγχρονων κτιρίων. Σε μία τυπική σύγχρονη κατοικία η θέρμανση, η ψύξη, ο φωτισμός και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης συμβάλλουν στο 60% περίπου της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Παράλληλα, παρότι ένα εμπορικό κτίριο απαιτεί κατά κανόνα λιγότερη θέρμανση, οι αντίστοιχες ανάγκες του σε ψύξη και φωτισμό είναι κατά 15 % περίπου μεγαλύτερες [1], [2].

1.2 Η ελληνική πραγματικότητα

Ο ελληνικός κτιριακός τομέας παρουσιάζει έντονο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω χρήσης πρωτογενών υλών, κατανάλωσης φυσικών πόρων και παραγωγής ρύπων και αποβλήτων. Τα ελληνικά κτίρια χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερος ενεργοβόρος κυρίως λόγω της παλαιότητάς τους και της μη ενσωμάτωσης σε αυτά των σύγχρονων τεχνολογιών. Τα περισσότερα παρουσιάζουν προβλήματα όπως:

- Μερική ή παντελή έλλειψη θερμομόνωσης. Η πλειοψηφία των κτιρίων έχουν κατασκευαστεί πριν από το έτος 1980, και γι' αυτό περιλαμβάνουν ελλιπή ή και καθόλου θερμομονωτική προστασία και ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις με χαμηλές αποδόσεις. Δίνοντας έμφαση στα κτίρια με χρήση κατοικίας, το αντίστοιχο ποσοστό είναι 55% και υποδηλώνει την επιτακτική ανάγκη για την ενεργειακή αναβάθμισή τους
- Παλαιάς τεχνολογίας κουφώματα
- Ελλιπή ηλιοπροστασία των νότιων και δυτικών όψεών τους
- Ανεπαρκή αξιοποίηση του υψηλού ηλιακού δυναμικού της χώρας
- Ανεπαρκή συντήρηση των συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού με αποτέλεσμα τη χαμηλή τους απόδοση [3].

Βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων είναι εφικτή η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας κατά 5% έως 6%, αλλά και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 5%. Εκτιμάται ότι η νέα γενιά κτιρίων μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση κατά μέσο όρο από 20% έως και 50% μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλων σχεδιαστικών παρεμβάσεων στο κτιριακό κέλυφος.

1.3 Νομοθεσία σχετικά με την ενεργειακή απόδοση κτιρίων

1.3.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία

Για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα καθοριστικός είναι ο ρόλος της εγχώριας, ευρωπαϊκής και παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής. Στις 16 Δεκεμβρίου του 2002 εκδόθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ε.Ε η Οδηγία 2002/91/ΕΚ αναφορικά με την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, με την οποία θα έπρεπε να συμμορφωθούν τα κράτη μέλη μέχρι τον Ιανουάριο του 2006. Η οδηγία αυτή περιλάμβανε τις απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση, την ψύξη, τον φωτισμό και τη χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος στα κτίρια. Επίσης προέβλεπε τον έλεγχο της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων που θα συνοδευόταν από την έκδοση αντίστοιχου πιστοποιητικού. Η οδηγία αναδιατυπώθηκε στις 19 Μαΐου του 2010 ως Οδηγία 2010/31/ΕΕ, η οποία αποτελεί

και την κύρια υπάρχουσα νομοθετική πράξη σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Η οδηγία αυτή λαμβάνει υπόψη διάφορες κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες, θέτει μια κοινή μεθοδολογία και καθορίζει εκ νέου τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, ψύξη, ανανέωση αέρα και φωτισμό. Ακόμα περιλαμβάνει και ορισμένους μακροπρόθεσμους στόχους, όπως είναι η δημιουργία κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nearly Zero-Energy Buildings-nZEB). Βάσει του άρθρου 2 της κοινοτικής Οδηγίας 2010/31/ΕΕ, ως κτίριο με σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση ορίζεται ένα κτίριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση του οποίου η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, καλύπτεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου.

Τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nZEB) διαθέτουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Δομικά στοιχεία υψηλών ενεργειακών προδιαγραφών
- Ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις ιδιαίτερα υψηλής ενεργειακής απόδοσης
- Ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής τους κατανάλωσης καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε τοπικό επίπεδο

Τα κράτη-μέλη οφείλουν να καταρτίσουν εθνικά σχέδια για την αύξηση του αριθμού των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nZEB), τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικούς στόχους ανάλογα με την κατηγορία του κτιρίου. Επίσης, τα κράτη-μέλη οφείλουν να αναπτύσσουν πολιτικές και να λαμβάνουν μέτρα που θα ενθαρρύνουν τη μετατροπή των κτιρίων σε κτίρια nZEB. Τέλος, τα υπάρχοντα κτίρια που υφίστανται ανακαίνιση σε μεγάλη κλίμακα θα πρέπει να αναβαθμίζουν την ενεργειακή τους απόδοση σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

1.3.2 Ελληνική νομοθεσία

Στην Ελλάδα, η πρώτη ουσιαστική προσπάθεια που σημειώθηκε για την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα έγινε το 1979 μέσω του Κανονισμού Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΦΕΚ 362Δ/1979) που εφαρμόστηκε για τη χρονική περίοδο 1979-2010 χωρίς τροποποιήσεις. Ένα θετικό αποτέλεσμα της εφαρμογής του κανονισμού αυτού αποτέλεσε η καθιέρωση της χρήσης διπλών υαλοπινάκων σε νέα κτίρια, με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεών του. Για την εναρμόνιση με την Κοινοτική Οδηγία 2002/91/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκδόθηκε ο ν. 3661/2008 (ΦΕΚ Α' 89) στις 19 Μαΐου του 2008. Ο νόμος αυτός προέβλεπε την υποχρεωτική έκδοση του «Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων» (Κ.Εν.Α.Κ.), ο οποίος θα

έπρεπε μεταξύ άλλων να προσδιορίζει τις ελάχιστες τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των νέων και των ριζικά ανακαινιζόμενων κτιρίων, καθώς και την προβλεπόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Ο Κ.Εν.Α.Κ. αντικατέστησε τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων το 2010.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή του Κ.Εν.Α.Κ. το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ) κατάρτισε σε συνεργασία με την πολιτεία τις απαραίτητες Τεχνικές Οδηγίες (ΤΟΤΕΕ) αναφορικά με τις μελέτες και τις επιθεωρήσεις της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, με βάση τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα. Επίσης ανέπτυξε κατάλληλο λογισμικό (ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ) για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης, την κατάταξη των κτιρίων στην κατάλληλη κατηγορία ενεργειακής απόδοσης (Α+, Α, Β+, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ και Η), τις μελέτες ενεργειακής απόδοσης και τις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων.

1.4 Ο ρόλος των παραθύρων στην ενεργειακή εξοικονόμηση

Τα παράθυρα αποτελούν ένα πολύ κρίσιμο στοιχείο κάθε κτιρίου, καθώς προσφέρουν φυσικό φωτισμό και αερισμό των εσωτερικών χώρων, καθώς και οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Κατά συνέπεια, τα παράθυρα είναι αναπόσπαστο κομμάτι κάθε κατασκευής, η οποία πρέπει να έχει ένα δίαυλο επικοινωνίας με το εξωτερικό περιβάλλον. Ωστόσο, από ενεργειακή άποψη αποτελούν ένα αδύναμο σημείο του κτιριακού κελύφους, αφού περίπου το 60 % των ενεργειακών απωλειών προκαλείται από τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή διαμέσου των παραθύρων, οδηγώντας σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη [14].

Χάρη στην ευκολία ως προς την αντικατάστασή τους και το σχετικά μικρό κόστος προκύπτει ότι η απλούστερη και πιο αποδοτική από ενεργειακή άποψη παρέμβαση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα υπάρχον κτίριο με σκοπό την ενεργειακή του αναβάθμιση είναι η αντικατάσταση των υαλοπινάκων του με άλλους, πιο σύγχρονους που θα παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες. Συνεπώς, είναι επιτακτική η ανάγκη χρήσης υαλοστασίων προηγμένης τεχνολογίας, τα οποία θα αξιοποιούν σε βέλτιστο επίπεδο τις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης στον εσωτερικό χώρο. Η κατάλληλη επιλογή και ο σχεδιασμός ενός βελτιστοποιημένου συστήματος παραθύρων είναι αναγκαία για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και της θερμικής άνεσης των κατοίκων τους.

2 Στοιχεία μεταφοράς θερμότητας σε υαλοπίνακες

Η μετάδοση θερμότητας είναι ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο οι περιβαλλοντικές μεταβολές εκδηλώνονται στο εσωτερικό των κτιρίων. Η αγωγή της θερμότητας από το περίβλημα ενός κτιρίου, η άμεση μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα παράθυρα, αλλά και η απορρόφηση αυτής της ακτινοβολίας από τα εκτεθειμένα στοιχεία ενός κτιρίου (τοίχοι, οροφή) και η αίσθηση ψύχους των ατόμων λόγω της έντονης κυκλοφορίας του αέρα είναι παραδείγματα της επίδρασης της μεταφοράς θερμότητας στη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων και τους χρήστες τους. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί κυρίως η μεταφορά θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων ενός κτιρίου και οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων που επηρεάζουν αυτή τη μεταφορά θερμότητας.

2.1 Μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διακριτούς τρόπους:

- αγωγιμότητα ή αγωγή (conduction)
- συναγωγιμότητα ή συναγωγή (convection) και
- ακτινοβολία (radiation)

Ως θερμική αγωγιμότητα (thermal conduction) ορίζεται ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός υλικού μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία) λόγω της φυσικής επαφής. Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, που παρουσιάζουν χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα καθαρώς μεταλλικά στερεά. Το πιο κλασικό παράδειγμα ροής θερμότητας με αγωγή είναι οι θερμικές απώλειες από τις αδιαφανείς επιφάνειες των κτιρίων το χειμώνα. Υπάρχει επίσης μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της έννοιας της θερμικής αγωγιμότητας και αυτής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά. Ροές λόγω θερμικής αγωγιμότητας συμβαίνουν στην κατεύθυνση της μείωσης της θερμοκρασίας, ενώ αντίστοιχα η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξελίσσεται από σημεία υψηλού σε σημεία χαμηλού δυναμικού.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι αποτέλεσμα των μεγαλύτερης κλίμακας κινήσεων ενός ρευστού, είτε αυτό είναι υγρό ή αέριο. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή. Για παράδειγμα, απώλεια θερμότητας με συναγωγή παρουσιάζεται όταν κρύος άνεμος φυσά πάνω από το δέρμα ενός ανθρώπου και αφαιρεί θερμότητα από αυτό.

Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι η μεταφορά ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Για τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτείται κανένα υλικό μέσο. Η μόνη προϋπόθεση είναι η παρουσία δύο επιφανειών σε διαφορετική θερμοκρασία. Η ενέργεια που μεταφέρεται από τον ήλιο στη Γη είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας [4].

2.2 Μεταφορά θερμότητας σε υαλοπίνακες

Η συνολική ροή ενέργειας μέσω ενός υαλοπίνακα αποτελεί συνάρτηση των ακόλουθων τριών βασικών παραγόντων:

- **Μεταφορά θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (Temperature driven heat transfer):** Η ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον οδηγεί στη μεταφορά θερμότητας από ή προς το εσωτερικό του κτιρίου μέσω ενός υαλοπίνακα εξαιτίας της συνδυασμένης επίδρασης των φαινομένων αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται μέσω του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-factor) του υαλοστασίου.
- **Ηλιακό κέρδος (solar gain):** Ανεξάρτητα από την εξωτερική θερμοκρασία, μπορούν να υπάρξουν θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων λόγω άμεσης ή διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Το μέγεθος του θερμικού κέρδους εκφράζεται από τον συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (Solar Heat Gain Coefficient-SHGC) του υαλοπίνακα.
- **Διείσδυση αέρα (Infiltration):** Θερμικές απώλειες ή θερμικά κέρδη μπορούν επίσης να παρουσιαστούν εξαιτίας πιθανής διείσδυσης αέρα μέσα από χαραμάδες στο σύστημα του παραθύρου. Το φαινόμενο αυτό μετράται ανάλογα με την παροχή αέρα που περνά μέσα από μία συγκεκριμένη επιφάνεια του παραθύρου με δεδομένες συνθήκες πίεσης. Στην πραγματικότητα, η διείσδυση αέρα ποικίλλει ανάλογα με τις μεταβολές στην πίεση που προκαλούνται από μεταβολές του αέρα ή της θερμοκρασίας. Η διείσδυση αέρα συνεισφέρει ακόμα στα ψυκτικά φορτία του καλοκαιριού σε ορισμένα κλίματα, καθώς αυξάνει το εσωτερικό επίπεδο υγρασίας.

Αν δε ληφθεί υπόψιν η μεταβολή της υγρασίας και η διείσδυση αέρα, σύμφωνα με τον οδηγό της ASHRAE, η ροή ενέργειας μέσω ενός υαλοπίνακα υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης [15]:

$$q = U \cdot A_{pf} \cdot (T_{out} - T_{in}) + (SHGC \cdot A_{pf} \cdot E_t)$$

Όπου:

q = η στιγμιαία θερμοροή σε W

U = ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (U-factor) σε $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

T_{in} = η εσωτερική θερμοκρασία αέρα σε $^{\circ}C$

T_{out} = η εξωτερική θερμοκρασία αέρα σε $^{\circ}C$

A_{pf} = η συνολική προβαλλόμενη επιφάνεια υαλοπίνακα σε m^2

SHGC = ο συνολικός συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους, ο οποίος είναι αδιάστατος

E_t = η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε $\frac{W}{m^2}$

Η παραπάνω εξίσωση αποδεικνύει ότι οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας U και του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους SHGC αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη θερμορροή μέσω ενός παραθύρου. Οι συντελεστές αυτοί θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

2.2.1 Μεταφορά θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (Temperature driven heat transfer)

Η θερμότητα ρέει πάντα από τα σώματα υψηλότερης προς τα σώματα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Συνεπώς, κατά τους χειμερινούς μήνες η θερμότητα ρέει από το εσωτερικό του κτιρίου προς το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ ακολουθεί αντίστροφη πορεία κατά τους θερινούς μήνες που η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη. Οι θερμικές απώλειες και τα θερμικά κέρδη των υαλοπινάκων που οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον προκύπτουν από τα τρία βασικά μοντέλα μεταφοράς θερμότητας:

1. Μεταφορά θερμότητας με αγωγή παρουσιάζεται όταν η θερμότητα μεταφέρεται μέσω στερεών υλικών, τα οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι υαλοπίνακες, τα διαχωριστικά και τα στοιχεία του πλαισίου
2. Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή εμφανίζεται στην περίπτωση που η θερμότητα μεταφέρεται μέσω της κίνησης ενός ρευστού (δηλαδή αερίου ή υγρού). Συναγωγή παρατηρείται μεταξύ του παραθύρου και των εσωτερικών και εξωτερικών στρωμάτων αέρα, καθώς και στα διάκενα αέρα στο εσωτερικό των παραθύρων
3. Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία παρουσιάζεται μεταξύ των υαλοπινάκων των παραθύρων ή ανάμεσα στο παράθυρο και τον εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο.

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τα στρώματα του παραθύρου συνεισφέρει στη μεταφορά θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία που μεταδίδεται μέσω του υαλοστασίου είναι ανεξάρτητη από αυτή. Η

απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνεται στο ηλιακό θερμικό κέρδος (SHGC) και εν μέρει επανεκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο [16].

2.2.1.1 Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Συγκριτικά με έναν καλά μονωμένο τοίχο, η μεταφορά θερμότητας μέσω ενός τυπικού παλιότερου υαλοπίνακα είναι γενικά αρκετά μεγαλύτερη. Ένας μονός υαλοπίνακας παρουσιάζει πολύ μικρές μονωτικές ιδιότητες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της μόνωσης προέρχεται από το στρώμα αέρα σε κάθε πλευρά του γυαλιού. Ένα υαλοστάσιο αυτού του είδους, που ουσιαστικά επιτρέπει στη θερμότητα να ρέει εκτός του χώρου σχεδόν ανεμπόδιστα, οδηγεί σε πολύ μεγάλες θερμικές απώλειες, ενώ ο ρυθμός απώλειας θερμότητας είναι περίπου δέκα με είκοσι φορές μεγαλύτερος από αυτόν του τοίχου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι για εξωτερική θερμοκρασία $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εσωτερική θερμοκρασία $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, η θερμοκρασία του γυαλιού του μονού υαλοπίνακα στη μόνιμη κατάσταση θα είναι περίπου $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή θα είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να δημιουργηθεί πάγος στην εσωτερική πλευρά του γυαλιού.

2.2.1.2 Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

Η συναγωγή επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας σε πολλά σημεία της κατασκευής: στην επιφάνεια του γυαλιού προς τον εσωτερικό χώρο ή το εξωτερικό περιβάλλον, σε κενά των κουφωμάτων, αλλά και στα διάκενα αέρα στο εσωτερικό των παραθύρων. Αν η επιφάνεια του παραθύρου προς τον εσωτερικό χώρο έχει χαμηλή θερμοκρασία, τότε ψύχει τα γειτονικά στρώματα αέρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητάς τους. Με αυτόν τον τρόπο, τα ψυχρότερα στρώματα αέρα κινούνται προς το πάτωμα, καθώς αντικαθίστανται με θερμότερα στρώματα αέρα και δημιουργούν ένα ρεύμα θερμότητας. Η κατάσταση αυτή μπορεί να αποφευχθεί μέσω της εγκατάστασης ενός παραθύρου με μεγαλύτερη μόνωση που θα εξασφαλίζει υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια του γυαλιού.

Από την εξωτερική πλευρά του παραθύρου, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας επηρεάζεται από το στρώμα αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του παραθύρου. Καθώς ο άνεμος φυσά κατά μήκος της επιφάνειας του παραθύρου, προκαλώντας μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, η μονωτική ικανότητα του αέρα μειώνεται, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς απώλειας θερμότητας. Τέλος, όταν υπάρχει διάκενο αέρα μεταξύ των υαλοπινάκων ενός παραθύρου, τα δημιουργούμενα ρεύματα συναγωγής διευκολύνουν τη μεταφορά θερμότητας. Ρυθμίζοντας κατάλληλα την απόσταση μεταξύ των υαλοπινάκων και επιλέγοντας ένα αέριο με καλύτερες μονωτικές ικανότητες από τον αέρα οι διπλοί υαλοπίνακες μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις αντίστοιχες απώλειες [16].

2.2.1.3 Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις, η ποσότητα της οποίας αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του σώματος. Έτσι, στην περίπτωση δύο σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες, παρότι και τα δύο σώματα εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η καθαρή ροή ακτινοβολίας μεταξύ τους κατευθύνεται πάντα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα.

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κτίριο εξαρτάται κυρίως από τη θέση, το μέγεθος, το σχήμα και το είδος των υαλοπινάκων. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια των κτιρίων και μέσω των ανοιγμάτων του κτιριακού κελύφους περνά στους εσωτερικούς χώρους. Οι τοίχοι, το δάπεδο, αλλά και τα έπιπλα των εσωτερικών χώρων θερμαίνονται, καθώς απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας αυτής. Στη συνέχεια αποβάλλουν τη θερμότητα αυτή με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Οι υαλοπίνακες, οι οποίοι είναι συνήθως αδιαφανείς σε ακτινοβολίες με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 3 μm, δεν επιτρέπουν στη θερμική ακτινοβολία να τους διαπεράσει, με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό της στο εσωτερικό του κτιρίου. Η θερμότητα στη συνέχεια απορροφάται και από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία και μεταφέρεται στον εσωτερικό αέρα με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία του χώρου. Η κατάσταση αυτή είναι γενικά επιθυμητή κατά τη διάρκεια των ψυχρών περιόδων του έτους, ωστόσο δημιουργεί προβλήματα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, αλλά και σε άλλες περιπτώσεις όπως, για παράδειγμα, σε κοινόχρηστα κτίρια στα οποία ο μεγάλος αριθμός εργαζομένων, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός και τα φώτα σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία προκαλούν υπερθέρμανση των χώρων.

Η ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται σημαντικά από τον προσανατολισμό των ανοιγμάτων. Τα νότια ανοίγματα δέχονται το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας τους χειμερινούς μήνες για κτίρια που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο. Αντίθετα, τους θερινούς μήνες, καθώς οι κατακόρυφες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό δέχονται ηλιακή ακτινοβολία για λίγες ώρες και με μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με τη χρήση κατάλληλων οριζόντιων σκιάστρων. Τα βόρεια ανοίγματα συμβάλλουν στην καλύτερη ποιότητα φωτισμού σε κτίρια που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο, διότι δέχονται κυρίως διάχυτη και όχι άμεση ακτινοβολία. Συνεπώς είναι βοηθητικά το καλοκαίρι, ωστόσο συνιστάται να έχουν περιορισμένη επιφάνεια, καθώς οδηγούν σε μεγάλες θερμικές απώλειες και ελάχιστα κέρδη τον χειμώνα. Τα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα παρουσιάζουν τη χειρότερη συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και δέχονται μεγάλα ποσά ακτινοβολίας το καλοκαίρι. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι απαραίτητα για λόγους φωτισμού ή θέας. Κατά την ανατολή και τη δύση του ο ήλιος κινείται χαμηλά στον ορίζοντα, με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να παρουσιάζει μικρές

γωνίες πρόσπτωσης και να εισχωρεί βαθιά στο εσωτερικό του κτιρίου. Τα ανοίγματα με δυτικό προσανατολισμό παρουσιάζουν ιδιαίτερα δυσμενή συμπεριφορά τους θερινούς μήνες, καθώς δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μετά το μεσημέρι. Ταυτόχρονα, τις ώρες αυτές εμφανίζονται και άλλα φορτία λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση του αναγκαίου ψυκτικού φορτίου. Γι' αυτούς τους λόγους συνιστάται σκίαση για τα ανατολικά και τα δυτικά ανοίγματα, η οποία είναι συνήθως εξωτερική και κατακόρυφου τύπου. Γενικά, τα δυτικά ανοίγματα θεωρούνται τα περισσότερο κρίσιμα κατά την προσπάθεια ελέγχου της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

2.3 Επίδραση των διαστάσεων των υαλοπινάκων-WWR

Οι διαστάσεις ενός υαλοπίνακα αποτελούν επίσης έναν καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει τον φωτισμό και το βάθος εισχώρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Με αύξηση της αναλογίας ύψους/πλάτος ενός υαλοπίνακα εξασφαλίζεται μεγαλύτερη διεισδυτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, ωστόσο παράλληλα περιορίζεται η θέα. Αντίθετα, σε υαλοπίνακες με μικρότερες αναλογίες ύψους/πλάτος περιορίζεται η διεισδυτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, όμως εξασφαλίζεται πιο ομοιόμορφος φωτισμός. Αναφορικά με το εμβαδόν των υαλοπινάκων ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά και επηρεάζει την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου είναι ο λόγος του συνολικού εμβαδού των υαλοπινάκων προς το συνολικό εμβαδόν εξωτερικών τοίχων, που αναφέρεται ως Window-to-Wall Ratio (WWR).

Για τον υπολογισμό της συνολικής επιφάνειας εξωτερικών τοίχων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνολική επιφάνεια που διαχωρίζει το εξωτερικό περιβάλλον από το εσωτερικό του κτιρίου, δηλαδή η συνολική επιφάνεια τοίχων στην οποία μπορεί να αναπτυχθεί διαφορά θερμοκρασίας και όχι μόνο οι προσόψεις του κτιρίου που φέρουν υαλοπίνακες. Αντίστοιχα, στη συνολική επιφάνεια των υαλοπινάκων λαμβάνεται υπόψη και η επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα κουφώματα και τα χωρίσματα των υαλοπινάκων και όχι μόνο η επιφάνεια του γυαλιού. Επίσης περιλαμβάνονται και άλλες διαφανείς και ημιδιαφανείς επιφάνειες εκτός των παραθύρων, όπως είναι τα γυάλινα τούβλα.

Για τον υπολογισμό του WWR θα πρέπει να εξαιρούνται επίσης οι ακόλουθες περιπτώσεις τοίχων:

- Τοίχοι με παράθυρα προς μη κλιματιζόμενους κλειστούς χώρους (για παράδειγμα ένα παράθυρο που βλέπει ένα κλειστό γκαράζ). Σε αυτή την περίπτωση ούτε ο τοίχος, ούτε το παράθυρο θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

- Τοίχοι χωρίς παράθυρα που περιλαμβάνουν μόνο ανοίγματα για αερισμό. Αν κάποιο από τα ανοίγματα περιλαμβάνει υαλοπίνακα, τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.
- Τοίχοι με παράθυρα και ανοίγματα προς εσωτερικούς αεραγωγούς, καθώς στους αεραγωγούς αυτούς δε θεωρείται ότι αναπτύσσεται σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά, επειδή είναι μικροί σε μέγεθος και εκτείνονται κατακόρυφα για πολλούς ορόφους.
- Εξωτερικοί τοίχοι που δεν εκτίθενται άμεσα στο περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι τοίχοι ενός υπογείου ή οι τοίχοι που είναι σε άμεση επαφή με ένα άλλο κτίριο.
- Γυάλινες επιφάνειες που χρησιμοποιούνται διακοσμητικά και είναι εντελώς αδιαφανείς.

Σημειώνεται, τέλος, ότι για τον υπολογισμό του WWR δεν λαμβάνονται υπόψη οι οροφές.

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου συνήθως αυξάνεται με αύξηση του WWR, ειδικά στην περίπτωση παραθύρων με ανατολικό ή δυτικό προσανατολισμό, λόγω των μεγάλων θερμικών απωλειών μέσω των παραθύρων. Ο γενικός κανόνας είναι ότι για να εξασφαλιστεί επαρκής θερμομόνωση, ο WWR δε θα πρέπει να ξεπερνά το 40%. Ωστόσο, ο κανόνας αυτός δεν είναι απόλυτος αφού στη σημερινή εποχή υπάρχουν βελτιωμένοι υαλοπίνακες με χαμηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας, οι οποίοι επιτρέπουν μεγαλύτερες τιμές WWR. Έτσι, υπάρχουν παραδείγματα εμπορικών κτιρίων με τιμές WWR κοντά στο 100 %. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο είδος των χρησιμοποιούμενων υαλοπινάκων, ενώ ένας σημαντικός παράγοντας είναι και το κλίμα της περιοχής που βρίσκεται το κτίριο. Γενικά όσο θερμότερο είναι το κλίμα της περιοχής, τόσο υψηλότερες είναι οι επιτρεπτές τιμές WWR, με την προϋπόθεση ύπαρξης κατάλληλης σκίασης για τη θερινή περίοδο. Σε περιπτώσεις εφαρμογής τεχνολογιών «έξυπνων» παραθύρων, μία μεγάλη τιμή WWR οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση των φορτίων αιχμής και παρουσιάζει μεγαλύτερες δυνατότητες ενεργειακής εξοικονόμησης [17].

2.4 Θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων

2.4.1 Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U (U-factor)

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο για την ποσοτικοποίηση της μονωτικής ικανότητας ενός στοιχείου, αφού υποδεικνύει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας κατά μήκος του συγκεκριμένου στοιχείου. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας αποτελεί ουσιαστικά τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός υαλοστασίου, εκφράζεται σε $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ και

περιλαμβάνει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία για ένα δεδομένο σύνολο περιβαλλοντικών συνθηκών. Συνεπώς, αντιπροσωπεύει τη θερμορροή ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον εκφρασμένη σε W, μέσω ενός τετραγωνικού μέτρου επιφάνειας παραθύρου για θερμοκρασιακή διαφορά 1 °C. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός υλικού, τόσο μικρότερη είναι η παρατηρούμενη θερμορροή διαμέσου του. Επίσης, η θερμική αντίσταση R του υλικού υπολογίζεται ως η αντίστροφη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας, δηλαδή:

$$R = \frac{1}{U}$$

Σε ένα υαλοστάσιο, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες των υλικών του παραθύρου, αλλά και από τις καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος και την ταχύτητα του ανέμου. Το NFRC (National Fenestration Rating Council) έχει τυποποιήσει τις συνθήκες περιβάλλοντος για τις οποίες γίνεται υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας για την αξιολόγηση των εμπορικά διαθέσιμων υαλοστασίων. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Ταχύτητα ανέμου 5,5 m/s
- Εσωτερική θερμοκρασία αέρα 21 °C
- Εξωτερική θερμοκρασία αέρα -18 °C

Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας που αφορά ολόκληρο το σύστημα του παραθύρου προκύπτει από τις μονωτικές ικανότητες των υαλοπινάκων, τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στην περιφέρεια του συστήματος (edge effects) και από τις μονωτικές ικανότητες του πλαισίου και των παραθυρόφυλλων.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας που αφορά μόνο τους υαλοπίνακες επηρεάζεται κυρίως από τον συνολικό αριθμό υαλοπινάκων στο σύστημα, τις αποστάσεις μεταξύ τους, το είδος του αερίου στα διάκενα και τα χαρακτηριστικά των επιστρώσεων που πιθανόν να υπάρχουν στις διάφορες επιφάνειες. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των υαλοπινάκων συχνά αναφέρεται και ως center-of-glass U-factor.

2.4.1.1 Περιφερειακά φαινόμενα (edge effects)

Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας γίνεται η παραδοχή της κάθετης θερμορροής στην επιφάνεια των υαλοπινάκων. Ωστόσο, τα παράθυρα αποτελούν πολύπλοκες τρισδιάστατες κατασκευές, στην οποία τα υλικά και οι διατομές εναλλάσσονται σε ένα σχετικά μικρό χώρο. Για παράδειγμα, τα μεταλλικά διαχωριστικά στην άκρη ενός μονωτικού γυαλιού παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη

θερμορροή σε σχέση με το κέντρο του μονωτικού γυαλιού, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες απώλειες θερμότητας στην περιφέρεια των υαλοπινάκων. Η σχετική επίδραση αυτών των φαινομένων γίνεται πιο έντονη όσο η μονωτική ικανότητα της υπόλοιπης κατασκευής αυξάνεται.

2.4.1.2 Πλαίσιο και παραθυρόφυλλα

Οι απώλειες θερμότητας μέσω του πλαισίου σε ένα παράθυρο μπορούν να είναι αρκετά σημαντικές. Συγκεκριμένα, σε ένα τυπικό παράθυρο με διαστάσεις 1,2 m x 0,9 m το πλαίσιο και τα παραθυρόφυλλα καταλαμβάνουν περίπου το 30% της επιφάνειας του υαλοστασίου. Σε πλαίσια με διατομή κατασκευασμένη από ένα ενιαίο, στερεό υλικό, ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται με βάση την αγωγή θερμότητας μέσω του υλικού. Ωστόσο, κούφια ή σύνθετα πλαίσια που είναι επενδυμένα με διάφορα ενισχυτικά υλικά είναι περισσότερο πολύπλοκα, καθώς απαιτείται συνδυασμός της αγωγής με τη συναγωγή λόγω του αέρα και την εκπομπή ακτινοβολίας μεταξύ των διάφορων επιφανειών. Επιπρόσθετα, τα πλαίσια σπάνια παρουσιάζουν ενιαία διατομή γύρω από έναν υαλοπίνακα.

2.4.1.3 Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας

Καθώς ο συντελεστής θερμοπερατότητας έχει διαφορετική τιμή για τους υαλοπίνακες, τη ζώνη στην περιφέρειά τους και το πλαίσιο μπορεί να προκληθεί σύγχυση κατά τη σύγκριση διαφορετικών κατασκευών. Γι' αυτόν τον λόγο, το NFRC εισήγαγε την έννοια του συνολικού συντελεστή θερμοπερατότητας. Για τον υπολογισμό του μέσω της μεθόδου του NFRC απαιτείται ένα σύνολο από παραδοχές και διαδικασίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή του συνολικού συντελεστή θερμοπερατότητας είναι μεγαλύτερη από αυτή που αναφέρεται μόνο στους υαλοπίνακες, καθώς οι υαλοπίνακες παρουσιάζουν μεγαλύτερες μονωτικές ικανότητες σε σχέση με το πλαίσιο. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται με τα υαλοστάσια σε κατακόρυφη θέση, καθώς μπορεί να επηρεαστεί από την κλίση της κατασκευής [16].

2.4.2 Ηλιακό θερμικό κέρδος και διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία

Το δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό ενεργειακής απόδοσης ενός παραθύρου είναι η ικανότητά του να ελέγχει το ηλιακό θερμικό κέρδος μέσω των υαλοπινάκων. Το ηλιακό θερμικό κέρδος συνήθως αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για τον υπολογισμό των φορτίων κλιματισμού σε μία κατοικία. Η ένταση του θερμικού

κέρδους από την ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να ξεπεράσει σημαντικά τα θερμικά κέρδη από άλλες πηγές, όπως είναι η εξωτερική θερμοκρασία ή η υγρασία.

Το φως του ήλιου αποτελείται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με πολλά μήκη κύματος, που κυμαίνονται από υπεριώδη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος στην ορατή ακτινοβολία και την υπέρυθρη, που παρουσιάζεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Περίπου η μισή ηλιακή ακτινοβολία ανήκει στο ορατό φάσμα. Από την υπόλοιπη το μεγαλύτερο ποσοστό είναι υπέρυθρη, ενώ υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό υπεριώδους. Αυτή η ιδιότητα του φωτός καθιστά δυνατή την επιλεκτική είσοδο ή απόρριψη διαφορετικών τμημάτων του ηλιακού φάσματος. Παρότι η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στον χώρο μέσω των παραθύρων μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα σε ορισμένα κλίματα και σε συγκεκριμένες εποχές του χρόνου, η μεγιστοποίηση του ηλιακού θερμικού κέρδους είναι αναγκαία κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Οι αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις καθιστούν την επιλογή του κατάλληλου είδους υαλοπίνακα αρκετά δύσκολη.

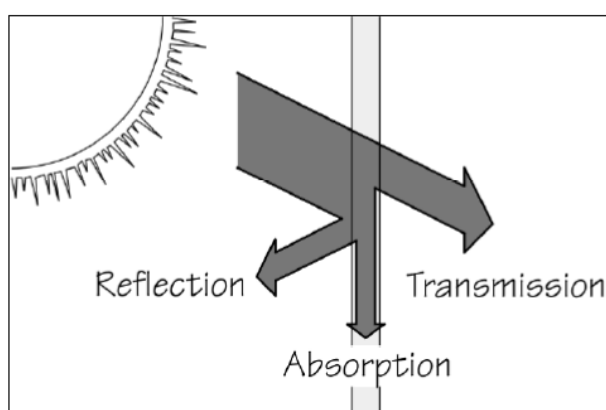
Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά έναν υαλοπίνακα εκφράζεται από δύο συντελεστές: τον συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (Solar Heat Gain Coefficient-SHGC) και τον συντελεστή σκίασης (Shading Coefficient-SC). Και στις δύο περιπτώσεις, το ηλιακό θερμικό κέρδος προέρχεται τόσο από την προσπίπτουσα ακτινοβολία που μεταδίδεται άμεσα διαμέσου του υαλοπίνακα, όσο και από ένα ποσοστό της απορροφούμενης ακτινοβολίας που ρέει προς τον εσωτερικό χώρο [16].

Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους αντιπροσωπεύει το ηλιακό θερμικό κέρδος του συστήματος σε σύγκριση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Παρότι μπορεί να προσδιοριστεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή του που αντιστοιχεί σε κάθετη πρόσπτωση. Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους αναφέρεται στην ενεργειακή απόδοση ολόκληρου του υαλοστασίου και αποτελεί μία ακριβή ένδειξη του θερμικού κέρδους υπό ένα μεγάλο εύρος συνθηκών. Εκφράζεται ως ένας αδιάστατος αριθμός με τιμή από 0 μέχρι 1, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο μεγαλύτερο αναμένεται το θερμικό κέρδος. Υπερτερεί του συντελεστή σκίασης, καθώς εκφράζει καλύτερα την εξάρτηση του ηλιακού θερμικού κέρδους από τη γωνία πρόσπτωσης.

Ο συντελεστής σκίασης αντιπροσωπεύει τον ρυθμό ηλιακού θερμικού κέρδους που εισέρχεται στο σύστημα σε σύγκριση με την περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης σε διαφανές γυαλί πάχους 3 mm.

Το ηλιακό θερμικό κέρδος οφείλεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο ή στη διάχυτη ακτινοβολία που προκύπτει από την ανάκλαση της άμεσης ακτινοβολίας στο έδαφος και σε άλλες επιφάνειες. Το συνολικό θερμικό κέρδος προκύπτει από την προσπίπτουσα ακτινοβολία που εισέρχεται στο δωμάτιο

διαπερνώντας τον υαλοπίνακα και από το δευτερεύον θερμικό κέρδος λόγω του ποσοστού της ακτινοβολίας που απορροφάται από διάφορα στρώματα του παραθύρου και μεταφέρεται στο εσωτερικό με αγωγή, συναγωγή ή ακτινοβολία [18]. Από την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα, ένα μέρος διέρχεται μέσω του υαλοπίνακα στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, ένα μέρος ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τον υαλοπίνακα και συνεπώς εισέρχεται με έμμεσο τρόπο στο κτίριο. Οι περισσότερες καινοτομίες στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης των υαλοστασίων τα τελευταία χρόνια αφορούν τη δυνατότητα ελέγχου του ποσοστού διάβασης, ανάκλασης και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας για διαφορετικά μήκη κύματος.



Σχήμα 2.1: Η ανάκλαση (reflection), απορρόφηση (absorption) και διάβαση (transmission) της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός υαλοπίνακα

Οι διάφοροι τύποι υαλοπινάκων διαφέρουν ως προς τη διαπερατότητά τους στα επιμέρους κομμάτια του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Για παράδειγμα, ένας υαλοπίνακας με ελαφρύ πράσινο χρώμα τείνει να επιτρέπει τη μετάδοση προς το εσωτερικό περισσότερης ορατής ακτινοβολίας στην περιοχή του πράσινου, ενώ απορροφά και ανακλά σε μεγαλύτερο βαθμό τα υπόλοιπα χρώματα. Παρομοίως, ένας υαλοπίνακας με χάλκινη απόχρωση θα απορροφά την ακτινοβολία με μπλε και πράσινο χρώμα και θα επιτρέπει κυρίως τη διέλευση των πιο θερμών χρωμάτων. Οι ουδέτερες γκρίζες αποχρώσεις απορροφούν εξίσου τα περισσότερα χρώματα.

Οι ίδιες αρχές εφαρμόζονται και στις περιοχές εκτός του ορατού φάσματος. Τα περισσότερα είδη γυαλιού είναι μερικώς διαφανή σε τουλάχιστον ένα ποσοστό υπεριώδους ακτινοβολίας, ενώ τα πλαστικά είναι συνήθως αδιαφανή σε αυτή. Το γυαλί είναι αδιαφανές στο άπω υπέρυθρο (25-1000 μm), αλλά γενικά διαφανές στο εγγύς υπέρυθρο (0,75-25 μm).

2.5 Οπτικές ιδιότητες υαλοπινάκων

Οι βασικές ιδιότητες ενός υαλοπίνακα που επηρεάζουν τη μεταφορά της ηλιακής ενέργειας είναι η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance-VT), η ανακλαστικότητα (reflectance) και η απορροφητικότητα (absorptance).

2.5.1 Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance-VT)

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός σώματος, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καταφέρνει να διαδοθεί διαμέσου της μάζας του σώματος και να φτάσει στην απέναντι πλευρά. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται μέσω του συντελεστή διάβασης τ , που ονομάζεται αλλιώς και διαπερατότητα και ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολίας I_τ που διαδίδεται διαμέσου της μάζας του σώματος προς τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία I . Η διαπερατότητα ενός υλικού, συνεπώς, εκφράζεται από την εξίσωση [5]:

$$\tau = \frac{I_\tau}{I}$$

Η τιμή της διαπερατότητας είναι διαφορετική για διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στην περίπτωση των υαλοπινάκων, ένα από τα βασικότερα κριτήρια για τη σωστή επιλογή τους και την εξασφάλιση συνθηκών οπτικής άνεσης είναι η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία.

Η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία αποτελεί μία οπτική ιδιότητα που υποδεικνύει το ποσοστό της προσπίπτουσας ορατής ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω του υαλοπίνακα στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Παρότι δεν επηρεάζει άμεσα τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των υαλοστασίων. Μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, ωστόσο συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή της που αντιστοιχεί σε κάθετη πρόσπτωση. Η τιμή της καθορίζεται από το είδος του γυαλιού, τον αριθμό των υαλοπινάκων και πιθανές επιστρώσεις που μπορεί να έχουν προστεθεί σε αυτούς. Η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία κυμαίνεται από τιμές μεγαλύτερες του 90 % σε περιπτώσεις διαφανούς γυαλιού έως και τιμές μικρότερες από 10 % για ιδιαίτερος ανακλαστικές επιστρώσεις ή χρωματισμένο γυαλί.

Η ιδιότητα αυτή επηρεάζει σημαντικά τη διαθέσιμη ποσότητα φυσικού φωτισμού, τη δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, την ιδιωτικότητα και τον έλεγχο της θάμβωσης. Οι επιδράσεις της στα παραπάνω μεγέθη συχνά είναι αντικρουόμενες. Για παράδειγμα, μία υψηλή τιμή διαπερατότητας είναι επιθυμητή για την εξασφάλιση επαρκούς φυσικού φωτισμού, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει θάμβωση. Κοινή πρακτική είναι η επιλογή υαλοπινάκων με

υψηλή τιμή διαπερατότητας και ο συνδυασμός τους με κατάλληλα σκίαστρα ή περσίδες με σκοπό τη ρύθμιση της διαπερατότητας για την προσαρμογή στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες.

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υαλοπινάκων τα τελευταία χρόνια επιτρέπουν στους κατασκευαστές να ελέγχουν τη συμπεριφορά των υλικών σε διαφορετικές περιοχές του φάσματος. Οι βασικές ιδιότητες του υλικού υποστρώματος (γυαλί ή πλαστικό) μπορούν να αλλοιωθούν και είναι δυνατή η προσθήκη επιστρώσεων στην επιφάνειά τους. Για παράδειγμα, ένα υαλοστάσιο που έχει βελτιστοποιηθεί για την εξασφάλιση φυσικού φωτισμού και τη μείωση των θερμικών κερδών θα πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση ενός επαρκούς ποσού ορατής ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα θα παρεμποδίζει τη διέλευση ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο που προκαλεί ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη. Αντίθετα, ένα υαλοστάσιο που έχει βελτιστοποιηθεί με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ηλιακού θερμικού κέρδους τον χειμώνα θα πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας ορατής, αλλά και υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ θα πρέπει να παρεμποδίζει την ακτινοβολία στο άπω υπέρυθρο που είναι χαμηλής ενέργειας και οδηγεί σε θερμικές απώλειες.

2.5.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance)

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα, ένα ποσοστό της ανακλάται πίσω στο εξωτερικό περιβάλλον. Η ανακλαστικότητα ενός σώματος εκφράζεται μέσω του συντελεστή ανάκλασης ρ , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της ανακλώμενης προς το περιβάλλον ακτινοβολίας I_ρ προς τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία I στην επιφάνεια. Δηλαδή:

$$\rho = \frac{I_\rho}{I}$$

Η φυσική ανακλαστικότητα του γυαλιού εξαρτάται από την ποιότητα της επιφάνειάς του, την πιθανή ύπαρξη επιστρώσεων και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σήμερα, πρακτικά όλα τα είδη γυαλιού που κατασκευάζονται είναι γυαλιά επίπλευσης (float glass) και έχουν παρόμοια ποιότητα ως προς την ανακλαστικότητά τους. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία με την οποία το φως συναντά την επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερο κομμάτι της ακτινοβολίας ανακλάται αντί να απορροφηθεί ή να διαδοθεί μέσω του υαλοπίνακα. Ακόμα και το διάφανο γυαλί είναι ικανό να ανακλάσει ποσοστό 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ή και μεγαλύτερο όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από 70°, θεωρώντας ότι η γωνία πρόσπτωσης ορίζεται ως προς την κάθετο στην επιφάνεια του γυαλιού.

Η ανακλαστικότητα του γυαλιού μπορεί να αυξηθεί εφαρμόζοντας διάφορες μεταλλικές επιστρώσεις στην επιφάνειά του. Οι παλαιότερες διαδικασίες περιλάμβαναν ένα κράμα υδραργύρου και κασσίτερου με σκοπό τη δημιουργία επιφάνειας με ιδιότητες καθρέφτη. Μία διαδικασία επίστρωσης με άργυρο αναπτύχθηκε το 1865, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά των καθρεφτών. Στη σημερινή εποχή είναι δυνατή η δημιουργία επιφανειών που μοιάζουν με καθρέφτη με εναπόθεση εν κενώ αλουμινίου ή αργύρου, ή με την εφαρμογή μίας ανθεκτικής πυρολυτικής επίστρωσης απευθείας κατά τη διάρκεια της κατασκευής του γυαλιού. Οι πιο παχιές επιστρώσεις είναι δυνατό να είναι πλήρως ανακλαστικές και ουσιαστικά αδιαφανείς, ενώ οι λεπτότερες επιστρώσεις είναι μερικώς ανακλαστικές, επιτρέποντας σε ένα μέρος της ακτινοβολίας να τις διαπεράσει.

Οι πιο κοινές επιστρώσεις ανακλούν όλα τα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ωστόσο, στα τελευταία είκοσι χρόνια, οι ερευνητές κατάφεραν να σχεδιάσουν επιστρώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε γυαλί ή πλαστικό και ανακλούν επιλεκτικά μόνο σε συγκεκριμένα εύρη μήκους κύματος. Η ικανότητα μεταβολής της ανακλαστικότητας στο άπω και εγγύς υπέρυθρο αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής (low-e) που είναι κατάλληλες για ψυχρότερα κλίματα, καθώς και για τον σχεδιασμό επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής με επιλεκτική συμπεριφορά που είναι πιο κατάλληλες για θερμότερα κλίματα.

2.5.3 Απορροφητικότητα (Absorptance)

Η ηλιακή ακτινοβολία που δε διαδίδεται μέσω της μάζας του γυαλιού και δεν ανακλάται από την επιφάνειά του απορροφάται. Όταν η ακτινοβολία απορροφάται από το γυαλί, μετατρέπεται σε θερμότητα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του γυαλιού. Η απορροφητικότητα ενός υλικού εκφράζεται μέσω του συντελεστή απορρόφησης α , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας που απορροφάται από το υλικό I_α προς τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία I στην επιφάνειά του. Δηλαδή:

$$\alpha = \frac{I_\alpha}{I}$$

Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τη γωνία πρόσπτωσης στο σώμα, τη φύση της απορροφούσας επιφάνειας και τη θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία. Αντίθετα, δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος που δέχεται την ακτινοβολία [5].

Το σύνηθες διαφανές γυαλί πάχους 3 mm απορροφά μόλις το 4% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η απορροφητικότητα του γυαλιού μπορεί να αυξηθεί προσθέτοντας

στο γυαλί χημικά που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια. Αν τα υλικά απορροφούν την ορατή ακτινοβολία, το γυαλί φαίνεται σκουρόχρωμο, ενώ αν απορροφούν την υπεριώδη ή την εγγύς υπέρυθρη παρουσιάζεται μικρή ή και καμία μεταβολή στην οπτική τους εμφάνιση. Το διαφανές γυαλί απορροφά πολύ μικρή ποσότητα ορατού φωτός, ενώ το σκουρόχρωμο γυαλί απορροφά ένα σημαντικό ποσοστό. Καθώς η απορροφούμενη ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα και αυξάνει τη θερμοκρασία του γυαλιού, όταν οι απορροφητικοί υαλοπίνακες είναι εκτεθειμένοι στον ήλιο αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία σε σχέση με το διαφανές γυαλί. Συνήθως έχουν γκρι, χάλκινο ή μπλε-πράσινο χρώμα και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μείωση του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους και για τον έλεγχο της θάμβωσης. Καθώς παρεμποδίζουν την είσοδο ενός ποσοστού του ηλιακού θερμικού κέρδους, μειώνουν τα ψυκτικά φορτία του κτιρίου και τον εξοπλισμό κλιματισμού. Ωστόσο, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο μείωσης του ψυκτικού φορτίου.

