

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΩΜΟΓΕΝΩΝ ΥΑΛΟΣΤΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΤΙΡΙΩΝ

Σκυλάκη Μαρίνα

Επιβλέπων καθηγητής: Αρναουτάκης Γεώργιος

Ηράκλειο, Ιούνιος 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την αξιολόγηση χρωμογενών υαλοστασίων με στόχο τη διερεύνηση της συμβολής τους στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Τα υαλοστάσια αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του κτιριακού κελύφους, καθώς επηρεάζουν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας, τα θερμικά κέρδη, τις θερμικές απώλειες και τις απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται προηγμένα και χρωμογενή συστήματα υάλωσης, με έμφαση στις τεχνολογίες μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων και στη δυνατότητά τους να προσαρμόζουν τη διαπερατότητά τους ανάλογα με το αντίστοιχο ερέθισμα λειτουργίας. Αρχικά, συγκροτείται βιβλιογραφικό σύνολο αντιπροσωπευτικών συστημάτων και αναλύονται η φασματική τους συμπεριφορά, ο μηχανισμός οπτικής μετάβασης και οι βασικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την αντιστρεψιμότητα, τη σταθερότητα, την ανθεκτικότητα και την πρακτική εφαρμογή.

Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται για την επιλογή συστημάτων που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για περαιτέρω υπολογιστική αξιολόγηση. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η διαδικασία μοντελοποίησης των υαλοστασίων με χρήση των λογισμικών Optics και LBNL WINDOW, καθώς και η ενεργειακή προσομοίωσή τους στο EnergyPlus. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται σε κτίριο γραφειακής χρήσης, για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και τιμές λόγου παραθύρου προς τοίχο, με σύγκριση των δυναμικών υαλοστασίων έναντι συμβατικού διπλού υαλοστασίου και στατικού υαλοστασίου χαμηλής εκπομπής. Μέσω της διαδικασίας αυτής εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης των χρωμογενών υαλοστασίων ως αποδοτικότερων λύσεων υάλωσης για τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων των κτιρίων.

Optimization of Chromogenic Glazing Systems for Enhanced Building Energy Efficiency

Skylaki Marina

Abstract

This diploma thesis focuses on the evaluation of chromogenic glazing systems, aiming to investigate their contribution to the improvement of building energy performance. Glazing systems are a critical component of the building envelope, as they affect solar radiation transmission, heat gains, heat losses, and the energy demands for heating and cooling. In this context, advanced and chromogenic glazing systems are examined, with emphasis on technologies with variable optical properties and on their ability to adjust their transmittance according to the corresponding operating stimulus. Initially, a literature-based set of representative systems is developed, and their spectral behaviour, optical switching mechanism, and main limitations related to reversibility, stability, durability, and practical application are analysed.

This analysis is used to select systems of interest for further computational assessment. Subsequently, the modelling procedure of the glazing systems is developed using Optics and LBNL WINDOW, followed by their energy simulation in EnergyPlus. The evaluation is carried out in an office building, under different climatic conditions and window-to-wall ratios, while the dynamic glazing systems are compared against conventional double glazing and static low-emissivity glazing. Through this procedure, the potential use of chromogenic glazing systems as more efficient glazing solutions for reducing the energy demands of buildings is examined.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Αρναουτάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ επίσης όλους όσοι συνέβαλαν, με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στην ολοκλήρωση της εργασίας, είτε μέσω επιστημονικής βοήθειας είτε μέσω πρακτικής υποστήριξης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, για τη στήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη ii

Abstract iii

Ευχαριστίες iv

Περιεχόμενα v

Κατάλογος Σχημάτων viii

Κατάλογος Πινάκων xi

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή 1

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων και περιβαλλοντικές επιπτώσεις 1

1.2 Ρόλος του κτιριακού κελύφους στην ενεργειακή απόδοση 1

1.3 Ρόλος των υαλοστασίων στην ενεργειακή απόδοση 2

1.4 Έξυπνα υαλοστάσια ως τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας 2

1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας 3

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική επισκόπηση προηγμένων υαλοστασίων ..4

2.1 Αλληλεπίδραση ηλιακής ακτινοβολίας με υαλοπίνακες 4

2.2 Οπτικές και φασματικές ιδιότητες υαλοπινάκων 5

2.2.1 Διαπερατότητα (Transmittance) 6

2.2.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance) 7

2.2.3 Απορροφητικότητα (Absorptance) 7

2.3 Θερμικές ιδιότητες και ενεργειακοί δείκτες υαλοστασίων 8

2.3.1 Συντελεστής θερμοπερατότητας (U-value) 8

2.3.2 Συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών (SHGC) 10

2.3.3 Συντελεστής εκπομπής ($\boldsymbol{\varepsilon}$) 10

2.4 Κατηγορίες προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων 11

2.4.1 Ορισμός προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων 11

2.4.2 Υαλοστάσια σταθερών οπτικών ιδιοτήτων 11

2.4.3 Υαλοστάσια μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων..... 15

2.5 Υφιστάμενες μελέτες αξιολόγησης προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων 22

2.5.1 Προσεγγίσεις αξιολόγησης και βασικοί δείκτες απόδοσης..... 22

2.5.2 Υφιστάμενες αξιολογήσεις δυναμικών χρωμογενών υαλοστασίων 22

2.6 Ερευνητικό κενό και συμβολή της παρούσας εργασίας..... 24

Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία αξιολόγησης υαλοστασίων.....25

3.1 Κριτήρια συγκρότησης του συνόλου εξεταζόμενων συστημάτων..... 25

3.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από τη βιβλιογραφία 25

3.3 Συσχέτιση μηχανισμών οπτικής μετάβασης και μεταβολής φασματικής διαπερατότητας... 26

3.3.1 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας..... 27

3.3.2 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης. 32

3.3.3 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων 34

3.3.4 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής ή δομικής αναδιάταξης..... 37

3.4 Αντιστρεψιμότητα, σταθερότητα, ανθεκτικότητα και περιορισμοί λειτουργίας..... 52

3.5 Τελική επιλογή συστημάτων για υπολογιστική προσομοίωση 62

Κεφάλαιο 4ο: Υπολογιστικά εργαλεία και διαδικασία προσομοίωσης 64

4.1 Ρόλος των υπολογιστικών εργαλείων στην παρούσα εργασία..... 64

4.2 Λογισμικό Optics 64

4.3 Λογισμικό LBNL WINDOW..... 65

4.3.1 Βιβλιοθήκες του WINDOW..... 65

4.3.2 Υπολογιζόμενα μεγέθη και εξαγωγή δεδομένων από το WINDOW 67

4.4 Λογισμικό EnergyPlus 67

4.5 Συνολική διαδικασία προσομοίωσης..... 68

4.6 Παραδοχές και περιορισμοί μοντελοποίησης..... 70

Κεφάλαιο 5ο: Μελέτη περίπτωσης κτιρίου αναφοράς 72

5.1 Περιγραφή κτιρίου αναφοράς 72

5.2 Κλιματικά δεδομένα περιοχών μελέτης 73

5.3 Χαρακτηριστικά κτιριακού κελύφους..... 74

5.3.1 Αδιαφανή δομικά στοιχεία 74

5.3.2 Θερμικές ιδιότητες αδιαφανών στοιχείων 75

5.3.3 Γεωμετρία ανοιγμάτων και περιπτώσεις WWR 76

5.4 Εξεταζόμενα υαλοστάσια και σενάρια προσομοίωσης 77

5.5 Λειτουργικές συνθήκες κτιρίου και εξαγόμενα μεγέθη 77

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης και σύγκριση με αποτελέσματα βιβλιογραφίας 79

6.1 Οπτικοθερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υαλοστασίων..... 79

6.2 Ετήσια συνολική ενεργειακή κατανάλωση 80

6.3 Ετήσιες απαιτήσεις επιμέρους τελικών χρήσεων 81

6.3.1 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση..... 81

6.3.2 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη 82

6.3.3 Συγκεντρωτική αποτύπωση επιμέρους τελικών χρήσεων 83

6.4 Μηνιαία κατανομή ενεργειακών απαιτήσεων 86

6.4.1 Μηνιαία συνολική κατανάλωση ενέργειας..... 86

6.4.2 Μηνιαία κατανάλωση για θέρμανση 87

6.4.3 Μηνιαία κατανάλωση για ψύξη..... 88

6.5 Επίδραση του WWR στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση 88

6.6 Σύγκριση με αποτελέσματα βιβλιογραφίας 91

6.7 Συνολική αποτίμηση ενεργειακής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων υαλοστασίων 96

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας 98

7.1 Συμπεράσματα..... 98

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα 99

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....101

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Στατικά φασματικά επιλεκτικά και low-e συστήματα αναφοράς.....108

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Επιλογή ισοδύναμης αναπαράστασης και ενδιάμεσων θερμοκρασιακών καταστάσεων θερμοχρωμικού υαλοστασίου.....110

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Χρόνος εκτέλεσης προσομοιώσεων 117

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Η ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός υαλοπίνακα..... 5

Σχήμα 2-2 Λειτουργική αρχή υαλοστασίου χαμηλής εκπομπής. Πηγή: [17] 13

Σχήμα 2-3 Έγχρωμοι απορροφητικοί υαλοπίνακες διαφορετικών αποχρώσεων. Πηγή: [18] 14

Σχήμα 2-4 Παράδειγμα φωτοβολταϊκού υαλοστασίου σε στοιχείο σκίασης κτιρίου. Πηγή: [20]..... 15

Σχήμα 2-5 Αρχή λειτουργίας θερμοχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [21]..... 17

Σχήμα 2-6 Αρχή λειτουργίας φωτοχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [21]..... 18

Σχήμα 2-7: Βασική διάταξη και λειτουργία ηλεκτροχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [24]..... 20

Σχήμα 2-8 Αρχή λειτουργίας αεριοχρωμικού υαλοστασίου με ελεγχόμενη παροχή αερίου. Πηγή: [27] 21

Σχήμα 2-9 Μεταβολή της διαφάνειας σε υαλοστάσια αιωρούμενων σωματιδίων και υγρών κρυστάλλων. Πηγή: [24] 22

Σχήμα 3-1 Μηχανιστική ταξινόμηση των εξεταζόμενων χρωμογενών ευφυών συστημάτων υάλωσης, με βάση τον κυρίαρχο μηχανισμό που ελέγχει τη μετάβαση μεταξύ των οπτικών καταστάσεων. 27

Σχήμα 3-2 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών ηλεκτροχημικών διεργασιών που σχετίζονται με ηλεκτροχρωμικά συστήματα ιοντικής μεταφοράς μάζας. (α) Αντιπροσωπευτική ηλεκτροχρωμική διάταξη βασισμένη σε οξείδια, όπου παρουσιάζεται η συζευγμένη μεταφορά ιόντων, η ροή ηλεκτρονίων και η αντιστάθμιση φορτίου κατά τον χρωματισμό και τον αποχρωματισμό [30]. (β) Αντιπροσωπευτικοί τρόποι αποθήκευσης φορτίου σε ηλεκτροχρωμικά νανοκρυσταλλικά υμένια, με διάκριση μεταξύ χωρητικής φόρτισης, επιφανειακών οξειδοαναγωγικών διεργασιών και παρεμβολής ιόντων [29]..... 28

Σχήμα 3-3 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας ηλεκτροχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας. 30

Σχήμα 3-4 Διαγράμματα φασματικής διαπερατότητας ανά οπτική κατάσταση για τα συστήματα διπλής φασματικής ρύθμισης που βασίζονται σε μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας: (a) TiO_{2-x} [33], (b) $Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32], (c) $WO_x/CeO_x–TiO_2$ [31] και (d) polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35]..... 31

Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση του mask-inspired $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 θερμοχρωμικού υαλοστασίου από περοβσκίτη [41]. (a) Αρχή λειτουργίας της πολυστρωματικής διάταξης, όπου παρουσιάζονται η πρόσβαση υδρατμών, η προστασία από το νερό και η χρωματική μετάβαση. (b) Διαδικασία κατασκευής της τριστρωματικής δομής του συστήματος. 33

Σχήμα 3-6 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης. 34

Σχήμα 3-7 Σχηματική αναπαράσταση φωτοχρωμικών μηχανισμών μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων. (a) Φωτοχρωμισμός με βάση το WO_3 μέσω φωτοαναγωγής W^{6+}/W^{5+}, συμβολής καταστάσεων ατελειών και αντιστρεπτού αποχρωματισμού [49]. (b) Τοπικές δομικές διαμορφώσεις που σχετίζονται με κενές θέσεις στο YHO, όπου παρουσιάζονται κενές θέσεις υδριδίου και οξυγόνου που συνδέονται με τη χαλάρωση του πλέγματος [48]..... 35

Σχήμα 3-8 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων. 36

Σχήμα 3-9 Σχηματική αναπαράσταση του θερμοχρωμικού φασικού μετασχηματισμού του VO_2. Η μονοκλινής ημιαγώγιμη φάση χαμηλής θερμοκρασίας μετασχηματίζεται στη μεταλλική φάση ρουτιλίου υψηλής θερμοκρασίας [51]. 38

Σχήμα 3-10 Ταξινόμηση των θερμοχρωμικών συστημάτων με βάση το VO_2 που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού, καθώς και των κύριων υποκατηγοριών τους. 39

Σχήμα 3-11 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών συστημάτων υμενίων και διαστρωματώσεων οξειδίων με βάση το VO_2, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού. 41

Σχήμα 3-12 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών σωματιδιακών συστημάτων VO_2 σε πολυμερικό μέσο-ξενιστή, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού. 42

Σχήμα 3-13 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας μορφολογικά τροποποιημένων θερμοχρωμικών συστημάτων VO_2, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού. 43

Σχήμα 3-14 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας υβριδικού θερμοχρωμικού συστήματος με βάση το VO_2 σε επίπεδο υαλοστασίου, το οποίο διέπεται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού. 44

Σχήμα 3-15 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικού συστήματος που διέπεται από μηχανισμό αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής. 45

Σχήμα 3-16 Αντιπροσωπευτική διαδρομή μοριακής φωτοχρωμικής μετάβασης για το Spirooxazine/PMMA film, όπου παρουσιάζεται ο αντιστρεπτός μετασχηματισμός μεταξύ της άχρωμης μορφής spirooxazine (SO) και της χρωματισμένης μορφής merocyanine (MC), υπό ακτινοβόληση και επακόλουθο αποχρωματισμό [61]. 47

Σχήμα 3-17 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής αναδιάταξης. 48

Σχήμα 3-18 Αντιπροσωπευτικοί καταλυτικά υποβοηθούμενοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού. (a) Σχηματική αναπαράσταση χρωματισμού υμενίων με βάση το WO_3, ο οποίος προκαλείται από H_2 σε υμένια WO_3 με καταλύτη Pt και περιλαμβάνει διάσπαση H_2, διάχυση υδρογόνου και σχηματισμό χρωματισμένης ανηγμένης φάσης οξειδίου του βολφραμίου [25]. (b) Σχηματική αναπαράσταση αντιστρεπτής υδρογόνωσης/αφυδρογόνωσης σε στρώση μετάβασης με βάση το Mg–TiO_2 και επικάλυψη Pd, η οποία συνδέεται με διαστολή/συστολή του ενεργού υμενίου [67]. 50

Σχήμα 3-19 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας αεριοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού 51

Σχήμα 4-1 Glazing System Library στο πρόγραμμα Windows 7.7..... 66

Σχήμα 4-2 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας προσομοίωσης, από τη μοντελοποίηση των υαλοστασίων έως την εκτέλεση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στο EnergyPlus. 69

Σχήμα 5-1 Προσαρμοσμένη τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου αναφοράς Medium Office, με ενδεικτική αποτύπωση των τριών εξεταζόμενων τιμών του λόγου παραθύρων προς τοίχο (WWR 0,3, 0,6 και 0,9). 72

Σχήμα 6-1 Ετήσια συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου. 80

Σχήμα 6-2 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου ... 82

Σχήμα 6-3 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου..... 83

Σχήμα 6-4 Μηνιαία συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου. 86

Σχήμα 6-5 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου. 87

Σχήμα 6-6 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου. 88

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Σύνοψη των ηλεκτροχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας, με βάση το βασικό υλικό, το δευτερεύον συστατικό, τον ηλεκτρολύτη και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης. 29

Πίνακας 3-2 Σύνοψη του θερμοχρωμικού συστήματος περοβσκίτη που διέπεται από μηχανισμό μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης, με βάση το βασικό υλικό, τα δευτερεύοντα συστατικά και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης. 33

Πίνακας 3-3 Σύνοψη των φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων. 36

Πίνακας 3-4 Σύνοψη των θερμοχρωμικών συστημάτων με βάση το VO_2 που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και τον μηχανισμό μετάβασης. 38

Πίνακας 3-5 Σύνοψη του θερμοχρωμικού συστήματος που διέπεται από μηχανισμό αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό, τη δομή-ξενιστή και τον μηχανισμό μετάβασης. 45

Πίνακας 3-6 Σύνοψη των φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής αναδιάταξης, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και τον μηχανισμό μετάβασης. 47

Πίνακας 3-7 Σύνοψη των συστημάτων που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού, με βάση το βασικό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης. 50

Πίνακας 3-8 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων ιοντικής μεταφοράς μάζας. 57

Πίνακας 3-9 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης. 58

Πίνακας 3-10 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων.... 59

Πίνακας 3-11 *Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής ή δομικής αναδιάταξης.* 59

Πίνακας 3-12 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού με καταλυτική υποβοήθηση. 61

Πίνακας 5-1: Γεωγραφικά στοιχεία κλιματικών αρχείων 73

Πίνακας 5-2: Κλιματικοί δείκτες και θερμοκρασίες σχεδιασμού 74

Πίνακας 5-3 Κατασκευές αδιαφανών δομικών στοιχείων 75

Πίνακας 5-4 Συντελεστές θερμοπερατότητας αδιαφανών στοιχείων του κελύφους..... 75

Πίνακας 5-5 Ισοδύναμοι συντελεστές $Ueff$ για τα δάπεδα επί εδάφους 76

Πίνακας 5-6 Γεωμετρικές περιπτώσεις WWR 77

Πίνακας 5-7 Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας και αξιολόγησης του κτιριακού μοντέλου 78

Πίνακας 6-1 Οπτικοθερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υαλοστασίων 79

Πίνακας 6-2 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για το Ηράκλειο 84

Πίνακας 6-3 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για τη Μόσχα 84

Πίνακας 6-4 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για το Ριάντ 85

Πίνακας 6-5 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για το Ηράκλειο. 89

Πίνακας 6-6 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για τη Μόσχα. 90

Πίνακας 6-7 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για το Ριάντ. 90

Πίνακας 6-8 Μελέτες αξιολόγησης θερμοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές..... 92

Πίνακας 6-9 Μελέτες αξιολόγησης ηλεκτροχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές 93

Πίνακας 6-10 Μελέτες αξιολόγησης φωτοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές..... 93

Πίνακας 6-11 Μελέτες αξιολόγησης αεριοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές 94

Πίνακας 6-12 Μελέτες αξιολόγησης στατικών φασματικά επιλεκτικών και low-e υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές..... 95

Πίνακας 6-13 Συγκριτικές μελέτες αξιολόγησης ευφυών υαλοστασίων σε ελληνικά κτιριακά σενάρια 95

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η συνεχώς αυξανόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την βιώσιμη ανάπτυξη και τη διασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας. Η αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των ενεργειακών αναγκών, με τον κτιριακό τομέα να αποτελεί έναν από τους βασικότερους καταναλωτές σε διεθνές επίπεδο. Σύμφωνα με τον International Energy Agency (IEA), τα κτίρια ευθύνονται για το 30% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας παγκοσμίως, ενώ παράλληλα εκτιμάται ότι συμβάλλουν στο 26% περίπου των ενεργειακά σχετιζόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [1]. Τα παραπάνω στοιχεία αναδεικνύουν τον κρίσιμο ρόλο του κτιριακού τομέα στην επίτευξη των διεθνών και ευρωπαϊκών στόχων για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων συνδέεται κυρίως με τη λειτουργία συστημάτων εξασφάλισης συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης στους εσωτερικούς χώρους. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης αφορά τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης και αερισμού (HVAC), τα οποία επηρεάζονται από τις κλιματικές συνθήκες, τη χρήση του κτιρίου και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του. Παράλληλα, σημαντικό μέρος της κατανάλωσης αποδίδεται στον τεχνητό φωτισμό και στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, ιδιαίτερα σε κτίρια τριτογενούς τομέα με αυξημένες λειτουργικές απαιτήσεις. Η κατανομή αυτής της ενεργειακής κατανάλωσης καθιστά αναγκαία τη βελτιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων τόσο κατά το στάδιο του σχεδιασμού όσο και κατά τη λειτουργία των κτιρίων [2].

Στο πλαίσιο αυτό, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιριακού τομέα αποτελεί βασικό άξονα του σύγχρονου ενεργειακού σχεδιασμού. Η επίτευξη χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης προϋποθέτει τον περιορισμό των θερμικών απωλειών και των ανεπιθύμητων θερμικών κερδών μέσω κατάλληλων σχεδιαστικών επιλογών και τεχνολογικών λύσεων. Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, γεγονός που καθιστά το κτιριακό κέλυφος έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου.

1.2 Ρόλος του κτιριακού κελύφους στην ενεργειακή απόδοση

Το κτιριακό κέλυφος αποτελεί το φυσικό όριο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου. Απαρτίζεται από τα δομικά στοιχεία που έρχονται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, όπως οι εξωτερικοί τοίχοι, η οροφή, τα δάπεδα σε επαφή με το έδαφος και τα ανοίγματα [3]. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών επηρεάζουν άμεσα τις θερμικές απώλειες κατά τη χειμερινή περίοδο και τα θερμικά κέρδη κατά τη θερινή περίοδο, καθορίζοντας σε σημαντικό βαθμό τις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη.

Η θερμική λειτουργία του κτιριακού κελύφους βασίζεται στους βασικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή την αγωγή μέσω των δομικών στοιχείων, τη συναγωγή λόγω ανταλλαγής αέρα και την ακτινοβολία μεταξύ επιφανειών και προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η συμβολή κάθε μηχανισμού

εξαρτάται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία του κελύφους. Μεταξύ των στοιχείων του κελύφους, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαφανή δομικά στοιχεία, καθώς επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς το εσωτερικό του κτιρίου, σε αντίθεση με τα αδιαφανή στοιχεία που λειτουργούν κυρίως ως θερμικά εμπόδια. Η ιδιαιτερότητα αυτή διαφοροποιεί τη θερμοενεργειακή τους συμπεριφορά και οδηγεί στην ανάγκη ξεχωριστής μελέτης τους.

1.3 Ρόλος των υαλοστασίων στην ενεργειακή απόδοση

Τα υαλοστάσια αποτελούν το πιο ευάλωτο θερμικά στοιχείο του κτιριακού κελύφους λόγω της υψηλότερης θερμοπερατότητάς τους συγκριτικά με τα αδιαφανή δομικά στοιχεία. Μέσω αυτών πραγματοποιείται σημαντικό μέρος των θερμικών απωλειών το χειμώνα, ενώ παράλληλα επιτρέπεται η είσοδος ηλιακής ακτινοβολίας που επηρεάζει τα ψυκτικά φορτία κατά τη θερινή περίοδο. Ταυτόχρονα, τα παράθυρα επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα φυσικού φωτισμού και κατά συνέπεια τις ανάγκες ενεργειακής κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό [4].

Για τον λόγο αυτό, τα υαλοστάσια αποτελούν βασικό σημείο ενεργειακής βελτιστοποίησης των υφιστάμενων και νέων κτιρίων, καθώς η επιλογή κατάλληλων υαλοπινάκων μπορεί να μειώσει τα θερμικά φορτία και να βελτιώσει τις συνθήκες θερμικής και οπτικής άνεσης. Η ενεργειακή αναβάθμιση των παραθύρων θεωρείται μία από τις πιο άμεσες και αποδοτικές παρεμβάσεις για τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου.

1.4 Έξυπνα υαλοστάσια ως τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας

Η περιορισμένη ενεργειακή απόδοση των συμβατικών υαλοπινάκων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων υαλοστασίων που μπορούν να ελέγχουν την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο αποτελεσματικότερα. Στο πλαίσιο αυτό, τα έξυπνα υαλοστάσια (smart windows) αποτελούν υαλοπίνακες με δυνατότητα μεταβολής των οπτικών και θερμικών τους χαρακτηριστικών, είτε παθητικά, ως απόκριση στις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες, είτε ενεργητικά μέσω συστημάτων ελέγχου [5].

Ο θεμελιώδης μηχανισμός λειτουργίας των εν λόγω τεχνολογιών είναι η προσαρμογή της διαπερατότητας του υαλοπίνακα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες, με στόχο τον περιορισμό των ανεπιθύμητων θερμικών κερδών κατά τη θερινή περίοδο και την καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη χειμερινή περίοδο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα έξυπνα υαλοστάσια μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των ενεργειακών φορτίων ενός κτιρίου χωρίς να υπονομεύεται η οπτική άνεση των χρηστών.

Η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα αυτό επικεντρώνεται τόσο στην ανάπτυξη νέων υλικών όσο και στην αξιολόγηση της ενεργειακής τους συμπεριφοράς σε πραγματικές συνθήκες [6]. Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη και η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών έξυπνων υαλοστασίων αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για την αποσαφήνιση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους.

1.5 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση χρωμογενών υαλοστασίων ως τεχνολογιών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Η εργασία εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικά συστήματα υάλωσης μπορούν να επηρεάσουν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας, τα θερμικά κέρδη και τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την τεχνολογική τους κατηγορία, αλλά και τη φασματική τους συμπεριφορά, τον μηχανισμό οπτικής μετάβασης και τους βασικούς περιορισμούς λειτουργίας τους. Επιμέρους στόχοι είναι η συγκριτική αποτίμηση αντιπροσωπευτικών δυναμικών και στατικών υαλοστασίων, η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και περιορισμών τους και η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης τους ως στοιχείων του κτιριακού κελύφους για τη μείωση των ενεργειακών φορτίων και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης.

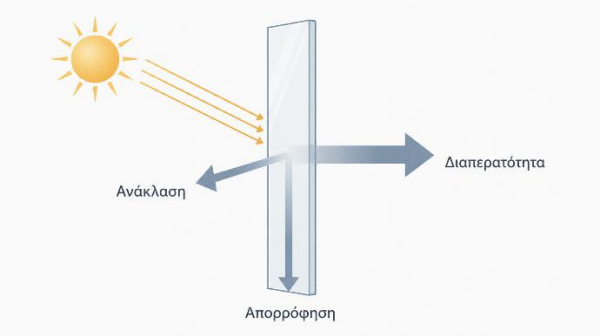
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο και βιβλιογραφική επισκόπηση προηγμένων υαλοστασίων

2.1 Αλληλεπίδραση ηλιακής ακτινοβολίας με υαλοπίνακες

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κτιριακό κέλυφος αποτελεί βασική παράμετρο της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός κτιρίου, ιδιαίτερα στην περίπτωση των αδιαφανών δομικών στοιχείων. Σε αντίθεση με τα αδιαφανή στοιχεία, οι υαλοπίνακες δεν λειτουργούν μόνο ως διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, αλλά επιτρέπουν και τη διέλευση μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας προς τον εσωτερικό χώρο. Συνεπώς, πριν εξεταστούν οι επιμέρους δείκτες αξιολόγησης των υαλοστασίων, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ο τρόπος με τον οποίο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεταδίδεται, ανακλάται ή απορροφάται από τον υαλοπίνακα. Το πρότυπο ISO 9050 χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών όπως η φωτεινή και η ηλιακή διαπερατότητα υαλοπινάκων, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν βάση για υπολογισμούς φωτισμού, θέρμανσης και αερισμού χώρων [7].

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης καλύπτει ένα εκτεταμένο φασματικό εύρος, το οποίο περιλαμβάνει την υπεριώδη, την ορατή και την εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Κάθε φασματική περιοχή συνδέεται με διαφορετική πτυχή της λειτουργίας ενός υαλοπίνακα και, κατά συνέπεια, επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την οπτική και θερμική συμπεριφορά του. Πιο συγκεκριμένα, η ορατή περιοχή σχετίζεται κυρίως με τη δυνατότητα φυσικού φωτισμού των εσωτερικών χώρων, ενώ η εγγύς υπέρυθρη περιοχή συνδέεται σημαντικά με τη μεταφορά ηλιακής θερμικής ενέργειας προς το εσωτερικό του κτιρίου. Επομένως, η συμπεριφορά ενός υαλοπίνακα δεν εξετάζεται μόνο με γνώμονα το συνολικό ποσοστό ακτινοβολίας που διέρχεται από αυτόν, αλλά και με βάση τη φασματική περιοχή στην οποία εμφανίζεται η εκάστοτε μεταβολή [8].

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα, δεν διέρχεται εξ ολοκλήρου προς το εσωτερικό περιβάλλον. Ένα μέρος της μεταδίδεται μέσω του υλικού, ένα μέρος της ανακλάται προς το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ το εναπομείναν απορροφάται από τον ίδιο τον υαλοπίνακα και κατ' επέκταση εισέρχεται έμμεσα στο κτίριο. Η κατανομή αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού, το πάχος του, τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και την πιθανή ύπαρξη επιστρώσεων ή άλλων λειτουργικών στρωμάτων. Η βασική αυτή αλληλεπίδραση παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2.1 και αποτελεί το σημείο εκκίνησης για τον ορισμό των οπτικών ιδιοτήτων που αναλύονται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 2-1 Η ανάκλαση, απορρόφηση και διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός υαλοπίνακα

Η παραπάνω κατανομή καθίσταται ιδιάζουσας σημασίας στην περίπτωση των προηγμένων ή δυναμικών υαλοστασίων. Στα συμβατικά υαλοστάσια, η κατανομή της ακτινοβολίας παραμένει ουσιαστικά προκαθορισμένη από τη σύσταση, το πάχος και τις επιστρώσεις του υαλοπίνακα, ενώ στα προηγμένα ή δυναμικά συστήματα μπορεί να τροποποιείται με πιο στοχευμένο τρόπο, είτε μέσω ειδικών επιστρώσεων είτε μέσω ενεργών ή παθητικών μηχανισμών, με σκοπό τον αποτελεσματικότερο έλεγχο της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο [9].

Συνεπώς, η μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και της βασικής αλληλεπίδρασής της με τους υαλοπίνακες αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατανόηση των ιδιοτήτων από τις οποίες καθορίζεται η ενεργειακή συμπεριφορά των υαλοστασίων. Στην ενότητα που ακολουθεί αναλύονται οι βασικές οπτικές και φασματικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, οι οποίες περιγράφουν ποσοτικά τη μετάδοση, την ανάκλαση και την απορρόφηση της ακτινοβολίας.

2.2 Οπτικές και φασματικές ιδιότητες υαλοπινάκων

Οι οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων περιγράφουν ποσοτικά την κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετά την αλληλεπίδρασή της με το υλικό. Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή αυτής της συμπεριφοράς είναι η διαπερατότητα, η ανακλαστικότητα και η απορροφητικότητα. Για κάθε μήκος κύματος, η αρχή διατήρησης της ενέργειας οδηγεί στη σχέση:

$$T(\lambda) + R(\lambda) + A(\lambda) = 1 \qquad (2.1)$$

Όπου:

Τ(λ) = η φασματική διαπερατότητα του υαλοπίνακα για μήκος κύματος λ

R(λ) = η φασματική ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα για μήκος κύματος λ

Α(λ) = η φασματική απορροφητικότητα του υαλοπίνακα για μήκος κύματος λ

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στον υαλοπίνακα είτε μεταδίδεται είτε ανακλάται είτε απορροφάται από το υλικό.

2.2.1 Διαπερατότητα (Transmittance)

Η διαπερατότητα εκφράζει το μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από τον υαλοπίνακα. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος, η φασματική διαπερατότητα μπορεί να οριστεί ως:

$$T(\lambda) = \frac{I_t(\lambda)}{I_i(\lambda)} \tag{2.2}$$

Όπου:

$I_t(\lambda)$ = η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

$I_i(\lambda)$ = η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

Η τιμή της διαπερατότητας κυμαίνεται από 0 έως 1 ή, ισοδύναμα, από 0% έως 100%. Τιμή κοντά στο 0 σημαίνει ότι η ακτινοβολία στο συγκεκριμένο μήκος κύματος πρακτικά δεν διέρχεται από τον υαλοπίνακα, ενώ τιμή κοντά στο 1 σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας μεταδίδεται.

Στους υαλοπίνακες κτηρίων, η διαπερατότητα δεν εξετάζεται μόνο σε ένα μεμονωμένο μήκος κύματος, αλλά συχνά υπολογίζεται ως ολοκληρωμένο μέγεθος για συγκεκριμένες περιοχές του φάσματος. Έτσι προκύπτουν δείκτες όπως η ορατή διαπερατότητα και η ηλιακή διαπερατότητα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υαλοπίνακα σε σχέση με τον φυσικό φωτισμό και τη διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με το EN 410:2011, τα φωτεινά και ηλιακά χαρακτηριστικά των υαλοπινάκων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για υπολογισμούς φωτισμού, θέρμανσης και ψύξης χώρων, καθώς και για τη σύγκριση διαφορετικών τύπων υαλοστασίων [10].

Η ορατή διαπερατότητα (Visible Transmittance, T_{vis}) εκφράζει το ποσοστό της ορατής ακτινοβολίας που διέρχεται από τον υαλοπίνακα. Συνδέεται άμεσα με τον φυσικό φωτισμό των εσωτερικών χώρων, καθώς υψηλότερη ορατή διαπερατότητα επιτρέπει μεγαλύτερη είσοδο φωτός. Ωστόσο, η υψηλή ορατή διαπερατότητα από μόνη της δεν αρκεί για να χαρακτηριστεί ένα υαλοστάσιο ενεργειακά αποδοτικό, καθώς πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με τη διέλευση ακτινοβολίας στις υπόλοιπες περιοχές του ηλιακού φάσματος.

Η ηλιακή διαπερατότητα (Solar Transmittance, T_{sol}) εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω του υαλοπίνακα σε ευρύτερο φασματικό εύρος. Σε αντίθεση με την ορατή διαπερατότητα, δεν περιορίζεται μόνο στην περιοχή που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι, αλλά περιλαμβάνει και τμήματα της ακτινοβολίας που συμμετέχουν στη μεταφορά ηλιακής ενέργειας. Κατά συνέπεια, δύο υαλοπίνακες με παρόμοια ορατή διαπερατότητα μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική ηλιακή διαπερατότητα, εφόσον η συμπεριφορά τους στην υπέρυθρη περιοχή διαφέρει.

2.2.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance)

Η ανακλαστικότητα εκφράζει το μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από τον υαλοπίνακα. Η ακτινοβολία αυτή δεν διέρχεται μέσα από το υλικό, αντιθέτως επιστρέφει προς την πλευρά από την οποία προσπίπτει. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος, η φασματική ανακλαστικότητα ορίζεται ως:

$$R(\lambda) = \frac{I_r(\lambda)}{I_i(\lambda)} \tag{2.3}$$

Όπου:

$I_r(\lambda)$ = η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

$I_i(\lambda)$ = η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ανακλαστικότητας, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας επιστρέφει από την επιφάνεια ή τις εσωτερικές στρώσεις του υαλοπίνακα.

Η τιμή της ανακλαστικότητας εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύσταση του γυαλιού, η γωνία πρόσπτωσης, η μορφή της επιφάνειας και η ύπαρξη επιστρώσεων. Σε απλούς υαλοπίνακες, η ανάκλαση οφείλεται κυρίως στη μετάβαση της ακτινοβολίας από τον αέρα στο γυαλί και αντίστροφα. Σε επιστρωμένους ή πολυστρωματικούς υαλοπίνακες, η ανακλαστικότητα μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά, καθώς οι στρώσεις του συστήματος δύνανται να σχεδιαστούν με στόχο την επιλεκτική ανάκλαση συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος.

Στην πράξη, η ανακλαστικότητα έχει σημασία τόσο για την ποσότητα ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο όσο και για την οπτική εικόνα του υαλοπίνακα. Υψηλή ανακλαστικότητα στην ορατή περιοχή μπορεί να επηρεάσει την εμφάνιση της όψης και την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ αυξημένη ανακλαστικότητα σε άλλες περιοχές του φάσματος μπορεί να αξιοποιηθεί για τον περιορισμό της ανεπιθύμητης ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2.3 Απορροφητικότητα (Absorptance)

Η απορροφητικότητα εκφράζει το μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από τον υαλοπίνακα. Η ακτινοβολία αυτή δεν μεταδίδεται προς την άλλη πλευρά και δεν ανακλάται προς το εξωτερικό περιβάλλον, αλλά συγκρατείται αρχικά μέσα στο υλικό. Για συγκεκριμένο μήκος κύματος, η φασματική απορροφητικότητα ορίζεται ως:

$$A(\lambda) = \frac{I_a(\lambda)}{I_i(\lambda)} \tag{2.4}$$

Όπου:

$I_a(\lambda)$ = η ένταση της απορροφούμενης ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

$I_i(\lambda)$ = η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο μήκος κύματος λ

Με βάση την ενεργειακή ισορροπία, η απορροφητικότητα μπορεί επίσης να προκύψει από τη σχέση:

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda) \tag{2.5}$$

Η απορροφούμενη ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό του υαλοπίνακα. Αυτό σημαίνει ότι η απορρόφηση δεν αποτελεί απλώς «απώλεια» της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας, αλλά επηρεάζει τη θερμική κατάσταση του ίδιου του υλικού. Στη συνέχεια, μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται στον υαλοπίνακα μπορεί να μεταφερθεί προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό περιβάλλον, ανάλογα με τις θερμοκρασιακές συνθήκες και τη διάταξη του υαλοστασίου.

Η διάκριση μεταξύ ανάκλασης και απορρόφησης είναι ιδιαίτερα σημαντική στην ερμηνεία της συμπεριφοράς ενός υαλοπίνακα. Δύο υαλοπίνακες μπορεί να εμφανίζουν παρόμοια διαπερατότητα, αλλά διαφορετική ενεργειακή συμπεριφορά, αν στον έναν η μη μεταδιδόμενη ακτινοβολία κυρίως ανακλάται, ενώ στον άλλον κυρίως απορροφάται. Συνεπώς, η απορροφητικότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μαζί με τη διαπερατότητα και την ανακλαστικότητα κατά την αξιολόγηση ενός υαλοστασίου.

2.3 Θερμικές ιδιότητες και ενεργειακοί δείκτες υαλοστασίων

Οι οπτικές ιδιότητες που αναλύθηκαν στην παραπάνω ενότητα περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο η ακτινοβολία μεταδίδεται, ανακλάται ή απορροφάται από τον υαλοπίνακα. Για την ενεργειακή αξιολόγηση ενός υαλοστασίου, όμως, κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί και η θερμική του συμπεριφορά. Η θερμική απόδοσή του δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο, αλλά και από τη θερμότητα που μεταφέρεται λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό, οι βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση των υαλοστασίων περιλαμβάνουν τον συντελεστή θερμοπερατότητας, τον ηλιακό συντελεστή θερμικών κερδών και, ιδιαίτερα στην περίπτωση επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής, την εκπεμπτικότητα.

2.3.1 Συντελεστής θερμοπερατότητας (U-value)

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U αποτελεί βασικό δείκτη για την περιγραφή της θερμομονωτικής ικανότητας ενός υαλοστασίου. Εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα μέσω του υαλοστασίου, ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Με άλλα λόγια, ο δείκτης U δείχνει πόση θερμότητα μπορεί να περάσει από $1\ m^2$ υαλοστασίου όταν η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις δύο πλευρές του είναι $1\ K$. Η μονάδα μέτρησής του είναι $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Το EN 673:2024 ορίζει τη μέθοδο υπολογισμού της θερμοπερατότητας υαλοπινάκων με επίπεδες και παράλληλες επιφάνειες, ενώ το ISO 15099:2003 καλύπτει αναλυτικούς υπολογισμούς θερμικής και οπτικής συμπεριφοράς παραθύρων, θυρών και διατάξεων σκίασης [11], [12].

Η θερμική ροή που περιγράφεται από τον συντελεστή U δεν αφορά την άμεση διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά τη θερμική ανταλλαγή που προκαλείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ

των δύο πλευρών του ανοίγματος. Για ένα υαλοστάσιο επιφάνειας A, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μπορεί να εκφραστεί προσεγγιστικά ως:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_i - T_O) \tag{2.6}$$

Όπου:

$\dot{Q}$ = ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω του υαλοστασίου $[W]$

U = ο συντελεστής θερμοπερατότητας $[W/m^2K]$

A = η επιφάνεια του υαλοστασίου $[\ m^2]$

T_i = η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου $[\ K\ ]$ ή [°C]

T_O = η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος $[\ K\ ]$ ή [°C]

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι, για την ίδια επιφάνεια και την ίδια θερμοκρασιακή διαφορά, μεγαλύτερη τιμή του U οδηγεί σε μεγαλύτερη θερμική ροή μέσω του υαλοστασίου. Αντίθετα, μικρότερη τιμή του U υποδηλώνει καλύτερη θερμομονωτική συμπεριφορά, καθώς περιορίζεται η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Συνεπώς, στα παράθυρα και στα υαλοστάσια, χαμηλότερη τιμή του συντελεστή U συνδέεται με καλύτερη θερμομονωτική συμπεριφορά, καθώς περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών του υαλοστασίου [13].

Στην περίπτωση των υαλοστασίων, η τιμή του U επηρεάζεται από τη συνολική δομή του συστήματος. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν ο αριθμός των υαλοπινάκων, το πάχος και το είδος του διακένου, το αέριο πλήρωσης, η ύπαρξη επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής και οι θερμικές αντιστάσεις στις εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες. Για παράδειγμα, ένα διπλό ή τριπλό υαλοστάσιο παρουσιάζει συνήθως χαμηλότερη θερμοπερατότητα από έναν απλό μονό υαλοπίνακα, επειδή τα διάκενα μεταξύ των φύλλων γυαλιού προσθέτουν θερμική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας. Αντίστοιχα, η χρήση αερίων χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας ή επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής μπορεί να μειώσει περαιτέρω τη θερμική ανταλλαγή.

Είναι επίσης σημαντικό να διακρίνεται η θερμοπερατότητα του ίδιου του υαλοπίνακα από τη θερμοπερατότητα ολόκληρου του παραθύρου. Η πρώτη αφορά κυρίως το κεντρικό τμήμα του υαλοστασίου, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει επιπλέον την επίδραση του πλαισίου, των αποστατών και των περιφερειακών θερμογεφυρών. Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση επικεντρώνεται στις ιδιότητες των υαλοστασίων, καθώς αυτές αποτελούν τη βασική μεταβλητή σύγκρισης μεταξύ των εξεταζόμενων τεχνολογιών.

2.3.2 Συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών (SHGC)

Ο συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών, γνωστός και ως $SHGC$, αποτελεί επίσης βασική ενεργειακή παράμετρο για την αξιολόγηση υαλοπινάκων καθώς εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο ως θερμότητα. Σύμφωνα με τον ορισμό του U.S. Department of Energy, ο $SHGC$ είναι το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται μέσω παραθύρου είτε με άμεση μετάδοση είτε αφού πρώτα απορροφηθεί και αποδοθεί ως θερμότητα προς το εσωτερικό [13].