2.5.4 Συσχέτιση των οπτικών ιδιοτήτων της επιφάνειας ενός υαλοπίνακα

Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία I που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα, ένα μέρος διαδίδεται μέσω της μάζας του υαλοπίνακα προς τον εσωτερικό χώρο ($\tau \cdot I$), ένα μέρος απορροφάται ($\alpha \cdot I$), ενώ η υπόλοιπη ακτινοβολία ανακλάται πίσω στο περιβάλλον ($\rho \cdot I$). Στην ανακλώμενη ακτινοβολία προστίθεται και το ποσό της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα λόγω της θερμοκρασίας του. Ο ενεργειακός αυτός ισολογισμός εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = \tau \cdot I + \alpha \cdot I + \rho \cdot I$$

Απλοποιώντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι:

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση RAT από τα αρχικά γράμματα των λέξεων Transmission (διάβαση), Absorption (απορρόφηση) και Reflection (ανάκλαση).

Οι παραπάνω οπτικές ιδιότητες εξαρτώνται από το πάχος και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, από το είδος της επιφανειακής επίστρωσης που είναι πιθανό να υπάρχει και από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Επίσης, καθώς οι τιμές τους εξαρτώνται και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, συνήθως χρησιμοποιούνται μέσες τιμές για το συνολικό φάσμα.

2.5.5 Εκπομπή (Emittance)

Όταν η θερμική ή η φωτεινή ενέργεια απορροφάται από το γυαλί, απομακρύνεται μέσω συναγωγής από τον κινούμενο αέρα ή επανεκπέμπεται από την επιφάνεια του γυαλιού. Η ικανότητα ενός υλικού να ακτινοβολεί ενέργεια ονομάζεται εκπομπή. Τα υαλοστάσια, καθώς και τα άλλα αντικείμενα και ο εξοπλισμός ενός κτιρίου συνήθως εκπέμπουν ή ακτινοβολούν θερμότητα με τη μορφή άπω υπέρυθρης ακτινοβολίας με μεγάλο μήκος κύματος. Η ικανότητα εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας ενός υαλοπίνακα είναι καθοριστική για τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα. Συνεπώς, μειώνοντας την ικανότητα εκπομπής του υαλοπίνακα, μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά οι μονωτικές του ικανότητες.

Το κοινό γυαλί έχει συντελεστή εκπομπής 0,84 στο κομμάτι του φάσματος με μεγάλα μήκη κύματος, δηλαδή εκπέμπει το 84 % της ενέργειας που είναι δυνατόν να εκπεμφθεί από ένα σώμα με την ίδια θερμοκρασία. Αυτό επίσης σημαίνει ότι από τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (όπου δεν παρατηρείται διάβαση), το 84 % απορροφάται και μόνο το 16 % ανακλάται. Αντίθετα, το γυαλί με επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής (low-e) μπορεί να παρουσιάσει πολύ μικρή τιμή συντελεστή εκπομπής, που μπορεί να φτάσει και το 0,04. Δηλαδή, εκπέμπεται μόνο το 4 % της ενέργειας που θα μπορούσε να εκπεμφθεί σε αυτή τη θερμοκρασία και το υπόλοιπο 96 % της προσπίπτουσας υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος ανακλάται **[16]**.

3 Τεχνολογίες παραθύρων με σταθερές οπτικές ιδιότητες

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. Συνεπώς, οι συντελεστές ανάκλασης, απορρόφησης και διάβασης έχουν συγκεκριμένες, σταθερές τιμές και δεν υπάρχει δυνατότητα δυναμικού ελέγχου του ηλιακού θερμικού κέρδους ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του χρήστη [6].

Από άποψη δομής, τα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα παραθύρων μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων γυαλιού που περιλαμβάνουν σε μονά, διπλά και τριπλά παράθυρα. 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.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι πιο συνηθισμένοι και διαδεδομένοι στην αγορά, αλλά και κάποιοι πιο εξελιγμένοι τύποι υαλοπινάκων, οι οποίοι παρουσιάζουν σταθερές οπτικές ιδιότητες.

3.1 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 [19]. 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. Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U μειώνεται με αύξηση του πάχους του γυαλιού. Τυπική τιμή για τον συντελεστή θερμοπερατότητας για υαλοπίνακα πάχους 4 mm είναι $5,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ [7], ενώ τυπικές τιμές για τον SHGC και τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία είναι 0,86 και 0,90 αντίστοιχα.

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.

3.2 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 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.

Ενδεικτική τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας διπλού υαλοπίνακα με στρώματα γυαλιού πάχους 4 mm και διάκενο αέρα πάχους 6 mm είναι $3,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Αν το διάκενο αέρα έχει πάχος 12 mm, η τιμή αυτή μειώνεται σε $2,9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Αντίστοιχες τιμές για τον SHGC και τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία είναι 0,75 και 0,81 [7].

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 εξοικονόμηση 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 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 [19]

3.3 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.

Ενδεικτική τιμή θερμοπερατότητας για τριπλό υαλοπίνακα με στρώματα γυαλιού πάχους 4 mm και διάκενα αέρα πάχους 12 mm το καθένα είναι 2,2 W/m² K. Για τον SHGC και τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία οι αντίστοιχες τυπικές τιμές είναι 0,61 και 0,70. 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.

3.4 Επιστρώσεις υαλοπινάκων

Οι επιστρώσεις υαλοπινάκων συνήθως σχεδιάζονται με σκοπό την παρεμπόδιση της εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας και τη μείωση των ψυκτικών φορτίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂ των κτιρίων. Οι επιστρώσεις που εφαρμόζονται σε παράθυρα αποτελούνται συνήθως από πολλά στρώματα επικαλυμμένου ή χημικά επεξεργασμένου πολυεστέρα και

μπορεί να περιλαμβάνουν ένα μεταλλικό στρώμα για τη βελτίωση της συμπεριφοράς τους ως προς την ηλιακή ακτινοβολία. Παρότι υπάρχουν πολλά είδη επιστρώσεων, αυτές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας είναι οι πιο διαδεδομένες. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των επιστρώσεων είναι η προστασία από τις δυσμενείς συνέπειες του ήλιου (αποφυγή υπερθέρμανσης, μείωση φαινομένων θάμβωσης και προστασία από υπεριώδη ακτινοβολία), αύξηση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας, καθώς και αισθητικά πλεονεκτήματα.

Η εφαρμογή επιστρώσεων σε παράθυρα οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις ως προς τις ενεργειακές καταναλώσεις, με την καλύτερη απόδοση να παρουσιάζεται σε κτίρια γραφείων. Επιπρόσθετα, οι επιστρώσεις που εφαρμόζονται σε διαφανείς υαλοπίνακες οδηγούν σε μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση σε σχέση με τους χρωματισμένους υαλοπίνακες. Η εφαρμογή επιστρώσεων στη γενική περίπτωση οδηγεί σε μείωση των ψυκτικών φορτίων, αλλά σε ταυτόχρονη αύξηση των αναγκών θέρμανσης. Βέβαια, η αύξηση των φορτίων θέρμανσης που παρατηρείται δεν είναι σημαντική και δεν αρκεί για να αντισταθμίσει τα οφέλη από τη χρήση τους. Η μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση και εκμετάλλευση του ηλιακού θερμικού κέρδους επιτυγχάνεται με παράθυρα νότιου προσανατολισμού. Επιπρόσθετα, για τη μείωση των αναγκών θέρμανσης σε παράθυρα με μεγάλη επιφάνεια και βόρειο ή νότιο προσανατολισμό απαιτούνται χαμηλές τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας U [20].

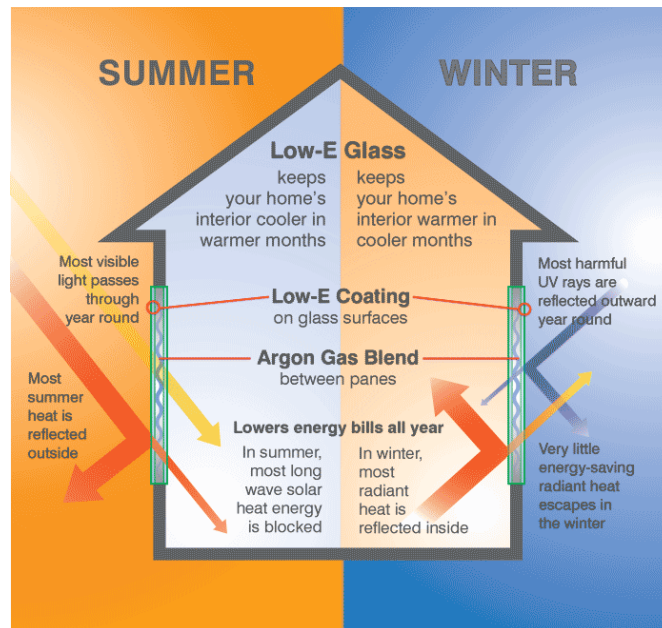
3.5 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing)

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 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 [21].

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 [22]. 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.

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. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς οι επιστρώσεις low-e ανακλούν την ακτινοβολία στο εσωτερικό του κτιρίου και εκπέμπουν μικρό ποσοστό ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Η αντίστροφη διαδικασία πραγματοποιείται τους θερινούς μήνες, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των εσωτερικών χώρων του κτιρίου που μπορεί να προκαλέσει δυσφορία. Οι ιδιότητες των επιστρώσεων low-e 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.



Σχήμα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της συμπεριφοράς των υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής

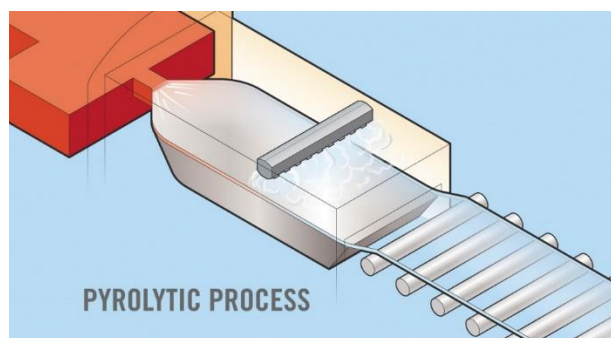
3.5.1 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τον σκοπό χρήσης

Οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις παθητικές επιστρώσεις low-e (passive low-e coatings) και τις επιστρώσεις low-e ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας (solar control low-e coatings). Οι παθητικές επιστρώσεις low-e σχεδιάζονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ηλιακού θερμικού κέρδους και της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία, λειτουργώντας ουσιαστικά ως ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης, με σκοπό τη μείωση των αναγκών θέρμανσης. Οι επιστρώσεις ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας σχεδιάζονται με σκοπό τον περιορισμό της ηλιακής θερμικής ενέργειας που εισέρχεται στο κτίριο, με σκοπό την εξασφάλιση χαμηλότερης εσωτερικής θερμοκρασίας και τη μείωση των αναγκών κλιματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται περιορίζοντας την είσοδο της υπεριώδους και υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς και της θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από εξωτερικά αντικείμενα, όπως είναι τα οδοστρώματα και τα παρακείμενα κτίρια, χωρίς ταυτόχρονα να παρεμποδίζεται η είσοδος της ορατής ακτινοβολίας [23].

Μετά από την πρώτη εμφάνιση των παραθύρων χαμηλής εκπομπής στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η αγορά των υαλοπινάκων πέρασε ριζικές αλλαγές. Σε κάποιες χώρες θεωρείται ήδη δεδομένη η εγκατάσταση παραθύρων με κατάλληλες επιστρώσεις, είτε low-e για τη μείωση των αναγκών σε θέρμανση, είτε ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας για τη μείωση των ψυκτικών αναγκών είτε και συνδυασμό τους. Οι δυνατότητες ενεργειακής εξοικονόμησης είναι σημαντικές και στις δύο περιπτώσεις και πρακτικά πάντα συνοδεύονται από σημαντική βελτίωση των συνθηκών άνεσης.

3.5.2 Κατηγοριοποίηση ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής

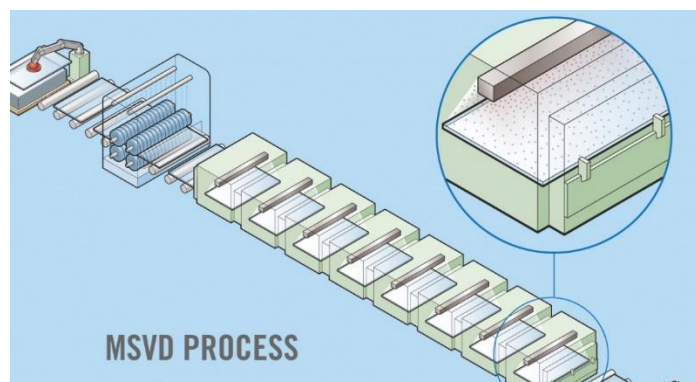
Οι δύο τύποι επιστρώσεων παράγονται μέσω δύο βασικών μεθόδων παραγωγής: της πυρολυτικής μεθόδου ή μέσω της μεθόδου MSVD (Magnetron Sputter Vacuum Deposition). Στην πυρολυτική διαδικασία, η οποία έγινε γνωστή στις αρχές της δεκαετίας του 1970, η επικάλυψη εφαρμόζεται σε γυάλινη «κορδέλα» κατά τη διαδικασία παραγωγής του γυαλιού. Η επικάλυψη είναι ένα μεταλλικό οξείδιο, συνήθως οξείδιο κασσιτέρου με μερικά πρόσθετα και εναποτίθεται απευθείας πάνω στην επιφάνεια του γυαλιού, ενώ είναι ακόμα ζεστό. Το αποτέλεσμα είναι ένα αρκετά σκληρό και επομένως πολύ ανθεκτικό επιφανειακό στρώμα που αναφέρεται πολλές φορές και ως “hard coat”. Τέλος, το γυαλί κόβεται σε τυποποιημένα φύλλα διαφόρων μεγεθών και αποστέλλεται στους κατασκευαστές. Μία πυρολυτική επικάλυψη μπορεί να είναι από δέκα έως και είκοσι φορές παχύτερη από μία επίστρωση MSVD, αλλά εξακολουθεί να είναι εξαιρετικά λεπτή. Ακόμα, μπορεί να εκτεθεί στον αέρα, να καθαριστεί με κανονικά προϊόντα καθαρισμού και να υποβληθεί σε φθορά χωρίς να χάσει τις ιδιότητες low-e. Παρότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στις ιδιότητες των συγκεκριμένων επικαλύψεων, τυπικά έχουν τιμές συντελεστή εκπομπής στο εύρος $\epsilon=0,10 - 0,20$. Οι υαλοπίνακες που κατασκευάζονται μέσω αυτής της μεθόδου χαρακτηρίζονται ως υαλοπίνακες high-transmission low-e.



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση της πυρολυτικής διαδικασίας για την κατασκευή γυαλιού χαμηλής εκπομπής

Η διαδικασία MSVD εισήχθη τη δεκαετία του 1980 και βελτιώθηκε σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτή την περίπτωση η επίστρωση εφαρμόζεται εκτός της γραμμής παραγωγής, σε προ-κομμένο γυαλί σε θάλαμο κενού με θερμοκρασία δωματίου. Οι επιστρώσεις αυτές είναι πολυστρωματικές, συνήθως με τρία κύρια στρώματα, με τουλάχιστον ένα στρώμα μετάλλου. Οι επικαλύψεις χρησιμοποιούν συχνά ένα στρώμα αργύρου και πρέπει να προστατεύονται από την υγρασία και την επαφή. Γι' αυτόν τον λόγο χαρακτηρίζονται και ως “soft coats”. Παρότι οι επιστρώσεις δεν είναι ανθεκτικές από μόνες τους, όταν τοποθετούνται σε ένα σφραγισμένο συγκρότημα δύο ή τριών υαλοπινάκων αναμένεται να έχουν παρόμοια διάρκεια ζωής με το υπόλοιπο συγκρότημα. Οι επιμεταλλωμένες επικαλύψεις παρουσιάζουν συνήθως χαμηλότερη ικανότητα εκπομπής σε σχέση με τις πυρολυτικές επικαλύψεις

και συναντώνται στο εμπόριο με τιμές συντελεστών εκπομπής που κυμαίνονται στο εύρος $\epsilon=0,02 - 0,10$. Οι υαλοπίνακες που κατασκευάζονται μέσω αυτής της μεθόδου χαρακτηρίζονται ως υαλοπίνακες moderate-transmission ή low-transmission low-e. Οι τελευταίοι ονομάζονται και φασματικά επιλεκτικοί (spectrally selective) low-e υαλοπίνακες και περιορίζουν τις απώλειες θερμότητας τον χειμώνα, αλλά και το θερμικό κέρδος το καλοκαίρι.



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση της διαδικασίας MSVD για την κατασκευή γυαλιού χαμηλής εκπομπής

Λόγω της ιστορικής εξέλιξης των τεχνολογιών αυτών οι παθητικές επιστρώσεις συνδέονται μερικές φορές με την πυρολυτική μέθοδο, ενώ οι επιστρώσεις ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας με την μέθοδο MSVD, ωστόσο αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές [22].

3.5.3 Ενεργειακή απόδοση

Ο συντελεστής θερμικής εκπομπής ενός παραθύρου χωρίς επίστρωση εκτιμάται κοντά στο 84 %, ενώ με τις πρώτες διαθέσιμες επιστρώσεις από ενισχυμένο οξείδιο του κασσίτερου μειώθηκε στο 15 %. Εφόσον το μεγαλύτερο κομμάτι των ενεργειακών απωλειών των παραθύρων αποτελείται από θερμική ακτινοβολία, η μείωση αυτή συνεπάγεται μια ριζική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Με τη δημιουργία επιστρώσεων με δομή διηλεκτρικό-μέταλλο-διηλεκτρικό κατέστη δυνατή η μείωση της θερμικής εκπομπής ακόμα και σε επίπεδο χαμηλότερο από 5 %. Πλέον, οι δυνατότητες μείωσης της θερμικής εκπομπής φτάνουν στα όριά τους, καθώς η θερμική ημισφαιρική εκπομπή συνήθως υπολογίζεται από μετρήσεις της ανακλαστικότητας σε ένα εύρος μήκους κύματος 3-45 μm και η μειωμένη ακρίβεια των μεθόδων μέτρησης καθιστούν δύσκολο τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπής με ακρίβεια καλύτερη από ± 1 %. Ταυτόχρονα, η συνεχής προσπάθεια για τη δημιουργία επιστρώσεων με πολύ μικρή τιμή συντελεστή εκπομπής είναι πιθανό να μειώσει την απόδοση του υαλοπίνακα από άλλες απόψεις, για παράδειγμα λόγω μειωμένης διαπερατότητας σε ηλιακή ή συγκεκριμένα σε ορατή ακτινοβολία.

Στη γενική περίπτωση, η θερμική εκπομπή δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο για τη διαπίστωση της ενεργειακής απόδοσης του παραθύρου. Μικρές μειώσεις της θερμικής εκπομπής δεν οδηγούν απαραίτητα σε καλύτερη ενεργειακή απόδοση του παραθύρου, καθώς η ενεργειακή απόδοση επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους, όπως η διαπερατότητα σε ηλιακή και ορατή ακτινοβολία, το αέριο που χρησιμοποιείται στο διάκενο των παραθύρων, αλλά και από τον τύπο του κτιρίου, τον προσανατολισμό του και τις κλιματικές συνθήκες. Σε ψυχρότερα κλίματα κρίνεται πιο σημαντική η προσπάθεια για εξασφάλιση χαμηλότερης τιμής συντελεστή εκπομπής, με την προϋπόθεση ότι οι τιμές των άλλων σημαντικών παραμέτρων, δηλαδή του SHGC και της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα. Σε θερμότερα κλίματα ή σε κτίρια γραφείων με μεγάλες ανάγκες ψύξης η επίδραση της θερμικής εκπομπής είναι συνήθως μικρότερη από αυτή της διαπερατότητας σε ηλιακή ακτινοβολία. Συμπερασματικά, η χρήση των low-e υαλοπινάκων θεωρείται απαραίτητη κυρίως σε ψυχρότερα κλίματα, ενώ μικρές διαφορές στην τιμή του συντελεστή εκπομπής πρακτικά δεν επηρεάζουν την ενεργειακή εξοικονόμηση στο κτίριο.

3.5.4 Θέσεις τοποθέτησης των επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής

Οι επιστρώσεις τοποθετούνται στις επιφάνειες που θερμαίνονται περισσότερο κατά τη διάρκεια του χρόνου με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσής τους. Η θέση της επίστρωσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τον συντελεστή θερμοπερατότητας του παραθύρου, αλλά επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους. Σε έναν τυποποιημένο διπλό υαλοπίνακα υπάρχουν τέσσερις πιθανές θέσεις που μπορούν να εφαρμοστούν οι επιστρώσεις. Η πρώτη επιφάνεια είναι η εξωτερική, η δεύτερη και η τρίτη βρίσκονται απέναντι η μία από την άλλη και διαχωρίζονται από ένα μονωτικό στρώμα αέρα ή κάποιου ευγενούς αερίου, ενώ η τέταρτη επιφάνεια βρίσκεται από την εσωτερική πλευρά του παραθύρου. Οι παθητικές επιστρώσεις low-e, οι οποίες είναι περισσότερο κατάλληλες για εξασφάλιση θέρμανσης, λειτουργούν καλύτερα όταν βρίσκονται στην τρίτη ή στην τέταρτη επιφάνεια με σκοπό τη μεγιστοποίηση του παθητικού ηλιακού κέρδους τον χειμώνα. Με αυτόν τον τρόπο, βέβαια, μειώνεται ελαφρώς η ικανότητα ελέγχου του ηλιακού κέρδους το καλοκαίρι. Αντίθετα, οι επιστρώσεις ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας, που προτιμώνται για τη μείωση των αναγκών ψύξης, λειτουργούν καλύτερα όταν βρίσκονται πλησιέστερα στον ήλιο, συνήθως στη δεύτερη επιφάνεια, με στόχο τη μείωση του ηλιακού θερμικού κέρδους και τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι κατασκευαστές μπορεί να τοποθετήσουν τις επιστρώσεις σε διαφορετικές θέσεις για άλλους λόγους, όπως είναι για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης θερμικών τάσεων.

Σε υαλοπίνακες low-e υψηλότερων επιδόσεων χρησιμοποιούνται τρεις γυάλινες πλάκες που διαχωρίζονται από δύο διάκενα με αέρα ή κάποιο αδρανές αέριο. Σε κάποια από αυτά τα παράθυρα χρησιμοποιείται μόνο μία επίστρωση low-e, ενώ σε άλλα χρησιμοποιείται μία επίστρωση ανά διάκενο. Εκτός από τη θερμότητα που διεισδύει στο γυαλί, ένα μέρος της θερμότητας χάνεται στις άκρες του γυαλιού και μέσα από το μεταλλικό πλαίσιο. Συνεπώς, το συνολικό ποσό θερμότητας που διέρχεται μέσω του παραθύρου εξαρτάται από τον αριθμό των υαλοπινάκων, το είδος του αερίου που χρησιμοποιείται στα διάκενα μεταξύ των υαλοπινάκων, την απόδοση της επίστρωσης low-e και το σχέδιο και το υλικό του πλαισίου [22].

3.5.5 Πλεονεκτήματα

Οι υαλοπίνακες low-e παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μείωση της έντονης φωτεινότητας και η επίτευξη οπτικής άνεσης, με παράλληλη δυναμική ρύθμιση του θερμικού ηλιακού κέρδους, με στόχο τη μείωση των αναγκών θέρμανσης και ψύξης του χώρου. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματά τους αποτελούν το αμελητέο κόστος συντήρησης, η δυνατότητα τοποθέτησης σε ήδη υφιστάμενα τζάμια με παράλληλη αύξηση της αντοχής τους και η ευελιξία που προσφέρουν ως προς την επιλογή του κατάλληλου τύπου μεμβράνης ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

Το κόστος απόκτησης (είτε για αντικατάσταση υαλοπινάκων, είτε για πρωτογενή τοποθέτηση) ενός παραθύρου low-e για ένα τυπικό διαμέρισμα, δεν ξεπερνά τα 1200-1700 €. Σύμφωνα με μελέτες, η διαφορά κόστους κτήσης μεταξύ των υαλοπινάκων low-e και των συμβατικών διπλών υαλοπινάκων αποσβένεται σε ένα περίπου χρόνο. Ακόμη πρέπει να τονιστεί ότι για τους υαλοπίνακες low-e τελευταίας γενιάς δεν υπάρχει ουσιαστικά όριο ζωής, ενώ δεν απαιτούν απολύτως καμία ειδική συντήρηση πέρα του τυπικού καθαρισμού όπως και όλοι οι απλοί υαλοπίνακες. Τέλος συνδυαζόμενοι (με πολύ μικρό επιπλέον κόστος) με υαλοπίνακες ασφαλείας ή πυρασφάλειας ή ηχομονωτικούς, εξασφαλίζουν στα κτίρια επιπλέον σημαντικά πλεονεκτήματα.

3.6 Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με πλήρωση αερίων (Gas filled glazing)

Η πλήρωση των διακένων σε διπλούς και τριπλούς υαλοπίνακες με αέριο αποτελεί την πιο συνηθισμένη τακτική της σύγχρονης τεχνολογίας παραθύρων. Το αέριο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ο αέρας, λόγω του χαμηλού του κόστους. Ωστόσο, η θερμική αγωγιμότητα του αέρα είναι 0,026 W/m K σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση, γεγονός που δεν τον καθιστά την πιο αποδοτική ενεργειακά λύση.

Σε ένα διπλό ή τριπλό παράθυρο είναι δυνατή η μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας μέσω της μείωσης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό είναι δυνατό με την αντικατάσταση του περιεχόμενου στο παράθυρο αέρα με ένα ευγενές αέριο. Το πιο διαδεδομένο αέριο που χρησιμοποιείται γι' αυτόν τον σκοπό είναι το αργό, με θερμική αγωγιμότητα $0,018 \text{ W/m K}$, το οποίο θα πρέπει να καταλαμβάνει τουλάχιστον το 90 % του όγκου του διακένου. Η πλήρωση με αργό πρέπει να παραμένει για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του υαλοπίνακα και να μη χάνεται περισσότερο από 5 % αυτής σε μία χρονική περίοδο 25 ετών. Η χρήση κρυπτού ή ξένου οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας (οι θερμικές τους αγωγιμότητες είναι $0,0095 \text{ W/m K}$ και $0,0055 \text{ W/m K}$ αντίστοιχα), αλλά απαιτεί ταυτόχρονα μεγαλύτερο κόστος κατασκευής [24]. Τα αέρια αυτά παρουσιάζουν εκτός από μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τον αέρα και μεγαλύτερη πυκνότητα, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή, αφού η κίνηση του αερίου στο διάκενο καθίσταται δυσκολότερη. Το αέριο που χρησιμοποιείται καθορίζει και τη βέλτιστη απόσταση μεταξύ των υαλοστασίων του στοιχείου, το οποίο θα πρέπει να είναι αεροστεγώς σφραγισμένο. Κάποιες φορές χρησιμοποιούνται και μείγματα αερίων. Η χρήση κάποιου πληρωτικού αερίου επηρεάζει ελάχιστα τον SHGC και πρακτικά καθόλου τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία.

Τέλος, συνηθισμένη περίπτωση αποτελεί ο συνδυασμός υαλοστασίου που περιέχει ευγενές αέριο με ανακλαστική μεμβράνη low-e. Τα παράθυρα αυτά παρουσιάζουν υψηλή ποιότητα και εκτός από τη θερμική μόνωση προσφέρουν επιπρόσθετα ηχομόνωση, αλλά και ασφάλεια σε περίπτωση θραύσης.

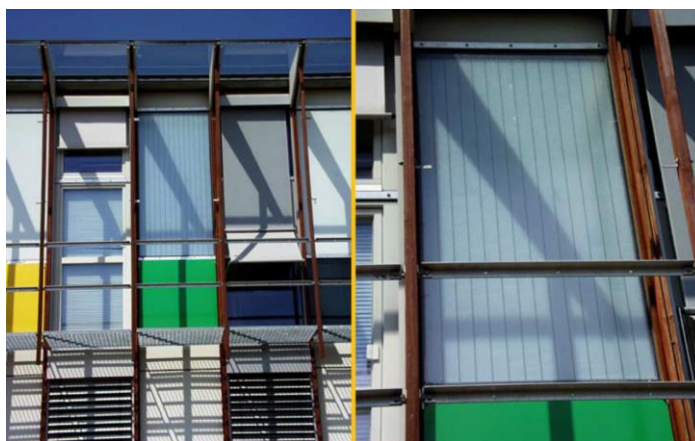
3.7 Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με κενό αέρος (Vacuum glazing)

Η μείωση της θερμικής αγωγιμότητας και του συντελεστή θερμοπερατότητας σε ένα διπλό ή τριπλό παράθυρο μπορεί να επιτευχθεί επίσης με εξασφάλιση συνθηκών κενού αέρος στο διάκενο. Οι υαλοπίνακες κενού αέρος συνδυάζουν χαμηλές θερμικές απώλειες και υψηλές τιμές διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία. Η ιδέα αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1913, αλλά η πρώτη επιτυχής κατασκευή εμφανίστηκε το 1989 από τους Robinson και Collins στο Πανεπιστήμιο του Σίντνεϊ [25]. Το κενό αέρος παρέχει μεγαλύτερη θερμομόνωση συγκριτικά με την πλήρωση του παραθύρου με αέρα ή ευγενή αέρια, αλλά αποτελεί και την πιο ακριβή μέθοδο. Προσφέρει εξαιρετική θερμική απόδοση και αν εξασφαλιστεί αρκετά χαμηλή πίεση, ουσιαστικά μηδενίζεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Γι' αυτόν τον λόγο, στους υαλοπίνακες με κενό αέρος υπάρχουν διάκενα με αρκετά μικρότερο πάχος, έως και $0,2 \text{ mm}$.

Η εξασφάλιση του κενού αέρος στο εσωτερικό του παραθύρου οδηγεί σε καλύτερη θερμική μόνωση και οπτικές ιδιότητες, αφού παρεμποδίζεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Παράλληλα, μπορούν να προστεθούν διαφανή επικαλύμματα χαμηλής εκπομπής στην εσωτερική πλευρά του ενός ή και των δύο γυάλινων φύλλων [26]. Η κατασκευή του συγκεκριμένου τύπου παραθύρων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς είναι αναγκαία η αποφυγή ρωγμών και η επίτευξη υψηλού επιπέδου εκκένωσης και αντίστασης στις δυσμενείς ατμοσφαιρικές συνθήκες για την αύξηση του χρόνου ζωής.

3.8 Υαλοπίνακες με αεροτζέλ (Aerogel glazing)

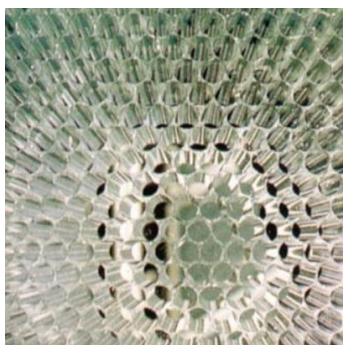
Το αεροτζέλ θεωρείται ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη θερμική μόνωση ανακαινιζόμενων οικιακών κτιρίων. Ως υλικό αποτελείται συνήθως από αφρούς πυριτίου ή άλλων χημικών ενώσεων με μικροπόρους μεγέθους περίπου 10 nm και μπορεί να τοποθετηθεί στο εσωτερικό διαφόρων τύπων διπλών υαλοστασίων με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Παρότι δεν αποτελεί ένα καινούργιο υλικό, έχουν σημειωθεί εντυπωσιακές εξελίξεις στην τεχνολογία του κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ η ενσωμάτωσή του σε παράθυρα ξεκίνησε το 2005.



Σχήμα 3.4: Υαλοπίνακας με αεροτζέλ που έχει ενσωματωθεί στην πρόσοψη του κτιρίου της ZAE στο Wurzburg

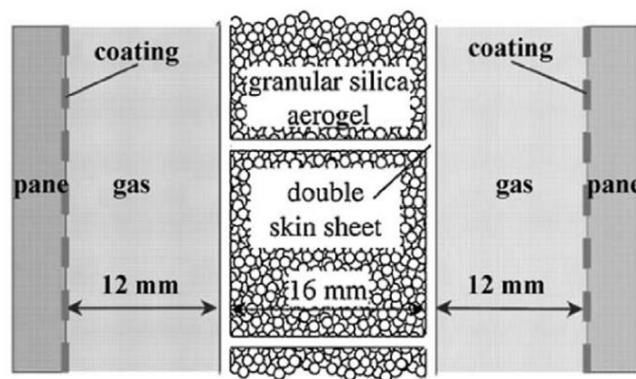
Τα αεροτζέλ διακρίνονται σε μονολιθικά και κοκκώδη. Τα μονολιθικά αεροτζέλ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παραθύρων υψηλής ποιότητας ως προς την προσφερόμενη θερμική άνεση. Τοποθετούνται μεταξύ δύο γυάλινων φύλλων, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μερική αφαίρεση του αέρα με σκοπό τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, καθώς το αεροτζέλ παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τον ακίνητο αέρα. Συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες κατασκευής μονωτικών παραθύρων υψηλής απόδοσης, οι υαλοπίνακες

με αεροτζέλ παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμική διαπερατότητα σε ηλιακή ακτινοβολία, γεγονός που επιδρά θετικά στην ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση κτιρίων σε ψυχρά κλίματα [27]. Οι διατάξεις αυτές, ωστόσο, παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα λόγω της μειωμένης αντοχής και αντίστασης στο νερό του αεροτζέλ. Αν το αεροτζέλ έρθει σε επαφή με νερό, οι επιφανειακές τάσεις στους πόρους μπορεί να καταστρέψουν τη δομή του υλικού [28]. Επίσης, παρουσιάζονται δυσκολίες κατά την κατασκευή υαλοστασίων μεγαλύτερων διαστάσεων και προβλήματα σε εφαρμογές όπου είναι επιθυμητή η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, αφού το αεροτζέλ έχει μπλε χρώμα κατά τη διέλευση των φωτεινών ακτίνων και κίτρινο κατά την ανάκλασή τους. Τέλος, για την κατασκευή γυάλινων παραθύρων αυτού του τύπου απαιτείται ένα λειτουργικό και αεροστεγώς κλεισμένο περιμετρικά άκρο, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Τα κοκκώδη αεροτζέλ τοποθετούνται στο εσωτερικό διπλών, διάφανων τζαμιών με υψηλές μονωτικές ιδιότητες.



Σχήμα 3.5: Η εσωτερική δομή του μονολιθικού αεροτζέλ

Από τις δύο κατηγορίες, τα μονολιθικά αεροτζέλ παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαπερατότητα σε φωτεινή ακτινοβολία (της τάξης του 0,62) σε συνδυασμό με πολύ χαμηλές τιμές θερμικής διαπερατότητας (περίπου $0,60 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ σε διπλό υαλοπίνακα με κενό αέρος) και μικρό πάχος (14 mm). Αντίθετα, στην περίπτωση του κοκκώδους αεροτζέλ, παρατηρείται μείωση της φωτεινής ακτινοβολίας κατά περίπου 60% σε σύγκριση με διπλούς υαλοπίνακες που διαθέτουν επίστρωση low-e, ενώ για το ίδιο συνολικό πάχος ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας είναι λίγο μεγαλύτερος από $1,00 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ [29]. Τέλος, το μονολιθικό αεροτζέλ επιτρέπει την κατασκευή πιο λεπτών παραθύρων με τιμές θερμικής διαπερατότητας μικρότερες από $0,50 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, χωρίς ταυτόχρονη ελάττωση της διαπερατότητας σε ηλιακή ακτινοβολία και με σχετικά μικρή μείωση του διαθέσιμου φυσικού φωτισμού.

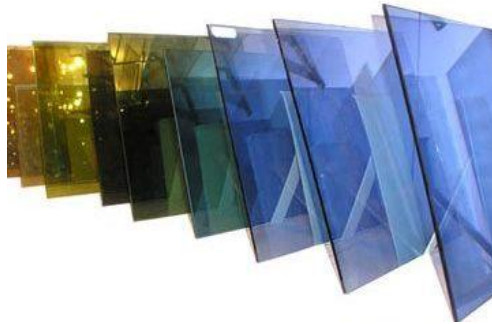


Σχήμα 3.6: Σχηματική αναπαράσταση της δομής διπλού υαλοπίνακα με κοκκώδες αεροτζέλ

Η απόδοσή αυτού του τύπου παραθύρων καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων του υλικού και από το συνολικό πάχος του υαλοστασίου. Η θερμική αγωγιμότητα των παραθύρων με αεροτζέλ μειώνεται με αύξηση του πάχους της στρώσης του υλικού. Παρουσιάζουν συνήθως υψηλές τιμές θερμικής αντίστασης, αλλά και διαπερατότητα σε ηλιακή και φωτεινή ακτινοβολία. Ωστόσο, καθώς τα αεροτζέλ τείνουν να διασκορπίζουν το φως, η ενσωμάτωσή τους σε παράθυρα οδηγεί σε μειωμένη οπτική ποιότητα [30].

3.9 Ανακλαστικοί υαλοπίνακες (Reflective glazing)

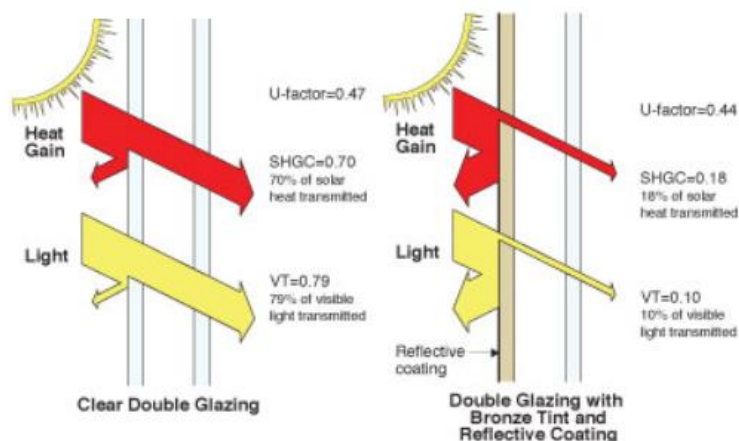
Οι υαλοπίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ηλιακών θερμικών κερδών μέσω της αύξησης της ανακλαστικότητας της επιφάνειάς τους. Η βασική αρχή για την παραγωγή ανακλαστικών γυαλιών είναι η εφαρμογή επιστρώσεων λεπτών στρωμάτων οξειδίων διαφόρων μετάλλων ή μεταλλικών αλάτων στη μία επιφάνειά τους, με αποτέλεσμα το γυαλί να αποκτά αυξημένες ανακλαστικές ιδιότητες, αλλά και διάφορους χρωματισμούς. Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) μπορεί να μειωθεί σε διαφορετικό βαθμό, ανάλογα με το πάχος και την ανακλαστικότητα της επίστρωσης και τη θέση της στο σύστημα του παραθύρου [31]. Τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα οξείδια του τιτανίου, του χρωμίου και του χαλκού. Η ανακλαστική επίστρωση συνδυάζεται με άλλες επιστρώσεις οξειδίων μετάλλων, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός συντελεστής ανάκλασης, ο οποίος εξαρτάται και από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του γυαλιού και από το χρώμα του. Οι επιστρώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφανές ή έγχρωμο γυαλί.



Σχήμα 3.7: Παραδείγματα ανακλαστικών υαλοπινάκων με διαφορετικούς χρωματισμούς

Σε έναν μονό έγχρωμο υαλοπίνακα καθώς μειώνεται ο SHGC, παρατηρείται ακόμα πιο γρήγορη μείωση της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία (VT). Το γεγονός αυτό θέτει πρακτικούς περιορισμούς ως προς τις δυνατότητες μείωσης του ηλιακού θερμικού κέρδους μέσω διαφορετικών χρωματισμών. Συγκριτικά με τους έγχρωμους υαλοπίνακες, οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη μείωση της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, σε ποσοστό έως και 50 %. Προτιμώνται, επίσης, λόγω της οπτικής τους υπεροχής και της ικανότητάς τους να περιορίζουν τη θάμβωση από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου [32]. Παρότι η επίστρωση ανακλά ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δεν εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον υαλοπίνακα και η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία παραμένουν αρκετά υψηλές.

Μία πολύ σημαντική παράμετρος των ανακλαστικών υαλοπινάκων είναι το οπτικό αποτέλεσμα που δίνουν οι χρωματισμοί τους. Οι χρωματισμοί αυτοί δημιουργούνται από τους διαφορετικούς δείκτες διάθλασης που παρουσιάζουν διαφορετικά υλικά, αλλά και δύο στρώματα διαφορετικού πάχους του ίδιου υλικού. Οι κατασκευαστές είναι σε θέση να παράγουν ανακλαστικούς υαλοπίνακες με διαφορετικό οπτικό αποτέλεσμα συνδυάζοντας διαφορετικά υλικά, αλλά και διαφορετικά πάχη επιστρώσεων του ίδιου υλικού. Οι επιστρώσεις υψηλής ανακλαστικότητας συνήθως παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, ωστόσο υπάρχουν και εμπορικά διαθέσιμοι υαλοπίνακες με υψηλότερες τιμές, με σκοπό την εξασφάλιση περισσότερου φυσικού φωτισμού.



Σχήμα 3.8: Σύγκριση της συμπεριφοράς ενός ανακλαστικού διπλού υαλοπίνακα (δεξιά) με έναν συμβατικό διαφανή (αριστερά)

Σε διπλούς υαλοπίνακες η επίστρωση μπορεί να τοποθετηθεί στην εξωτερική ή την εσωτερική πλευρά του διακένου. Όταν τοποθετείται εξωτερικά, η πρόσοψη του υαλοπίνακα γίνεται πιο ομοιόμορφη και ανακλαστική, προσδίδοντας μία μεταλλική απόχρωση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονων ανακλάσεων στο περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προκληθεί θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο και στα γύρω κτίρια, καθώς οι υαλοπίνακες συμπεριφέρονται ως καθρέφτες που ενισχύουν την επίδραση του ήλιου. Έχουν αναφερθεί ακόμα και περιπτώσεις, όπου λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία προκλήθηκε τήξη σε σημεία προσόψεων γειτονικών κτιρίων. Γι' αυτό τον λόγο, η χρήση τους αποφεύγεται ή ακόμα και απαγορεύεται από τοπικούς κανονισμούς σε συγκεκριμένες περιοχές. Όταν η επίστρωση τοποθετείται εσωτερικά, η εμφάνιση και η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα είναι λιγότερο έντονες και το χρώμα του γυαλιού βάσης είναι πιο εμφανές. Όπως και στην περίπτωση των έγχρωμων υαλοπινάκων, η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία συνήθως μειώνεται περισσότερο από τον SHGC. Η ανάκλαση του φωτός γίνεται προς την πλευρά με τη μεγαλύτερη ένταση φωτισμού. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η κατεύθυνση ανάκλασης μπορεί να αντιστραφεί και οι υαλοπίνακες να λειτουργούν ως καθρέφτες προς τον εσωτερικό χώρο. Συνεπώς, οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες δεν προσφέρουν ιδιωτικότητα τη νύχτα, όταν τα εσωτερικά φώτα είναι αναμμένα.

Για ήδη εγκατεστημένους σε κτίρια υαλοπίνακες υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης πλαστικού φιλμ με ανακλαστική επίστρωση στην εσωτερική επιφάνεια των υαλοπινάκων. Ωστόσο, οι επιστρώσεις αυτές δεν είναι εξίσου ανθεκτικές με τους υαλοπίνακες που είναι ανακλαστικοί εκ κατασκευής.

Οι ανακλαστικές επιστρώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως σε εμπορικά κτίρια με μεγάλη γυάλινη επιφάνεια, σε ζεστά κλίματα ή σε παράθυρα με σημαντικά ηλιακά θερμικά κέρδη. Οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες χρησιμοποιούνται επίσης από πολλούς

αρχιτέκτονες χάρη στην ικανότητά τους να περιορίζουν τη θάμβωση στο εσωτερικό του κτιρίου και λόγω της ομοιόμορφης εξωτερικής τους εμφάνισης [31].

3.10 Υαλοπίνακες με αντανάκλαστικές επιστρώσεις (Anti-reflective coated glazing)

Οι υαλοπίνακες αυτού του είδους φέρουν επιστρώσεις και από τις δύο τους πλευρές με σκοπό την εξασφάλιση καλής και ανεμπόδιστης θέας στο εξωτερικό περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις, τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη νύχτα. Ταυτόχρονα, δεν επηρεάζεται η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας. Με την εφαρμογή αντανάκλαστικών επιστρώσεων έχει επίσης διαπιστωθεί ότι είναι δυνατή η αύξηση της διαπερατότητας σε φυσικό φως κατά περίπου 10 % [33].



Σχήμα 3.9: Παράδειγμα εφαρμογής υαλοπινάκων με αντανάκλαστικές επιστρώσεις

3.11 Απορροφητικοί υαλοπίνακες (Heat absorbing glazing)

Και αυτό το είδος υαλοπινάκων συνιστάται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου, καθώς απορροφούν σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζουν τη θερμοπερατότητα, χωρίς παράλληλα να μειώνουν σημαντικά τη φωτοδιαπερατότητά τους. Σε σχέση με τους ανακλαστικούς υαλοπίνακες παρουσιάζουν το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ότι δεν προκαλούν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου, καθώς ανακλούν μόνο ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [19].

Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες δεν προσφέρουν κάποια βελτίωση στον συντελεστή θερμοπερατότητας, αφού η βαφή δεν επηρεάζει την αγωγιμότητα και τον συντελεστή εκπομπής του γυαλιού. Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μεταδίδεται μέσω του υαλοπίνακα με αγωγή και αυξάνει τη θερμοκρασία του. Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, έως και 50 % της απορροφούμενης θερμότητας από έναν μονό υαλοπίνακα μπορεί να μεταφερθεί τελικά στον εσωτερικό χώρο μέσω

συναγωγής και επανεκπομπής της ακτινοβολίας. Γι' αυτόν τον λόγο, η χρήση τους συνεχώς μειώνεται, καθώς προτιμώνται υαλοπίνακες που παρουσιάζουν και χαρακτηριστικά χαμηλής εκπομπής. Εσωτερικά στρώματα διαφανούς γυαλιού ή γυαλιού με ειδικές επιλεκτικές επιστρώσεις μπορούν να ενσωματωθούν σε απορροφητικούς υαλοπίνακες για τη μείωση της ανεπιθύμητης μεταφοράς θερμότητας [34]. Η εφαρμογή απορροφητικών επιστρώσεων μειώνει τον SHGC, ωστόσο η μείωση αυτή δεν είναι σημαντική συγκριτικά με άλλους τύπους υαλοπινάκων (π.χ. τους ανακλαστικούς). Όπως και στην περίπτωση των ανακλαστικών παραθύρων, η μείωση του SHGC οδηγεί και σε σημαντική μείωση της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία. Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες προσφέρουν πιο αποτελεσματικό έλεγχο της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας όταν χρησιμοποιούνται ως το εξωτερικό στρώμα γυαλιού σε διπλά παράθυρα.

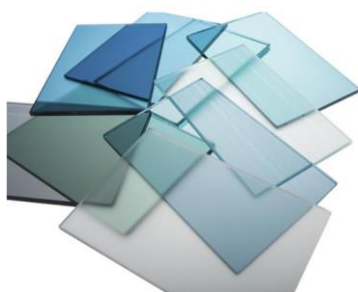
Ένα σημαντικό πρόβλημα για τους απορροφητικούς υαλοπίνακες είναι ο κίνδυνος του «θερμικού σοκ» που προκαλείται από την ανομοιόμορφη έκθεση της επιφάνειάς τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί μεγάλες τοπικές θερμοκρασιακές διαφορές που οδηγούν στην ανάπτυξη θερμικών τάσεων που μπορεί να ξεπεράσουν τα όρια αντοχής του γυαλιού και τελικά να προκαλέσουν τη θραύση του. Το πρόβλημα αυτό είναι πιο έντονο για τους σκουρόχρωμους υαλοπίνακες, αφού απορροφούν περισσότερη θερμότητα και φτάνουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με τους ανοιχτόχρωμους.

3.12 Έγχρωμοι υαλοπίνακες (Tinted glazing)

Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες αποτελούν ουσιαστικά μία κατηγορία απορροφητικών υαλοπινάκων που αποκτούν φυμέ, πράσινο, μπλε, γκρι, χάλκινο ή κάποιο άλλο χρώμα, ανάλογα με τα μεταλλικά οξειδία που προστίθενται στη σύσταση του γυαλιού κατά τη διαδικασία κατασκευής του. Με τη βοήθεια κατάλληλης χημικής επεξεργασίας οι έγχρωμοι υαλοπίνακες παρουσιάζουν χαμηλή θερμοπερατότητα, αλλά και χαμηλή φωτοδιαπερατότητα και συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου, τον περιορισμό της θάμβωσης και την αύξηση της ιδιωτικότητας. Εκτός από τη διαπερατότητα σε ηλιακή ακτινοβολία, οι υπόλοιπες βασικές ιδιότητες του γυαλιού παραμένουν ανεπηρέαστες. Η απόχρωση και η πυκνότητα εξαρτώνται από το πάχος του γυαλιού. Έγχρωμοι υαλοπίνακες μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με τη χρήση κατάλληλων επιστρώσεων. Καθώς παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή απορρόφησης, απορροφούν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τους συμβατικούς υαλοπίνακες. Η ακτινοβολία αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τους.

Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες έχουν την ικανότητα να λειτουργούν ως επιλεκτικά φίλτρα για διαφορετικά τμήματα του ηλιακού φάσματος ανάλογα με τον χρωματισμό τους.

Για παράδειγμα, οι κίτρινοι υαλοπίνακες φιλτράρουν το ιώδες και το μπλε φως. Συνήθως, οι υαλοπίνακες με πράσινο ή μπλε χρώμα προσφέρουν μεγαλύτερη οπτική διαπερατότητα και χαμηλότερη θερμική διαπερατότητα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους έγχρωμους υαλοπίνακες που είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Οι διάφοροι χρωματισμοί των υαλοπινάκων μπορούν, εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας, να προσδώσουν σε ένα κτίριο και μία αισθητικά ωραία εμφάνιση, ενώ το χρώμα αναμένεται να είναι ομοιογενές σε όλο το πάχος τους και ανθεκτικό στο πέρασμα του χρόνου. Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες, εκτός από τη μείωση της διαπερατότητας σε ηλιακή ακτινοβολία, αποσκοπούν επίσης στον περιορισμό της θάμβωσης [35]. Το βασικό μειονέκτημα των έγχρωμων υαλοπινάκων σε σχέση με τους ανακλαστικούς είναι ότι, παρότι διατηρούν τη διαφάνειά τους από την εσωτερική τους πλευρά, μειώνουν τη φωτεινότητα και, ανάλογα με τον χρωματισμό τους, μπορεί να διαστρεβλώνουν τα χρώματα. Ακόμα, συνήθως παρουσιάζουν μικρότερη μείωση των ανεπιθύμητων ηλιακών θερμικών κερδών. Οι περισσότεροι υαλοπίνακες με γκρι ή χάλκινη απόχρωση δεν είναι επιλεκτικοί και μειώνουν τη διείσδυση τόσο του φυσικού φωτός, όσο και της θερμότητας. Τα πιο διαδεδομένα χρώματα είναι το γκρι, το μπλε και το πράσινο, καθώς δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την αντίληψη των χρωμάτων του εξωτερικού περιβάλλοντος και συνδυάζονται συνήθως καλά με τα περισσότερα χρώματα που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική. Σε θερμά κλίματα οι σκουρόχρωμοι υαλοπίνακες θα πρέπει να αποφεύγονται, καθώς απορροφούν περισσότερο φωτεινή παρά θερμική ακτινοβολία.



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα διαθέσιμων στο εμπόριο πράσινων υαλοπινάκων

Πλέον, οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει έγχρωμους υαλοπίνακες υψηλής απόδοσης, οι οποίοι είναι περισσότερο επιλεκτικοί. Αυτό επιτυγχάνεται ενσωματώνοντας κατάλληλες πρόσθετες ουσίες κατά την κατασκευή του γυαλιού. Η βελτίωση της επιλεκτικότητας σε σχέση με τους συμβατικούς υαλοπίνακες μπλε και πράσινου χρώματος είναι μικρότερη, καθώς αυτοί παρουσιάζουν ήδη επιλεκτική συμπεριφορά. Στους έγχρωμους υαλοπίνακες υψηλής απόδοσης με ανοιχτό μπλε ή πράσινο χρώμα παρατηρείται σημαντική μείωση του SHGC.

Σε διπλά παράθυρα, οι έγχρωμες στρώσεις γυαλιού τοποθετούνται στην εξωτερική πλευρά, έτσι ώστε η θερμότητα που συσσωρεύεται σε αυτές να διοχετεύεται με μεγαλύτερη ευκολία στο εξωτερικό περιβάλλον. Στην περίπτωση των ήδη

εγκατεστημένων σε κτίρια υαλοπινάκων υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης πλαστικού φιλμ με έγχρωμη επίστρωση στην εσωτερική επιφάνειά τους. Η επίστρωση αυτή μειώνει τα ηλιακά θερμικά κέρδη, αλλά, όπως και στην περίπτωση των ανακλαστικών υαλοπινάκων, δεν είναι εξίσου αποτελεσματική ή ανθεκτική με τους εκ κατασκευής επιλεκτικούς έγχρωμους υαλοπίνακες [36].

3.13 Φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες (Photovoltaic glazing)

Οι φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες αποτελούν μία καινούργια ιδέα της μοντέρνας αρχιτεκτονικής που παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα κτίρια. Η αξιοποίηση φωτοβολταϊκών κελιών σε συστήματα παραθύρων προσφέρει σκίαση με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για αυτό το είδος παραθύρων.

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στον ψεκασμό νανοσωματιδίων πυριτίου που συμπεριφέρονται ως φωτοβολταϊκά κελιά στην επιφάνεια του υαλοπίνακα. Στο παρελθόν, οι τεχνολογίες φωτοβολταϊκών παραθύρων που υπήρχαν στην αγορά βασίζονταν σε αδιαφανή φωτοβολταϊκά κελιά κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si PV cells), τα οποία καθιστούσαν τα παράθυρα αναποτελεσματικά σε οικιακές εφαρμογές. Οι υαλοπίνακες αυτοί έγιναν πολύ πιο διαδεδομένοι στην αγορά μετά από τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών κελιών άμορφου πυριτίου (semi-transparent a-Si PV cells). Κατά τη διαδικασία παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού υαλοπίνακα με άμορφο πυρίτιο, τα κελιά γίνονται πολύ λεπτά μέσω της προσθήκης ενός κανονικού μοτίβου μικροσκοπικών οπών. Η συνολική επιφάνεια την οπών καθορίζει την ηλιακή διαπερατότητα του παραθύρου, ενώ η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από την οπτική του διαπερατότητα [30]. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι τα ανεπιθύμητα θερμικά ηλιακά κέρδη που προκύπτουν από τη χρήση των συμβατικών παραθύρων κατά τους θερινούς μήνες μπορούν να περιοριστούν σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% μέσω φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων [28].



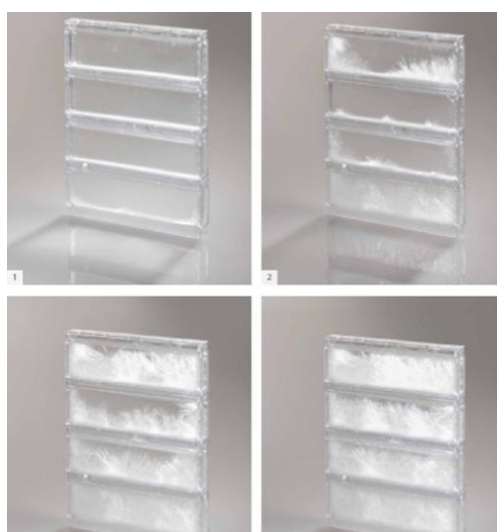
Σχήμα 3.11: Παράδειγμα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων σε κτίριο

Οι φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες μπορούν να ενσωματωθούν στις προσόψεις ή την οροφή των κτιρίων ή και σε ήδη έτοιμα συστήματα παραθύρων χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά την αισθητική του κτιρίου. Λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κελιών αναμένεται ότι η χρήση των φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων θα καταστεί πολύ πιο διαδεδομένη σε μελλοντικές εφαρμογές.

3.14 Υαλοπίνακες με υλικά αλλαγής φάσης (PCM glazing)

Τα τελευταία χρόνια σημειώθηκε μεγάλο ενδιαφέρον για τα υλικά αλλαγής φάσης (Phase Change Materials-PCMs) με σκοπό τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε κτίρια μέσω της θερμικής ρύθμισης του κτιριακού κελύφους. Τα υλικά αλλαγής φάσης μεταβαίνουν από στερεή σε υγρή φάση καθώς απορροφούν ενέργεια από μία πηγή θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, επιστρέφουν από την υγρή στη στερεή τους φάση, εκλύοντας ταυτόχρονα τη θερμότητα που είχαν αποθηκεύσει προηγουμένως. Αυτή η χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών αλλαγής φάσης επιτρέπει την εφαρμογή τους σε παράθυρα με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Μεταξύ των διάφορων τύπων υλικών αλλαγής φάσης, η παραφίνη είναι πιο διαδεδομένη λόγω του χαμηλού της κόστους. Ωστόσο, η χαμηλή θερμική της αγωγιμότητα και η μεγάλη μεταβολή του όγκου της που παρατηρείται κατά την αλλαγή φάσης αποτελούν τα σημαντικότερα προβλήματα που περιορίζουν τις εφαρμογές αυτού του είδους παραθύρων σε κτίρια [37].

Η εταιρεία GlassX κατασκεύασε ένα υαλοπίνακα που περιλάμβανε υλικό αλλαγής φάσης και ονομαζόταν “GlassX Crystal”. Σύμφωνα με τα φυλλάδια της εταιρείας ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας του υαλοπίνακα είναι μικρότερος από 0,50 W/m² K. Η διαδικασία της αλλαγής φάσης του υαλοπίνακα φαίνεται στη **Σχήμα 3.12 [30]**.



Σχήμα 3.12: Αλλαγή φάσης στον υαλοπίνακα με υλικό αλλαγής φάσης GlassX Crystal

3.15 Αυτοκαθαριζόμενοι υαλοπίνακες (Self-cleaning glazing)

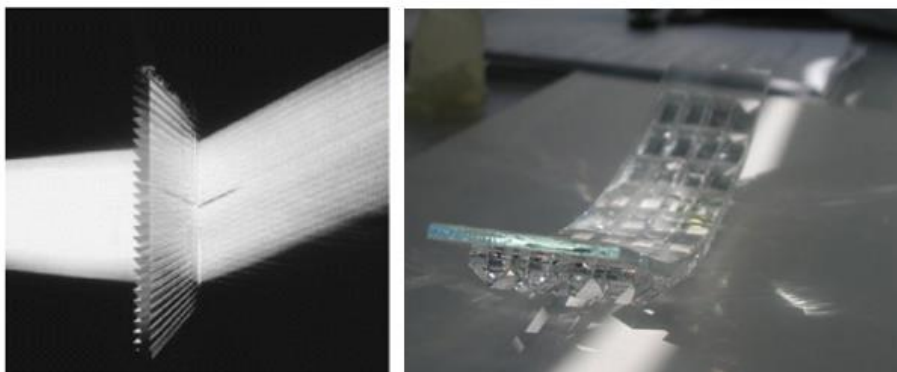
Η ιδέα του αυτοκαθαριζόμενου υαλοπίνακα παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Watanabe και τους συνεργάτες του το 1992 σε ένα κεραμικό πλακάκι με επίστρωση διοξειδίου του τιτανίου (TiO_2) [38]. Η επίστρωση αυτή είναι σε ικανή να αποσυνθέσει οργανικές ενώσεις που «μολύνουν» την επιφάνεια με τη βοήθεια της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ιδέα αυτή χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στα καλύμματα των φαναριών στις σήραγγες των αυτοκινητοδρόμων της Ιαπωνίας. Ο λόγος του ρυθμού «απολύμανσης» (decontamination) προς τον ρυθμό «μόλυνσης» (contamination) της επιφάνειας είναι καθοριστικός για την απόδοση αυτού του τύπου υαλοπίνακα. Ο φωτοκαταλύτης TiO_2 είναι σε θέση να καθαρίσει την επιφάνεια μόνο εφόσον ο ρυθμός απολύμανσης είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό μόλυνσης. Η αποτελεσματικότητα της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης μπορεί να βελτιωθεί μέσω της ροής φυσικού νερού, λόγω των υδρόφιλων ιδιοτήτων της επίστρωσης TiO_2 .

Η καλύτερη περίπτωση εφαρμογής των αυτοκαθαριζόμενων επιστρώσεων είναι τα εξωτερικά στρώματα υλικών σε κατασκευές, καθώς είναι εκτεθειμένα σε άφθονη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας και βροχοπτώσεων. Οι επιστρώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλακάκια, γυαλί, πλαστικά φιλμ, τσιμέντο κ.ά. που έχουν ήδη κατασκευαστεί στην Ιαπωνία από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και σε άλλες χώρες τα τελευταία χρόνια.

Οι αυτοκαθαριζόμενοι υαλοπίνακες μπορούν να συνδυαστούν με αντανάκλαστικές επιστρώσεις για την κατασκευή επιστρώσεων με πολλαπλές λειτουργίες. Μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε τριπλά παράθυρα, παράθυρα με κενό αέρος ή παράθυρα με αεροτζέλ με υψηλή ενεργειακή απόδοση, καθώς η αυτοκαθαριζόμενη επίστρωση τοποθετείται στην εξωτερική πλευρά του υαλοπίνακα [30].

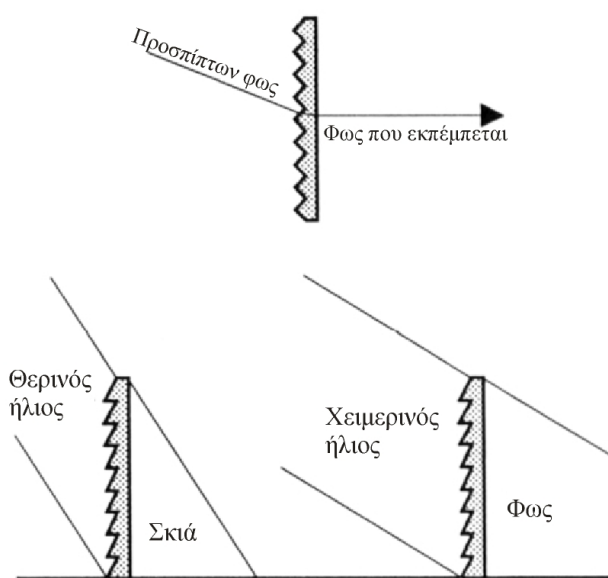
3.16 Πρισματικοί υαλοπίνακες (Prismatic glazing)

Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από μία επιφάνεια με εσοχές και προεξοχές και μία εντελώς επίπεδη, με αποτέλεσμα τη διάχυση του φωτός που προσπίπτει σε αυτές. Οι πρισματικές, πριονωτές επιφάνειες κατασκευάζονται συνήθως από ακρυλικά υλικά. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αλλαγή της διεύθυνσης ενός ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας, διάχυτος φυσικός φωτισμός και περιορισμός της θάμβωσης.



Σχήμα 3.13: Αλλαγή της διεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε πρισματικό υαλοπίνακα (αριστερά) και παράδειγμα πρισματικού γυαλιού (δεξιά)

Η λειτουργία του συστήματος στηρίζεται στο φαινόμενο της διάθλασης του φωτός στην άνω πλευρά της πρισματικής επιφάνειας και την ολική ανάκλασή του στην εσωτερική της επιφάνεια. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να απορρίπτει ή να ανακατευθύνει το φως σε έναν χώρο, ανάλογα με την κατασκευή της διάταξης. Κατά τους θερινούς μήνες που ο ήλιος βρίσκεται ψηλά στον ουρανό και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη, η φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρίσματος, ανακλάται στην απέναντι επιφάνεια και στη συνέχεια προς τα έξω, δηλαδή η διάταξη λειτουργεί ως σύστημα ηλιοπροστασίας. Αντίθετα, κατά τον χειμώνα, που η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη, πραγματοποιείται διάθλαση των φωτεινών ακτίνων προς τον εσωτερικό χώρο [39].



Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των πρισματικών στοιχείων

Τα πρισματικά συστήματα μπορούν να είναι σταθερά ή κινητά και χρησιμοποιούνται ως ολόσωμες κατασκευές, ως επιμέρους κεκλιμένες διατάξεις ή σε συνδυασμό με επιπρόσθετα πρισματικά στοιχεία σε οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο.

Παρουσιάζουν καλές οπτικές ιδιότητες παρά τη χρήση φτηνού και χαμηλής ποιότητας γυαλιού για την κατασκευή τους. Συχνά χρησιμοποιούνται δύο στρώσεις, με την πρισματική επιφάνεια προς την εσωτερική πλευρά με σκοπό την προστασία της από την σκόνη ή συνδυάζονται με διπλά υαλοστάσια. Οι εφαρμογές τους περιλαμβάνουν διατάξεις ηλιοπροστασίας και περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη κατανομή του φωτός σε ένα σκοτεινό χώρο.

Βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι η σημαντική μείωση της θάμβωσης σε σχέση με τα συμβατικά παράθυρα, αλλά και η ημιδιαφανής τους επιφάνεια, η οποία δεν παρέχει καλή οπτική αντίληψη του εσωτερικού χώρου, χωρίς, ωστόσο, να παρεμποδίζει την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Ακόμα, καθώς τα συστήματα αυτά διαθέτουν στρώματα γυαλιού και από τις δύο πλευρές, δεν απαιτείται καθαρισμός τους. Βασικά μειονεκτήματα των ακίνητων πρισματικών διατάξεων αποτελούν η αισθητική υποβάθμιση της όψης του κτιρίου και η έλλειψη πλήρους ηλιοπροστασίας, λόγω της μεταβαλλόμενης θέσης του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ακόμα, κατά την εγκατάστασή των συστημάτων αυτού του είδους ενδέχεται να προκύψουν κατασκευαστικά προβλήματα αναφορικά με το κενό μεταξύ των στρώσεων, ενώ το κόστος κατασκευής είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με τα συμβατικά παράθυρα, αν και συχνά αντισταθμίζεται χάρη στην προκύπτουσα ενεργειακή εξοικονόμηση. Τέλος, σε ειδικές εφαρμογές (για παράδειγμα σε αίθουσες με έργα τέχνης) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η ικανότητα των συστημάτων αυτών να αναλύουν τις φωτεινές ακτίνες στα επιμέρους χρώματα που τις αποτελούν [6].

3.17 Ολογραφικοί υαλοπίνακες (Holographic glazing)

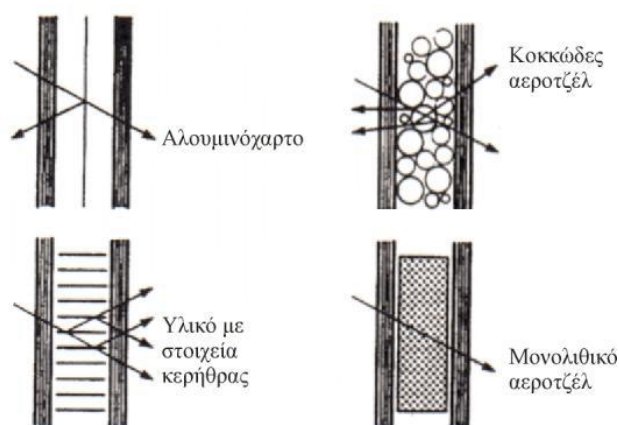
Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται στην αλλαγή της διεύθυνσης του φωτός στο διάφανο περίβλημα του υαλοστασίου μέσω της αξιοποίησης του φαινομένου της διάθλασης, η οποία προκαλείται από την ολογραφική τεχνική κατασκευής του. Η ειδική πολυμερής μεμβράνη που φέρει λεπτές λωρίδες υλικού ανακατευθύνει μόνο την ακτινοβολία που προσπίπτει υπό συγκεκριμένη γωνία, ενώ δεν επηρεάζει την ακτινοβολία που προσπίπτει υπό άλλες διευθύνσεις. Στη συνέχεια, το παράθυρο εκτρέπει προς τον εσωτερικό χώρο τη διαχεόμενη ηλιακή ακτινοβολία με συγκεκριμένη γωνία εκτροπής, η οποία καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Τα ολογραφικά οπτικά στοιχεία, είτε σε επίπεδη είτε σε τρισδιάστατη μορφή, εστιάζουν το προσπίπτον ηλιακό φως και το διασπούν φασματικά. Ο τρόπος διάθλασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την κατασκευή του ολογράμματος, η οποία πραγματοποιείται με μεθόδους παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στη φωτογραφία, ενώ οι επιθυμητές οπτικές ιδιότητες

διαμορφώνονται με τη χρήση ακτίνων λέιζερ. Είναι δυνατή η επίτευξη ικανότητας διάθλασης μέχρι και 90 %, γεγονός που σημαίνει ότι το 90 % του εισερχόμενου φωτός διαθλάται με μία συγκεκριμένη γωνία εξόδου. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλιοπροστασία, για την αύξηση της φωτεινότητας σε σκοτεινούς χώρους, αλλά και για την ανάκλαση και απομάκρυνση του προσπίπτοντος στο παράθυρο ηλιακού φωτός υπό καθορισμένη γωνία [6]. Τα τρισδιάστατα ολογραφικά οπτικά στοιχεία μπορούν να συνδυαστούν και με φωτοβολταϊκές μεμβράνες.

3.18 Διαφανή μονωτικά υλικά (TIM-Transparent Insulation Materials)

Τα διαφανή μονωτικά υλικά είναι διατάξεις τριχοειδών σωλήνων, επίπεδων λεπτών φύλλων ή στοιχείων με σχήμα κερήθρας που σχηματίζουν κελιά κατάλληλων διαστάσεων. Κατασκευάζονται από πολυκαρβονικά πολυμερή και γυαλί.



Σχήμα 3.15: Σχηματική αναπαράσταση των διάφορων τύπων διαφανών μονωτικών υλικών

Καθώς το βασικό χαρακτηριστικό των υλικών αυτών είναι η ικανότητα διάθλασης και διάχυσης του ορατού φωτός δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που είναι επιθυμητή η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται κυρίως σε τοίχους θερμικής αποθήκευσης, σε ανοίγματα οροφών και σε προστεγάσματα αποτροπής του ήλιου που μπορεί να είναι οριζόντια ή υπό κλίση. Βασικό μειονέκτημα των υλικών αυτών αποτελεί η ανάγκη σημαντικού πάχους του υλικού για την επίτευξη αρκετά χαμηλών τιμών θερμικής διαπερατότητας. Για παράδειγμα, για την επίτευξη συντελεστή διαπερατότητας με τιμή στο εύρος 1,0-1,5 W/m² K θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό πάχους 50 - 100 mm. Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα για τα υαλοστάσια αυτού του είδους που κατασκευάζονται από γυαλί σε διαφορετικές από τις συνήθεις συνθήκες πίεσης είναι η ανάγκη για ένα λειτουργικό και αεροστεγώς κλεισμένο περιμετρικά άκρο. Τέλος, σημειώνεται ότι καθώς η συμπεριφορά των υλικών αυτών διαφοροποιείται ανάλογα με την εποχή του χρόνου,

τα υαλοστάσια αυτά μπορούν να θεωρηθούν και ως μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διαπερατότητα των παραθύρων μπορεί να είναι ως και 20 % μεγαλύτερη τον χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι [40].

3.19 Υαλοπίνακες με μεμβράνες μεταβλητής διαπερατότητας

Οι επιστρώσεις αυτές παρουσιάζουν ανισότροπες οπτικές ιδιότητες που καθορίζονται από τη γωνία πρόσπτωσης της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας διευκολύνεται σε διευθύνσεις παράλληλες στους άξονες των διακλαδώσεων. Οι διατάξεις αυτές αποσκοπούν στην παρεμπόδιση της διέλευσης ηλιακής ακτινοβολίας με μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, η οποία συναντάται κατά κανόνα τους καλοκαιρινούς μήνες. Αντίθετα, είναι επιθυμητή η διέλευση της ακτινοβολίας με μικρές γωνίες πρόσπτωσης, ώστε να επιτυγχάνεται καλή ορατότητα. Μία τέτοια μεμβράνη μπορεί να συνδυαστεί με αντίστοιχη μεμβράνη χαμηλής εκπομπής, με σκοπό την αύξηση της ετήσιας θερμικής απόδοσης σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητή η αποτροπή της θέρμανσης, καθώς οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής μειώνουν το θερμικό κέρδος από την υπέρυθρη ακτινοβολία.

4 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.

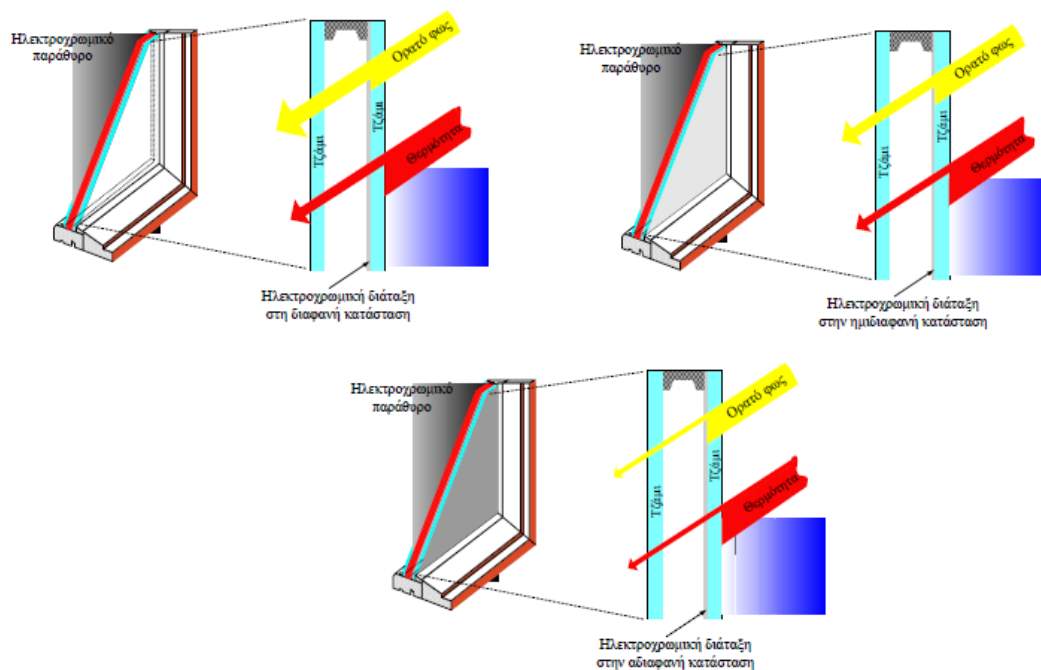
Η επιλογή των παραθύρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο τύπος του κτιρίου και οι κλιματικές συνθήκες. Τα είδη των παραθύρων που είναι διαθέσιμα σήμερα περιλαμβάνουν μονά τζάμια χαμηλού κόστους, διπλά ή τριπλά τζάμια με υψηλή ποιότητα μόνωσης, παράθυρα με διάφορες λειτουργίες ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως είναι τα παράθυρα τύπου low-e και τα μεταλλικά παράθυρα υψηλής ανακλαστικότητας, καθώς και καινοτόμα «έξυπνα» παράθυρα, τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα δυναμικού ελέγχου της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας [14].

Ο όρος «έξυπνα παράθυρα» περιλαμβάνει υαλοπίνακες που διαθέτουν την ικανότητα μεταβολής των 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. Τα χρωμογενετικά υλικά μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: τα ηλεκτροχρωμικά, τα θερμοχρωμικά, τα φωτοχρωμικά και τα αεριοχρωμικά υλικά. Ως έξυπνα παράθυρα χαρακτηρίζονται επίσης τα υαλοστάσια υγρών κρυστάλλων (liquid crystal glazing), καθώς και οι συσκευές αιωρούμενων σωματιδίων (suspended particle devices). Οι παραπάνω κατηγορίες υαλοπινάκων θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο.

4.1 Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες (Electrochromic glazing)

Ως ηλεκτροχρωμικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που αλλάζουν χρώμα σε ανταπόκριση με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο μέσω οξειδωσης (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. Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μπορούν να μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους μεταξύ της πλήρους διαφανούς και της χρωματισμένης τους κατάστασης χωρίς, ωστόσο, να γίνονται ποτέ εντελώς αδιαφανή.

Δηλαδή, ανεξάρτητα με την ένταση του χρωματισμού των παραθύρων υπάρχει πάντα οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ρυθμίζουν τη διαπερατότητα, την ανακλαστικότητα, την απορροφητικότητα και την ικανότητα εκπομπής τους μεταξύ δύο ακραίων τιμών. 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 αγωγή υμένα.



Σχήμα 4.1: Η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας και η ροή θερμότητας σε ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο

4.1.1 Αρχή λειτουργίας

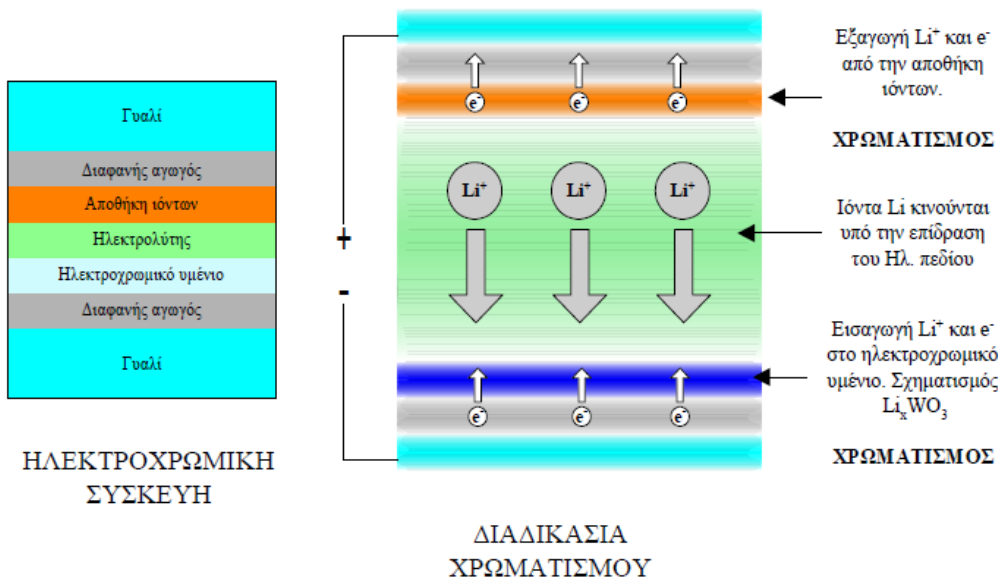
Όταν ένα ηλεκτροχρωμικό παράθυρο βρίσκεται σε διαφανή-αποχρωματισμένη κατάσταση ένα ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας μπορεί να διαπερνά τη μάζα του. Η αρχική αυτή τιμή της διαπερατότητας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως είναι το είδος και το πάχος των διάφορων στρωμάτων υλικών, το είδος του ηλεκτρολύτη και το είδος των χρησιμοποιούμενων κρυστάλλων. Κατά την αλλαγή φάσης παρατηρείται σημαντική μείωση της διαπερατότητας, η οποία μπορεί να φθάσει και το 90 %, ανάλογα με τα επιμέρους χαρακτηριστικά της διάταξης. Ακόμα, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας ανακλάται από τα υμένα

και τα κρύσταλλα του συστήματος προς το εξωτερικό περιβάλλον. Στην αδιαφανή-χρωματισμένη του κατάσταση το ηλεκτροχρωμικό υμένιο απορροφά σημαντικό ποσοστό της υπέρυθρης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Το γεγονός αυτό συντελεί στην αύξηση του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας του παραθύρου, ενώ τις θερμές καλοκαιρινές ημέρες υπάρχει ο κίνδυνος της καταστροφής του λόγω υπερθέρμανσης. Συνεπώς, για την εξασφάλιση μεγάλης διάρκειας ζωής της ηλεκτροχρωμικής διάταξης, αλλά και για τον περιορισμό των θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο, απαιτείται η χρήση ειδικών επιστρώσεων με χαμηλό συντελεστή εκπομπής [41]. 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 θερμοκούς αισθητήρες και αισθητήρες φωτισμού. 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.

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 ως την 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 3-5 Volt DC) τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μεταβάλλουν αντιστρεπτά τη διαπερατότητά τους στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο [8].

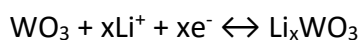
Σε έναν υαλοπίνακα είναι αναγκαία η τοποθέτηση πολλαπλών επιστρώσεων ηλεκτροχρωμικής βαφής. Μία τυπική ηλεκτροχρωμική συσκευή αποτελείται από τα ακόλουθα 5 διαδοχικά λεπτά στρώματα, τοποθετημένα πάνω σε ένα μονό γυάλινο υπόστρωμα ή ανάμεσα σε δύο γυάλινα υποστρώματα:

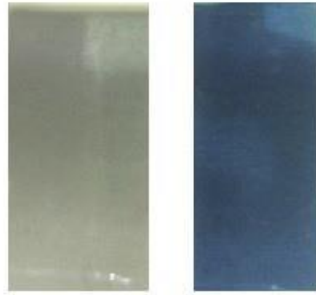
1. Ένα διαφανές και ηλεκτρικά αγώγιμο υμένιο (στις περισσότερες περιπτώσεις κάποιο οξείδιο του κασσίτερου με προσμίξεις ινδίου), με υπόστρωμα γυαλί
2. Ένα ηλεκτροχρωμικό υμένιο που αποτελεί το οπτικά ενεργό τμήμα της διάταξης και κατασκευάζεται συνήθως από WO_3
3. Έναν ηλεκτρολύτη (πολυμερή ή στερεό) 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 [42]



Σχήμα 4.2: 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 του **Σχήματος 4.2**, 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 WO_3 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 [9]. Η αντίδραση οξειδοαναγωγής που περιγράφει τη διαδικασία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:





Σχήμα 4.3: 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 παράμετρος που περιγράφει τη μεταβολή στην οπτική κατάσταση ενός ηλεκτροχρωμικού συστήματος είναι η μεταβολή της οπτικής του πυκνότητας, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta OD_\lambda = \log \left(\frac{\tau_{b\lambda}}{\tau_{c\lambda}} \right)$$

Με $\tau_{b\lambda}$ και $\tau_{c\lambda}$ συμβολίζονται οι διαπερατότητες του ηλεκτροχρωμικού συστήματος στη διαφανή και στη χρωματισμένη κατάσταση αντίστοιχα για ακτινοβολία μήκους κύματος λ .

Επίσης, μπορεί να οριστεί η απόδοση του χρωματισμού η_λ που αποτελεί ένα μέτρο της έντασης της αλλαγής του χρώματος του συστήματος ανά μονάδα εισερχόμενου φορτίου:

$$\eta_\lambda = \frac{\Delta OD_\lambda}{Q}$$

Στην παραπάνω σχέση με Q συμβολίζεται το εισερχόμενο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας.

4.1.2 Σημαντικές ιδιότητες

Υπάρχουν ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που απαιτούν συνεχή τροφοδοσία για να διατηρήσουν μία κατάσταση, ενώ άλλα έχουν την ικανότητα να διατηρούν τον χρωματισμό της για σημαντικό χρονικό διάστημα μετά από την αποσύνδεσή τους από το κύκλωμα. Η ιδιότητα αυτή χαρακτηρίζεται ως ηλεκτροχρωμική μνήμη και είναι υψίστης σημασίας, καθώς όσο μικρότερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερη

ενέργεια θα πρέπει να καταναλώνει η ηλεκτροχρωμική διάταξη για να διατηρεί σταθερό τον χρωματισμό της. Οι υαλοπίνακες αυτού του είδους χρειάζονται ενέργεια για την εξασφάλιση της μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη.

Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτροχρωμικού συστήματος αποτελούν η αντιστρεψιμότητα, η επαναληψιμότητα και η διάρκεια ζωής. Η αντιστρεψιμότητα και η επαναληψιμότητα υπονοούν ότι σε κάθε κύκλο λειτουργίας το εισερχόμενο και το εξερχόμενο φορτίο θα πρέπει να είναι ίσα και ότι αυτή η τιμή θα πρέπει να διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Τέλος, 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 χρόνια, θεωρώντας ότι παρουσιάζουν περίπου 5 κύκλους λειτουργίας ημερησίως.

Μία αρκετά ενδιαφέρουσα ιδιότητα των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων είναι η εξάρτηση που παρουσιάζει ο χρόνος μετάβασης από την επιφάνεια των υαλοπινάκων, τα υλικά κατασκευής και τη θερμοκρασία. Στη γενική περίπτωση είναι δυνατή η διατήρηση της συσκευής σε οποιαδήποτε από τις ενδιάμεσες καταστάσεις. Για έναν υαλοπίνακα διαστάσεων 10 cm x 30 cm έχει αποδειχθεί ότι η πλήρης μετάβαση από τη διαφανή στη χρωματισμένη κατάσταση απαιτεί περίπου 300 s, ενώ για έναν υαλοπίνακα διαστάσεων 1,2 m x 0,8 m απαιτούνται περίπου 20 min για έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας, δηλαδή για τη μετάβαση στην αδιαφανή του κατάσταση και τον αποχρωματισμό του. Η διαδικασία του χρωματισμού διαρκεί συνήθως 12 min, ενώ ο αποχρωματισμός διαρκεί 8 min, δηλαδή η διαδικασία του χρωματισμού είναι πιο αργή. Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες συνήθως έχουν δύο βασικές καταστάσεις, την πλήρως διαφανή και την αδιαφανή κατάσταση, ενώ υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας υαλοπινάκων με διαφορετικά χρώματα (μπλε, κίτρινο, πράσινο, κόκκινο, γκρι κ.ά.). Έχει διαπιστωθεί ότι οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες που κατασκευάζονται από συνδυασμούς πολυμερών είναι οι πιο κατάλληλοι για τη δημιουργία διαφορετικών χρωμάτων μέσω της αλλαγής της δομής τους. Όταν ένα υλικό εμφανίζει περισσότερες από δύο ηλεκτροχρωμικές καταστάσεις, δηλαδή προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας πολλών διαφορετικών χρωμάτων, τότε χαρακτηρίζεται ως πολυηλεκτροχρωμικό (polielelectrochromic). Οι δυνατότητες για τη δημιουργία διαφορετικών χρωμάτων βρίσκονται ακόμα υπό μελέτη.

4.1.3 Ανάλυση της δομής ενός ηλεκτροχρωμικού παραθύρου

Όπως προαναφέρθηκε, ως υπόστρωμα για την παρασκευή των διαφανών και ηλεκτρικά αγώγιμων υμενίων χρησιμοποιείται συνήθως γυαλί. Πιο σύνθετες διατάξεις περιλαμβάνουν υμένια με δομή Διηλεκτρικό/Μέταλλο/Διηλεκτρικό και χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικά αγώγιμα υμένια λόγω της ύπαρξης του μετάλλου.

Καθώς οι διατάξεις αυτές έχουν αρκετά χαμηλό συντελεστή εκπομπής κρίνονται κατάλληλες για την εφαρμογή τους σε κτίρια, με σκοπό τον έλεγχο του ηλιακού θερμικού κέρδους. Συστήματα ZnS/Ag/ZnS έχουν μελετηθεί ως αγώγιμα ηλεκτρόδια σε ηλεκτροχρωμικές διατάξεις, παρουσιάζοντας πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα [43].

Το ηλεκτροχρωμικό υμένιο αποτελεί το οπτικά ενεργό τμήμα της διάταξης και κατασκευάζεται συνήθως από WO_3 σε διατάξεις ανόργανων μεταλλικών οξειδίων. Χαρακτηρίζεται και ως ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode). Τα ηλεκτρόδια ηλεκτροχρωμικών συσκευών με μεγάλη επιφάνεια που χρησιμοποιούνται σε αρχιτεκτονικές εφαρμογές συνήθως κατασκευάζονται με εναπόθεση σε συνθήκες κενού (π.χ. με ψεκασμό). Το φαινόμενο του ηλεκτροχρωμισμού έχει γενικά παρατηρηθεί σε οξείδια των στοιχείων μετάπτωσης. Παρότι όλα τα οξείδια αυτά έχουν την ιδιότητα να μεταβάλλουν τις οπτικές τους ιδιότητες με εξαναγκασμένη εισαγωγή και εξαγωγή ιόντων, τα μόνα κατάλληλα για εφαρμογή σε ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι αυτά που είναι πλήρως διαφανή στην ορατή ακτινοβολία. Αυτά είναι τα οξείδια των Ti, Ni, Nb, Mo, Ta, W και Ir. Τα ηλεκτροχρωμικά υμένια πρέπει να είναι διαπερατά σε ελαφριά ιόντα και να παρουσιάζουν επαρκή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα χρησιμοποιούμενα ιόντα είναι καλό να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα για βέλτιστες συνθήκες μεταφοράς. Συνεπώς, καταλληλότερα θεωρούνται τα πρωτόνια (H^+), Li^+ , Na^+ και K^+ . Τα ιόντα αυτά τελικά δεσμεύονται από τα πλεγματικά κενά των οξειδίων. Μεγαλύτερη δέσμευση ιόντων παρατηρείται στα ένυδρα ηλεκτροχρωμικά υμένια [8].

Ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης θα πρέπει να εμφανίζει χαμηλή ιοντική αγωγιμότητα και μπορεί να είναι υγρός, να έχει μορφή στερεού υμενίου που παρασκευάζεται με φυσικές ή χημικές μεθόδους ή να είναι πολυμερές σε μορφή gel. Ο ηλεκτρολύτης δρα σαν μονωτής ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια και επιτρέπει την κίνηση των ιόντων μόνο κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού.

Το φορτίο που χρησιμοποιείται για τον χρωματισμό του οξειδίου του βολφραμίου πρέπει να αποθηκεύεται εκτός του ηλεκτροδίου εργασίας, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο αποχρωματισμός. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ως αντί-ηλεκτρόδιο (counter electrode) ένα υμένιο αποθήκευσης ιόντων. Για την κατασκευή του υμενίου αυτού μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά, όπως τα NiO , Ta_2O_5 , CeO_x . Πιο διαδεδομένα είναι τα υμένια από οξείδιο του βαναδίου (V_2O_5), καθώς αποτελούνται από επάλληλα στρώματα και προσφέρουν τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλου ποσοστού ιόντων χωρίς σημαντική αλλαγή του χρώματος [44].

Οι πειραματικές μετρήσεις ηλεκτροχρωμικών φιλμ πραγματοποιούνται συνήθως με τη βοήθεια ενός ηλεκτροχημικού κελιού τριών ηλεκτροδίων. Το κελί αυτό αποτελείται από το ηλεκτρόδιο εργασίας (working electrode), το ηλεκτρόδιο

αναφοράς (reference electrode) και το αντί-ηλεκτρόδιο (counter electrode), τα οποία βυθίζονται στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας μετράται ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς, του οποίου το δυναμικό παραμένει συνεχώς σταθερό. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας του χρωματισμού και του αποχρωματισμού η διαφορά δυναμικού που μετράται αποτελεί ουσιαστικά το άθροισμα όλων των δυναμικών που προκύπτουν ανάμεσα στο διάφανο αγώγιμο οξειδίο που αποτελεί τη βάση του ηλεκτροχρωμικού φιλμ και το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Καθώς τόσο το διάφανο αγώγιμο οξειδίο, όσο και ο ηλεκτρολύτης παρουσιάζουν αρκετά υψηλή αγωγιμότητα, η πτώση τάσης σε αυτά είναι μικρή. Θεωρώντας μηδενική την εσωτερική αντίσταση του ηλεκτροχρωμικού φιλμ προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μέρος της διαφοράς δυναμικού εφαρμόζεται στη διεπιφάνεια ηλεκτροδίου εργασίας και ηλεκτρολύτη.

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. Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών υαλοστασίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ενώ είναι δυνατή και η ενσωμάτωσή τους στο κεντρικό σύστημα διαχείρισης του κτιρίου (Building Management System-BMS).

4.1.4 Κατηγοριοποίηση ηλεκτροχρωμικών παραθύρων

Τα ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια με επιστρώσεις οξειδίου του βολφραμίου έχουν αναπτυχθεί εδώ και δεκαετίες και είναι πλέον διαθέσιμα ως εμπορικά προϊόντα από διάφορους κατασκευαστές παραθύρων [45]. Τα συμβατικά ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια παρουσιάζουν την ιδιότητα του “broadband switching”, δηλαδή οι διαπερατότητές τους στις περιοχές του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου (NIR-Near Infrared Region) μειώνονται από κοινού κατά την αλλαγή κατάστασης. Τα τρέχοντα εμπορικά διαθέσιμα επιστρώματα μειώνουν τη μετάδοση θερμότητας μέσω περιορισμένης απορρόφησης, ενώ έχουν δημιουργηθεί και πρωτότυπα ανακλαστικών συσκευών. Οι συμβατικοί ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί στην παρεμπόδιση της ηλιακής θερμικής ενέργειας και την άμβλυση της θάμβωσης. Συνήθως, οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες είναι ικανοί να αποκλείουν ένα τμήμα της θερμότητας στο εγγύς υπέρυθρο και στις δύο καταστάσεις.

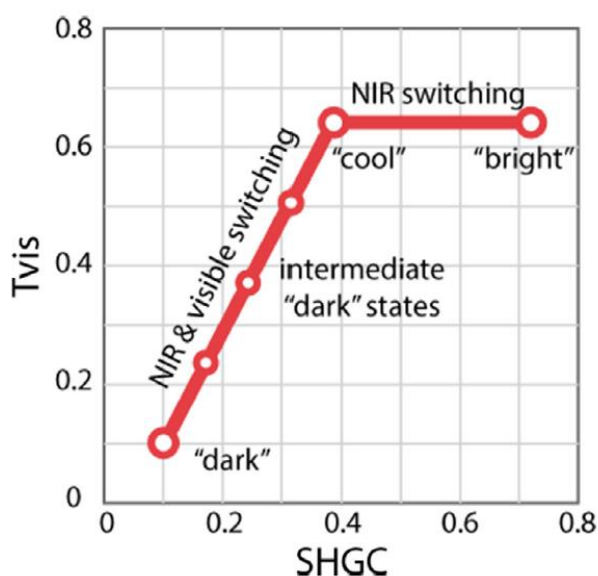
4.1.4.1 NIR-switching electrochromic glazing (NEC)

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε μία διαφανής ηλεκτροχρωμική επίστρωση ικανή να τροποποιεί τη μετάδοση της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο (NIR), χωρίς να επηρεάζει το ορατό φως [46]. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει ένα αισθητικό πλεονέκτημα σε αυτόν τον τύπο υαλοπινάκων σε σχέση με τους συμβατικούς ηλεκτροχρωμικούς για μία ποικιλία εφαρμογών σε κτίρια και διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Χάρη στον σχεδιασμό της επίστρωσης, οι υαλοπίνακες NEC μπορούν να κατασκευαστούν με μεθόδους χαμηλότερου κόστους που θα ακολουθούνται από μία διαδικασία ανόπτησης για τη σταθεροποίηση της μεμβράνης στο υπόστρωμα, σε αντίθεση με τις συμβατικές δυναμικές επιστρώσεις, που χρησιμοποιούν πιο περίπλοκες και ακριβές διεργασίες επίστρωσης με ψεκασμό σε συνθήκες κενού. Συνεπώς, η δυνατότητα εξοικονόμησης ως προς το κόστος παραγωγής μπορεί να αυξήσει την ανταγωνιστικότητα της αγοράς των υαλοπινάκων NEC. Η χρήση των υαλοπινάκων αυτών δε συνιστάται σε ιδιαίτερα θερμά κλίματα, καθώς οι υαλοπίνακες NEC μπορεί να επιτρέψουν την είσοδο μεγαλύτερης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας από την επιθυμητή σε συγκεκριμένες εποχές του χρόνου [47].