Σε επίπεδο ευρωπαϊκής ορολογίας χρησιμοποιείται συχνά και ο συντελεστής g, ο οποίος εκφράζει τη συνολική ηλιακή ενεργειακή διαπερατότητα του υαλοστασίου. Πρακτικά, οι δυο έννοιες χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ικανότητα ενός υαλοστασίου να επιτρέπει την είσοδο ηλιακών θερμικών κερδών στο χώρο. Η τιμή τους κυμαίνεται από 0 έως 1 ή, ισοδύναμα, από 0% έως 100%. Χαμηλή τιμή του συντελεστή σημαίνει αποτελεσματικό περιορισμό των ηλιακών θερμικών κερδών, ενώ υψηλή τιμή σημαίνει ότι μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ενέργειας εισέρχεται στο κτίριο.

Η κατάλληλη τιμή του $SHGC$ ή του g εξαρτάται από το κλίμα, τον προσανατολισμό και τη χρήση του κτιρίου. Σε θερμά κλίματα ή σε χώρους με υψηλά ψυκτικά φορτία, χαμηλότερες τιμές βοηθούν στον περιορισμό της υπερθέρμανσης. Αντίθετα, σε ψυχρότερα κλίματα ή σε περιπτώσεις όπου τα ηλιακά κέρδη είναι επιθυμητά τον χειμώνα, υψηλότερες τιμές μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των θερμικών αναγκών. Επομένως, ο δείκτης αυτός δεν αξιολογείται απομονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με το κλίμα, τον προσανατολισμό και τη συνολική ενεργειακή στρατηγική του κτιρίου.

2.3.3 Συντελεστής εκπομπής (ε)

Ο συντελεστής εκπομπής ε εκφράζει την ικανότητα μιας επιφάνειας να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία σε σχέση με ένα ιδανικό μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Η τιμή της κυμαίνεται από 0 έως 1. Επιφάνειες με υψηλή εκπεμπτικότητα εκπέμπουν ευκολότερα θερμική ακτινοβολία, ενώ επιφάνειες με χαμηλή εκπεμπτικότητα περιορίζουν την ακτινοβολιακή ανταλλαγή θερμότητας. Στην περίπτωση των υαλοστασίων, ο δείκτης αυτός είναι χρήσιμος για την ερμηνεία της θερμικής συμπεριφοράς επιφανειών ή επιστρώσεων που έχουν σχεδιαστεί ώστε να μειώνουν την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας [14].

Σε αντίθεση με τη διαπερατότητα, την ανακλαστικότητα και την απορροφητικότητα, που περιγράφουν την απόκριση του υαλοπίνακα στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η εκπεμπτικότητα αναφέρεται κυρίως στη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την ίδια την επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται μαζί με τους θερμικούς δείκτες των υαλοστασίων.

2.4 Κατηγορίες προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων

Η εξέλιξη των υαλοστασίων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών που δεν περιορίζονται μόνο στη μείωση των θερμικών απωλειών, αλλά επιδιώκουν και αποτελεσματικότερο έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο κτίριο. Ο εν λόγω έλεγχος αποκτά ιδιάζουσα σημασία στην περίπτωση κτιρίων με μεγάλες γυάλινες επιφάνειες, όπου τα υαλοστάσια επηρεάζουν ταυτόχρονα τα θερμικά κέρδη, τις απαιτήσεις ψύξης και θέρμανσης, τον φυσικό φωτισμό και την οπτική άνεση. Στο πλαίσιο αυτό, τα προηγμένα και ευφυή υαλοστάσια σχεδιάζονται ώστε να συνδυάζουν θερμομονωτική προστασία, έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας και διατήρηση ικανοποιητικών συνθηκών φωτισμού στον εσωτερικό χώρο.

2.4.1 Ορισμός προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων

Ως προηγμένα υαλοστάσια μπορούν να χαρακτηριστούν τα συστήματα υαλοπινάκων που παρουσιάζουν βελτιωμένη θερμική οπτική ή φασματική συμπεριφορά σε σχέση με έναν συμβατικό υαλοπίνακα. Η βελτίωση αυτή μπορεί να επιτυγχάνεται μέσω ειδικών επιστρώσεων, πολυστρωματικών διατάξεων, αερίων διάκενου, φασματικά επιλεκτικών υλικών ή άλλων τεχνολογικών λύσεων που περιορίζουν τις θερμικές απώλειες και ελέγχουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Στο ευρύτερο αυτό πεδίο εντάσσονται και τα ευφυή ή έξυπνα υαλοστάσια, όρος που χρησιμοποιείται πιο ειδικά για τα υαλοστάσια που δύνανται να μεταβάλουν την οπτική ή/και ηλιακή τους απόκριση κατά τη λειτουργία. Η μεταβολή αυτή αφορά κυρίως τη διαπερατότητα, την απορρόφηση ή την ανάκλαση της ακτινοβολίας και μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό των ανεπιθύμητων θερμικών κερδών, στη μείωση της θάμβωσης και στη διατήρηση επαρκούς φυσικού φωτισμού. Κυρίαρχη θέση σε αυτή την κατηγορία κατέχουν τα χρωμογενή υλικά, δηλαδή υλικά των οποίων η οπτική κατάσταση μεταβάλλεται υπό την επίδραση κατάλληλου εξωτερικού ερεθίσματος. Ανάλογα με το είδος του ερεθίσματος, τα χρωμογενή υλικά διακρίνονται σε θερμοχρωμικά, φωτοχρωμικά, ηλεκτροχρωμικά και αεριοχρωμικά [9].

Τα προηγμένα υαλοστάσια, επομένως, δεν περιορίζονται στα χρωμογενή ή δυναμικά συστήματα. Στην ευρύτερη κατηγορία τους περιλαμβάνονται και στατικά υαλοστάσια υψηλής απόδοσης, όπως τα υαλοστάσια χαμηλής εκπομπής και τα φασματικά επιλεκτικά υαλοστάσια, των οποίων η απόκριση παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία. Έτσι, οι τεχνολογίες προηγμένων υαλοστασίων μπορούν να οργανωθούν σε δύο βασικές ομάδες: στα υαλοστάσια σταθερών οπτικών ιδιοτήτων και στα υαλοστάσια μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων.

2.4.2 Υαλοστάσια σταθερών οπτικών ιδιοτήτων

Τα υαλοστάσια σταθερών οπτικών ιδιοτήτων αποτελούν την πιο καθιερωμένη κατηγορία προηγμένων υαλοστασίων και βασίζονται σε μόνιμα καθορισμένη οπτική και θερμική συμπεριφορά [15], [16]. Σε αντίθεση με τα δυναμικά συστήματα, τα οποία δύνανται να μεταβάλλουν τη διαπερατότητα, την απορρόφηση ή την ανάκλασή τους κατά τη λειτουργία τους, τα στατικά υαλοστάσια παρουσιάζουν σταθερή απόκριση. Η ενεργειακή τους συμπεριφορά δεν προκύπτει από κάποιον μηχανισμό εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων, αλλά από τον αρχικό σχεδιασμό του υαλοστασίου. Αυτός

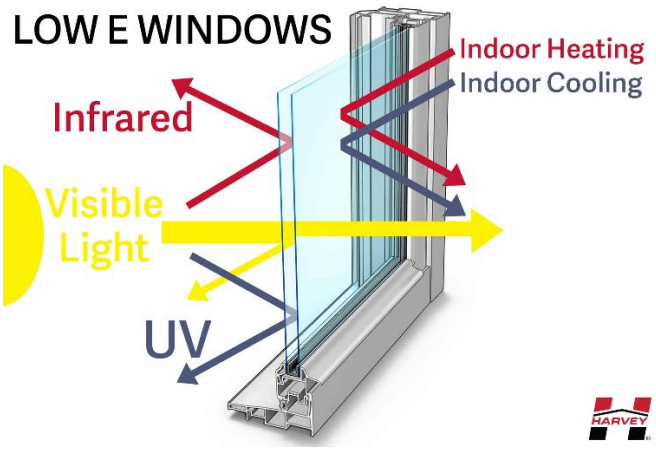
περιλαμβάνει: τη σύσταση του γυαλιού, τη γεωμετρία του υαλοστασίου, την παρουσία διάκενου ή μονωτικού υλικού και, κυρίως, τις επιστρώσεις που εφαρμόζονται στις επιφάνειες του γυαλιού. Μέσω αυτών των χαρακτηριστικών καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο το υαλοστάσιο μεταδίδει, ανακλά ή απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία, και η ικανότητά του να περιορίζει τη θερμική ανταλλαγή μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος.

Η συνεισφορά των προηγμένων στατικών υαλοστασίων είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς αποτελούν ήδη εμπορικά ώριμες λύσεις και η χρήση τους σε κτιριακές εφαρμογές είναι ευρέως διαδεδομένη [15], [16]. Παρότι δεν διαθέτουν προσαρμοστική λειτουργία, μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των θερμικών απωλειών, στον περιορισμό των ανεπιθύμητων ηλιακών κερδών και στη βελτίωση της ισορροπίας μεταξύ φυσικού φωτισμού και ψυκτικών φορτίων. Συνεπώς, συνιστούν βασικό σημείο αναφοράς στη μελέτη προηγμένων υαλοστασίων, τόσο ως αυτόνομες τεχνολογικές λύσεις όσο και ως μέτρο σύγκρισης για νεότερα δυναμικά συστήματα.

Υαλοστάσια χαμηλής εκπομπής και φασματικά επιλεκτικά υαλοστάσια

Τα υαλοστάσια χαμηλής εκπομπής, γνωστά ως low-emissivity ή low-e glazing, αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες στατικών προηγμένων υαλοστασίων. Η λειτουργία τους βασίζεται σε πολύ λεπτές επιστρώσεις στην επιφάνεια του γυαλιού, οι οποίες μειώνουν την ικανότητα του υαλοστασίου να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η θερμική ανταλλαγή μεταξύ της θερμότερης και της ψυχρότερης πλευράς του παραθύρου, γεγονός που βελτιώνει τη θερμομονωτική του συμπεριφορά και μειώνει τις θερμικές απώλειες [15]. Σε κλασικές low-e εφαρμογές, η έμφαση δίνεται κυρίως στη συγκράτηση της εσωτερικής θερμότητας κατά τη χειμερινή περίοδο, με ταυτόχρονη διατήρηση ικανοποιητικής διαπερατότητας στο ορατό φως.

Η ίδια τεχνολογική βάση μπορεί να εξελιχθεί σε φασματικά επιλεκτικά υαλοστάσια ή solar-control υαλοστάσια, με τον σχεδιασμό της επίστρωσης να επικεντρώνεται στον πιο στοχευμένο έλεγχο διαφορετικών περιοχών του ηλιακού φάσματος. Σε αυτήν την περίπτωση, ζητούμενο δεν αποτελεί μόνο η χαμηλή εκπομπή θερμότητας, αλλά ο συνδυασμός υψηλής ορατής διαπερατότητας με περιορισμένη μετάδοση της ηλιακής θερμότητας. Έτσι, τα φασματικά επιλεκτικά υαλοστάσια επιτρέπουν την είσοδο φυσικού φωτισμού, ενώ μειώνουν τη διέλευση υπεριώδους και κυρίως εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, περιορίζοντας τα ανεπιθύμητα ηλιακά κέρδη. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως πολυστρωματικές επιστρώσεις, συχνά με στρώματα μετάλλου ή οξειδίου μετάλλου, οι οποίες διαμορφώνουν επιλεκτικά τη διαπερατότητα, την ανάκλαση και την απορρόφηση του υαλοστασίου, ανάλογα με το μήκος κύματος.



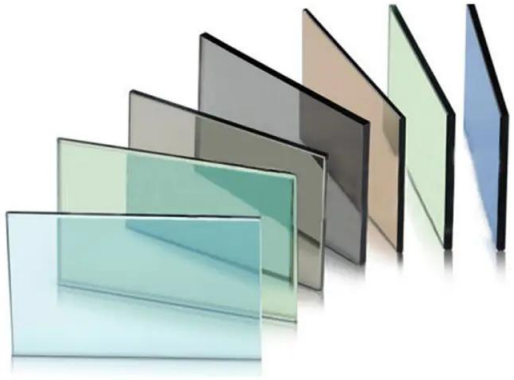
Σχήμα 2-2 Λειτουργική αρχή υαλοστασίου χαμηλής εκπομπής. Πηγή: [17]

Ανακλαστικοί, απορροφητικοί και έγχρωμοι υαλοπίνακες

Οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες αποτελούν στατική τεχνολογία ηλιακού ελέγχου, στην οποία η μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας επιτυγχάνεται κυρίως μέσω αυξημένης ανάκλασης. Η ανακλαστική συμπεριφορά οφείλεται στην εφαρμογή λεπτών επιστρώσεων στη μία επιφάνεια του υαλοπίνακα, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται από οξείδια διαφόρων μετάλλων ή μεταλλικά άλατα. Αναλόγως το είδος της επίστρωσης που επιλέγεται το γυαλί, εκτός από υψηλότερη ανακλαστικότητα, μπορεί να εμφανίζει και διαφορετικούς χρωματισμούς. Η επίδρασή τους στον περιορισμό των ηλιακών κερδών εξαρτάται από το πάχος, την ανακλαστικότητα και τη θέση της επίστρωσης μέσα στο σύστημα του παραθύρου, γι' αυτό η θερμική τους συμπεριφορά πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με τη συνολική διάταξη του υαλοστασίου και όχι μόνο ως ιδιότητα ενός μεμονωμένου υαλοπίνακα. Παράλληλα, όμως, η αυξημένη ανάκλαση μπορεί να επηρεάσει την οπτική επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον και την αισθητική της όψης. Συνεπώς, η χρήση τους συνδέεται άμεσα με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του εκάστοτε κτιρίου.

Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες διαφοροποιούνται από τους ανακλαστικούς ως προς τον τρόπο με τον οποίο περιορίζουν την ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο. Αποτελούν μια στατική τεχνολογία ηλιακού ελέγχου στην οποία σημαντικό μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας δεν ανακλάται ούτε μεταδίδεται άμεσα προς το εσωτερικό περιβάλλον, αλλά απορροφάται από τη μάζα του γυαλιού. Η απορρόφηση αυτή μειώνει την άμεση είσοδο ηλιακής ακτινοβολίας στο κτίριο, όμως ταυτόχρονα αυξάνει τη θερμοκρασία του ίδιου του υαλοπίνακα, καθώς μετατρέπεται σε θερμότητα στο εσωτερικό του [16]. Η θερμότητα που αναπτύσσεται στον υαλοπίνακα κατανέμεται στη συνέχεια προς τις δυο πλευρές του υαλοστασίου, αναλόγως τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν και την θέση του υαλοπίνακα στο σύστημα. Επομένως, η συμβολή των απορροφητικών υαλοπινάκων στον περιορισμό των ηλιακών κερδών δεν εξαρτάται μόνο από τη μείωση της άμεσης διαπερατότητας, αλλά και από το ποσοστό της απορροφούμενης θερμότητας που τελικά αποδίδεται προς τον εσωτερικό χώρο.

Στις συνηθέστερες μορφές απορροφητικών υαλοπινάκων συγκαταλέγονται οι έγχρωμοι υαλοπίνακες. Η απόχρωσή τους προκύπτει συνήθως από την προσθήκη κατάλληλων χημικών ενώσεων ή μεταλλικών οξειδίων στη μάζα του γυαλιού κατά την παραγωγή του. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να παραχθούν γκρι, πράσινοι, μπλε, χάλκινοι ή άλλοι χρωματισμοί, οι οποίοι δεν διαδραματίζουν μόνο αισθητικό ρόλο, αλλά συνδέονται και με διαφορετική φασματική απόκριση. Ανάλογα με τη σύσταση και το πάχος του υαλοπίνακα, μεταβάλλεται το ποσοστό ακτινοβολίας που μεταδίδεται ή απορροφάται σε κάθε περιοχή του φάσματος. Επομένως, η επιλογή ενός έγχρωμου υαλοπίνακα πρέπει να γίνεται με γνώμονα τη ζητούμενη ισορροπία ανάμεσα στον ηλιακό έλεγχο, τη διατήρηση φυσικού φωτισμού και τη συνολική θερμική επίδραση στο κτίριο.



Σχήμα 2-3 Έγχρωμοι απορροφητικοί υαλοπίνακες διαφορετικών αποχρώσεων. Πηγή: [18]

Λοιπές προηγμένες τεχνολογίες στατικών υαλοστασίων

Στην ευρύτερη κατηγορία των προηγμένων στατικών υαλοστασίων εντάσσονται και τεχνολογίες που δεν αποσκοπούν κατά κύριο λόγο στη φασματική επιλογή της ακτινοβολίας, αλλά στη βελτίωση της θερμομονωτικής ή λειτουργικής συμπεριφοράς του υαλοστασίου. Τα υαλοστάσια κενού αέρος (Vacuum glazing) χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό διάκενο χαμηλής πίεσης μεταξύ δύο υαλοπινάκων, ώστε να περιορίζεται η μεταφορά θερμότητας στο εσωτερικό του υαλοστασίου. Αντίστοιχα, τα υαλοστάσια με αεροτζέλ (aerogel glazing) ή διαφανή μονωτικά υλικά (TIM-Transparent Insulation Materials) αξιοποιούν υλικά πολύ χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας στη δομή του υαλοστασίου, με στόχο την αύξηση της θερμικής αντίστασης χωρίς πλήρη απώλεια της ηλιακής και ορατής διαπερατότητας. Η τελική οπτική συμπεριφορά εξαρτάται από τη μορφή του υλικού και τη διάταξη του συστήματος, καθώς διαφορετικές λύσεις μπορεί να παρουσιάζουν από σχετικά διάχυτη μετάδοση φωτός έως υψηλή διαφάνεια.

Αξιοσημείωτες είναι επίσης πιο ειδικές λύσεις όπως τα φωτοβολταϊκά υαλοστάσια (Photovoltaic glazing) και τα υαλοστάσια με υλικά αλλαγής φάσης (PCM glazing). Τα πρώτα ενσωματώνουν φωτοβολταϊκά στοιχεία στο υαλοστάσιο, ώστε μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μέρος καθορίζει τη διαπερατότητα, τον φυσικό φωτισμό και τα ηλιακά κέρδη του χώρου. Τα συστήματα αυτά εντάσσονται στο ευρύτερο πεδίο των

building-integrated photovoltaics (BIPV). Στην πλειονότητα των εφαρμογών η οπτική τους συμπεριφορά είναι σταθερή, καθώς καθορίζεται από τη διάταξη και την πυκνότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων, αν και στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί και πιο εξειδικευμένες διατάξεις φωτοβολταϊκών παραθύρων με μεταβαλλόμενη απορρόφηση ή δυναμική σκίαση [19]. Τα δεύτερα ενσωματώνουν υλικά αλλαγής φάσης στο σύστημα του παραθύρου, ώστε μέρος της εισερχόμενης θερμότητας να αποθηκεύεται προσωρινά ως λανθάνουσα θερμότητα και να αποδίδεται αργότερα, περιορίζοντας τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές και μετατοπίζοντας χρονικά τα θερμικά κέρδη.

Οι τεχνολογίες αυτές δείχνουν ότι η εξέλιξη των στατικών υαλοστασίων δεν περιορίζεται στις επιστρώσεις ελέγχου ακτινοβολίας. Αντίθετα, περιλαμβάνει και λύσεις θερμομόνωσης, προσωρινής αποθήκευσης θερμότητας, και σε ορισμένες περιπτώσεις, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, τα προηγμένα στατικά υαλοστάσια διαμορφώνουν ένα ευρύτερο τεχνολογικό πεδίο, στο οποίο η ενεργειακή απόδοση του παραθύρου μπορεί να βελτιωθεί μέσω διαφορετικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων.



Σχήμα 2-4 Παράδειγμα φωτοβολταϊκού υαλοστασίου σε στοιχείο σκίασης κτιρίου. Πηγή: [20]

2.4.3 Υαλοστάσια μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων

Τα υαλοστάσια μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων αποτελούν συστήματα στα οποία η οπτική συμπεριφορά δεν είναι σταθερή, αλλά δύναται να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε χρωμογενή υλικά, δηλαδή σε υλικά των οποίων η οπτική απόκριση μεταβάλλεται υπό την επίδραση εξωτερικού ερεθίσματος. Η μεταβολή αυτή αφορά κυρίως τη διαπερατότητα, την απορρόφηση, την ανάκλαση ή τη σκέδαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και, κατά συνέπεια, επηρεάζει την ποσότητα φωτός και ηλιακής ενέργειας που διέρχεται προς τον εσωτερικό χώρο. Εν αντιθέσει με τα στατικά προηγμένα υαλοστάσια, των οποίων η απόκριση καθορίζεται από τη μόνιμη δομή και σύνθεση του συστήματος, τα μεταβλητά υαλοστάσια μπορούν να προσαρμόζουν την οπτική τους κατάσταση ανάλογα με κάποιο εξωτερικό ερέθισμα.

Η αλλαγή αυτή μπορεί να προκαλείται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία ή από ελεγχόμενη εξωτερική διέγερση, όπως η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης ή η

έκθεση σε κατάλληλο αέριο. Με βάση το κριτήριο αυτό, τα δυναμικά υαλοστάσια διακρίνονται σε παθητικά και ενεργά συστήματα. Στα παθητικά η απόκριση του υλικού προκύπτει χωρίς άμεσο τεχνητό έλεγχο, ενώ στα ενεργά η αλλαγή της οπτικής κατάστασης μπορεί να ρυθμιστεί μέσω εξωτερικής παρέμβασης. Η διάκριση αυτή είναι ουσιαστικής σημασίας, καθώς καθορίζει τον βαθμό ελέγχου της οπτικής απόκρισης και τον τρόπο με τον οποίο το υαλοστάσιο προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Σε λειτουργικό επίπεδο, οι τεχνολογίες αυτές δεν διαφοροποιούνται μόνο ως προς το ερέθισμα που προκαλεί την απόκριση, αλλά και ως προς το είδος της οπτικής μεταβολής που εμφανίζουν. Σε ορισμένα συστήματα η μεταβολή γίνεται αντιληπτή κυρίως ως αλλαγή στη φωτεινή διαπερατότητα, ενώ σε άλλα επιδιώκεται ευρύτερος έλεγχος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής στα νεότερα δυναμικά υαλοστάσια, όπου η λειτουργία δεν περιορίζεται απαραίτητα σε μια απλή μετάβαση μεταξύ δύο οπτικών καταστάσεων, αλλά μπορεί να στοχεύει σε πιο επιλεκτική διαχείριση της εισερχόμενης ακτινοβολίας.

2.4.3.1 Παθητικά δυναμικά υαλοστάσια

Στα παθητικά δυναμικά υαλοστάσια η μεταβολή της οπτικής απόκρισης οφείλεται στο περιβαλλοντικό ερέθισμα καθαυτό και όχι σε άμεση εξωτερική εντολή ελέγχου. Οι κυριότερες κατηγορίες τους είναι τα θερμοχρωμικά και τα φωτοχρωμικά υαλοστάσια, στα οποία η απόκριση συνδέεται αντίστοιχα με την θερμοκρασία ή την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η απουσία συστήματος ενεργού ελέγχου απλοποιεί τη λειτουργία και την ενσωμάτωσή τους, καθώς η μετάβαση πραγματοποιείται χωρίς την απαίτηση ηλεκτρικής τροφοδοσίας, αισθητήρων ή χειροκίνητης ρύθμισης από τον χρήστη. Ταυτόχρονα, όμως, η απόκριση δεν μπορεί να επιβληθεί ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες, αλλά ενεργοποιείται μόνο όταν το αντίστοιχο ερέθισμα φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο. Κατά συνέπεια, βασικό ζήτημα στα παθητικά δυναμικά συστήματα είναι η χρονική σύμπτωση του ερεθίσματος που προκαλεί τη μεταβολή με τη στιγμή κατά την οποία η μεταβολή αυτή είναι πράγματι επιθυμητή για τη λειτουργία του υαλοστασίου.

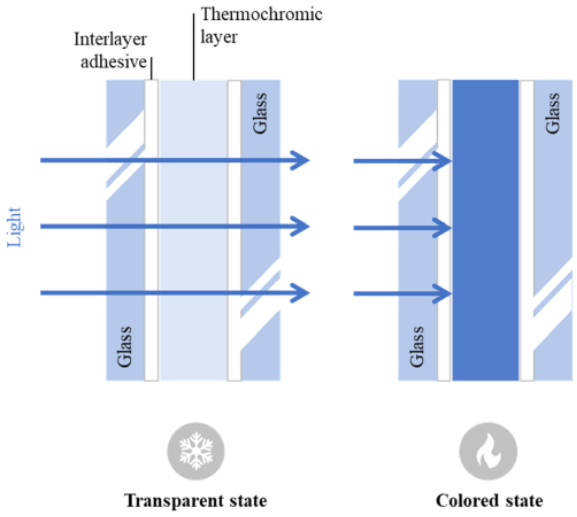
Θερμοχρωμικά υαλοστάσια (Thermochromic glazing)

Τα θερμοχρωμικά υαλοστάσια βασίζονται σε υλικά των οποίων η οπτική συμπεριφορά μεταβάλλεται όταν αλλάζει η θερμοκρασία τους. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το ενεργό υλικό βρίσκεται συνήθως σε κατάσταση υψηλότερης διαπερατότητας, ενώ όταν η θερμοκρασία του υπερβεί μία χαρακτηριστική θερμοκρασία μετάβασης (transition temperature, T_t), μεταπίπτει σε διαφορετική οπτική κατάσταση και περιορίζει μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η μετάβαση αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, αλλά και από την ακτινοβολία που απορροφάται από το ίδιο το υαλοστάσιο, καθώς η απορρόφηση αυξάνει τη θερμοκρασία του ενεργού στρώματος και μπορεί να οδηγήσει στην ενεργοποίηση της θερμοχρωμικής απόκρισης. Όταν οι θερμικές συνθήκες υποχωρήσουν, το υλικό μπορεί να επανέλθει στην αρχική του οπτική κατάσταση, εφόσον η θερμοχρωμική μεταβολή είναι αντιστρεπτή [9].

Τα συστήματα με βάση το διοξείδιο του βαναδίου (VO_2) αποτελούν την πλέον αντιπροσωπευτική οικογένεια θερμοχρωμικών υλικών. Το VO_2 είναι γνωστό για την αντιστρεπτή θερμοκρασιακά προκαλούμενη μετάβασή του, η οποία συνοδεύεται από αλλαγή της οπτικής του απόκρισης και για τον λόγο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς ως υλικό αναφοράς για θερμοχρωμικά υαλοστάσια. Σε επίπεδο

πρακτικών εφαρμογών, όμως, η θερμοχρωμική απόκριση δεν καθορίζεται μόνο από το ενεργό υλικό που επιλέγεται, η μορφή με την οποία αυτό ενσωματώνεται στο υαλοστάσιο διαδραματίζει εξίσου καθοριστικό ρόλο. Για τον παραπάνω λόγο, έχουν αναπτυχθεί απλές και τροποποιημένες VO_2 επιστρώσεις, πολυστρωματικές διατάξεις, σύνθετες μεμβράνες και laminated συστήματα, τα οποία επιδιώκουν να συνδυάσουν θερμοχρωμική απόκριση με αποδεκτή διαφάνεια και λειτουργική συμπεριφορά σε κτιριακές συνθήκες [6].

Παράλληλα, τα θερμοχρωμικά υαλοστάσια δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε συστήματα με βάση διοξείδιο του βαναδίου. Αντιθέτως παρέχουν ποικίλες προσεγγίσεις, όπως πολυμερικά, οργανικά ή υβριδικά θερμοχρωμικά υλικά, στα οποία η θερμοκρασία προκαλεί αλλαγές στην οπτική κατάσταση μέσω διαφορετικών φυσικοχημικών διεργασιών. Οι διατάξεις αυτές μπορεί να εμφανίζονται με τη μορφή επιστρώσεων, ενδιάμεσων στρωμάτων ή πολυστρωματικών συστημάτων. Συνεπώς, ο όρος θερμοχρωμικό υαλοστάσιο περικλείει μια ευρύτερη οικογένεια θερμοκρασιακά αποκρινόμενων λύσεων και όχι μια μόνο τεχνολογία υλικού μεμονωμένα.



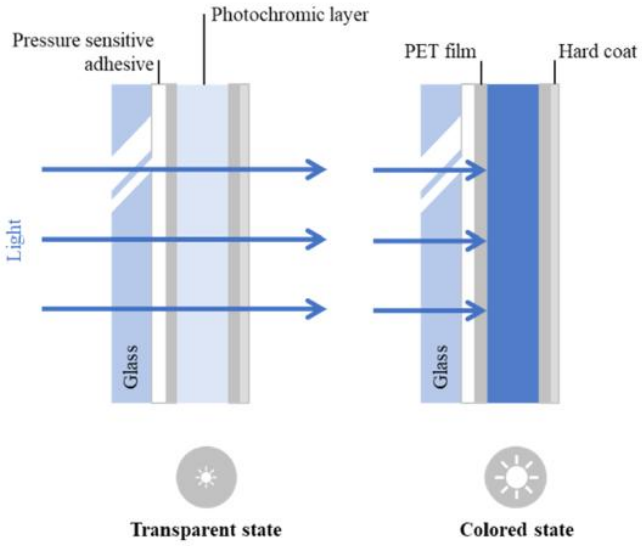
Σχήμα 2-5 Αρχή λειτουργίας θερμοχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [21]

Φωτοχρωμικά υαλοστάσια (Photochromic glazing)

Τα φωτοχρωμικά υαλοστάσια βασίζονται σε υλικά των οποίων η οπτική κατάσταση μεταβάλλεται κατά την έκθεσή τους σε κατάλληλη ακτινοβολία. Εν αντιθέσει με τα θερμοχρωμικά, όπου η μετάβαση ενεργοποιείται κυρίως από τη θερμοκρασία του ενεργού υλικού, στα φωτοχρωμικά συστήματα το ερέθισμα είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, συνήθως στην υπεριώδη ή ευρύτερα στην ηλιακή περιοχή του φάσματος. Κατά την έκθεση στο κατάλληλο φωτεινό ερέθισμα, το υλικό μεταβαίνει σε χρωματισμένη ή λιγότερο διαφανή κατάσταση, ενώ όταν η ένταση της ακτινοβολίας μειωθεί ή απομακρυνθεί, επανέρχεται στην πρότερή του κατάσταση. Η λειτουργία αυτή είναι διαδεδομένη στα πλαίσια των φωτοχρωμικών φακών, όμως η εφαρμογή της σε κτιριακά υαλοστάσια απαιτεί διαφορετική τεχνολογική προσέγγιση, διότι πρόκειται για μεγαλύτερη επιφάνεια και η απόκριση πρέπει να παραμένει σταθερή υπό επαναλαμβανόμενη ηλιακή έκθεση.

Η φωτοχρωμική απόκριση συνδέεται με αναστρεπτές μεταβολές στην εσωτερική κατάσταση του ενεργού υλικού, οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο αυτό αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία. Σε γενικό επίπεδο, η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως μετάβαση μεταξύ μιας πιο διαφανούς και μιας περισσότερο απορροφητικής ή χρωματισμένης κατάστασης. Η ακριβής φυσικοχημική προέλευση της μεταβολής διαφέρει ανάλογα με το υλικό και τη μορφή της διάταξης, γι' αυτό και στη βιβλιογραφία συναντώνται αρκετές διαφορετικές οικογένειες φωτοχρωμικών συστημάτων. Ενδεικτικά, έχουν μελετηθεί οργανικές φωτοχρωμικές ενώσεις, ανόργανα οξείδια, υβριδικά υλικά, μεμβράνες και πολυστρωματικές διατάξεις, στις οποίες η φωτοχρωμική λειτουργία ενσωματώνεται είτε ως επίστρωση είτε ως ενεργό ενδιάμεσο στρώμα στο υαλοστάσιο [16].

Σε κτιριακές εφαρμογές, κατά τον χρωματισμό του ενεργού υλικού, το υαλοστάσιο επιτρέπει μικρότερο ποσοστό ακτινοβολίας να διέλθει προς τον εσωτερικό χώρο, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της υπερβολικής φωτεινότητας και της θάμβωσης. Όταν το φωτεινό ερέθισμα μειώνεται, η επαναφορά προς πιο διαφανή κατάσταση ευνοεί την είσοδο φυσικού φωτός. Ωστόσο, η λειτουργική τους συμπεριφορά εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως το φασματικό εύρος της απόκρισης, η ταχύτητα χρωματισμού και αποχρωματισμού, η επαναληψιμότητα της μετάβασης και ο τρόπος ενσωμάτωσης του φωτοχρωμικού υλικού στο υαλοστάσιο. Επομένως, όπως και στα θερμοχρωμικά, ο όρος φωτοχρωμικό υαλοστάσιο περιγράφει μια ευρύτερη τεχνολογική κατηγορία και όχι μία μοναδική υλική λύση.



Σχήμα 2-6 Αρχή λειτουργίας φωτοχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [21]

2.4.3.2 Ενεργά δυναμικά υαλοστάσια

Τα ενεργά δυναμικά υαλοστάσια περιλαμβάνουν συστήματα στα οποία η μεταβολή της οπτικής κατάστασης δεν προκύπτει αποκλειστικά από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά ενεργοποιείται μέσω ελεγχόμενου εξωτερικού ερεθίσματος. Στη βιβλιογραφία, στις βασικές ενεργές τεχνολογίες ευφυών υαλοστασίων εντάσσονται κυρίως τα ηλεκτροχρωμικά, τα αεριοχρωμικά, τα υαλοστάσια αιωρούμενων σωματιδίων και τα συστήματα υγρών κρυστάλλων [22]. Η κοινή αρχή

λειτουργίας τους είναι ότι το υαλοστάσιο δεν έχει μια μόνιμη οπτική συμπεριφορά, αλλά μπορεί να μεταβαίνει μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων διαφάνειας ή χρωματισμού με μεγαλύτερο βαθμό ελέγχου, ανάλογα με τις απαιτήσεις φωτισμού, θερμικής προστασίας ή οπτικής άνεσης του χώρου. Με τον τρόπο αυτό, η λειτουργία του υαλοστασίου δεν εξαρτάται μόνο από τη χρονική σύμπτωση ενός εξωτερικού ερεθίσματος με τις ανάγκες του κτιρίου, αλλά μπορεί να προσαρμόζεται πιο στοχευμένα στις συνθήκες λειτουργίας. Ταυτόχρονα, η δυνατότητα αυτή συνοδεύεται από αυξημένη τεχνολογική πολυπλοκότητα, καθώς απαιτείται κατάλληλη διάταξη ενεργοποίησης, έλεγχος της μετάβασης και, στις περισσότερες περιπτώσεις, πρόσθετη υποδομή σε σχέση με τα παθητικά δυναμικά συστήματα.

Ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια (Electrochromic glazing)

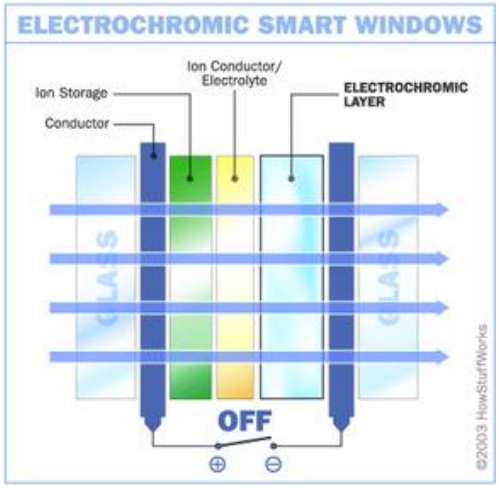
Τα ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια αποτελούν τη χαρακτηριστικότερη κατηγορία ενεργών δυναμικών υαλοστασίων, καθώς η μετάβαση της οπτικής τους κατάστασης πραγματοποιείται με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης. Η διέγερση αυτή προκαλεί αντιστρεπτή ηλεκτροχημική μεταβολή στο ενεργό στρώμα του συστήματος, με αποτέλεσμα το υαλοστάσιο να μπορεί να μεταβαίνει από μία περισσότερο διαυγή κατάσταση σε μία πιο χρωματισμένη ή σκουρόχρωμη κατάσταση. Η παραπάνω μεταβολή δεν περιορίζεται μόνο στην αισθητική εμφάνιση του υαλοπίνακα, αλλά συνδέεται με τη ρύθμιση της διαπερατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή με τον έλεγχο του φυσικού φωτισμού και της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας.

Η βασική μορφή των ηλεκτροχρωμικών υαλοστασίων βασίζεται σε πολυστρωματική διάταξη, στην οποία το ενεργό ηλεκτροχρωμικό υλικό συνδυάζεται με αγώγιμα και βοηθητικά στρώματα, ώστε η εφαρμογή δυναμικού να οδηγεί σε ελεγχόμενη μεταβολή της οπτικής κατάστασης. Ωστόσο, η κατηγορία αυτή δεν περιορίζεται σε μία μόνο τεχνολογική μορφή. Στη βιβλιογραφία συναντώνται συμβατικά ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια, όπου η μετάβαση αφορά κυρίως τη συνολική μείωση της διαπερατότητας, καθώς και πιο σύνθετες διατάξεις, όπως ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια διπλής φασματικής ρύθμισης (dual-band electrochromic glazing), συμπληρωματικά ηλεκτροχρωμικά συστήματα (complementary electrochromic systems), πολυμερικά ή οργανικά ηλεκτροχρωμικά συστήματα και νανοδομημένες ή πλασμονικές αρχιτεκτονικές [23]. Η πληθώρα αυτή δείχνει ότι τα ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια αποτελούν μια ευρύτερη οικογένεια ενεργών συστημάτων, με κοινό χαρακτηριστικό την απόκριση στο ερέθισμα της ηλεκτρικής τάσης, αλλά με σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τα υλικά, τη δομή και το εύρος της φασματικής ρύθμισης.

Σε κτιριακές εφαρμογές, η εναλλαγή μεταξύ καταστάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ελεγχόμενο τρόπο, ανεξάρτητα από την άμεση χρονική σύμπτωση ενός περιβαλλοντικού ερεθίσματος με τις ανάγκες του χώρου. Συνεπώς, το υαλοστάσιο δύναται να λειτουργεί ως ενεργό στοιχείο του κελύφους, προσαρμόζοντας τη διαφάνειά του ανάλογα με τις απαιτήσεις φωτισμού, ηλιακής προστασίας και οπτικής άνεσης. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί την ειδοποιό διαφορά των ηλεκτροχρωμικών συστημάτων από τα παθητικά δυναμικά υαλοστάσια, στα οποία η μετάβαση εξαρτάται άμεσα από την εξωτερική θερμοκρασία ή την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η ενεργή λειτουργία τους ωστόσο δεν στερείται μειονεκτημάτων, καθώς συνοδεύεται από μεγαλύτερη τεχνική συνθετότητα λόγω των απαιτήσεων σε ηλεκτρική τροφοδοσία, κατάλληλη διασύνδεση με το σύστημα ελέγχου και επιλογή στρατηγικής ενεργοποίησης. Επομένως, τα ηλεκτροχρωμικά υαλοστάσια

αντιμετωπίζονται ως τεχνολογία υψηλότερου ελέγχου αλλά και μεγαλύτερης ενσωμάτωσης στο κτιριακό σύστημα, σε σχέση με λύσεις που μεταβάλλονται αποκλειστικά λόγω των εξωτερικών συνθηκών.



Σχήμα 2-7: Βασική διάταξη και λειτουργία ηλεκτροχρωμικού υαλοστασίου. Πηγή: [24]

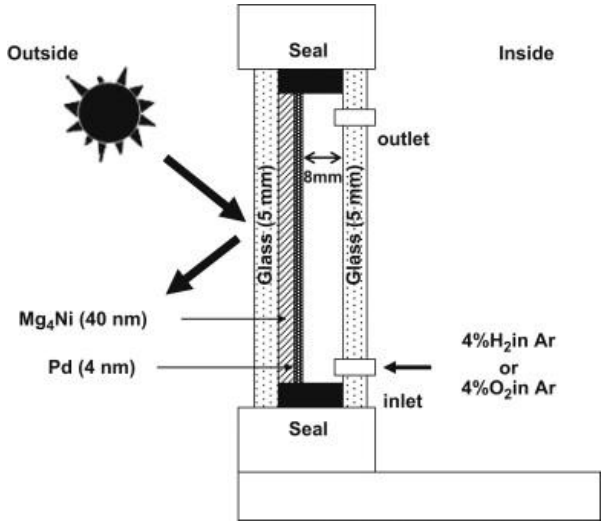
Αεριοχρωμικά υαλοστάσια (Gasochromic glazing)

Στα αεριοχρωμικά υαλοστάσια, ο έλεγχος της οπτικής κατάστασης πραγματοποιείται μέσω της σύστασης του αέριου περιβάλλοντος που έρχεται σε επαφή με το λειτουργικό στρώμα του υαλοστασίου. Αντί για ηλεκτρική ενεργοποίηση, όπως στα ηλεκτροχρωμικά, η μετάβαση μεταξύ των οπτικών καταστάσεων προκαλείται από την ελεγχόμενη εισαγωγή αερίων, κυρίως υδρογόνου και οξυγόνου, τα οποία οδηγούν σε χρωματισμό ή αποχρωματισμό του συστήματος. Η χαρακτηριστικότερη μορφή της τεχνολογίας βασίζεται σε λεπτά στρώματα τριοξειδίου του βολφραμίου (WO_3) με καταλυτική επίστρωση, όπου η εισαγωγή αραιωμένου υδρογόνου οδηγεί σε χρωματισμό και η επακόλουθη έκθεση σε οξυγόνο επιτρέπει την επαναφορά προς τη διαυγή κατάσταση [25].

Πέραν των καθιερωμένων διατάξεων με βάση το WO_3, στα αεριοχρωμικά συστήματα εντάσσονται και υλικά που λειτουργούν με μεταβολή της ανακλαστικής τους συμπεριφοράς. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν οι αεριοχρωμικοί ανακλαστικοί υαλοπίνακες ή μεταβαλλόμενοι καθρέπτες (gasochromic switchable mirrors), οι οποίοι βασίζονται κυρίως σε μεταλλοϋδριδικά στρώματα με βάση κράματα μαγνησίου. Σε αυτά τα συστήματα, η αέρια διέγερση δεν οδηγεί απλώς σε χρωματισμό ενός διαφανούς υλικού, αλλά σε μετάβαση ανάμεσα σε περισσότερο ανακλαστική και περισσότερο διαπερατή κατάσταση [26]. Έτσι, η κατηγορία των αεριοχρωμικών καλύπτει δύο βασικές λογικές οπτικού ελέγχου: τον χρωματισμό οξειδικών στρωμάτων και τη μεταβολή ανακλαστικότητας μεταλλοϋδριδικών διατάξεων.

Η χρήση αέριου μέσου ως στοιχείου ενεργοποίησης διαφοροποιεί τα αεριοχρωμικά υαλοστάσια από τα ηλεκτρικά ελεγχόμενα ενεργά συστήματα. Η λειτουργία τους δεν εξαρτάται μόνο από τις οπτικές ιδιότητες των επιμέρους καταστάσεων, αλλά και από την ανάγκη ελεγχόμενης παροχής και διαχείρισης

του αερίου στο κτιριακό κέλυφος. Για τον λόγο αυτό, η τεχνολογία συνοδεύεται από αυξημένες απαιτήσεις ενσωμάτωσης σε σχέση με συστήματα που ενεργοποιούνται αποκλειστικά μέσω ηλεκτρικού σήματος.