4.1.4.2 Dual-band electrochromic glazings (DBEC)

Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώθηκαν στην ανάπτυξη ενός σύνθετου τζαμιού που θα συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και τις ικανότητες αλλαγής οπτικών ιδιοτήτων τόσο των συμβατικών ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, όσο και των NEC. Ο πρώτος ηλεκτροχρωμικός υαλοπίνακας «διπλής ζώνης» (dual-band) βασίστηκε στην αλληλεπίδραση μεταξύ νανοκρυστάλλων οξειδίου ινδίου-κασσιτέρου (Indium Tin Oxide-ITO) και ενός γυαλιού από οξείδιο του νιοβίου (NbO_x) [48]. Και τα δύο αυτά υλικά παρουσιάζουν ηλεκτροχρωμικές ιδιότητες, ωστόσο σε διαφορετικές περιοχές του φάσματος. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει τη δημιουργία ενός συνθέτου ITO- NbO_x που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανεξάρτητη ρύθμιση της διαπερατότητας του υαλοπίνακα στις περιοχές του εγγύς υπέρυθρου (λόγω των ιδιοτήτων του ITO) και του ορατού φωτός (λόγω των ιδιοτήτων του NbO_x). Επίσης, βρίσκεται υπό μελέτη ένα νέο βελτιωμένο υλικό για υαλοπίνακες «διπλής ζώνης» που βασίζεται στον συνδυασμό νανοκρυστάλλων οξειδίου του βολφραμίου (WO_{3-x}) αντί του ITO με γυαλί από NbO_x [49]. Όπως και στην περίπτωση των NEC, αυτές οι επικαλύψεις νανοκρυστάλλων μπορούν να εφαρμοστούν στο γυαλί μέσω μίας διαδικασίας με μικρότερο κόστος κεφαλαίου και με μικρότερη ένταση ενέργειας κατά την εφαρμογή και την ανόπτηση, γεγονός που σημαίνει ότι το κόστος παραγωγής των επικαλυμμένων υαλοπινάκων μπορεί να είναι μικρότερο σε σχέση με αυτούς που παράγονται με ψεκασμό (sputtering).

Ένας υαλοπίνακας DBEC έχει την ικανότητα δυναμικής εναλλαγής των οπτικών του ιδιοτήτων και μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ότι αποτελείται από διαφορετικές ηλεκτροχρωμικές καταστάσεις, κάθε μία από τις οποίες οδηγεί σε διαφορετικό τρόπο λειτουργίας. Στην πιο απλοποιημένη περίπτωση, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχουν μόνο τρεις διαφορετικές καταστάσεις: η ηλεκτροχρωμική κατάσταση “bright”, η οποία είναι άκρως διαφανής στα ορατά και εγγύς υπέρυθρα φάσματα, η κατάσταση “cool” που είναι διαφανής στην ορατή ακτινοβολία και παρεμποδίζει τη διέλευση της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο και η κατάσταση “dark” που παρεμποδίζει τη διέλευση και των δύο φασμάτων.

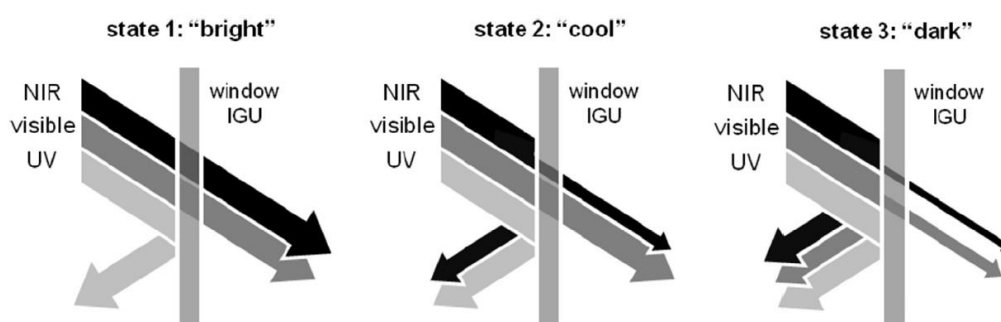


Σχήμα 4.4: Μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων και πιθανές μεταβάσεις κάθε κατάστασης για έναν υαλοπίνακα DBEC

Ουσιαστικά, με βάση το παραπάνω σχήμα, η συμπεριφορά ενός συμβατικού ηλεκτροχρωμικού υαλοπίνακα μπορεί να εξηγηθεί ως η μετάβαση από την κατάσταση “cool” στην κατάσταση “dark”, καθώς και ως το ενδιάμεσο μεταξύ των δύο, ενώ η συμπεριφορά ενός NEC εξηγείται ως η μετάβαση από την κατάσταση “bright” στην κατάσταση “cool” που επηρεάζει τη μετάδοση της ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο, χωρίς να επηρεάζει την ορατή ακτινοβολία.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών δείχνουν ότι οι νέες, δυναμικές τεχνολογίες παραθύρων, όπως οι υαλοπίνακες DBEC, βρίσκονται κοντά στο να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες για την εφαρμογή σε κτίρια παγκοσμίως. Ωστόσο, τα οφέλη απόδοσης των DBEC σε σχέση με άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες δεν έχουν ακόμα ποσοτικοποιηθεί πέρα από κάποιες προκαταρκτικές μελέτες για την εύρεση του πεδίου εφαρμογής τους και την ανάπτυξη πρωτοτύπων [50]. Επιπλέον δεν υπάρχουν ακόμα δημοσιευμένα ευρήματα αναφορικά με τον τρόπο με τον οποίο διάφοροι εξωτερικοί παράγοντες (για παράδειγμα οι κλιματικές συνθήκες, η γεωμετρία του

κτιρίου και τα μοτίβα συμπεριφοράς των ενοίκων) μπορούν να επηρεάσουν τα πιθανά πλεονεκτήματα της χρήσης τους.



Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός DBEC υαλοπίνακα στις τρεις διαφορετικές του καταστάσεις

4.1.4.3 Σύγκριση των παραπάνω διατάξεων

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες στις περισσότερες περιοχές και τύπους κτιρίων οι υαλοπίνακες DBEC παρουσιάζουν σταθερά την υψηλότερη εξοικονόμηση. Ωστόσο, η απόδοσή τους είναι συχνά συγκρίσιμη με αυτή μίας από τις άλλες δύο τεχνολογίες. Σε περιπτώσεις μεγάλων και μεσαίων σε μέγεθος κτιρίων και γενικότερα στις νότιες περιοχές η συγκρίσιμη τεχνολογία είναι οι συμβατικοί ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες. Σε αυτά τα κλίματα, όπου τα ψυκτικά φορτία κυριαρχούν στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου, η προσθήκη της ακτινοβολίας στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου είναι πρακτικά μηδενικής σημασίας. Σύμφωνα με τα πρότυπα της ASHRAE, όταν χρησιμοποιούνται συμβατικά παράθυρα σε τέτοιου είδους περιοχές, έχουν συνήθως αρκετά σκούρο χρώμα και τιμές συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) και διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία (VT) γύρω στο 0,25. Τα αντίστοιχα συμβατικά ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και τα παράθυρα DBEC, όταν δεν εκτίθενται σε υψηλή ηλιοφάνεια, βρίσκονται σε κατάσταση με μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (VT=0,3-0,4) και χαμηλότερο ηλιακό θερμικό κέρδος (SHGC=0,18-0,22), οδηγώντας σε εξοικονόμηση τόσο ως προς τα ψυκτικά φορτία, όσο και ως προς τα φορτία φωτισμού.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση κτιρίων μεσαίου ύψους σε βόρειες, αστικές περιοχές, η απόδοση των DBEC είναι πιο κοντά με αυτή των υαλοπινάκων NEC. Σε αυτή την περίπτωση, η αύξηση του ηλιακού θερμικού κέρδους έχει σημαντική αξία λόγω παραγόντων όπως οι χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες, οι μεγαλύτερες απαιτήσεις θέρμανσης και τα χαμηλότερα εσωτερικά θερμικά κέρδη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι υαλοπίνακες DBEC συνδυάζουν τη λειτουργικότητα τόσο των απλών ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, όσο και των NEC. Η ιδιότητά τους να μεταβάλλουν τις οπτικές τους ιδιότητες σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών τους

καθιστούν μία ευέλικτη τεχνολογική λύση τόσο για ψυχρότερα, όσο και για θερμότερα κλίματα. Ως εκ τούτου, υπό ιδανικές συνθήκες ελέγχου, θα πρέπει να είναι πάντα σε θέση να φτάνουν ή και να υπερβαίνουν την απόδοση οποιασδήποτε από τις άλλες δύο τεχνολογίες υαλοπινάκων [51].

4.1.5 Εμπορικά διαθέσιμοι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες και εφαρμογές

Η παραγωγή ηλεκτροχρωμικών παραθύρων έχει ήδη ξεκινήσει από πολλές πολυεθνικές εταιρείες (Pilkington, Sage), ενώ άλλες προβαίνουν σε επενδύσεις σε αυτόν τον τομέα (Glaverbel). 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 4.6: Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες στην αδιαφανή (αριστερά) και τη διάφανη (δεξιά) τους κατάσταση

Παρότι υπάρχουν αρκετοί κατασκευαστές ηλεκτροχρωμικού γυαλιού παγκοσμίως, μόνο τρεις διαθέτουν εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα σε διάφορες διαστάσεις: η SAGE Electrochromics Inc. από τις Η.Π.Α και οι Gesimat GmbH και EControl-Glas από τη Γερμανία. Η έλλειψη παραγωγής ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε μεγάλη κλίμακα, με αποτέλεσμα την έλλειψη μίας ανταγωνιστικής αγοράς, οδηγεί σε υψηλά κόστη για την τεχνολογία αυτή. Για παράδειγμα, το κόστος για εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα των SAGE και Gesimat είναι περίπου 1000 €/m². 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. Μέσω της ωρίμανσης της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων αναμένεται σημαντική μείωση του κόστους τους που σταδιακά θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησής τους σε νέα ή ανακαινιζόμενα κτίρια.

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 Stadtparkasse στη Δρέσδη το 1999 από την εταιρεία Pilkington. Η πρόσοψη αυτή έχει επιφάνεια μεγαλύτερη από 200 m² 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 η εγκατάσταση ηλεκτροχρωμικών παραθύρων δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω του υψηλού κόστους και της σχετικά μικρής προβλεπόμενης διάρκειας ζωής, η οποία δεν ξεπερνά τα 10 χρόνια.



Σχήμα 4.7: Εφαρμογή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων E-Control της Pilkington σε κτίριο γραφείων

4.1.6 Στρατηγικές ελέγχου

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 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 αντανάκλασεων 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.

Προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι η πιο κατάλληλη παράμετρος για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικά κριτήρια για τον έλεγχο με βάση την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα. Από προσομοιώσεις κτιρίων στην περιοχή της Μεσογείου προέκυψε ότι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτεύχθηκε για αλλαγή του χρωματισμού του παραθύρου όταν η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ήταν 150 W/m^2 . Αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν μικρές διαφορές στην ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας για διαφορετικές τιμές μετάβασης της ηλιακής ακτινοβολίας, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η ενεργειακή εξοικονόμηση είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την επιλογή της τιμής μετάβασης.

Οι υαλοπίνακες που ελέγχονται με βάση την εσωτερική θερμοκρασία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κλιματιζόμενους χώρους και είναι ουσιαστικά κατάλληλοι μόνο σε κτίρια με παθητική λειτουργία.

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 [52].

4.1.7 Ενεργειακή απόδοση

Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες προσομοιώσεις κτιρίων με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με σκοπό τον υπολογισμό της προκύπτουσας ενεργειακής εξοικονόμησης. Υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν για ένα τυπικό μοντέλο γραφείου έδειξαν ότι μπορούν να υπάρξουν σημαντικά ενεργειακά κέρδη ως προς τα φορτία ψύξης, ενώ η ενεργειακή εξοικονόμηση εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που βρίσκεται το κτίριο. Ο συνδυασμός ηλεκτροχρωμικών διατάξεων και θερμομονωτικών παραθύρων με διπλή υάλωση μπορεί να συμβάλει στην κατασκευή προϊόντων που θα προστατεύουν τον εσωτερικό χώρο των κτιρίων από τις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος και θα οδηγήσουν στη μείωση των θερμικών απωλειών. Μέσω του ελέγχου των θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο και του περιορισμού της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατή η

μείωση των αναγκών κλιματισμού. Παράλληλα, η ανάπτυξη και η χρήση βελτιστοποιημένων ηλεκτροχρωμικών παραθύρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης, καθώς και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρουν τα έξυπνα παράθυρα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η τοποθεσία, το είδος του κτιρίου, ο προσανατολισμός, οι απαιτήσεις του κτιρίου για φωτισμό και άνεση, καθώς και η επιλογή του παραθύρου αναφοράς με το οποίο γίνεται η σύγκριση. Αναφορικά με την ενεργειακή τους απόδοση, τα έξυπνα παράθυρα ανταγωνίζονται σε σημαντικό βαθμό τα παράθυρα ηλιακού ελέγχου (solar control). Η ενεργειακή εξοικονόμηση σε σχέση με τα καλύτερα στατικά παράθυρα υπολογίζεται κατά προσέγγιση 0-50 kWh/m²yr σε περιοχές με κλιματικές συνθήκες αντίστοιχες με αυτές της Στοκχόλμης, 25-75 kWh/m²yr σε κλιματικές συνθήκες όπως του Denver και 50-150 kWh/m²yr σε κλιματικές συνθήκες όπως του Miami (τα τετραγωνικά μέτρα αναφέρονται σε επιφάνεια γυαλιού) [53]. Σε πραγματικές συνθήκες τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται και από τη συμπεριφορά των χρηστών. Ωστόσο, είναι σαφές ότι τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν ίδια ή και καλύτερη ενεργειακή απόδοση συγκριτικά με τα στατικά παράθυρα, ενώ παρέχουν επιπρόσθετα καλύτερες συνθήκες άνεσης, για παράδειγμα μέσω του αυτοματοποιημένου ελέγχου της θάμβωσης. Στον αντίποδα, τα στατικά παράθυρα είναι πιθανό να χρειαστούν επιπρόσθετα συστήματα σκίασης για την αποφυγή της θάμβωσης. Τα παράθυρα μεταβλητής διαπερατότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε κλίματα με έντονη ηλιοφάνεια και σε κτίρια γραφείων με υψηλές ανάγκες για ψύξη, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και μέσω της ρύθμισης του φωτισμού και του εξαερισμού.

4.1.8 Αντοχή

Μέχρι στιγμής δεν έχει αναπτυχθεί μία διεθνώς αναγνωρισμένη μεθοδολογία για τον έλεγχο της αντοχής των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων σε πραγματικές συνθήκες με παράλληλη δυνατότητα πρόβλεψης του πραγματικού χρόνου ζωής τους. Τα βελτιστοποιημένα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα προβλέπεται να έχουν αντοχή μεγαλύτερη από 100000 συνεχείς κύκλους χρωματισμού και αποχρωματισμού χωρίς την εμφάνιση ιχνών γήρανσης [54]. Η αντοχή και συνεπώς και η αξιοπιστία των ηλεκτροχρωμικών συστημάτων καθορίζεται από το περιβάλλον λειτουργίας τους, αλλά και από το είδος της σφράγισης.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές σε ελεγχόμενες συνθήκες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι για να είναι δυνατή

η εμπορική εφαρμογή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων θα πρέπει αυτά να είναι ανθεκτικά στους ακόλουθους παράγοντες [8]:

1. Στην επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής των υλικών μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στις επιφάνειες επαφής τους. Ακόμα, η υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να μειώσει τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.
2. Στις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας του συστήματος. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η θερμοκρασία στην επιφάνεια των παραθύρων αυξάνεται λόγω της συνεχούς απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, κυρίως όταν τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα βρίσκονται στη διαφανή τους κατάσταση. Συνεπώς, το παράθυρο λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατά πολύ μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι οποίες μπορούν να φτάσουν μέχρι και τους 120 °C, γεγονός που ενεργοποιεί μηχανισμούς γήρανσης με θερμικά επαγόμενες χημικές αντιδράσεις ή λόγω μηχανικών τάσεων που προκύπτουν από τις έντονες θερμοκρασιακές διαφορές. Οι μηχανικές καταπονήσεις αυτές μπορούν να καταστρέψουν την περιφερειακή σφράγιση των παραθύρων, επιτρέποντας την είσοδο της υγρασίας, η οποία μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τα ηλεκτροχρωμικά υμένα.
3. Στην υγρασία και τα ατμοσφαιρικά αέρια. Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι αναγκαίο να φέρουν περιφερειακή σφράγιση με σκοπό την παρεμπόδιση της εισόδου υγρασίας ή οξυγόνου που οδηγούν στη μείωση του χρόνου ζωής ή ακόμα και την καταστροφή της διάταξης μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων με τα υμένα της διάταξης.
4. Στις περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος, βροχή) και ρύπους.

Για να εξασφαλιστεί η αντοχή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στους παραπάνω παράγοντες καθοριστική είναι η κατασκευή τους. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στον σχεδιασμό του διαχωριστή των τζαμιών, στο είδος των τζαμιών, στις ιδιότητες και τον τρόπο τοποθέτησης των σφραγιστικών μέσων, στην προεπεξεργασία της επιφάνειας των τζαμιών και τον σχεδιασμό της ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Πλέον, οι περιφερειακές σφραγίσεις σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν μεταβολές της θερμοκρασίας, των ατμοσφαιρικών συνθηκών, του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέθοδος του διπλού σφραγίσματος αποτελεί μια πιο εξελιγμένη τεχνική, η οποία πιθανώς να αποτελεί τη βέλτιστη λύση και για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα. Για την εξασφάλιση μεγαλύτερης διάρκειας ζωής συνιστάται η χρήση κεραμικών επιστρώσεων με ιόντα Li^+ , καθώς υφίστανται σε πολύ μικρότερο βαθμό τις φωτοχημικές αντιδράσεις που προκαλούν αλλοιώσεις σε ηλεκτροχρωμικά συστήματα με επιστρώσεις πολυμερών. Επιπρόσθετα, οι συντελεστές θερμικής διαστολής των κεραμικών επιστρώσεων είναι αρκετά κοντά σε

αυτούς των γυάλινων υποστρωμάτων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρότερων τάσεων σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών που εκτίθεται το παράθυρο [55].

4.1.9 Κόστος

Από άποψη κόστους οι εμπορικές εφαρμογές ηλεκτροχρωμικών παραθύρων θα πρέπει να συνδυάζουν χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας και προσιτό κόστος αγοράς και εγκατάστασης. Καθώς τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα δε διαθέτουν κινητά μέρη, το κόστος συντήρησής τους είναι μηδαμινό. Επίσης, το κόστος λειτουργίας τους είναι χαμηλό, καθώς η ισχύς που καταναλώνεται για τη λειτουργία τους είναι σχετικά μικρή, με τάξη μεγέθους περίπου 8 W/m².

Τα εμπορικά διαθέσιμα θερμομονωτικά παράθυρα υψηλής ποιότητας έχουν κόστος περίπου 80 €/m², ενώ τα απλά ηλεκτροχρωμικά παράθυρα υπολογίζεται ότι κοστίζουν περίπου 1000 €/m² [56]. Για να είναι δυνατή η ουσιαστική διείσδυση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στην αγορά, η τιμή τους θα πρέπει να μειωθεί περίπου κατά μία τάξη μεγέθους, ώστε να φτάσει σε επίπεδο 100-150 €/m². Η τιμή αυτή μπορεί να επιτευχθεί μακροπρόθεσμα με κατάλληλο σχεδιασμό και παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα [9].

4.1.10 Πλεονεκτήματα

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. Η τεχνολογία των 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

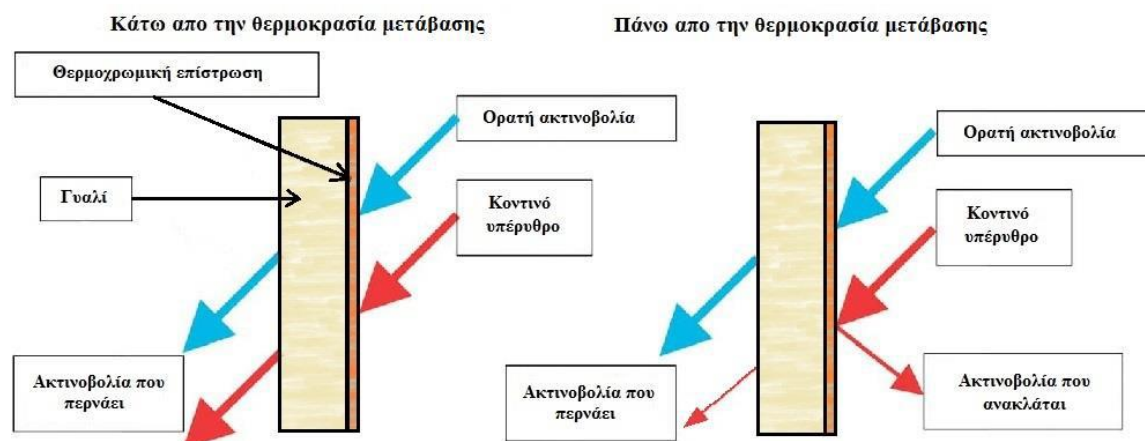
- Αποτελεσματικό έλεγχο της εισερχόμενης φωτεινής ακτινοβολίας και περιορισμός της θάμβωσης, χωρίς ταυτόχρονα να παρεμποδίζεται η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον
- Μηδαμινό κόστος συντήρησης λόγω της έλλειψης κινητών μερών
- Δυνατότητα επίτευξης όλων των ενδιάμεσων καταστάσεων ανάμεσα στην πλήρως 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. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των ηλεκτροχρωμικών επιστρώσεων είναι η δυνατότητα εφαρμογής τους σε υπάρχοντα συμβατικά παράθυρα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το υψηλό κόστος που θα προέκυπτε από την κατασκευή νέων υαλοπινάκων. 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 [8].

4.2 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. Για παράδειγμα, σε μία θερμοχρωμική επιστρώση που αποτελείται από υδρογέλη (hydrogel) και πολυμερές, όταν η θερμοκρασία επιφανείας είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης, τα δύο συστατικά αναμειγνύονται ομοιόμορφα καθιστώντας την επιστρώση διαφανή. Αντίθετα, η επιστρώση γίνεται ημιδιαφανής και ανακλά με διάχυτο τρόπο την προσπίπτουσα

ακτινοβολία όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τη θερμοκρασία μετάβασης, καθώς τα δύο βασικά συστατικά της έχουν πλέον διαχωριστεί. 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 [57].

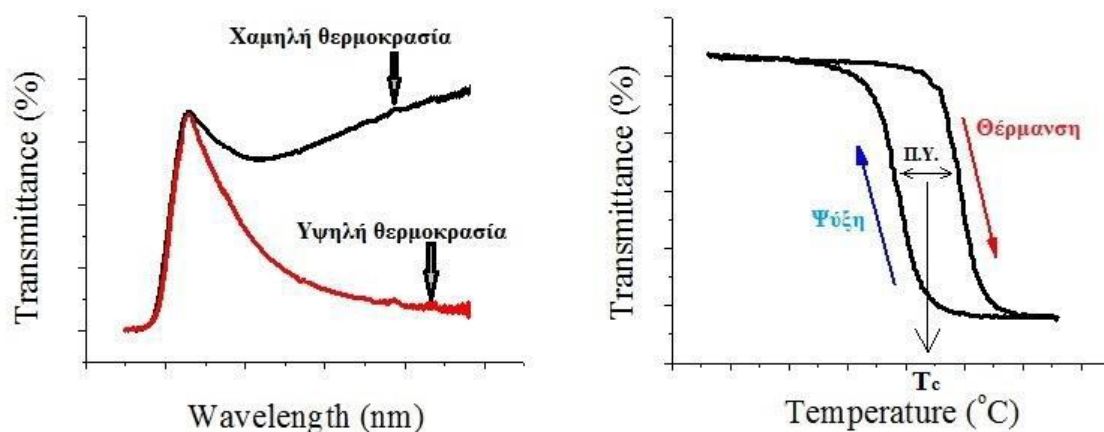


Σχήμα 4.8: Η συμπεριφορά ενός θερμοχρωμικού παραθύρου

4.2.1 Το διοξείδιο του βαναδίου

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 $68\text{ }^\circ\text{C}$. 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 $1\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ στην περίπτωση των λεπτών υμενίων και των νανοδομών μπορεί να πάρει τιμές $(10-15)\text{ }^\circ\text{C}$ και $(30-35)\text{ }^\circ\text{C}$ αντιστοίχως. Στο **Σχήμα 4.9** 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 επιστρώσης 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 υπέρυθη 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 [10].



Σχήμα 4.9: 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)

4.2.2 Αρχή λειτουργίας

Η θερμοκρασία ενός θερμοχρωμικού παραθύρου συνδέεται με τις οπτικές και θερμικές του ιδιότητες, όπως είναι η απορροφητικότητα, η δυνατότητα ρύθμισης της ηλιακής ακτινοβολίας που περνά μέσα από τη μάζα του, η ανακλαστικότητα και η θερμοκρασία μετάβασης. Ακόμα, επηρεάζεται και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, δηλαδή την εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Υαλοστάσια με μικρότερη απορροφητικότητα και υψηλότερη θερμοκρασία μετάβασης απαιτούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ώστε να προκληθεί αλλαγή φάσης.

Η κατάσταση ενός θερμοχρωμικού παραθύρου, δηλαδή το αν είναι διαυγές ή αδιαφανές, καθορίζει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο δωμάτιο. Όταν το παράθυρο είναι μερικώς ή πλήρως αδιαφανές, αυτό συνεπάγεται μειωμένη διαπερατότητα σε ηλιακή ακτινοβολία. Το πλήθος των ωρών κατά τις οποίες το παράθυρο βρίσκεται σε αδιαφανή κατάσταση καθορίζεται από τη θερμοκρασία μετάβασης, την ικανότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, καθώς και από τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Υαλοστάσια με μεγαλύτερη απορροφητικότητα αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με μεγαλύτερο ρυθμό και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερες πιθανότητες να ξεπεραστεί η θερμοκρασία μετάβασης και να αυξηθούν οι ώρες που το παράθυρο θα βρίσκεται σε αδιαφανή κατάσταση.

4.2.3 Ταξινόμηση θερμοχρωμικών υλικών

Τα θερμοχρωμικά υλικά μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον μηχανισμό μέσω του οποίου μεταβαίνουν σε κατάσταση χαμηλής διαπερατότητας σε ηλιακή και ορατή ακτινοβολία, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία μετάβασης. Οι τρεις βασικές κατηγορίες είναι οι θερμοχρωμικές υδρογέλες (thermochromic hydrogels), τα μείγματα θερμοχρωμικών πολυμερών (thermochromic polymer blends) και τα θερμοχρωμικά πολυμερή με ενσωματωμένες σταθερές περιοχές (embedded thermochromic polymers with fixed domains). Οι θερμοχρωμικές υδρογέλες αποτελούνται από δίκτυα διασυνδεδεμένων πολυμερών που απορροφούν το νερό και περιλαμβάνουν διάφορες τόσο υδρόφιλες, όσο και υδρόφοβες ομάδες στη δομή τους. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης, τα πολυμερή είναι υδρόφιλα με τους δεσμούς υδρογόνου ανάμεσα στα μόρια του νερού και τα πολυμερή να κυριαρχούν έναντι στις υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πολυμερών. Συνεπώς, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τη θερμοκρασία μετάβασης το πολυμερές είναι ομοιόμορφα διαλυμένο σε μοριακό επίπεδο οδηγώντας σε μια διάφανη και ισότροπη ως προς τη μετάδοση ακτινοβολίας κατάσταση. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας μετάβασης οι δεσμοί υδρογόνου μεταξύ των μορίων νερού και των πολυμερών αποδυναμώνονται, οδηγώντας στην επικράτηση των υδρόφοβων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μορίων του πολυμερούς και τη συσσωμάτωσή του. Συνεπώς προκαλείται διαχωρισμός των φάσεων και το νερό απομακρύνεται από το δίκτυο του πολυμερούς. Όταν η διαφορά ανάμεσα στους δείκτες διάθλασης αυτών των δύο φάσεων είναι ικανοποιητική, το φως διασκορπίζεται αντί να μεταδίδεται διαμέσου του υλικού, με αποτέλεσμα τον χρωματισμό του συστήματος.

Τα μείγματα θερμοχρωμικών πολυμερών εξαρτώνται επίσης από τη διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης των δύο συστατικών του συστήματος. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, τα δύο συστατικά σχηματίζουν ένα θερμοπλαστικό πολυμερές ενσωματωμένο σε μία πολυμερική μήτρα. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης και τα δύο πολυμερή παρουσιάζουν παρόμοιους δείκτες διάθλασης και συνεπώς το μείγμα των πολυμερών είναι διαφανές. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και φτάνει τη θερμοκρασία μετάβασης, οι δείκτες διάθλασης των πολυμερών μεταβάλλονται, γεγονός που συνεπάγεται τον διασκορπισμό του φωτός. Η θερμοκρασία μετάβασης και η ένταση του χρωματισμού τόσο στις θερμοχρωμικές υδρογέλες, όσο και στα θερμοχρωμικά μείγματα πολυμερών μπορούν να μεταβληθούν προσθέτοντας ή αλλάζοντας την αναλογία συμπολυμερών, αλάτων και τασιενεργών.

Η τρίτη βασική κατηγορία περιλαμβάνει θερμοχρωμικά υλικά που αποτελούνται από ένα ομοιογενώς διασκορπισμένο πεδίο σκέδασης που είναι στατικά ενσωματωμένο σε μία διαφανή μήτρα, όπως η ρητίνη. Η μήτρα έχει σταθερό δείκτη διάθλασης ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία και παραμένει σε στερεή κατάσταση. Σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης και η μήτρα και οι

περιοχές σκέδασης εμφανίζουν παρόμοιο δείκτη διάθλασης, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες ο δείκτης διάθλασης των σωματιδίων στην περιοχή σκέδασης μεταβάλλεται. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διάχυση του φωτός σε θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας μετάβασης και τη μετάβαση σε μία ημιδιαφανή, σκουρόχρωμη κατάσταση [57].

4.2.4 Επιθυμητές ιδιότητες

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 °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 [57]

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. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκε ένα μεγάλο πλήθος υλικών, βασισμένων στο VO₂, με περισσότερο επιθυμητές ιδιότητες, μέσω μίας ποικιλίας μεθόδων χημικής παρασκευής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι μεμβράνες VO₂ ενισχυμένες με βολφράμιο (W-doped VO₂ films), οι μεμβράνες VO₂ ενισχυμένες με μαγνήσιο (Mg-doped VO₂ films), οι μεμβράνες VO₂ με χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης και τα νανοσωματίδια VO₂ [14].

Η εισαγωγή προσμίξεων στο πλέγμα του VO₂ κρίνεται σημαντική για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων. Μετά από τη μελέτη διαφόρων χημικών στοιχείων προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι προσμίξεις με μεγαλύτερη ατομική ακτίνα από αυτή του V⁴⁺

μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία μετάβασης. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν ιόντα του βολφραμίου, του νιοβίου και του τιτανίου. Στον αντίποδα, προσμίξεις ιόντων με μικρότερη ατομική ακτίνα, όπως είναι τα ιόντα του αλουμινίου και του χρωμίου, οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα μελέτες, το πιο αποδοτικό στοιχείο για τη μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης είναι το βολφράμιο [10].

Σημειώνεται ότι μία χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης δεν είναι πάντα επιθυμητή, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική μείωση της εισερχόμενης στον χώρο ηλιακής ακτινοβολίας 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.

4.2.5 Ενεργειακή απόδοση

Μελέτες αναφορικά με τη συσχέτιση των οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών παραθύρων και της ενεργειακής τους απόδοσης έδειξαν ότι μικρότερος συντελεστής εκπομπής σε μεγαλύτερα μήκη κύματος οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση, ενώ υψηλή απορροφητικότητα μετά από την αλλαγή φάσης του θερμοχρωμικού υλικού οδηγεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση. Ακόμα, τα θερμοχρωμικά υλικά με VO₂ που εμφανίζουν μεγαλύτερη μείωση στη διαπερατότητά τους στην ηλιακή ακτινοβολία και μικρότερη αύξηση στην απορροφητικότητά τους μετά από την αλλαγή φάσης παρουσιάζουν μεγαλύτερες δυνατότητες για εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός μεταβολής της υστέρησης κρίνεται σημαντικός για την εξοικονόμηση ενέργειας. Θερμοχρωμικά υαλοστάσια με χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης και μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής της υστέρησης είναι ικανά να μειώσουν τη ζήτηση ενέργειας κατά 51 % σε σύγκριση με τα τυπικά διαυγή παράθυρα. Κατά τη μελέτη μίας σειράς από υποθετικά θερμοχρωμικά παράθυρα με διαφορετικές θερμοκρασίες μετάβασης, μεγέθη, προσανατολισμούς και κλιματικές συνθήκες με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων δυνατών θερμοχρωμικών χαρακτηριστικών διαπιστώθηκε ότι τα θερμοχρωμικά παράθυρα μείωσαν τον αριθμό των ωρών κατά τις οποίες οι ένοικοι υπέφεραν από θάμβωση ή έλλειψη άνεσης, ενώ το 13,7 % – 16,7 % της ενεργειακής κατανάλωσης ήταν δυνατό να αποφευχθεί με βελτιστοποιημένο προσανατολισμό και μεγάλη επιφάνεια παραθύρων σε ζεστά κλίματα.

Κατά τη σύγκριση θερμοχρωμικών παραθύρων με βάση το VO₂ με παράθυρα low-e και έγχρωμους απορροφητικούς υαλοπίνακες, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα θερμοχρωμικά παράθυρα μπορούν να μειώσουν σε μεγαλύτερο βαθμό την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου. Ακόμα διαπιστώθηκε ότι η

εξοικονόμηση ενέργειας που προέκυψε από τα θερμοχρωμικά παράθυρα σε πιο θερμά κλίματα ήταν πιο σημαντική απ' ότι σε ψυχρότερα [58].

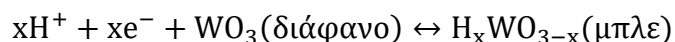
4.2.6 Εφαρμογές

Τα θερμοχρωμικά παράθυρα θεωρούνται κατάλληλα για εφαρμογή σε υαλοπίνακες υψηλού επιπέδου, σε φεγγίτες ή σε παράθυρα οροφών. Μελέτες της αποδοτικότητας των θερμοχρωμικών παραθύρων σε διάφορους προσανατολισμούς έδειξαν ότι παρότι τα θερμικά κέρδη μέσω των παραθύρων δεν μεγιστοποιούνται όταν αυτά βρίσκονται υπό κλίση 0°, τα παράθυρα είναι περισσότερο ικανά να περιορίσουν τη θερμότητα σε αυτή τη θέση, λόγω της μεγαλύτερης έκθεσής τους στον ήλιο. Η παρεμπόδιση εισόδου της θερμότητας στον εσωτερικό χώρο επιτρέπει στο παράθυρο να παραμένει στην ανακλαστική του κατάσταση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σχέση με μεγαλύτερες κλίσεις [57].

Παρότι η ακριβής θέση τοποθέτησης της θερμοχρωμικής επίστρωσης καθορίζεται από τους υπεύθυνους για τον σχεδιασμό του κτιρίου, συνήθως χρησιμοποιείται σε θέσεις όπου η οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον δε κρίνεται σημαντική, καθώς αυτή θα χαθεί σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία μετάβασης.

4.3 Αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες (Gasochromic glazing)

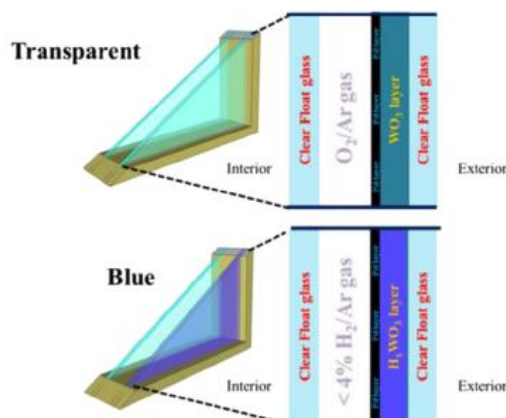
Οι αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες έχουν παρόμοια εμφάνιση με τους ηλεκτροχρωμικούς από χρωματική άποψη, με τη διαφορά ότι για τη μεταβολή των οπτικών τους ιδιοτήτων χρησιμοποιείται στο εσωτερικό του διακένου του υαλοπίνακα ένα αναγωγικό αέριο, συνήθως μείγμα υδρογόνου με αργό. Η αεριοχρωμική συμπεριφορά των άμορφων στρωμάτων οξειδίων του βολφραμίου συσχετίζεται άμεσα με τη διπλή εισαγωγή/εξαγωγή ιόντος και ηλεκτρονίου, η οποία περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση:



Σύμφωνα με την παραπάνω αντίδραση, ο ρυθμός χρωματισμού εξαρτάται από την αγωγιμότητα των ιόντων και των ηλεκτρονίων. Συνεπώς, ο ρυθμός χρωματισμού και αποχρωματισμού μπορεί να βελτιωθεί εξασφαλίζοντας μη στοιχειομετρικές συνθήκες και υψηλό πορώδες. Η ταχύτητα χρωματισμού των επιστρώσεων WO_3 μπορεί επίσης να βελτιωθεί σημαντικά εισάγοντας σωματίδια SiO_2 στο πλέγμα του WO_3 .

Σε αντίθεση με την συνήθη δομή των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, που αποτελούνται από πέντε στρώματα υλικών, για μία αεριοχρωμική μονάδα απαιτείται μόνο ένα στρώμα WO_3 με καταλύτη παλλάδιο (Pd). Ένα ακόμα πλεονέκτημα των

αεριοχρωμικών στοιχείων είναι ότι η στρώση WO_3/Pd μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε οποιοδήποτε διαφανές υπόστρωμα και δεν απαιτείται διαφανές αγωγίμο γυαλί, όπως στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών μονάδων. Η επαναφορά του παραθύρου από την χρωματισμένη (μπλε) του κατάσταση στην αρχική πραγματοποιείται μέσω της έκθεσής του σε μείγμα αργού με οξυγόνο. Η διατήρηση μίας συγκεκριμένης κατάστασης επιτυγχάνεται μέσω της απομόνωσης του διακένου από περαιτέρω αλλαγές στην περιεκτικότητά του σε υδρογόνο [59].



Σχήμα 4.10: Η δομή ενός αεριοχρωμικού υαλοπίνακα

Το οπτικώς ενεργό συστατικό αποτελείται από ένα πορώδες φιλμ οξειδίου του βολφραμίου με πάχος μικρότερο από 1 μm . Παραλλαγές στο πάχος του φιλμ και στην περιεκτικότητα του διακένου σε υδρογόνο μπορούν να επηρεάσουν τον βαθμό και την ταχύτητα του χρωματισμού. Μία αεριοχρωμική μονάδα παρουσιάζει συνήθως υψηλή οπτική διαπερατότητα στη διαφανή της κατάσταση, ενώ το βάθος και η ταχύτητα χρωματισμού αυξάνονται με αύξηση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης και να μεταφερθεί στο διάκενο του παραθύρου μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος διανομής. Κατά τη διαδικασία αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η συγκέντρωση του υδρογόνου δεν ξεπερνά το κατώτερο όριο ανάφλεξης του, που είναι 3 % κ.ο. Η διαπερατότητα του υαλοπίνακα σε ορατή ακτινοβολία μπορεί να πάρει τιμές από 0,10 έως 0,59, ενώ ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους κυμαίνεται μεταξύ 0,12 και 0,46 [11]. Μία αεριοχρωμική μονάδα παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα ρύθμισης των οπτικών της ιδιοτήτων στο υπέρυθρο σε σχέση με το ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Συνεπώς, στη χρωματισμένη της κατάσταση παρεμποδίζει αποτελεσματικά την είσοδο της υπέρυθρης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου, ενώ παράλληλα δεν αυξάνει τις ανάγκες για τεχνητό φωτισμό.

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα ένα αεριοχρωμικό σύστημα με βάση το τριοξείδιο του βολφραμίου (WO_3) προκάλεσε αναταραχή λόγω της απλής και οικονομικής του δομής και της υψηλής διαπερατότητάς του σε ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, στη

συνέχεια ο ενθουσιασμός για την τεχνολογία αυτή σταδιακά χάθηκε. Στη γενική περίπτωση, οι αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν κάποιους περιορισμούς ως προς την παροχή αερίου και τη συναρμολόγηση του συστήματος λόγω πολυπλοκότητας, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή έξυπνων παραθύρων με χαμηλό κόστος, με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Δεδομένου του κόστους και της διάρκειας ζωής τους δεν κρίνεται αναγκαία η αλλαγή της κατάστασής τους σε ωριαία βάση, με εξαίρεση την περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών. Η μελέτη τους έχει δείξει ότι η λειτουργία τους είναι συνήθως κατάλληλη για περιοχές με ζεστά καλοκαίρια, αλλά κρύους χειμώνες.

4.4 Φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες (Photochromic glazing)

Τα παράθυρα αυτού του είδους έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν το χρώμα τους ανάλογα με την ένταση του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνειά τους. Η οπτική διαπερατότητά τους μειώνεται υπό την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας λόγω της χημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα, ενώ επανέρχεται στην αρχική της τιμή υπό συνθήκες σκότους. Η διαπερατότητα των παραθύρων που ενσωματώνουν τέτοια υλικά φθίνει με την αύξηση της ακτινοβολίας, ενώ σε αποχρωματισμένη κατάσταση η διαπερατότητά τους είναι παρόμοια με εκείνη του απλού γυαλιού.

Το φωτοχρωμικό φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε ανόργανα υλικά, όπως το γυαλί, αλλά και σε οργανικά υλικά που χαρακτηρίζονται από συγκρίσιμες οπτικές ιδιότητες και καλύτερη δυναμική συμπεριφορά. Ωστόσο, στην περίπτωση των οργανικών υλικών παρουσιάζονται δυσμενείς απώλειες υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών, ενώ η συμπεριφορά τους δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί σε βάθος χρόνου [12].

Για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων σε υαλοπίνακες χρησιμοποιούνται βαφές που περιέχουν οξειδία αλογόνων και διάφορα οργανικά ή ανόργανα συνθετικά υλικά. Αρκετά από τα συνθετικά υλικά αυτά είναι αναγκαίο να αναμειγνύονται με ίχνη βαρέων μετάλλων ή με αλογόνα, ώστε να αποκτήσουν φωτοχρωμικά χαρακτηριστικά. Οι φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι κατάλληλοι για τον περιορισμό της θάμβωσης από το φυσικό φως, ωστόσο δεν ελέγχουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη, καθώς η ποσότητα του φωτός που προσπίπτει σε έναν υαλοπίνακα δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, καθώς ο ήλιος βρίσκεται χαμηλότερα στον ουρανό, η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια των υαλοπινάκων με νότιο προσανατολισμό αυξάνεται. Συνεπώς, ο υαλοπίνακας θα βρίσκεται σε σκουρόχρωμη κατάσταση κυρίως τους χειμερινούς και όχι τους θερινούς μήνες, κατά τους οποίους τα ηλιακά θερμικά κέρδη θα ήταν περισσότερο ανεπιθύμητα.

Ο χρόνος μετάβασης από τη διαφανή στην χρωματισμένη κατάσταση μπορεί να διαρκέσει μερικά λεπτά, ενώ η αντίστροφη διαδικασία συνήθως διαρκεί μερικές δεκάδες λεπτά. Ωστόσο, παρουσιάζεται εξάρτηση και από τη θερμοκρασία, καθώς αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει τη διαπερατότητα και τη δυναμική συμπεριφορά της συσκευής.

Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια και παρότι λειτουργεί σωστά σε κομμάτια γυαλιού μικρών διαστάσεων, αυτό δεν έχει ακόμα επιτευχθεί σε μεγαλύτερη κλίμακα, δηλαδή για γυαλιά με κατάλληλο μέγεθος και αντοχή, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε παράθυρα. Τέλος, το σχετικό κόστος της τεχνολογίας αυτής είναι ακόμα αρκετά μεγάλο [11].

4.5 Υαλοστάσια με στοιχεία υγρών κρυστάλλων (Liquid crystal windows-LCWs)

Μία εναλλακτική τεχνολογία για την κατασκευή έξυπνων παραθύρων είναι τα συστήματα υγρών κρυστάλλων. Τα στοιχεία υγρών κρυστάλλων αποτελούνται από υλικά με ηλεκτροχρωμικές ιδιότητες και κρυσταλλική δομή. Κατά την απουσία ηλεκτρικού πεδίου τα σταγονίδια υγρών κρυστάλλων είναι τυχαία προσανατολισμένα, με αποτέλεσμα το σύστημα να βρίσκεται σε αδιαφανή κατάσταση, κατά την οποία, ωστόσο, επιτρέπεται η διέλευση του φωτός. Με την εφαρμογή κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου επιτυγχάνεται ο προσανατολισμός των μορίων των κρυστάλλων παράλληλα στη διεύθυνση του πεδίου, με αποτέλεσμα τη μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων του υαλοπίνακα και τη μετάβασή του σε διαφανή κατάσταση. Η μετάβαση από την αδιαφανή στη διαφανή κατάσταση και αντίστροφα πραγματοποιείται ακαριαία (σε κλάσματα του δευτερολέπτου), ενώ τα παράθυρα αυτού του τύπου εμφανίζουν ένα χαρακτηριστικό θόλωμα, επειδή οι υγροί κρύσταλλοι σκεδάζουν το φως αντί να το απορροφούν [60].

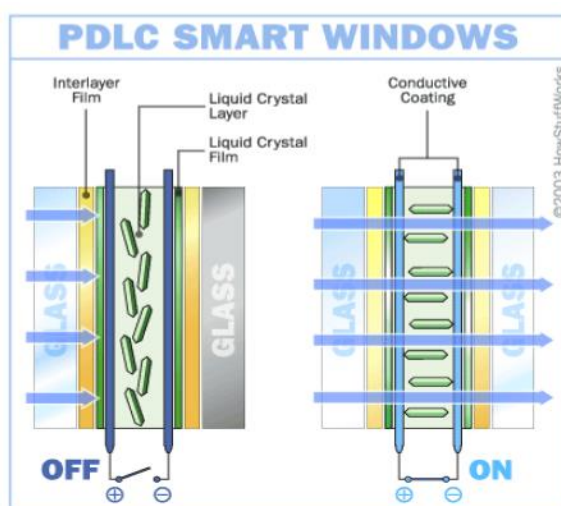


Σχήμα 4.11: Παράθυρα με στοιχεία υγρών κρυστάλλων στη διαφανή (αριστερά) και αδιαφανή (δεξιά) τους κατάσταση

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι υγρών κρυστάλλων. Μία συσκευή υγρών κρυστάλλων έχει πάντα πολυεπίπεδη δομή, ανεξάρτητα από τον τύπο των

κρυστάλλων που περιλαμβάνει. Συγκεκριμένα, αποτελείται από υποστρώματα από γυαλί ή κάποιο οργανικό υλικό, τα οποία περιβάλλουν τα υπόλοιπα στρώματα. Στο εσωτερικό βρίσκονται τα διαφανή ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ εσωτερικά όλων βρίσκεται το στρώμα υγρών κρυστάλλων. Τα συστήματα υγρών κρυστάλλων λειτουργούν με τάσεις από 24 μέχρι 120 V, ενώ υπάρχουν και εφαρμογές που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενη τάση της τάξης των 100 V.

Τα στοιχεία υγρών κρυστάλλων παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα συνήθη ηλεκτροχρωμικά υλικά. Ωστόσο, η σταθερότητα των συσκευών μετά από μακρά έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, καθώς και το υψηλό κόστος αποτελούν ζητήματα που δεν έχουν αντιμετωπιστεί ακόμη. Ακόμα, καθώς για τη σωστή λειτουργία του συγκεκριμένου είδους υλικού απαιτείται συνεχής εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου για τον προσανατολισμό των κρυστάλλων, οι εφαρμογές τους σε κτίρια είναι περιορισμένες. Επίσης, καθώς η τεχνολογία αυτή επιτρέπει μόνο δύο εναλλακτικές καταστάσεις διαπερατότητας, τη διάφανη και την αδιαφανή, αξιοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου είναι επιθυμητή η εξασφάλιση της ιδιωτικότητας [12].

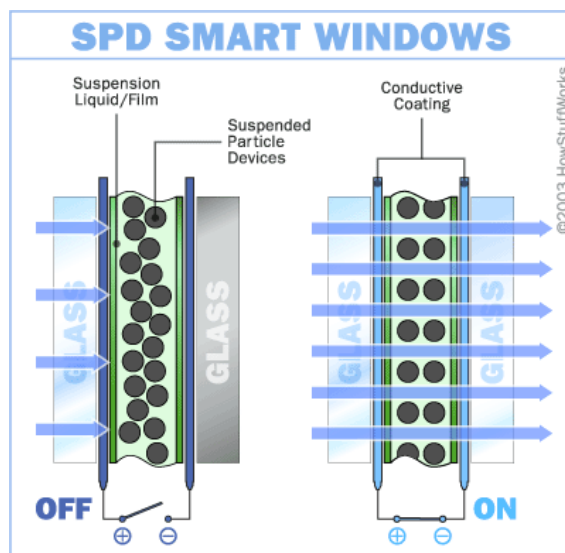


Σχήμα 4.12: Δομή και λειτουργία ενός παραθύρου υγρών κρυστάλλων

4.6 Συσκευές αιωρούμενων σωματιδίων (Suspended particle devices-SPDs)

Αυτό το είδος ηλεκτρικά ελεγχόμενων υαλοπινάκων βασίζεται στη χρήση ενός λεπτού φιλμ που έχει μορφή παραπλήσια αυτής υγρού και περιλαμβάνει πολλά μικροσκοπικά αιωρούμενα σωματίδια. Σε αυτές τις συσκευές εκατομμύρια αιωρούμενα σωματίδια τοποθετούνται μεταξύ δύο πινάκων από γυαλί ή πλαστικό που διαθέτουν ειδική διαφανή επίστρωση αγωγίμου υλικού. Το λεπτό φιλμ επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση των σωματιδίων μεταξύ των υαλοπινάκων. Όταν η συσκευή δεν τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια, τα σωματίδια βρίσκονται σε άτακτη διάταξη και αποκόπτουν μερικώς τη διαπερατότητα σε φωτεινή ακτινοβολία και τη θέα,

προσδίδοντας στον υαλοπίνακα μια μπλε απόχρωση. Μέσω διαφανών ηλεκτρικών αγωγών επιτρέπεται η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου στο φιλμ, με αποτέλεσμα την ευθυγράμμιση των σωματιδίων και την αύξηση της διαπερατότητας. Η αλλαγή της κατάστασης των υαλοπινάκων πραγματοποιείται άμεσα, ενώ το εύρος μεταβολής του SHGC είναι μικρότερο σε σύγκριση με τους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες.



Σχήμα 4.13: Δομή και λειτουργία ενός παραθύρου αιωρούμενων σωματιδίων

Με βάση τα σημερινά δεδομένα, η συσκευή χρειάζεται περίπου 100 V AC για τη μετάβαση στη διαφανή κατάσταση. Επίσης διαθέτει την ικανότητα να ρυθμιστεί και σε οποιαδήποτε ενδιάμεση κατάσταση, καθώς με μείωση της τάσης παρατηρείται σταδιακός χρωματισμός του παραθύρου μέχρι να φτάσει στην πλήρως αδιαφανή του κατάσταση. Όπως και στην περίπτωση των υγρών κρυστάλλων απαιτείται συνεχής παροχή ενέργειας για την παραμονή σε κατάσταση αυξημένης διαπερατότητας. Υαλοπίνακες αυτού του είδους που απαιτούν μικρότερη τάση για τη λειτουργία τους και επιτυγχάνουν διαφορετικούς χρωματισμούς και μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της διαπερατότητας σε ηλιακή ακτινοβολία βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι παρεμποδίζει τη διέλευση της υπεριώδους ακτινοβολίας σε ποσοστό μεγαλύτερο του 99 %. Είναι δυνατή η χρήση φωτοκυττάρων και άλλων αισθητήρων για τον αυτόματο έλεγχο του επιπέδου του φωτισμού. Καθώς οι υαλοπίνακες αυτοί τώρα εισέρχονται στην αγορά, το υψηλό τους κόστος αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό πρόβλημα [61].

5 Ενεργειακή μοντελοποίηση και προσομοίωση κτιρίων

5.1 Μέθοδοι προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων

Για να καταστεί δυνατή η ενεργειακή προσομοίωση ενός κτιρίου και ο υπολογισμός της ενεργειακής του κατανάλωσης θα πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο ενεργειακό μοντέλο. Ένα ενεργειακό μοντέλο κτιρίου αποτελεί ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του συστήματος. Η προσομοίωση ενός ενεργειακού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω μίας **άμεσης προσέγγισης (forward approach)** που προβλέπει τις τιμές των μεταβλητών εξόδου μέσω ενός μοντέλου με λεπτομερώς καθορισμένη δομή και παραμέτρους, το οποίο δέχεται ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου. Τα μοντέλα που δημιουργούνται με αυτή την προσέγγιση ονομάζονται “White-box models” και συνήθως είναι πολύ ακριβής.

Μία εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η **προσέγγιση βάσει δεδομένων (data driven approach)**, η οποία βασίζεται στη γνώση των τιμών των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να βρεθούν μέσω μετρήσεων σε πειραματικές διαδικασίες ή μπορεί να είναι ήδη γνωστά από προηγούμενες έρευνες. Τα μοντέλα που προκύπτουν μέσω αυτής της μεθόδου χαρακτηρίζονται ως “Black-box models” και αποσκοπούν στην εκτίμηση της δομής του συστήματος μέσω ανάλυσης μίας ή περισσότερων μεταβλητών μεταξύ των μεταβλητών εξόδου (καθαρή ενεργειακή κατανάλωση) και εισόδου (αριθμός ατόμων, ηλιακά δεδομένα, δεδομένα αέρα κ.ά.). Καθώς στα πλαίσια αυτής της μεθόδου η προσομοίωση βασίζεται σε δεδομένα πραγματικής λειτουργίας, τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια των μετρητικών τεχνικών και την υπολογιστική δύναμη των διατάξεων που χρησιμοποιούνται.

Η τελευταία μέθοδος προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων χαρακτηρίζεται ως προσέγγιση “Grey-box” και ουσιαστικά συνδυάζει τις προηγούμενες δύο μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται πρώτα ένα φυσικό μοντέλο που αναπαριστά τη δομή είτε τη φυσική διαμόρφωση του κτιρίου είτε των συστημάτων και του εξοπλισμού θέρμανσης, ανανέωσης αέρα, κλιματισμού και ψύξης και στη συνέχεια αναγνωρίζονται μέσω στατιστικής ανάλυσης οι πιο σημαντικές παράμετροι λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτόν απαιτείται υψηλό επίπεδο γνώσεων τόσο ως προς την κατασκευή των απαραίτητων εξισώσεων μοντελοποίησης του συστήματος, όσο και ως προς την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων. Η προσέγγιση αυτή έχει πολλές δυνατότητες, ειδικά για τον εντοπισμό και τη διάγνωση σφαλμάτων, ωστόσο η εφαρμογή της στον κτιριακό τομέα είναι περιορισμένη [62].

5.2 Το λογισμικό EnergyPlus

Τα τελευταία πενήντα χρόνια εκατοντάδες ενεργειακά προγράμματα κτιρίων έχουν αναπτυχθεί. Τα πιο χρήσιμα εργαλεία στον τομέα της ενεργειακής εξοικονόμησης κτιρίων αποτελούν τα ολοκληρωμένα προγράμματα ενεργειακής προσομοίωσης, τα οποία παρέχουν βασικούς δείκτες απόδοσης των κτιρίων, όπως η χρήση και η ζήτηση ενέργειας στο κτίριο, η εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία και το κόστος.

Το EnergyPlus είναι ένα δημόσια διαθέσιμο εργαλείο προσομοίωσης, βασισμένο στα πιο δημοφιλή χαρακτηριστικά και δυνατότητες των BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2, τα οποία αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ως εργαλεία ενεργειακής προσομοίωσης. Τα προγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με σκοπό τη χρήση τους από μηχανικούς σχεδιασμού ή αρχιτέκτονες που επιθυμούν να διαστασιολογήσουν κατάλληλα τον εξοπλισμό HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) του κτιρίου, να εκπονήσουν μελέτες κόστους κύκλου ζωής, βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης κ.λπ. Γεννήθηκαν από την ανησυχία που προκάλεσε η ενεργειακή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και από την αναγνώριση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων ως ένα μείζον ενεργειακό πρόβλημα.

Όπως και τα γονικά του προγράμματα, το EnergyPlus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων και την εκτέλεση αναλύσεων ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης ολόκληρων ή συγκεκριμένων ζωνών κτιρίων με βάση ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Τα μοντέλα EnergyPlus κατασκευάζονται με βάση τη γεωμετρία του κτιρίου, τα χαρακτηριστικά του κελύφους του, των μηχανικών συστημάτων και των συστημάτων φωτισμού, καθώς και τα χρονοδιαγράμματα ρύθμισης της συμπεριφοράς των ενοίκων και των συστημάτων HVAC. Το εργαλείο αυτό αναπτύχθηκε τα τελευταία 20 χρόνια και εφαρμόζεται συνήθως για την προσομοίωση και την ενεργειακή ανάλυση κτιρίων, καθώς παρέχει αρκετά ακριβείς προβλέψεις της εσωτερικής θερμοκρασίας, η τιμή της οποίας είναι ζωτικής σημασίας για τη διαστασιολόγηση των χρησιμοποιούμενων συστημάτων και την εξασφάλιση της υγείας και την άνεσης των ενοίκων. Υπολογίζει τα φορτία θέρμανσης και ψύξης που είναι απαραίτητα για τη διατήρηση των εσωτερικών συνθηκών στα επιθυμητά σημεία ρύθμισης θερμικού ελέγχου, τις συνθήκες σε ένα πιθανό δευτερεύον σύστημα HVAC, καθώς και πολλές άλλες λεπτομέρειες προσομοίωσης που επιτρέπουν στον χρήστη να επαληθεύσει ότι η προσομοίωση συμπεριφέρεται όπως το πραγματικό κτίριο. Πολλά από τα χαρακτηριστικά προσομοίωσης έχουν κληρονομηθεί από τα προγράμματα BLAST και DOE-2. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει το EnergyPlus είναι οι ακόλουθες:

- Ολοκληρωμένη, ταυτόχρονη επίλυση κατά την οποία η απόκριση του κτιρίου και τα κύρια και δευτερεύοντα συστήματα είναι σφικτά συζευγμένα. Όταν είναι αναγκαίο, πραγματοποιούνται επαναλήψεις.
- Χρονικά βήματα, υποπολλαπλάσια της ώρας, που καθορίζονται από τον χρήστη (με προεπιλεγμένη τιμή τα 15 λεπτά) για την αλληλεπίδραση μεταξύ των θερμικών ζωνών και του περιβάλλοντος. Μεταβλητά χρονικά βήματα για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των θερμικών ζωνών και των συστημάτων HVAC, τα οποία μεταβάλλονται αυτόματα για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της λύσης.
- Χρήση αρχείων καιρού, εισόδου και εξόδου σε μορφή κειμένου ASCII που περιλαμβάνουν σε ωριαία ή συχνότερη βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις τυποποιημένες και προσδιορισμένες από τον χρήστη αναφορές αντίστοιχα.
- Μέθοδος επίλυσης βασισμένη στον ισολογισμό θερμότητας του κτιρίου που επιτρέπει ταυτόχρονο υπολογισμό των επιδράσεων της ακτινοβολίας και της συναγωγής, τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές επιφάνειες σε κάθε χρονικό βήμα.
- Αγωγή θερμότητας σε μεταβατική κατάσταση μέσω των δομικών στοιχείων, όπως τοίχοι, οροφές, δάπεδα κ.λπ. χρησιμοποιώντας κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας.
- Βελτιωμένη μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος μέσω συνδέσεων με τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και απλουστευμένες αναλυτικές τεχνικές.
- Συνδυασμένο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που υπολογίζει την απορρόφηση/εκρόφηση είτε μέσω της ενσωμάτωσης κάθε στρώματος στις συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας με αγωγή είτε μέσω ενός αποτελεσματικού μοντέλου βάθους διείσδυσης υγρασίας (Effective Moisture Penetration Depth Model-EMPD).
- Μοντέλα θερμικής άνεσης που βασίζονται στη δραστηριότητα, την εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού, την υγρασία κ.λπ.
- Προηγμένοι υπολογισμοί υαλοπινάκων, συμπεριλαμβανομένων ελεγχόμενων περσίδων παραθύρων, ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, ισολογισμών θερμότητας σε κάθε διαδοχικό στρώμα που επιτρέπουν τον σωστό υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τους υαλοπίνακες.
- Έλεγχος φωτισμού ημέρας (daylight control), συμπεριλαμβανομένων υπολογισμών φωτισμού εσωτερικού χώρου, προσομοίωσης και ελέγχου θάμβωσης, ελέγχου φωτιστικών και υπολογισμού της επίδρασης του μειωμένου τεχνητού φωτισμού στη θέρμανση και την ψύξη.
- Συστήματα HVAC (συμβατικά και λαμβάνοντας υπόψιν την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας) που βασίζονται σε επαναληπτικό υπολογισμό και επιτρέπουν

στους χρήστες να μοντελοποιούν τυπικά και ελαφρώς τροποποιημένα συστήματα χωρίς να ανασυνθέτουν τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος.

- Υπολογισμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης με ικανότητα πρόβλεψης των σωματιδίων CO₂, SO_x, NO_x, CO και της παραγωγής υδρογονανθράκων τόσο για την επιτόπια όσο και για την απομακρυσμένη μετατροπή ενέργειας.
- Δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δημοφιλή περιβάλλοντα προσομοίωσης και εργαλεία όπως το WINDOW και το DElight με σκοπό την λεπτομερέστερη ανάλυση των συστατικών στοιχείων του κτιρίου [63].

Το EnergyPlus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μίας ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίου μέσω της άμεσης προσέγγισης. Περιληπτικά, τα βήματα που θα πρέπει να ακολουθηθούν για τη δημιουργία και τη χρήση ενός τέτοιου μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

1. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν τον σχεδιασμό του κτιρίου (διαστάσεις, μορφή, προσανατολισμός κ.α.)
2. Σχεδιασμός του κτιρίου με τη βοήθεια κατάλληλου σχεδιαστικού προγράμματος που μπορεί να συζευχθεί με το EnergyPlus και εξαγωγή του αντίστοιχου αρχείου IDF
3. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν την κατασκευή του κτιρίου (υλικά κατασκευής, θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες) και ενσωμάτωσή τους μέσω του EnergyPlus
4. Απόκτηση των αρχείων κλιματικών δεδομένων που αφορούν την περιοχή που βρίσκεται το υπό μελέτη κτίριο και των γεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής (γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ζώνη ώρας και υψόμετρο) και ενσωμάτωσή τους στο αρχείο
5. Επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών του συστήματος HVAC και καθορισμός των απαραίτητων ρυθμίσεων λειτουργίας του
6. Καθορισμός των διαφόρων «προγραμμάτων λειτουργίας του κτιρίου» που μπορεί να αφορούν τη συμπεριφορά των ενοίκων, τη λειτουργία των συστημάτων φωτισμού και του ηλεκτρικού εξοπλισμού κ.ά.
7. Επιλογή των επιθυμητών μεταβλητών εξόδου και του χρονικού βήματος υπολογισμού
8. Εκτέλεση της ενεργειακής προσομοίωσης για την επιθυμητή χρονική περίοδο
9. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας

5.3 Το λογισμικό WINDOW

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WINDOW 7.6 για την επιλογή των υαλοπινάκων που μελετήθηκαν. Το WINDOW περιλαμβάνει βιβλιοθήκες μεμονωμένων στρώσεων γυαλιού, αλλά και ολοκληρωμένων συστημάτων παραθύρων, καθώς και τις οπτικές ιδιότητες κάθε γυάλινης επιφάνειας. Οι βιβλιοθήκες του WINDOW έχουν δημιουργηθεί με βάση την Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Υαλοπινάκων (International Glazing Database) και περιλαμβάνουν προϊόντα από συγκεκριμένους κατασκευαστές, αλλά και γενικότερες καταχωρήσεις προϊόντων, οι ιδιότητες των οποίων έχουν προκύψει ως μέσες τιμές δεδομένων από τουλάχιστον δύο δείγματα.

Με τη χρήση του λογισμικού αυτού είναι δυνατός ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραθύρου, επιλέγοντας υαλοπίνακες, υλικά πλήρωσης και κατάλληλα πλαίσια από τις βιβλιοθήκες του προγράμματος ή ορίζοντας καινούργια. Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με άλλα προγράμματα, όπως είναι το EnergyPlus ή το TRNSYS για την αυτόματη μεταφορά των δεδομένων των παραθύρων. Μέσω του WINDOW μπορεί επίσης να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμοπερατότητας στο κέντρο του υαλοπίνακα, ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους και η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία για κάθε σύστημα που κατασκευάζεται [16].

	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond	Comment
Glass 1	103	CLEAR_6.DAT	#	5.7	<input type="checkbox"/>	0.771	0.070	0.070	0.884	0.080	0.080	0.000	0.840	0.840	1.000	
Gap 1	1	Air		12.0												
Glass 2	103	CLEAR_6.DAT	#	5.7	<input type="checkbox"/>	0.771	0.070	0.070	0.884	0.080	0.080	0.000	0.840	0.840	1.000	

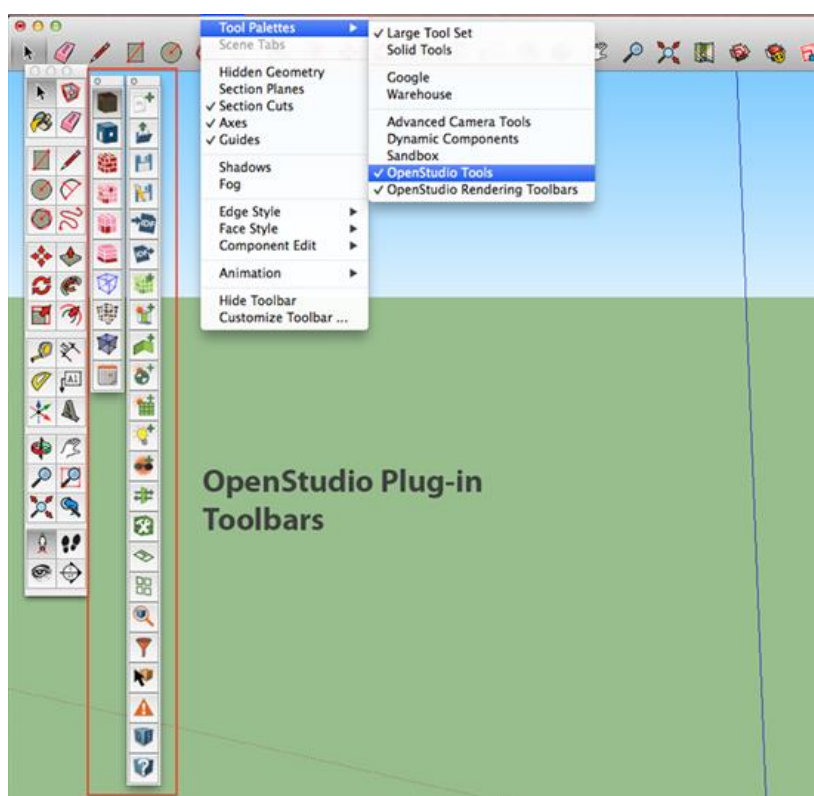
Ufactor		SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Layer 1 Keff	Gap 1 Keff	Layer 2 Keff
W/m2-K				W/m2		W/m-K	W/m-K	W/m-K	W/m-K
2.703		0.809	0.704	533	0.786	0.1175	1.0000	0.0638	1.0000

Σχήμα 5.1: Παράδειγμα σχεδιασμού ενός συστήματος παραθύρου στο περιβάλλον του WINDOW

5.4 Το λογισμικό SketchUp

Η σχεδίαση του κτιριακού κελύφους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος SketchUp 2016. Το SketchUp είναι ένα λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης μοντέλων με ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως στην αρχιτεκτονική, την εσωτερική διακόσμηση κτιρίων, σε εφαρμογές πολιτικού και μηχανολόγου μηχανικού κ.ά. Καθώς το πρόγραμμα αυτό είναι αρκετά απλό στην εκμάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με λογισμικά σχεδίασης CAD.

Η χρήση του SketchUp για εφαρμογές που σχετίζονται με το EnergyPlus είναι ευρέως διαδεδομένη. Η συνεργασία μεταξύ των δύο προγραμμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσθήκης στο SketchUp κατάλληλου plug-in που επιτρέπει την εξαγωγή του αρχείου του κτιρίου σε μορφή αρχείου IDF, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασικό αρχείο εισόδου στο EnergyPlus. Θα πρέπει πάντα να εξασφαλίζεται η συμβατότητα του plug-in και της έκδοσης του SketchUp που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε το plug-in Openstudio 1.13.0.



Σχήμα 5.2: Τα εργαλεία που προσφέρει στο σχεδιαστικό περιβάλλον του SketchUp το Openstudio 1.13.0 plug-in

5.5 Μοντελοποίηση και έλεγχος της μεταφοράς θερμότητας στα κτίρια

Ο σκοπός κάθε συστήματος θέρμανσης ή κλιματισμού είναι η επίτευξη θερμικής άνεσης στους χώρους διαμονής και δραστηριότητας των χρηστών κάθε κτιρίου. Η θερμική άνεση αποτελεί μια σχετικά υποκειμενική κατάσταση, η οποία επηρεάζεται από μία σειρά παραμέτρων και συνθηκών, οι σημαντικότερες των οποίων είναι [13]:

- Η θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα
- Η ένδυση και δραστηριότητα των χρηστών
- Η ταχύτητα των εσωτερικών ρευμάτων αέρα

Μέσω της μοντελοποίησης και προσομοίωσης της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου είναι δυνατό να ελεγχθεί ότι εξασφαλίζονται οι απαραίτητες συνθήκες άνεσης για τους ενοίκους σε όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά και να βελτιστοποιηθεί η ενεργειακή του απόδοση.

5.5.1 Η έννοια της θερμικής ζώνης

Οι επιμέρους επιφάνειες ενός κτιριακού κελύφους αποτελούν ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό ενός κτιριακού μοντέλου. Το EnergyPlus, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του κτιρίου στην παρούσα εργασία, αναγνωρίζει γενικά δύο τύπους επιφανειών:

1. Τις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας και
2. Τις επιφάνειες αποθήκευσης θερμότητας

Ως επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας χαρακτηρίζονται οι επιφάνειες που αναμένεται να διαχωρίζουν χώρους με σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά. Συνεπώς, οι εξωτερικές επιφάνειες, όπως είναι οι εξωτερικοί τοίχοι, οι οροφές και το δάπεδο, αλλά και οι εσωτερικές επιφάνειες που διαχωρίζουν χώρους διαφορετικής θερμοκρασίας χαρακτηρίζονται ως επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας. Με βάση τον γενικό κανόνα που ακολουθείται, όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες χαρακτηρίζονται ως επιφάνειες αποθήκευσης θερμότητας.

Το πρώτο βήμα για τον σχεδιασμό ενός κτιριακού μοντέλου είναι η δημιουργία των επιμέρους θερμικών ζωνών. Μία κτιριακή «ζώνη» αφορά τη μεταφορά θερμότητας που λαμβάνει χώρα σε ένα κτίριο και όχι τη γεωμετρία του. Ως θερμική ζώνη χαρακτηρίζεται ένας όγκος αέρα που βρίσκεται σε ενιαία θερμοκρασία, καθώς και όλες οι επιφάνειες μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας που βρίσκονται στα όρια αυτού του όγκου αέρα ή στο εσωτερικό του. Μία θερμική ζώνη αποτελείται από χώρους με παρόμοια χρήση, ίδιο προφίλ λειτουργίας ή/και κοινά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα. Ο διαχωρισμός του κτιριακού μοντέλου σε θερμικές ζώνες είναι αναγκαίος, διότι το EnergyPlus υπολογίζει μέσω κατάλληλων

ισολογισμών θερμότητας την ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της κάθε θερμικής ζώνης εντός προκαθορισμένων θερμοκρασιακών ορίων με ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Εφόσον μία θερμική ζώνη χαρακτηρίζεται από ενιαία θερμοκρασία αέρα, ένα κτίριο συνήθως δε διακρίνεται σε θερμικές ζώνες με βάση το πλήθος των δωματίων του, αλλά με βάση το πλήθος των ανεξάρτητων συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού που διαθέτει.

Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. και το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 13790:2009, ο καθορισμός ανεξάρτητων θερμικών ζωνών επιβάλλεται όταν:

- Η επιθυμητή θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων διαφέρει κατά περισσότερο από 4 °C σε σχέση με άλλα τμήματα του κτιρίου κατά τη χειμερινή ή/και τη θερινή περίοδο
- Οι χώροι παρουσιάζουν διαφορετική χρήση ή λειτουργία, καθώς οι χώροι διαφορετικών χρήσεων έχουν συνήθως και διαφορετικές εσωτερικές συνθήκες σχεδιασμού (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, νωπό αέρα κ.ά.)
- Υπάρχουν χώροι που χρησιμοποιούν διαφορετικά συστήματα θέρμανσης ή/και ψύξης ή/και κλιματισμού λόγω διαφορετικών επιθυμητών εσωτερικών συνθηκών
- Υπάρχουν χώροι με πολύ μεγάλες ενεργειακές συναλλαγές σε σχέση με το υπόλοιπο κτίριο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι χώροι με νότιο προσανατολισμό, οι οποίοι συνήθως παρουσιάζουν σημαντικά ηλιακά θερμικά κέρδη
- Υπάρχουν χώροι, όπου το σύστημα μηχανικού αερισμού (παροχής νωπού αέρα ή κλιματισμού) καλύπτει λιγότερο από το 80 % της επιφάνειας κάτοψης του χώρου.

Χώροι με όγκο μικρότερο από το 10 % του συνολικού κτιριακού όγκου ή/και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση (συγκριτικά με το υπόλοιπο κτίριο) δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως αυτόνομες θερμικές ζώνες. Το ίδιο ισχύει και για δευτερεύοντες βοηθητικούς χώρους που δεν θερμαίνονται και συνδέονται λειτουργικά με κάποια θερμική ζώνη. Οι χώροι αυτοί ενσωματώνονται στην αντίστοιχη θερμική ζώνη.

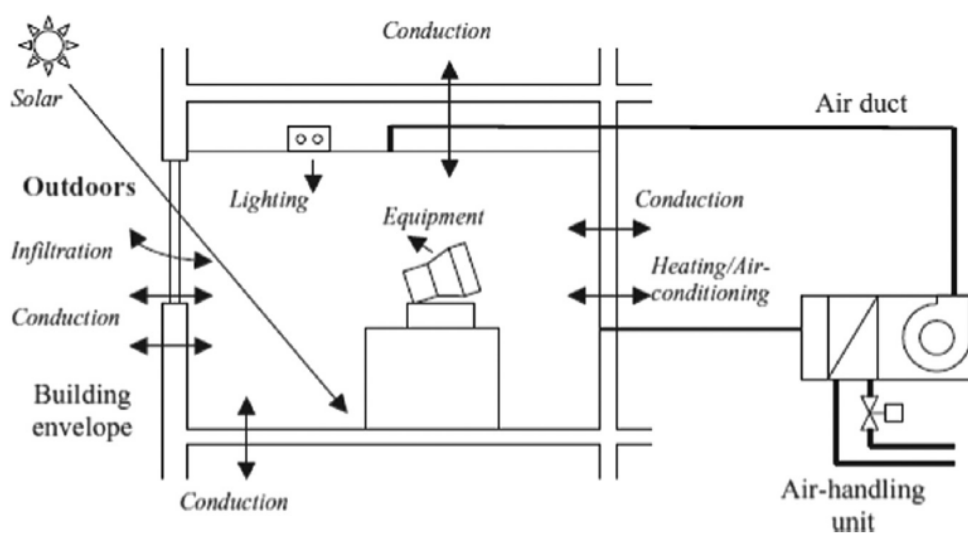
Στη γενική περίπτωση ολοκληρωμένες εκτιμήσεις του συνολικού φορτίου ενός κτιρίου μπορούν να αποκτηθούν με αρκετά απλά μοντέλα, ενώ πιο λεπτομερή μοντέλα απαιτούνται όταν είναι επιθυμητή η πιο ακριβής μελέτη της κατανομής των φορτίων στο εσωτερικό του κτιρίου [13].

5.5.2 Συστήματα για την εξασφάλιση συνθηκών άνεσης-Χωρικό φορτίο κτιρίου

Για την εξασφάλιση της θερμικής και οπτικής άνεσης των ατόμων τα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), τα συστήματα φωτισμού και ο

υπόλοιπος ηλεκτρικός εξοπλισμός αποτελούν τους κύριους καταναλωτές ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Για τη διατήρηση θερμικής άνεσης απαιτείται η προσθήκη ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου μέσω ενός συστήματος θέρμανσης ή η αφαίρεσή του μέσω ενός συστήματος ψύξης. Το ποσό αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες, τη σχετική υγρασία και τα χαρακτηριστικά του ανέμου, αλλά και από τις εσωτερικές συνθήκες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των ενοίκων, τη ροή θερμότητας και υγρασίας μέσω των τοίχων και των εσωτερικών χώρων κ.α. Η ενέργεια αυτή αποτελεί φορτίο για τα συστήματα θέρμανσης, ανανέωσης αέρα και κλιματισμού (HVAC) και συνεπώς ονομάζεται Χωρικό Φορτίο Κτιρίου (Building Space Load-BSL). Από μαθηματική άποψη, το χωρικό φορτίο αποτελεί ουσιαστικά τον ρυθμό προσθήκης ή αφαίρεσης θερμότητας από τον χώρο, με σκοπό τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Τα περισσότερα συστήματα HVAC σχεδιάζονται ανάλογα με τις ανάγκες του χώρου σε θέρμανση και ψύξη, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τον παραγόμενο θόρυβο, την ποιότητα και την κίνηση του αέρα.

Στα πλαίσια ενός κτιρίου συναντώνται και οι τρεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας. Στους κλιματιζόμενους χώρους πραγματοποιείται μεταφορά αισθητής θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής ή/και ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας λόγω μεταβολής της υγρασίας, η οποία μπορεί να προκληθεί από την παραγωγή υδρατμών από εξοπλισμό στο εσωτερικό του δωματίου ή μέσω της αναπνοής των ατόμων.



Σχήμα 5.3: Η μεταφορά ενέργειας στο εσωτερικό ενός κτιρίου με τη βοήθεια ενός συστήματος HVAC

Σε ένα κτίριο γραφείων με μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων η τοποθεσία, ο προσανατολισμός και ο WWR αποτελούν τις πιο καθοριστικές παραμέτρους αναφορικά με τις συνολικές ανάγκες θέρμανσης και ψύξης [64].

6 Διαδικασία κατασκευής του κτιριακού μοντέλου

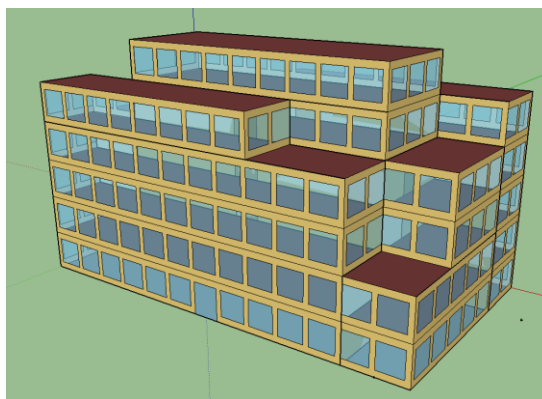
6.1 Το υπό μελέτη κτίριο

Το κτίριο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι ένα εξάωρο κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική επιφάνεια υαλοπινάκων. Καθώς σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη ενός μοντέρνου κτιρίου γραφείων που θα εκμεταλλεύεται τη μεγάλη γυάλινη του επιφάνεια για τη μείωση των ετήσιων αναγκών θέρμανσης και φωτισμού, αποφασίστηκε η επιλογή ενός κτιρίου με ιδιαίτερη γεωμετρία κελύφους που θα αντιπροσωπεύει τις σύγχρονες τάσεις της αρχιτεκτονικής. Το κτίριο αυτό σχεδιάστηκε με βάση την αρχιτεκτονική του “Urban Glass House”, ενός γυάλινου κτιρίου που σχεδιάστηκε από τον Αμερικανό αρχιτέκτονα Philip Johnson και βρίσκεται στην περιοχή της πλατείας Hudson, στο Μανχάταν της Νέας Υόρκης.



Σχήμα 6.1: Το Urban Glass House στη Νέα Υόρκη

Μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος SketchUp 2016 και με τη βοήθεια του plugin Openstudio 1.13.0 έγινε δυνατός ο σχεδιασμός του κτιριακού μοντέλου, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω:



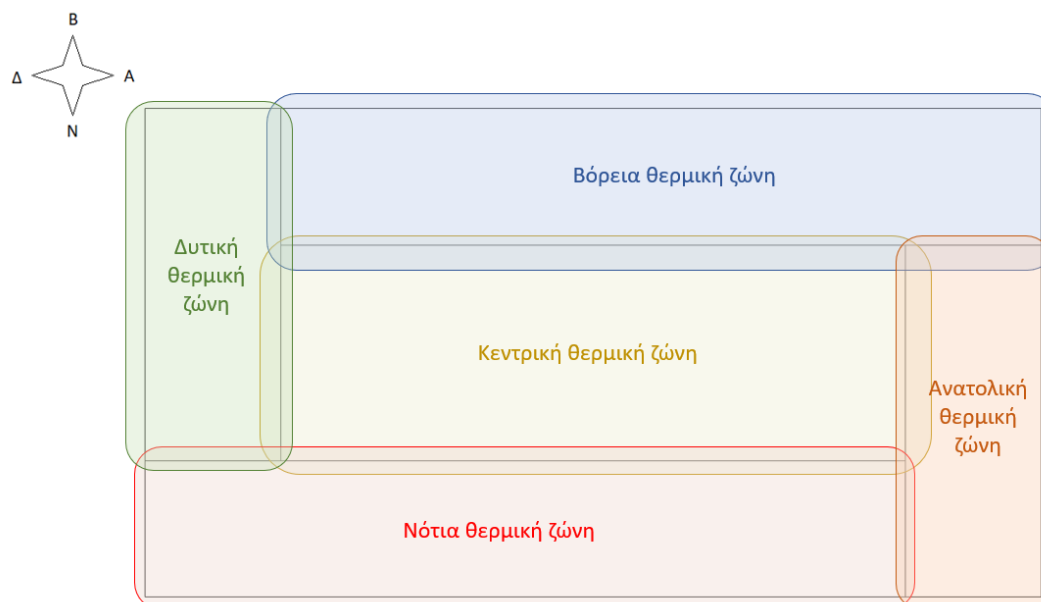
Σχήμα 6.2: Το κτιριακό μοντέλο που δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού SketchUp

Στη συνέχεια θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των βημάτων σχεδίασης του παραπάνω μοντέλου.

6.2 Διαδικασία σχεδιασμού του κτιριακού μοντέλου στο SketchUp 2016

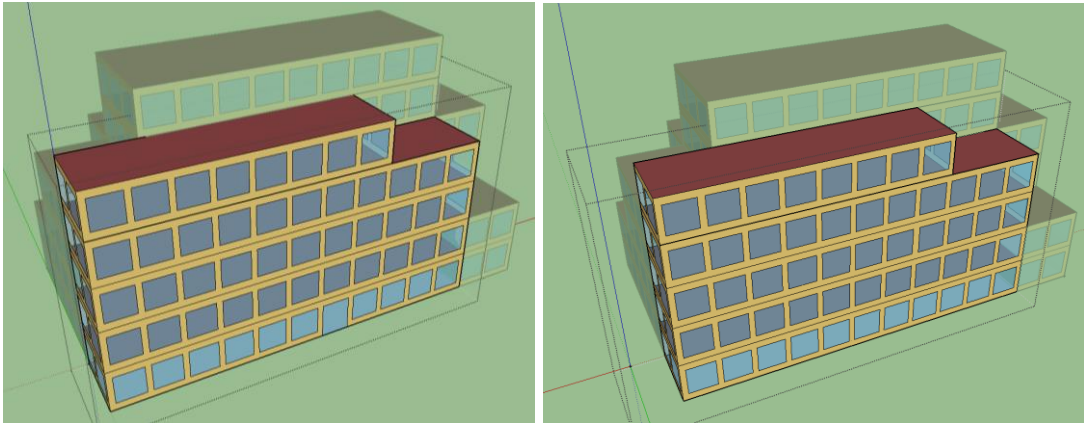
6.2.1 Διαχωρισμός του κτιρίου σε θερμικές ζώνες

Στα περισσότερα κτιριακά μοντέλα συνιστάται ο διαχωρισμός του κτιρίου στον ελάχιστο δυνατό αριθμό θερμικών ζωνών, προκειμένου να επιτυγχάνεται οικονομία στο πλήθος των δεδομένων εισόδου και στον υπολογιστικό χρόνο [13]. Στην παρούσα εργασία αποφασίστηκε ο διαχωρισμός του κτιριακού μοντέλου σε πέντε κατακόρυφες θερμικές ζώνες, οι οποίες παρουσιάζονται στην παρακάτω κάτοψη του πρώτου ορόφου:

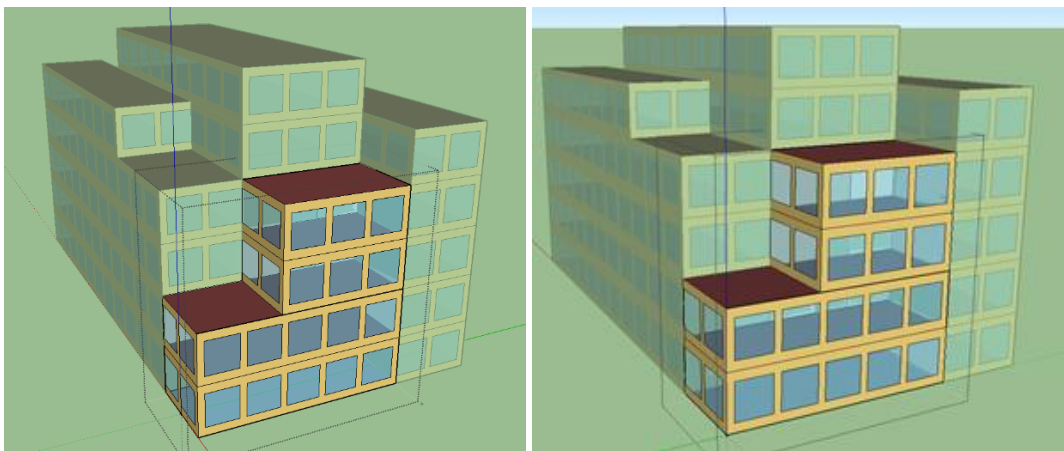


Σχήμα 6.3: Οι πέντε θερμικές ζώνες του υπό μελέτη κτιρίου

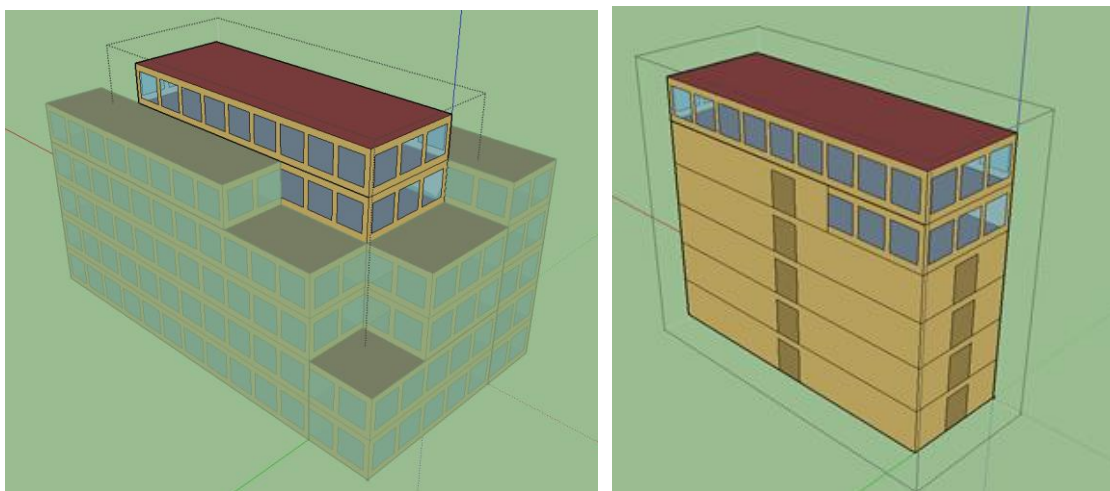
Η διάκριση των θερμικών ζωνών στο κτιριακό μοντέλο που δημιουργήθηκε φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.4: Η νότια (αριστερά) και βόρεια (δεξιά) θερμική ζώνη



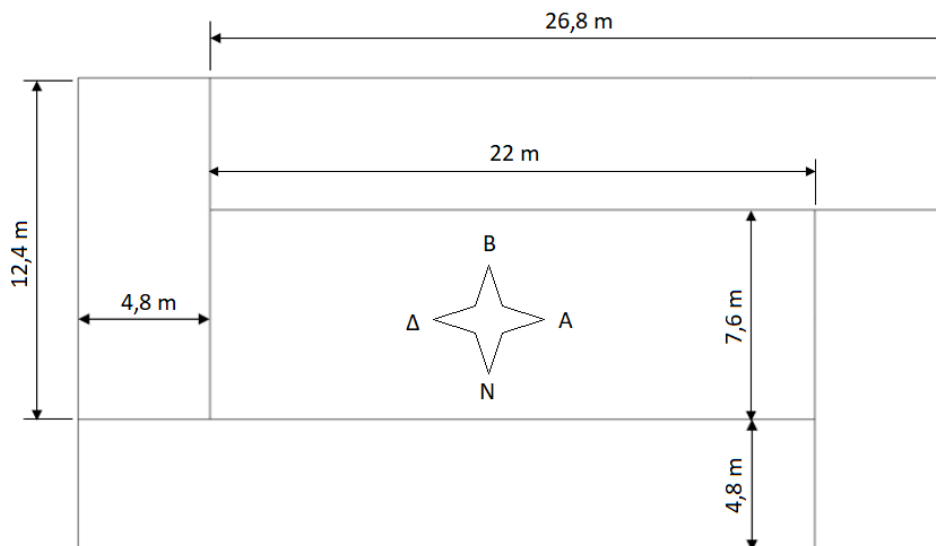
Σχήμα 6.5: Η ανατολική (αριστερά) και δυτική (δεξιά) θερμική ζώνη



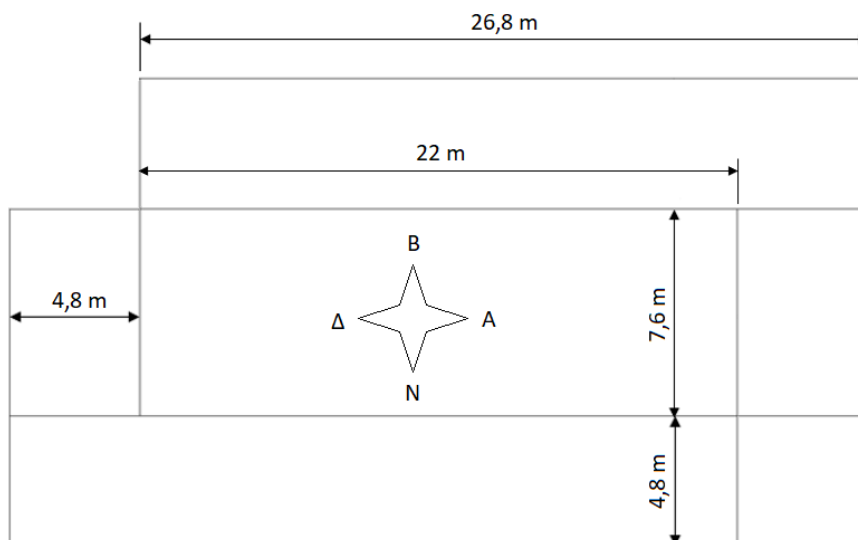
Σχήμα 6.6: Η κεντρική θερμική ζώνη στο συνολικό κτίριο (αριστερά) και χωρίς τις υπόλοιπες ζώνες (δεξιά)

6.2.2 Σχεδιασμός του κτιριακού κελύφους

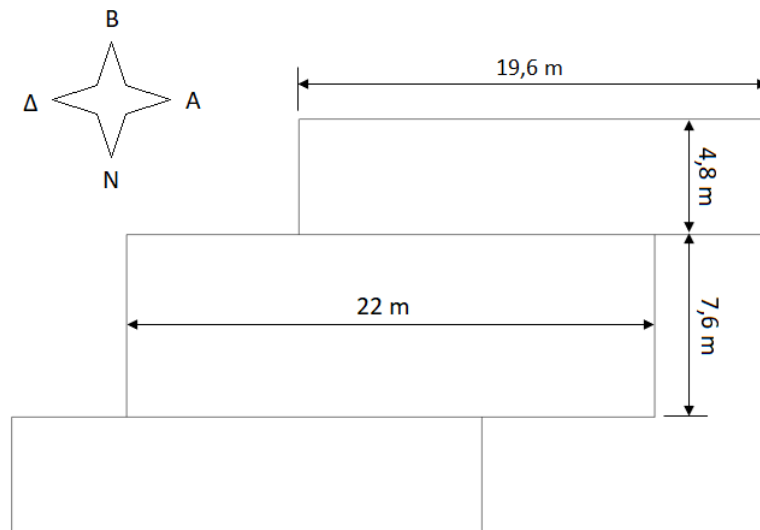
Μετά από τη δημιουργία κάθε θερμικής ζώνης μέσω του κατάλληλου εργαλείου του SketchUp, οι επιμέρους χώροι κάθε ορόφου σχεδιάζονται ως ορθογώνιοι παραλληλεπίπεδοι χώροι στο εσωτερικό της αντίστοιχης θερμικής ζώνης. Κάθε όροφος σχεδιάστηκε με ύψος 3 m. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατόψεις με τις διαστάσεις των επιμέρους χώρων για κάθε όροφο του κτιρίου:



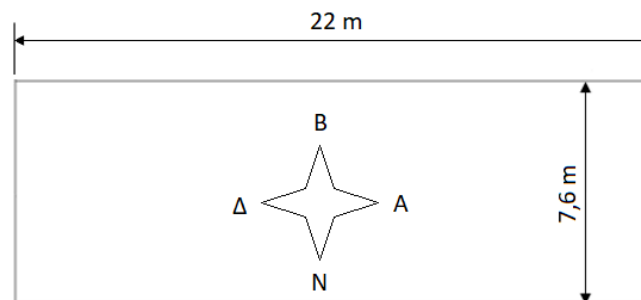
Σχήμα 6.7: Κάτοψη του πρώτου και δεύτερου ορόφου



Σχήμα 6.8: Κάτοψη του τρίτου και τέταρτου ορόφου



Σχήμα 6.9: Κάτοψη του πέμπτου ορόφου



Σχήμα 6.10: Κάτοψη του έκτου ορόφου

Μετά από τον σχεδιασμό των εξωτερικών τοίχων, της οροφής και των δαπέδων σχεδιάστηκαν η γυάλινη πόρτα και τα παράθυρα στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου. Η πόρτα τοποθετήθηκε στο κέντρο της νότιας πρόσοψης του κτιρίου με μήκος 2 m και ύψος 2,5 m. Συνολικά σχεδιάστηκαν 223 υαλοπίνακες στο κτιριακό κέλυφος με διαστάσεις 2 m x 2 m, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους, αλλά και από τα όρια κάθε τοίχου οριζόντια απόσταση 0,4 m. Η κατακόρυφη απόσταση των υαλοπινάκων από τα όρια κάθε ορόφου είναι 0,5 m. Ακόμα, σχεδιάστηκαν εσωτερικές πόρτες που συνδέουν τους πλευρικούς χώρους κάθε ορόφου που ανήκουν σε διαφορετικές θερμικές ζώνες με την κεντρική θερμική ζώνη. Οι πόρτες αυτές έχουν ίδιες διαστάσεις με την εξωτερική πόρτα και τοποθετήθηκαν στο κέντρο της κοινής επιφάνειας των χώρων.