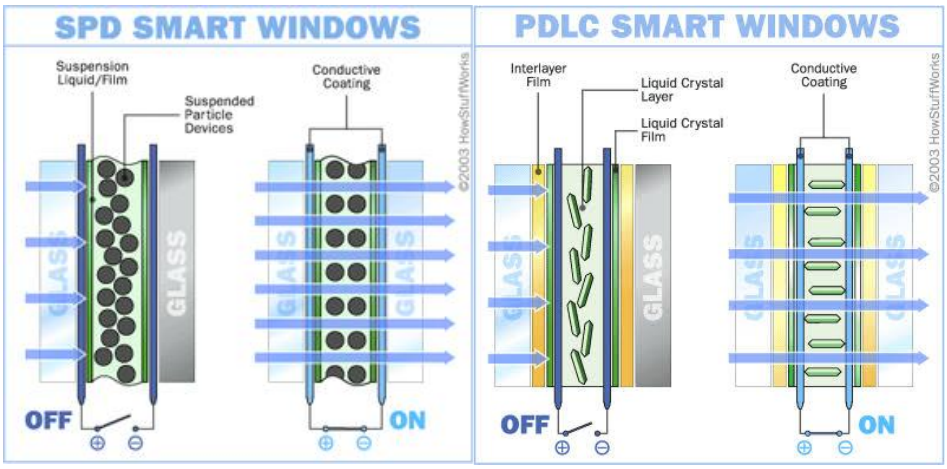


Σχήμα 2-8 Αρχή λειτουργίας αεριοχρωμικού υαλοστασίου με ελεγχόμενη παροχή αερίου. Πηγή: [27]

Υαλοστάσια αιωρούμενων σωματιδίων και υγρών κρυστάλλων (SPD / PDLC)

Στις ενεργές δυναμικές τεχνολογίες περιλαμβάνονται επίσης τα υαλοστάσια αιωρούμενων σωματιδίων (Suspended Particle Devices, SPD) και οι διατάξεις υγρών κρυστάλλων, με συνηθέστερη μορφή τα συστήματα πολυμερικά διασπαρμένων υγρών κρυστάλλων (Polymer-Dispersed Liquid Crystal, PDLC). Η λειτουργία τους διαφοροποιείται από τα χρωμογενή υαλοστάσια, καθώς η μεταβολή της οπτικής κατάστασης δεν βασίζεται κυρίως σε χρωματισμό του ενεργού υλικού, αλλά στην ηλεκτρικά ελεγχόμενη διάταξη σωματιδίων ή μορίων μέσα σε κατάλληλο ενδιάμεσο μέσο. Στα SPD, τα αιωρούμενα σωματίδια μεταβάλλουν τον προσανατολισμό τους υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, οδηγώντας σε αλλαγή του βαθμού διαπερατότητας. Στα PDLC, αντίστοιχα, τα σταγονίδια υγρών κρυστάλλων που βρίσκονται μέσα σε πολυμερική μήτρα προκαλούν σκέδαση όταν είναι άτακτα προσανατολισμένα, ενώ με την εφαρμογή τάσης η διάταξη γίνεται περισσότερο διαφανής [22].

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν κυρίως ενδιαφέρον ως συστήματα ελέγχου διαφάνειας, θάμβωσης και οπτικής ιδιωτικότητας. Τα SPD συνδέονται περισσότερο με ρύθμιση της φωτεινότητας και του βαθμού σκίασης, ενώ τα PDLC χρησιμοποιούνται συχνότερα για μετάβαση μεταξύ διαφανούς και γαλακτώδους/ημιδιαφανούς κατάστασης. Επομένως, παρότι ανήκουν στα ενεργά δυναμικά υαλοστάσια, η λειτουργική τους λογική διαφέρει από εκείνη των ηλεκτροχρωμικών και αεριοχρωμικών συστημάτων, όπου η οπτική μεταβολή συνδέεται με χρωμογενή ή ηλεκτροχημική απόκριση του υλικού.



Σχήμα 2-9 Μεταβολή της διαφάνειας σε υαλοστάσια αιωρούμενων σωματιδίων και υγρών κρυστάλλων. Πηγή: [24]

2.5 Υφιστάμενες μελέτες αξιολόγησης προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων

2.5.1 Προσεγγίσεις αξιολόγησης και βασικοί δείκτες απόδοσης

Οι υφιστάμενες μελέτες αξιολόγησης προηγμένων και ευφυών υαλοστασίων ακολουθούν διαφορετικές προσεγγίσεις, ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης της εξεταζόμενης τεχνολογίας και τον σκοπό της εκάστοτε εργασίας. Σε αρκετές περιπτώσεις, η αξιολόγηση ξεκινά από τον πειραματικό χαρακτηρισμό των οπτικών και θερμικών ιδιοτήτων του υλικού ή του υαλοπίνακα, μέσω μετρήσεων φασματικής διαπερατότητας, ανακλαστικότητας, ηλιακής διαπερατότητας και θερμικής συμπεριφοράς. Άλλες μελέτες βασίζονται σε δοκιμές μικρής κλίμακας, όπως θάλαμοι ή πρότυποι χώροι, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης του υαλοστασίου στη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου, στη μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας και στις συνθήκες φωτισμού. Παράλληλα, μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας χρησιμοποιεί υπολογιστικές προσομοιώσεις, στις οποίες οι ιδιότητες των υαλοστασίων εισάγονται σε εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης κτιρίων, ώστε να εκτιμηθεί η επίδρασή τους σε ετήσια ή εποχιακή βάση [6], [21].

Στις μελέτες αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως δείκτες που περιγράφουν τόσο το ίδιο το υαλοστάσιο όσο και την επίδρασή του στη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Σε επίπεδο υαλοπίνακα, οι βασικότεροι δείκτες είναι η ορατή διαπερατότητα, η ηλιακή διαπερατότητα, ο συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών και ο συντελεστής θερμοπερατότητας. Σε επίπεδο κτιρίου, η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως στη μεταβολή των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, στη συνολική κατανάλωση HVAC, στην κατανάλωση φωτισμού και, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε δείκτες οπτικής ή θερμικής άνεσης. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στις παραμέτρους του κτιριακού σεναρίου, όπως το κλίμα, ο προσανατολισμός, ο λόγος παραθύρου προς τοίχο, ο τύπος του κτιρίου και η στρατηγική ελέγχου, όπου αυτή εφαρμόζεται. Η ύπαρξη αυτών των διαφορετικών παραμέτρων καθιστά τις προηγούμενες αξιολογήσεις χρήσιμες για την κατανόηση των γενικών τάσεων, αλλά όχι πάντα άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ τους [21].

2.5.2 Υφιστάμενες αξιολογήσεις δυναμικών χρωμογενών υαλοστασίων

Με βάση τις μελέτες που συνοψίζονται στους Πίνακας 6-8–Πίνακας 6-13, η βιβλιογραφική αξιολόγηση των δυναμικών χρωμογενών και προηγμένων υαλοστασίων δείχνει ότι η απόδοσή τους δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του ίδιου του υαλοπίνακα, αλλά και από το κτιριακό και κλιματικό πλαίσιο στο οποίο εφαρμόζονται. Οι μελέτες αυτές καλύπτουν διαφορετικές τεχνολογίες, κλιματικές περιοχές, κτιριακά μοντέλα και εργαλεία προσομοίωσης, ενώ χρησιμοποιούν ποικίλους δείκτες ενεργειακής ή οπτικής απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, αποτελούν βάση αναφοράς για τις παραμέτρους που λαμβάνονται συνήθως υπόψη σε τέτοιου είδους αξιολογήσεις, όπως το κλίμα, ο προσανατολισμός, ο λόγος παραθύρου προς τοίχο, το εργαλείο προσομοίωσης και τα μεγέθη απόδοσης.

Από τη συγκεντρωτική καταγραφή των μελετών προκύπτει ότι οι περισσότερες αξιολογήσεις βασίζονται σε κτίρια ή χώρους γραφείων, ενώ δευτερευόντως εξετάζονται κατοικίες και πολυκατοικίες. Η εστίαση σε κτίρια γραφειακής χρήσης δικαιολογείται από την ταυτόχρονη επιρροή των υαλοστασίων, σε αυτές τις εφαρμογές, στα ηλιακά κέρδη, τα ψυκτικά φορτία, τον φυσικό φωτισμό και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την οπτική άνεση. Παράλληλα, το κλιματικό πλαίσιο εμφανίζεται καθοριστικό, καθώς η ίδια μεταβολή στις οπτικές ή θερμικές ιδιότητες ενός υαλοστασίου μπορεί να έχει διαφορετική επίδραση σε θερμά, ψυχρά ή μικτά κλίματα. Για τον λόγο αυτό, αρκετές μελέτες εξετάζουν περισσότερες από μία τοποθεσίες ή κλιματικές ζώνες, ώστε να αποτιμηθεί η μεταβολή της απόδοσης υπό διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης ο λόγος επιφάνειας υάλωσης προς επιφάνειας τοιχοποιίας (WWR, window to wall ratio), ο οποίος εμφανίζεται είτε ως σταθερή παράμετρος είτε ως μεταβλητή παραμετρικής διερεύνησης. Η αύξηση της γυάλινης επιφάνειας ενισχύει τον ρόλο του υαλοστασίου στη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου, καθώς αυξάνονται τόσο τα ηλιακά κέρδη όσο και οι θερμικές ανταλλαγές μέσω του κελύφους [28]. Ωστόσο, από τις διαθέσιμες μελέτες δεν προκύπτει μία ενιαία βέλτιστη τιμή WWR για όλες τις περιπτώσεις. Σε αρκετά σενάρια οι μεσαίες τιμές εμφανίζονται πιο ισορροπημένες, ενώ πολύ υψηλές τιμές μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων, ανάλογα με το κλίμα, τον προσανατολισμό, τον τύπο υαλοστασίου και τους δείκτες που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση.

Σε επίπεδο τεχνολογικών οικογενειών, οι θερμοχρωμικές και ηλεκτροχρωμικές λύσεις εμφανίζονται συχνότερα σε κτιριακές αξιολογήσεις, ενώ οι φωτοχρωμικές και αεριοχρωμικές εφαρμογές παρουσιάζονται σε μικρότερο αριθμό μελετών ή σε πιο ειδικά σενάρια. Παράλληλα, στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται συχνά και στατικά φασματικά επιλεκτικά ή low-e υαλοστάσια ως σημεία αναφοράς, επειδή αποτελούν ώριμες λύσεις ηλιακού ελέγχου και θερμικής βελτίωσης του κελύφους. Στο πλαίσιο αυτό, η παρουσία τους στην παρούσα βιβλιογραφική αποτύπωση έχει κυρίως συγκριτικό χαρακτήρα και δεν μετατοπίζει το επίκεντρο από τα χρωμογενή υαλοστάσια.

Η παραπάνω βιβλιογραφική εικόνα είναι σημαντική για την παρούσα εργασία, διότι τεκμηριώνει την ανάγκη αξιολόγησης των υαλοστασίων σε επίπεδο κτιρίου και όχι μόνο με βάση τις ιδιότητες του υλικού. Παράλληλα, δικαιολογεί την επιλογή βασικών παραμέτρων της μεθοδολογίας, όπως η χρήση κτιρίου γραφειακής αναφοράς, η εξέταση διαφορετικών κλιματικών συνθηκών, η διερεύνηση διαφορετικών τιμών WWR και η σύγκριση δυναμικών χρωμογενών υαλοστασίων με στατικές φασματικά επιλεκτικές λύσεις. Η αναλυτική σύγκριση των βιβλιογραφικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 6ο:, όπου οι αντίστοιχες μελέτες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους Πίνακας 6-8–Πίνακας 6-13.

2.6 Ερευνητικό κενό και συμβολή της παρούσας εργασίας

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι τα προηγμένα και χρωμογενή υαλοστάσια έχουν ήδη αξιολογηθεί σε αρκετές μελέτες προσομοίωσης, κυρίως ως προς την επίδρασή τους στα φορτία θέρμανσης και ψύξης, στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, στον φωτισμό ή στην οπτική άνεση. Οι μελέτες αυτές παρέχουν σημαντικά αποτελέσματα για συγκεκριμένα συστήματα, τεχνολογικές λύσεις ή κτιριακές εφαρμογές. Ωστόσο, η μεταξύ τους σύγκριση δεν είναι πάντοτε άμεση, καθώς κάθε εργασία εξετάζει διαφορετικό τύπο υαλοστασίου, διαφορετικό κτιριακό και κλιματικό πλαίσιο και διαφορετικούς δείκτες απόδοσης. Παράλληλα, η τεχνολογική κατηγορία ενός υαλοστασίου, όπως θερμοχρωμικό, φωτοχρωμικό, ηλεκτροχρωμικό ή αεριοχρωμικό, δεν αρκεί από μόνη της για να εξηγήσει τη φασματική του συμπεριφορά ή τους περιορισμούς λειτουργίας του. Το ερευνητικό κενό, επομένως, δεν αφορά την απουσία κτιριακών αξιολογήσεων, αλλά την ανάγκη για μια πιο συνεκτική βάση σύγκρισης, η οποία να συνδέει τον μηχανισμό οπτικής μετάβασης, τη φασματική απόκριση και την πρακτική καταλληλότητα των συστημάτων πριν από την ενεργειακή τους αξιολόγηση.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει σε αυτή την κατεύθυνση, διαμορφώνοντας ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης που συνδυάζει τη βιβλιογραφική καταγραφή, τη μηχανιστική ταξινόμηση και τη φασματική σύγκριση των εξεταζόμενων υαλοστασίων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, τα χρωμογενή συστήματα δεν αντιμετωπίζονται μόνο ως γενικές τεχνολογικές κατηγορίες, αλλά εξετάζονται με βάση τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η οπτική τους κατάσταση, το φασματικό εύρος της μεταβολής και τους βασικούς περιορισμούς αντιστρεψιμότητας, σταθερότητας και εφαρμογής. Το πλαίσιο αυτό χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την επιλογή αντιπροσωπευτικών υαλοστασίων και την υπολογιστική διερεύνησή τους σε κοινό μοντέλο γραφειακού κτιρίου, υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και τιμές WWR, με συμβατικό διπλό υαλοστάσιο και στατικό φασματικά επιλεκτικό υαλοστάσιο χαμηλής εκπομπής (low-e) ως βάση σύγκρισης. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία συνδέει τη φασματική και μηχανιστική αξιολόγηση με την τελική ενεργειακή απόδοση σε επίπεδο κτιρίου, χωρίς να περιορίζεται σε απλή σύγκριση μεμονωμένων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 3ο: Μεθοδολογία αξιολόγησης υαλοστασίων

3.1 Κριτήρια συγκρότησης του συνόλου εξεταζόμενων συστημάτων

Η επιλογή των συστημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με στόχο τη συγκρότηση ενός βιβλιογραφικού συνόλου κατάλληλου για φασματική σύγκριση και υπολογιστική αξιολόγηση. Το κύριο αντικείμενο της ανάλυσης είναι τα χρωμογενή υαλοστάσια, για τα οποία βασικό κριτήριο ένταξης αποτέλεσε η ύπαρξη μεταβαλλόμενης οπτικής συμπεριφοράς. Για τα συστήματα αυτά απαιτήθηκε η παρουσία δύο ή περισσότερων σαφώς καθορισμένων καταστάσεων λειτουργίας του ίδιου συστήματος, ώστε να μπορεί να εξεταστεί η διαφοροποίηση της φασματικής διαπερατότητας μεταξύ των καταστάσεων αυτών. Το κριτήριο αυτό είναι απαραίτητο για τα χρωμογενή υαλοστάσια, καθώς η αξιολόγησή τους δεν αφορά μόνο την οπτική συμπεριφορά κάθε επιμέρους κατάστασης, αλλά και το μέγεθος της μεταβολής που επιτυγχάνεται κατά τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη.

Παράλληλα με τα χρωμογενή συστήματα, στο σύνολο διατηρήθηκαν και ορισμένα στατικά φασματικά επιλεκτικά ή low-e υαλοστάσια. Τα εν λόγω συστήματα δεν εμφανίζουν μετάβαση μεταξύ διαφορετικών οπτικών καταστάσεων και, επομένως, δεν αξιολογούνται με βάση το εύρος μεταβολής της φασματικής τους απόκρισης. Η ένταξή τους εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό, καθώς παρέχουν μία σταθερή συγκριτική βάση απέναντι στην οποία μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά των δυναμικών τεχνολογιών. Ως εκ τούτου, εξετάζονται διακριτά από τα χρωμογενή συστήματα και διατηρούνται στο σύνολο δεδομένων ως συστήματα αναφοράς. Η αναλυτική καταγραφή των στατικών συστημάτων που εξετάστηκαν ως πιθανές λύσεις αναφοράς παρουσιάζεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Θεμελιώδη προϋπόθεση για όλα τα συστήματα αποτέλεσε η διαθεσιμότητα φασματικών δεδομένων διαπερατότητας. Προτεραιότητα δόθηκε σε μελέτες που παρείχαν καμπύλες ή αριθμητικά δεδομένα σε ευρύ φασματικό εύρος, κατά προτίμηση έως την εγγύς υπέρυθρη περιοχή, καθώς η αξιολόγηση ενός υαλοστασίου δεν μπορεί να στηριχθεί επαρκώς μόνο σε μια συνολική τιμή διαπερατότητας. Η φασματική πληροφορία επιτρέπει να αποτυπωθεί αν η διαφοροποίηση της απόκρισης εντοπίζεται κυρίως στην ορατή περιοχή ή στην περιοχή της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, γεγονός που είναι κρίσιμο για τη σύνδεση της οπτικής συμπεριφοράς με τη δυνατότητα ελέγχου φωτισμού και ηλιακών θερμικών κερδών.

Τέλος, τα συστήματα που συμπεριλήφθηκαν έπρεπε να παρουσιάζουν σαφή τεχνική συνάφεια με εφαρμογές υαλοστασίων. Η απαίτηση αυτή δεν περιορίζει το σύνολο δεδομένων μόνο σε πλήρεις εμπορικές μονάδες παραθύρων, καθώς μεγάλο μέρος της σχετικής βιβλιογραφίας αφορά επιστρώσεις, films, πολυστρωματικές διατάξεις ή εργαστηριακά πρωτότυπα. Ωστόσο, κάθε περίπτωση έπρεπε να διαθέτει επαρκή σύνδεση με διαφανή στοιχεία κτιριακού κελύφους και να παρέχει δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν σε συγκριτική ανάλυση. Με αυτόν τον τρόπο, το τελικό σύνολο δεν διαμορφώνεται ως απλή βιβλιογραφική καταγραφή, αλλά ως οργανωμένη βάση συστημάτων για την αξιολόγηση της φασματικής και ενεργειακής τους συμπεριφοράς.

3.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από τη βιβλιογραφία

Έπειτα από τον καθορισμό των κριτηρίων επιλογής, τα συστήματα που πληρούσαν τις παραπάνω προϋποθέσεις οργανώθηκαν σε κοινή βάση καταγραφής. Για κάθε βιβλιογραφική πηγή

καταχωρίστηκαν τα βασικά στοιχεία του συστήματος, όπως η τεχνολογική κατηγορία, η μορφή της διάταξης, το ενεργό υλικό ή η βασική στρωματογραφία, οι διαθέσιμες καταστάσεις λειτουργίας και το εύρος των φασματικών δεδομένων. Η καταγραφή αυτή ήταν απαραίτητη ώστε συστήματα που προέρχονται από μελέτες διαφορετικής πειραματικής διάταξης και διαφορετικού επιπέδου τεχνολογικής ανάπτυξης, να αποδοθούν σε ενιαία μορφή και να δύνανται να συγκριθούν με κοινά κριτήρια.

Η κύρια πληροφορία που συλλέχθηκε ήταν η φασματική διαπερατότητα των συστημάτων στις διαθέσιμες καταστάσεις λειτουργίας. Όταν οι τιμές δίνονταν αριθμητικά, μεταφέρθηκαν απευθείας στη βάση δεδομένων. Όταν η πληροφορία παρεχόταν μόνο με τη μορφή διαγραμμάτων, οι αντίστοιχες καμπύλες ψηφιοποιήθηκαν ώστε να εξαχθούν αριθμητικά ζεύγη μήκους κύματος και διαπερατότητας. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε στις καμπύλες που ήταν απαραίτητες για τη συγκριτική ανάλυση και όχι υποχρεωτικά στο σύνολο των διαθέσιμων καταστάσεων κάθε συστήματος. Στις περιπτώσεις όπου ένα δυναμικό υαλοστάσιο παρουσίαζε περισσότερες από δύο οπτικές καταστάσεις, η ενεργοποιημένη κατάσταση επιλέχθηκε με γνώμονα τη διατήρηση χρήσιμης ορατής διαπερατότητας και την ταυτόχρονη μείωση της διαπερατότητας στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή, αντί να αντιστοιχεί απαραίτητα στη σκοτεινότερη διαθέσιμη κατάσταση.

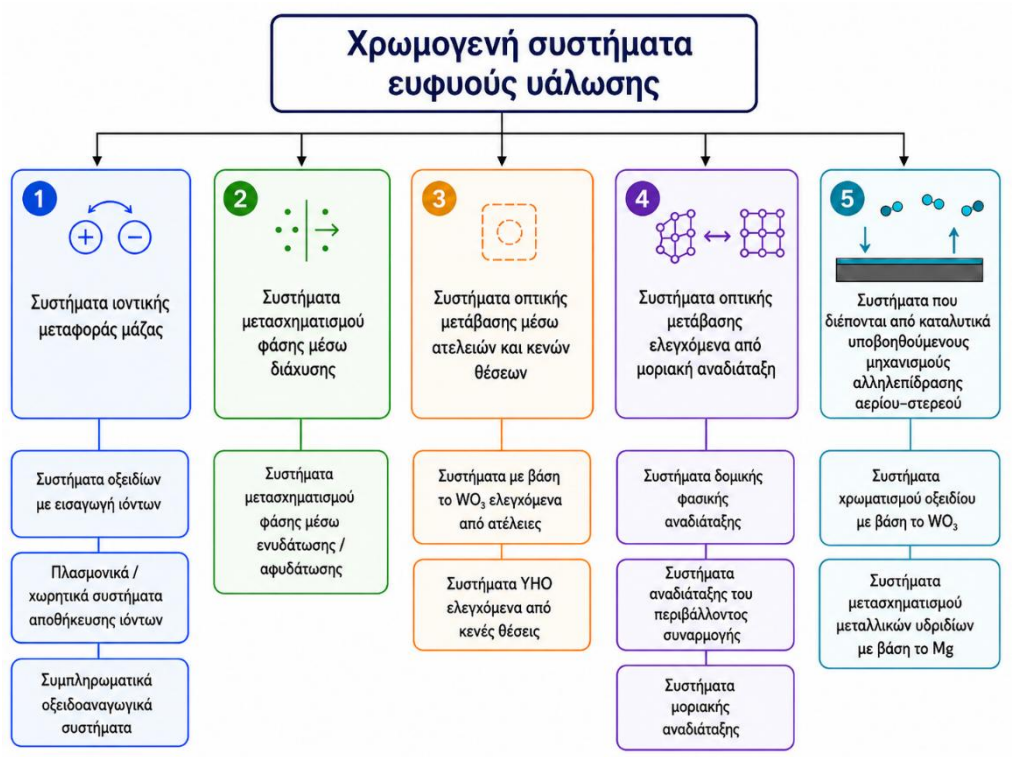
Η επεξεργασία αυτή επέτρεψε την άμεση αντιπαραβολή των καμπυλών διαπερατότητας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και καταστάσεων λειτουργίας. Η σύγκριση δεν βασίστηκε μόνο στις απόλυτες τιμές διαπερατότητας, αλλά και στη φασματική περιοχή όπου εμφανίζεται η κύρια μεταβολή, δηλαδή στην ορατή, στην εγγύς υπέρυθρη ή σε ευρύτερο τμήμα του ηλιακού φάσματος. Με αυτόν τον τρόπο, τα βιβλιογραφικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την ερμηνεία της λειτουργικής συμπεριφοράς των συστημάτων και για την επιλογή των περιπτώσεων που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω αξιολόγηση.

3.3 Συσχέτιση μηχανισμών οπτικής μετάβασης και μεταβολής φασματικής διαπερατότητας

Μετά τη συγκρότηση του συνόλου των εξεταζόμενων συστημάτων και την οργάνωση των διαθέσιμων φασματικών δεδομένων, η αξιολόγηση δεν περιορίζεται στη συμβατική ταξινόμηση των τεχνολογιών σε θερμοχρωμικά, φωτοχρωμικά, ηλεκτροχρωμικά και αεριοχρωμικά υαλοστάσια. Οι κατηγορίες αυτές είναι χρήσιμες για την αρχική περιγραφή του ερεθίσματος που ενεργοποιεί τη μεταβολή της οπτικής κατάστασης, δεν επαρκούν όμως από μόνες τους για να ερμηνεύσουν τη φασματική συμπεριφορά και την πρακτική καταλληλότητα κάθε συστήματος, καθώς δεν αποτυπώνουν πάντοτε τον κυρίαρχο φυσικό ή φυσικοχημικό μηχανισμό που ελέγχει τη μετάβαση μεταξύ των οπτικών καταστάσεων.

Για τον λόγο αυτό, η σύγκριση που ακολουθεί οργανώνεται με βάση τη συνδυασμένη εξέταση του μηχανισμού οπτικής μετάβασης, της μεταβολής της φασματικής διαπερατότητας και των περιορισμών που σχετίζονται με την αντιστρεψιμότητα, τη σταθερότητα και τη λειτουργική ανθεκτικότητα. Οι συμβατικές χρωμογενείς κατηγορίες διατηρούνται ως δευτερεύοντες περιγραφικοί όροι, όπου αυτό είναι απαραίτητο, ενώ η κύρια βάση της ανάλυσης είναι ο μηχανισμός που καθορίζει την οπτική απόκριση κάθε συστήματος. Η προσέγγιση αυτή δεν αντιμετωπίζει τις παραπάνω παραμέτρους ως ανεξάρτητα κριτήρια, αλλά ως αλληλένδετα στοιχεία ενός κοινού πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο χρησιμοποιείται για τη σταδιακή τεκμηρίωση της τελικής επιλογής των συστημάτων που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για περαιτέρω υπολογιστική ανάλυση.

Στο πλαίσιο αυτό, τα εξεταζόμενα συστήματα οργανώνονται σε πέντε βασικές οικογένειες, ανάλογα με τον κυρίαρχο μηχανισμό που ελέγχει τη μετάβαση μεταξύ των οπτικών τους καταστάσεων. Οι μηχανιστικές οικογένειες αυτές είναι: ιοντική μεταφορά μάζας, μετασχηματισμός φάσης μέσω διάχυσης, μετάβαση μέσω ατελειών και κενών θέσεων, μοριακή ή δομική αναδιάταξη και αλληλεπίδραση αερίου–στερεού με καταλυτική υποβοήθηση. Η ταξινόμηση αυτή παρέχει το πλαίσιο για την ανάλυση που ακολουθεί, όπου κάθε οικογένεια δεν εξετάζεται μόνο ως προς το υλικό ή το ερέθισμα ενεργοποίησης, αλλά και ως προς τον τρόπο με τον οποίο ο μηχανισμός μετάβασης διαμορφώνει τη φασματική απόκριση του υαλοστασίου.



Σχήμα 3-1 Μηχανιστική ταξινόμηση των εξεταζόμενων χρωμογενών ευφυών συστημάτων υάλωσης, με βάση τον κυρίαρχο μηχανισμό που ελέγχει τη μετάβαση μεταξύ των οπτικών καταστάσεων.

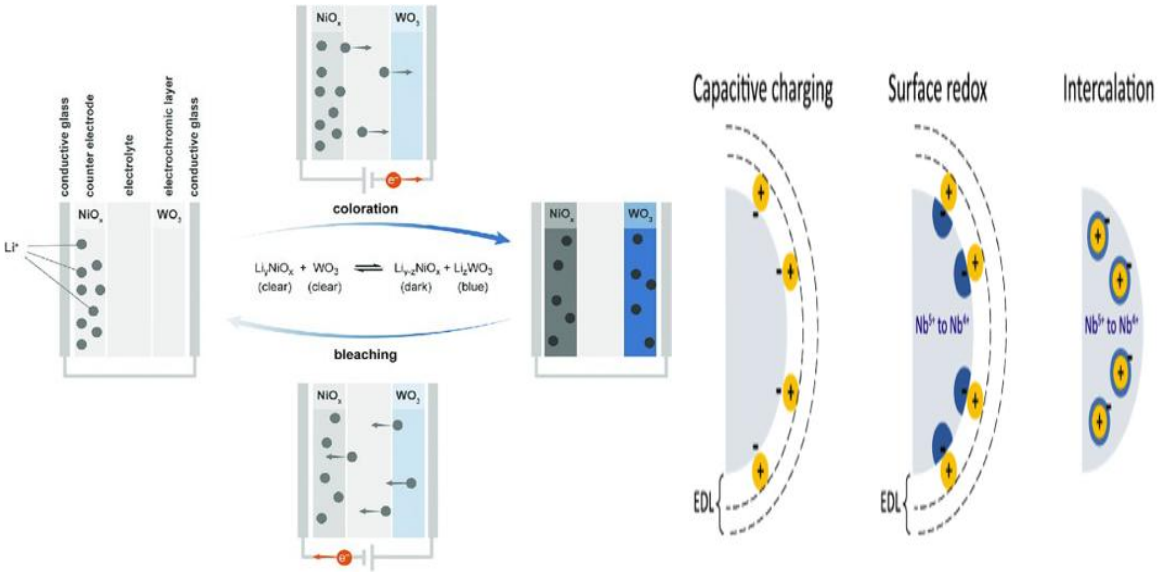
3.3.1 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει χρωμογενή συστήματα υάλωσης στα οποία η οπτική μετάβαση ελέγχεται από ηλεκτρικά οδηγούμενη κίνηση ιόντων, σε συνδυασμό με αντιστάθμιση ηλεκτρονικού φορτίου. Το αντισταθμιστικό φορτίο μπορεί να μεταβάλει την τυπική βαθμίδα οξείδωσης ενεργών οξειδοαναγωγικών κέντρων, όπως συμβαίνει σε οξείδια μετάλλων μετάπτωσης ή σε συμπληρωματικά οξειδοαναγωγικά υλικά. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί κυρίως να τροποποιεί τον πληθυσμό φορέων σε νανοδομημένους ξενιστές, οδηγώντας σε πλασμονικές ή χωρητικές οπτικές αποκρίσεις, χωρίς να υπάρχει απαραίτητα απλή αντιστοιχία ένα προς ένα με μεταβολή της στοιχειομετρίας του κρυσταλλικού πλέγματος.

Στο πλαίσιο αυτό, η εισαγωγή ιόντων αναφέρεται γενικά στην πρόσληψη ιόντων από το ενεργό υλικό. Η παρεμβολή ιόντων περιγράφει ειδικότερα την εισχώρηση ιόντων σε διαθέσιμες κρυσταλλογραφικές ή νανοδομημένες θέσεις ενός ξενιστή, ενώ η αποπαρεμβολή ή εξαγωγή ιόντων περιγράφει την αντίστροφη διαδικασία απομάκρυνσης κατά τον αποχρωματισμό [29]. Οι διεργασίες αυτές

αντιμετωπίζονται εδώ ως συγγενείς ηλεκτροχημικές οδοί μέσα στην ευρύτερη οικογένεια της ιοντικής μεταφοράς μάζας και όχι ως ανεξάρτητες χρωμογενείς κατηγορίες.

Το Σχήμα 3-2 χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει εννοιολογικά τις βασικές ηλεκτροχημικές οδούς. Η σύζευξη ιόντων και ηλεκτρονίων σε επίπεδο διάταξης εξηγεί τη συνολική ηλεκτροχρωμική λειτουργία, ενώ η χωρητική φόρτιση, οι επιφανειακές οξειδοαναγωγικές διεργασίες και η παρεμβολή ιόντων δείχνουν διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να αποθηκευτεί το εισαγόμενο φορτίο στο ενεργό υλικό.



Σχήμα 3-2 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών ηλεκτροχημικών διεργασιών που σχετίζονται με ηλεκτροχρωμικά συστήματα ιοντικής μεταφοράς μάζας. (α) Αντιπροσωπευτική ηλεκτροχρωμική διάταξη βασισμένη σε οξείδια, όπου παρουσιάζεται η συζευγμένη μεταφορά ιόντων, η ροή ηλεκτρονίων και η αντιστάθμιση φορτίου κατά τον χρωματισμό και τον αποχρωματισμό [30]. (β) Αντιπροσωπευτικοί τρόποι αποθήκευσης φορτίου σε ηλεκτροχρωμικά νανοκρυσταλλικά υμένια, με διάκριση μεταξύ χωρητικής φόρτισης, επιφανειακών οξειδοαναγωγικών διεργασιών και παρεμβολής ιόντων [29].

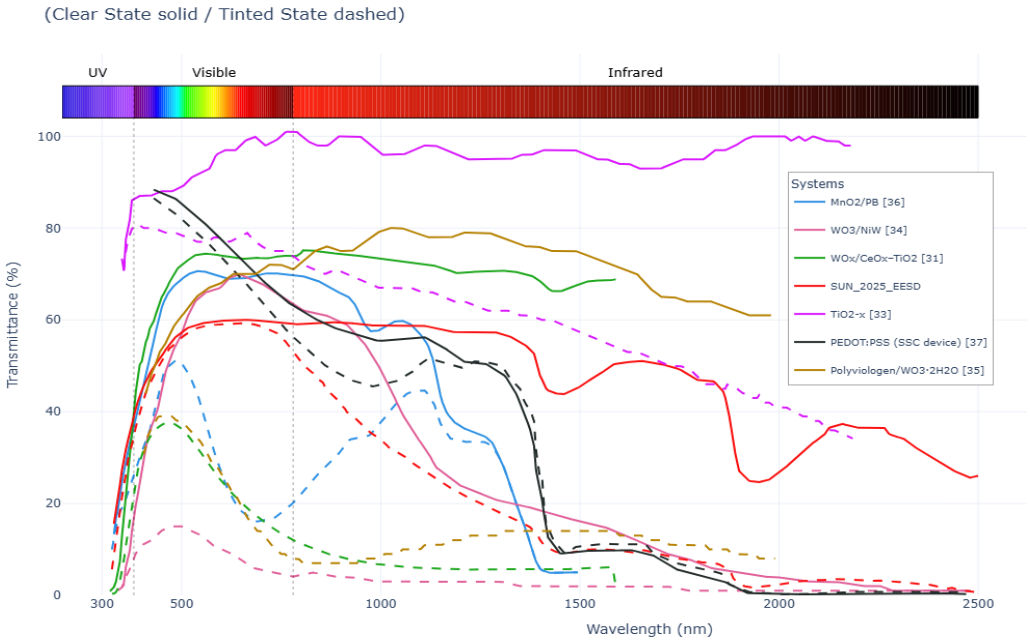
Στα συστήματα που διατηρήθηκαν στην παρούσα ανάλυση, η ιοντική μετάβαση πραγματοποιείται μέσω διαφορετικών μεταφερόμενων ειδών και ηλεκτροχημικών διαδρομών. Το ηλεκτροχρωμικό laminate διπλής φασματικής ρύθμισης WOx/CeOx–TiO_2 [31], η ηλεκτροχρωμική διάταξη διπλής φασματικής ρύθμισης $Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32], η TiO_{2-x} ηλεκτροχρωμική διάταξη με νανοκρυστάλλους [33] και το ηλεκτροχρωμικό τριπλό υαλοστάσιο WO_3/NiW [34] βασίζονται κυρίως σε ηλεκτροχημική μεταφορά Li^+. Η μεταφορά αυτή εκφράζεται ως παρεμβολή, αποπαρεμβολή ή εισαγωγή/εξαγωγή ιόντων μέσα σε ενεργές αρχιτεκτονικές οξειδίων.

Αντίθετα, η ηλεκτροχρωμική διάταξη διπλής καθόδου polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35] λειτουργεί μέσω ηλεκτροχημικής μετάβασης συζευγμένης με Zn^{2+}, ενώ η συμπληρωματική ηλεκτροχρωμική νανοσύνθετη διάταξη MnO_2/PB [36] ελέγχεται από παρεμβολή και αποπαρεμβολή K^+ στα οξειδοαναγωγικά ενεργά συστατικά. Η συμμετρική ηλεκτροχρωμική διάταξη υπερπυκνωτή PEDOT:PSS [37] αντιπροσωπεύει μια συγγενή ιοντική διαδρομή, όπου η μετάβαση συνδέεται με χωρητικές οξειδοαναγωγικές διεργασίες συζευγμένες με ιόντα ηλεκτρολύτη σε συμμετρικά ηλεκτρόδια αγώγιμου πολυμερούς. Συνολικά, τα συστήματα αυτά συγκροτούν μία ενιαία οικογένεια, επειδή, παρά τις διαφορές τους ως προς τα υλικά και την αρχιτεκτονική της διάταξης, η μεταβολή της οπτικής

κατάστασης ελέγχεται σε πρωτεύον επίπεδο από ιοντικά διαμεσολαβούμενη ηλεκτροχημική μεταφορά μέσα στην ενεργή δομή.

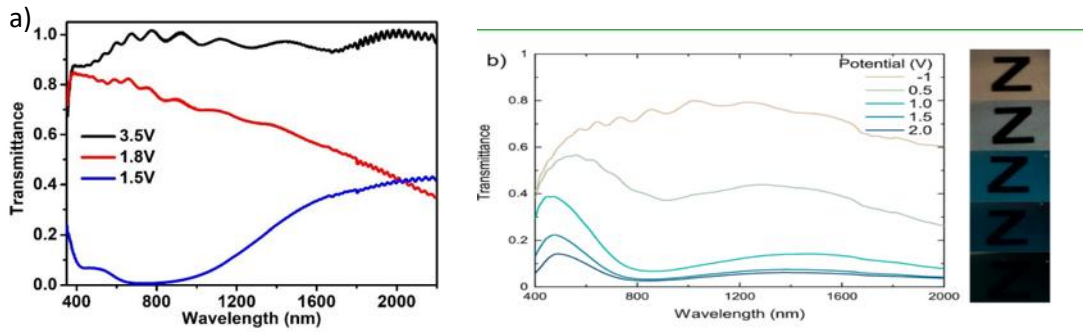
Πίνακας 3-1 Σύνοψη των ηλεκτροχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας, με βάση το βασικό υλικό, το δευτερεύον συστατικό, τον ηλεκτρολύτη και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης.

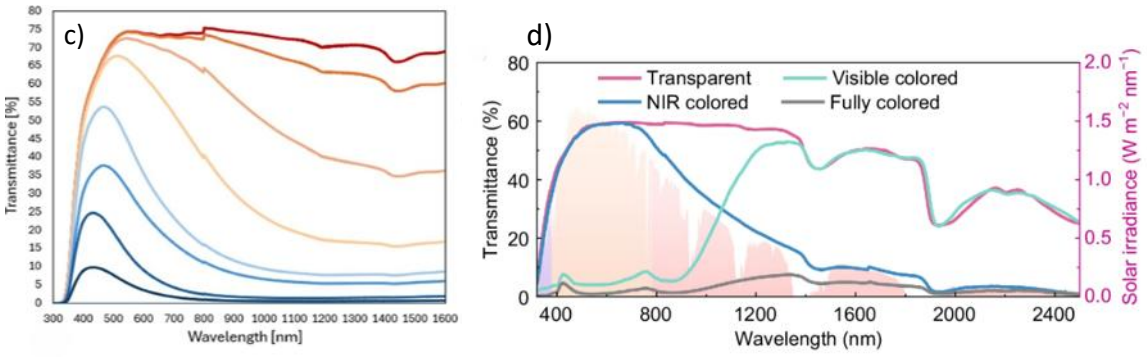
Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Ηλεκτρολύτης**	**Μεταφερόμενο είδος και μηχανισμός**
$WO_x/CeO_x–TiO_2$ [31]	WOx	$CeOx/TiO_2$	ιοντικά αγώγιμη μεμβράνη PVB	ηλεκτροχημική παρεμβολή Li^+
$Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32]	νανοκρύσταλλοι $Nb_{12}O_{29}$	αντίθετο ηλεκτρόδιο V_2O_5	ηλεκτρολύτης γέλης 1,0 M $LiClO_4$ σε ανθρακικό προπυλένιο με PMMA	παρεμβολή/αποπαρεμβολή Li^+
TiO_{2-x} [33]	νανοκρύσταλλοι $TiO_{2–x}$ με έλλειψη οξυγόνου	-	ηλεκτρολύτης $LiClO_4$/PC	πλασμονική παρεμβολή Li^+
WO_3/NiW [34]	WO_3	στρώση αποθήκευσης ιόντων NiW	ηλεκτρολύτης $LiClO_4$ τύπου γέλης	εισαγωγή/εξαγωγή Li^+
Polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35]	Polyviologen + $WO_3 \cdot 2H_2O$	στρώση PEDOT:PSS + άνοδος πλέγματος Zn	στερεοποιημένος υδατικός ηλεκτρολύτης Zn^{2+} με UV σκλήρυνση	οξειδοαναγωγική μεταφορά Zn^{2+} διπλής φασματικής ρύθμισης
PEDOT:PSS (SSC device) [37]	ηλεκτρόδια λεπτού υμενίου PEDOT:PSS σε συμμετρική διάταξη	-	ηλεκτρολύτης H_3PO_4 με βάση EG/H_2O	χωρητική οξειδοαναγωγική μετάβαση μέσω ιόντων ηλεκτρολύτη σε συμμετρικά ηλεκτρόδια PEDOT:PSS
MnO_2/PB [36]	MnO_2	Prussian Blue (PB, $Fe_4[Fe(CN)_6]_3 \cdot xH_2O$)	υδατικό διάλυμα KCl 1,0 M	οξειδοαναγωγική μεταφορά μέσω παρεμβολής/αποπαρεμβολής K^+



Σχήμα 3-3 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας ηλεκτροχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας.

Σημείωση: *Για τα συστήματα με περισσότερες οπτικές καταστάσεις που εξαρτώνται από την εφαρμοζόμενη τάση, η κύρια σύγκριση πραγματοποιείται με μία διαυγή κατάσταση και μία επιλεγμένη χρωματισμένη κατάσταση. Η επιλεγμένη χρωματισμένη κατάσταση επιλέχθηκε ώστε να διατηρείται μια χρήσιμη ισορροπία μεταξύ ορατής διαπερατότητας και ρύθμισης της εγγύς υπέρυθρης περιοχής, και όχι απαραίτητα ώστε να αντιπροσωπεύει τη σκοτεινότερη διαθέσιμη κατάσταση. Οι πρόσθετες καμπύλες φασματικής διαπερατότητας ανά κατάσταση παρουσιάζονται χωριστά, ώστε να αποτυπωθεί το ευρύτερο εύρος ρύθμισης των διατάξεων αυτών, χωρίς κάθε ενδιάμεση κατάσταση να αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστό σύστημα.*





Σχήμα 3-4 Διαγράμματα φασματικής διαπερατότητας ανά οπτική κατάσταση για τα συστήματα διπλής φασματικής ρύθμισης που βασίζονται σε μηχανισμούς ιοντικής μεταφοράς μάζας: (a) TiO_{2-x} [33], (b) $Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32], (c) $WO_x/CeO_x–TiO_2$ [31] και (d) polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35].