6.2.3 Καθορισμός οριακών συνθηκών στοιχείων κτιριακού κελύφους

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία σχεδιασμού του κτιριακού κελύφους, ήταν αναγκαίος ο καθορισμός των βασικών χαρακτηριστικών κάθε επιφάνειας, δηλαδή της ονομασίας της, του «τύπου» της (π.χ. πόρτα, παράθυρο) και των οριακών συνθηκών της. Για τις εξωτερικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το φυσικό περιβάλλον επιλέχθηκε η οριακή συνθήκη “outdoors”, η οποία δηλώνει στο πρόγραμμα ότι η συγκεκριμένη επιφάνεια δέχεται προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, αλλά και ότι είναι εκτεθειμένη στις εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Για τις εσωτερικές επιφάνειες επιλέχθηκε η οριακή συνθήκη “surface”, η οποία δηλώνει ότι η συγκεκριμένη επιφάνεια έρχεται σε άμεση επαφή με μία άλλη επιφάνεια και στη συνέχεια καθορίστηκε η επιφάνεια που λειτουργεί ως οριακή της συνθήκη.

Τελικό βήμα του σχεδιασμού του κτιριακού κελύφους στο SketchUp είναι η χρήση του εργαλείου “Surface Matching” που ρυθμίζει τις κατάλληλες οριακές συνθήκες για κάθε επιφάνεια και «ταιριάζει» αυτόματα τις οριακές συνθήκες των επιφανειών που συνορεύουν μεταξύ τους μέσω της επιλογής “Match in Entire Model”. Στη συνέχεια, μέσω του εργαλείου “Export EnergyPlus Input Data File” δημιουργείται ένα αρχείο IDF με τα χαρακτηριστικά του κτιρίου που σχεδιάστηκε, το οποίο είναι κατάλληλο για επεξεργασία με χρήση του EnergyPlus.

6.3 Καθορισμός των απαραίτητων δεδομένων εισόδου

Για την πραγματοποίηση της ενεργειακής προσομοίωσης του κτιρίου απαιτείται η εισαγωγή των κατάλληλων δεδομένων εισόδου στις διάφορες καρτέλες που προσφέρει ο IDF Editor του EnergyPlus. Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των ενεργειακών προσομοιώσεων του κτιρίου.

6.3.1 Τοποθεσία

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας θεωρήθηκε ότι το κτίριο βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας. Τα βασικά δεδομένα που απαιτούνται για την περιγραφή της τοποθεσίας, εισάγονται στην καρτέλα *Site: Location* του EnergyPlus. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Βασικά δεδομένα για την περιοχή της Αθήνας

Γεωγραφικό πλάτος	37,9°
Γεωγραφικό μήκος	23,73°
Ζώνη ώρας	2 hr
Υψόμετρο	15 m

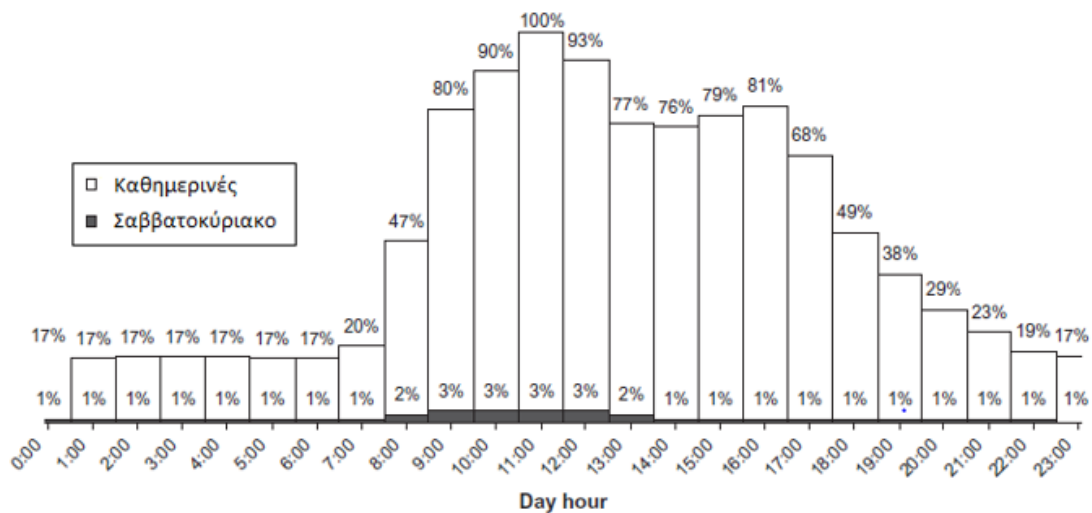
Οι παραπάνω ρυθμίσεις στο περιβάλλον του EnergyPlus φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

Field	Units	Obj1
Name		Athens
Latitude	deg	37,9
Longitude	deg	23,73
Time Zone	hr	2
Elevation	m	15

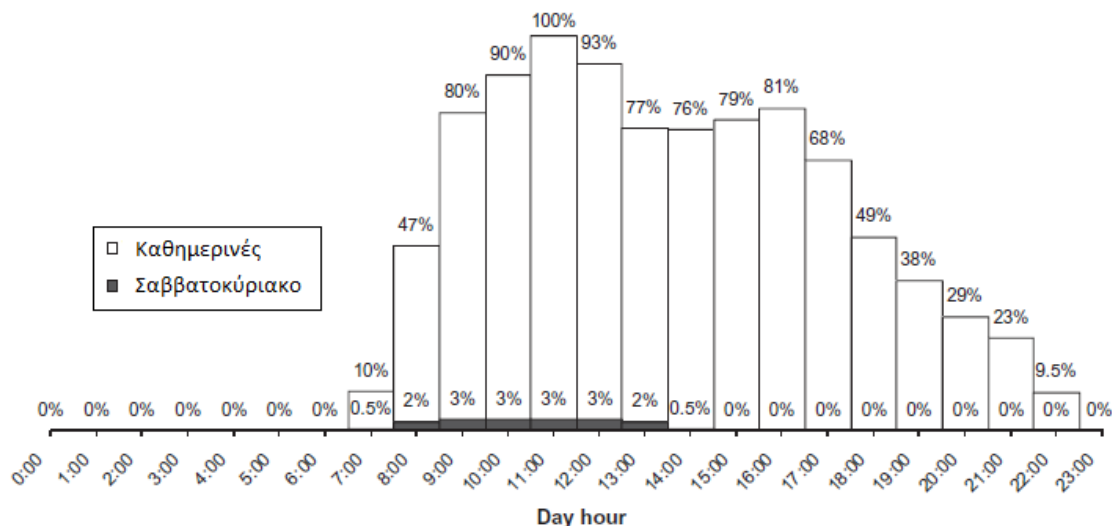
Σχήμα 6.11: Ρυθμίσεις τοποθεσίας στο EnergyPlus

6.3.2 Προγράμματα λειτουργίας

Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στον χρήστη τον καθορισμό προγραμμάτων λειτουργίας που σχετίζονται με διάφορα είδη φορτίων του κτιρίου, όπως είναι η δραστηριότητα των εργαζομένων του κτιρίου, ο φωτισμός και ο υπόλοιπος ηλεκτρικός εξοπλισμός. Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 6.12: Πρόγραμμα λειτουργίας του φωτισμού και του ηλεκτρικού εξοπλισμού



Σχήμα 6.13: Πρόγραμμα παρουσίας ατόμων στο εσωτερικό του κτιρίου

Τα προγράμματα ορίζονται με τη μορφή ποσοστού ως προς το μέγιστο δυνατό φορτίο σε κάθε περίπτωση στην καρτέλα *Schedule:Compact*.

Σύμφωνα με την αναθεωρημένη μορφή του Κ.Ε.Ν.Α.Κ. του 2017 για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία ανήκει η Αθήνα, ως περίοδος θέρμανσης θεωρείται η περίοδος που μεσολαβεί μεταξύ 1^{ης} Νοεμβρίου και 15^{ης} Απριλίου. Συνεπώς, ορίστηκε ένα πρόγραμμα λειτουργίας που θα εξασφαλίζει τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης μόνο κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, από τις 08:00 μέχρι τις 22:00 το βράδυ. Αντίστοιχα, δημιουργήθηκε πρόγραμμα λειτουργίας του συστήματος ψύξης για την περίοδο ψύξης, η οποία διαρκεί από τη 15^η Μαΐου έως τη 15^η Σεπτεμβρίου, για το ίδιο εύρος ωρών κατά τη διάρκεια της ημέρας [13].

Ακόμα, δημιουργήθηκαν δύο απαραίτητα προγράμματα λειτουργίας για τη λειτουργία του θερμοστάτη του κτιρίου. Συγκεκριμένα, για τη χειμερινή περίοδο δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα που εξασφαλίζει ότι όταν το σύστημα θέρμανσης βρίσκεται σε λειτουργία, τότε θα λειτουργεί με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε κάθε θερμική ζώνη στους 20 °C. Αντίστοιχα, κατά τη θερινή περίοδο το σύστημα ψύξης λειτουργεί με σκοπό τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στους 26 °C.

Τέλος, σημειώνεται ότι παρότι στην περίπτωση των θερμοχρωμικών παραθύρων δεν είναι δυνατή η αποφυγή του χρωματισμού τους κατά τη χειμερινή περίοδο εφόσον ο χρωματισμός τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης, αυτή η δυνατότητα υπάρχει στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων. Επομένως, ορίστηκε κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας που αποτρέπει τον χρωματισμό της ηλεκτροχρωμικής επίστρωσης κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, με σκοπό την εξασφάλιση μεγαλύτερων ηλιακών θερμικών κερδών και τη

μείωση των αναγκών θέρμανσης. Επομένως, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα έχουν τη δυνατότητα χρωματισμού μόνο κατά την περίοδο ψύξης, κατά την οποία λειτουργεί και το σύστημα ψύξης του κτιρίου.

6.3.3 Σύσταση δομικών στοιχείων κτιρίου

Για τη σωστή μοντελοποίηση του κτιρίου θα πρέπει να οριστούν τα στρώματα υλικών από τα οποία αποτελείται κάθε δομικό του στοιχείο. Στην καρτέλα *Material* ορίζονται τα στρώματα υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, των ταβανιών, των οροφών και του δαπέδου. Για κάθε στρώμα υλικού θα πρέπει να οριστεί η τραχύτητά του, το πάχος του, η ειδική θερμική αγωγιμότητά του, η πυκνότητά του και η ειδική θερμοχωρητικότητά του. Επίσης, θα πρέπει να οριστούν οι συντελεστές απορρόφησης θερμότητας, απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και απορρόφησης ορατής ακτινοβολίας.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11
Name		Wall Finishing Layer	Brick	EW Insulation	RF Inner Finishing L	Concrete	RF Insulation	RF Outer Finishing L	Ceramic Tiles	W Insulation	Wood	FL Insulation
Roughness		MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumSmooth	Rough	MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough
Thickness	m	0,025	0,09	0,067	0,02	0,2	0,075	0,1	0,01	0,071	0,04	0,075
Conductivity	W/m-K	0,87	0,7	0,035	0,87	0,93	0,035	0,87	0,6	0,035	0,18	0,035
Density	kg/m3	1900	1970	30	1900	2300	30	1900	2000	30	820	30
Specific Heat	J/kg-K	1000	800	840	1000	653	840	1000	1090	840	2300	840
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,4	0,8	0,7	0,65	0,7	0,7	0,65	0,7	0,7	0,5	0,7
Visible Absorptance		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7

Σχήμα 6.14: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων στο EnergyPlus

6.3.4 Υλικά κατασκευής υαλοπινάκων

Κάθε παράθυρο σχεδιάζεται ως ένα σύνολο από διαδοχικά στρώματα γυαλιού και διακένων με κατάλληλο αέριο. Στην καρτέλα *Window Material: Glazing* καθορίζονται οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες, αλλά και το πάχος των επιμέρους στρώσεων γυαλιού που χρησιμοποιούνται για τη δόμηση των παραθύρων. Οι τιμές αυτές βρέθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού WINDOW. Επίσης, στην καρτέλα αυτή ορίζονται και οι ιδιότητες του γυαλιού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γυάλινης πόρτας στην νότια πρόσοψη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ιδιότητες των στρωμάτων γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Glass Door	ELECTRO GLASS LIGHT STATE	ELECTRO GLASS DARK STATE	CLEAR5.LOF	LOW-E_5.LOG
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name						
Thickness	m	0,009456	0,006	0,006	0,0047	0,0047
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,279	0,814	0,111	0,796	0,676
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,047	0,086	0,179	0,074	0,117
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,05	0,086	0,179	0,074	0,105
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,393	0,847	0,128	0,888	0,826
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,052	0,099	0,081	0,082	0,115
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,056	0,099	0,081	0,082	0,109
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0	0	0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84	0,84	0,158
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Conductivity	W/m-K	1	0,9	0,9	1	1
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		1			1	1
Solar Diffusing		No			No	No
Young's modulus	Pa	72000000000			72000000000	72000000000
Poisson's ratio		0,22			0,22	0,22

Σχήμα 6.15: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών των στρώσεων γυαλιού των παραθύρων στο EnergyPlus

6.3.5 Κατασκευή θερμοχρωμικών υαλοπινάκων

Το EnergyPlus διαθέτει ειδική καρτέλα για την εισαγωγή των χαρακτηριστικών των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων, η οποία ονομάζεται *Window Material: Glazing Group: Thermochromic*. Η λειτουργία αυτή δίνει τη δυνατότητα ορισμού διαφορετικών στρωμάτων γυαλιού, που θα αντιστοιχούν στο στρώμα γυαλιού με τη θερμοχρωμική επίστρωση, για διάφορα εύρη θερμοκρασιών. Δηλαδή, υπάρχει η δυνατότητα μελέτης των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων και σε ενδιάμεσες καταστάσεις χρωματισμού μέχρι να μεταβούν στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση.

Field	Units	Obj1
Name		TCCGlazings
Optical Data Temperature 1	C	25
Window Material Glazing Name 1		WO18RT25
Optical Data Temperature 2	C	27
Window Material Glazing Name 2		WO18RT27
Optical Data Temperature 3	C	29
Window Material Glazing Name 3		WO18RT29
Optical Data Temperature 4	C	31
Window Material Glazing Name 4		WO18RT31
Optical Data Temperature 5	C	33
Window Material Glazing Name 5		WO18RT33
Optical Data Temperature 6	C	35
Window Material Glazing Name 6		WO18RT35
Optical Data Temperature 7	C	37
Window Material Glazing Name 7		WO18RT37
Optical Data Temperature 8	C	39
Window Material Glazing Name 8		WO18RT39
Optical Data Temperature 9	C	41
Window Material Glazing Name 9		WO18RT41
Optical Data Temperature 10	C	43
Window Material Glazing Name 10		WO18RT43
Optical Data Temperature 11	C	45
Window Material Glazing Name 11		WO18RT45
Optical Data Temperature 12	C	50
Window Material Glazing Name 12		WO18RT50
Optical Data Temperature 13	C	55
Window Material Glazing Name 13		WO18RT55
Optical Data Temperature 14	C	60
Window Material Glazing Name 14		WO18RT60

Σχήμα 6.16: Ρυθμίσεις των χαρακτηριστικών του θερμοχρωμικού στρώματος γυαλιού στο EnergyPlus

Στη συνέχεια, για κάθε πιθανή κατάσταση της θερμοχρωμικής επίστρωσης θα πρέπει να οριστούν οι αντίστοιχες οπτικές και θερμικές ιδιότητες του στρώματος γυαλιού στην καρτέλα *Window Material: Glazing*.

6.3.6 Αέριο διακένου

Στην καρτέλα *Window Material: Gas* ορίζονται τα πιθανά αέρια πλήρωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα διάκενα των παραθύρων, καθώς και οι ιδιότητές τους. Τα αέρια που χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα σενάρια που μελετήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Air Gap	Argon Gap
Gas Type		Air	Argon
Thickness	m	0,006	0,0127
Conductivity Coefficient A	W/m-K	0,024069	0,016345
Conductivity Coefficient B	W/m-K2		
Conductivity Coefficient C	W/m-K3		
Viscosity Coefficient A	kg/m-s	0,000017	0,000021
Viscosity Coefficient B	kg/m-s-K		
Viscosity Coefficient C	kg/m-s-K2		
Specific Heat Coefficient A	J/kg-K	1006,103271	519
Specific Heat Coefficient B	J/kg-K2		
Specific Heat Coefficient C	J/kg-K3		
Molecular Weight	g/mol	28,96	39,948
Specific Heat Ratio			

Σχήμα 6.17: Ρυθμίσεις αερίων διακένου στο EnergyPlus

6.3.7 Δομή βασικών επιφανειών του κτιριακού κελύφους

Η δομή των στοιχείων του κτιριακού κελύφους σχεδιάστηκε με βάση τις οδηγίες του Κ.Εν.Α.Κ. για την κλιματική ζώνη Β, σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτιρίου [13]. Για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία ανήκει η Αθήνα, οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.2: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των επί μέρους δομικών στοιχείων για την κλιματική ζώνη Β σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτιρίου

Δομικό στοιχείο	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m ² K]
Εξωτερικός τοίχος σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	0,45
Δάπεδο σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πυλωτή)	0,40
Εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφή)	0,40

Το δάπεδο του κτιρίου θεωρήθηκε ότι βρίσκεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πυλωτή), καθώς θεωρητικά όλα τα κτίρια διαθέτουν πλέον και υπόγειους χώρους. Για τη μοντελοποίηση του κτιρίου θεωρήθηκαν στρώματα υλικών για κάθε δομικό στοιχείο και βρέθηκαν οι θερμοφυσικές ιδιότητες για το κάθε υλικό. Επίσης, για κάθε υλικό, εκτός από τις μονώσεις, θεωρήθηκε ένα αντίστοιχο πάχος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το πάχος της μόνωσης για κάθε δομικό στοιχείο, ώστε να προκύψει η επιθυμητή τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας με βάση τα στοιχεία του **Πίνακα 6.2**. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Η θερμική αντίσταση R_i [m² K/W] του στρώματος υλικού i ισούται με:

$$R_i = \frac{l_i}{k_i}$$

Όπου με l_i συμβολίζεται το πάχος του συγκεκριμένου στρώματος υλικού και με k_i η ειδική θερμική του αγωγιμότητα εκφρασμένη σε W/m K. Η συνολική θερμική αντίσταση R ενός δομικού στοιχείου είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων των N στρωμάτων υλικού από τα οποία αποτελείται. Δηλαδή:

$$R = \sum_{i=1}^N R_i$$

Επίσης, η συνολική θερμική αντίσταση R είναι ίση με την αντίστροφη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R = \frac{1}{U} = \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N \frac{l_i}{k_i} \rightarrow U = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{l_i}{k_i}}$$

Επομένως, γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U για τους εξωτερικούς τοίχους, το δάπεδο και τις οροφές, τις τιμές της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας για κάθε υλικό και το πάχος όλων των στρωμάτων υλικών εκτός της μόνωσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους του στρώματος της μόνωσης σε

κάθε δομικό στοιχείο. Οι εσωτερικοί τοίχοι και τα ταβάνια θεωρήθηκε ότι δεν περιλαμβάνουν μόνωση στη δομή τους και συνεπώς ο συντελεστής θερμοπερατότητάς τους υπολογίστηκε από το EnergyPlus κατά την ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου. Τα επιμέρους στρώματα υλικών που θεωρήθηκαν για κάθε δομικό στοιχείο και τα αντίστοιχα μεγέθη παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6.3: Τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων υλικού των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους

ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ			
Στρώμα υλικού	Πάχος l_i [m]	Ειδική θερμική αγωγιμότητα k_i [W/m K]	Θερμική αντίσταση R_i [m² K/W]
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εξωτερικό)	0,025	0,87	0,029
Τούβλο, τοιχοποιία	0,09	0,7	0,129
Μόνωση	0,067	0,035	1,908
Τούβλο, τοιχοποιία	0,09	0,7	0,129
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εσωτερικό)	0,025	0,87	0,029
Συνολική θερμική αντίσταση R [m² K/W]	2,222	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m² K]	0,45
ΔΑΠΕΔΟ			
Στρώμα υλικού	Πάχος l_i [m]	Ειδική θερμική αγωγιμότητα k_i [W/m K]	Θερμική αντίσταση R_i [m² K/W]
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εξωτερικό)	0,1	0,87	0,115
Μόνωση	0,075	0,035	2,130
Σκυρόδεμα	0,2	0,93	0,215
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εσωτερικό)	0,02	0,87	0,023
Κεραμικά πλακάκια	0,01	0,6	0,017
Συνολική θερμική αντίσταση R [m² K/W]	2,5	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m² K]	0,4
ΟΡΟΦΕΣ			
Στρώμα υλικού	Πάχος l_i [m]	Ειδική θερμική αγωγιμότητα k_i [W/m K]	Θερμική αντίσταση R_i [m² K/W]
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εξωτερικό)	0,1	0,87	0,115
Μόνωση	0,075	0,035	2,147
Σκυρόδεμα	0,2	0,93	0,215
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εσωτερικό)	0,02	0,87	0,023
Συνολική θερμική αντίσταση R [m² K/W]	2,5	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m² K]	0,4

Πίνακας 6.4: Τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων υλικού των δομικών στοιχείων του κτιριακού κελύφους που υπολογίστηκαν από το EnergyPlus

ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ		
Στρώμα υλικού	Πάχος l_i [m]	Ειδική θερμική αγωγιμότητα k_i [W/m K]
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εξωτερικό)	0,025	0,87
Τούβλο, τοιχοποιία	0,09	0,7
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εσωτερικό)	0,025	0,87
Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m² K]		2,690
ΤΑΒΑΝΙΑ		
Στρώμα υλικού	Πάχος l_i [m]	Ειδική θερμική αγωγιμότητα k_i [W/m K]
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εξωτερικό)	0,1	0,87
Σκυρόδεμα	0,2	0,93
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος (εσωτερικό)	0,02	0,87
Κεραμικά πλακάκια	0,01	0,6
Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m² K]		2,705

Στην καρτέλα *Construction* καθορίζεται η δομή όλων των επιφανειών του κτιριακού κελύφους, δηλαδή των εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων, των οροφών, των ταβανιών, του δαπέδου, των εσωτερικών πορτών που συνδέουν τις τέσσερις πλευρικές θερμικές ζώνες με την κεντρική, της εξωτερικής γυάλινης πόρτας και των 223 παραθύρων. Τα στρώματα υλικών ορίζονται με τη μορφή λίστας, ξεκινώντας από το εξωτερικό στρώμα και προχωρώντας προς το εσωτερικό. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Name		Interior Door	Exterior Wall	Roof	Ceiling	Floor	Interior Wall	Glass Door	ELECTRO-CON-LIG	ELECTRO-CON-DA
Outside Layer		Wood	Wall Finishing Layer	RF Outer Finishing L	RF Outer Finishing L	RF Outer Finishing L	Wall Finishing Layer	Glass Door	LOW-E_5.LOG	LOW-E_5.LOG
Layer 2			Brick	RF Insulation	Concrete	FL Insulation	Brick		Argon Gap	Argon Gap
Layer 3			EW Insulation	Concrete	RF Inner Finishing L	Concrete	Wall Finishing Layer		CLEAR5.LOF	CLEAR5.LOF
Layer 4			Brick	RF Inner Finishing L	Ceramic Tiles	RF Inner Finishing L			Argon Gap	Argon Gap
Layer 5			Wall Finishing Layer			Ceramic Tiles			ELECTRO GLASS I	ELECTRO GLASS I
Layer 6										

Σχήμα 6.18: Ρυθμίσεις των στρωμάτων υλικού των επιφανειών του κτιριακού κελύφους στο EnergyPlus

6.3.8 Έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων

Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων χρησιμοποιείται η καρτέλα *Window Property: Shading Control*. Ορίζεται ότι ο υαλοπίνακας έχει μεταβλητές οπτικές ιδιότητες, καθώς και ποια δομή υαλοπίνακα θα χρησιμοποιηθεί όταν το παράθυρο βρίσκεται στη χρωματισμένη του κατάσταση. Επίσης ορίζεται ότι το παράθυρο θα μεταβαίνει στη χρωματισμένη του κατάσταση όταν η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ξεπεράσει τα 500 W/m^2 , καθώς γι' αυτή την τιμή διαπιστώθηκε ότι ελαχιστοποιούνται οι ανάγκες ψύξης του κτιρίου κατά τη θερινή περίοδο, χωρίς ταυτόχρονα να αυξάνονται υπερβολικά οι ανάγκες τεχνητού φωτισμού. Τέλος, ορίζεται το όνομα του προγράμματος λειτουργίας του παραθύρου, το οποίο επιτρέπει τον χρωματισμό του μόνο κατά την περίοδο ψύξης.

Field	Units	Obj1
Name		EC Control
Shading Type		SwitchableGlazing
Construction with Shading Name		ELECTRO-CON-DARK
Shading Control Type		OnIfHighSolarOnWindow
Schedule Name		Electrochromic control
Setpoint	W/m2, W or deg	500
Shading Control Is Scheduled		Yes
Glare Control Is Active		No
Shading Device Material Name		
Type of Slat Angle Control for Blinds		FixedSlatAngle
Slat Angle Schedule Name		
Setpoint 2	W/m2 or deg C	

Σχήμα 6.19: Ρυθμίσεις για τον έλεγχο του χρωματισμού των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων στο EnergyPlus

6.3.9 Φορτία ατόμων

Κάθε άτομο, ανάλογα με τη δραστηριότητα με την οποία ασχολείται, εκλύει θερμότητα υπό τη μορφή αισθητού και λανθάνοντος φορτίου. Το αισθητό φορτίο προέρχεται από τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα του στον αέρα, καθώς και από την ακτινοβολία που εκπέμπει το άτομο σε αναλογία περίπου 50%-50%. Εξαρτάται από τη δραστηριότητα του ατόμου και την ένδυσή του. Το λανθάνον φορτίο οφείλεται στην αναπνοή και την εφίδρωση του ατόμου και αυξάνεται όσο εντονότερη είναι η δραστηριότητά του. Για τον συνυπολογισμό των φορτίων των ατόμων στα φορτία του κτιρίου χρησιμοποιείται κατάλληλος συντελεστής ετεροχρονισμού, ο οποίος ονομάζεται μέσος συντελεστής παρουσίας χρηστών και εκφράζει κατά μέσο όρο την πραγματική παρουσία των ατόμων στους χώρους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας [13]. Σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN ISO 13790:2009 και ΕΛΟΤ EN 13779:2008 για τον υπολογισμό των φορτίων των ατόμων χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μεγέθη:

Πίνακας 6.5: Εκλυόμενη θερμότητα από άτομα

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Θερμική ισχύς ανά άτομο [W/άτομο]	Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας [W/m ²]	Μέσος συντελεστής παρουσίας
Γραφείο	80	8	0,30

Στη καρτέλα *People* του EnergyPlus τα φορτία από άτομα εκφράζονται σε άτομα ανά μονάδα επιφάνειας δαπέδου θερμικής ζώνης. Συνεπώς, η τιμή που θα

χρησιμοποιηθεί είναι $\frac{8 \frac{W}{m^2}}{80 \frac{W}{\text{άτομο}}} = 0,1 \frac{\text{άτομο}}{m^2}$.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. On the left, a list of objects is displayed, with 'People' selected. The 'Field Description' pane on the right shows the following information:

Field	Units	Obj1
Name		189.1-2009 - Office
Zone or ZoneList Name		189.1-2009 - Office
Number of People Schedule Name		Occupancy
Number of People Calculation Method		People/Area
Number of People		
People per Zone Floor Area	person/m2	0,1
Zone Floor Area per Person	m2/person	
Fraction Radiant		0,3
Sensible Heat Fraction		
Activity Level Schedule Name		Office Activity

Σχήμα 6.20: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία ατόμων στο EnergyPlus

6.3.10 Φορτία τεχνητού φωτισμού

Σε κάθε χώρο είναι αναγκαία η ύπαρξη κατάλληλου φωτισμού που εξασφαλίζει στους χρήστες οπτική άνεση, δηλαδή ένα περιβάλλον με την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φωτισμού, με σκοπό την ευχάριστη διαμονή και την ανεμπόδιση άσκηση της προβλεπόμενης δραστηριότητάς τους χωρίς να παρουσιάζονται φαινόμενα που οδηγούν σε οπτική δυσφορία ή/και κόπωση [13]. Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12464.1-2011 περιλαμβάνει τα συνιστώμενα επίπεδα φωτισμού ανάλογα με τη χρήση του χώρου, τα οποία παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.6: Στάθμη γενικού φωτισμού κτιρίου αναφοράς σύμφωνα με το EN 12464-1 2011

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Στάθμη φωτισμού [lx]	Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]	Δείκτης θάμβωσης UGR	Ομοιομορφία φωτισμού Uo (min/μέση τιμή)
Γραφείο	500	0,8	19	0,6

Ακόμα, θεωρώντας ότι τα χρησιμοποιούμενα φωτιστικά είναι φωτιοδίοδοι (LED) προκύπτει ότι μία τυπική τιμή πυκνότητας ισχύος φωτισμού ανά 100 lux είναι $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot 100 \text{ lux}}$. Συνεπώς, για στάθμη φωτισμού 500 lx προκύπτει ότι η ισχύς των φωτιστικών που θα θεωρηθεί στην καρτέλα *Lights* είναι $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot 100 \text{ lux}} \cdot 500 \text{ lux} = 12,5 \frac{W}{m^2}$.

Field	Units	Obj1
Name		189.1-2009 - Office - OpenOffice - C24-8 Lights
Zone or ZoneList Name		All Zones
Schedule Name		Lighting and Equipment
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	12.5
Watts per Person	W/person	

Σχήμα 6.21: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία τεχνητού φωτισμού στο EnergyPlus

6.3.11 Φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα θερμικά φορτία που παράγονται από ηλεκτρικό εξοπλισμό, αλλά και δευτερευόντως από άλλες συσκευές. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται με συναγωγή και ακτινοβολία, σε αναλογία που καθορίζεται από το είδος της συσκευής. Στις περισσότερες εφαρμογές ο ηλεκτρικός εξοπλισμός παράγει αισθητά φορτία.

Λόγω της αύξησης των εφαρμογών ηλεκτρικών συσκευών και ειδικότερα της πληροφορικής και των επικοινωνιών, τα θερμικά κέρδη από ηλεκτρικές συσκευές είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε κτίρια εμπορικών και διοικητικών δραστηριοτήτων (γραφεία, υπηρεσίες κ.ά.). Όπως και στην περίπτωση των φορτίων από άτομα, ο συνυπολογισμός των φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού γίνεται μέσω κατάλληλου συντελεστή ετεροχρονισμού που εκφράζει προσεγγιστικά την πραγματική λειτουργία των συσκευών στους χώρους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας [13]. Τα αναγκαία μεγέθη για τον υπολογισμό των φορτίων ηλεκτρικών συσκευών παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 6.7: Εκτιμώμενη θερμική ισχύς ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Ισχύς εξοπλισμού [W/m ²]	Μέσος συντελεστής ετερ/σμού	Ετεροχρον. ισχύς εξοπλ. [W/m ²]	Μέσος συντελεστής λειτουργίας
Γραφείο	15	0,3	4,5	0,3

Τα φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\text{Φορτία εξοπλισμού} = (\text{Ισχύς εξοπλισμού}) \cdot (\text{Μέσος συντελεστής ετερ/σμού}) \cdot (\text{Μέσος συντελεστής λειτουργίας})$$

Με βάση τα παραπάνω, η τιμή ρύθμισης των φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού στη καρτέλα *Electric Equipment* του EnergyPlus είναι $15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,3 \cdot 0,3 = 1,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Field	Units	Obj1
Name		189.1-2009 - Office - OpenOffice - CZ4-8 Electric Equipment
Zone or ZoneList Name		All Zones
Schedule Name		Lighting and Equipment
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Design Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	1,35
Watts per Person	W/person	

Σχήμα 6.22: Οι ρυθμίσεις για τα φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού στο EnergyPlus

6.3.12 Εξασφάλιση φυσικού φωτισμού

Το επίπεδο φυσικού φωτισμού αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου γραφείων, καθώς καθορίζει τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού που είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της οπτικής άνεσης των εργαζομένων. Γι' αυτόν τον λόγο, το συγκεκριμένο κτίριο μοντελοποιήθηκε κατάλληλα, ώστε να λαμβάνεται υπόψη κάθε χρονική στιγμή το επίπεδο του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου και με βάση αυτό να ρυθμίζεται η ένταση του τεχνητού φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, αφού τα φώτα απενεργοποιούνται όταν δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία τους.

Στην καρτέλα *Daylighting: Controls* καθορίζονται οι θερμικές ζώνες στις οποίες είναι επιθυμητός ο έλεγχος του επιπέδου φυσικού φωτισμού, καθώς και η ελάχιστη ισχύς εξόδου του τεχνητού φωτισμού πριν τα φώτα απενεργοποιηθούν πλήρως, η οποία ορίστηκε να έχει την προεπιλεγμένη για το EnergyPlus τιμή (20% της ονομαστικής ισχύος εξόδου). Ακόμα, ορίστηκαν τα σημεία αναφοράς κάθε θερμικής ζώνης, στα οποία πραγματοποιείται έλεγχος του επιπέδου φυσικού φωτισμού και η επιθυμητή στάθμη φωτισμού, η οποία είναι 500 lux σύμφωνα με τον **Πίνακα 6.6**. Οι συντεταγμένες των σημείων αναφοράς για τον έλεγχο του φυσικού φωτισμού ορίστηκαν στην καρτέλα *Daylighting: Reference Point*. Από προεπιλογή του EnergyPlus, ο έλεγχος του φωτισμού πραγματοποιείται σε ανύψωση 0,8 m από το

έδαφος. Για κάθε θερμική ζώνη χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα σημείο ελέγχου, το οποίο επιλέχθηκε ώστε να βρίσκεται στο κέντρο της θερμικής ζώνης.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Daylight-North	Daylight-East	Daylight-West	Daylight-Center	Daylight-South
Zone Name		North Thermal Zone	East Thermal Zone	West Thermal Zone	Center Thermal Zone	South Thermal Zone
Daylighting Method		SplitFlux	SplitFlux	SplitFlux	SplitFlux	SplitFlux
Availability Schedule Name						
Lighting Control Type		Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous
Minimum Input Power Fraction for Continuous or Continuous		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Minimum Light Output Fraction for Continuous or Continuous		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Number of Stepped Control Steps		1	1	1	1	1
Probability Lighting will be Reset When Needed in Manual		1	1	1	1	1
Glare Calculation Daylighting Reference Point Name						
Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clock	deg					
Maximum Allowable Discomfort Glare Index		22	22	22	22	22
DElight Gridding Resolution	m2					
Daylighting Reference Point 1 Name		North-daylight control	East-daylight control	West-daylight control	Center-daylight control	South-daylight control
Fraction of Zone Controlled by Reference Point 1		1	1	1	1	1
Illuminance Setpoint at Reference Point 1	lux	500	500	500	500	500

Σχήμα 6.23: Οι ρυθμίσεις για τον έλεγχο των επιπέδων φυσικού φωτισμού στο EnergyPlus

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		South-daylight control	North-daylight control	East-daylight control	West-daylight control	Center-daylight control
Zone Name		South Thermal Zone	North Thermal Zone	East Thermal Zone	West Thermal Zone	Center Thermal Zone
X-Coordinate of Reference Point	m	13,4	18,2	29,2	2,4	11
Y-Coordinate of Reference Point	m	-14,8	-2,4	-11	-6,2	-8,6
Z-Coordinate of Reference Point	m	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Σχήμα 6.24: Οι ρυθμίσεις για τις συντεταγμένες των σημείων αναφοράς φυσικού φωτισμού στο EnergyPlus

6.3.13 Φορτία ανανέωσης αέρα

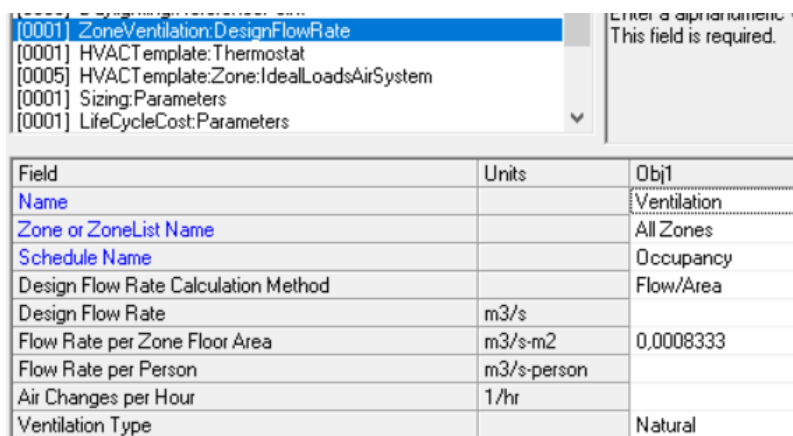
Για την εξασφάλιση συνθηκών υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτιρίου και κάθε ανεξάρτητου τμήματος κτιρίου απαιτείται η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος. Οι απαιτήσεις σε νωπό αέρα περιβάλλοντος καθορίζονται ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και το πλήθος των ατόμων στο εσωτερικό του [13]. Για ένα κτίριο γραφείων οι απαιτήσεις νωπού αέρα περιβάλλοντος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.8: Απαιτούμενος νωπός αέρας (για χώρους μη καπνιζόντων)

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	Άτομα/100 m ² επιφ. δαπέδου	Νωπός αέρας [m ³ /h/άτομο]	Νωπός αέρας [m ³ /h/m ²]
Γραφείο	10	30	3,00

Η ρύθμιση των φορτίων ανανέωσης αέρα γίνεται στην καρτέλα *Zone Ventilation: Design Flow Rate*. Η ροή αέρα ανά m² δαπέδου ορίζεται ως εξής:

$$3 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 8,333 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

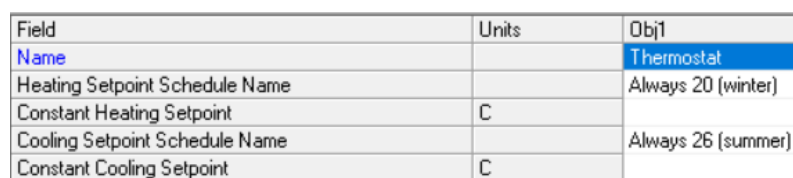


Field	Units	Obj1
Name		Ventilation
Zone or ZoneList Name		All Zones
Schedule Name		Occupancy
Design Flow Rate Calculation Method		Flow/Area
Design Flow Rate	m3/s	
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2	0,0008333
Flow Rate per Person	m3/s-person	
Air Changes per Hour	1/hr	
Ventilation Type		Natural

Σχήμα 6.25: : Οι ρυθμίσεις για την ανανέωση αέρα στο περιβάλλον του EnergyPlus

6.3.14 Σύστημα θέρμανσης και ψύξης

Οι βασικές παράμετροι που διαμορφώνουν τη θερμική άνεση σε έναν χώρο είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα. Οι παράμετροι αυτές ελέγχονται μέσω του συστήματος θέρμανσης (μόνο η θερμοκρασία του αέρα) ή κλιματισμού (θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα) με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών άνεσης. Σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. για κτίριο γραφείων η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων είναι 20 °C για τη χειμερινή και 26 °C για τη θερινή περίοδο [13]. Συνεπώς, το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου ρυθμίστηκε με σκοπό τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στις παραπάνω τιμές μέσω της καρτέλας *HVAC Template: Thermostat*.



Field	Units	Obj1
Name		Thermostat
Heating Setpoint Schedule Name		Always 20 (winter)
Constant Heating Setpoint	C	
Cooling Setpoint Schedule Name		Always 26 (summer)
Constant Cooling Setpoint	C	

Σχήμα 6.26: : Οι ρυθμίσεις του θερμοστάτη στο περιβάλλον του EnergyPlus

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για τον υπολογισμό των ενεργειακών καταναλώσεων του κτιρίου ορίστηκαν ιδανικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, δηλαδή δύο συστήματα που είναι σε θέση να προσφέρουν κάθε χρονική στιγμή τη θερμική ή ψυκτική αντιστοίχως ισχύ που απαιτείται, ώστε η εσωτερική θερμοκρασία

να παραμείνει σταθερή στην τιμή που έχει οριστεί από τον θερμοστάτη. Οι απαραίτητες ρυθμίσεις για τα ιδανικά συστήματα HVAC έγιναν στην καρτέλα *HVAC Template: Zone: Ideal Loads Air System*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Zone Name		Center Thermal Zone	East Thermal Zone	North Thermal Zone	South Thermal Zone	West Thermal Zone
Template Thermostat Name		Thermostat	Thermostat	Thermostat	Thermostat	Thermostat
System Availability Schedule Name						
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50	50	50	50	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13	13	13	13	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156	0,0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077	0,0077
Heating Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s					
Maximum Sensible Heating Capacity	W					
Cooling Limit		NoLimit	NoLimit	NoLimit	NoLimit	NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s					
Maximum Total Cooling Capacity	W					
Heating Availability Schedule Name		Heating Period	Heating Period	Heating Period	Heating Period	Heating Period
Cooling Availability Schedule Name		Cooling Period	Cooling Period	Cooling Period	Cooling Period	Cooling Period

Σχήμα 6.27: Οι ρυθμίσεις των ιδανικών συστημάτων HVAC στο περιβάλλον του EnergyPlus

7 Αποτελέσματα ενεργειακής προσομοίωσης

7.1 Συντελεστής θερμοπερατότητας και ηλιακό θερμικό κέρδος

Η ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου πραγματοποιήθηκε για επτά διαφορετικά είδη υαλοπινάκων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους και η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία, όπως υπολογίστηκαν μέσω του EnergyPlus:

Πίνακας 7.1: Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας, ηλιακού θερμικού κέρδους και διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων

Είδος υαλοπίνακα	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m ² K]	Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους SHGC	Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία τ_{vis}
Μονός	5,906	0,859	0,899
Διπλός	2,561	0,761	0,814
Διπλός low-e	1,924	0,685	0,741
Τριπλός	1,605	0,609	0,703
Τριπλός low-e	1,126	0,517	0,624
Τριπλός low-e TC (Διάφανη κατάσταση)	1,583	0,538	0,534
Τριπλός low-e Ηλεκτροχρωμικός (Διάφανη κατάσταση)	1,600	0,558	0,638
Τριπλός low-e EC (Αδιαφανής κατάσταση)	1,600	0,441	0,096

Σύμφωνα με τα στοιχεία του **Πίνακα 7.1** ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας των παραθύρων μειώνεται με την προσθήκη επιπλέον στρώσεων γυαλιού και ειδικών επιστρώσεων, με αποτέλεσμα μικρότερες θερμικές απώλειες. Ταυτόχρονα μειώνονται και ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους και η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία. Οι τρεις συντελεστές εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή τους στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων, όταν όλοι οι υαλοπίνακες βρίσκονται σε διαφανή κατάσταση. Παρατηρείται ότι κατά τον χρωματισμό των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων η τιμή του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U παραμένει αμετάβλητη, ενώ η τιμή του SHGC μειώνεται. Παράλληλα, παρατηρείται σημαντική μείωση της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία. Δηλαδή, κατά την αλλαγή κατάστασης περιορίζεται η είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου, αλλά δεν επηρεάζονται οι απώλειες θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς με το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες δε μελετήθηκαν σε δύο μόνο εναλλακτικές καταστάσεις (διαφανής και αδιαφανής κατάσταση) όπως οι ηλεκτροχρωμικοί, αλλά

θεωρήθηκε ότι οι ιδιότητές τους μεταβάλλονται σταδιακά όταν η θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης ξεπεράσει τους 25 °C και φτάνουν στην πλήρη αδιαφανή τους κατάσταση στους 85 °C. Για την μοντελοποίηση τους χρησιμοποιήθηκαν 20 διαφορετικές στρώσεις γυαλιού, με διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με τη θερμοκρασία. Τα αντίστοιχα μεγέθη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.2: Συντελεστές θερμικής διαπερατότητας, ηλιακού θερμικού κέρδους και διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία για τις διαφορετικές καταστάσεις των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων

Θερμοκρασία [°C]	Στρώση γυαλιού	Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m ² K]	Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους SHGC	Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία τ_{vis}
<25	Διάφανη κατάσταση	1,583	0,538	0,534
25	WO18RT25	1,583	0,538	0,534
27	WO18RT27	1,583	0,537	0,519
29	WO18RT29	1,583	0,536	0,503
31	WO18RT31	1,583	0,535	0,489
33	WO18RT33	1,583	0,534	0,474
35	WO18RT35	1,583	0,533	0,460
37	WO18RT37	1,583	0,532	0,447
39	WO18RT39	1,583	0,532	0,434
41	WO18RT41	1,583	0,531	0,421
43	WO18RT43	1,583	0,530	0,409
45	WO18RT45	1,583	0,529	0,397
50	WO18RT50	1,583	0,524	0,316
55	WO18RT55	1,583	0,519	0,252
60	WO18RT60	1,583	0,516	0,201
65	WO18RT65	1,583	0,513	0,160
70	WO18RT70	1,583	0,508	0,105
75	WO18RT75	1,583	0,504	0,070
80	WO18RT80	1,583	0,502	0,046
85	WO18RT85	1,583	0,500	0,031

Όπως και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων, από τα στοιχεία του **Πίνακα 7.2** προκύπτει ότι ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας δε μεταβάλλεται κατά την αλλαγή κατάστασης των θερμοχρωμικών παραθύρων. Αντίθετα, ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους μειώνεται σταδιακά με αύξηση της θερμοκρασίας.

7.2 Ώρες χρωματισμού θερμοχρωμικών υαλοπινάκων

Όπως προαναφέρθηκε, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μοντελοποιήθηκαν ώστε να ξεκινούν να χρωματίζονται όταν η θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης ξεπεράσει τους 25 °C. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων επιλέχθηκαν τυχαία τέσσερα παράθυρα του τρίτου ορόφου του κτιρίου με διαφορετικούς προσανατολισμούς για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας της θερμοχρωμικής επίστρωσης με χρονικό βήμα μίας ώρας. Στη συνέχεια βρέθηκαν και αθροίστηκαν για κάθε μήνα οι ώρες κατά τις οποίες η θερμοκρασία ξεπέρασε τους 25 °C, με αποτέλεσμα την έναρξη του χρωματισμού των παραθύρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.3: Ώρες χρωματισμού θερμοχρωμικών υαλοπινάκων ανάλογα με τον προσανατολισμό

Μήνας	Ώρες χρωματισμού ανάλογα με προσανατολισμό			
	Ανατολή	Βορράς	Νότος	Δύση
Ιανουάριος	59	0	144	54
Φεβρουάριος	52	0	139	56
Μάρτιος	139	0	183	97
Απρίλιος	252	72	223	172
Μάιος	358	292	307	340
Ιούνιος	565	502	510	568
Ιούλιος	743	718	734	743
Αύγουστος	744	687	740	744
Σεπτέμβριος	602	373	603	547
Οκτώβριος	303	135	328	226
Νοέμβριος	99	0	161	52
Δεκέμβριος	46	0	130	37
Σύνολο	3962	2779	4202	3636

Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 7.3, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες χρωματίζονται πρακτικά σε όλη τη διάρκεια του έτους, ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω της χαμηλής τιμής θερμοκρασίας μετάβασης. Αυτή η συμπεριφορά είναι ανεπιθύμητη, καθώς περιορίζουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη και οδηγούν σε αύξηση των αναγκών θέρμανσης, συγκριτικά με μία περίπτωση υαλοπινάκων με μεγαλύτερη τιμή θερμοκρασίας μετάβασης. Κατά την περίοδο ψύξης, και συγκεκριμένα κατά τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο (για τον ανατολικό και τον νότιο προσανατολισμό) παρατηρείται ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες παραμένουν σε χρωματισμένη κατάσταση για πολύ μεγάλο πλήθος ωρών. Ειδικά για τον Ιούλιο και τον Αύγουστο παραμένουν σε χρωματισμένη κατάσταση σχεδόν για όλες τις ώρες του μήνα. Αυτή η συμπεριφορά είναι επιθυμητή, καθώς αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των αναγκών ψύξης.

Από άποψη προσανατολισμού παρατηρείται ότι οι υαλοπίνακες με νότιο προσανατολισμό παραμένουν χρωματισμένοι για μεγαλύτερο πλήθος ωρών ετησίως, καθώς δέχονται εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της θερμοχρωμικής επιστρώσης. Σημαντικό είναι και το πλήθος ωρών για τον ανατολικό και τον δυτικό προσανατολισμό, ενώ οι υαλοπίνακες με βόρειο προσανατολισμό χρωματίζονται λιγότερες φορές κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω των πιο περιορισμένων θερμικών κερδών.

7.3 Ώρες χρωματισμού ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων

Η μοντελοποίηση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων έγινε με βάση δύο διαφορετικές καταστάσεις: μία πλήρως διαφανή και μία πλήρως χρωματισμένη. Η μετάβαση από τη διαφανή στην αδιαφανή κατάσταση γίνεται όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ξεπεράσει τα 500 W/m². Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συνολικές ώρες για τις οποίες οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες βρίσκονταν στην αδιαφανή τους κατάσταση για κάθε μήνα:

Πίνακας 7.4: Ώρες χρωματισμού ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων ανάλογα με τον προσανατολισμό

Μήνας	Ώρες χρωματισμού ανάλογα με προσανατολισμό			
	Ανατολή	Βορράς	Νότος	Δύση
Ιανουάριος	0	0	0	0
Φεβρουάριος	0	0	0	0
Μάρτιος	0	0	0	0
Απρίλιος	0	0	0	0
Μάιος	52	0	6	48
Ιούνιος	106	0	0	106
Ιούλιος	117	0	5	115
Αύγουστος	100	0	81	98
Σεπτέμβριος	40	0	62	37
Οκτώβριος	0	0	0	0
Νοέμβριος	0	0	0	0
Δεκέμβριος	0	0	0	0
Σύνολο	414	0	156	403

Συγκρίνοντας τα στοιχεία των Πινάκων 7.3 και 7.4 προκύπτει ότι οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες χρωματίζονται για πολύ λιγότερες ώρες ετησίως σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς. Αυτό συμβαίνει καθώς ο χρωματισμός των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων επιτρέπεται μόνο κατά την περίοδο ψύξης, αλλά και εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου ελέγχου τους. Παρατηρείται χρωματισμός των παραθύρων κυρίως για ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό, ενώ στην περίπτωση του βόρειου προσανατολισμού η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν ξεπερνά ποτέ τα 500 W/m².

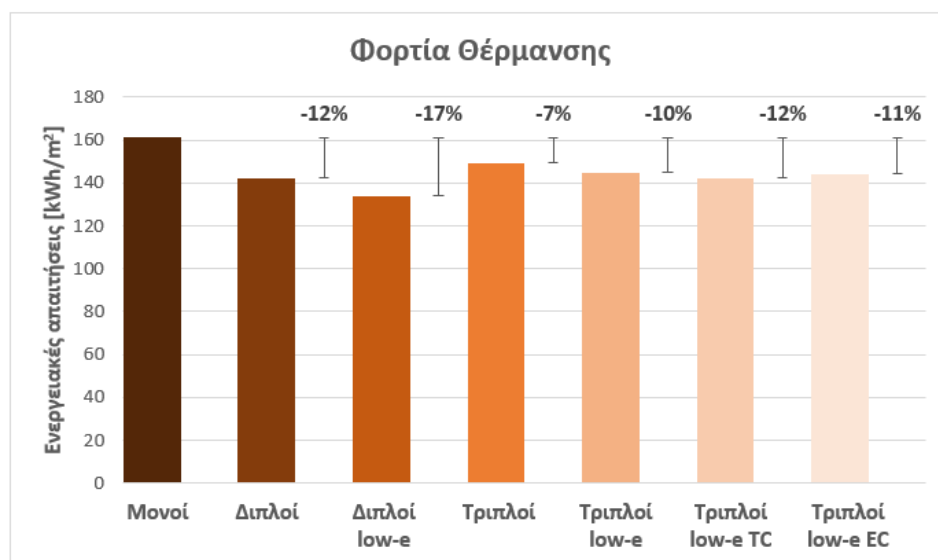
Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι θα ήταν προτιμότερο να μην τοποθετηθούν ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες με βόρειο προσανατολισμό.

7.4 Σύγκριση ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων για διάφορους τύπους παραθύρων

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου υπό μελέτη για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, για κάθε περίπτωση, θεωρώντας ένα ιδανικό ενεργειακό σύστημα θέρμανσης και ψύξης. Επίσης, υπολογίστηκαν οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για κάθε είδος υαλοπινάκων ως άθροισμα των ετήσιων αναγκών θέρμανσης και ψύξης, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα θερμικά φορτία που οφείλονται στην παρουσία ατόμων και τη λειτουργία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού είναι ίδια σε κάθε περίπτωση. Ως κατάσταση αναφοράς θεωρήθηκε η περίπτωση χρήσης μόνο απλών υαλοπινάκων.

7.4.1 Σύγκριση ετήσιων φορτίων θέρμανσης

Τα φορτία θέρμανσης που προκύπτουν θεωρώντας ιδανικό σύστημα θέρμανσης για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 7.1: Σύγκριση των ετήσιων φορτίων θέρμανσης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων

Στην περίπτωση των φορτίων θέρμανσης μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 17%) επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διπλών υαλοπινάκων low-e, οι οποίοι συνδυάζουν επαρκή μόνωση από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες των χειμερινών μηνών και υψηλές τιμές ηλιακών θερμικών κερδών που συμβάλλουν στον περιορισμό των αναγκών θέρμανσης. Οι επιστρώσεις low-e που χρησιμοποιήθηκαν

για την κατασκευή των υαλοπινάκων ήταν κατάλληλα σχεδιασμένες για την εξασφάλιση υψηλών τιμών ηλιακού θερμικού κέρδους, καθώς κατά την ενεργειακή μελέτη του κτιρίου παρατηρήθηκε ότι τα φορτία θέρμανσης είναι σημαντικά μεγαλύτερα από τα φορτία ψύξης.

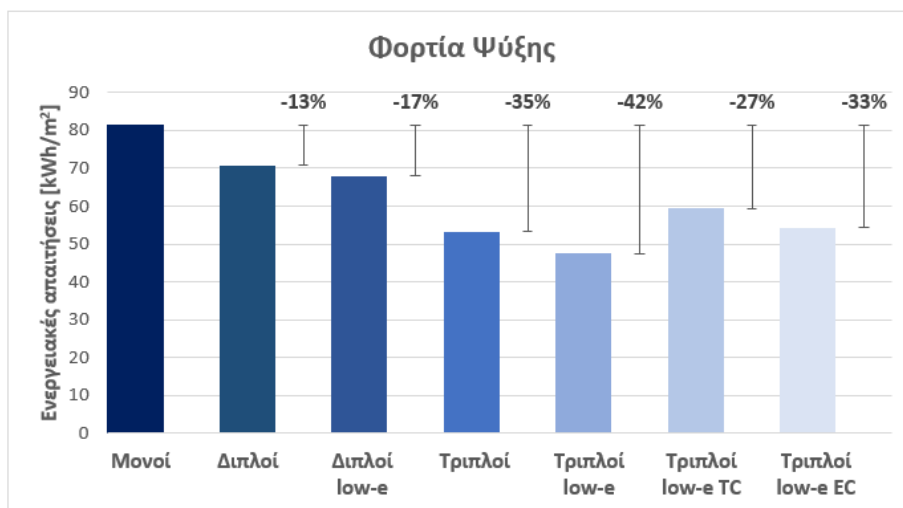
Σημαντική εξοικονόμηση (κατά 12%) παρατηρείται επίσης στην περίπτωση των διπλών και των τριπλών θερμοχρωμικών υαλοπινάκων low-e. Οι διπλοί υαλοπίνακες υστερούν ως προς τη μονωτική τους ικανότητα, καθώς σύμφωνα με τον **Πίνακα 7.1** παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας και συνεπώς μεγαλύτερες θερμικές απώλειες σε σχέση με τα άλλα εναλλακτικά είδη υαλοπινάκων. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από τον υψηλό συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους που επιτρέπει την είσοδο μεγάλης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου.

Οι τριπλοί θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες low-e κατασκευάστηκαν με τη χρήση των ίδιων γυάλινων επιφανειών σε σχέση με τα τριπλά low-e υαλοστάσια, με μοναδική διαφορά την εσωτερική στρώση γυαλιού που φέρει τη θερμοχρωμική επίστρωση. Συνεπώς, η διαφορά που παρατηρείται στην εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες και τους τριπλούς θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες οφείλεται στις διαφορετικές οπτικές ιδιότητες της εσωτερικής στρώσης γυαλιού που οδηγούν συνολικά σε μεγαλύτερα θερμικά κέρδη. Επίσης, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν μικρότερη τιμή θερμικής διαπερατότητας σε σχέση με τους ηλεκτροχρωμικούς, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερες ενεργειακές απώλειες.

Οι τριπλοί ηλεκτροχρωμικοί low-e υαλοπίνακες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τους τριπλούς low-e, καθώς η μεγαλύτερη τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας που παρουσιάζουν αντισταθμίζεται από την επίσης μεγαλύτερη τιμή ηλιακού θερμικού κέρδους. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας με σκοπό την εξασφάλιση της μετάβασής τους στην αδιαφανή τους κατάσταση μόνο κατά την περίοδο ψύξης (15^η Μαΐου – 15^η Σεπτεμβρίου), ώστε να μην παρεμποδιστεί η είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Τέλος, χαμηλότερη ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 7%) παρουσιάζεται στην περίπτωση των τριπλών παραθύρων, τα οποία παρουσιάζουν ενδιάμεσες τιμές συντελεστών θερμικής διαπερατότητας και ηλιακού θερμικού κέρδους σε σχέση με τα άλλα είδη υαλοπινάκων.

7.4.2 Σύγκριση ετήσιων φορτίων ψύξης

Αναφορικά με τα ετήσια φορτία ψύξης για τους διαφορετικούς τύπους υαλοπινάκων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

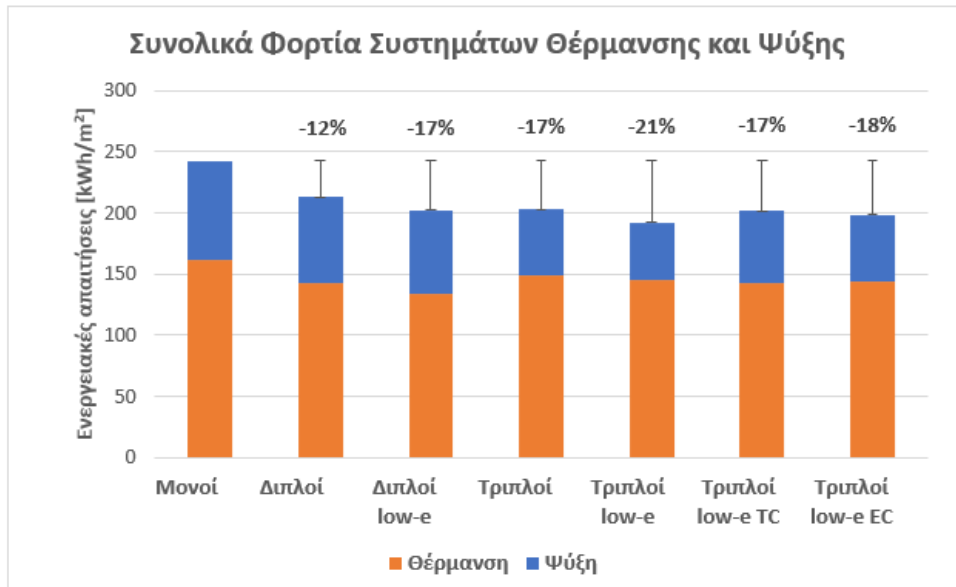


Σχήμα 7.2: Σύγκριση των ετήσιων φορτίων ψύξης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων

Ως προς τα φορτία ψύξης παρουσιάζεται ενεργειακή εξοικονόμηση κατά 42% στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων που παρουσιάζουν τη μικρότερη τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας, με αποτέλεσμα τη μειωμένη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό του κτιρίου. Σημαντική εξοικονόμηση παρουσιάζεται επίσης στην περίπτωση των τριπλών υαλοπινάκων και των τριπλών ηλεκτροχρωμικών low-e υαλοπινάκων (κατά 35% και 33% αντιστοίχως) που χαρακτηρίζονται από πολύ κοντινές τιμές θερμικής διαπερατότητας. Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, ο μεγαλύτερος συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους στη διάφανη τους κατάσταση αντισταθμίζεται από την αρκετά μικρότερη τιμή του μετά τον χρωματισμό τους. Μείωση της εξοικονόμησης παρουσιάζεται στην περίπτωση των τριπλών θερμοχρωμικών low-e υαλοπινάκων, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές θερμοπερατότητας και SHGC σε σχέση με τους τριπλούς υαλοπίνακες. Επίσης, παρότι χρωματίζονται για μεγάλο πλήθος ωρών κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, η μεταβολή του SHGC κατά τον χρωματισμό τους είναι αρκετά μικρή. Τέλος, οι διπλοί και διπλοί low-e υαλοπίνακες παρουσιάζουν τη μικρότερη εξοικονόμηση ως προς τα φορτία ψύξης λόγω των μεγαλύτερων τιμών θερμοπερατότητας και SHGC σε σχέση με τους άλλους τύπους παραθύρων.

7.4.3 Σύγκριση ετήσιων συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης

Τα συνολικά ετήσια φορτία των ιδανικών συστημάτων HVAC υπολογίζονται ως άθροισμα των ετησίων αναγκών θέρμανσης και ψύξης, με σκοπό τον προσδιορισμό του τύπου υαλοπίνακα που προσφέρει συνολικά τη μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

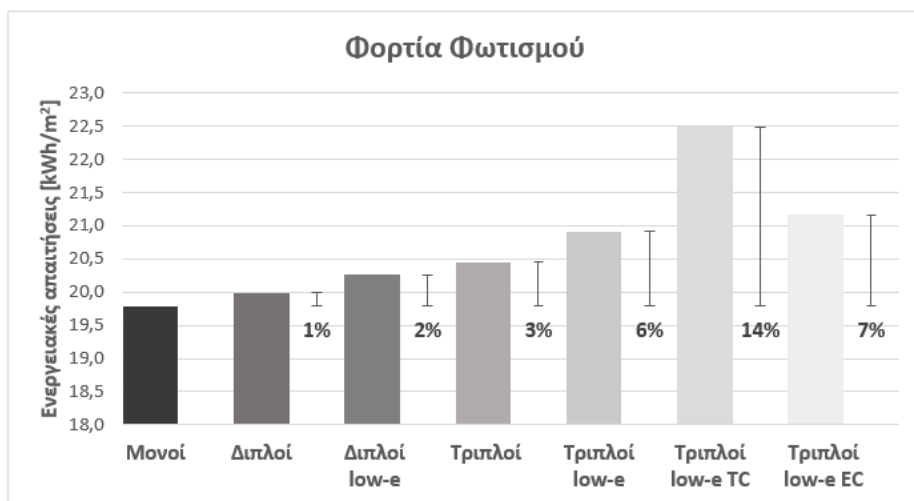


Σχήμα 7.3: Σύγκριση των ετήσιων συνολικών φορτίων των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων

Σύμφωνα με το **Σχήμα 7.3** ο τύπος υαλοπίνακα που προσφέρει συνολικά τη μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 21% σε σύγκριση με την περίπτωση των απλών υαλοπινάκων) είναι οι τριπλοί low-e υαλοπίνακες. Η εφαρμογή των παραθύρων αυτών εξασφαλίζει, όπως προαναφέρθηκε, τη μεγαλύτερη μείωση των αναγκών ψύξης, με ταυτόχρονη σημαντική μείωση των αναγκών θέρμανσης. Αξιοσημείωτη εξοικονόμηση παρουσιάζεται και στην περίπτωση των διπλών low-e, τριπλών, θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων. Παρατηρείται ότι οι διπλοί και διπλοί low-e υαλοπίνακες προσφέρουν ίδια ποσοστιαία ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 17%) για τα φορτία θέρμανσης και ψύξης. Συνεπώς, η εφαρμογή των συγκεκριμένων τύπων παραθύρων εξασφαλίζει περίπου ίδια ποσοστιαία μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε όλη τη διάρκεια του έτους. Αντίθετα, οι τριπλοί, θερμοχρωμικοί και ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να αξιοποιηθούν σε περιπτώσεις που είναι κυρίως επιθυμητή η σημαντική μείωση των ψυκτικών φορτίων, με ταυτόχρονη μικρότερη μείωση των φορτίων θέρμανσης. Η μικρότερη ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 12%) εμφανίζεται στην περίπτωση των διπλών υαλοπινάκων, γεγονός αναμενόμενο, αφού προσφέρουν μικρότερη μονωτική ικανότητα σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους παραθύρων.

7.4.4 Σύγκριση ετήσιων φορτίων φωτισμού

Οι ετήσιες ηλεκτρικές καταναλώσεις που οφείλονται στον τεχνητό φωτισμό με χρήση LED για τους διάφορους τύπους παραθύρων παρουσιάζονται παρακάτω:

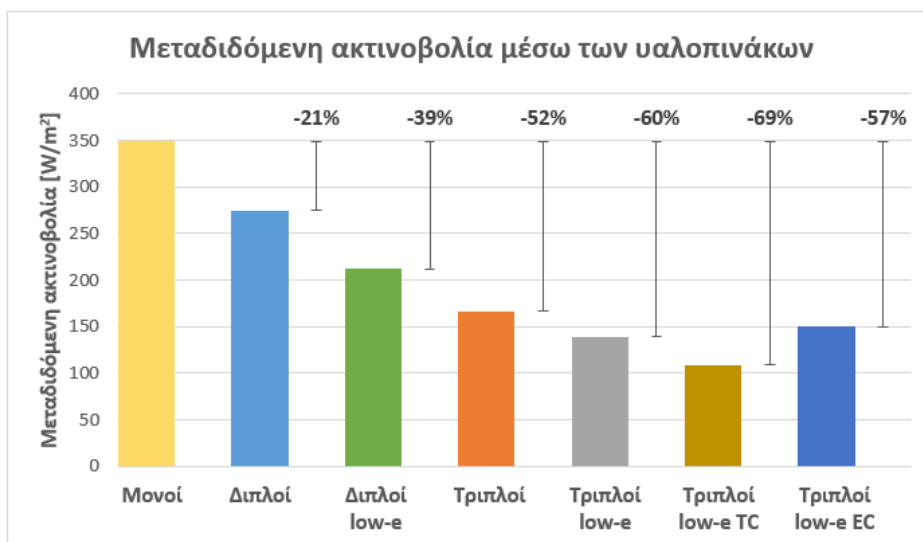


Σχήμα 7.4: Σύγκριση των ετήσιων απαιτήσεων φωτισμού για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων

Στην περίπτωση του φωτισμού προέκυψε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση εμφανίζεται με την εφαρμογή μονών υαλοπινάκων, αφού αυτοί παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ορατή ηλιακή ακτινοβολία σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1. Με την προσθήκη επιπλέον στρώσεων γυαλιού ή ειδικών επιστρώσεων η διαπερατότητα του παραθύρου σε ορατή ακτινοβολία μειώνεται, με αποτέλεσμα τον περιορισμό του φυσικού φωτισμού και την ανάγκη ύπαρξης τεχνητού φωτισμού που οδηγεί σε επιπρόσθετες καταναλώσεις. Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων παρουσιάζονται μικρότερες ανάγκες τεχνητού φωτισμού σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς, καθώς σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1 χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία στην αποχρωματισμένη τους κατάσταση, αλλά και επειδή ο έλεγχός τους επιτυγχάνεται με βάση την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να παραμένουν στη χρωματισμένη τους κατάσταση για λιγότερες ώρες ετησίως. Αντίθετα, καθώς η αλλαγή κατάστασης των θερμοχρωμικών παραθύρων εξαρτάται από τη θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης και επειδή τα υπό μελέτη παράθυρα ξεκινούν να μεταβαίνουν στην αδιαφανή τους κατάσταση όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 25 °C, παρατηρείται χρωματισμός τους και για συγκεκριμένες ώρες της ημέρας κατά τη χειμερινή περίοδο, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω τις ανάγκες τεχνητού φωτισμού.

7.4.5 Μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων

Σε ένα κτίριο με μεγάλη γυάλινη επιφάνεια είναι απαραίτητος ο περιορισμός της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την αποφυγή των ανεπιθύμητων ηλιακών θερμικών κερδών και της υπερθέρμανσης κατά τη θερινή περίοδο. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η συνολική ετήσια μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα:



Σχήμα 7.5: Συνολική ετήσια μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

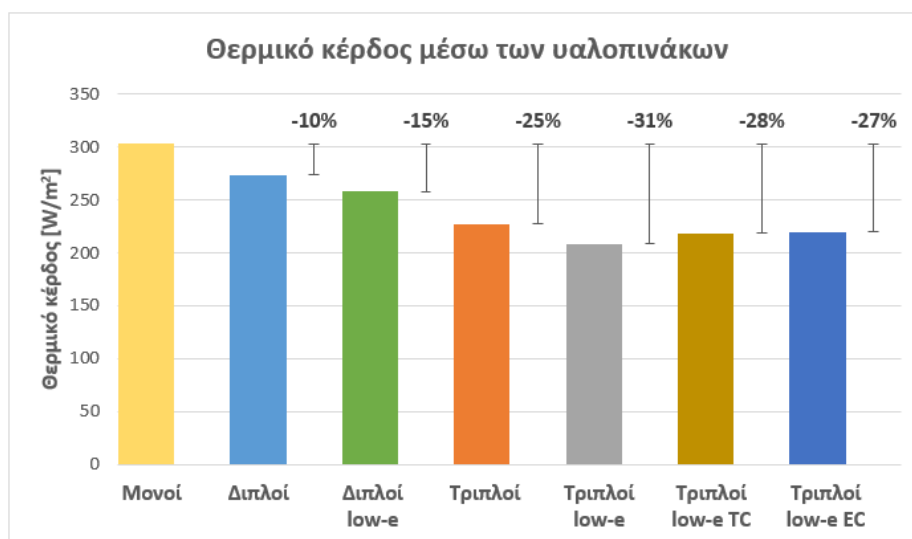
Σύμφωνα με το **Σχήμα 7.5** όλοι οι τύποι υαλοπίνακα οδηγούν σε μείωση της συνολικής ακτινοβολίας που μεταδίδεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Όπως είναι αναμενόμενο, η προσθήκη επιπλέον στρώσεων γυαλιού ή ειδικών επιστρώσεων (low-e, θερμοχρωμικές ή ηλεκτροχρωμικές) οδηγεί σε μείωση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων. Η μεγαλύτερη μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας (κατά 69%) εμφανίζεται στην περίπτωση των τριπλών low-e θερμοχρωμικών υαλοπινάκων, γεγονός που είναι λογικό λόγω της δομής τους, αλλά και εξαιτίας της θερμοκρασίας μετάβασής τους που είναι οι 25 °C. Συνεπώς, όποτε η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θερμοχρωμικής επίστρωσης ξεπεράσει τους 25 °C ξεκινά η αλλαγή της κατάστασης των παραθύρων, τα οποία χρωματίζονται όλο και πιο έντονα και μειώνουν όλο και περισσότερο τη διαπερατότητά τους με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες βρίσκονται στη χρωματισμένη τους κατάσταση για πολλές ώρες κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Επίσης, λόγω της σχετικά χαμηλής τιμής θερμοκρασίας μετάβασης, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μεταβαίνουν στην αδιαφανή τους κατάσταση και ορισμένες ώρες της ημέρας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου. Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, καθώς ο έλεγχός τους επιτυγχάνεται με βάση την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνειά τους, με τιμή μετάβασης τα 500 W/m², οι υαλοπίνακες παραμένουν στη χρωματισμένη τους κατάσταση για λιγότερες ώρες σε σύγκριση με τους θερμοχρωμικούς, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν τη διέλευση μεγαλύτερης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας από τη μάζα τους.

Τέλος, αφού οι τριπλοί low-e και οι τριπλοί low-e ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες περιλαμβάνουν τις ίδιες δύο πρώτες στρώσεις γυαλιού, ο λόγος που οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν μικρότερη μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας σε σχέση με τους τριπλούς low-e οφείλεται στις ιδιότητες της τρίτης

στρώσης γυαλιού, η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ηλιακή ακτινοβολία στη διάφανη της κατάσταση. Στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων, η τρίτη στρώση γυαλιού περιλαμβάνει δεύτερη επίστρωση low-e, η οποία περιορίζει σε μεγαλύτερο βαθμό τη διέλευση της ακτινοβολίας σε όλη τη διάρκεια του έτους. Αντίθετα, παρότι οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες περιορίζουν πιο αποτελεσματικά τη διέλευση της ακτινοβολίας στη χρωματισμένη τους κατάσταση, ο χρωματισμός τους διαρκεί μόνο συγκεκριμένες ώρες κατά τη διάρκεια του έτους και μάλιστα μόνο κατά την περίοδο ψύξης, δίνοντας συνολικά χειρότερα αποτελέσματα.

7.4.6 Θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων

Τα θερμικά κέρδη που εξασφαλίζονται ετησίως μέσω των παραθύρων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



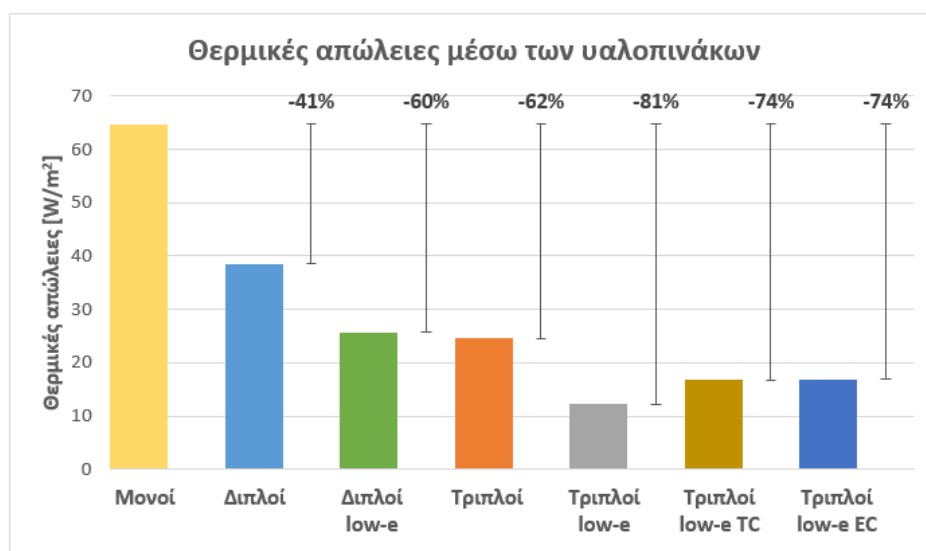
Σχήμα 7.6: Συνολικά ετήσια θερμικά κέρδη μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, τα θερμικά κέρδη των παραθύρων περιορίζονται μέσω της χρήση πιο εξελιγμένων τύπων υαλοπινάκων που περιλαμβάνουν περισσότερες στρώσεις γυαλιού ή κατάλληλες επιστρώσεις. Η μεγαλύτερη μείωση των θερμικών κερδών (κατά 31%) επιτυγχάνεται στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων. Παρατηρείται ότι η μείωση των θερμικών κερδών που επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης επιστρώσεων low-e δεν είναι μεγάλη, καθώς οι συγκεκριμένες επιστρώσεις είναι κατάλληλα σχεδιασμένες ώστε να εξασφαλίζουν υψηλά θερμικά κέρδη που θα μειώσουν τις ανάγκες θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο, δεδομένου ότι για το συγκεκριμένο κτίριο οι ανάγκες θέρμανσης ξεπερνούν σημαντικά τις ανάγκες ψύξης. Στην περίπτωση των θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων παρατηρείται ελαφρώς μικρότερη μείωση των

θερμικών κερδών (κατά 28% και 27% αντίστοιχα), καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας και SHGC στη διάφανή τους κατάσταση.

7.4.7 Θερμικές απώλειες μέσω των υαλοπινάκων

Οι θερμικές απώλειες που παρουσιάζονται ετησίως για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων συγκρίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



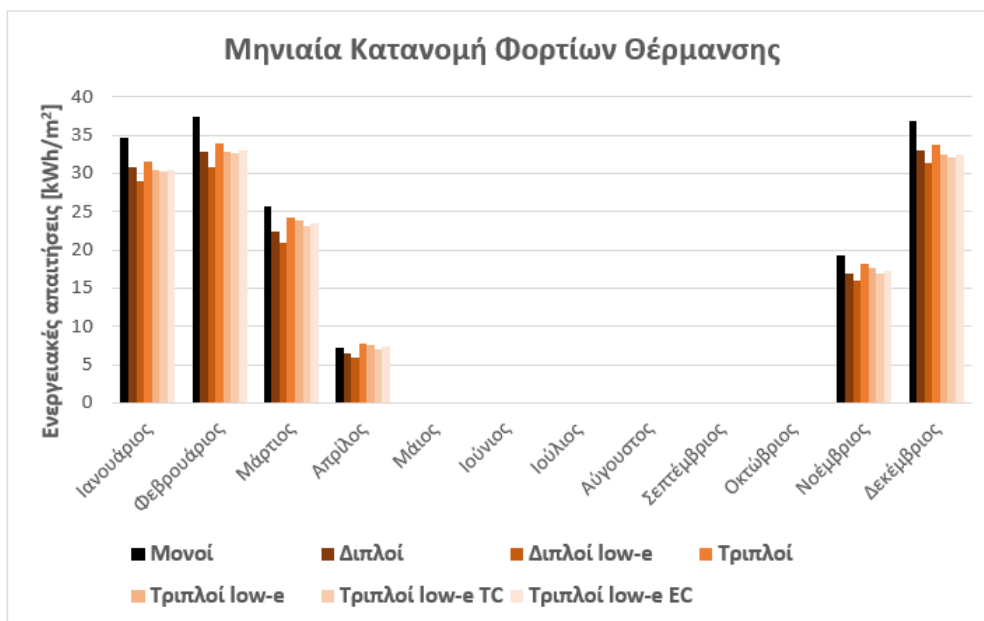
Σχήμα 7.7: Συνολικές ετήσιες θερμικές απώλειες μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

Σύμφωνα με το **Σχήμα 7.7** στην περίπτωση των θερμικών απωλειών παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των θερμικών κερδών. Με την εφαρμογή προηγμένων τύπων υαλοπινάκων παρατηρείται πολύ μεγάλη μείωση των θερμικών απωλειών που οφείλεται στη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας, ενώ η μεγαλύτερη μείωση εμφανίζεται για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες (κατά 81%). Μεγάλη μείωση των απωλειών εμφανίζεται και για τους θερμοχρωμικούς και τους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες (κατά 74%). Στις περιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται ελαφρώς μεγαλύτερες απώλειες απ' ό,τι στην περίπτωση των τριπλών low-e παραθύρων, λόγω της ελαφρώς μεγαλύτερης τιμής συντελεστή θερμοπερατότητας.

7.5 Μηνιαία κατανομή φορτίων

7.5.1 Φορτία θέρμανσης

Η μηνιαία κατανομή των φορτίων θέρμανσης και για τις πέντε θερμικές ζώνες του υπό μελέτη κτιρίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



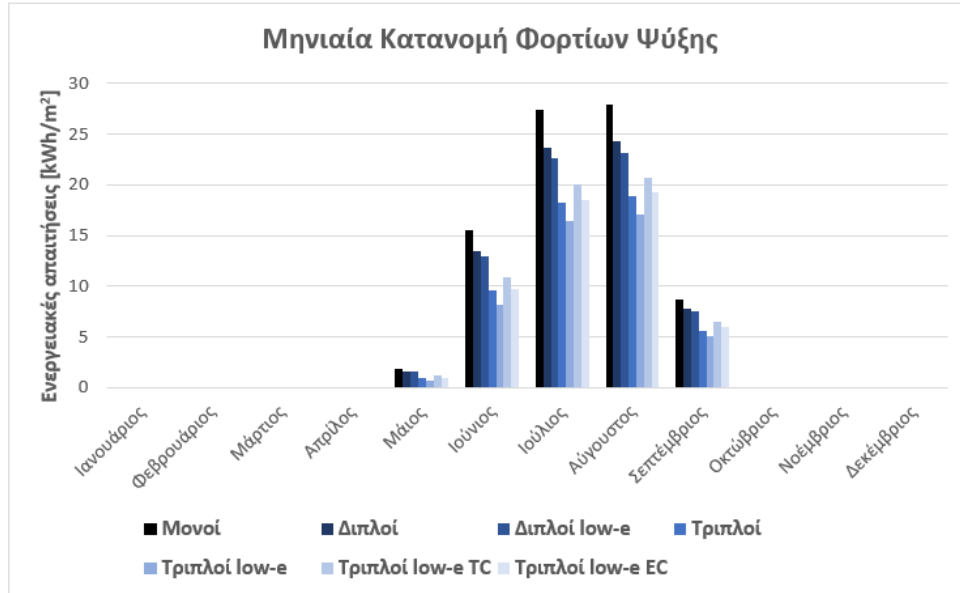
Σχήμα 7.8: Μηνιαία κατανομή των φορτίων θέρμανσης του κτιρίου

Σύμφωνα με την αναθεωρημένη μορφή του Κ.ΕΝ.Α.Κ. του 2017 για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία ανήκει η Αθήνα, ως περίοδος θέρμανσης θεωρείται η περίοδος που μεσολαβεί μεταξύ 1^{ης} Νοεμβρίου και 15^{ης} Απριλίου [13]. Συνεπώς, ορίστηκε κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας που εξασφάλισε τη λειτουργία των ιδανικού συστήματος θέρμανσης μόνο για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Τα μικρότερα φορτία θέρμανσης για όλους τους τύπους υαλοπινάκων παρουσιάζονται κατά τον Απρίλιο, τόσο λόγω των ευνοϊκών καιρικών συνθηκών, αλλά και επειδή το σύστημα θέρμανσης σχεδιάστηκε να λειτουργεί μόνο κατά το πρώτο δεκαπενθήμερο του μήνα. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μεγαλύτερες ανάγκες θέρμανσης παρουσιάζονται κατά τους χειμερινούς μήνες.

Τα φορτία θέρμανσης παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά από μήνα σε μήνα για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες ελέγχονται αυτόματα μέσω κατάλληλου προγράμματος λειτουργίας με σκοπό την αποφυγή του χρωματισμού τους κατά την περίοδο θέρμανσης. Αντίθετα, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν με αντίστοιχη μέθοδο και συνεπώς υπάρχει πιθανότητα χρωματισμού τους σε ημέρες με υψηλότερη θερμοκρασία αν η θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επιστρώσης ξεπεράσει τους 25 °C. Ωστόσο, παρατηρείται ότι σε κάθε μήνα οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες οδηγούν σε ελαφρώς μικρότερα φορτία θέρμανσης σε σχέση με τους ηλεκτροχρωμικούς, γεγονός που οφείλεται κυρίως στη μικρότερη τιμή συντελεστή θερμικής διαπερατότητας που παρουσιάζουν στην αποχρωματισμένη τους κατάσταση.

7.5.2 Φορτία ψύξης

Αντίστοιχα, η μηνιαία κατανομή των φορτίων ψύξης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



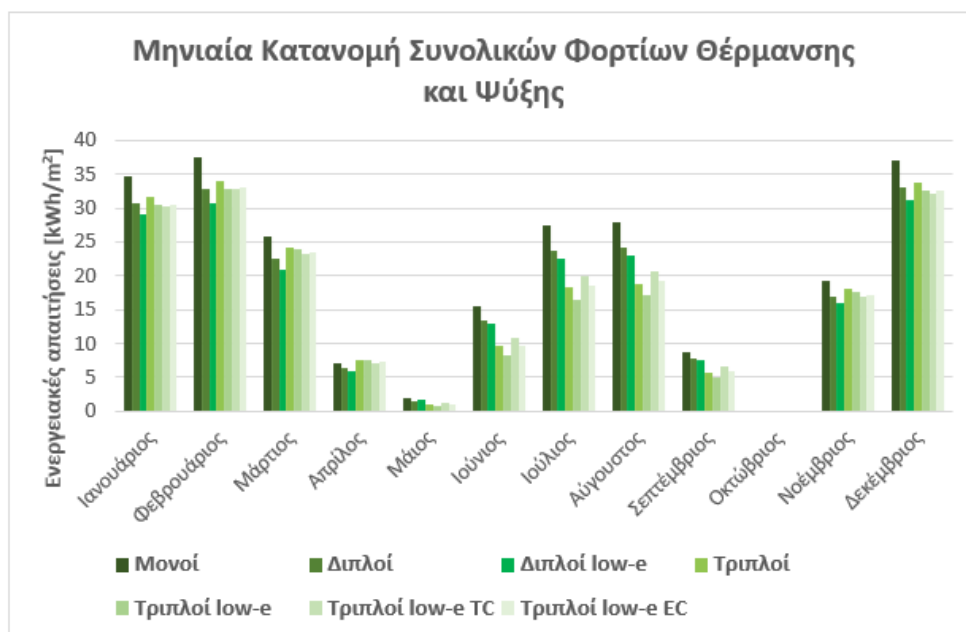
Σχήμα 7.9: Μηνιαία κατανομή των φορτίων ψύξης του κτιρίου

Η περίοδος ψύξης για την κλιματική ζώνη Β αντιστοιχεί στην περίοδο από τη 15^η Μαΐου μέχρι τη 15^η Σεπτεμβρίου [13]. Επομένως, μέσω κατάλληλου προγράμματος λειτουργίας εξασφαλίστηκε η λειτουργία του ιδανικού συστήματος ψύξης μόνο κατά τη συγκεκριμένη περίοδο. Σύμφωνα με το Σχήμα 7.9 οι μεγαλύτερες ανάγκες ψύξης παρουσιάζονται κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενώ κατά τον Ιούνιο τα ψυκτικά φορτία έχουν αρκετά μικρότερες τιμές. Κατά το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Μαΐου παρουσιάζονται τα μικρότερα ψυκτικά φορτία, ενώ κατά το πρώτο δεκαπενθήμερο του Σεπτεμβρίου οι ανάγκες ψύξης είναι σχετικά μεγαλύτερες.

Τα φορτία ψύξης για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά από μήνα σε μήνα. Σημειώνεται ότι από άποψη τάξης μεγέθους, τα φορτία ψύξης παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τα φορτία θέρμανσης.

7.5.3 Συνολικά φορτία συστημάτων θέρμανσης και ψύξης

Η μηνιαία κατανομή των συνολικών φορτίων που προκύπτουν από τη λειτουργία των συστημάτων HVAC παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

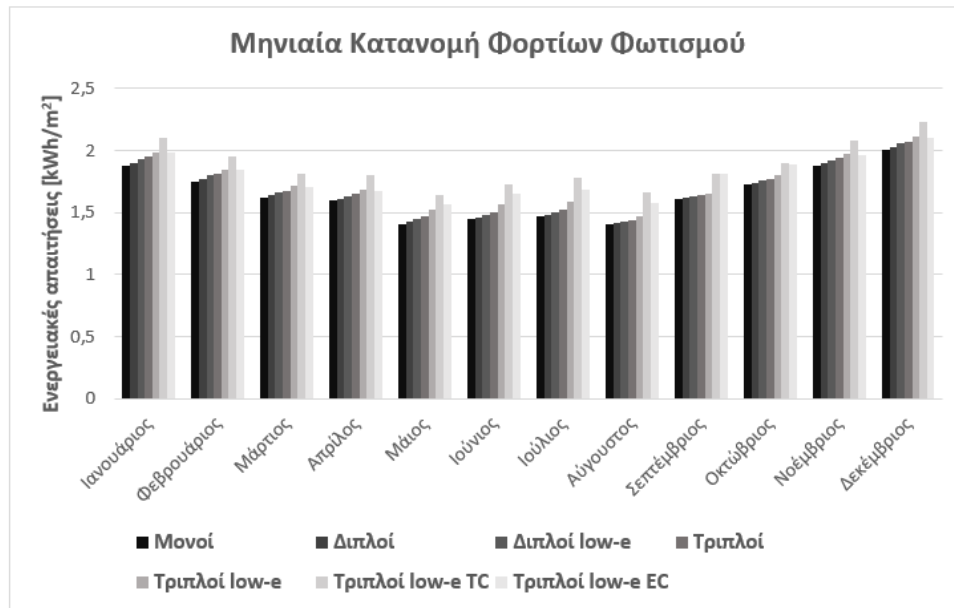


Σχήμα 7.10: Μηνιαία κατανομή των συνολικών φορτίων των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου

Σύμφωνα με το **Σχήμα 7.10** η μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση από τα συστήματα HVAC του κτιρίου παρατηρείται κατά τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο και οφείλεται στις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου. Σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις ψύξης παρατηρούνται και κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, οι οποίες ωστόσο περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό μέσω της εφαρμογής προηγμένων τύπων υαλοπινάκων (τριπλών, τριπλών low-e, τριπλών low-e θερμοχρωμικών ή τριπλών low-e ηλεκτροχρωμικών). Τέλος, σημειώνεται ότι σύμφωνα με την αναθεωρημένη μορφή του Κ.ΕΝ.Α.Κ. του 2017, για την κλιματική ζώνη Β ο μήνας Οκτώβριος δεν ανήκει ούτε στην περίοδο θέρμανσης, ούτε στην περίοδο ψύξης και συνεπώς κατά τον μήνα αυτό δεν παρατηρούνται φορτία θέρμανσης ή ψύξης [13].

7.5.4 Φορτία φωτισμού

Στη συγκεκριμένη ενεργειακή μοντελοποίηση έχει νόημα να μελετηθεί η μηνιαία κατανομή των φορτίων φωτισμού λόγω της εφαρμογής του Daylighting control που ρυθμίζει το επίπεδο του τεχνητού φωτισμού ανάλογα με τον διαθέσιμο φυσικό φωτισμό που εξασφαλίζεται μέσω της μεγάλης γυάλινης επιφάνειας του κτιρίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



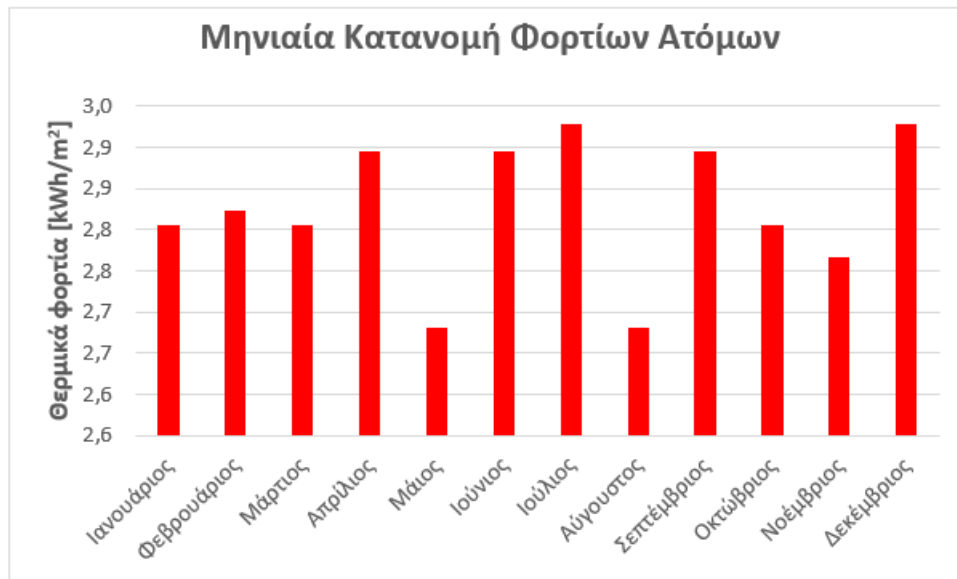
Σχήμα 7.11: Μηνιαία κατανομή της ηλεκτρικής κατανάλωσης λόγω του τεχνητού φωτισμού του κτιρίου

Όπως παρατηρείται από το **Σχήμα 7.11** τα φορτία τεχνητού φωτισμού είναι αρκετά μικρά από άποψη τάξης μεγέθους. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα φορτία φωτισμού εμφανίζουν μικρότερες τιμές κατά τους μήνες Μάιο-Αύγουστο, κατά τους οποίους η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη και παρουσιάζεται μεγαλύτερη ποσότητα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις γυάλινες επιφάνειες του κτιρίου. Αντίστοιχα, κατά τους χειμερινούς μήνες οι ανάγκες τεχνητού φωτισμού είναι μεγαλύτερες. Κατά την περίοδο ψύξης παρουσιάζονται μεγαλύτερες ανάγκες τεχνητού φωτισμού για τους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες λόγω της μεγάλης έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και ιδιαίτερα για τους θερμοχρωμικούς, καθώς η θερμοκρασία ξεπερνά κατά κανόνα τους 25 °C σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες περιορίζουν τα ανεπιθύμητα μεγάλα ηλιακά θερμικά κέρδη προσφέροντας ταυτόχρονα φυσικό φωτισμό για μικρότερες τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

7.5.5 Θερμικά φορτία ατόμων και ηλεκτρικού εξοπλισμού

Η μηνιαία κατανομή των θερμικών φορτίων που οφείλονται στην παρουσία ατόμων στο εσωτερικό του κτιρίου και στη λειτουργία του ηλεκτρικού εξοπλισμού παρουσιάζονται παρακάτω. Τα φορτία αυτά δεν επηρεάζονται από τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υαλοπινάκων και συνεπώς είναι σταθερά σε όλες τις επιμέρους περιπτώσεις. Καθώς έχουν οριστεί διαφορετικά προγράμματα λειτουργίας για τις καθημερινές ημέρες και τα Σαββατοκύριακα και για τα δύο είδη φορτίων, η μεταβολή που παρουσιάζεται από μήνα σε μήνα οφείλεται κυρίως στην κατανομή των ημερών σε κάθε μήνα. Σημειώνεται ότι τα φορτία αυτά και ιδιαίτερα τα φορτία ηλεκτρικού

εξοπλισμού μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά αμελητέα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα θερμικά φορτία.