Ωστόσο, η κοινή αυτή αρχή μετάβασης δεν οδηγεί σε μία μοναδική φασματική απόκριση. Σε πιο συμβατικές διατάξεις βασισμένες σε οξείδια, όπως το ηλεκτροχρωμικό τριπλό υαλοστάσιο WO_3/NiW [34], η εισαγωγή ιόντων μεταβάλλει την ηλεκτρονική κατάσταση του ενεργού οξειδίου και η χρωματισμένη κατάσταση εμφανίζεται κυρίως ως ευρεία μείωση της διαπερατότητας στην ορατή και στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή του ηλιακού φάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Το αποτέλεσμα είναι μία σκουρόχρωμη κατάσταση ηλιακού ελέγχου και όχι ένα φασματικά επιλεκτικό φίλτρο. Η ορατή και η εγγύς υπέρυθρη περιοχή εξασθενούν ταυτόχρονα, επειδή το εισαγόμενο φορτίο δημιουργεί ευρεία απορρόφηση στο ενεργό ηλεκτροχρωμικό στρώμα.

Διαφορετική φασματική απόκριση προκύπτει όταν η ιοντικά οδηγούμενη οξειδοαναγωγική διεργασία κατανέμεται σε συμπληρωματικά ηλεκτροχρωμικά συστατικά. Στη συσκευή MnO_2/PB [36], οι δύο ενεργές φάσεις δεν συνεισφέρουν ισοδύναμα στην ίδια περιοχή του φάσματος. Το MnO_2 ενισχύει κυρίως την εξασθένηση προς τη μικρού μήκους κύματος ορατή περιοχή, ενώ το Prussian Blue επεκτείνει τη μεταβολή προς μεγαλύτερα ορατά μήκη κύματος και προς το όριο της εγγύς υπέρυθρης περιοχής. Η συνδυασμένη διάταξη διευρύνει έτσι το παράθυρο εξασθένησης της χρωματισμένης κατάστασης, χωρίς όμως να παράγει καθαρό διαχωρισμό μεταξύ ελέγχου της ορατής και της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή, η ιοντική μεταφορά μάζας διευρύνει τη μείωση της ηλιακής διαπερατότητας μέσω επικαλυπτόμενων οξειδοαναγωγικών ζωνών απορρόφησης μέσα στην ίδια διάταξη.

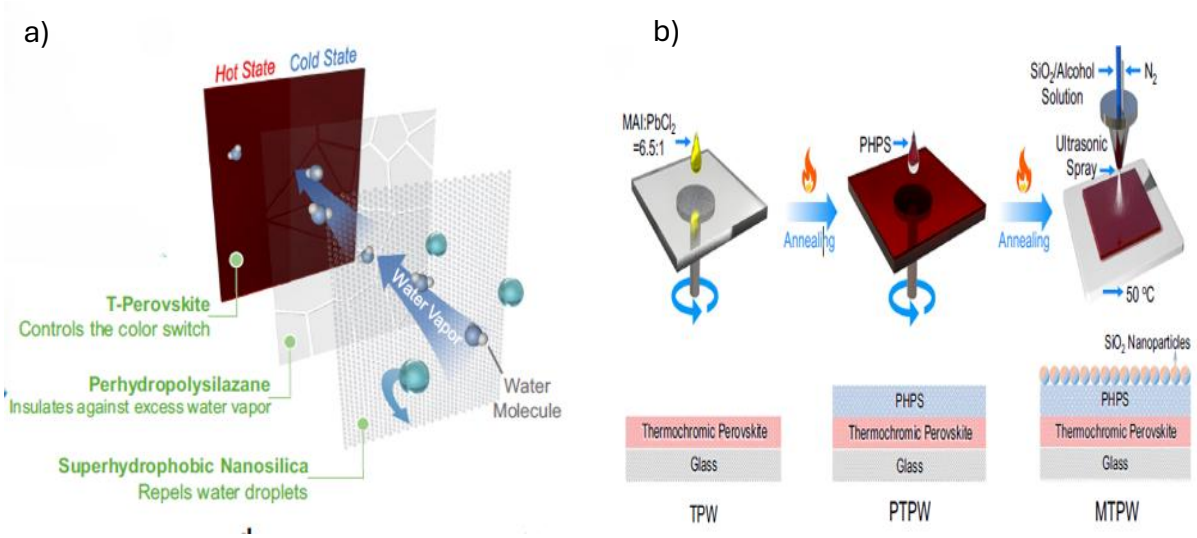
Μεταξύ των συστημάτων ιοντικής μεταφοράς μάζας, οι διατάξεις διπλής φασματικής ρύθμισης αποτελούν τις περιπτώσεις όπου η ιοντικά διαμεσολαβούμενη φόρτιση μεταφράζεται με πιο καθαρό τρόπο σε φασματική επιλεκτικότητα. Στις επιλεγμένες χρωματισμένες καταστάσεις, τα $TiO_{2–x}$ [33], $Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32] και WOx/CeOx–TiO_2 [31] διατηρούν περισσότερο τον χαρακτήρα ορατής διαπερατότητας, ενώ μειώνουν αποτελεσματικότερα την εγγύς υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Η απόκριση αυτή συνδέεται με τον τρόπο με τον οποίο η ιοντικά διαμεσολαβούμενη φόρτιση φιλοξενείται στο ενεργό στρώμα. Σε μέτρια επίπεδα φόρτισης, οι απεντοπισμένοι φορείς φορτίου ή η πλασμονικού τύπου απορρόφηση συνεισφέρουν κυρίως στην εξασθένηση της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ εντονότερος εντοπισμός φορτίου θα οδηγούσε σταδιακά σε ισχυρότερο χρωματισμό στην ορατή περιοχή. Αντίστοιχος διαχωρισμός μεταξύ ορατής και εγγύς υπέρυθρης απόκρισης επιτυγχάνεται στο σύστημα polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35] μέσω της διάταξης διπλής καθόδου. Σε αυτή την περίπτωση, το polyviologen συνεισφέρει κυρίως στον έλεγχο του ορατού φωτός, ενώ το $WO_3 \cdot 2H_2O$ συνδέεται κυρίως με τη ρύθμιση της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Το βασικό συμπέρασμα από αυτή την οικογένεια είναι ότι η ιοντική μεταφορά μάζας παρέχει μία κοινή ηλεκτροχημική διαδρομή, αλλά όχι μία ενιαία φασματική συμπεριφορά. Στα επιλεγμένα συστήματα, η μετάβαση από τη διαυγή στη χρωματισμένη κατάσταση μπορεί να εμφανιστεί ως ευρεία σκίαση στην ορατή και εγγύς υπέρυθρη περιοχή, ως διευρυμένη εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω συμπληρωματικών οξειδοαναγωγικών ζωνών ή ως πιο επιλεκτική μείωση της εγγύς υπέρυθρης διαπερατότητας σε διατάξεις διπλής φασματικής ρύθμισης. Το κρίσιμο στοιχείο για την αξιολόγηση δεν είναι μόνο η ύπαρξη ιοντικής μεταφοράς, αλλά η οπτική μορφή που λαμβάνει το εισαγόμενο φορτίο μέσα στην εκάστοτε αρχιτεκτονική. Όταν η απόκριση του φορτίου είναι ευρέως πολαρονική, το υαλοστάσιο σκουραίνει σε μεγάλο φασματικό εύρος. Όταν συνδυάζονται συμπληρωματικά οξειδοαναγωγικά κέντρα, το παράθυρο εξασθένησης διευρύνεται. Όταν κυριαρχούν πλασμονικές ή διαχωρισμένες ηλεκτροχρωμικές διαδρομές, το σύστημα μπορεί να μειώσει τη μετάδοση της ηλιακής υπέρυθρης ακτινοβολίας, διατηρώντας παράλληλα μεγαλύτερο μέρος του ορατού φωτός.

3.3.2 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης

Σε αυτή την οικογένεια, η οπτική απόκριση ελέγχεται από τη διάχυση ενός μικρού μοριακού είδους, το οποίο μεταβάλλει αντιστρεπτά τη φασική κατάσταση του ενεργού υλικού. Η διεργασία διάχυσης αποτελεί επομένως μέρος του ίδιου του μηχανισμού μετάβασης: το μεταφερόμενο είδος σταθεροποιεί μία δομική μορφή του χρωμογενούς μέσου, ενώ η απομάκρυνσή του επιτρέπει τη μετατροπή του σε μια άλλη, οπτικά διακριτή μορφή. Στους ενυδατωμένους περοβσκίτες αλογονιδίων μετάλλων, τον ρόλο αυτό έχει ο υδρατμός H_2O. Η ενυδάτωση ευνοεί μια διαφανή ενυδατωμένη φάση, όπως η $MA_4PbX_6 \cdot 2H_2O$, ενώ η θέρμανση προωθεί την αφυδάτωση και τη μετατροπή προς μια χρωματισμένη περοβσκιτική φάση τύπου $MAPbX_3$ [38]. Παρόμοια μετάβαση περοβσκίτη μέσω διάχυσης ή με υποβοήθηση φιλοξενούμενου είδους έχει αναφερθεί σε ενυδατωμένα $MAPbI_3$ films για έξυπνα υαλοστάσια [39], σε εναλλασσόμενα φωτοβολταϊκά παράθυρα υποβοηθούμενα από μεθυλαμίνη [19] και σε ανόργανα $CsPbI_{3-x}Br_x$ θερμοχρωμικά φωτοβολταϊκά παράθυρα [40]. Ωστόσο, τα παραδείγματα αυτά διαφέρουν ως προς τον βαθμό συνάφειάς τους με εφαρμογές υαλοστασίων: ορισμένα παραμένουν λιγότερο προστατευμένα απέναντι στην υγρασία, ενώ άλλα εισάγουν φωτοβολταϊκή λειτουργία ή απαιτούν συνθήκες μετάβασης που είναι λιγότερο κατάλληλες για παθητικά αρχιτεκτονικά υαλοστάσια.

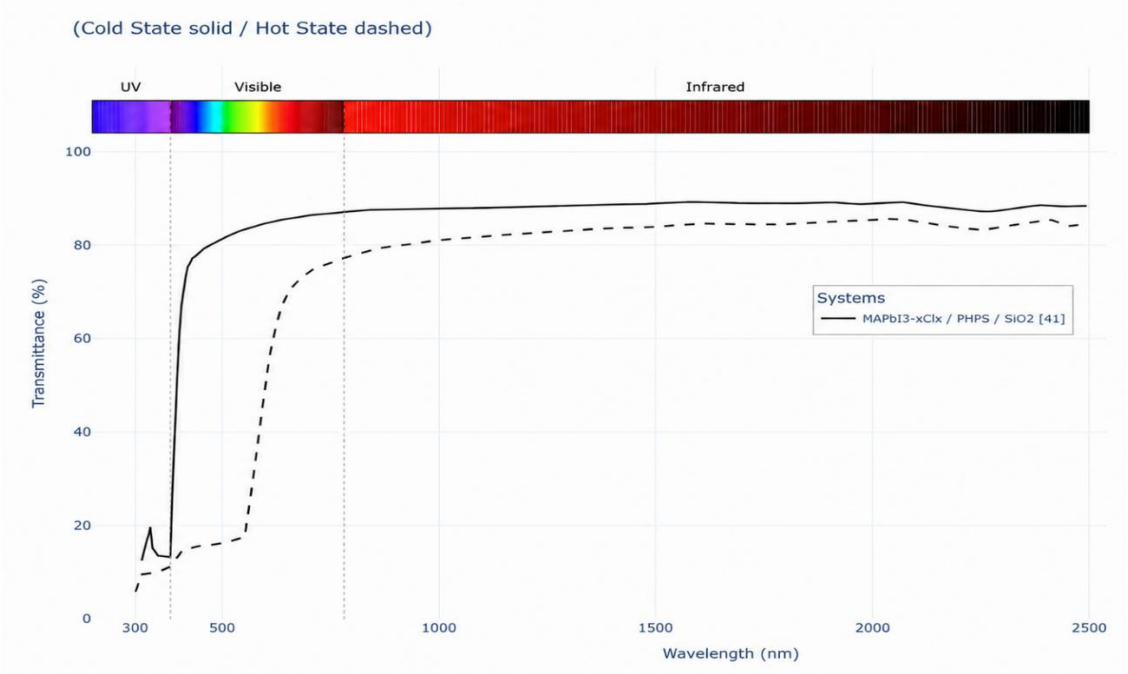
Για τον λόγο αυτό, το επιλεχθέν σύστημα στην παρούσα ανάλυση είναι το mask-inspired $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 θερμοχρωμικό υαλοστάσιο περοβσκίτη [41]. Σε αυτό το παράθυρο, η θερμοχρωμική στρώση με βάση το $MAPbI_{3-x}Cl_x$ παρέχει την αντιστρεπτή χρωματική μετάβαση μέσω ενυδάτωσης/αφυδάτωσης που διαμεσολαβείται από υδρατμούς H_2O. Η ενεργή στρώση συνδυάζεται με ενδιάμεση στρώση $SiO_x/SiON_x$ που προέρχεται από perhydropolysilazane (PHPS) και με υπερυδρόφοβη ανώτερη στρώση νανοσωματιδίων SiO_2. Οι δευτερεύουσες αυτές στρώσεις δεν αποτελούν χρωμογενή μέσα, αλλά ρυθμίζουν την πρόσβαση των υδρατμών, βελτιώνουν την οπτική καθαρότητα και μειώνουν την άμεση έκθεση σε υγρό νερό. Συνεπώς, ο μηχανισμός μετάβασης παραμένει εντοπισμένος στη φασική μετατροπή του περοβσκίτη, ενώ η πολυστρωματική αρχιτεκτονική καθιστά τον μηχανισμό αυτό περισσότερο συμβατό με πρακτική μορφή υαλοστασίου.



Σχήμα 3-5 Σχηματική αναπαράσταση του mask-inspired $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 θερμοχρωμικού υαλοστασίου από περοβσκίτη [41]. (a) Αρχή λειτουργίας της πολυστρωματικής διάταξης, όπου παρουσιάζονται η πρόσβαση υδρατμών, η προστασία από το νερό και η χρωματική μετάβαση. (b) Διαδικασία κατασκευής της τριστρωματικής δομής του συστήματος.

Πίνακας 3-2 Σύνοψη του θερμοχρωμικού συστήματος περοβσκίτη που διέπεται από μηχανισμό μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης, με βάση το βασικό υλικό, τα δευτερεύοντα συστατικά και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Μεταφερόμενο είδος και μηχανισμός**
$MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 [41]	ενυδατωμένος περοβσκίτης $MAPbI_{3-x}Cl_x$	ενδιάμεση στρώση PHPS (SiO_x) + υπερυδρόφοβα νανοσωματίδια SiO_2	διάχυση υδρατμών H_2O – φασική μετάβαση μέσω ενυδάτωσης/αφυδάτωσης



Σχήμα 3-6 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης.

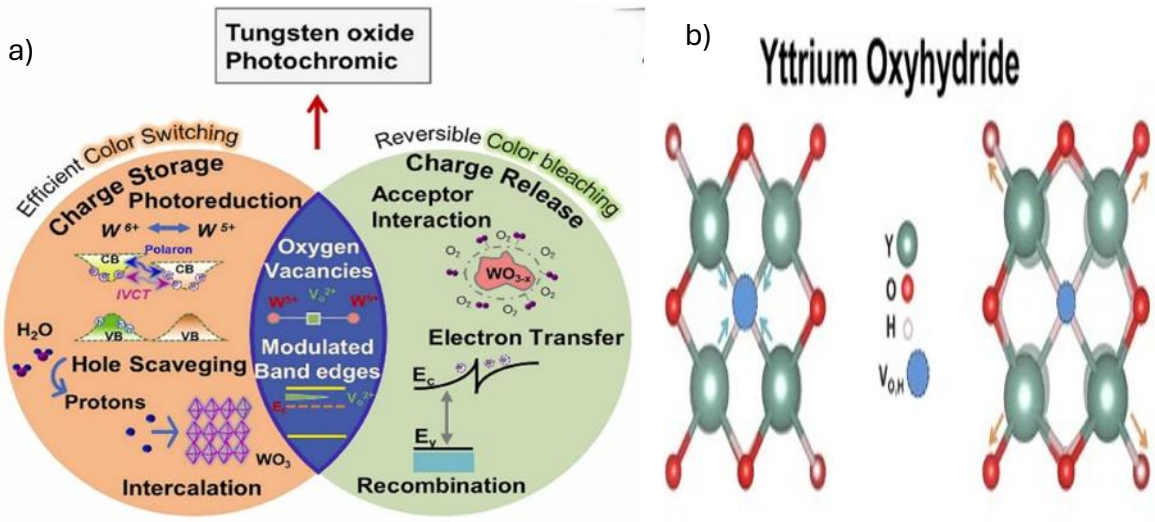
Ο μηχανισμός αυτός αποτυπώνεται στο διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-6 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης. Για το επιλεγμένο $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 σύστημα [41], η μετάβαση από τη διαφανή στη χρωματισμένη κατάσταση εκφράζεται κυρίως μέσω εξασθένησης στην υπεριώδη–ορατή περιοχή, ενώ το τμήμα της εγγύς υπέρυθρης περιοχής επηρεάζεται συγκριτικά λιγότερο. Η φασματική αυτή συμπεριφορά είναι συνεπής με τη διαδρομή φασικής μετάβασης του ενυδατωμένου περοβσκίτη, στην οποία η οπτική αντίθεση συνδέεται κυρίως με τον σχηματισμό της χρωματισμένης περοβσκιτικής φάσης. Ως αποτέλεσμα, το παράθυρο παρέχει αποτελεσματική ρύθμιση στην ορατή περιοχή, αλλά η άμεση συμβολή του σε ευρύτερη απόδοση ηλιακού ελέγχου παραμένει πιο περιορισμένη σε σχέση με τεχνολογίες στις οποίες η απόκριση μετάβασης εκτείνεται εντονότερα στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή.

3.3.3 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει φωτοχρωμικά συστήματα στα οποία η οπτική μετάβαση συνδέεται με παγίδευση και μεταφορά φορτίου μέσω ατελειών μέσα στο ενεργό στερεό, και όχι με εκτεταμένη ιοντική παρεμβολή ή με αντιστρεπτή φασική μετάβαση ολόκληρου του κρυσταλλικού πλέγματος. Στα ανόργανα φωτοχρωμικά οξείδια, η συμπεριφορά αυτή περιγράφεται συνήθως μέσω φωτοεπαγόμενων οξειδοαναγωγικών διεργασιών, μεταβολών της οξειδωτικής κατάστασης και καταστάσεων ατελειών που δημιουργούνται από μη στοιχειομετρία ή από κενές θέσεις. Ειδικά στα συστήματα με βάση το WO_3, η υπεριώδης ακτινοβολία δημιουργεί ηλεκτρόνια και οπές, ενώ ο χρωματισμός που ακολουθεί

συνδέεται με τη μερική αναγωγή του βολφραμίου από W^{6+} σε W^{5+}. Η διεργασία αυτή οδηγεί σε μεταφορά φορτίου μεταξύ κέντρων βολφραμίου διαφορετικού σθένους [42]. Παράλληλα, η απόκριση αυτή έχει συσχετιστεί και με διεργασίες που περιλαμβάνουν πρωτόνια [43], καθώς οι οπές μπορούν να αντιδράσουν με προσροφημένο νερό και να δημιουργήσουν είδη H^+, τα οποία διαχέονται στο οξειδικό δίκτυο και σταθεροποιούν την ανηγμένη κατάσταση. Επιπλέον, η έλλειψη οξυγόνου και οι δομές πλούσιες σε κενές θέσεις επηρεάζουν έντονα την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού, επειδή δημιουργούν καταστάσεις ατελειών που διευκολύνουν τον χρωματισμό και μεταβάλλουν τη διαδρομή αποχρωματισμού [42], [44].

Η οικογένεια αυτή εκπροσωπείται από δύο βασικούς κλάδους: έναν κλάδο με βάση το WO_3 και έναν κλάδο με βάση το yttrium oxyhydride, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Ο κλάδος WO_3 περιλαμβάνει το φωτοχρωμικό σύνθετο film Fe-WO_3/PMMA [45], το σύνθετο film νανοχρωστικών WO_3/PMMA [46] και το φωτοχρωμικό film αναβάθμισης με βάση το WO_3 σε PET [47]. Στο Fe-doped WO_3/PMMA σύστημα, η ενσωμάτωση Fe χρησιμοποιείται για την τροποποίηση του νανοσωματιδιακού συστήματος WO_3. Για το συγκεκριμένο σύστημα, αναφέρεται υψηλή διασπορά των νανοσωματιδίων WO_3, με μέσο μέγεθος περίπου 8,5 nm. Η φωτοχρωμική διεργασία αποδίδεται στη φωτοεπαγόμενη μετατροπή W^{6+}/W^{5+} στο οξείδιο του βολφραμίου, ενώ η νανοσωματιδιακή διαμόρφωση επιτρέπει και συμβολή τύπου συντονισμού εντοπισμένου επιφανειακού πλασμονίου (LSPR) από τους φωτοπαραγόμενους φορείς φορτίου. Στα συστήματα με βάση το WO_3 χωρίς πρόσμιξη, διατηρείται η ίδια ευρύτερη φωτοχρωμική οικογένεια, καθώς ο χρωματισμός περιγράφεται επίσης μέσω μεταβολής της κατάστασης οξείδωσης του W από W^{6+} σε W^{5+} και παγίδευσης φορτίου μέσω ατελειών στο οξείδιο του βολφραμίου. Ο δεύτερος κλάδος της κατηγορίας εκπροσωπείται από το yttrium oxyhydride [48], όπου ο φωτοχρωμισμός αποδίδεται σε κενές θέσεις υδριδικών και οξειδικών ανιόντων, οι οποίες δημιουργούν βαθιές εντοπισμένες καταστάσεις στο ενεργειακό χάσμα. Η ακτινοβόληση μεταβάλλει την κατάσταση φορτίου των κενών θέσεων και προκαλεί τοπική χαλάρωση του πλέγματος. Επομένως, η οπτική σκουρόχρωση εξετάζεται εδώ ως φωτοχρωμική διεργασία ελεγχόμενη από κενές θέσεις, και όχι ως κλασική διαδρομή φασικής μετάβασης.



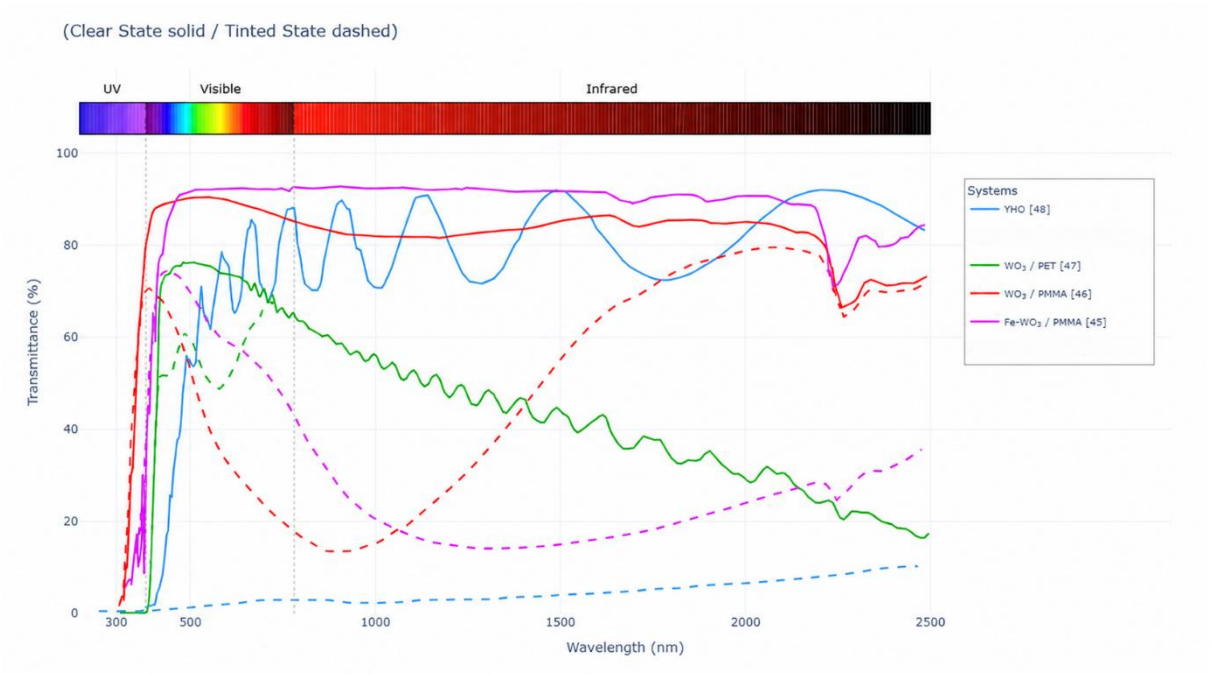
Σχήμα 3-7 Σχηματική αναπαράσταση φωτοχρωμικών μηχανισμών μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων. (a) Φωτοχρωμισμός με βάση το WO_3 μέσω φωτοαναγωγής W^{6+}/W^{5+}, συμβολής καταστάσεων ατελειών και αντιστρεπτού

αποχρωματισμού [49]. (b) Τοπικές δομικές διαμορφώσεις που σχετίζονται με κενές θέσεις στο YHO, όπου παρουσιάζονται κενές θέσεις υδριδίου και οξυγόνου που συνδέονται με τη χαλάρωση του πλέγματος [48].

Τα συστήματα που εντάσσονται στην κατηγορία αυτή συνοψίζονται ως εξής:

Πίνακας 3-3 Σύνοψη των φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Μεταφερόμενο είδος και μηχανισμός**
Fe-WO_3 / PMMA [45]	Fe-doped WO_3	PMMA	μεταφορά ηλεκτρονίων/πρωτονίων υποβοηθούμενη από ατέλειες, φωτοχρωμική μετατροπή W^{6+}/W^{5+}
WO_3 / PMMA [46]	νανοχρωστικές WO_3	PMMA	φωτοεπαγόμενη μεταφορά ηλεκτρονίων, μετατροπή W^{6+}/W^{5+}
YHO [48]	yttrium oxyhydride (YHO)	πολυμερική ενθυλάκωση	φωτοχρωμισμός υποβοηθούμενος από ατέλειες, μέσω κενών θέσεων υδριδικών και οξειδικών ανιόντων
WO_3 / PET [47]	WO_3	PET	φωτοεπαγόμενη μεταφορά ηλεκτρονίων



Σχήμα 3-8 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων.

Με βάση τον μηχανισμό που περιγράφηκε παραπάνω, οι καμπύλες φασματικής διαπερατότητας του Σχήμα 3-8 δείχνουν ότι η ίδια βασική ενεργοποίηση μέσω ακτινοβόλησης μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά φασματικά εύρη μεταβολής, ανάλογα με τη διαδρομή ατελειών που εμπλέκεται. Στον κλάδο WO_3, η απόκριση συνδέεται με την αναγωγή του βολφραμίου και τον σχηματισμό μικτών καταστάσεων σθένους W^{5+}/W^{6+}, γεγονός που εμφανίζεται κυρίως ως σκουρόχρωση στην ορατή περιοχή στο film νανοχρωστικών WO_3/PMMA [46]. Στην περίπτωση αυτή, η απόκριση εκτείνεται μόνο μερικώς

στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή και στη συνέχεια εξασθενεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Αυτό δείχνει ότι η βασική διαδρομή χρωματισμού του WO_3 δεν παρέχει απαραίτητα σταθερή ρύθμιση της εγγύς υπέρυθρης περιοχής σε όλο το μετρούμενο φασματικό εύρος. Αν και το Fe-WO_3/PMMA σύστημα [45] βασίζεται στον ίδιο φωτοχρωμικό μηχανισμό με κέντρο το βολφράμιο, η φασματική του απόκριση εκφράζεται εντονότερα στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Η αρχική μείωση στην περιοχή NIR αποδίδεται σε απορρόφηση τύπου LSPR από φωτοπαραγόμενα ηλεκτρόνια στο WO_3, ενώ η μεταγενέστερη σκουρόχρωση στην ορατή περιοχή συνδέεται με απορρόφηση μικρών πολαρονίων μεταξύ W^{6+} και W^{5+} [45]. Η διάκριση αυτή εξηγεί γιατί τα δύο συστήματα με βάση το PMMA μπορούν να εμφανίζονται παρόμοια σε μεγάλο μέρος της ορατής περιοχής, αλλά να διαφοροποιούνται έντονα σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η πρόσμιξη με Fe και ο έλεγχος σε επίπεδο νανοσωματιδίων φαίνεται να ενισχύουν τη συμβολή των ελεύθερων φορέων φορτίου στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή, ενώ το film WO_3/PMMA χωρίς πρόσμιξη παραμένει πιο κοντά σε ορατοκεντρική φωτοχρωμική απόκριση WO_3.

Πιο περιορισμένη απόκριση παρατηρείται στο νανοκεραμικό φωτοχρωμικό film αναβάθμισης WO_3/PET [47]. Σε αντίθεση με τα συστήματα WO_3 με βάση το PMMA, η περίπτωση αυτή δεν αποτελεί απλό σύνθετο υμένιο WO_3/πολυμερούς, αλλά πλήρες υμένιο αναβάθμισης, στο οποίο δύο νανοκεραμικές φωτοχρωμικές στρώσεις με βάση το WO_3 έχουν εναποτεθεί με τεχνική sputtering σε εύκαμπτα υποστρώματα PET και περικλείονται από υμένια αναστολής της UV ακτινοβολίας. Με την αύξηση της UV ή της ηλιακής έκθεσης, η προσαρμοστική μεταβολή εκφράζεται κυρίως ως μείωση της ορατής διαπερατότητας, ενώ οι καμπύλες της εγγύς υπέρυθρης περιοχής σχεδόν επικαλύπτονται μεταξύ διαυγούς και χρωματισμένης κατάστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8. Αυτό δείχνει ότι η προσαρμοστική οπτική μεταβολή του συγκεκριμένου film αναβάθμισης κυριαρχείται από ορατή φωτοχρωμική σκουρόχρωση, ενώ η πολυστρωματική αρχιτεκτονική PET/στρώσεις αναστολής UV περιορίζει τον βαθμό στον οποίο η απόκριση με βάση το WO_3 εμφανίζεται ως ευρύτερη ρύθμιση της εγγύς υπέρυθρης περιοχής.

Αντίθετα, το φωτοχρωμικό υμένιο οξυϋδριδίου υττρίου (YHO) ακολουθεί διαφορετική διαδρομή ατελειών, η οποία παράγει ευρύτερη φασματική απόκριση. Εδώ, η φωτοεπαγόμενη σκουρόχρωση συνδέεται με κενές θέσεις υδριδικών και οξειδικών ανιόντων στο μικτό ανιοντικό πλέγμα, και όχι με αναγωγή με κέντρο το βολφράμιο. Η φωτοεπαγόμενη σκουρόχρωμη κατάσταση παρουσιάζει πολύ βαθύτερη και πιο εκτεταμένη απώλεια διαπερατότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-8, κάτι που είναι συνεπές με απορρόφηση μέσω καταστάσεων κενών θέσεων υδριδίου και οξυγόνου στο μικτό ανιοντικό πλέγμα [48]. Σε σχέση με τις περιπτώσεις που βασίζονται στο WO_3, η διαφορά δεν αφορά μόνο το υλικό, αλλά τη διαδρομή του μηχανισμού και τη φασματική της έκφραση. Το YHO εκφράζει τη μετάβαση μέσω απορρόφησης που σχετίζεται με κενές θέσεις σε ευρύτερο μετρούμενο φασματικό εύρος, ενώ τα συστήματα με βάση το WO_3 την εκφράζουν μέσω απορρόφησης W^{6+}/W^{5+}, η οποία διαμορφώνεται από τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική σύνθετου υμενίου ή υμενίου αναβάθμισης.

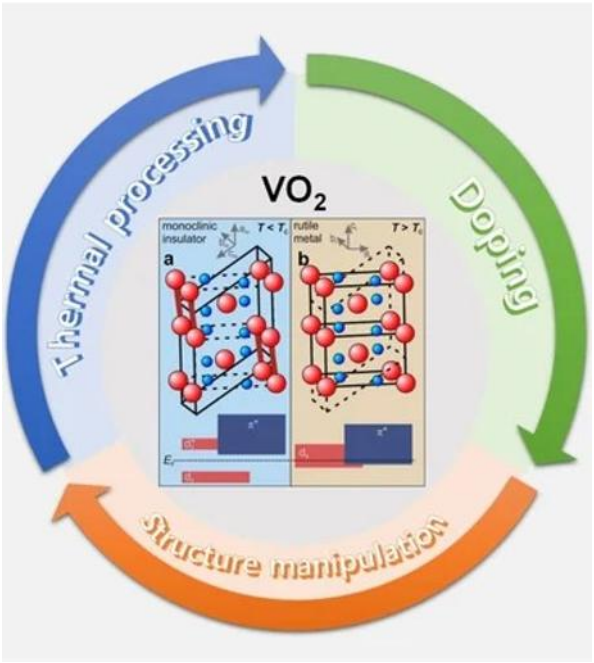
3.3.4 Συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής ή δομικής αναδιάταξης

3.3.4.1 Θερμοχρωμικά συστήματα που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικής μετάβασης

Στην υποκατηγορία αυτή, η οπτική μετάβαση ελέγχεται από έναν αντιστρεπτό δομικό φασικό μετασχηματισμό του ίδιου του ενεργού υλικού. Στα θερμοχρωμικά συστήματα με βάση το VO_2, η ενεργή φάση σε χαμηλή θερμοκρασία είναι το μονοκλινές VO_2, το οποίο μετασχηματίζεται αντιστρεπτά

στη φάση ρουτιλίου σε υψηλότερη θερμοκρασία. Ο μετασχηματισμός αυτός συνοδεύεται από μεταβολή της ηλεκτρονικής δομής του υλικού και αποτελεί τη βασική φυσική αρχή της θερμοχρωμικής μετάβασης στα ανόργανα συστήματα VO_2 [50]. Επομένως, το καθοριστικό χαρακτηριστικό αυτής της οικογένειας δεν είναι η παρουσία μιας δευτερεύουσας μήτρας, η αρχιτεκτονική της επίστρωσης, η πρόσμιξη ή η επιφανειακή επεξεργασία, αλλά το γεγονός ότι το ενεργό μέσο μετάβασης παραμένει το VO_2, το οποίο υφίσταται τον χαρακτηριστικό μετασχηματισμό από τη μονοκλινή φάση στη φάση ρουτιλίου.

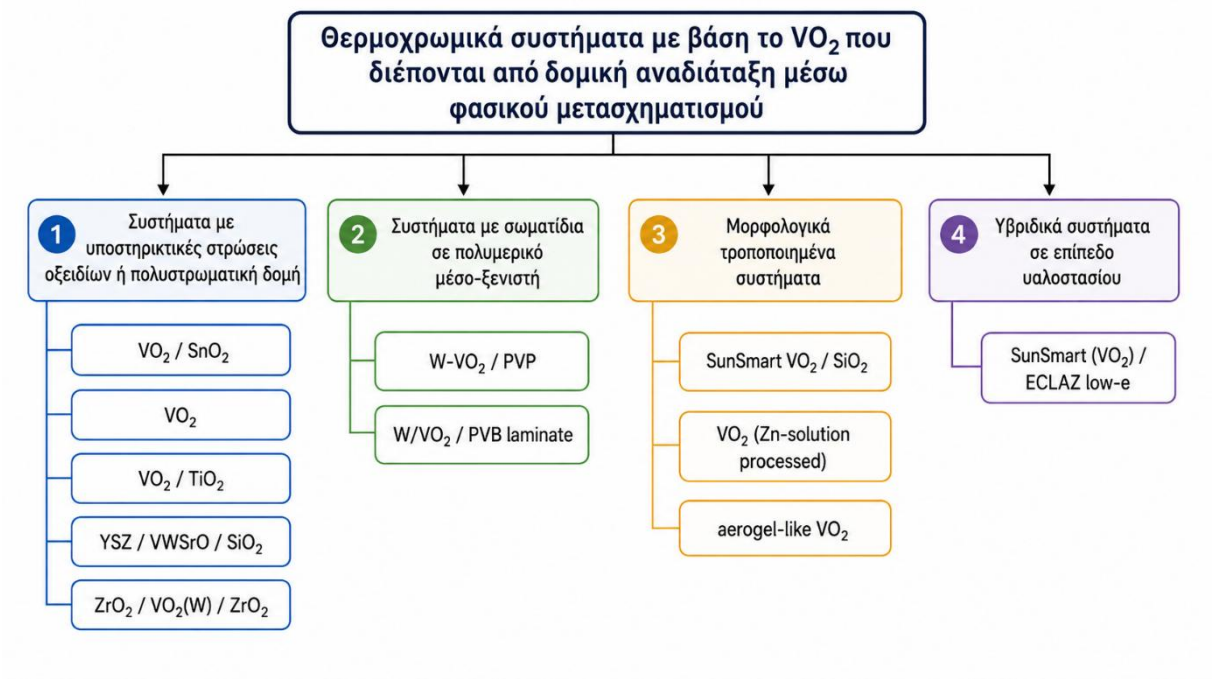
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η υποκατηγορία αυτή περιλαμβάνει θερμοχρωμικά συστήματα με βάση το VO_2, στα οποία το ενεργό συστατικό μετάβασης παραμένει το διοξείδιο του βαναδίου με αυτή τη δομική–θερμοχρωμική έννοια, ανεξάρτητα από επιμέρους μεταβολές στη σύσταση ή στην αρχιτεκτονική του συστήματος. Οι περιπτώσεις που διατηρούνται περιλαμβάνουν επιστρώσεις VO_2 χωρίς πρόσμιξη, συστήματα VO_2 με πρόσμιξη W, επιστρώσεις VO_2 με υποστήριξη από οξείδια ή πολυστρωματική δομή, πολυμερικά ή laminate συστήματα με σωματίδια VO_2, VO_2 films με ελεγχόμενη μορφολογία και μία υβριδική διάταξη VO_2/low-e σε επίπεδο υαλοστασίου. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν ως προς τη μέθοδο παρασκευής, τη μορφολογία, την περιεκτικότητα σε πρόσμιξη, το μέσο-ξενιστή και τη συνολική σχεδίαση της διαστρωμάτωσης. Ωστόσο, ομαδοποιούνται επειδή καμία από αυτές τις τροποποιήσεις δεν αλλάζει την ταυτότητα της ενεργής φάσης μετάβασης: η θερμοχρωμική απόκριση εξακολουθεί να αποδίδεται στο ίδιο το VO_2.



Σχήμα 3-9 Σχηματική αναπαράσταση του θερμοχρωμικού φασικού μετασχηματισμού του VO_2. Η μονοκλινής ημιαγώγιμη φάση χαμηλής θερμοκρασίας μετασχηματίζεται στη μεταλλική φάση ρουτιλίου υψηλής θερμοκρασίας [51].

Πίνακας 3-4 Σύνοψη των θερμοχρωμικών συστημάτων με βάση το VO_2 που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και τον μηχανισμό μετάβασης.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Μηχανισμός μετάβασης**
VO_2 / SnO_2 [52]	VO_2	SnO_2	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
SunSmart VO_2 / SiO_2 [53]	VO_2	SiO_2	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
SunSmart (VO_2) / ECLAZ low-e [53]	VO_2	Low-e επίστρωση με βάση Ag	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
W-VO_2 / PVP [54]	VO_2(M) με πρόσμιξη W	PVP	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
VO_2 [55]	VO_2	-	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
VO_2 / TiO_2 [55]	VO_2	TiO_2 + πολυμερικό υπόστρωμα Kapton CS	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
YSZ / VWSrO / SiO_2 [56]	$V_{0.855}W_{0.018}Sr_{0.127}O_2$	YSZ + SiO_2	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
ZrO_2 / VO_2(W) / ZrO_2 [57]	$V_{0.982}W_{0.018}O_2$	ZrO_2	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
W/VO_2 / PVB laminate [50]	W/VO_2	PVB	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
VO_2 (Zn-solution processed) [58]	VO_2	Επιφανειακή επεξεργασία με διάλυμα Zn	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος
aerogel-like VO_2 [59]	Νανοκρυσταλλικό VO_2	-	Αναδιάταξη ατομικού πλέγματος



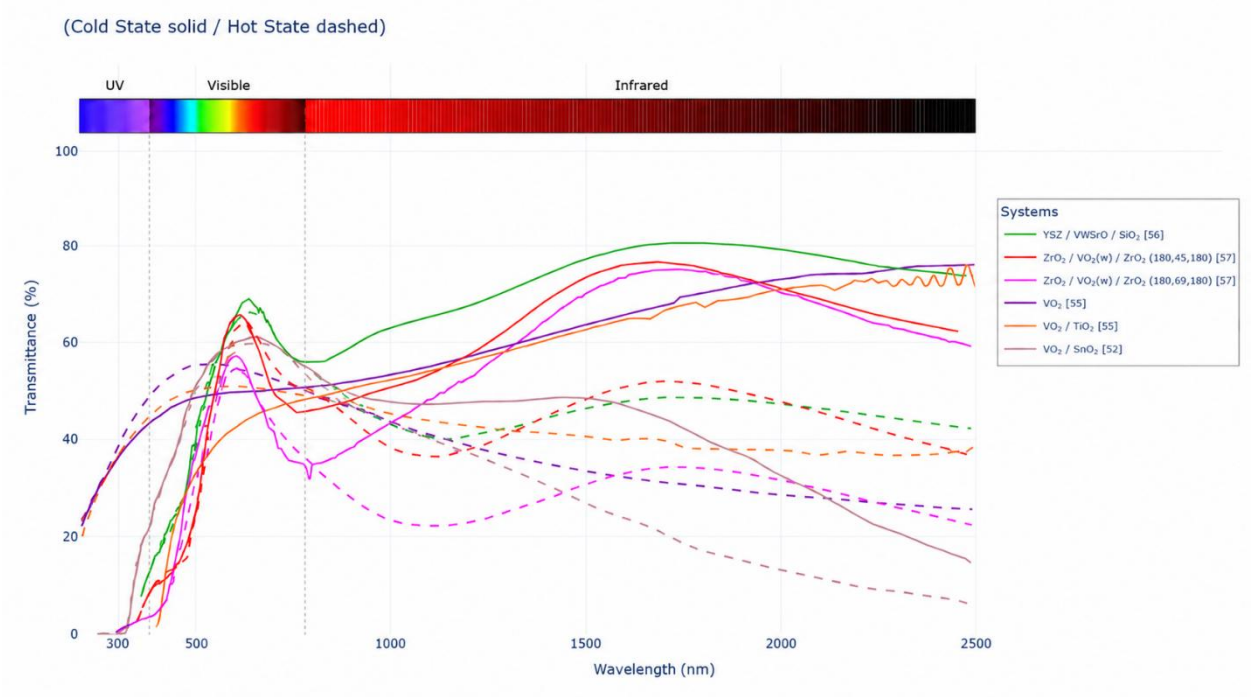
Σχήμα 3-10 Ταξινόμηση των θερμοχρωμικών συστημάτων με βάση το VO_2 που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού, καθώς και των κύριων υποκατηγοριών τους.