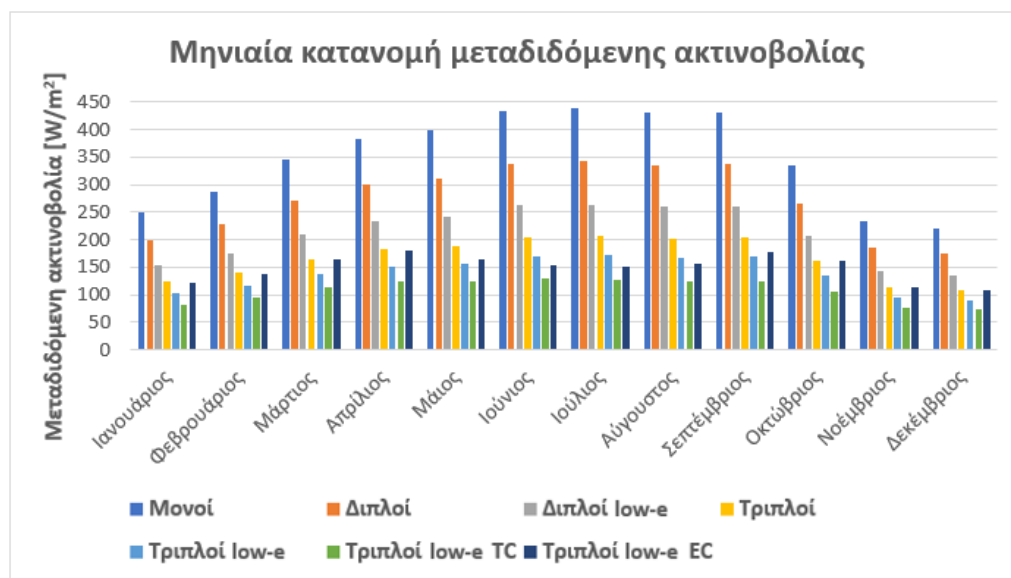
Σχήμα 7.12: Μηνιαία κατανομή των θερμικών φορτίων ατόμων



Σχήμα 7.13: Μηνιαία κατανομή των θερμικών φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού

7.5.6 Μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων

Η μηνιαία κατανομή της ακτινοβολίας που διέρχεται μέσω των υαλοπινάκων παρουσιάζεται παρακάτω:

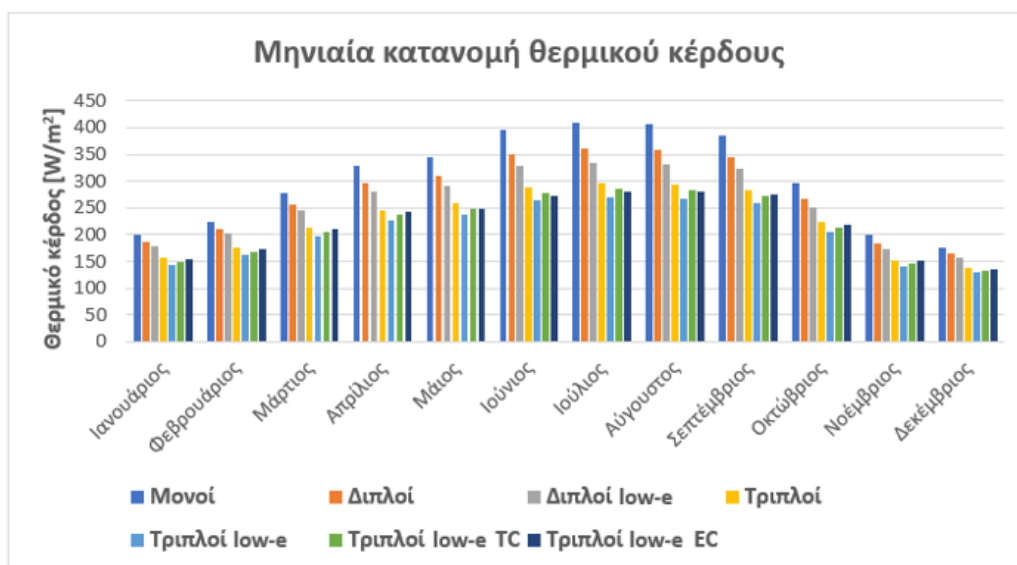


Σχήμα 7.14: Μηνιαία κατανομή της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

Σύμφωνα με τα Σχήματα 7.5 και 7.14 η ίδια τάση που παρατηρείται σε ετήσια βάση εμφανίζεται και από μήνα σε μήνα για τα διάφορα είδη υαλοπινάκων. Κατά τη θερινή περίοδο που η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια των υαλοπινάκων αυξάνεται, παρατηρείται και μεγαλύτερη διέλευση ακτινοβολίας διαμέσου των παραθύρων. Την περίοδο ψύξης που οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες χρωματίζονται, η διαφορά τους σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς μειώνεται. Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες οδηγούν στη μικρότερη διέλευση ακτινοβολίας σε κάθε μήνα του έτους, αφού ακόμα και κατά τη χειμερινή περίοδο η θερμοκρασία της θερμοχρωμικής επίστρωσης ξεπερνά τη θερμοκρασία μετάβασης κάποιες ώρες τις μέρας, με αποτέλεσμα τον χρωματισμό των παραθύρων.

7.5.7 Θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων

Η μηνιαία κατανομή των θερμικών κερδών που εμφανίζονται λόγω των υαλοπινάκων παρουσιάζεται παρακάτω για τους διαφορετικούς τύπους παραθύρων:



Σχήμα 7.15: Μηνιαία κατανομή του θερμικού κέρδους μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

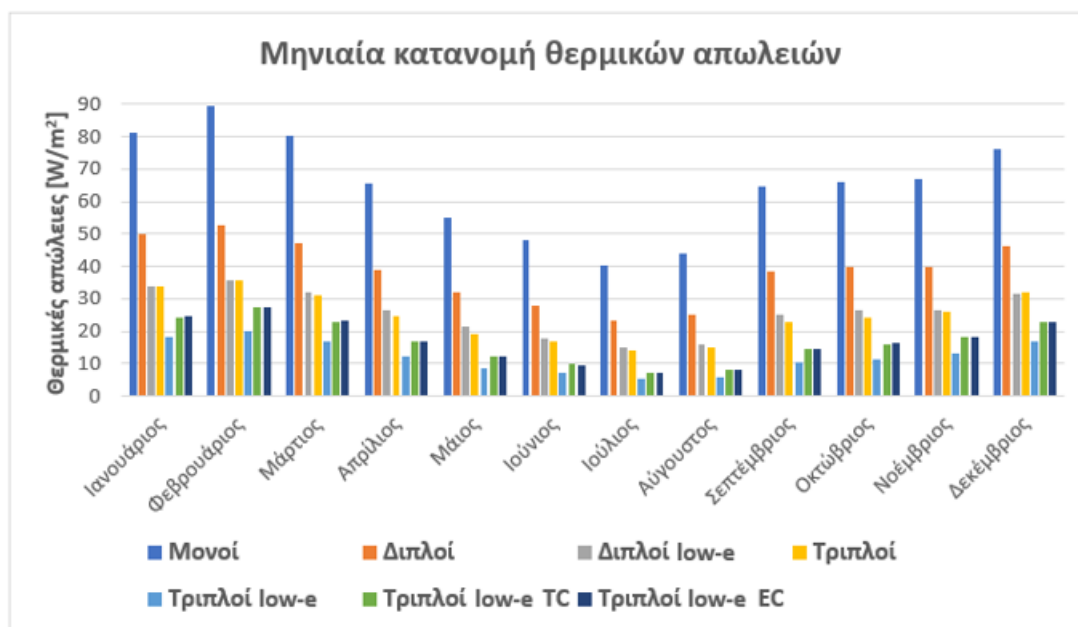
Με βάση το **Σχήμα 7.15** η μηνιαία κατανομή των θερμικών κερδών λόγω της γυάλινης επιφάνειας του κτιρίου παρουσιάζει περίπου την ίδια συμπεριφορά για κάθε μήνα. Όπως συμβαίνει και για τις ετήσιες τιμές, τα θερμικά κέρδη μειώνονται ξεκινώντας από τους απλούς-μονούς υαλοπίνακες και προχωρώντας προς πιο εξελιγμένες μορφές παραθύρων, με την ελάχιστη τιμή για κάθε μήνα να εμφανίζεται στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων, που παρουσιάζουν την μικρότερη τιμή SHGC και συντελεστή θερμοπερατότητας λόγω των δύο επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής που περιλαμβάνουν. Ως προς τους θερμοχρωμικούς και ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες, οι οποίοι εμφανίζουν λίγο μεγαλύτερες τιμές SHGC και θερμικής διαπερατότητας στη διαφανή τους κατάσταση, τα θερμικά κέρδη είναι ελαφρώς μεγαλύτερα.

Ακόμα, για τους θερμοχρωμικούς και ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τον υπό μελέτη μήνα. Για τους θερινούς μήνες (Ιούνιο – Αύγουστο) που οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες επιτρέπεται να αλλάξουν κατάσταση από το σύστημα ελέγχου, παρατηρείται ότι εξασφαλίζουν μικρότερα θερμικά κέρδη και συνεπώς μικρότερες ανάγκες ψύξης σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς. Αντίθετα, κατά τους υπόλοιπους μήνες, εφόσον μόνο οι θερμοχρωμικοί είναι σε θέση να αλλάξουν κατάσταση, αυτοί παρουσιάζουν μικρότερα θερμικά κέρδη. Η συμπεριφορά αυτή των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων είναι ανεπιθύμητη για τους μήνες που ανήκουν στην περίοδο θέρμανσης (1^η Νοεμβρίου-15^η Απριλίου), καθώς την περίοδο αυτή σκοπός είναι η μεγιστοποίηση των ηλιακών θερμικών κερδών για τη μείωση των αναγκών θέρμανσης. Τον μήνα Μάιο τα θερμικά κέρδη των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων προκύπτουν ελαφρώς μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα των θερμοχρωμικών, επειδή οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να μεταβαίνουν στην χρωματισμένη τους κατάσταση καθ' όλη

τη διάρκεια του έτους, ενώ οι ηλεκτροχρωμικοί επιτρέπεται να χρωματίζονται μόνο κατά την περίοδο ψύξης, η οποία περιλαμβάνει μόνο το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Μαΐου. Τον μήνα Οκτώβριο παρατηρείται σημαντικά μεγαλύτερη μείωση των θερμικών κερδών στην περίπτωση των θερμοχρωμικών παραθύρων σε σχέση με τα ηλεκτροχρωμικά, καθώς ο μήνας αυτός δεν ανήκει ούτε στην περίοδο θέρμανσης ούτε στην περίοδο ψύξης, με αποτέλεσμα την παραμονή των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων στη διαφανή τους κατάσταση.

7.5.8 Θερμικές απώλειες μέσω των υαλοπινάκων

Η μηνιαία κατανομή των θερμικών απωλειών που οφείλονται στην παρουσία των υαλοπινάκων για τους διάφορους τύπους παραθύρων που μελετήθηκαν φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 7.16: Μηνιαία κατανομή των θερμικών απωλειών μέσω των παραθύρων για κάθε τύπο υαλοπίνακα

Με βάση το παραπάνω σχήμα, η μηνιαία κατανομή των θερμικών απωλειών μέσω των παραθύρων παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες ετήσιες τιμές. Οι απώλειες θερμότητας μειώνονται δραστικά μέσω της μείωσης του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U κατά τη μετάβαση από τους μονούς υαλοπίνακες αναφοράς προς τους πιο εξελιγμένους τριπλούς low-e υαλοπίνακες, οι οποίοι και παρουσιάζουν τις μικρότερες απώλειες. Καθώς οι θερμοχρωμικοί και οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές θερμοπερατότητας στην αποχρωματισμένη τους κατάσταση από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι οι απώλειές τους παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές. Επειδή κατά την περίοδο θέρμανσης μόνο οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες

χρωματίζονται και μάλιστα για λίγες ώρες μέσα στην ημέρα, για τους μήνες Οκτώβριο-Απρίλιο οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες απώλειες. Αντίθετα, κατά τους μήνες της περιόδου ψύξης (Μάιο-Αύγουστο) οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες εμφανίζουν ελαφρώς μικρότερες απώλειες.

7.6 Σύγκριση ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων για διάφορες τιμές WWR

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα παράθυρα θεωρούνται ως ένα «αδύναμο σημείο» του κτιριακού κελύφους, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές συντελεστή θερμικής διαπερατότητας σε σχέση με τους εξωτερικούς τοίχους και τις οροφές, με αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών απωλειών. Ωστόσο, μέσω των υαλοπινάκων μπορούν να εξασφαλιστούν και σημαντικά θερμικά κέρδη λόγω της εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Επομένως είναι σκόπιμο να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής της συνολικής γυάλινης επιφάνειας του κτιρίου στις ετήσιες ενεργειακές του απαιτήσεις.

Συγκεκριμένα, για την ανάλυση αυτή επιλέχθηκε να μειωθεί ο λόγος της συνολικής γυάλινης επιφάνειας προς τη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων WWR στο μισό και στο ένα τέταρτο της αρχικής του τιμής. Δηλαδή, ενώ οι υαλοπίνακες που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες είχαν διαστάσεις 2 m x 2 m, στην πρώτη περίπτωση επιλέχθηκε να μειωθεί το ύψος τους σε 1 m, ενώ στη δεύτερη περίπτωση σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν διαστάσεις 1 m x 1 m.

Στην τρέχουσα κατάσταση το κτίριο διαθέτει 223 παράθυρα εμβαδού 4 m² και μία εξωτερική γυάλινη πόρτα με εμβαδό 5 m². Επομένως, το συνολικό εμβαδό των γυάλινων επιφανειών του κτιρίου υπολογίζεται:

$$A_{\gamma\alpha\lambda} = 223 \cdot 4 + 5 = 897 \text{ m}^2$$

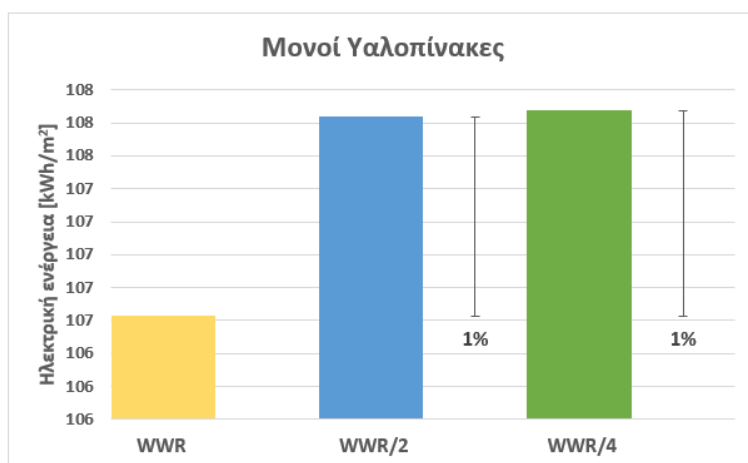
Η συνολική επιφάνεια εξωτερικών του κτιρίου υπολογίστηκε $A_{\text{τοιχ}}=1641,6 \text{ m}^2$. Συνεπώς, η αρχική τιμή WWR του κτιρίου υπολογίζεται:

$$WWR = \frac{A_{\gamma\alpha\lambda}}{A_{\text{τοιχ}}} = \frac{897 \text{ m}^2}{1641,6 \text{ m}^2} = 0,5464 = 54,64 \%$$

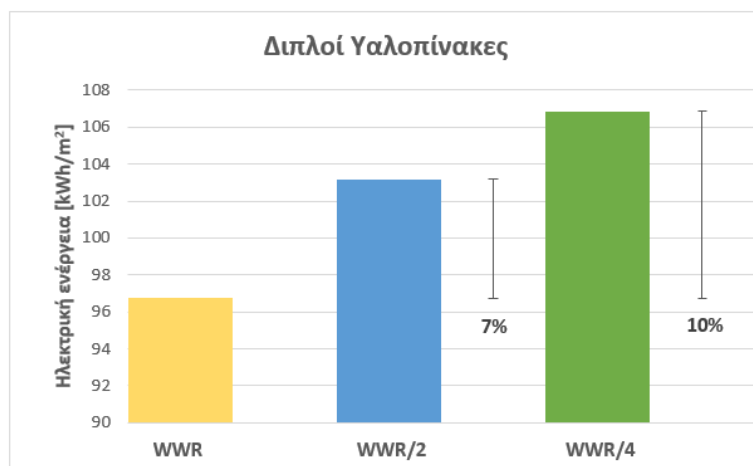
Για να διαπιστωθεί ποιος τύπος υαλοπίνακα οδηγεί σε μικρότερη συνολική ενεργειακή κατανάλωση θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι με μείωση του WWR αυξάνονται οι απαιτήσεις σε τεχνητό φωτισμό. Συνεπώς, θα πρέπει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία των συστημάτων HVAC να εκφραστούν ως ηλεκτρικές καταναλώσεις, ώστε να είναι δυνατή η άθροισή τους με την ηλεκτρική κατανάλωση για τον φωτισμό του κτιρίου. Για τον σκοπό αυτό θα θεωρηθεί ότι η θέρμανση και η ψύξη του κτιρίου επιτυγχάνονται με τη χρήση αντλιών θερμότητας με τιμή συντελεστή συμπεριφοράς COP=3 και βαθμό ενεργειακής απόδοσης EER=2,8. Για τον υπολογισμό της συνολικής

ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε ότι οι ετήσιες καταναλώσεις του ηλεκτρικού εξοπλισμού του κτιρίου είναι 4,034 kWh/m².

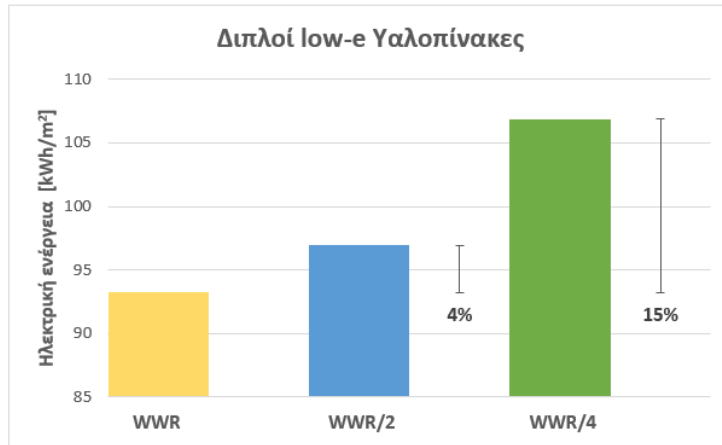
Τα αποτελέσματα για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



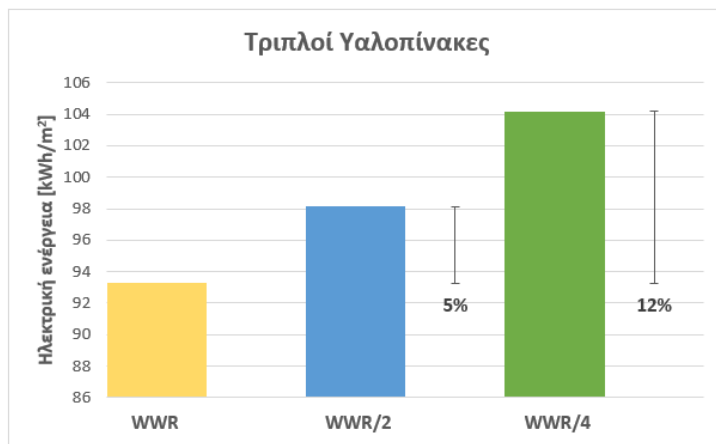
Σχήμα 7.17: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους μονούς υαλοπίνακες



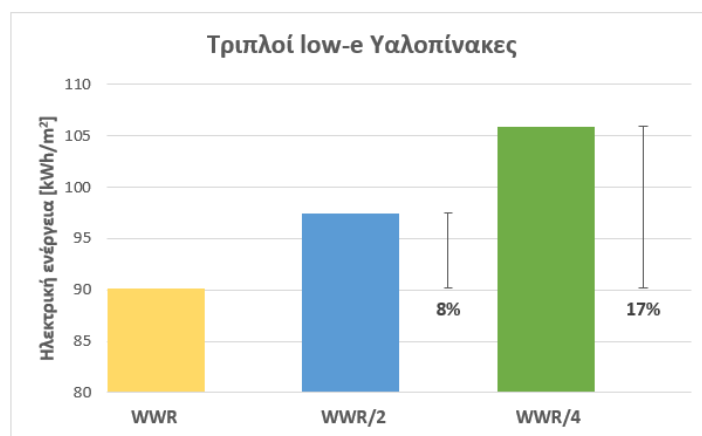
Σχήμα 7.18: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους διπλούς υαλοπίνακες



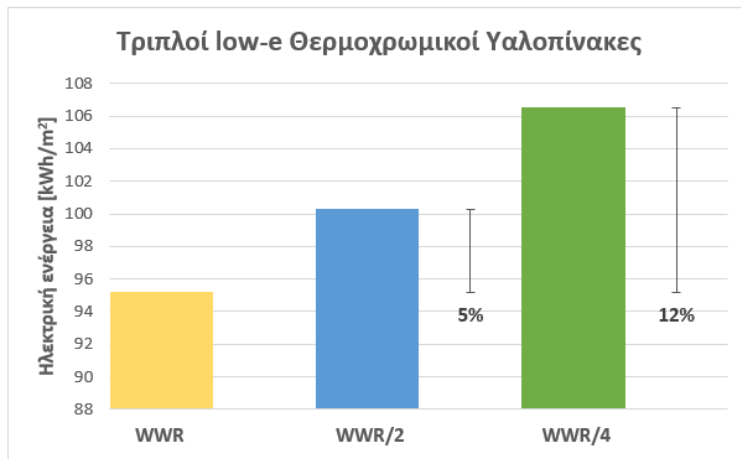
Σχήμα 7.19: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους διπλούς low-e υαλοπίνακες



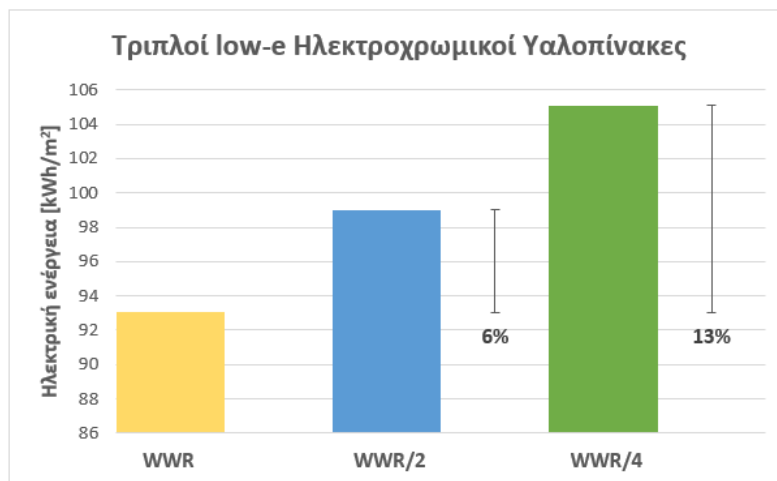
Σχήμα 7.20: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς υαλοπίνακες



Σχήμα 7.21: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες



Σχήμα 7.22: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες



Σχήμα 7.23: Σύγκριση των ετησίων συνολικών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις WWR για τους τριπλούς low-e ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες

Τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.5: Αριθμητικά αποτελέσματα των απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια του κτιρίου για τις τρεις διαφορετικές τιμές WWR

WWR	Απαιτήσεις για θέρμανση [kWh/m ²]	Απαιτήσεις για ψύξη [kWh/m ²]	Απαιτήσεις για φωτισμό [kWh/m ²]	Συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/m ²]
Μονοί υαλοπίνακες				
WWR	53,725	29,081	19,789	106,629
WWR/2	68,746	12,922	22,136	107,839
WWR/4	75,988	1,772	26,081	107,876
Διπλοί υαλοπίνακες				
WWR	47,463	25,270	19,992	96,759
WWR/2	66,102	10,221	22,812	103,169
WWR/4	74,981	0,926	26,912	106,852
Διπλοί low-e υαλοπίνακες				
WWR	44,684	24,272	20,261	93,251
WWR/2	61,113	8,393	23,405	96,945
WWR/4	74,606	0,667	27,569	106,876
Τριπλοί υαλοπίνακες				
WWR	49,775	19,016	20,455	93,280
WWR/2	63,697	6,603	23,813	98,148
WWR/4	71,683	0,420	28,056	104,193
Τριπλοί low-e υαλοπίνακες				
WWR	48,280	16,943	20,917	90,173
WWR/2	63,301	5,591	24,564	97,490
WWR/4	71,582	0,250	30,056	105,922
Τριπλοί low-e θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες				
WWR	47,472	21,191	22,492	95,190
WWR/2	62,315	7,485	26,470	100,303
WWR/4	70,805	0,629	31,057	106,524
Τριπλοί low-e ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες				
WWR	48,093	19,446	21,454	93,026
WWR/2	62,728	6,975	25,279	99,016
WWR/4	71,097	0,642	29,305	105,078

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα και τα δεδομένα του Πίνακα 7.5 μείωση της συνολικής επιφάνειας των υαλοπινάκων οδηγεί σε σημαντική μείωση των ετησίων αναγκών ψύξης, αλλά και σε εξίσου σημαντική αύξηση των αναγκών θέρμανσης λόγω της απώλειας σημαντικού ποσοστού των ηλιακών θερμικών κερδών. Ταυτόχρονα, αυξάνονται και οι ανάγκες τεχνητού φωτισμού, καθώς υπάρχει λιγότερο φυσικό φως διαθέσιμο από τους υαλοπίνακες.

Στην περίπτωση των απλών υαλοπινάκων παρατηρείται μία πολύ μικρή αύξηση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια κατά τη μείωση του WWR. Αυτό συμβαίνει επειδή η βελτίωση που παρατηρείται λόγω της μείωσης των αναγκών ψύξης αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη αύξηση των αναγκών θέρμανσης και φωτισμού, αλλά και από τις σημαντικές θερμικές απώλειες που παρουσιάζονται λόγω της υψηλής τιμής του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις υαλοπινάκων, που χαρακτηρίζονται από καλύτερες τιμές θερμοπερατότητας σύμφωνα με τον **Πίνακα 7.1**, η μείωση των φορτίων θέρμανσης που εξασφαλίζεται από τα ηλιακά θερμικά κέρδη μέσω των παραθύρων είναι πολύ πιο σημαντική από την αύξηση των αναγκών ψύξης, με αποτέλεσμα τη μείωση των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια με αύξηση του WWR. Ταυτόχρονα, με αύξηση του WWR παρατηρείται και μείωση των ετήσιων αναγκών φωτισμού. Επομένως, σε όλες τις περιπτώσεις υαλοπινάκων συμπεραίνεται ότι αξίζει η σχεδίαση του κτιρίου με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια, αφού αυτή οδηγεί σε μείωση της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση, η μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση με αύξηση του WWR παρατηρείται με την εφαρμογή των τριπλών low-e υαλοπινάκων.

7.7 Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και μείωση εκπομπών CO₂

Βασικός στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα μέσω της εφαρμογής προηγμένων τύπων υαλοπινάκων είναι η μείωση των εκπομπών CO₂. Για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ σε κάθε περίπτωση θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η ενεργειακή κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για κάθε τύπο παραθύρου, πολλαπλασιάζοντας τις ετήσιες ηλεκτρικές καταναλώσεις με τον συντελεστή 2,9 σύμφωνα με την αναθεωρημένη μορφή του Κ.ΕΝ.Α.Κ. του 2017. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό του εκλυόμενου CO₂ θα πρέπει να γίνει πολλαπλασιασμός με τον συντελεστή 0,989 kg CO₂/kWh, καθώς και με τη συνολική επιφάνεια δαπέδου του κτιρίου (2604,48 m²) [13]. Ως κατάσταση αναφοράς θεωρείται πάντα η εφαρμογή μόνο απλών παραθύρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.6: Ετήσιες απαιτήσεις πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου και ετήσια εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ για τους διάφορους τύπους υαλοπινάκων

Τύπος υαλοπίνακα	Συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/m ²]	Συνολικές απαιτήσεις πρωτογενούς ενέργειας [kWh/m ²]	Εκλυόμενες εκπομπές CO ₂ [tn/έτος]	Διαφορά εκπομπών CO ₂ σε σχέση με κατάσταση αναφοράς [tn/έτος]
Μονοί	106,63	309,22	796,51	0,00
Διπλοί	96,76	280,60	722,78	-73,73 (-9%)
Διπλοί low-e	93,25	270,43	696,58	-99,93 (-13%)
Τριπλοί	93,28	270,51	696,79	-99,71 (-13%)
Τριπλοί low-e	90,17	261,50	673,59	-122,92 (-15%)
Τριπλοί low-e TC	95,19	276,05	711,06	-85,45 (-11%)
Τριπλοί low-e EC	93,03	269,78	694,90	-101,61 (-13%)

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις προκύπτει ότι η μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ εμφανίζεται κατά τη χρήση των τριπλών low-e υαλοπινάκων, οι οποίοι οδηγούν σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 122,92 tn ετησίως, δηλαδή κατά 15 % συγκριτικά με την περίπτωση χρήσης απλών παραθύρων. Σημαντική εξοικονόμηση παρατηρείται επίσης και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών, των τριπλών και των διπλών low-e υαλοπινάκων.

8 Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα ενεργειακής προσομοίωσης υαλοπινάκων

Από την ενεργειακή προσομοίωση των διάφορων τύπων υαλοπινάκων προέκυψαν αρκετά σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα.

Αρχικά, λόγω της επιλογής μίας χαμηλής τιμής θερμοκρασίας μετάβασης (25 °C) παρατηρήθηκε χρωματισμός των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων για ένα μεγάλο πλήθος ωρών ετησίως, ειδικά στην περίπτωση των παραθύρων με νότιο προσανατολισμό. Η συμπεριφορά αυτή ήταν ανεπιθύμητη κατά την περίοδο θέρμανσης, αλλά επιθυμητή κατά την περίοδο ψύξης. Στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, χάρη στη δυνατότητα ελέγχου του χρωματισμού των παραθύρων, ήταν δυνατή η παρεμπόδιση του χρωματισμού τους κατά την περίοδο θέρμανσης, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερα θερμικά κέρδη. Ταυτόχρονα, καθώς η τιμή έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που προκαλεί τον χρωματισμό των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων επιλέχθηκε σχετικά υψηλή (500 W/m²), οι υαλοπίνακες χρωματίζονται για πολύ λιγότερες ώρες ετησίως.

Ως προς τις ανάγκες θέρμανσης όλοι οι υαλοπίνακες οδήγησαν σε σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση. Συγκεκριμένα, κατά τη μετάβαση από τους μονούς υαλοπίνακες αναφοράς σε διπλούς και στη συνέχεια σε διπλούς low-e παρατηρήθηκε αύξηση της ενεργειακής εξοικονόμησης (12% και 17% αντίστοιχα), καθώς με τη χρήση πιο προηγμένων τύπων παραθύρων η βελτίωση του συντελεστή θερμοπερατότητας ήταν πολύ πιο έντονη σε σχέση με τη μείωση του SHGC. Οι υαλοπίνακες αυτοί, συνεπώς, κατάφεραν να εξασφαλίσουν σημαντική θερμομόνωση κατά τη χειμερινή περίοδο, αξιοποιώντας παράλληλα στον βέλτιστο βαθμό τα ηλιακά θερμικά κέρδη. Στην περίπτωση των τριπλών παραθύρων η βελτίωση του συντελεστή θερμοπερατότητας αντισταθμίστηκε σε μεγάλο βαθμό από τη μείωση του SHGC, με αποτέλεσμα τη μικρότερη εξοικονόμηση ως προς τα φορτία θέρμανσης (κατά 7%). Όσον αφορά τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες, παρότι χρωματίζονται για ένα μεγάλο πλήθος ωρών ετησίως, η μείωση του SHGC κατά τον χρωματισμό τους δεν είναι μεγάλη, ενώ διαθέτουν μία αρκετά χαμηλή τιμή συντελεστή θερμοπερατότητας, με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση ως προς τα φορτία θέρμανσης (κατά 12%). Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες οδήγησαν σε παρόμοια εξοικονόμηση (κατά 11%), καθώς παρότι δεν χρωματίστηκαν κατά τη χειμερινή περίοδο, η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητάς τους ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς.

Αναφορικά με τις ανάγκες ψύξης η προσθήκη επιπρόσθετων στρώσεων γυαλιού και επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής οδήγησε σε μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας και του SHGC, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ενεργειακή

εξοικονόμηση. Η μέγιστη εξοικονόμηση ως προς τα φορτία ψύξης παρουσιάστηκε στην περίπτωση των τριπλών low-e υαλοπινάκων (κατά 42%). Παρότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες χρωματίστηκαν για ένα μεγάλο πλήθος ωρών κατά την περίοδο ψύξης, ο συντελεστής θερμοπερατότητάς τους και ο SHGC (τόσο στη διαφανή, όσο και στην αδιαφανή τους κατάσταση) είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες, με αποτέλεσμα μικρότερη ενεργειακή εξοικονόμηση (κατά 27%). Οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες οδήγησαν σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση (κατά 33%), καθώς, παρότι χρωματίστηκαν για πολύ λιγότερες ώρες, η μείωση του SHGC κατά τον χρωματισμό τους ήταν πολύ πιο έντονη.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου από τα συστήματα HVAC παρατηρείται ότι η ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας και του SHGC με την προσθήκη επιπλέον υαλοπινάκων ή επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής συμβάλλει στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων. Η μέγιστη εξοικονόμηση παρατηρήθηκε στην περίπτωση των τριπλών low-e παραθύρων (κατά 21%). Οι θερμοχρωμικοί και ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες προσέφεραν επίσης σημαντική εξοικονόμηση. Παρατηρήθηκε ότι οι διπλοί και οι διπλοί low-e υαλοπίνακες παρουσιάζουν περίπου ίδια ποσοστιαία μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ως προς τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης. Συνεπώς, αυτοί οι τύποι παραθύρων είναι περισσότερο κατάλληλοι για την ομοιόμορφη μείωση της κατανάλωσης ετησίως. Αντίθετα, οι υπόλοιποι τύποι υαλοστασίων είναι περισσότερο κατάλληλοι για τον περιορισμό σε μεγάλο βαθμό των αναγκών ψύξης, προσφέροντας παράλληλα και εξοικονόμηση ως προς τις ανάγκες θέρμανσης.

Με την προσθήκη επιπλέον υαλοπινάκων ή επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής παρατηρείται αύξηση των αναγκών για τεχνητό φωτισμό λόγω της μείωσης της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία. Ταυτόχρονα, η μεταδιδόμενη ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων, τα θερμικά κέρδη και οι θερμικές απώλειες μειώνονται λόγω της μείωσης της θερμικής διαπερατότητας και του SHGC. Όπως είναι αναμενόμενο, οι μέγιστες ανάγκες τεχνητού φωτισμού (αύξηση κατά 14%) και η ελάχιστη μεταδιδόμενη ακτινοβολία (μείωση κατά 69%) παρουσιάζονται για τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες που χρωματίζονται για πολλές ώρες ετησίως. Κατά την περίοδο ψύξης, που οι ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες χρωματίζονται, παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά και μικρότερες απώλειες και θερμικά κέρδη σε σχέση με τους θερμοχρωμικούς. Κατά την περίοδο θέρμανσης τα θερμικά κέρδη είναι μικρότερα για τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες, αφού δεν μπορεί να αποφευχθεί ο χρωματισμός τους.

Κατά τη μελέτη της επίδρασης της συνολικής γυάλινης επιφάνειας του κτιρίου παρατηρήθηκε ότι, καθώς οι ετήσιες ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου είναι μεγαλύτερες από τις ανάγκες ψύξης, η αύξηση του WWR βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση, αφού μειώνει τις ανάγκες θέρμανσης και τεχνητού φωτισμού. Η

μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση παρατηρείται για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες.

Τέλος, εξετάζοντας την εξοικονόμηση ως προς την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO₂, η μεγαλύτερη μείωση (κατά 15%) σημειώθηκε για τους τριπλούς low-e υαλοπίνακες, οι οποίοι οδήγησαν σε μείωση των ετήσιων εκπομπών CO₂ κατά 122,92 tn.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η διπλωματική εργασία αυτή μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για περαιτέρω έρευνα στο τομέα της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων με σκοπό την αξιολόγηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Ορισμένα θέματα που κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθούν στο μέλλον είναι τα ακόλουθα:

- Η προσομοίωση της ενεργειακής απόδοσης του ίδιου κτιρίου σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και γεωγραφικά πλάτη και η αντιδιαστολή των αποτελεσμάτων με αυτά της παρούσας εργασίας με σκοπό την βαθύτερη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των διάφορων τύπων υαλοπινάκων
- Η εφαρμογή μεθόδων εξωτερικής ή εσωτερικής σκίασης στο κτίριο και η σύγκριση των ενεργειακών αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν στην περίπτωση των θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων για τον προσδιορισμό της πιο αποδοτικής από ενεργειακής άποψης λύσης
- Ο ορισμός πραγματικών θερμικών συστημάτων για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου με μεγαλύτερη ακρίβεια και η ενσωμάτωση συστημάτων που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες μορφές ενέργειας για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Για παράδειγμα θα μπορούσε να μελετηθεί η τοποθέτηση ηλιακών συλλεκτών στην οροφή του κτιρίου σε συνδυασμό με τη χρήση αντλίας θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου
- Η μελέτη των ίδιων τύπων υαλοπινάκων σε ένα κτίριο με συμμετρική δομή, ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση του προσανατολισμού στην ενεργειακή συμπεριφορά κάθε τύπου υαλοπίνακα
- Η μοντελοποίηση των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων λαμβάνοντας υπόψη πολλές ενδιαμέσες καταστάσεις εκτός από την πλήρως διαφανή και αδιαφανή τους κατάσταση, έτσι ώστε η ενεργειακή προσομοίωση να είναι καλύτερα προσαρμοσμένη στα πραγματικά δεδομένα
- Ειδικά στην περίπτωση των τριπλών low-e θερμοχρωμικών παραθύρων θα ήταν ενδιαφέρουσα η σύγκριση της ενεργειακής τους απόδοσης με ένα αντίστοιχο τύπο παραθύρων που διαθέτουν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα με

μεγαλύτερη τιμή θερμοκρασίας μετάβασης και πιο έντονη μεταβολή του SHGC κατά τον χρωματισμό του.

9 Βιβλιογραφία

9.1 Ελληνική

[1] Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, 2013. Δελτίο Τύπου – Έρευνα κατανάλωσης ενέργειας στα νοικοκυριά, 2011-2012. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SFA40/>-

[2] Έκθεση μακροπρόθεσμης στρατηγικής για την κινητοποίηση επενδύσεων για την ανακαίνιση του αποτελούμενου από κατοικίες και εμπορικά κτίρια, δημόσια και ιδιωτικά, εθνικού κτιριακού αποθέματος (Άρθρο 4, Οδηγία 27/2012/ΕΕ) - Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ)

[3] Δρούτσα Κ.Γ., Κοντογιαννίδης Σ., Δασκαλάκη Ε.Γ., Μπαλαράς Κ.Α., 2014. Αποτύπωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των ελληνικών κτιρίων μέσω των ενεργειακών πιστοποιητικών. 10ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας. Διαθέσιμο στην ηλεκτρονική διεύθυνση: http://vergina.eng.auth.gr/IHT/B_03.pdf

[4] Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Μύρων Μονιάκης, *Θέρμανση-Ψύξη-Κλιματισμός*, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας & Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 2015

[5] Μ. Φούντη, Δ. Χουντάλας, *Μεταφορά Θερμότητας II*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας

[6] ΑΡΤΕΜΗ ΣΠΑΝΑΚΗ, *ΥΑΛΟΣΤΑΣΙΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ*, Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ-Σ.Τ.Ε.Φ. ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

[7] Ρήγα Αθηνά, *Το γυαλί στις κατασκευές*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Τεχνικών Υλικών, Αθήνα 2011

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

[9] ΕΛΕΝΗ ΣΥΡΡΑΚΟΥ (2005), *ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΧΡΩΜΙΚΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ*, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

[10] Δημήτριος Λουλουδάκης, *Ανάπτυξη και Μελέτη Καινοτόμων Χρωμικών Επιστρώσεων και Διατάξεων για Εφαρμογή σε «Έξυπνα Παράθυρα»*, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Σχολή Θετικών και τεχνολογικών επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Κρήτη, 2016

[11] Παναγιώτης Ντελαλής, *Επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας

[12] ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, *ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΘΥΡΩΝ*, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ,

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Πάτρα, Ιούνιος 2016

[13] ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017, *ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ*, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ Κ.Ε.Ν.Α.Κ., Α' έκδοση, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

9.2 Ξενόγλωσση

[14] Runqi Liang, Yanyi Sun, Marina Aburas, Robin Wilson, Yupeng Wu, *Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China*, Energy & Buildings 176 (2018) 216-231

[15] 2001 ASHRAE Handbook of Fundamentals

[16] THERM 6.3/WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual, Lawrence Berkeley National Laboratory, July 2013

[17] <http://mundobim.com/construpm/edge-green-buildings-whats-window-to-wall-ratio/>

[18] Jorge S. Carlos, Helena Corvacho, *Evaluation of the performance indices of a ventilated double window through experimental and analytical procedures: SHGC-values*, Energy and Buildings 86 (2015) 886-897

[19] <https://www.eurodomica.gr/proionta/yalopinakes>

[20] Ali Bahadori-Jahromi, Abdulazeez Rotimi, Anastasia Mylona, Paulina Godfrey and Darren Cook, 2017, *Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings*

[21] Jeffrey Rissman and Hallie Kennan, *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>)

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

[23] <https://www.stanekwindows.com/what-is-low-e-glass-and-does-it-make-windows-more-energy-efficient.aspx>

[24] Bjørn Petter Jelle, Andrew Hynd, Arild Gustavsen, Dariush Arasteh, Howdy Goudey, Robert Hart, *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities*, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 96, January 2012, pages 1-28

- [25] Robinson S. J., Collins R. E., *Evacuated windows-theory and practice*, In: ISES Solar World Congress, International Solar Energy Society, 1989, Kobe, Japan
- [26] Yueping Fang, Philip C. Eames, Brian Norton, Trevor J. Hyde, Junfu Zhao, Jinlei Wang, Ye Huang, *Low emittance coatings and the thermal performance of vacuum glazing*, Solar Energy, Volume 81, Issue 1, January 2007, pages 8-12
- [27] J. M. Schultz, K. I. Jensen, F. H. Kristiansen, *Super insulating aerogel glazing*, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 89, Issues 2-3, 15 November 2005, Pages 275-285
- [28] Liu H., *The development of novel window systems towards low carbon buildings*, The University of Nottingham, 2012
- [29] C. Buratti, E. Moretti, *Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings*, Applied Energy, Volume 98, October 2012, Pages 396-403
- [30] Erdem Cuce, Saffa B. Riffat, *A state-of-the-art review on innovative glazing technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2015) 695-714
- [31] Windows for high-performance commercial buildings, Reflective coatings, διαθέσιμο στο: <https://www.commercialwindows.org/reflective.php>
- [32] Solar reflective glass, διαθέσιμο στο: <http://www.doubledinstallations.co.uk/glass-options.html>
- [33] Elin Hammarberg, Arne Roos, *Antireflection treatment of Low-emitting glazings for energy efficient windows with high visible transmittance*, Thin Solid Films, Volume 442, Issues 1-2, October 2003, pages 222-226
- [34] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/AE_heat_absorbing_window_glass.html
- [35] Tin-tai Chow, Chunying Li, Zhang Lin, *Innovative solar windows for cooling-demand climate*, Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) 212-220
- [36] Windows for high-performance commercial buildings, Tinted Glazing, διαθέσιμο στο: <https://www.commercialwindows.org/tints.php>
- [37] Mohammed M. Farid, Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, Said Al-Hallaj, *A review on phase change energy storage: materials and applications*, Energy Conversion and Management, Volume 45, Issues 9-10, June 2004, pages 1597-1615
- [38] Watanabe T., Hashimoto K., Fujishima A., *Proceedings of the first international conference on TiO₂ photocatalyst purification and treatment of water and air*, 1992
- [39] B. Sourek, V. Jirka, V. Shemelin, T. Matuska, *Experimental characterization of glazing with glass prisms*, Solar Energy 158 (2017) 440-447
- [40] Yanyi Sun, *Glazing system with transparent insulation material for building energy saving and daylight comfort*, March 2017

- [41] Lampert C. M. (2004), *Chromogenic smart materials*, Materials Today 7(3), 28
- [42] Neil L. Sbar, Lou Podbelski, Hong Mo Yang, Brad Pease, *Electrochromic dynamic windows for office buildings*, International Journal of Sustainable Built Environment (2012) 1, 125-139
- [43] Leftheriotis G., Yianoulis P., Patrikios D. (1997), *Deposition and optical properties of optimized ZnS/Ag/ZnS thin films for energy saving applications*, Thin Solid Films 306, 92-99
- [44] Granqvist C. G. (1995), *Handbook of inorganic electrochromic materials*, Elsevier
- [45] W. J. Hee, M. A. Alghoul, B. Bakhtyar, OmKalthum Elayeb, M. A. Shameri, M. S. Alrubaih, K. Sopian, *The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 42 (2015), pages 323-343
- [46] [Yang Wang, Evan L. Runnerstrom and Delia J. Milliron, *Switchable Materials for Smart Windows*, Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, Volume 7, 2016, pp 283-304](#)
- [47] Guillermo Garcia, Raffaella Buonsanti, Anna Llores, Evan L. Runnerstrom, Amy Bergerud, Delia J. Milliron, *Near-Infrared Spectrally Selective Plasmonic Electrochromic Thin Films*, Advanced Optical Materials (2013), Volume 1, Issue 3
- [48] Brian A. Korgel, *Composite for smarter windows*, Nature 500 (2013), pp 278-279
- [49] Jongwook Kim, Gary K. Ong, Yang Wang, Gabriel LeBlanc, Teresa E. Williams, Tracy M. Mattox, Brett A. Helms and Delia J. Milliron, *Nanocomposite Architecture for Rapid, Spectrally-Selective Electrochromic Modulation of Solar Transmittance*, Nano Lett. 2015, 15, 8, pp 5574-5579
- [50] Loonen RCGM, Hensen JLM, *Smart windows with dynamic spectral selectivity-a scoping study*, Proc Build Simul 2015, pp 2158-2165
- [51] Nicholas DeForest, Arman Shehabi, Stephen Selkowitz, Delia J. Milliron. *A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings*. Applied Energy (2017) 95-109
- [52] Paulo Tavares, Hermano Bernardo, Adélio Gaspar, António Martins, *Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in Mediterranean buildings refurbishment*, Solar Energy 134 (2016) 236-250
- [53] Karlsson J., Roos A. (2001), *Annual energy window performance versus glazing thermal emittance-the relevance of very low emittance values*, Thin Solid Films 392(2), pp 345-348
- [54] www.sage.com

- [55] Sbar N., Badding M., Budziak R., Cortez K., Laby L., Michalski L., Ngo T., Schultz S. and Urbanik K. (1999), *Progress toward durable, cost effective electrochromic window glazings*, Solar Energy Materials and Solar Cells 56, pp 321-341
- [56] Selkowitz S. E., Rubin M., Lee E. S., Sullivan R. (1994), *A review of electrochromic window performance factors*, Lawrence Berkeley National Laboratory, NBNL 35486, UC 1600
- [57] Kaitlin Allen, Karen Connelly, Peter Rutherford, Yupeng Wu. *Smart windows-Dynamic control of building energy performance*. Energy and Buildings 139 (2017) 535-546
- [58] Manfredi Saeli, Clara Piccirillo, Ivan P. Parkin, Russell Binions, Ian Ridley, *Energy modelling studies of thermochromic glazing*, Energy and Buildings 42 (2010) 1666-1673
- [59] Wei Feng, Liping Zou, Guohua Gao, Guangming Wu, Jun Shen, Wen Li. *Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis*. Solar Energy Materials & Solar Cells 144 (2016) 316-323
- [60] <http://www.glazette.com/Glass-Knowledge-Bank-70/Liquid-Crystal-Glass.html>
- [61] <https://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window2.htm>
- [62] V.S.K.V. Harish, Arun Kumar, *A review on modeling and simulation of building energy systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016) 1272-1292
- [63] ENERGYPLUS VERSION 8.6 DOCUMENTATION, *Getting Started*, U.S Department of Energy, September 30, 2016, pp. 5-6
- [64] V.S.K.V. Harish, Arun Kumar, *A review on modeling and simulation of building energy systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016) 1272-1292
- [65] ENERGYPLUS VERSION 8.6 DOCUMENTATION, *Input Output Reference*, U.S Department of Energy, September 30, 2016
- [66] Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Michaël Kummert, Brent T. Griffith, *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*, Building and Environment 43 (2008) 661-673
- [67] Marco Casini, *Active dynamic windows for buildings: A review*, Renewable Energy 119 (2018) 923-934
- [68] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, *Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review*, Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) 87-105

[69] Hong Ye, Xianchun Meng, Bin Xu, *Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window*, Energy and Buildings 49 (2012) 164-172