Παρότι όλα τα συστήματα αυτής της υποομάδας βασίζονται στον ίδιο φασικό μετασχηματισμό του VO_2, η μετρούμενη φασματική τους απόκριση επηρεάζεται έντονα από την τελική μορφή του υλικού ή του υαλοστασίου. Για τον λόγο αυτό, η φασματική απόκριση εξετάζεται μέσα από συγκρίσιμες ομάδες συστημάτων και όχι ως ένα ενιαίο, αδιαφοροποίητο σύνολο. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει υμένια VO_2 και ανόργανες διαστρωματώσεις οξειδίων, όπου η απόκριση διαμορφώνεται κυρίως από την ποιότητα της επίστρωσης, τις υποστηρικτικές στρώσεις οξειδίων, τις προσμίξεις και τον οπτικό σχεδιασμό της διαστρωμάτωσης. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει πολυμερικά, laminate και σωματιδιακά συστήματα VO_2, όπου το μέγεθος των σωματιδίων, η διασπορά και η μήτρα-ξενιστής επηρεάζουν καθοριστικά το τελικό προφίλ διαπερατότητας. Μια τρίτη ομάδα περιλαμβάνει μορφολογικά τροποποιημένα συστήματα VO_2, στα οποία το πορώδες, η κατανομή των περιοχών VO_2 ή η σύνθετη νανοδομή χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της ισορροπίας μεταξύ ορατής διαπερατότητας και υπέρυθρης μεταβολής. Τέλος, η περίπτωση SunSmart × ECLAZ [53] εξετάζεται ως υβριδική διάταξη σε επίπεδο υαλοστασίου, όπου η απόκριση του VO_2 συνδυάζεται με τη φασματική διήθηση ενός υαλοπίνακα με low-e επίστρωση.

Όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 3-11, στα υμένια VO_2 και στις ανόργανες διαστρωματώσεις οξειδίων, ο φασματικός διαχωρισμός μεταξύ ψυχρής και θερμής κατάστασης ακολουθεί την αναμενόμενη θερμοχρωμική συμπεριφορά του VO_2. Η μεταβολή δεν εμφανίζεται ως ομοιόμορφη μείωση της διαπερατότητας σε όλο το φάσμα, αλλά κυρίως ως ρύθμιση στο υπέρυθρο τμήμα του ηλιακού φάσματος. Στο VO_2/SnO_2 [52] ή σε μονοστρωματικές επιστρώσεις τύπου VO_2 [55], ο φασικός μετασχηματισμός μπορεί να προκαλέσει σαφή διαχωρισμό ψυχρής–θερμής κατάστασης στην υπέρυθρη περιοχή, αλλά η ορατή διαπερατότητα παραμένει ευαίσθητη στην ποιότητα, το πάχος, την κρυσταλλικότητα και τη μικροδομή του υμενίου.

Σε διατάξεις με υποστηρικτικές στρώσεις οξειδίων ή πολυστρωματική δομή, όπως VO_2/TiO_2 [55], ZrO_2/VO_2(W)/ZrO_2 [57] και YSZ/VWSrO/SiO_2 [56], οι προσμίξεις και οι στρώσεις οπτικής

προσαρμογής χρησιμοποιούνται ώστε η ίδια θερμοχρωμική απόκριση του VO_2 να γίνει πιο χρήσιμη σε επίπεδο παραθύρου. Η πρόσμιξη με W μετατοπίζει τη θερμοκρασία μετασχηματισμού προς χαμηλότερες τιμές από την εγγενή τιμή του VO_2, που είναι περίπου 68 °C, προς εύρος καταλληλότερο για θερμοχρωμικά υαλοστάσια (κοντά στους 20–25 °C ή και χαμηλότερα). Παράλληλα, η ενσωμάτωση Sr και οι αντι-ανακλαστικές στρώσεις οξειδίων, όπως ZrO_2, YSZ και SiO_2, συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών στην ορατή περιοχή και στη διατήρηση υψηλότερης φωτεινής διαπερατότητας. Στις περιπτώσεις αυτές, ο μηχανισμός μετάβασης παραμένει ο φασικός μετασχηματισμός του πλέγματος του VO_2, αλλά το τελικό φασματικό αποτέλεσμα διαμορφώνεται από τη διαστρωμάτωση γύρω από την ενεργή στρώση.



Σχήμα 3-11 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών συστημάτων υμενίων και διαστρωματώσεων οξειδίων με βάση το VO_2, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού.

Τα συστήματα VO_2 σε πολυμερικό μέσο-ξενιστή που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-12 εμφανίζουν διαφορετικό τύπο φασματικού περιορισμού σε σχέση με τις διαστρωματώσεις οξειδίων. Στο W/VO_2/PVB laminate [50], οι καμπύλες ψυχρής και θερμής κατάστασης διαχωρίζονται κυρίως εκτός της ορατής περιοχής, αλλά το φάσμα δεν είναι ομαλό. Η μετρούμενη διαπερατότητα παρουσιάζει τοπικές μειώσεις και ανωμαλίες, οι οποίες είναι συμβατές με σωματιδιακή ενδιάμεση στρώση σε πολυστρωματική διάταξη και όχι με συνεχή επίστρωση. Για το συγκεκριμένο laminate, η μελέτη προέλευσης αναγνωρίζει το μέγεθος των νανοσωματιδίων, τη διασπορά και τη θολότητα ως κρίσιμες παραμέτρους. Αυτό σημαίνει ότι το πολυμερικό μέσο-ξενιστής επηρεάζει όχι μόνο το μέγεθος της υπέρυθρης ρύθμισης, αλλά και την οπτική καθαρότητα του laminate [50].

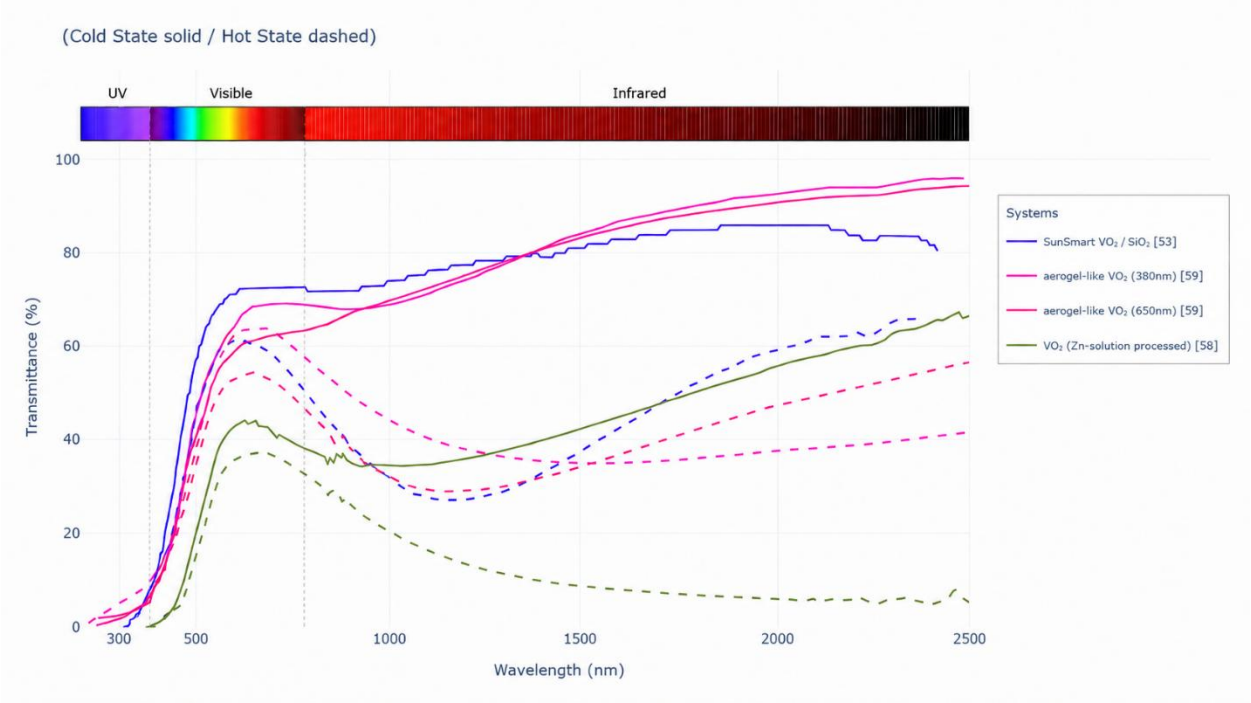
Το σύνθετο υμένιο W-VO_2/PVP [54] παρουσιάζει καθαρότερο φασματικό προφίλ, με σχετικά μικρή μεταβολή στην ορατή περιοχή και ισχυρότερη διαφορά ψυχρής–θερμής κατάστασης στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Σε αυτή την περίπτωση, η μήτρα PVP λειτουργεί ως μέσο-ξενιστής της σωματιδιακής φάσης VO_2 με πρόσμιξη W. Επομένως, η χρήσιμη απόκριση εξαρτάται από τη διατήρηση επαρκούς διασποράς των σωματιδίων, χωρίς υπερβολική ορατή απορρόφηση. Τα δύο συστήματα που παρουσιάζονται υποστηρίζουν το ίδιο συμπέρασμα μέσα από διαφορετικές αρχιτεκτονικές: η ενσωμάτωση του VO_2 σε πολυμερικό μέσο μπορεί να το καταστήσει αξιοποιήσιμο σε μορφή υμενίου ή laminate, αλλά το τελικό φάσμα ελέγχεται από συμβιβασμό μεταξύ ισχύος υπέρυθρης μετάβασης, ορατής διαπερατότητας και οπτικών απωλειών που προκαλούνται από τα σωματίδια.



Σχήμα 3-12 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικών σωματιδιακών συστημάτων VO_2 σε πολυμερικό μέσο-ξενιστή, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού.

Η ομάδα των μορφολογικά τροποποιημένων συστημάτων VO_2 περιλαμβάνει περιπτώσεις στις οποίες η φασματική απόκριση επηρεάζεται έντονα από τη δομή σε νανοκλίμακα: περιοχές VO_2 διεσπαρμένες σε μήτρα πλούσια σε SiO_2, επιφάνεια VO_2 επεξεργασμένη με Zn ή πορώδες νανοκρυσταλλικό δίκτυο VO_2. Στην επίστρωση SunSmart VO_2/SiO_2 [53], η μήτρα πλούσια σε SiO_2 διαχωρίζει και οπτικά αραιώνει τις περιοχές VO_2. Έτσι, η επίστρωση αποφεύγει την έντονη ορατή απορρόφηση που θα αναμενόταν από μια πυκνή στρώση VO_2, ενώ διατηρεί σαφή μείωση στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή μετά τον φασικό μετασχηματισμό. Το αποτέλεσμα είναι μια πιο επιλεκτική απόκριση από μια απλή ευρυφασματική σκουρόχρωση: η ορατή περιοχή διατηρείται σε μεγάλο βαθμό, ενώ ο διαχωρισμός ψυχρής–θερμής κατάστασης γίνεται πιο σημαντικός σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, όπου επηρεάζονται κυρίως τα ηλιακά θερμικά κέρδη, βλ. Σχήμα 3-13.

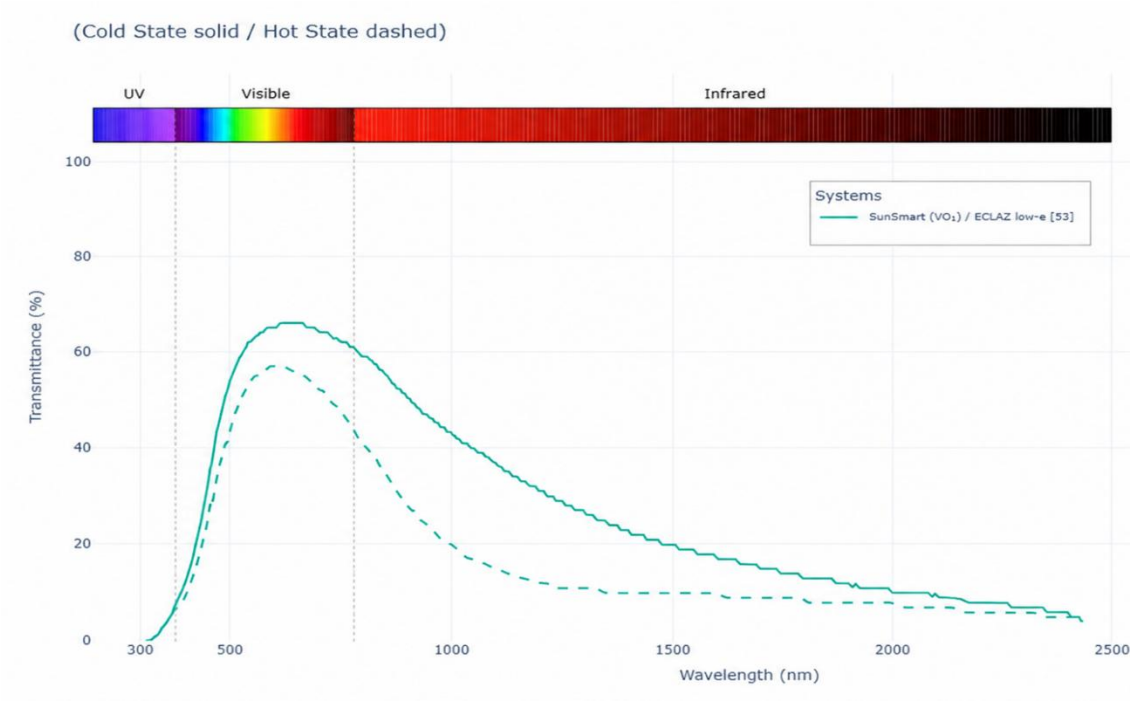
Το υμένιο VO_2 με επεξεργασία διαλύματος Zn [58] συμπεριφέρεται περισσότερο ως συμπαγής επίστρωση, αλλά η επιφανειακή επεξεργασία με Zn τροποποιεί την υφή του υμενίου και μειώνει τις μορφολογικές οπτικές απώλειες, δίνοντας πιο ομαλό φάσμα με διατηρημένη υπέρυθρη ρύθμιση. Οι επιστρώσεις VO_2 τύπου αερογέλης [59] αποτελούν την πιο πορώδη περίπτωση αυτής της ομάδας. Το νανοκρυσταλλικό τους δίκτυο μειώνει τη συνολική οπτική πυκνότητα και τροποποιεί τη σκέδαση και τη διάδοση του φωτός μέσα από το υμένιο, γεγονός που εξηγεί γιατί σχετικά υψηλή διαπερατότητα μπορεί να συνυπάρχει με μετρήσιμη μείωση της διαπερατότητας στην υπέρυθρη περιοχή στη θερμή κατάσταση. Στο Σχήμα 3-13, τα τέσσερα συστήματα παρουσιάζουν διαφορετική κατανομή της θερμοχρωμικής αντίθεσης στην ορατή και την εγγύς υπέρυθρη περιοχή, η οποία προκύπτει αντίστοιχα από την αραίωση σε μήτρα, την επιφανειακή επεξεργασία και την πορώδη νανοδομή.



Σχήμα 3-13 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας μορφολογικά τροποποιημένων θερμοχρωμικών συστημάτων VO_2, τα οποία διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού.

Μετά τις περιπτώσεις σε επίπεδο υλικού, η διάταξη SunSmart/ECLAZ [53] εισάγει ένα επιπλέον επίπεδο φασματικής αλληλεπίδρασης, επειδή η θερμοχρωμική απόκριση του SunSmart δεν αξιολογείται πλέον μεμονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με εμπορικό low-e υαλοπίνακα ECLAZ. Στην περίπτωση αυτή, το SunSmart λειτουργεί ως θερμοχρωμικό γυαλί με βάση το VO_2, ενώ το ECLAZ αποτελεί υαλοπίνακα χαμηλής εκπεμπτικότητας. Έτσι, μέρος της διαπερατότητας στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή έχει ήδη περιοριστεί από το low-e στοιχείο πριν ληφθεί υπόψη η πρόσθετη θερμοχρωμική απόκριση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14. Ο φασικός μετασχηματισμός του VO_2 παραμένει η πηγή της θερμοκρασιακά εξαρτώμενης μεταβολής, αλλά η παρουσία του ECLAZ περιορίζει το φασματικό εύρος μέσα στο οποίο μπορεί να εκδηλωθεί. Συνολικά, τα συστήματα με βάση το VO_2 δείχνουν ότι το κοινό φασματικό τους αποτύπωμα δεν είναι η εξασθένηση σε ολόκληρο το φασματικό εύρος, αλλά μια θερμοκρασιακά επαγόμενη μεταβολή που εκφράζεται κυρίως στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Η χρησιμότητα αυτής της επιλεκτικής υπέρυθρης απόκρισης εξαρτάται από το αν ο συνολικός σχεδιασμός

του υαλοστασίου μπορεί να διατηρήσει την ορατή διαπερατότητα, επιτρέποντας ταυτόχρονα στη θερμοχρωμική διαφορά διαπερατότητας του VO_2 στην ηλιακή υπέρυθρη περιοχή να παραμένει λειτουργικά αποτελεσματική.



Σχήμα 3-14 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας υβριδικού θερμοχρωμικού συστήματος με βάση το VO_2 σε επίπεδο υαλοστασίου, το οποίο διέπεται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού.

3.3.4.2 Θερμοχρωμικά συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής

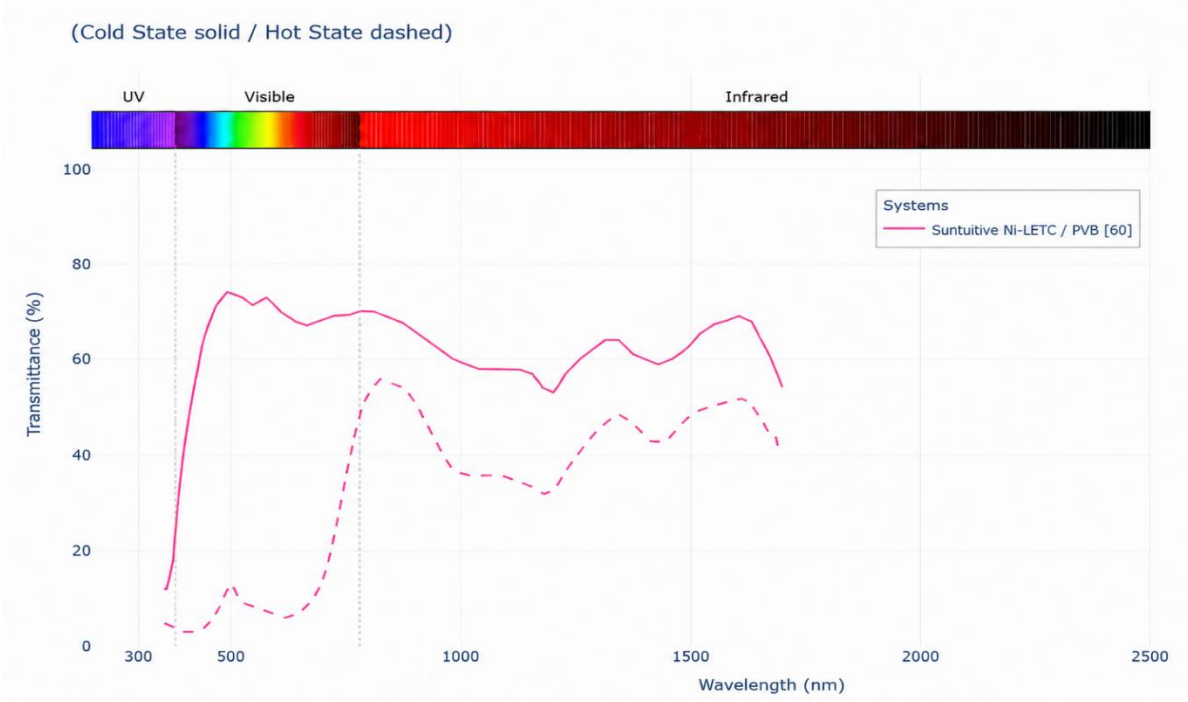
Στην υποκατηγορία αυτή, η θερμοχρωμική μετάβαση ελέγχεται από θερμοκρασιακά επαγόμενη αναδιάταξη του περιβάλλοντος συναρμογής γύρω από το ενεργό μεταλλικό κέντρο, και όχι από δομικό φασικό μετασχηματισμό ανόργανου κρυσταλλικού πλέγματος. Στα θερμοχρωμικά συστήματα ανταλλαγής υποκαταστατών, το κεντρικό μεταλλικό ιόν συναρμόζεται με διαφορετικούς υποκαταστάτες καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Η διεργασία αυτή τροποποιεί το πεδίο υποκαταστατών και, κατά συνέπεια, τη συμπεριφορά απορρόφησης του χρωμογενούς συμπλόκου. Ο μηχανισμός ακολουθεί επομένως διαδρομή αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής, στην οποία το ενεργό χρωμογενές είδος παραμένει σύμπλοκο μετάλλου–υποκαταστάτη ενσωματωμένο σε μέσο-ξενιστή, και όχι στερεό τύπου VO_2 που υφίσταται μετασχηματισμό κρυσταλλικής δομής [23].

Η αντιπροσωπευτική περίπτωση που εξετάζεται εδώ είναι το Pleotint Suntuitive™ laminated glazing [60], το οποίο βασίζεται σε θερμοχρωμική ενδιάμεση στρώση ανταλλαγής υποκαταστατών ενσωματωμένη σε laminate πολυβινυλοβουτυράλης (PVB). Το ενεργό είδος είναι σύμπλοκο συναρμογής με βάση το Ni, διασπαρμένο στην πολυμερική ενδιάμεση στρώση. Καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία, η ανταλλαγή προσδεμάτων/ligands τροποποιεί το περιβάλλον συναρμογής γύρω από το κέντρο Ni και η θερμοχρωμική απόκριση παράγεται μέσα στην ίδια την ενδιάμεση στρώση. Συνεπώς, το συνολικό σύστημα αποτελεί διάταξη πολυστρωματικού υαλοστασίου (laminated glazing), στην

οποία η χρωμογενής λειτουργία είναι ενσωματωμένη στην ενδιάμεση στρώση PVB, και όχι ανόργανη επίστρωση που έχει αποτεθεί απευθείας πάνω στο γυαλί.

Πίνακας 3-5 Σύνοψη του θερμοχρωμικού συστήματος που διέπεται από μηχανισμό αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό, τη δομή-ξενιστή και τον μηχανισμό μετάβασης.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Δομή-ξενιστής**	**Μηχανισμός μετάβασης**
Suntuitive Ni-LETC / PVB [60]	σύμπλοκο συναρμογής με βάση το Ni	οργανικοί υποκαταστάτες	ενδιάμεση στρώση PVB	ανταλλαγή ligands / αναδιάταξη περιβάλλοντος συναρμογής



Σχήμα 3-15 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας θερμοχρωμικού συστήματος που διέπεται από μηχανισμό αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής.

Η περίπτωση αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής παρουσιάζει διαφορετικό προφίλ φασματικής απόκρισης από τα θερμοχρωμικά συστήματα VO_2 που εξετάστηκαν προηγουμένως. Στο Suntuitive Ni-LETC/PVB [60] υαλοστάσιο, η θερμοκρασιακά εξαρτώμενη μεταβολή του περιβάλλοντος μετάλλου–υποκαταστάτη επηρεάζει κυρίως τη συμπεριφορά απορρόφησης της ενδιάμεσης στρώσης. Ως αποτέλεσμα, η καμπύλη της θερμής κατάστασης δεν εμφανίζεται ως κυρίως υπέρυθρα επιλεκτική απόκριση. Αντίθετα, η ισχυρότερη διαφοροποίηση μεταξύ ψυχρής και θερμής κατάστασης παρατηρείται στην ορατή περιοχή, ενώ η μείωση της διαπερατότητας συνεχίζεται πιο ήπια

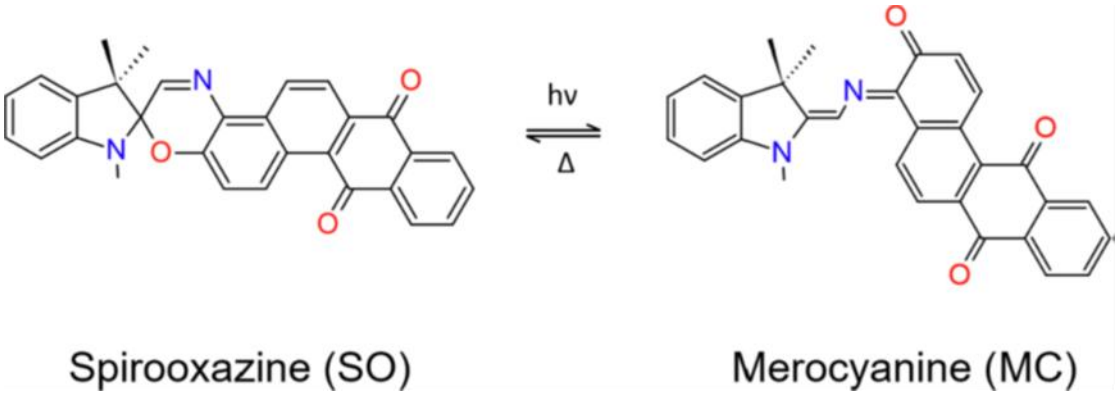
προς την εγγύς υπέρυθρη περιοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-15. Η συμπεριφορά αυτή είναι συμβατή με μεταβολή της χρωματικής πυκνότητας μέσα στην ενεργή ενδιάμεση στρώση, η οποία καθοδηγείται από την αναδιάταξη του περιβάλλοντος συναρμογής, και όχι με τη μεταλλική υπέρυθρη απόκριση που συνδέεται με τον φασικό μετασχηματισμό του VO_2.

Η φασματική αυτή διαφοροποίηση αποσαφηνίζει και τον ρόλο του συστήματος στη συνολική σύγκριση. Η φασματική του απόκριση το καθιστά περισσότερο σύστημα ρύθμισης φυσικού φωτισμού, καθώς η θέρμανση προκαλεί ευρεία μείωση της μεταδιδόμενης ορατής ακτινοβολίας, με πιο μέτρια επέκταση προς την εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Επομένως, το προφίλ ελέγχου της εγγύς υπέρυθρης περιοχής είναι λιγότερο επιλεκτικό από εκείνο των θερμοχρωμικών συστημάτων VO_2 που διέπονται από δομική αναδιάταξη μέσω φασικού μετασχηματισμού. Από τις υπόλοιπες οικογένειες που διατηρούνται στην ανάλυση, η πλησιέστερη φασματική αναλογία είναι μόνο μερική και εμφανίζεται στην περίπτωση του περοβσκίτη που διέπεται από μετάβαση φάσης μέσω διάχυσης, όπου η μεταβολή είναι επίσης κυρίως προσανατολισμένη στην ορατή περιοχή, αλλά με πολύ ασθενέστερη συμβολή στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Το Suntuitive Ni-LETC/PVB [60] δεν διαχωρίζεται επομένως επειδή το φασματικό του προφίλ είναι απολύτως μοναδικό, αλλά επειδή η οπτική μεταβολή προέρχεται από θερμοκρασιακά επαγόμενη ανταλλαγή ligands γύρω από σύμπλοκο συναρμογής με βάση το Ni μέσα στην ενδιάμεση στρώση PVB, και όχι από δομική αναδιάταξη τύπου VO_2 ή από διαδρομή ενυδάτωσης/αφυδάτωσης μέσω υδρατμών H_2O.

3.3.4.3 Φωτοχρωμικά συστήματα που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής αναδιάταξης

Ο μοριακός φωτοχρωμισμός βασίζεται σε αντιστρεπτό φωτοεπαγόμενο μετασχηματισμό του ίδιου του χρωμογενούς μορίου. Σε αυτή την υποκατηγορία, η οπτική απόκριση δεν προκύπτει από ιοντική παρεμβολή, μεταφορά φορτίου μέσω ατελειών ή φασικό μετασχηματισμό στερεάς κατάστασης, αλλά από μοριακή αναδιάταξη μεταξύ μορφών με διαφορετική ηλεκτρονική δομή και διαφορετική συμπεριφορά απορρόφησης. Τα οργανικά φωτοχρωμικά μόρια ενεργοποιούνται από ακτινοβόληση σε συγκεκριμένες περιοχές μηκών κύματος και η μετάβαση τους συνδέεται με φωτοεπαγόμενη δομική μεταβολή. Στα συστήματα με spirooxazine, η ακτινοβόληση προκαλεί διάνοιξη του μοριακού δακτυλίου μέσω διάσπασης δεσμού στο σπειρο-κέντρο του μορίου, οδηγώντας στον σχηματισμό της ανοικτής, χρωματισμένης μορφής merocyanine. Με την απομάκρυνση του ερεθίσματος, το μόριο επανέρχεται στην κλειστή, άχρωμη μορφή spirooxazine [61].

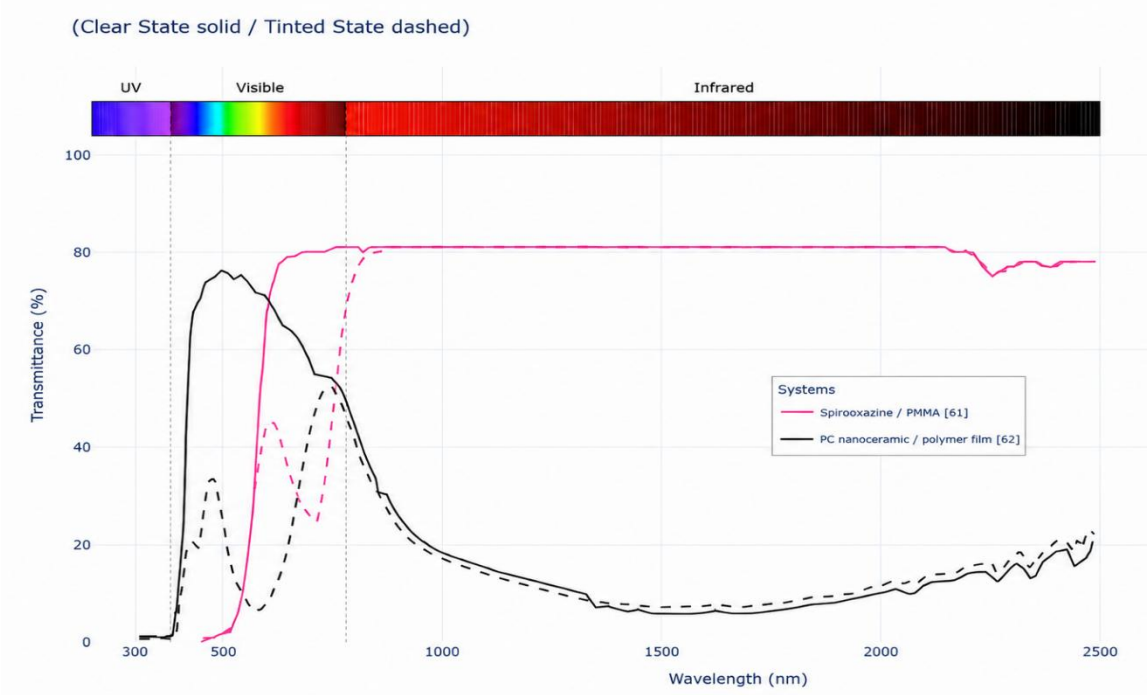
Τα δύο συστήματα που διατηρούνται στην υποκατηγορία αυτή είναι το Spirooxazine / PMMA [61] και το PC nanoceramic/polymer film [62]. Το Spirooxazine/PMMA film είναι φωτοχρωμικό υμένιο στο οποίο το ενεργό φωτοχρωμικό μόριο spirooxazine είναι διασπαρμένο σε μήτρα PMMA. Κατά την ακτινοβόληση, η spirooxazine μετασχηματίζεται στην ανοικτή μορφή merocyanine μέσω διάσπασης δεσμού στο σπειρο-κέντρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-16, παράγοντας τη χρωματισμένη κατάσταση. Μετά την απομάκρυνση του ερεθίσματος, το μόριο επανέρχεται στην κλειστή και άχρωμη μορφή spirooxazine. Στην περίπτωση του PC nanoceramic/polymer film, η ακριβής ενεργή σύσταση δεν δημοσιοποιείται, επειδή πρόκειται για εμπορικό υμένιο. Το υμένιο περιγράφεται ως πολυστρωματικό φωτοχρωμικό υμένιο με φωτοευαίσθητους νανοκεραμικούς κρυστάλλους ενσωματωμένους σε μήτρα-ξενιστή, οι οποίοι σκουραίνουν υπό ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως λόγω UV ενεργοποίησης, και επιστρέφουν στη διαυγή κατάσταση όταν μειώνεται η έκθεση στην UV ακτινοβολία.



Σχήμα 3-16 Αντιπροσωπευτική διαδρομή μοριακής φωτοχρωμικής μετάβασης για το Spirooxazine/PMMA film, όπου παρουσιάζεται ο αντιστρεπτός μετασχηματισμός μεταξύ της άχρωμης μορφής spirooxazine (SO) και της χρωματισμένης μορφής merocyanine (MC), υπό ακτινοβόληση και επακόλουθο αποχρωματισμό [61].

Πίνακας 3-6 Σύνοψη των φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής αναδιάταξης, με βάση το ενεργό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και τον μηχανισμό μετάβασης.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Μηχανισμός μετάβασης**
Spirooxazine / PMMA [61]	Spirooxazine (SO)	PMMA	φωτοεπαγόμενη μοριακή ισομερείωση
PC nanoceramic / polymer film [62]	νανοκεραμικοί φωτοχρωμικοί κρύσταλλοι	πολυστρωματικό πολυμερικό υμένιο	φωτοεπαγόμενη μοριακή αναδιάταξη (UV φωτοχρωμισμός)



Σχήμα 3-17 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας φωτοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής αναδιάταξης.

Η οπτική απόκριση αυτής της υποκατηγορίας καθορίζεται κυρίως από τον τρόπο με τον οποίο ο φωτοεπαγόμενος μοριακός μετασχηματισμός μεταβάλλει την απορρόφηση του ενεργού χρωμογενούς είδους. Στο Spirooxazine/PMMA film [61], η ακτινοβόληση προωθεί τον μετασχηματισμό της αρχικά άχρωμης μορφής spirooxazine στη χρωματισμένη μορφή merocyanine, δημιουργώντας χαρακτηριστική ζώνη απορρόφησης στην ορατή περιοχή. Αυτό αποτυπώνεται στις καμπύλες φασματικής διαπερατότητας ως τοπική μείωση της διαπερατότητας στην ορατή περιοχή, ενώ η εγγύς υπέρυθρη περιοχή δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από την ίδια τη φωτοχρωμική μετάβαση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17. Το σύστημα δείχνει επομένως μια μοριακή διαδρομή στην οποία η μετάβαση εκφράζεται κυρίως μέσω σχηματισμού χρώματος στην ορατή περιοχή, και όχι μέσω ευρείας ρύθμισης της ηλιακής διαπερατότητας.

Το PC nanoceramic/polymer film [62] παρουσιάζει επίσης σκουρόχρωση ενεργοποιούμενη από UV ακτινοβολία στην ορατή περιοχή, αλλά το συνολικό προφίλ φασματικής διαπερατότητας δεν μπορεί να ερμηνευθεί αποκλειστικά μέσω της φωτοχρωμικής μοριακής αναδιάταξης. Στην περίπτωση αυτή, η χαμηλή διαπερατότητα σε μεγάλο μέρος της εγγύς υπέρυθρης περιοχής υπάρχει ήδη στη διαυγή κατάσταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17. Αυτό δείχνει ότι η εξασθένηση στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή επηρεάζεται έντονα από την πολυστρωματική διαμόρφωση του υμενίου. Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τη δομή που αναφέρεται για το εμπορικό υμένιο, η οποία περιλαμβάνει οπτικές στρώσεις με βάση το PET και στρώση με σωματίδια περιορισμού υπέρυθρης ακτινοβολίας (anti-IR particles), πέρα από τη φωτοχρωμική λειτουργία. Επειδή όμως πρόκειται για εμπορικό σύστημα, η ακριβής χημική ταυτότητα των anti-IR σωματιδίων και η λεπτομερής σύσταση των λειτουργικών

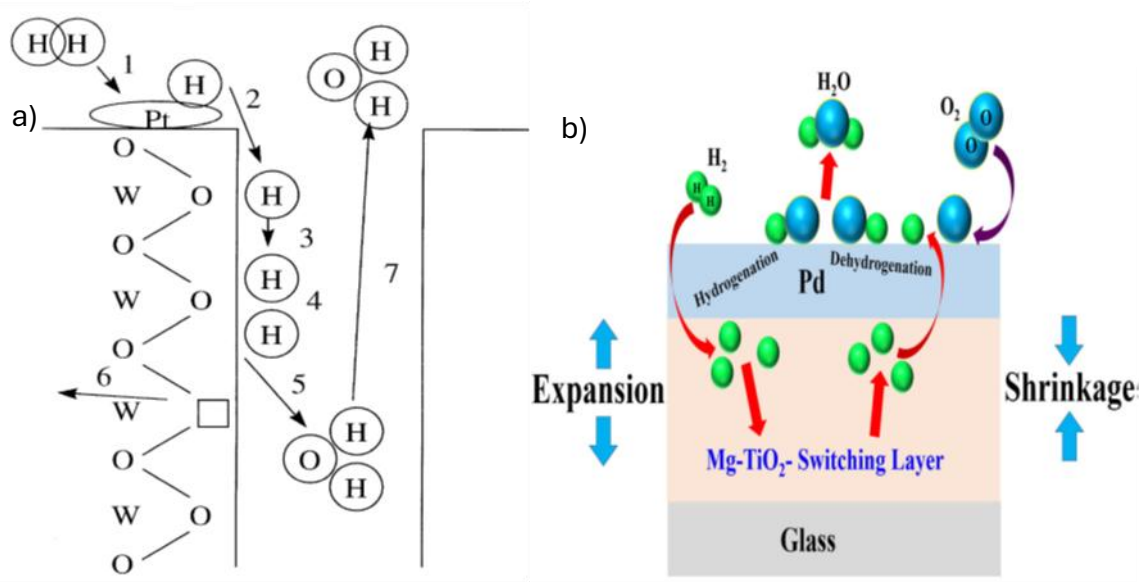
στρώσεων δεν δημοσιοποιούνται. Επομένως, ο φωτοχρωμικός μηχανισμός εξηγεί κυρίως την προσαρμοστική μεταβολή στην ορατή περιοχή, ενώ η απόκριση στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή συνδέεται περισσότερο με τον βοηθητικό οπτικό σχεδιασμό του υμενίου.

Συνολικά, η υποομάδα αυτή δείχνει ότι ο μοριακός φωτοχρωμισμός δεν αποτελεί από μόνος του πλήρη μηχανισμό ηλιακού ελέγχου σε όλο το μετρούμενο φασματικό εύρος. Η άμεση συνεισφορά του είναι η εξαρτώμενη από την ακτινοβόληση μείωση της ορατής διαπερατότητας. Οποιαδήποτε ενισχυμένη ρύθμιση της διαπερατότητας στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το φωτοχρωμικό συστατικό ενσωματώνεται στη μήτρα-ξενιστή, στην επίστρωση ή στην πολυστρωματική δομή του υμενίου ή του υαλοστασίου.

3.3.4.4 Συστήματα που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού

Οι καταλυτικά υποβοηθούμενοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού βασίζονται στην αλληλεπίδραση ενός εξωτερικού αέριου περιβάλλοντος με ένα ενεργό στερεό μέσο, συνήθως με τη βοήθεια μιας καταλυτικής επιφανειακής στρώσης [25]. Στην κατηγορία αυτή διακρίνονται δύο μηχανιστικά διαφορετικοί κλάδοι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Ο πρώτος περιλαμβάνει συστήματα χρωματισμού οξειδίου με βάση το WO_3, στα οποία το υδρογόνο διασπάται στην επιφάνεια του καταλύτη και τα παραγόμενα είδη μεταφέρονται στο οξείδιο του βολφραμίου, προκαλώντας χρωματισμό του υμενίου και επακόλουθο αποχρωματισμό κατά την έκθεση σε οξυγόνο [25]. Ο δεύτερος περιλαμβάνει συστήματα μετασχηματισμού μεταλλικών υδριδίων με βάση το Mg, στα οποία η οπτική μετάβαση ελέγχεται από την υδρογόνωση και αφυδρογόνωση της ίδιας της μεταλλικής στρώσης. Η διεργασία αυτή μεταβάλλει το σύστημα μεταξύ ανακλαστικής μεταλλικής κατάστασης και πιο διαπερατής κατάστασης υδριδίου. Στις μελέτες από τις οποίες αντλήθηκαν, τα συστήματα αυτά περιγράφονται ως switchable mirrors, ενώ στην παρούσα ταξινόμηση εντάσσονται με βάση τον υποκείμενο μηχανισμό μετασχηματισμού μετάλλου–υδριδίου.

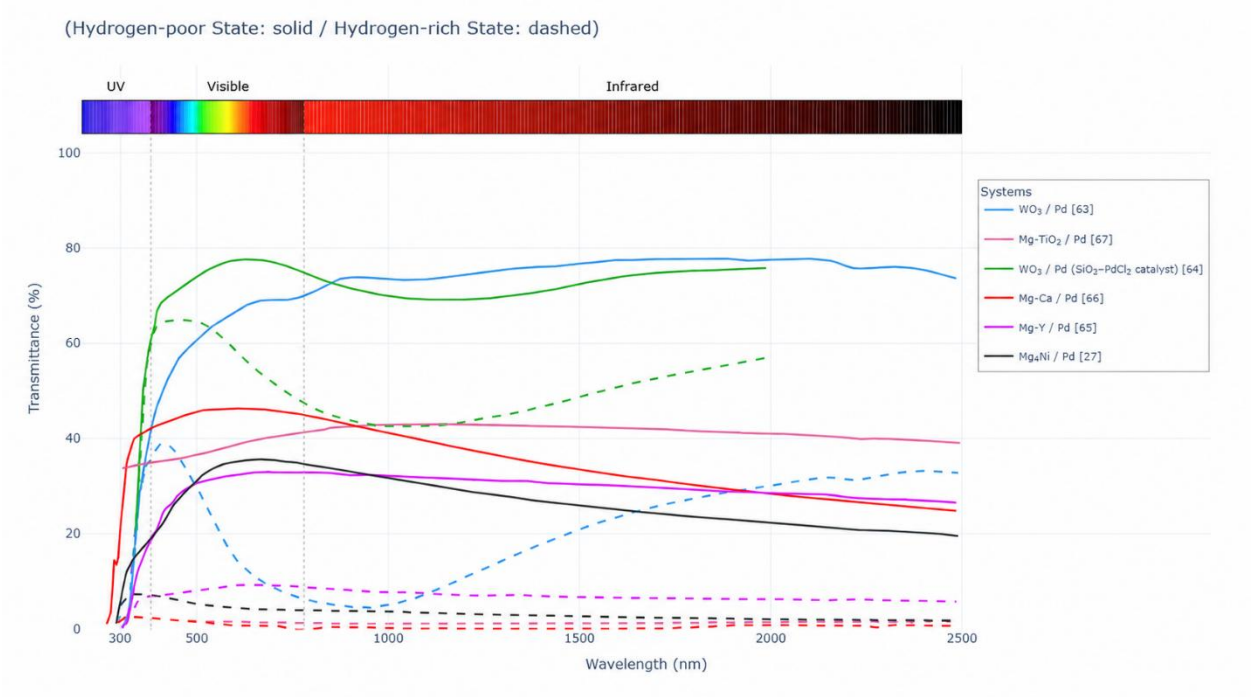
Τα αντιπροσωπευτικά συστήματα αυτής της ενότητας περιλαμβάνουν το σύστημα υάλωσης WO_3/Pd [63], το νανοπορώδες υμένιο WO_3/Pd [64], το Mg–Ni switchable mirror [27], το Mg–Y switchable mirror [65], το Mg–Ca switchable mirror [66] και το Mg–TiO_2-based switchable mirror [67]. Στον κλάδο του WO_3, τα συστήματα έχουν μορφή υμενίων ή υαλοστασίων με ενεργό στρώση οξειδίου του βολφραμίου και λεπτή καταλυτική στρώση Pd ή Pt. Η μετάβαση πραγματοποιείται μέσω καταλυτικά υποβοηθούμενου χρωματισμού και αποχρωματισμού του οξειδίου. Στον κλάδο των switchable mirrors με βάση το μαγνήσιο, η ενεργή στρώση είναι κράμα ή σύνθετη στρώση που αποκρίνεται στο υδρογόνο και μεταβαίνει αντιστρεπτά μεταξύ ανακλαστικής μεταλλικής κατάστασης και πιο διαπερατής κατάστασης υδριδίου. Η περίπτωση Mg–TiO_2 ανήκει στον ίδιο ευρύτερο κλάδο, αλλά εισάγει TiO_2 στην ενεργή στρώση με βάση το Mg, χωρίς το TiO_2 να αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη χρωμογενής φάση.



Σχήμα 3-18 Αντιπροσωπευτικοί καταλυτικά υποβοηθούμενοι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού. (a) Σχηματική αναπαράσταση χρωματισμού υμενίων με βάση το WO_3, ο οποίος προκαλείται από H_2 σε υμένια WO_3 με καταλύτη Pt και περιλαμβάνει διάσπαση H_2, διάχυση υδρογόνου και σχηματισμό χρωματισμένης ανηγμένης φάσης οξειδίου του βολφραμίου [25]. (b) Σχηματική αναπαράσταση αντιστρεπτής υδρογόνωσης/αφυδρογόνωσης σε στρώση μετάβασης με βάση το $Mg–TiO_2$ και επικάλυψη Pd, η οποία συνδέεται με διαστολή/συστολή του ενεργού υμενίου [67].

Πίνακας 3-7 Σύνοψη των συστημάτων που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού, με βάση το βασικό υλικό, το δευτερεύον συστατικό και το μεταφερόμενο είδος που καθορίζει τον μηχανισμό μετάβασης.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Μεταφερόμενο είδος και μηχανισμός**
Mg_4Ni / Pd [27]	κράμα Mg_4Ni	στρώση επικάλυψης Pd	H_2/O_2 – υδρογόνωση/αφυδρογόνωση
$Mg–TiO_2$ / Pd [67]	σύνθετη στρώση $Mg–TiO_2$	καταλυτική στρώση Pd	H_2/O_2 – υδρογόνωση/αφυδρογόνωση υποβοηθούμενη από διάχυση H
WO_3 / Pd [63]	WO_3	Pd	H_2/O_2 – εισαγωγή/εξαγωγή H^+/e^-
Mg–Y / Pd [65]	κράμα Mg–Y	Pd	H_2/O_2 – υδρογόνωση/αφυδρογόνωση
Mg–Ca / Pd [66]	κράμα Mg–Ca	Pd	H_2/O_2 – υδρογόνωση/αφυδρογόνωση
WO_3 / Pd ($SiO_2–PdCl_2$ catalyst) [64]	WO_3 (νανοπορώδες)	καταλύτης Pd (στρώση $SiO_2–PdCl_2$)	H_2/O_2 – καταλυτικά υποβοηθούμενη εισαγωγή/εξαγωγή H^+



Σχήμα 3-19 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας αεριοχρωμικών συστημάτων που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού

Σημείωση: *Ο εμπλουτισμός με υδρογόνο έχει αντίθετη οπτική επίδραση στους δύο αεριοχρωμικούς κλάδους. Στα υμένια με βάση το WO_3 μειώνει τη διαπερατότητα μέσω αεριοεπαγόμενου χρωματισμού, ενώ στα switchable mirrors με βάση το Mg αυξάνει τη διαπερατότητα, επειδή μετασχηματίζει την ανακλαστική μεταλλική κατάσταση σε πιο διαπερατή κατάσταση υδριδίου.*

Η μηχανιστική αυτή διάκριση αποτυπώνεται και στην κατεύθυνση της μεταβολής της διαπερατότητας. Στα συστήματα χρωματισμού οξειδίου με βάση το WO_3 [63], [64], η αντίδραση που ενεργοποιείται από το υδρογόνο εκφράζεται ως μετάβαση από αποχρωματισμένη κατάσταση υψηλής διαπερατότητας σε χρωματισμένη κατάσταση χαμηλότερης διαπερατότητας σε όλο το μετρούμενο φασματικό εύρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-19. Η κατεύθυνση αυτή είναι συνεπής με τον καταλυτικά υποβοηθούμενο χρωματισμό οξειδίου: το υδρογόνο διασπάται στον καταλύτη, μεταφέρεται στη στρώση WO_3 και δημιουργεί ανηγμένες οπτικά ενεργές καταστάσεις, ενώ η έκθεση σε οξυγόνο επαναφέρει την αποχρωματισμένη κατάσταση [25]. Οι καμπύλες φασματικής διαπερατότητας αντιστοιχούν επομένως σε αεριοεπαγόμενη σκουρόχρωση οξειδίου και όχι σε μετάβαση ανακλαστικού καθρέφτη. Το μέγεθος της μείωσης διαφέρει μεταξύ των επιλεγμένων συστημάτων WO_3, γεγονός που δείχνει ότι το τελικό προφίλ διαπερατότητας διαμορφώνεται όχι μόνο από την ίδια την αντίδραση του WO_3, αλλά και από το πορώδες του υμενίου, τη διαμόρφωση του καταλύτη και την πρόσβαση του αερίου στην ενεργή στρώση.

Τα συστήματα με βάση το Mg [27], [65], [66], [67] σχηματίζουν ξεχωριστό φασματικό κλάδο, επειδή η υδρογόνωση αυξάνει τη διαπερατότητα. Στην αφυδρογονωμένη κατάσταση, η στρώση που περιέχει Mg παραμένει μεταλλική και συμπεριφέρεται ως ανακλαστική κατάσταση τύπου καθρέφτη, με πολύ χαμηλή διαπερατότητα στο μεγαλύτερο μέρος της ορατής και της εγγύς υπέρυθρης περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-19. Η υδρογόνωση μετασχηματίζει την ενεργή μεταλλική στρώση σε φάση υδριδίου, μειώνοντας τον ανακλαστικό χαρακτήρα του υμενίου και αυξάνοντας τη διαπερατότητα προς μια πιο διαφανή κατάσταση. Η απόκριση της διαφανούς κατάστασης ελέγχεται στη συνέχεια από τον σχεδιασμό του κράματος ή της σύνθετης στρώσης. Οι συνθέσεις Mg–Ca και Mg–Y χρησιμοποιούνται

για τη βελτίωση της ομαλότητας στην ορατή περιοχή και της χρωματικής ουδετερότητας, ενώ η ενσωμάτωση TiO_2 στα υμένια $Mg–TiO_2$ συνδέεται κυρίως με τη μεταφορά υδρογόνου και την ανάκτηση του εύρους μετάβασης, και όχι με ανεξάρτητη χρωμογενή συνεισφορά.

Η σύγκριση της φασματικής διαπερατότητας δείχνει επομένως ότι η κατηγορία καταλυτικά υποβοηθούμενης αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού περιλαμβάνει δύο αντίθετες μορφές μεταβολής. Τα συστήματα χρωματισμού οξειδίου με βάση το WO_3 χρησιμοποιούν την καταλυτικά υποβοηθούμενη αλληλεπίδραση αερίου–στερεού για να μεταβούν από διαφανή κατάσταση προς κατάσταση χαμηλότερης διαπερατότητας. Αντίθετα, τα συστήματα μετασχηματισμού μεταλλικών υδριδίων με βάση το Mg ακολουθούν την αντίστροφη κατεύθυνση: η κατάσταση χαμηλής διαπερατότητας είναι η μεταλλική ανακλαστική κατάσταση, ενώ η υδρογόνωση παράγει την κατάσταση υδριδίου με υψηλότερη διαπερατότητα. Συνεπώς, η κοινή ενεργοποίηση από αέριο περιβάλλον δεν οδηγεί σε κοινό προφίλ φασματικής διαπερατότητας. Η παρατηρούμενη απόκριση εξαρτάται από το αν το υδρογόνο δημιουργεί απορροφητικά κέντρα χρωματισμού σε οξείδιο ή μετασχηματίζει μια ανακλαστική μεταλλική στρώση σε πιο διαπερατή φάση υδριδίου.

3.4 Αντιστρεψιμότητα, σταθερότητα, ανθεκτικότητα και περιορισμοί λειτουργίας

Η προηγούμενη ενότητα ανέδειξε ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός οπτικής μετάβασης επηρεάζει άμεσα τον τρόπο με τον οποίο εκφράζεται η μεταβολή της φασματικής διαπερατότητας. Ωστόσο, η αξιολόγηση ενός χρωμογενούς υαλοστασίου δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στη φασματική διαφορά μεταξύ διαυγούς και χρωματισμένης κατάστασης. Για κτιριακές εφαρμογές, ο μηχανισμός οπτικής μετάβασης, η φασματική απόκριση και οι περιορισμοί ανθεκτικότητας πρέπει να εξετάζονται ως αλληλένδετες παράμετροι του ίδιου πλαισίου αξιολόγησης. Ένα σύστημα με έντονη φασματική μεταβολή μπορεί να έχει περιορισμένη τεχνολογική αξία εάν η μετάβαση δεν είναι πλήρως αντιστρεπτή, εάν η απόκριση ή η επαναφορά είναι αργή, ή εάν η λειτουργία του υποβαθμίζεται υπό επαναλαμβανόμενους κύκλους και περιβαλλοντική έκθεση. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα η ανθεκτικότητα δεν αντιμετωπίζεται ως γενικός χαρακτηρισμός, αλλά οργανώνεται με βάση συγκεκριμένους περιορισμούς, όπως η εγγενής υποβάθμιση του υλικού, η υποβάθμιση διεπιφανειών, η γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης, η κόπωση από επαναλαμβανόμενους κύκλους λειτουργίας, οι περιορισμοί χρόνου απόκρισης ή επαναφοράς και το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας κάθε διάταξης.

Στα συστήματα ιοντικής μεταφοράς μάζας, η αντιστρεψιμότητα της οπτικής μετάβασης συνδέεται άμεσα με την ηλεκτροχημική φύση της διεργασίας: η οπτική κατάσταση μπορεί να μεταβληθεί με εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα και, σε αρκετές περιπτώσεις, να διατηρηθεί σε ενδιάμεσα επίπεδα, εφόσον η εισαγωγή και η εξαγωγή ιόντων παραμένουν επαρκώς ισορροπημένες. Η ίδια αυτή ελεγχόμενη λειτουργία αποτελεί και βασική πηγή περιορισμών ανθεκτικότητας, καθώς η επαναλαμβανόμενη ιοντική μεταφορά μπορεί να οδηγήσει σε παγίδευση ιόντων, παρασιτικές οξειδοαναγωγικές διεργασίες, δομική καταπόνηση του ενεργού υλικού, απώλειες που σχετίζονται με τον ηλεκτρολύτη, ατελή επαναφορά της αποχρωματισμένης κατάστασης ή αύξηση του χρόνου μετάβασης. Η λειτουργία σε μεγάλη επιφάνεια προσθέτει επιπλέον περιορισμό κινητικής απόκρισης, καθώς τα ηλεκτροχρωμικά οξείδια συχνά απαιτούν από δεκάδες δευτερόλεπτα έως λεπτά για πλήρη οπτική μετάβαση [68]. Στο παρόν σύνολο συστημάτων, το WO_3/NiW τριπλό υαλοστάσιο [34] και το WOx/CeOx–TiO_2 laminate διπλής φασματικής ρύθμισης [31] δείχνουν σαφή συνάφεια με υαλοστασιακή ή κτιριακή εφαρμογή, όμως η συνεισφορά τους στην παρούσα ενότητα παραμένει κυρίως αρχιτεκτονική και

προσανατολισμένη στην απόδοση, καθώς δεν παρέχονται αναλυτικά δεδομένα κυκλικής υποβάθμισης ή κινητικής μεταγωγής για τις συγκεκριμένες διατάξεις.

Πιο άμεση τεκμηρίωση αντιστρεψιμότητας παρέχεται από τις πρωτότυπες ηλεκτροχρωμικές διατάξεις διπλής φασματικής ρύθμισης και τις υβριδικές διατάξεις. Το $Nb_{12}O_{29}/V_2O_5$ [32] αναφέρεται ότι διατηρεί το μεγαλύτερο μέρος της ορατής και ηλιακής μεταβολής μετά από 1000 κύκλους, αν και η μετάβαση μεταξύ καταστάσεων παραμένει της τάξης των λεπτών. Στο TiO_{2-x} [33], η δημιουργία κενών θέσεων οξυγόνου συνδέεται με ταχύτερη διάχυση Li^+ και με περιορισμό της δομικής υποβάθμισης κατά την επαναλαμβανόμενη παρεμβολή και αποπαρεμβολή ιόντων· χαρακτηριστικά, η δημοσίευση τεκμηριώνει χρόνους μετάβασης της τάξης των δευτερολέπτων και διατήρηση της διπλής φασματικής ρύθμισης μετά από εκτεταμένη κυκλική λειτουργία. Το Polyviologen/$WO_3 \cdot 2H_2O$ [35] δίνει επίσης ισχυρή ένδειξη ελεγχόμενης αντιστρεψιμότητας, καθώς η προσθήκη PEDOT χρησιμοποιείται για να περιορίσει τη διόγκωση και τη διάβρωση του polyviologen, ενώ οι χρόνοι μετάβασης αναφέρονται επίσης σε κλίμακα δευτερολέπτων. Εδώ, επομένως, η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας δεν αφορά μόνο το χρωμογενές υλικό, αλλά και τη σταθερότητα των ενεργών διεπιφανειών και των προστατευτικών στρώσεων που επιτρέπουν επαναλαμβανόμενη λειτουργία.

Στα PEDOT:PSS [37] και MnO_2/PB [36], η αντιστρεψιμότητα συνδέεται επίσης με στοιχεία πέρα από το ίδιο το ενεργό χρωμογενές υλικό. Στη συμμετρική διάταξη υπερπυκνωτή PEDOT:PSS [37], η χρήση ηλεκτρολύτη EG/H_2O συνδέεται με λειτουργία σε ευρύτερο θερμοκρασιακό εύρος και περιορισμό προβλημάτων παγώματος, άρα η σταθερότητα του ηλεκτρολύτη και η γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους αξιολόγησης. Στο σύνθετο υμένιο MnO_2/PB [36], η μελέτη επισημαίνει ότι η περιορισμένη πρόσφυση του Prussian Blue μπορεί να προκαλέσει φτωχότερη κυκλική σταθερότητα, ενώ η ανάπτυξή του μέσα σε πορώδη δομή MnO_2 βελτιώνει την πρόσφυση και περιορίζει την αποκόλληση ή διάλυση του ενεργού υλικού στον υδατικό ηλεκτρολύτη. Συνεπώς, στην οικογένεια αυτή η αντιστρεψιμότητα δεν κρίνεται μόνο από την ηλεκτροχημική δυνατότητα αλλαγής κατάστασης, αλλά και από το αν η ιοντική κίνηση μπορεί να διατηρείται επαναλήψιμη χωρίς σταδιακή απώλεια οπτικής αντίθεσης, ταχύτητας ή ποιότητας απόκρισης.

Στα συστήματα μεταβολής φάσης μέσω διάχυσης, η αντιστρεψιμότητα συνδέεται στενά με τον περιβαλλοντικό έλεγχο, καθώς το εξωτερικό είδος που απαιτείται για τη μεταγωγή μπορεί ταυτόχρονα να αποσταθεροποιήσει το ενεργό στρώμα [69]. Στο επιλεγμένο θερμοχρωμικό περοβσκιτικό σύστημα $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 [41], το οποίο εξετάζεται ως πρωτότυπο θερμοχρωμικό περοβσκιτικό παράθυρο με προστατευτική τριπλή αρχιτεκτονική και όχι ως εμπορικά ώριμο υαλοστάσιο, η μεταγωγή βασίζεται στη διάχυση υδρατμών και στην αντιστρεπτή ενυδάτωση/αφυδάτωση του ενεργού περοβσκιτικού υλικού. Ο υδρατμός είναι απαραίτητος για τη θερμοχρωμική λειτουργία, αλλά η ίδια ευαισθησία στην υγρασία καθιστά το υλικό ευάλωτο σε γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης και εγγενή υποβάθμιση, ιδιαίτερα μέσω επιφανειακών ατελειών και ορίων κόκκων. Αυτό δημιουργεί ένα στενό πρακτικό εύρος λειτουργίας: ανεπαρκής υγρασιακή πρόσβαση μπορεί να επιβραδύνει ή να περιορίσει την επαναφορά, ενώ υπερβολική υγρασία ή άμεση έκθεση σε νερό μπορεί να αποσταθεροποιήσει το ενεργό στρώμα. Η προστατευτική αρχιτεκτονική του συστήματος επιχειρεί να διατηρήσει τη μεταγωγή μέσω υδρατμών, περιορίζοντας παράλληλα την άμεση υγρασιακή καταπόνηση, την οπτική θόλωση και τη διαρροή μολύβδου. Ωστόσο, η βελτίωση αυτή δεν αναιρεί τον βασικό περιορισμό της οικογένειας: η αντιστρεψιμότητα παραμένει εξαρτημένη από την ελεγχόμενη μεταφορά υδρατμών και από τη μακροχρόνια αποτελεσματικότητα της προστατευτικής διάταξης.

Στα συστήματα όπου η μετάβαση πραγματοποιείται μέσω ατελειών και κενών θέσεων, η αντιστρεψιμότητα συνδέεται με την ικανότητα του ενεργού υλικού να επανέρχεται από τη φωτοεπαγόμενη χρωματισμένη κατάσταση μετά την απομάκρυνση της ακτινοβολίας. Στα συστήματα με βάση το WO_3, η μετάβαση βασίζεται κυρίως σε φωτοεπαγόμενη αναγωγή W^{6+}/W^{5+} και σε παγίδευση φορτίου σε ατέλειες ή μη στοιχειομετρικές θέσεις του οξειδίου. Το Fe-WO_3/PMMA [45] εξετάζεται ως φωτοχρωμικό σύνθετο υμένιο σε επίπεδο απόδειξης αρχής, με επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά χρωματισμού/αποχρωματισμού για περισσότερους από 50 κύκλους. Ωστόσο, η επαναφορά δεν είναι φασματικά ομοιόμορφη: η ορατή απόκριση αποκαθίσταται ταχύτερα, ενώ η συνεισφορά στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή απαιτεί αρκετές ώρες για πλήρη επαναφορά. Αντίθετα, το WO_3/PET νανοκεραμικό φωτοχρωμικό retrofit υμένιο [47] αντιστοιχεί σε πιο εφαρμοσμένο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας, καθώς εξετάζεται ως πολυστρωματικό υμένιο παραθύρου και αναφέρεται ότι διατηρεί τις οπτικές και μηχανικές του ιδιότητες μετά από 5000 κύκλους UV έκθεσης. Ωστόσο, δεν αποσαφηνίζει την κινητική προέλευση της καθυστέρησης του αποχρωματισμού. Το κενό αυτό διευκρινίζεται από κινητικές μελέτες σε WO_{3-x} [42], οι οποίες δείχνουν ότι ο αποχρωματισμός δεν εξελίσσεται ως μία άμεση και ενιαία αντιστροφή της χρωματισμένης κατάστασης. Το ταχύτερο μέρος συνδέεται με ανακατανομή φορτίου, ενώ το βραδύτερο μέρος εξαρτάται από χαλάρωση σχετιζόμενη με διάχυση μειωμένων ή πρωτονικά σταθεροποιημένων ειδών. Αυτό εξηγεί γιατί η μεταβολή στα φωτοχρωμικά συστήματα βασισμένα σε WO_3 δύναται να είναι αντιστρεπτή και παράλληλα να εξακολουθεί να εμφανίζεται καθυστερημένη επαναφορά, ιδίως εκτός της ορατής περιοχής.

Το YHO [48] διαφοροποιείται από τα συστήματα που βασίζονται σε WO_3, καθώς η φωτοχρωμική απόκριση αποδίδεται σε υδριδικές και οξειδικές κενές θέσεις και σε τοπική χαλάρωση του πλέγματος, όχι σε μεταβολή σθένους του W. Πρόκειται για σύστημα σε επίπεδο λεπτού υμενίου, με λιγότερο ώριμο προφίλ υαλοστασιακής εφαρμογής σε σχέση με το retrofit WO_3/PET υμένιο [47]. Η επαναφορά μετά τον φωτισμό μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος, όμως η τεκμηρίωση της κυκλικής σταθερότητας παραμένει πιο περιορισμένη: η επαναλαμβανόμενη έκθεση μπορεί να μειώσει το εύρος φωτοσκότισης, ενώ η σχεδόν πλήρης χαλάρωση απαιτεί αρκετές ώρες στο σκοτάδι. Επιπλέον, τα διαθέσιμα δεδομένα ενθυλάκωσης δείχνουν ότι η προστατευτική στρώση Al_2O_3 δεν αρκεί πάντα για την πλήρη αποφυγή οξείδωσης και απώλειας απόκρισης, ενώ έχουν αναφερθεί και ζητήματα πρόσφυσης ή αποκόλλησης του υμενίου σε εφαρμογές ενθυλακωμένων υμενίων μεγαλύτερου πάχους [70].

Επομένως, η υποκατηγορία αυτή μπορεί να εμφανίζει αντιστρεπτή μετάβαση, αλλά η αντιστρεψιμότητα δεν συνεπάγεται απαραίτητα άμεση ή πλήρως ισοδύναμη επαναφορά σε όλο το μήκος κύματος. Οι κύριοι περιορισμοί εντοπίζονται στα όρια απόκρισης/επαναφοράς, στην κόπωση λόγω επαναλαμβανόμενων κύκλων, στη γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης και, όπου τεκμηριώνεται, στη διεπιφανειακή σταθερότητα του υμενίου.

Για τα θερμοχρωμικά συστήματα δομικής φασικής αναδιάταξης, η αντιστρεψιμότητα της οπτικής μετάβασης είναι γενικά καλά τεκμηριωμένη στη βιβλιογραφία, καθώς τα περισσότερα από τα επιλεγμένα συστήματα παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενη μετάβαση μεταξύ ψυχρής και θερμής κατάστασης μέσω θερμοκρασιακά εξαρτώμενων φασμάτων ή μετρήσεων υστέρησης. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι τα πλήρη συστήματα υλικών είναι εξίσου τεκμηριωμένα ως προς τη μακροχρόνια λειτουργία τους. Για να παραμείνει σταθερή η θερμοχρωμική συμπεριφορά, πρέπει να διατηρούνται η κρυσταλλικότητα, η στοιχειομετρία και η σταθερότητα των διεπιφανειών γύρω από το ενεργό VO_2, καθώς αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν αν η αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση μπορεί να διατηρηθεί πέρα από την αρχική μέτρηση.

Στα υμένια VO_2 που εξετάζονται κυρίως σε επίπεδο εργαστηριακού δείγματος, όπως το VO_2/SnO_2 [52], το VO_2 και το VO_2/TiO_2 [55], η θερμοχρωμική μετάβαση τεκμηριώνεται μέσω της ψυχρής–θερμής φασματικής απόκρισης, αλλά η μακροχρόνια σταθερότητα και η άμεση υαλοστασιακή συνάφεια δεν αξιολογούνται στον ίδιο βαθμό. Στα παραπάνω, πιθανή απώλεια της θερμοχρωμικής φάσης, της κρυσταλλικότητας ή της στοιχειομετρίας θα αντιστοιχούσε σε εγγενή υποβάθμιση του υλικού, επειδή η λειτουργία εξαρτάται άμεσα από τη διατήρηση της φασικής μετάβασης του VO_2. Στα συστήματα όπου εισάγεται W, η πρόσμιξη χρησιμοποιείται για τη μετατόπιση της θερμοκρασίας μετάβασης σε πιο κατάλληλο εύρος για κτηριακές εφαρμογές, στοιχείο κρίσιμο για τη διάκριση των πιο σχετικών συστημάτων από εκείνα που παραμένουν λιγότερο εφαρμόσιμα σε συνθήκες υαλοστασίου. Με αυτή τη λογική, τα πιο ισορροπημένα συστήματα είναι εκείνα που συνδυάζουν χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης, οπτικό σχεδιασμό της διαστρωμάτωσης και προστασία του ενεργού VO_2. Στο $ZrO_2/VO_2(W)/ZrO_2$ [57], οι ZrO_2 στρώσεις λειτουργούν ως αντι-ανακλαστικές και προστατευτικές στρώσεις, ενώ στο $YSZ/VWSrO/SiO_2$ [56] το άνω SiO_2 στρώμα εισάγεται επίσης ως προστατευτικό στρώμα για το ενεργό υμένιο. Επομένως, εδώ η ανθεκτικότητα δεν αφορά μόνο το ίδιο το VO_2, αλλά και τη σταθερότητα των διεπιφανειών μεταξύ του θερμοχρωμικού υμενίου και των γειτονικών προστατευτικών ή οπτικά προσαρμοστικών στρώσεων.

Τα συστήματα όπου το VO_2 ενσωματώνεται σε πολυμερική μήτρα ή ενδιάμεση πολυστρωματική στρώση, παρουσιάζουν διαφορετικό είδος περιορισμού. Το W/VO_2–PVB laminate [50] παραμένει αντιστρεπτό ως προς την ψυχρή–θερμή απόκριση, όμως η συμπεριφορά του εξαρτάται έντονα από την επεξεργασία των σωματιδίων. Η άλεση μειώνει το μέγεθος των σωματιδίων και περιορίζει τη θόλωση, καθιστώντας το υλικό πιο κατάλληλο για πολυστρωματική υαλοστασιακή χρήση, αλλά ταυτόχρονα μειώνει την ενθαλπία μετάβασης και εισάγει ασυμμετρία στην κινητική της φασικής μετάβασης [50]. Αυτό δείχνει ότι η επεξεργασία μπορεί να βελτιώνει την οπτική καταλληλότητα του συστήματος, ενώ παράλληλα αποδυναμώνει μέρος της θερμοχρωμικής απόκρισης. Το $W\text{-}VO_2$/PVP film [54] εμφανίζει επίσης την αναμενόμενη θερμοκρασιακά ελεγχόμενη μετάβαση του VO_2 μετά την εισαγωγή W, όμως η τεκμηρίωση περιορίζεται κυρίως στη συμπεριφορά του σύνθετου υμενίου στις μετρημένες ψυχρές και θερμές καταστάσεις. Συνεπώς, στα συστήματα αυτής της υποομάδας, η αντιστρεψιμότητα υποστηρίζεται στο επίπεδο της ψυχρής–θερμής μετάβασης, ενώ οι επιδράσεις της επεξεργασίας στη σταθερότητα της φασικής απόκρισης τεκμηριώνονται κυρίως για το W/VO_2–PVB laminate.

Τα μορφολογικά τροποποιημένα συστήματα VO_2, όπως το SunSmart VO_2/SiO_2 [53], το Zn-solution processed VO_2 [58] και το Aerogel-like VO_2 [59], βελτιώνουν την οπτική ισορροπία κυρίως μέσω της μικροδομής, αλλά αυτό αυξάνει και τη σημασία της προστασίας του ενεργού VO_2. Στο SunSmart VO_2/SiO_2, η εμπορική θερμοχρωμική επίστρωση βασίζεται σε VO_2/SiO_2 και λειτουργεί ως πιο ώριμη επίστρωση υαλοπίνακα, ενώ το Zn-solution processed VO_2 και το Aerogel-like VO_2 παραμένουν κυρίως σε επίπεδο τροποποιημένων υμενίων, όπου η επιφανειακή μορφολογία ή η πορώδης δομή τύπου αερογέλης βελτιώνουν τη φωτεινή διαπερατότητα και την ηλιακή/υπέρυθρη διαμόρφωση. Παράλληλα, μελέτες ανθεκτικότητας σε λεπτά υμένια VO_2 δείχνουν ότι μη προστατευμένο VO_2 μπορεί να χάσει τη θερμοχρωμική του συμπεριφορά υπό θερμότητα και υγρασία, μέσω οξείδωσης προς μη θερμοχρωμικά οξείδια του βαναδίου, ενώ επαρκώς παχιές οξειδικές άνω στρώσεις μπορούν να καθυστερήσουν αυτή την υποβάθμιση [71]. Το SunSmart × ECLAZ [53] αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση σε επίπεδο υαλοστασίου, όπου η εμπορική,βασιζόμενη στο VO_2, SunSmart επίστρωση συνδυάζεται με εμπορικό low-e ECLAZ υαλοπίνακα. Επομένως, είναι σημαντικό για την ενσωμάτωση του συστήματος σε υαλοστάσιο, αλλά δεν παρέχει αντίστοιχη πληροφορία ανθεκτικότητας. Συνεπώς, η υποοικογένεια αυτή παρέχει ισχυρή τεκμηρίωση για την αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή φασική μετάβαση του VO_2, αλλά δείχνει

επίσης ότι η υαλοστασιακή αξιοποίηση εξαρτάται από τον έλεγχο της θερμοκρασίας μετάβασης, τη σταθερότητα της ενεργής φάσης και την προστασία του υλικού από διεπιφανειακή ή περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Στα θερμοχρωμικά συστήματα αναδιάταξης του περιβάλλοντος συναρμογής, η διαθέσιμη τεκμηρίωση αφορά ουσιαστικά το Ni-LETC/PVB glazing [60], δηλαδή ένα εμπορικό πολυστρωματικό υαλοστάσιο. Το σύστημα υποστηρίζει αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση, καθώς οι μετρήσεις θέρμανσης και ψύξης δείχνουν ότι η οπτική κατάσταση μπορεί να επανέλθει. Ωστόσο, η επαναφορά δεν ακολουθεί πλήρως την ίδια διαδρομή, καθώς παρατηρείται υστέρηση μεταξύ των κύκλων θέρμανσης και ψύξης. Επομένως, ο βασικός περιορισμός της υποοικογένειας δεν είναι η απουσία αντιστρεψιμότητας, αλλά τα όρια απόκρισης/επαναφοράς που σχετίζονται με τη θερμικά εξαρτώμενη πορεία του συστήματος. Σε αντίθεση με τα συστήματα VO_2, όπου υπάρχουν περισσότερα δεδομένα για ρύθμιση θερμοκρασίας μετάβασης, προστατευτικές στρώσεις, περιβαλλοντική γήρανση και επιδράσεις επεξεργασίας, το επιλεγμένο σύστημα αναδιάταξης συναρμογής δεν παρέχει αντίστοιχα αναλυτική αξιολόγηση μακροχρόνιας υποβάθμισης ή κυκλικής κόπωσης. Έτσι, στο παρόν σύνολο μπορεί να θεωρηθεί τεχνολογικά ώριμο ως εμπορική υαλοστασιακή λύση, αλλά η αξιολόγηση της ανθεκτικότητάς του περιορίζεται κυρίως στην αντιστρεψιμότητα της θερμικής απόκρισης και στην παρατηρούμενη υστέρηση.

Στα φωτοχρωμικά συστήματα μοριακής αναδιάταξης, η αντιστρεψιμότητα συνδέεται με την ικανότητα του ενεργού φωτοχρωμικού είδους να επανέρχεται στη διαυγή κατάσταση μετά τη μείωση ή την απομάκρυνση της ακτινοβολίας. Στο Spirooxazine/PMMA film [61], η αντιστρεπτή μετάβαση μεταξύ της άχρωμης και της χρωματισμένης μορφής τεκμηριώνει τη βασική φωτοχρωμική λειτουργία, όμως η αξιολόγηση παραμένει κυρίως σε επίπεδο εργαστηριακού υμενίου και δεν συνοδεύεται από εκτεταμένα δεδομένα μακροχρόνιας κυκλικής κόπωσης ή περιβαλλοντικής γήρανσης. Αντίθετα, το PC nanoceramic/polymer film [62] εξετάζεται σε πιο εφαρμοσμένη μορφή, καθώς δοκιμάζεται ως φωτοχρωμικό υμένιο υαλοστασίου υπό πραγματικές συνθήκες ηλιακής έκθεσης. Παρότι η αρχιτεκτονική του υμενίου περιγράφεται, η ακριβής χημεία του ενεργού φωτοχρωμικού συστατικού δεν δημοσιοποιείται, γεγονός που περιορίζει τη μηχανιστική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας. Επομένως, η απόκριση μπορεί να αξιολογηθεί λειτουργικά ως προς τη μεταβολή διαπερατότητας και την επαναφορά, αλλά δεν μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένο μηχανισμό υποβάθμισης του ενεργού υλικού στον ίδιο βαθμό όπως σε συστήματα με γνωστή χημική σύσταση. Συνολικά, ο βασικός περιορισμός της υποοικογένειας δεν είναι η απουσία αντιστρεψιμότητας στην ορατή περιοχή, αλλά η περιορισμένη τεκμηρίωση για μακροχρόνια σταθερότητα, κυκλική κόπωση και περιβαλλοντική γήρανση, ιδιαίτερα όταν το φωτοχρωμικό υλικό ενσωματώνεται σε πολυμερικό ή πολυστρωματικό υμένιο υαλοστασίου.

Στα συστήματα χρωματισμού οξειδίου με βάση το WO_3, η αντιστρεψιμότητα υποστηρίζεται κυρίως στο επίπεδο χρωματισμού–αποχρωματισμού, καθώς η έκθεση σε υδρογόνο χρωματίζει το WO_3, ενώ η έκθεση σε οξυγόνο επαναφέρει την αποχρωματισμένη κατάσταση. Επομένως, το βασικό ζήτημα δεν είναι η απουσία αντιστρεψιμότητας, αλλά η σταθερότητα της καταλυτικά υποβοηθούμενης διαδρομής αερίου–στερεού υπό επαναλαμβανόμενη λειτουργία και περιβαλλοντική έκθεση. Προγενέστερες μηχανιστικές μελέτες δείχνουν ότι η αντίδραση εξαρτάται έντονα από την καταλυτικά υποβοηθούμενη μεταφορά ειδών υδρογόνου και οξυγόνου μέσα από την πορώδη δομή του WO_3 [25], ενώ μεταγενέστερες μελέτες σε επίπεδο υαλοστασίου επισημαίνουν τη δηλητηρίαση της καταλυτικής επιφάνειας, τις μεταβολές στην περιεκτικότητα νερού του υμενίου και την εξέλιξη του ρυθμού απόκρισης ως παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν προοδευτικά τη διαμόρφωση της οπτικής

απόκρισης [72]. Με αυτή την έννοια, οι προστατευτικές ή φωτοκαταλυτικές στρώσεις και οι ελεγχόμενες πορώδεις δομές δεν αποτελούν δευτερεύουσες λεπτομέρειες, αλλά μέρος της λογικής ανθεκτικότητας αυτής της υποοικογένειας. Σε επίπεδο συστήματος, η ανάγκη παροχής και διαχείρισης H_2/O_2, σωληνώσεων και ελέγχου ασφαλείας παραμένει βασικός περιορισμός τεχνολογικής ενσωμάτωσης, ιδιαίτερα για εφαρμογές εκ των υστέρων αναβάθμισης, ακόμη και όταν το οπτικό και ενεργειακό δυναμικό των WO_3-based gas-controlled glazings είναι σαφές [72].

Στα συστήματα μετασχηματισμού μεταλλικών υδριδίων με βάση το Mg, το βασικό ζήτημα αντιστρεψιμότητας μεταφέρεται από τον χρωματισμό ενός οξειδίου στη δομική σταθερότητα της μεταλλικής στρώσης που αποκρίνεται στο υδρογόνο και της διεπιφάνειάς της με τον καταλύτη. Τα συστήματα αυτά μπορούν να εναλλάσσονται αντιστρεπτά μεταξύ ανακλαστικής και διαπερατής κατάστασης, όμως η κυκλική ανθεκτικότητα επηρεάζεται έντονα από την υποβάθμιση της καταλυτικής στρώσης Pd, τη διαδιάχυση Pd–Mg, τη δημιουργία κραμάτων και τη φθορά της επιφάνειας κατά τους επαναλαμβανόμενους κύκλους υδρογόνωσης και αφυδρογόνωσης. Για τον λόγο αυτό, η διατήρηση του καταλύτη και η διεπιφανειακή σταθεροποίηση αντιμετωπίζονται στη βιβλιογραφία ως κεντρικές απαιτήσεις για αυτόν τον κλάδο. Ενδιάμεσες στρώσεις φραγμού, τροποποιημένες συνθέσεις κραμάτων Mg και στρώσεις με οξειδικά συστατικά μπορούν να βελτιώσουν την κυκλική συμπεριφορά, αλλά ταυτόχρονα δείχνουν ότι η ανακλαστική διαδρομή είναι πιο ευαίσθητη σε δομική υποβάθμιση από τη διαδρομή χρωματισμού του WO_3 [67], [73]. Τα Mg–Y και Mg–TiO_2 συστήματα δείχνουν ότι ο σχεδιασμός του κράματος ή της σύνθετης στρώσης μπορεί να μειώσει μέρος αυτών των περιορισμών ανθεκτικότητας [65], [67], ενώ τα Mg–Ni και Mg–Ca mirrors παραμένουν χρήσιμα κυρίως για την ανάδειξη του οπτικού δυναμικού και των επίμονων περιορισμών σε επίπεδο υλικού των ανακλαστικών αεριοχρωμικών συστημάτων [27], [66].

Συνολικά, στα συστήματα αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού με καταλυτική υποβοήθηση, η αντιστρεπτή οπτική λειτουργία τεκμηριώνεται είτε μέσω χρωματισμού–αποχρωματισμού είτε μέσω εναλλαγής ανακλαστικής–διαπερατής κατάστασης. Ωστόσο, η αξιολόγηση δεν μπορεί να περιοριστεί στη βραχυχρόνια οπτική εναλλαγή. Στα συστήματα WO_3, τα βασικά ζητήματα αφορούν τη διαχείριση των αερίων, τη σταθερότητα της καταλυτικά υποβοηθούμενης αντίδρασης και την κατάσταση του πορώδους υμενίου, ενώ στα συστήματα Mg κυριαρχούν η διατήρηση της στρώσης Pd, η διαδιάχυση Pd–Mg, η διεπιφανειακή υποβάθμιση και η δομική κόπωση από επαναλαμβανόμενους κύκλους υδρογόνωσης/αφυδρογόνωσης.

Πίνακας 3-8 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων ιοντικής μεταφοράς μάζας.

Σύστημα	**Τεχνολογική ωριμότητα**	**Κύρια φασματική λειτουργία**	**ΔTvis / ΔTNIR**	**Χρόνος μετάβασης**	**Ανθεκτικότητα σε κύκλους / διάρκεια ζωής**	**Τύπος υποβάθμισης ή λειτουργικού περιορισμού**
WOx/CeOx–TiO_2 [31]	Πειραματική πολυστρωματική διάταξη	Πολυκαταστασιακή VIS/NIR ρύθμιση	ΔTvis: 55%/ ΔTNIR: –	–	–	περιορισμένη τεχνολογική ωριμότητα

$Nb_{12}O_{29}$/ V_2O_5 [32]	Εργαστηριακή διάταξη σε γυαλί	Επιλεκτική μείωση NIR	ΔTvis: 11%/ ΔTNIR: 34%	χρωμ.: 5 min · αποχρ.: 2.5 min	1000 κύκλοι, μείωση ΔTvis 5.2%	περιορισμοί απόκρισης/ επαναφορά ς
TiO_{2-x} [33]	Νανοκρυσταλλι κό υμένιο / διάταξη απόδειξης αρχής	Επιλεκτική μείωση NIR	ΔTvis: 26.7%/ ΔTNIR: 72.6%	χρωμ.: 15.5 s · αποχρ.: 3.4 s	2000 κύκλοι, 95.6% διατήρηση χωρητικότη τας	κόπωση λόγω επαναλαμβ ανόμενων κύκλων λειτουργίας
WO_3/Ni W [34]	Δείγμα υαλοπίνακα / ενσωμάτωση σε τριπλό υαλοστάσιο	Ευρεία VIS–NIR εξασθένηση	ΔTvis: 52.8%/ ΔTNIR: –	–	–	–
Polyviolo gen/WO_3 ·$2H_2O$ [35]	Πειραματική διάταξη διπλής καθόδου	NIR ρύθμιση με χωριστή καθοδική διαδρομή	ΔTvis: –/ ΔTNIR: –	χρωμ.: 3.2 s · αποχρ.: 1.6 s στα 1800 nm	6000 s συνεχούς λειτουργίας , αμελητέα υποβάθμιση	διεπιφανεια κή υποβάθμιση
PEDOT: PSS [37]	Ημιδιαφανές υαλοστάσιο– υπερπυκνωτής	Ήπια NIR ρύθμιση	ΔTvis: 5.06%/ ΔTNIR: 11.51%	χρωμ.: 4.5 s · αποχρ.: 3.9 s	150 οπτικοί κύκλοι, 10.000 ηλεκτροχημ ικοί κύκλοι	γήρανση λόγω περιβαλλον τικής έκθεσης
MnO_2/P B [36]	Εργαστηριακή συμπληρωματικ ή διάταξη	Διευρυμένη VIS–NIR εξασθένηση	ΔTvis: 36.8%/ ΔTNIR: 30.9%	χρωμ.: 2.7 s · αποχρ.: 2.1 s	500 κύκλοι, 90.4% διαυγής και 89.2% χρωματισμέ νη κατάσταση	διεπιφανεια κή υποβάθμιση

Πίνακας 3-9 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης.

Σύστημα	**Τεχνολογική ωριμότητα**	**Κύρια φασματική λειτουργία**	**ΔTvis/ ΔTNIR**	**Χρόνος μετάβασης**	**Ανθεκτικό τητα σε κύκλους / διάρκεια ζωής**	**Τύπος υποβάθμισ ης ή λειτουργικ ού περιορισμο ύ**
$MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 [41]	Πρωτότυπο περοβσκιτικό παράθυρο	Κυρίως ορατή θερμοχρωμικ ή εξασθένηση	ΔTvis: 53.0%/ ΔTNIR: -	θέρμανση: 120 s· ψύξη: 300 s	45 ημέρες γήρανσης σε 23 °C και 60% RH, με Δτsol > 20%	γήρανση λόγω περιβαλλον τικής έκθεσης· εγγενής υποβάθμιση υλικού

Πίνακας 3-10 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων μετάβασης μέσω ατελειών και κενών θέσεων.

Σύστημα	**Τεχνολογική ωριμότητα**	**Κύρια φασματική λειτουργία**	**ΔTvis / ΔTNIR**	**Χρόνος μετάβασης**	**Ανθεκτικότητα σε κύκλους / διάρκεια ζωής**	**Τύπος υποβάθμισης ή λειτουργικού περιορισμού**
Fe-WO_3 / PMMA [45]	Σύνθετο υμένιο	Αρχικά NIR, έπειτα VIS–NIR εξασθένηση	ΔTvis: 31%/ ΔTNIR: –	χρωμ.: 30 min · αποχρ.: 1 h (Tvis), 5 h (NIR)	50 κύκλοι, χωρίς σημαντική μεταβολή φάσματος	περιορισμοί απόκρισης / επαναφοράς
WO_3 / PMMA [46]	Φωτοχρωμικό film σε γυαλί	VIS–IR φωτοχρωμική σκουρόχρωση	ΔTvis: 48%/ ΔTNIR: –	–	–	περιορισμοί απόκρισης / επαναφοράς
YHO [48]	Λεπτό υμένιο	Ευρεία φωτοσκότιση μέσω κενών θέσεων	ΔTvis: – /ΔTNIR: –	–	9 h εναλλαγής φωτισμού/σκότους και 15 h αποχρ.	διεπιφανειακή υποβάθμιση
WO_3 / PET [47]	Εμπορικό retrofit film	Κυρίως ορατή φωτοχρωμική σκουρόχρωση	ΔTvis: 20.1%/ ΔTNIR: –	–	5000 UV κύκλοι, διατήρηση οπτικών και μηχανικών ιδιοτήτων	γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης

Πίνακας 3-11 *Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων που διέπονται από μηχανισμούς μοριακής ή δομικής αναδιάταξης.*

Σύστημα	**Τεχνολογική ωριμότητα**	**Κύρια φασματική λειτουργία**	**ΔTvis / ΔTNIR**	**Χρόνος μετάβασης**	**Ανθεκτικότητα σε κύκλους / διάρκεια ζωής**	**Τύπος υποβάθμισης ή λειτουργικού περιορισμού**
Δομική φασική αναδιάταξη						
VO_2 / SnO_2 [52]	Εργαστηριακή επίστρωση	IR θερμοχρωμική ρύθμιση	ΔTvis: –/ ΔT1500: 20%	–	6 μήνες αποθήκευσης, χωρίς ουσιαστική μεταβολή	γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης
SunSmart VO_2 / SiO_2 [53]	Επίστρωση σε γυαλί	NIR θερμοχρωμική ρύθμιση με υψηλή Tvis	ΔTvis: 9.7%/ ΔTNIR: –	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	–

SunSmart VO_2 / ECLAZ low-e [53]	Υαλοστασιακή διάταξη με low-e επίστρωση	NIR ρύθμιση σε low-e υαλοστάσιο	ΔTvis: 8.9%/ ΔTNIR: –	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	–
W-VO_2 / PVP [54]	Εργαστηριακό σύνθετο υμένιο	NIR θερμοχρωμική ρύθμιση	ΔTvis: 2.9%/ ΔTNIR: –	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	–
VO_2 [55]	Εργαστηριακή επίστρωση	IR θερμοχρωμική ρύθμιση	ΔTvis: –/ΔT2500: 50%	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	υψηλή θερμοκρασία μετάβασης
VO_2 / TiO_2 [55]	Εργαστηριακή επίστρωση σε εύκαμπτο υπόστρωμα	IR ρύθμιση σε εύκαμπτη διάταξη	–	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	διεπιφανειακή υποβάθμιση / επίδραση υποστρώματος
YSZ / VWSrO / SiO_2 [56]	Πολυστρωματική επίστρωση	NIR ρύθμιση με υψηλή Tvis	ΔTvis: 3.0%/ ΔTNIR: –	–	–	–
ZrO_2 / VO_2(W) / ZrO_2 [57]	Πολυστρωματική επίστρωση	NIR ρύθμιση μέσω πολυστρωματικής δομής	ΔTvis: 3.9%/ ΔTNIR: –	–	–	–
W/VO_2 / PVB [50]	Υαλοστάσιο με PVB ενδιάμεση στρώση	NIR ρύθμιση με σωματιδιακή διασπορά	–	–	αντιστρεπτή ψυχρή–θερμή απόκριση	σκέδαση / απώλεια κρυσταλλικότητας
VO_2 με Zn-solution processed) [58]	Εργαστηριακή επίστρωση	NIR ρύθμιση μέσω μορφολογικής τροποποίησης	ΔTvis: 6.1%/ ΔTNIR: 20.3%	–	100 θερμικοί κύκλοι, παρόμοια θερμοχρωμική απόδοση	κόπωση λόγω επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων
aerogel-like VO_2 [59]	Πορώδης νανοκρυσταλλική επίστρωση	Υψηλή Tvis με ισχυρή IR ρύθμιση	380 nm: ΔTvis 2.8%, ΔTIR 29.8% · 650 nm: ΔTvis 5.2%, ΔTIR 35.5%	–	550 ημέρες έκθεσης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες	γήρανση λόγω περιβαλλοντικής έκθεσης
Αναδιάταξη του περιβάλλοντος συναρμογής						
Ni-LETC / PVB [60]	Πολυστρωματική υαλοστασιακή διάταξη	Κυρίως ορατή εξασθένηση,	ΔTvis: 64%/	–	αντιστρεπτή ψυχρή–	θερμοκρασιακή υστέρηση /

		ασθενέστερη NIR μεταβολή	ΔTNIR: –		θερμή απόκριση	περιορισμοί επαναφοράς
Μοριακή αναδιάταξη						
Spirooxazine / PMMA [61]	Εργαστηριακό υμένιο σε γυαλί	Ορατή εξασθένηση, με σχεδόν σταθερή NIR περιοχή	ΔTvis: 44%/ ΔTNIR: –	–	–	μεταβολή κυρίως στο ορατό, χωρίς ουσιαστική NIR ρύθμιση
PC nanoceramic / polymer film [62]	Εμπορικό πολυστρωματικό πολυμερικό υμένιο σε μονό υαλοπίνακα	Ορατή εξασθένηση με χαμηλή διαπερατότητα στην NIR περιοχή	ΔTvis: 62%/ ΔTNIR: –	χρωμ.: 10 s · αποχρ.: 15 min	–	αυξημένη απορρόφηση και επιφανειακή θέρμανση

Πίνακας 3-12 Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού με καταλυτική υποβοήθηση.

Σύστημα	**Τεχνολογική ωριμότητα**	**Κύρια φασματική λειτουργία**	**ΔTvis / ΔTNIR**	**Χρόνος μετάβασης**	**Ανθεκτικότητα σε κύκλους / διάρκεια ζωής**	**Τύπος υποβάθμισης ή λειτουργικού περιορισμού**
Συστήματα χρωματισμού οξειδίου με βάση το WO_3						
WO_3 / Pd [63]	Υαλοστασιακή διάταξη διπλού υαλοπίνακα	Μείωση διαπερατότητας, εντονότερη στην IR περιοχή	ΔTvis: 39.1%/ ΔTNIR: –	–	150 κύκλοι, σταθερή απόκριση	ανάγκη ελεγχόμενης παροχής αερίων
WO_3 / Pd, SiO_2–$PdCl_2$ [64]	Νανοπορώδης επίστρωση σε γυαλί	Μείωση διαπερατότητας, με κύρια μεταβολή στη NIR περιοχή	–	χρωμ.: 40 s · αποχρ.: 20 s	επαναλαμβανόμενοι κύκλοι στα 1000 nm, σταθερή απόκριση	μερική κατάρρευση πόρων και επιβράδυνση απόκρισης
Συστήματα μετασχηματισμού μεταλλικών υδριδίων με βάση το Mg						
Mg_4Ni / Pd [27]	Πρακτική υαλοστασιακή διάταξη	Ανακλαστική–διαπερατή εναλλαγή μέσω μεταβολής ανακλαστικότητας	ΔTvis: 28%/ ΔTNIR: –	ανακλ. → διαπ.: 15 s · διαπ. → ανακλ.: 8 min	–	οξείδωση ενεργής στρώσης και επιβράδυνση επαναφοράς
Mg–Y / Pd [65]	Εργαστηριακή επίστρωση σε γυαλί	Ανακλαστική–διαπερατή εναλλαγή με	–	–	>10.000 κύκλοι, χωρίς	περιορισμένη φωτεινή διαπερατότη

		σχετικά ουδέτερη οπτική απόχρωση			εμφανή υποβάθμιση	τα στη διαπερατή κατάσταση
Mg–Ca / Pd [66]	Εργαστηριακή επίστρωση σε γυαλί	Ανακλαστική –διαπερατή εναλλαγή με ουδέτερη οπτική απόχρωση	–	–	–	έλλειψη δεδομένων κυκλικής ανθεκτικότητας
Mg–TiO_2 / Pd [67]	Εργαστηριακή επίστρωση σε γυαλί	Ανακλαστική –διαπερατή εναλλαγή στην ορατή περιοχή	ΔTvis: 36.1%/ ΔTNIR: –	–	100 κύκλοι, μείωση ΔTvis κατά 3%	δομική κόπωση από επαναλαμβανόμενους κύκλους λειτουργίας

3.5 Τελική επιλογή συστημάτων για υπολογιστική προσομοίωση

Η συγκριτική αξιολόγηση των χρωμογενών συστημάτων ανέδειξε ότι η τελική επιλογή για υπολογιστική προσομοίωση δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στο αν ένα σύστημα εμφανίζει μεγάλη μεταβολή διαπερατότητας. Η μεταβολή αυτή πρέπει να εξεταστεί σε ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης με τη φασματική περιοχή στην οποία εμφανίζεται, τον μηχανισμό που την προκαλεί, την αντιστρεψιμότητά της, το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας κάθε διάταξης, όπως επίσης και πιθανούς μηχανισμούς υποβάθμισης. Με αυτόν τον τρόπο, η επιλογή δεν προκύπτει ως απλή κατάταξη υλικών, αλλά ως αποτέλεσμα της συνολικής σχέσης μεταξύ μηχανισμού μετάβασης, φασματικής λειτουργίας και πρακτικής καταλληλότητας για κτιριακή εφαρμογή.

Τα συστήματα ιοντικής μεταφοράς μάζας παρουσιάζουν το μεγαλύτερο εύρος δυνατοτήτων ως προς τον έλεγχο της οπτικής κατάστασης. Ορισμένες διατάξεις επιτυγχάνουν ευρεία μείωση της διαπερατότητας στην ορατή και εγγύς υπέρυθρη περιοχή, ενώ άλλες επιτρέπουν πιο επιλεκτική ρύθμιση της NIR ακτινοβολίας ή διαχωρισμό της ορατής και υπέρυθρης απόκρισης. Παρά την υψηλή λειτουργική τους σημασία, η προσομοίωσή τους σε κτιριακό επίπεδο απαιτεί πρόσθετες παραδοχές σχετικά με τη στρατηγική ενεργοποίησης, τα όρια ελέγχου, την επιλογή ενδιάμεσων καταστάσεων και την πλήρη οπτική περιγραφή κάθε κατάστασης. Για τον λόγο αυτό, τα συστήματα αυτά δεν επιλέγονται για το υπολογιστικό στάδιο της παρούσας εργασίας, καθώς η ένταξή τους θα απαιτούσε πρόσθετη μοντελοποίηση ενεργού ελέγχου, πέρα από τη σύγκριση σαφώς καθορισμένων φασματικών καταστάσεων.

Τα συστήματα μετασχηματισμού φάσης μέσω διάχυσης και τα συστήματα μετάβασης μέσω ατελειών ή κενών θέσεων παρουσιάζουν σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, όμως εμφανίζουν πιο έντονους περιορισμούς ως προς τη λειτουργική σταθερότητα και την επαναφορά. Στην περίπτωση του $MAPbI_{3-x}Cl_x$ / PHPS / SiO_2 [41], η οπτική μεταβολή είναι κυρίως ορατοκεντρική και συνδέεται με ελεγχόμενη πρόσβαση υδρατμών, γεγονός που καθιστά τη μακροχρόνια σταθερότητα κρίσιμη παράμετρο. Αντίστοιχα, στα Fe-WO_3 / PMMA [45], WO_3 / PMMA [46], WO_3 / PET [47] και YHO [48], η φασματική απόκριση μπορεί να είναι αξιόλογη, όμως η κινητική αποχρωματισμού, η επαναληψιμότητα και η περιβαλλοντική ανθεκτικότητα παραμένουν βασικοί λειτουργικοί περιορισμοί. Επομένως, οι οικογένειες αυτές συμβάλλουν ουσιαστικά στη συγκριτική κατανόηση των μηχανισμών, αλλά οι περιορισμοί στην επαναφορά, στην περιβαλλοντική σταθερότητα και στη μακροχρόνια λειτουργία τις καθιστούν λιγότερο ώριμες για εφαρμογή σε κτηριακό επίπεδο.

Στα συστήματα αναδιάταξης, η σύγκριση ανέδειξε σαφέστερη διαφοροποίηση μεταξύ των επιμέρους υποοικογενειών. Τα συστήματα δομικής φασικής αναδιάταξης με βάση το VO_2 παρουσιάζουν την πιο άμεση σύνδεση με τον έλεγχο ηλιακών θερμικών κερδών, καθώς η κύρια μεταβολή τους εμφανίζεται στην υπέρυθρη περιοχή, ενώ η ορατή διαπερατότητα μπορεί να διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα μέσω κατάλληλου σχεδιασμού της επίστρωσης. Αντίθετα, το σύστημα αναδιάταξης περιβάλλοντος συναρμογής Ni-LETC / PVB [60] και το σύστημα μοριακής αναδιάταξης Spirooxazine / PMMA [61] εμφανίζουν ισχυρότερη μεταβολή κυρίως στην ορατή περιοχή, γεγονός που τα συνδέει περισσότερο με τη ρύθμιση φωτισμού και θάμβωσης, παρά με καθαρά NIR-επιλεκτικό έλεγχο. Το PC nanoceramic / polymer film [62] διαφοροποιείται από το Spirooxazine / PMMA [61], καθώς η δυναμική του μεταβολή εκφράζεται κυρίως στην ορατή περιοχή, ενώ η χαμηλή διαπερατότητα στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή σχετίζεται κυρίως με τη συνολική πολυστρωματική δομή του film.

Μεταξύ των συστημάτων δομικής φασικής αναδιάταξης με βάση το VO_2, το πολυστρωματικό ZrO_2 / $V_{0.982}W_{0.018}O_2$ / ZrO_2 [57] αναδεικνύεται ως η ισχυρότερη περίπτωση για περαιτέρω υπολογιστική αξιολόγηση. Η παρουσία W στο ενεργό στρώμα συνδέεται με μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης, ενώ οι δύο στρώσεις ZrO_2 λειτουργούν ως οπτικά υποστηρικτικές στρώσεις που βελτιώνουν τη φωτεινή διαπερατότητα και τη συνολική φασματική συμπεριφορά της διάταξης. Έτσι, το σύστημα συνδυάζει τον βασικό μηχανισμό θερμοκρασιακής απόκρισης του VO_2 με πολυστρωματικό σχεδιασμό που είναι πιο κατάλληλος για εφαρμογή σε υαλοπίνακα.

Στην υποοικογένεια της μοριακής αναδιάταξης, το PC nanoceramic / polymer film [62] παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την υπολογιστική προσομοίωση, καθώς δεν πρόκειται μόνο για εργαστηριακό μοριακό υμένιο, αλλά για πολυστρωματικό εμπορικό film με σαφή εφαρμογή σε υαλοπίνακα. Η δυναμική του απόκριση εκφράζεται κυρίως ως μεταβολή στην ορατή διαπερατότητα, ενώ η συνολική δομή του film παρέχει ήδη χαμηλή διαπερατότητα στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή. Συνεπώς, επιτρέπει την αξιολόγηση ενός διαφορετικού είδους παθητικής δυναμικής λειτουργίας, στο οποίο η μεταβολή δεν ελέγχεται από τη θερμοκρασία του ενεργού υλικού, αλλά από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Τα συστήματα που διέπονται από καταλυτικά υποβοηθούμενους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης αερίου–στερεού, παρότι παρουσιάζουν έντονη και τεχνολογικά ενδιαφέρουσα οπτική μεταβολή, συνοδεύονται από σημαντικούς περιορισμούς για κτηριακή εφαρμογή. Η ανάγκη ελεγχόμενης παροχής αερίου, η σταθερότητα της καταλυτικής διεπιφάνειας και οι απαιτήσεις ασφαλούς ενσωμάτωσης στο κτιριακό κέλυφος μειώνουν την πρακτική τους καταλληλότητα σε σχέση με πιο άμεσα εφαρμόσιμες λύσεις υαλοστασίων.

Με βάση τα παραπάνω, για την υπολογιστική προσομοίωση επιλέγονται δύο χρωμογενή συστήματα: το ZrO_2 / $V_{0.982}W_{0.018}O_2$ / ZrO_2 [57] και το PC nanoceramic/ polymer film [62]. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη σύγκριση δύο διαφορετικών παθητικών μηχανισμών: ενός συστήματος που ενεργοποιείται θερμοκρασιακά και παρουσιάζει κύρια υπέρυθρη ρύθμιση, και ενός πολυστρωματικού film που ενεργοποιείται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, με έντονη ορατή μεταβολή και μειωμένη ηλιακή διαπερατότητα. Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση δεν λειτουργεί ως απλή επιβεβαίωση δύο υλικών, αλλά ως στοχευμένη αξιολόγηση δύο διαφορετικών τρόπων με τους οποίους η φασματική μεταβολή των χρωμογενών υαλοστασίων μπορεί να επηρεάσει την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Για τη συγκριτική υπολογιστική αξιολόγηση διατηρείται επίσης το Optifloat × ECLAZ [53] ως στατικό low-e σύστημα αναφοράς. Πρόκειται για συνδυασμό δύο εμπορικών υαλοπινάκων, ενός διαυγούς υαλοπίνακα Optifloat και ενός υαλοπίνακα ECLAZ χαμηλής εκπομπής, ο οποίος χρησιμοποιείται ως ώριμη φασματικά επιλεκτική βάση σύγκρισης λόγω της διαθεσιμότητας των απαιτούμενων δεδομένων και της δυνατότητας εισαγωγής του στο LBNL WINDOW.

Κεφάλαιο 4ο: Υπολογιστικά εργαλεία και διαδικασία προσομοίωσης

4.1 Ρόλος των υπολογιστικών εργαλείων στην παρούσα εργασία

Η αξιολόγηση των προηγμένων υαλοστασίων σε κτιριακό επίπεδο απαιτεί τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων, καθώς η ενεργειακή τους επίδραση δεν καθορίζεται μόνο από τις μεμονωμένες οπτικές και θερμικές τους ιδιότητες. Παράμετροι όπως η διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοπερατότητα και ο ηλιακός συντελεστής θερμικών κερδών αποκτούν πρακτική σημασία όταν ενταχθούν σε ένα συγκεκριμένο κτιριακό μοντέλο και συνδυαστούν με τις κλιματικές συνθήκες, τη γεωμετρία του κελύφους και τη λειτουργία του κτιρίου. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία δεν περιορίζεται στη βιβλιογραφική σύγκριση των συστημάτων, αλλά αξιοποιεί λογισμικά προσομοίωσης για τη σύνδεση των ιδιοτήτων των υαλοστασίων με την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου αναφοράς.

Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιούνται τα λογισμικά Optics, LBNL WINDOW και EnergyPlus, τα οποία καλύπτουν διαδοχικά στάδια της υπολογιστικής διαδικασίας. Το Optics χρησιμοποιείται για την επεξεργασία φασματικών δεδομένων και την προετοιμασία επιμέρους γυάλινων στρώσεων ή επιστρώσεων, όταν αυτό απαιτείται. Το WINDOW εφαρμόζεται στο επίπεδο του συστήματος υαλοπινάκων και επιτρέπει τον ορισμό, τη σύνθεση και τον υπολογισμό των βασικών οπτικοθερμικών χαρακτηριστικών διαφορετικών διατάξεων. Αντίστοιχα, το EnergyPlus χρησιμοποιείται στο επίπεδο του κτιρίου, με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης των επιλεγμένων υαλοστασίων στις ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση, ψύξη και τεχνητό φωτισμό.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα παραπάνω εργαλεία και τον τρόπο με τον οποίο υποστηρίζουν τη μεθοδολογία της παρούσας μελέτης. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη βασική λειτουργία τους, στις δυνατότητες που είναι χρήσιμες για την συγκεκριμένη εφαρμογή και στην μεταξύ τους σύνδεση. Η ανάλυση των επιμέρους δεικτών αξιολόγησης των υαλοστασίων έχει προηγηθεί στο Κεφάλαιο 2. Επομένως, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται μόνο ως μεγέθη που παράγονται και χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της υπολογιστικής διαδικασίας.

4.2 Λογισμικό Optics

Το Optics είναι υπολογιστικό εργαλείο του Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), το οποίο χρησιμοποιείται για την επεξεργασία οπτικών και φασματικών δεδομένων υαλοπινάκων, επιστρώσεων, εφαρμοζόμενων μεμβρανών και ελασματοποιημένων διατάξεων. Η λειτουργία του εστιάζει κυρίως στο επίπεδο της επιμέρους γυάλινης στρώσης ή του σύνθετου στρώματος, πριν αυτό χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση ενός πλήρους συστήματος. Μέσω του προγράμματος είναι δυνατή η εισαγωγή φασματικών δεδομένων, ο υπολογισμός ολοκληρωμένων οπτικών μεγεθών από τις αντίστοιχες καμπύλες και η παραγωγή καταχωρήσεων που μπορούν να αξιοποιηθούν στη συνέχεια στο WINDOW. Με αυτόν τον τρόπο, το Optics λειτουργεί ως ενδιάμεσο εργαλείο προεπεξεργασίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου τα απαιτούμενα δεδομένα δεν υπάρχουν έτοιμα στις διαθέσιμες βιβλιοθήκες ή όταν χρειάζεται να περιγραφεί μία ειδική στρώση με βάση μετρημένα φασματικά χαρακτηριστικά.

4.3 Λογισμικό LBNL WINDOW

Το WINDOW είναι λογισμικό υπολογισμού και ανάλυσης συστημάτων υαλοπινάκων και, εφόσον απαιτείται, ολοκληρωμένων συστημάτων παραθύρου, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των θερμικών, ηλιακών και οπτικών χαρακτηριστικών, λαμβάνοντας υπόψη τη διάταξη των υαλοπινάκων, τις επιμέρους στρώσεις, τα διάκενα, τα αέρια πλήρωσης, το πλαίσιο, όπου αυτό περιλαμβάνεται, και τις συνθήκες υπολογισμού. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόγραμμα επιτρέπει τη μετάβαση από τις ιδιότητες επιμέρους στοιχείων στην αξιολόγηση ολοκληρωμένων διατάξεων.

Η λειτουργία του βασίζεται στη σύνθεση του εξεταζόμενου συστήματος μέσα από επιμέρους βιβλιοθήκες, στις οποίες οργανώνονται τα δεδομένα των υλικών, των διακένων, των πλαισίων και των τελικών διατάξεων. Η δομή αυτή δίνει τη δυνατότητα συστηματικής δημιουργίας και τροποποίησης διαφορετικών διαμορφώσεων, καθώς και εξαγωγής αποτελεσμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη σύγκριση διαφορετικών επιλογών υάλωσης, είτε ως δεδομένα εισόδου σε λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων.

4.3.1 Βιβλιοθήκες του WINDOW

Η οργάνωση του WINDOW βασίζεται σε επιμέρους βιβλιοθήκες, οι οποίες αξιοποιούν καταχωρήσεις από την International Glazing Database (IGDB), δηλαδή τη διεθνή βάση δεδομένων προϊόντων υάλωσης που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα. Μέσα από τις βιβλιοθήκες αυτές αποθηκεύονται, επιλέγονται και συνδυάζονται τα δεδομένα που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση ενός συστήματος υαλοπινάκων ή ενός πλήρους παραθύρου. Κάθε βιβλιοθήκη αντιστοιχεί σε διαφορετικό επίπεδο του μοντέλου, από τα μεμονωμένα γυάλινα στρώματα και τα διάκενα έως τις συνθήκες υπολογισμού και, εφόσον απαιτείται, τα στοιχεία του πλαισίου. Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει στον χρήστη να τροποποιεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της διάταξης χωρίς να επανακαθορίζει κάθε φορά το σύνολο του μοντέλου.

Στις βασικές βιβλιοθήκες του προγράμματος περιλαμβάνονται η Glass Library, η Gap Library, η Glazing System Library, η Frame Library, η Environmental Conditions Library και η Window Library. Η κάθε μία εξυπηρετεί διαφορετικό στάδιο της μοντελοποίησης: άλλες αφορούν τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος υαλοπινάκων, ενώ άλλες χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση και την αξιολόγηση της τελικής διάταξης. Με αυτόν τον τρόπο, το λογισμικό οργανώνει τη διαδικασία σε διακριτά αλλά συνδεδεμένα επίπεδα, διευκολύνοντας τη δημιουργία, τη σύγκριση και την τροποποίηση διαφορετικών διατάξεων.

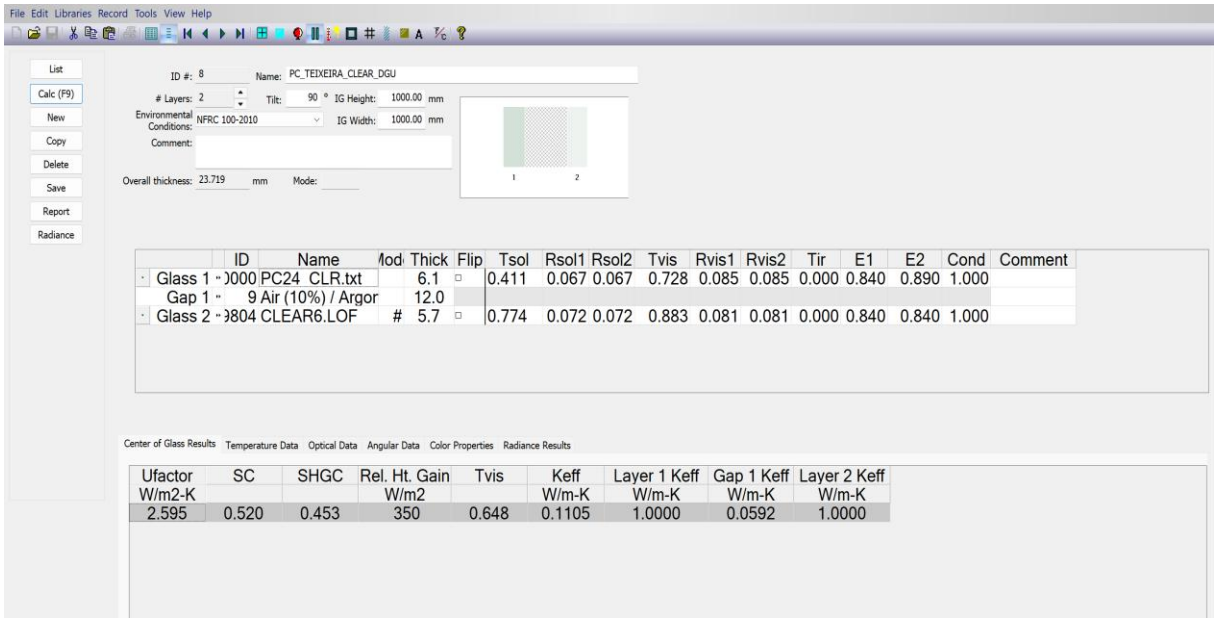
4.3.1.1 Glass Library

Η Glass Library περιλαμβάνει τις καταχωρήσεις των επιμέρους υαλοπινάκων και οπτικά χαρακτηρισμένων στρώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση ενός συστήματος υαλοπινάκων. Οι εγγραφές της βιβλιοθήκης αφορούν κυρίως προϊόντα υάλωσης, όπως διαφανείς, έγχρωμους, ανακλαστικούς ή επιστρωμένους υαλοπίνακες, ενώ μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν δεδομένα που έχουν εισαχθεί ή προεπεξεργαστεί από τον χρήστη μέσω του Optics. Για κάθε καταχώρηση δίνονται βασικά γεωμετρικά, οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά, όπως το πάχος, η ηλιακή διαπερατότητα (Tsol), η εμπρόσθια και οπίσθια ηλιακή ανακλαστικότητα (Rsol1, Rsol2), η

ορατή διαπερατότητα (Tvis), η εμπρόσθια και οπίσθια ορατή ανακλαστικότητα (Rvis1, Rvis2) και η εκπεμπτικότητα των δύο επιφανειών (Emis1, Emis2). Η επιλογή της κατάλληλης εγγραφής στη Glass Library αποτελεί βασικό στάδιο της μοντελοποίησης, καθώς οι υαλοπίνακες ή οι στρώσεις που επιλέγονται από αυτήν χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στη Glazing System Library για τη σύνθεση της τελικής διάταξης.

4.3.1.2 Glazing System Library

Η Glazing System Library αποτελεί το βασικό περιβάλλον σύνθεσης του συστήματος υαλοπινάκων. Σε αυτήν ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των γυάλινων στρώσεων (# Layers) και τη μεταξύ τους διάταξη, επιλέγοντας για κάθε θέση καταχωρήσεις από τη Glass Library και ορίζοντας τα αντίστοιχα διάκενα μέσω της Gap Library. Παράλληλα, προσδιορίζονται παράμετροι όπως η κλίση (Tilt), οι διαστάσεις του συστήματος (IG Height, IG Width) και οι συνθήκες υπολογισμού (Environmental Conditions), οι οποίες καθορίζουν τις εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες αναφοράς που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Με βάση τον συνδυασμό των επιμέρους στρώσεων, των διακένων και των επιλεγμένων συνθηκών, το WINDOW υπολογίζει τη θερμική και οπτική συμπεριφορά του συστήματος υαλοπινάκων και επιτρέπει την αξιολόγησή του πριν από τη χρήση του σε επόμενο στάδιο μοντελοποίησης.



Σχήμα 4-1 Glazing System Library στο πρόγραμμα Windows 7.7

4.3.1.3 Gap Library

Η Gap Library εμπεριέχει τα αέρια καθώς και μίγματα αυτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλήρωση στα διάκενα μεταξύ των υαλοπινάκων. Οι καταχωρήσεις της βιβλιοθήκης περιγράφονται από βασικές θερμοφυσικές ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα μέσα στο διάκενο. Σε αυτές περιλαμβάνονται η θερμική αγωγιμότητα (Conductivity), η οποία εκφράζει την ικανότητα του αερίου να μεταφέρει θερμότητα με αγωγή, το ιξώδες (Viscosity), που σχετίζεται με την αντίσταση του αερίου στη ροή, η ειδική θερμότητα (Cp), η πυκνότητα (Density) και ο αριθμός Prandtl (Prandtl), ο οποίος συνδέει τη διάχυση της ορμής με τη θερμική διάχυση. Μέσω των δεδομένων αυτών το WINDOW υπολογίζει τη θερμική συμπεριφορά του διακένου και τη συμβολή του στη

συνολική απόδοση του συστήματος υαλοπινάκων. Η επιλογή διαφορετικού αερίου, όπως αέρα, αργού, κρυπτού ή αντίστοιχου μίγματος, μπορεί να διαφοροποιήσει τη θερμομονωτική συμπεριφορά της διάταξης, καθώς τα αέρια αυτά παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας και λοιπών θερμοφυσικών ιδιοτήτων.

4.3.1.4 Frame Library και Window Library

Η Frame Library περιλαμβάνει τις καταχωρήσεις των πλαισίων που μπορούν να συνδυαστούν με ένα σύστημα υαλοπινάκων. Κάθε εγγραφή περιγράφει τη θερμική συμπεριφορά του αντίστοιχου πλαισίου, ώστε να μπορεί να ληφθεί υπόψη η συμβολή του στους υπολογισμούς του πλήρους παραθύρου. Η επιλογή πλαισίου είναι σημαντική όταν η μοντελοποίηση δεν περιορίζεται στο κεντρικό τμήμα των υαλοπινάκων, αλλά εξετάζει το παράθυρο ως συνολικό στοιχείο του κελύφους.

Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται στη Window Library, όπου το σύστημα υαλοπινάκων που έχει δημιουργηθεί στη Glazing System Library συνδυάζεται με την αντίστοιχη καταχώρηση πλαισίου από τη Frame Library και με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραθύρου. Με αυτόν τον τρόπο, η βιβλιοθήκη αυτή λειτουργεί ως το τελικό επίπεδο σύνθεσης του μοντέλου, καθώς ενώνει τα επιμέρους στοιχεία που έχουν οριστεί στις προηγούμενες βιβλιοθήκες σε μία ενιαία καταχώρηση παραθύρου.

4.3.2 Υπολογιζόμενα μεγέθη και εξαγωγή δεδομένων από το WINDOW

Ανάλογα με το επίπεδο μοντελοποίησης, το WINDOW υπολογίζει τα βασικά θερμικά, ηλιακά και οπτικά μεγέθη είτε για το σύστημα υαλοπινάκων είτε για το πλήρες παράθυρο, όταν στο μοντέλο περιλαμβάνονται και στοιχεία πλαισίου. Τα κυριότερα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τον συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value), τον συντελεστή ηλιακών θερμικών κερδών (SHGC), την ορατή διαπερατότητα (Tvis) και την ηλιακή διαπερατότητα (Tsol), καθώς και επιμέρους τιμές διαπερατότητας, ανακλαστικότητας και απορρόφησης. Τα μεγέθη αυτά συνοψίζουν τη θερμική και οπτική συμπεριφορά της εξεταζόμενης διάταξης και επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών επιλογών υάλωσης με κοινό υπολογιστικό τρόπο.

Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν είτε για άμεση αξιολόγηση διαφορετικών συστημάτων είτε ως δεδομένα εισόδου σε λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης. Για τον σκοπό αυτό, το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητα εξαγωγής των χαρακτηριστικών της διάταξης σε μορφή συμβατή με το EnergyPlus, ώστε οι ιδιότητες που υπολογίζονται στο επίπεδο της υάλωσης ή του παραθύρου να ενσωματωθούν στο κτιριακό μοντέλο. Έτσι, τα αποτελέσματα του WINDOW αποτελούν τη βάση για τη μεταγενέστερη ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων.

4.4 Λογισμικό EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι λογισμικό δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων, το οποίο αναπτύσσεται από το U.S. Department of Energy και χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων σε ετήσια ή μικρότερη χρονική κλίμακα. Μέσω του προγράμματος είναι δυνατός ο υπολογισμός θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων, της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, αερισμό και φωτισμό, καθώς και των εσωτερικών θερμοκρασιών και συνθηκών άνεσης που διαμορφώνονται κατά τη λειτουργία του κτιρίου. Για τον σκοπό αυτό, το κτίριο περιγράφεται με βάση τη γεωμετρία του, τα δομικά στοιχεία του κελύφους, τα ανοίγματα, τις θερμικές ζώνες, τα χρονοδιαγράμματα χρήσης, τα

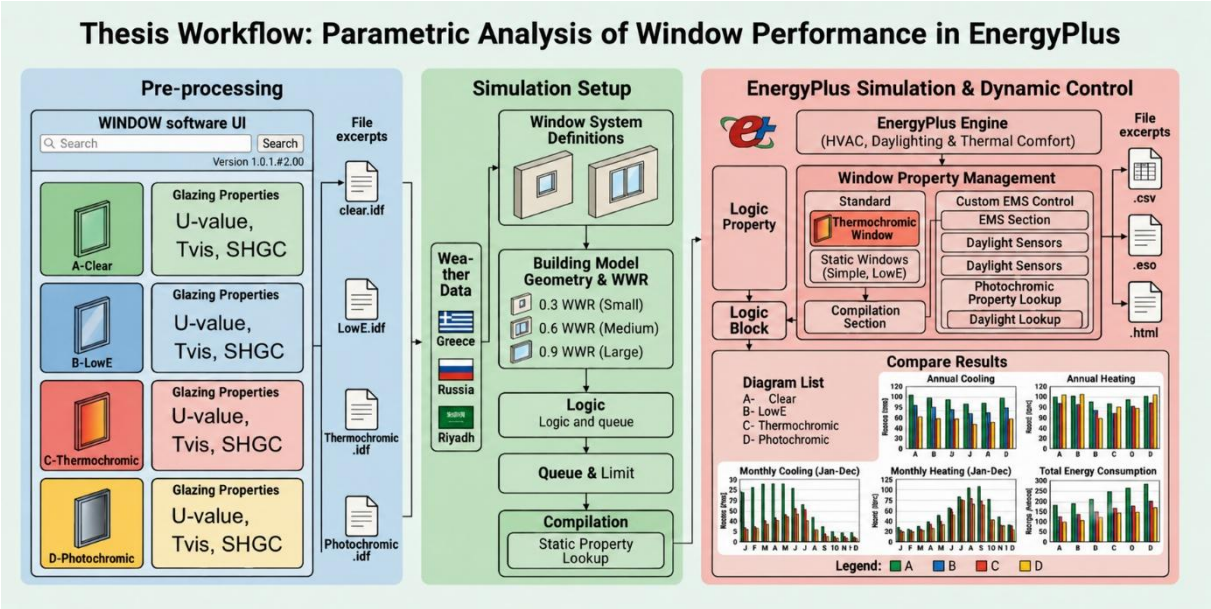
εσωτερικά φορτία, τα συστήματα φωτισμού και τα συστήματα HVAC. Το EnergyPlus βασίζεται σε υπολογισμούς θερμικού ισοζυγίου και επιτρέπει την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο κέλυφος, τις εσωτερικές συνθήκες και τα μηχανολογικά συστήματα του κτιρίου.

Πέρα από τον υπολογισμό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητες που είναι κρίσιμες για τη μελέτη του κτιριακού κελύφους. Μπορεί να υπολογίσει τις θερμικές ανταλλαγές μέσα από αδιαφανή και διαφανή δομικά στοιχεία, την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στις επιφάνειες του κτιρίου, τα ηλιακά κέρδη από τα ανοίγματα, καθώς και την επίδραση της σκίασης και του φυσικού φωτισμού. Στα υαλοστάσια, ειδικότερα, το EnergyPlus υποστηρίζει υπολογισμούς που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες των επιμέρους στρώσεων, τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, τη μετάδοση και ανάκλαση της ακτινοβολίας και την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας στα διαφορετικά στρώματα του υαλοπίνακα. Έτσι, η επίδραση ενός υαλοστασίου δεν περιορίζεται σε μία απλή τιμή θερμοπερατότητας, αλλά ενσωματώνεται στον υπολογισμό των ηλιακών κερδών, των θερμικών ροών και των φορτίων του κτιρίου.

Σημαντικό στοιχείο του EnergyPlus αποτελεί επίσης η δυνατότητα προσομοίωσης πιο σύνθετων ή ελεγχόμενων στοιχείων του κελύφους. Το πρόγραμμα μπορεί να χειριστεί συστήματα σκίασης, ελεγχόμενες περσίδες, ηλεκτροχρωμικά και θερμοχρωμικά υαλοστάσια, καθώς και άλλες περιπτώσεις όπου οι ιδιότητες της υάλωσης δεν παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η δυνατότητα αυτή είναι απαραίτητη για την ανάλυση δυναμικών υαλοστασίων, καθώς επιτρέπει την εισαγωγή μεταβαλλόμενων καταστάσεων λειτουργίας στο ίδιο κτιριακό μοντέλο, αντί της θεώρησης μίας σταθερής τιμής ιδιοτήτων για όλη την περίοδο υπολογισμού.

4.5 Συνολική διαδικασία προσομοίωσης

Η συνολική διαδικασία προσομοίωσης οργανώθηκε με στόχο τη μετατροπή των τελικών συστημάτων που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο της μελέτης στην κατάλληλη μορφή για ετήσια ενεργειακή ανάλυση στο EnergyPlus. Η γενική ροή της διαδικασίας παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4-2 και περιλαμβάνει την προετοιμασία των καταχωρήσεων υαλοστασίων, την υπολογιστική τους αναπαράσταση μέσω Optics και WINDOW, την εισαγωγή τους στο κτιριακό EnergyPlus μοντέλο και, τέλος, την εκτέλεση των ετήσιων προσομοιώσεων για τα εξεταζόμενα σενάρια. Με τον τρόπο αυτό, τα συστήματα που επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφική και φασματική αξιολόγηση εξετάστηκαν πλέον σε κτιριακό επίπεδο, μέσα σε κοινό υπολογιστικό πλαίσιο.



Σχήμα 4-2 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας προσομοίωσης, από τη μοντελοποίηση των υαλοστασίων έως την εκτέλεση και εξαγωγή αποτελεσμάτων στο EnergyPlus.

Αρχικά, για κάθε περίπτωση υαλοστασίου δημιουργήθηκε η αντίστοιχη υπολογιστική περιγραφή σε επίπεδο συστήματος υάλωσης . Βασική αρχή της μοντελοποίησης ήταν όλα τα εξεταζόμενα υαλοστάσια να αποδοθούν σε συγκρίσιμη διάταξη διπλού υαλοστασίου. Η επιλογή αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς τα τελικά συστήματα δεν προέρχονται από έτοιμες εμπορικές μονάδες υάλωσης με κοινή γεωμετρία, αλλά περιλαμβάνουν διαφορετικές τεχνολογικές μορφές, όπως εμπορικό γυαλί, επίστρωση και μεμβράνη. Για τον λόγο αυτό, η βασική δομή του υαλοστασίου διατηρήθηκε κοινή, με αντίστοιχη διάταξη υαλοπινάκων και διάκενου, ώστε οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων να συνδέονται κυρίως με τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες της εξεταζόμενης τεχνολογίας και όχι με διαφορετική γεωμετρία του παραθύρου. Το υαλοστάσιο αναφοράς δημιουργήθηκε ως συμβατικό διπλό υαλοστάσιο με δύο συμβατικούς υαλοπίνακες πάχους 6 mm και διάκενο 12 mm, πληρωμένο με μίγμα 90% αργού και 10% αέρα, ενώ το στατικό φασματικά επιλεκτικό/low-e σενάριο βασίστηκε σε εμπορική καταχώρηση από την Glass Library του WINDOW, η οποία συνδυάστηκε με έναν συμβατικό υαλοπίνακα στην ίδια λογική διάταξης.

Για το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία, καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα από τη βιβλιογραφία παρείχαν φασματικά δεδομένα διαπερατότητας και ανακλαστικότητας για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Τα δεδομένα αυτά αρχικά ψηφιοποιήθηκαν και εισήχθησαν στο λογισμικό Optics, ώστε να δημιουργηθούν οι αντίστοιχες καταχωρήσεις υλικού. Στη συνέχεια, οι καταχωρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στο WINDOW για τη σύνθεση του φωτοχρωμικού υαλοστασίου στην κοινή διάταξη διπλής υάλωσης. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν δύο καταστάσεις του ίδιου συστήματος, μία διαυγής και μία χρωματισμένη, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τη μεταγενέστερη δυναμική εναλλαγή τους στο EnergyPlus.

Η θερμοχρωμική περίπτωση αντιμετωπίστηκε διαφορετικά, επειδή το επιλεγμένο σύστημα αφορούσε πολυστρωματική επίστρωση πάνω σε εργαστηριακό δείγμα και δεν ήταν δυνατή η άμεση ανακατασκευή του στο WINDOW με πλήρη στρωματική ακρίβεια από τα διαθέσιμα δεδομένα. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν ισοδύναμες καταχωρήσεις υαλοπίνακα για την ψυχρή και τη θερμή

κατάσταση του συστήματος, οι οποίες ενσωματώθηκαν στη συνέχεια στην κοινή διάταξη διπλού υαλοστασίου της μελέτης. Στόχος ήταν να αποδοθεί όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά η μεταβολή της οπτικής συμπεριφοράς του επιλεγμένου θερμοχρωμικού συστήματος. Η επιλογή των ισοδύναμων καταστάσεων τεκμηριώθηκε μέσω σύγκρισης με το σύστημα αναφοράς ως προς την ορατή και ηλιακή διαπερατότητα, αλλά και ως προς τη φασματική κατανομή της μεταβολής μεταξύ ψυχρής και θερμής κατάστασης. Η αναλυτική σύγκριση των υποψήφιων καταστάσεων και των αντίστοιχων δεικτών φασματικής μεταβολής παρατίθεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Στη συνέχεια, μεταξύ των δύο ακραίων καταστάσεων δημιουργήθηκαν ενδιάμεσες οπτικές καταστάσεις, ώστε η θερμοχρωμική μετάβαση να μην αποδοθεί στο EnergyPlus ως απλή απότομη εναλλαγή μεταξύ δύο τιμών. Οι θερμοκρασιακές καταστάσεις και τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής της ψυχρής και της θερμής κατάστασης παρουσιάζονται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε την εισαγωγή του θερμοχρωμικού υαλοστασίου ως μεταβαλλόμενου συστήματος, με διακριτές καταστάσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες.

Μετά τη δημιουργία των επιμέρους καταχωρήσεων, τα υαλοστάσια εισήχθησαν στο λογισμικό EnergyPlus και εφαρμόστηκαν στις αντίστοιχες επιφάνειες ανοιγμάτων του κτιριακού μοντέλου. Τα στατικά συστήματα, δηλαδή το υαλοστάσιο αναφοράς και το low-e υαλοστάσιο, εισήχθησαν ως κατασκευές σταθερών ιδιοτήτων. Το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο προσομοιώθηκε μέσω της διαθέσιμης δυνατότητας του EnergyPlus για θερμοχρωμικά υλικά, όπου οι διαφορετικές καταχωρήσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικές θερμοκρασιακές καταστάσεις. Αντίθετα, το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο προσομοιώθηκε με χρήση του εργαλείου Energy Management System (EMS) του EnergyPlus, καθώς η λειτουργία του έπρεπε να συνδεθεί με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Στο πλαίσιο αυτό, το EMS χρησιμοποιήθηκε για την εναλλαγή των επιφανειών μεταξύ της διαυγούς και της χρωματισμένης κατασκευής, ανάλογα με τις συνθήκες ακτινοβολίας κάθε προσανατολισμού.

Στο τελικό στάδιο, οι καταχωρήσεις των υαλοστασίων εφαρμόστηκαν στο ίδιο κτιριακό μοντέλο αναφοράς και συνδυάστηκαν με τις προκαθορισμένες παραμέτρους της μελέτης. Οι ετήσιες προσομοιώσεις οργανώθηκαν παραμετρικά, με μεταβλητές τον τύπο υαλοστασίου, τον λόγο επιφάνειας υαλοστασίων προς εξωτερική τοιχοποιία και την κλιματική περιοχή. Τα υπόλοιπα βασικά χαρακτηριστικά του κτιρίου διατηρήθηκαν σταθερά. Από τις προσομοιώσεις εξήχθησαν τα βασικά ενεργειακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, όπως οι απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης, η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας και η ενεργειακή ένταση του κτιρίου. Οι χρόνοι εκτέλεσης των επιμέρους προσομοιώσεων καταγράφηκαν συμπληρωματικά, ώστε να αποτυπωθεί η υπολογιστική έκταση της διαδικασίας που εφαρμόστηκε. Η αναλυτική καταγραφή τους ανά κλιματική περιοχή, τύπο υαλοστασίου και τιμή WWR παρουσιάζεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C. Τα αποτελέσματα αυτά συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν συγκριτικά, ώστε να προκύψουν πίνακες και διαγράμματα για την αξιολόγηση της επίδρασης κάθε υαλοστασίου στις διαφορετικές κλιματικές και γεωμετρικές περιπτώσεις. Η αναλυτική περιγραφή του κτιριακού μοντέλου, των κλιματικών δεδομένων, των γεωμετρικών περιπτώσεων και των επιμέρους σεναρίων παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.6 Παραδοχές και περιορισμοί μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση των εξεταζόμενων υαλοστασίων συνοδεύεται από βασικούς περιορισμούς, καθώς τα επιλεγμένα συστήματα δεν αντιστοιχούν όλα σε πλήρη εμπορικά προϊόντα με άμεσα διαθέσιμη καταχώριση για εισαγωγή στο EnergyPlus, αλλά σε βιβλιογραφικές περιπτώσεις διαφορετικής μορφής

και διαφορετικού επιπέδου διαθέσιμων δεδομένων. Επομένως, η αναπαράστασή τους έγινε με ορισμένες υπολογιστικές παραδοχές, ώστε να μπορούν να ενταχθούν σε κοινή διάταξη διπλού υαλοστασίου και να αξιολογηθούν συγκριτικά. Στην περίπτωση του θερμοχρωμικού υαλοστασίου, η προσέγγιση δεν αποτελεί πλήρη στρωματική ανακατασκευή της αρχικής επίστρωσης, αλλά λειτουργική αναπαράσταση της μεταβολής των οπτικών ιδιοτήτων της μεταξύ ψυχρής και θερμής κατάστασης. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του φωτοχρωμικού υαλοστασίου, η λειτουργία αποδόθηκε μέσω δύο διακριτών καταστάσεων στο EMS του EnergyPlus. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση της φωτοχρωμικής απόκρισης στην ενεργειακή προσομοίωση, αλλά δεν περιγράφει αναλυτικά φαινόμενα όπως η κινητική χρωματισμού και αποχρωματισμού ή η υστέρηση.

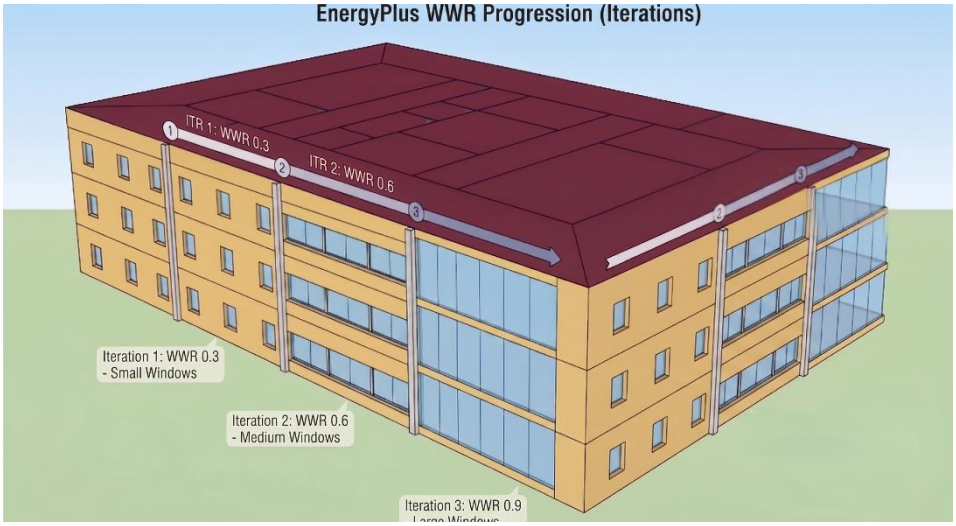
Σε επίπεδο κτιριακού μοντέλου υιοθετήθηκαν επίσης κάποιες παραδοχές. Το πρότυπο κτίριο που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί αμερικανικό πρότυπο μοντέλο και, επομένως, δεν αναπαριστά πλήρως τα κατασκευαστικά πρότυπα, τις πρακτικές λειτουργίας ή τις πραγματικές συνθήκες χρήσης ενός συγκεκριμένου ελληνικού, ρωσικού ή σαουδαραβικού κτιρίου αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία το μοντέλο προσαρμόστηκε ως προς τα κλιματικά δεδομένα, τον λόγο επιφάνειας υαλοστασίων προς εξωτερική τοιχοποιία και τον τύπο υάλωσης, ενώ η βασική λειτουργική περιγραφή του κτιρίου, τα εσωτερικά φορτία και τα προγράμματα χρήσης διατηρήθηκαν σταθερά. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων να συνδέονται κυρίως με τις παραμέτρους που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη και να μην επηρεάζονται από πρόσθετες μεταβολές στη χρήση ή στη λειτουργία του κτιρίου.

Οι ανωτέρω παραδοχές δεν αναιρούν τη χρησιμότητα της προσομοίωσης, αλλά ορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα. Η ανάλυση βασίζεται σε κοινή υπολογιστική βάση και επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων τεχνολογιών, με έμφαση στις μεταξύ τους διαφοροποιήσεις και όχι στην απόλυτη πρόβλεψη της απόδοσης ενός συγκεκριμένου προϊόντος ή πραγματικού κτιρίου.

Κεφάλαιο 5ο: Μελέτη περίπτωσης κτιρίου αναφοράς

5.1 Περιγραφή κτιρίου αναφοράς

Στην παρούσα εργασία ως κτίριο αναφοράς επιλέχθηκε το πρότυπο κτίριο Medium Office, το οποίο ανήκει στα commercial prototype building models του U.S. Department of Energy. Τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί από το Pacific Northwest National Laboratory στο πλαίσιο του Building Energy Codes Program και αποτελούν τυποποιημένα μοντέλα EnergyPlus για διαφορετικές κατηγορίες κτιρίων και κλιματικές περιοχές. Η χρήση ενός τέτοιου πρότυπου μοντέλου κρίθηκε κατάλληλη για την παρούσα μελέτη, καθώς παρέχει μια καθορισμένη και αναπαραγώγιμη κτιριακή βάση, με συγκεκριμένη γεωμετρία, θερμική ζωνοποίηση, λειτουργικά προφίλ και τεχνικές παραδοχές. Με τον τρόπο αυτό, η συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων υαλοστασίων δεν εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες ενός μεμονωμένου πραγματικού κτιρίου, αλλά πραγματοποιείται σε ένα κοινό υπολογιστικό πλαίσιο αναφοράς. Τα επίσημα DOE prototype models διατίθενται ως αρχεία EnergyPlus και χρησιμοποιούνται για μελέτες ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα πρότυπα ASHRAE 90.1 και IECC [74].



Σχήμα 5-1 Προσαρμοσμένη τρισδιάστατη απεικόνιση του κτιρίου αναφοράς Medium Office, με ενδεικτική αποτύπωση των τριών εξεταζόμενων τιμών του λόγου παραθύρων προς τοίχο (WWR 0,3, 0,6 και 0,9).

Το Medium Office αντιπροσωπεύει ένα μεσαίου μεγέθους κτίριο γραφείων, δηλαδή μια χρήση στην οποία η συμπεριφορά των υαλοστασίων έχει άμεση επίδραση στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου. Η λειτουργία των χώρων συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με τις ώρες ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό τον έλεγχο των ηλιακών κερδών, των ψυκτικών φορτίων και της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Η συνθήκη αυτή είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση προηγμένων υαλοστασίων, όπως τα θερμοχρωμικά και φωτοχρωμικά συστήματα, των οποίων η απόδοση εξαρτάται από τη μεταβολή των οπτικών και ηλιακών ιδιοτήτων τους υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Επομένως, το συγκεκριμένο πρότυπο κτίριο επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης των εξεταζόμενων υαλοστασίων σε ένα αντιπροσωπευτικό κτίριο του τριτογενούς τομέα.

Το αρχικό μοντέλο αποτελείται από τρεις ορόφους και έχει συνολική επιφάνεια περίπου 4.980 m². Η γεωμετρία του είναι σχετικά απλή και επαναλαμβανόμενη καθ' ύψος, με ύψος ορόφου περίπου 3,96 m και καθαρό ύψος χώρου περίπου 2,74 m. Η θερμική ζωνοποίηση ακολουθεί επίσης επαναλαμβανόμενη

διάταξη, καθώς κάθε όροφος περιλαμβάνει μία κεντρική ζώνη, τέσσερις περιμετρικές ζώνες και μία ζώνη plenum. Με αυτόν τον τρόπο αποδίδεται η διαφορετική θερμική συμπεριφορά των περιμετρικών χώρων, οι οποίοι επηρεάζονται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και τα υαλοστάσια, σε σχέση με τις εσωτερικές ζώνες, όπου κυριαρχούν περισσότερο τα εσωτερικά φορτία. Ο αρχικός λόγος επιφάνειας υαλοστασίων προς εξωτερική τοιχοποιία (WWR) είναι περίπου 33%, τιμή που στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί στη βασική περίπτωση WWR.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το Medium Office χρησιμοποιείται ως κοινή κτιριακή βάση για τη συγκριτική διερεύνηση τριών βασικών παραμέτρων: του κλίματος, του λόγου επιφάνειας υαλοστασίων προς εξωτερική τοιχοποιία και του τύπου υαλοστασίου. Το μοντέλο δεν αξιολογείται στις αρχικές αμερικανικές συνθήκες του αρχείου, αλλά προσαρμόζεται υπολογιστικά στις τρεις περιοχές μελέτης, το Ηράκλειο, τη Μόσχα και το Ριάντ. Η προσαρμογή αυτή, καθώς και τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις, παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

5.2 Κλιματικά δεδομένα περιοχών μελέτης

Η κλιματική διαφοροποίηση της μελέτης βασίζεται σε τρεις περιοχές με έντονα διαφορετικό θερμικό και ηλιακό προφίλ: το Ηράκλειο, τη Μόσχα και το Ριάντ. Για κάθε περιοχή χρησιμοποιήθηκαν κλιματικά δεδομένα σε μορφή EnergyPlusWeather (EPW), τα οποία περιλαμβάνουν τις ωριαίες μετεωρολογικές παραμέτρους που απαιτούνται για την ετήσια ενεργειακή προσομοίωση, όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και ταχύτητα ανέμου. Παράλληλα, τα αντίστοιχα αρχεία σχεδιαστικών ημερών (DDY) παρέχουν τις χαρακτηριστικές συνθήκες θέρμανσης και ψύξης που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των τοπικών συνθηκών σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, κάθε κλιματική περίπτωση περιγράφεται όχι μόνο από την ετήσια μεταβολή των καιρικών δεδομένων, αλλά και από τις ακραίες συνθήκες που σχετίζονται με τη διαστασιολόγηση των συστημάτων.

Πίνακας 5-1: Γεωγραφικά στοιχεία κλιματικών αρχείων

Περιοχή	**Κλιματικός σταθμός**	**Γεωγραφικό πλάτος**	**Γεωγραφικό μήκος**	**Υψόμετρο**
Ηράκλειο	Heraklion-Kazantzakis AP	35,34°	25,18°	35 m
Μόσχα	Moscow-Bibirevo	55,83°	37,62°	200 m
Ριάντ	Riyadh AB	24,72°	46,73°	634,6 m

Πίνακας 5-2: Κλιματικοί δείκτες και θερμοκρασίες σχεδιασμού

Περιοχή	Βαθμοημέρες θέρμανσης (HDD18)	Βαθμοημέρες ψύξης (CDD18)	Θερμοκρασία σχεδιασμού θέρμανσης	Θερμοκρασία σχεδιασμού ψύξης
Ηράκλειο	815	969	5,6 °C	32,2 °C
Μόσχα	4642	113	−21,5 °C	30,2 °C
Ριαντ	366	3499	6,2 °C	45,1 °C

Σημείωση: Οι θερμοκρασίες σχεδιασμού αφορούν τη θερμοκρασία ξηρού βολβού των αντίστοιχων design-day conditions για θέρμανση και ψύξη.

Το Ηράκλειο παρουσιάζει σχετικά χαμηλές βαθμοημέρες θέρμανσης και αυξημένες βαθμοημέρες ψύξης, στοιχείο που αποτυπώνει τον θερμότερο και ηλιακά εντονότερο χαρακτήρα του κλίματος. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η απόδοση των υαλοστασίων σχετίζεται κυρίως με τον περιορισμό των ανεπιθύμητων ηλιακών κερδών και τη μείωση των ψυκτικών φορτίων. Αντίθετα, η Μόσχα εμφανίζει πολύ υψηλές βαθμοημέρες θέρμανσης και περιορισμένες βαθμοημέρες ψύξης, οπότε η συμπεριφορά των υαλοστασίων αξιολογείται σε ένα πλαίσιο όπου μεγαλύτερη σημασία αποκτούν η θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους και η αξιοποίηση ή ο περιορισμός των ηλιακών κερδών ανάλογα με την εποχή. Το Ριάντ, από την άλλη πλευρά, χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές βαθμοημέρες ψύξης και πολύ περιορισμένες βαθμοημέρες θέρμανσης, γεγονός που το καθιστά αντιπροσωπευτική περίπτωση θερμού και έντονα ψυκτικά κυριαρχούμενου κλίματος. Στην περίπτωση αυτή, η αξιολόγηση των υαλοστασίων επικεντρώνεται κυρίως στην ικανότητά τους να περιορίζουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη και να μειώνουν τις απαιτήσεις ψύξης.

5.3 Χαρακτηριστικά κτιριακού κελύφους

Στο παρόν τμήμα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κτιριακού κελύφους του πρότυπου κτιρίου αναφοράς. Η περιγραφή αφορά κυρίως τα αδιαφανή δομικά στοιχεία, τη στρωματογραφία των βασικών κατασκευών του αρχικού prototype model και τη γεωμετρία των ανοιγμάτων. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν το κοινό υπόβαθρο όλων των σεναρίων της μελέτης και διατηρούνται αμετάβλητα μεταξύ των τριών κλιματικών περιοχών και των διαφορετικών τύπων υαλοστασίων. Οι μεταβολές που εισάγονται στο κέλυφος αφορούν τον λόγο επιφάνειας ανοιγμάτων προς εξωτερική τοιχοποιία, δηλαδή το WWR, ενώ τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υαλοστασίων παρουσιάζονται χωριστά στην επόμενη ενότητα.

5.3.1 Αδιαφανή δομικά στοιχεία

Τα αδιαφανή στοιχεία του κελύφους περιλαμβάνουν τις εξωτερικές τοιχοποιίες, την οροφή, το δάπεδο επί εδάφους και τις εξωτερικές θύρες. Στον Πίνακα 5-3 παρουσιάζονται οι βασικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Τα ονόματα των κατασκευών διατηρούνται όπως εμφανίζονται στο EnergyPlus, ώστε να υπάρχει άμεση αντιστοίχιση με το αρχείο προσομοίωσης, ενώ η περιγραφή των στρώσεων αποδίδεται στα ελληνικά.

Πίνακας 5-3 Κατασκευές αδιαφανών δομικών στοιχείων

Δομικό στοιχείο	**Όνομα κατασκευής στο EnergyPlus**	**Στρώσεις / περιγραφή**
Εξωτερική τοιχοποιία ισογείου	NONRES_EXT_WALL_GRD	Επίχρισμα 25 mm, γυψοσανίδα 16 mm, θερμομονωτική στρώση, γυψοσανίδα 16 mm
Εξωτερική τοιχοποιία μεσαίου ορόφου	NONRES_EXT_WALL_MID	Επίχρισμα 25 mm, γυψοσανίδα 16 mm, θερμομονωτική στρώση, γυψοσανίδα 16 mm
Εξωτερική τοιχοποιία άνω ορόφου	NONRES_EXT_WALL_TOP	Επίχρισμα 25 mm, γυψοσανίδα 16 mm, θερμομονωτική στρώση, γυψοσανίδα 16 mm
Οροφή	NONRES_ROOF	Στεγανωτική/ασφαλτική επικάλυψη, θερμομονωτική στρώση οροφής, μεταλλική επιφάνεια
Εξωτερική θύρα	SWINGING DOOR_CON	Αδιαφανές φύλλο θύρας
Δάπεδο επί εδάφους	FLOOR_FFACTOR constructions	Θερμομονωτική στρώση και πλάκα σκυροδέματος 150 mm

Οι εξωτερικές τοιχοποιίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη στάθμη του κτιρίου, καθώς το μοντέλο περιλαμβάνει διαφορετικές κατασκευές για το ισόγειο, τον μεσαίο όροφο και τον άνω όροφο. Η βασική λογική της στρωματογραφίας παραμένει κοινή, με εξωτερικό επίχρισμα, γυψοσανίδα και θερμομονωτική στρώση. Η οροφή αποτελείται από εξωτερική στεγανωτική επικάλυψη, θερμομόνωση και μεταλλική επιφάνεια, ενώ τα δάπεδα επί εδάφους αντιμετωπίζονται χωριστά λόγω της επαφής τους με το έδαφος.

5.3.2 Θερμικές ιδιότητες αδιαφανών στοιχείων

Οι θερμικές ιδιότητες των αδιαφανών στοιχείων του κελύφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4 μέσω του συντελεστή θερμοπερατότητας U. Οι τιμές αντιστοιχούν στις κατασκευές του αρχικού prototype model και διατηρούνται σταθερές σε όλα τα σενάρια της μελέτης. Με τον τρόπο αυτό, οι εξωτερικοί τοίχοι, η οροφή και οι εξωτερικές θύρες αποτελούν κοινό θερμικό υπόβαθρο, ενώ οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων αποδίδονται στις μεταβολές του WWR, του τύπου υαλοστασίου και του κλίματος.

Πίνακας 5-4 Συντελεστές θερμοπερατότητας αδιαφανών στοιχείων του κελύφους

Δομικό στοιχείο	**Όνομα κατασκευής στο EnergyPlus**	**Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m²K]**
Οροφή	NONRES_ROOF	0,221
Εξωτερική τοιχοποιία ισογείου	NONRES_EXT_WALL_GRD	0,841
Εξωτερική τοιχοποιία μεσαίου ορόφου	NONRES_EXT_WALL_MID	0,830
Εξωτερική τοιχοποιία άνω ορόφου	NONRES_EXT_WALL_TOP	1,019
Εξωτερική θύρα	SWINGING DOOR_CON	1,598

Για τα δάπεδα επί εδάφους, η θερμική ανταλλαγή με το έδαφος δεν περιγράφεται με τον ίδιο τρόπο όπως στους εξωτερικούς τοίχους ή στην οροφή. Στο EnergyPlus, η απλοποιημένη περιγραφή τέτοιων δαπέδων μπορεί να γίνει μέσω του δείκτη F, ο οποίος εκφράζει τις θερμικές απώλειες ανά μονάδα

εκτεθειμένης περιμέτρου και ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς. Η αντίστοιχη θερμική ροή μπορεί να γραφεί ως:

$$Q = A \cdot Ueff \cdot (Tout - Tin) = (Pexp \cdot F) \cdot (Tout - Tin) \quad (5.1)$$

Όπου:

Q = η θερμική ροή μέσω του δαπέδου [W]

A = η επιφάνεια του δαπέδου [m²]

$Ueff$ = ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής μεταφοράς [W/m²K]

$Tout$ = η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα [K]

Tin = η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα [K]

$Pexp$ = η εκτεθειμένη περίμετρος του δαπέδου [m]

F = ο δείκτης θερμικών απωλειών ανά μονάδα εκτεθειμένης περιμέτρου [W/mK]

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$Ueff = \frac{Pexp \cdot F}{A} \quad (5.2)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, τα δάπεδα επί εδάφους παρουσιάζονται χωριστά από τα υπόλοιπα αδιαφανή στοιχεία, στον Πίνακα 5-5, ώστε να μη συγχέεται ο ισοδύναμος U_{eff} με τον τυπικό συντελεστή θερμοπερατότητας των εξωτερικών τοίχων και της οροφής.

Πίνακας 5-5 Ισοδύναμοι συντελεστές U_{eff} για τα δάπεδα επί εδάφους

Ζώνη/θέση	**Κατασκευή στο EnergyPlus**	**U_{eff} [W/m²K]**
Περιμετρική ζώνη 1	PERIMETER_BOT_ZN_1_FLOOR_FFACTOR	0,297
Περιμετρική ζώνη 2	PERIMETER_BOT_ZN_2_FLOOR_FFACTOR	0,313
Περιμετρική ζώνη 3	PERIMETER_BOT_ZN_3_FLOOR_FFACTOR	0,297
Περιμετρική ζώνη 4	PERIMETER_BOT_ZN_4_FLOOR_FFACTOR	0,313
Εσωτερική ζώνη	CORE_BOT_ZN_5_FLOOR_FFACTOR	0,00564

5.3.3 Γεωμετρία ανοιγμάτων και περιπτώσεις WWR

Ιδιαίτερη σημασία για την παρούσα μελέτη έχει η επιφάνεια των υαλοστασίων, καθώς επηρεάζει άμεσα τα ηλιακά κέρδη, τις θερμικές απώλειες και τις ψυκτικές ή θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου. Για τον λόγο αυτό, εκτός από τη βασική γεωμετρία του πρότυπου Medium Office, εξετάζονται δύο επιπλέον γεωμετρικές παραλλαγές με αυξημένο λόγο επιφάνειας υαλοστασίων προς εξωτερική τοιχοποιία. Η

μικτή επιφάνεια των εξωτερικών τοίχων παραμένει σταθερή, ενώ μεταβάλλεται η επιφάνεια των ανοιγμάτων ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες περιπτώσεις WWR.

Πίνακας 5-6 Γεωμετρικές περιπτώσεις WWR

Περίπτωση	**Ονομαστικό WWR**	**Πραγματικό WWR στο EnergyPlus**	**Μικτή επιφάνεια εξωτερικών τοίχων [m²]**	**Επιφάνεια ανοιγμάτων [m²]**
Βασική γεωμετρία	0,33	33,00%	1.977,67	652,62
Αυξημένο WWR	0,60	59,94%	1.977,67	1.185,41
Πολύ υψηλό WWR	0,90	89,91%	1.977,67	1.778,12

Η βασική γεωμετρία αντιστοιχεί στο αρχικό πρότυπο μοντέλο, με πραγματικό WWR 33,00%. Οι δύο πρόσθετες περιπτώσεις, με πραγματικό WWR 59,94% και 89,91%, χρησιμοποιούνται ώστε να διερευνηθεί πώς μεταβάλλεται η απόκριση του κτιρίου όταν αυξάνεται σημαντικά η διαφανής επιφάνεια. Η παρουσίαση των WWR σε ξεχωριστό πίνακα επιτρέπει να διατηρηθεί σαφής διάκριση ανάμεσα στη γεωμετρική μεταβολή του κελύφους και στις ιδιότητες των υαλοστασίων, οι οποίες αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

5.4 Εξεταζόμενα υαλοστάσια και σενάρια προσομοίωσης

Στην ενεργειακή ανάλυση εξετάζονται τέσσερις περιπτώσεις υάλωσης: το υαλοστάσιο αναφοράς, ένα στατικό φασματικά επιλεκτικό υαλοστάσιο χαμηλής εκπομπής, καθώς και δύο δυναμικά συστήματα παθητικής απόκρισης, θερμοχρωμικού και φωτοχρωμικού τύπου. Οι περιπτώσεις αυτές ενσωματώνονται στο ίδιο κτιριακό μοντέλο και στις ίδιες γεωμετρικές παραλλαγές των ανοιγμάτων, ώστε η σύγκριση να βασίζεται στη μεταβολή του τύπου υαλοστασίου, του WWR και του κλιματικού προφίλ, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μοντέλου διατηρούνται σταθερά.

Οι οπτικοθερμικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για την απόδοση των εξεταζόμενων υαλοστασίων προκύπτουν από την υπολογιστική αναπαράσταση των συστημάτων και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Ενότητα 6.1. Η διερεύνηση πραγματοποιείται για τρεις γεωμετρικές περιπτώσεις WWR, δηλαδή 0,33, 0,60 και 0,90, και για τρεις κλιματικές περιοχές: το Ηράκλειο, τη Μόσχα και το Ριάντ. Από τον συνδυασμό των τεσσάρων υαλοστασίων, των τριών τιμών WWR και των τριών κλιμάτων προκύπτουν συνολικά 36 ετήσιες προσομοιώσεις.

5.5 Λειτουργικές συνθήκες κτιρίου και εξαγόμενα μεγέθη

Το κτίριο αναφοράς διατηρήθηκε ως μοντέλο γραφειακής χρήσης, με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στο αντίστοιχο πρότυπο μοντέλο Medium Office. Τα προγράμματα χρήσης, τα εσωτερικά φορτία, ο φωτισμός, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός και η βασική διάταξη των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης δεν τροποποιήθηκαν μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Με τον τρόπο αυτό, η χρήση του κτιρίου παραμένει κοινή σε όλα τα σενάρια και η σύγκριση εστιάζει στην επίδραση των

παραμέτρων που μεταβάλλονται στην παρούσα μελέτη, δηλαδή του κλίματος, του WWR και του τύπου υαλοστασίου.

Η βασική διάταξη του συστήματος HVAC διατηρήθηκε από το πρότυπο μοντέλο, ωστόσο η ενεργειακή του απόκριση δεν είναι ίδια για όλες τις περιπτώσεις. Για κάθε κλιματική περιοχή χρησιμοποιήθηκαν το αντίστοιχο αρχείο καιρού και τα αντίστοιχα design-day δεδομένα, ώστε τα φορτία σχεδιασμού και η ετήσια λειτουργία του συστήματος να αντιστοιχούν στις συνθήκες του Ηρακλείου, της Μόσχας και το Ριάντ. Αντίστοιχη διάκριση μεταξύ σταθερών λειτουργικών παραμέτρων και κλιματικά προσαρμοσμένων δεδομένων συναντάται και σε παρόμοιες μελέτες κτιριακής προσομοίωσης, όπου τα reference models διατηρούν τα βασικά χαρακτηριστικά χρήσης, ενώ οι κλιματικές συνθήκες και τα στοιχεία κελύφους διαφοροποιούνται ανά περίπτωση [61].

Πίνακας 5-7 Σύνοψη παραμέτρων λειτουργίας και αξιολόγησης του κτιριακού μοντέλου

Κατηγορία	**Προσδιορισμός στη μελέτη**
Χρήση κτιρίου	Γραφειακό κτίριο τύπου Medium Office
Προγράμματα χρήσης	Σύμφωνα με το πρότυπο μοντέλο
Εσωτερικά φορτία	Σύμφωνα με το πρότυπο μοντέλο
Φωτισμός και εξοπλισμός	Σύμφωνα με το πρότυπο μοντέλο
Σύστημα θέρμανσης και ψύξης	Διατηρείται η βασική διάταξη HVAC του πρότυπου μοντέλου, με κλιματικά προσαρμοσμένο υπολογισμό φορτίων
Κλιματικά δεδομένα	Weather file και design days ανά κλιματική περιοχή
Μεταβαλλόμενες παράμετροι	Κλιματική περιοχή, WWR, τύπος υαλοστασίου
Συνολικά ενεργειακά μεγέθη	Συνολική τελική ενέργεια κτιρίου (Total Site Energy) και ενεργειακή ένταση ανά επιφάνεια (Energy per Total Building Area)
Επιμέρους τελικές χρήσεις	Θέρμανση (Heating), ψύξη (Cooling), εσωτερικός φωτισμός (Interior Lighting) και ανεμιστήρες (Fans)
Κύρια μεγέθη αξιολόγησης	Θέρμανση, ψύξη, συνολική τελική ενέργεια και ενεργειακή ένταση
Συμπληρωματικά μεγέθη	Εσωτερικός φωτισμός και ανεμιστήρες, όπου απαιτείται για την ερμηνεία της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς

Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνεται έμφαση κυρίως στη θέρμανση και την ψύξη, καθώς αυτά τα μεγέθη επηρεάζονται άμεσα από τις θερμικές και ηλιακές ιδιότητες των υαλοστασίων. Η συνολική κατανάλωση και η ενεργειακή ένταση χρησιμοποιούνται ως συγκεντρωτικοί δείκτες σύγκρισης, ενώ οι υπόλοιπες τελικές χρήσεις αξιοποιούνται συμπληρωματικά, κυρίως για να ελεγχθεί αν οι μεταβολές στα υαλοστάσια επηρεάζουν ουσιαστικά τη συνολική ενεργειακή ισορροπία του κτιρίου.

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης και σύγκριση με αποτελέσματα βιβλιογραφίας

6.1 Οπτικοθερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υαλοστασίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι οπτικοθερμικές ιδιότητες των υαλοστασίων που χρησιμοποιήθηκαν στις ενεργειακές προσομοιώσεις. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από τη διαδικασία υπολογιστικής αναπαράστασης των συστημάτων υάλωσης και αποτέλεσαν τα δεδομένα εισόδου για την απόδοσή τους στο κτιριακό μοντέλο. Συγκεκριμένα, για κάθε εξεταζόμενο υαλοστάσιο προσδιορίστηκαν ο συντελεστής θερμοπερατότητας, ο συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών και η ορατή διαπερατότητα, καθώς οι δείκτες αυτοί επηρεάζουν άμεσα τις θερμικές ανταλλαγές, τα ηλιακά κέρδη και τη διέλευση φυσικού φωτισμού μέσω των ανοιγμάτων.

Στον Πίνακας 6-1 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (U-value), του συντελεστή ηλιακών θερμικών κερδών (SHGC/g) και της ορατής διαπερατότητας (Tvis) για το υαλοστάσιο αναφοράς, το στατικό υαλοστάσιο χαμηλής εκπομπής, το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο. Για τα στατικά συστήματα οι τιμές παραμένουν σταθερές, ενώ για τα δυναμικά υαλοστάσια παρατίθενται οι αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας, ώστε να αποτυπωθεί η μεταβολή της οπτικοθερμικής τους συμπεριφοράς κατά την ενεργοποίηση.

Πίνακας 6-1 Οπτικοθερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υαλοστασίων

Υαλοστάσιο	**Κατάσταση**	**U-value [W/m²K]**	**SHGC / g**	**Tvis**
Υαλοστάσιο αναφοράς	Σταθερή	2,553	0,707	0,784
Υαλοστάσιο low-e	Σταθερή	1,408	0,627	0,809
Θερμοχρωμικό	Ψυχρή / διαυγής	2,565	0,471	0,457
Θερμοχρωμικό	Θερμή / ενεργοποιημένη	1,554	0,325	0,380
Φωτοχρωμικό	Διαυγής	2,595	0,453	0,648
Φωτοχρωμικό	Χρωματισμένη	2,595	0,306	0,108

Σημείωση: *Για το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο, οι τιμές της ψυχρής/διαυγούς και της θερμής/ενεργοποιημένης κατάστασης αντιστοιχούν στην ισοδύναμη υπολογιστική αναπαράσταση που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο προσομοίωσης. Η επιλογή των αντίστοιχων καταστάσεων και η δημιουργία των ενδιάμεσων θερμοκρασιακών καταστάσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.*

Από τις τιμές του πίνακα προκύπτει ότι το υαλοστάσιο χαμηλής εκπομπής παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη θερμοπερατότητα σε σχέση με το υαλοστάσιο αναφοράς. Η διαφοροποίηση αυτή συνδέεται κυρίως με τον περιορισμό της θερμικής ανταλλαγής μέσω του ανοίγματος και αναμένεται να επηρεάσει περισσότερο τις απαιτήσεις θέρμανσης, ιδιαίτερα σε ψυχρότερα κλιματικά προφίλ.

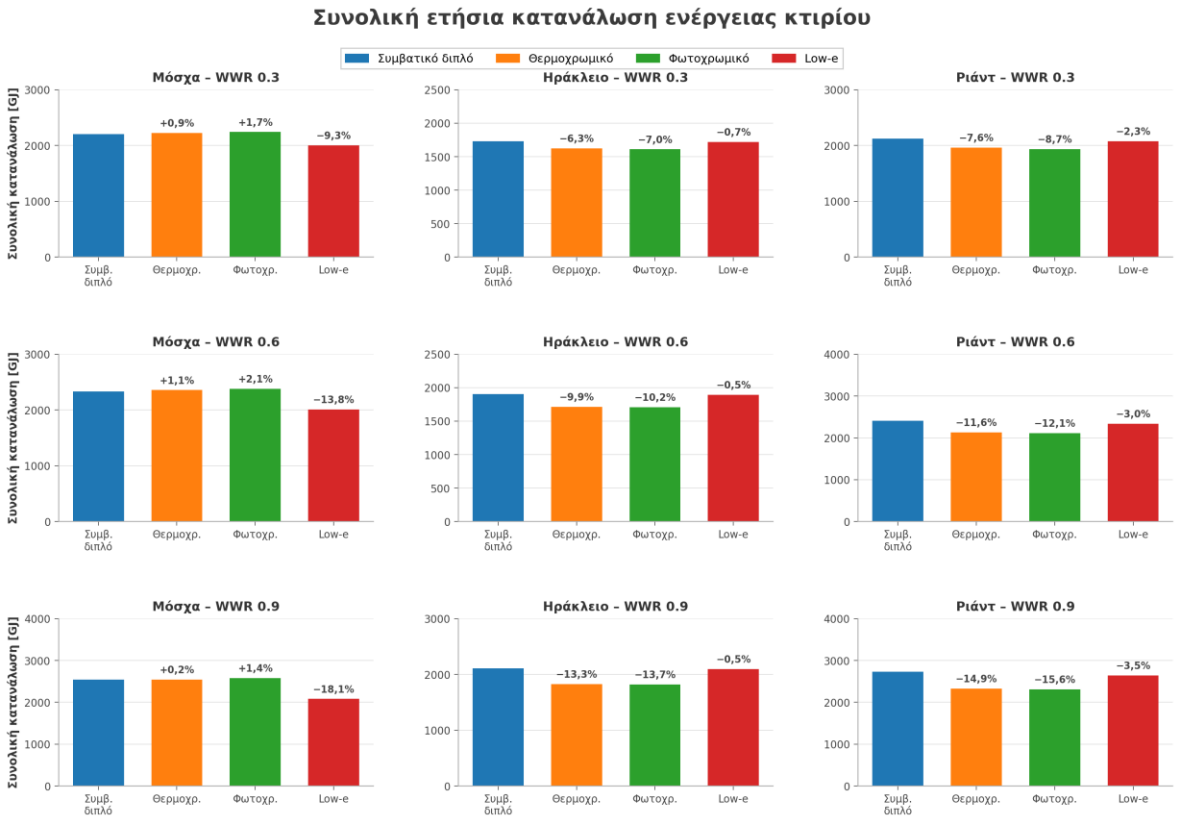
Αντίθετα, τα θερμοχρωμικά και φωτοχρωμικά υαλοστάσια χαρακτηρίζονται από μεταβολή του SHGC/g και της ορατής διαπερατότητας μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας τους. Η μείωση του SHGC/g στην ενεργοποιημένη ή χρωματισμένη κατάσταση υποδηλώνει περιορισμό των εισερχόμενων ηλιακών κερδών, γεγονός που αναμένεται να επιδράσει κυρίως στις ψυκτικές απαιτήσεις

του κτιρίου. Παράλληλα, η μείωση της Tvis, ιδίως στην περίπτωση του φωτοχρωμικού υαλοστασίου, δείχνει ότι η ενεργειακή απόκριση των δυναμικών συστημάτων συνοδεύεται και από σημαντική μεταβολή της ορατής διαπερατότητας.

Συνεπώς, οι οπτικοθερμικές ιδιότητες των εξεταζόμενων υαλοστασίων προδιαγράφουν διαφορετικούς μηχανισμούς επίδρασης στην ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου. Το υαλοστάσιο χαμηλής εκπομπής αναμένεται να επηρεάσει κυρίως τις θερμικές απώλειες, ενώ τα θερμοχρωμικά και φωτοχρωμικά υαλοστάσια αναμένεται να επιδράσουν κυρίως μέσω της μεταβολής των ηλιακών κερδών. Η επίδραση αυτή εξετάζεται στις επόμενες ενότητες μέσω της ετήσιας και μηνιαίας ανάλυσης των ενεργειακών αποτελεσμάτων.

6.2 Ετήσια συνολική ενεργειακή κατανάλωση

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου εξετάζεται όπως υπολογίζεται από το EnergyPlus μέσω του δείκτη Total Site Energy, για κάθε συνδυασμό κλιματικής περιοχής, WWR και τύπου υαλοστασίου. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται ως συνολικός δείκτης της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου, πριν από τη χωριστή εξέταση των επιμέρους απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης. Στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνονται και οι αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο αναφοράς, ώστε να είναι εμφανής η σχετική διαφοροποίηση μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων.



Σχήμα 6-1 Ετήσια συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-1, η συνολική ετήσια κατανάλωση διαφοροποιείται ανάλογα με το κλιματικό προφίλ και τον τύπο του υαλοστασίου. Στο Ηράκλειο, οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται για τα χρωμογενή υαλοστάσια, ενώ το low-e παραμένει κοντά στο υαλοστάσιο αναφοράς. Στη Μόσχα, η χαμηλότερη κατανάλωση εμφανίζεται για το low-e υαλοστάσιο σε όλες τις εξεταζόμενες τιμές WWR, ενώ το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο δεν οδηγούν σε μείωση της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης, αντιθέτως εμφανίζουν μικρή αύξηση. Στο Ριάντ, οι χαμηλότερες τιμές καταγράφονται ξανά για τα δυναμικά υαλοστάσια, με μικρή διαφοροποίηση μεταξύ φωτοχρωμικού και θερμοχρωμικού.

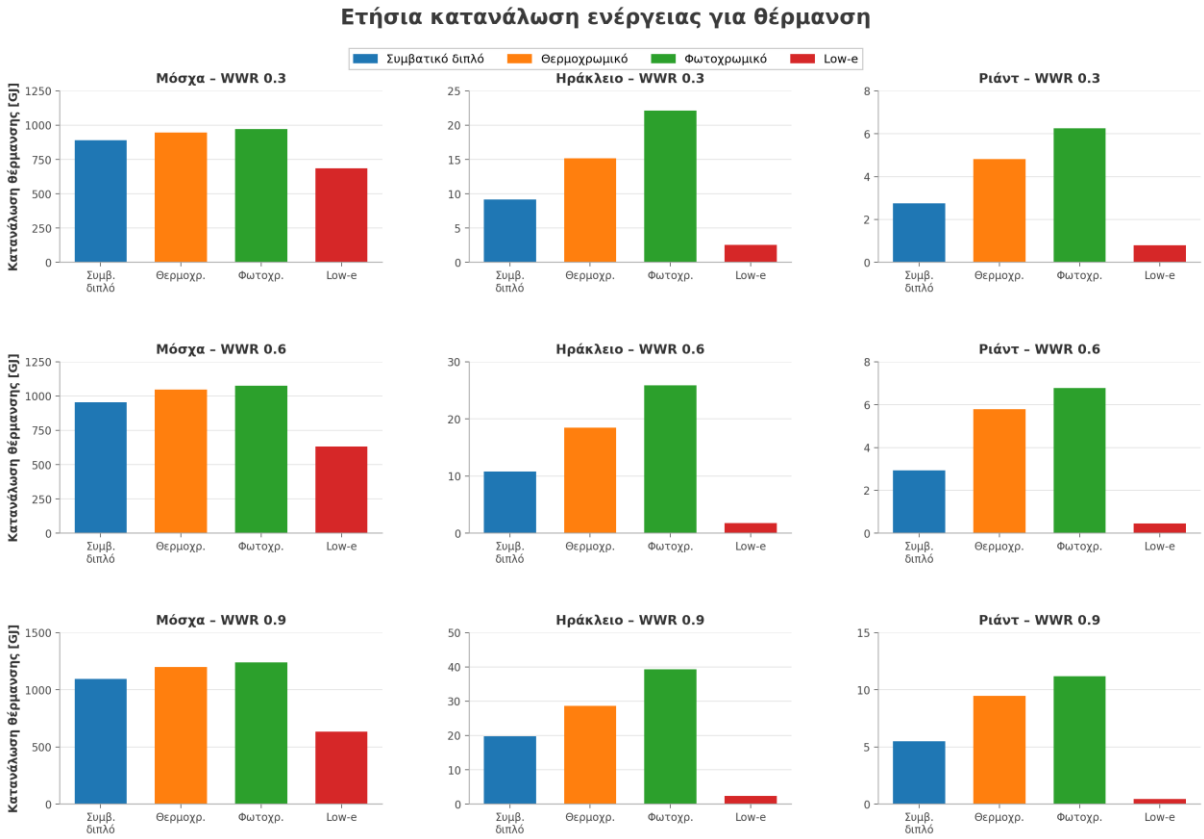
Η συνολική αυτή εικόνα δείχνει ότι η απόδοση των εξεταζόμενων υαλοστασίων δεν είναι ενιαία για όλες τις κλιματικές συνθήκες. Για την ερμηνεία των διαφορών αυτών, στην επόμενη ενότητα εξετάζονται χωριστά οι ετήσιες απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης, καθώς και η συμβολή των βασικών επιμέρους ενεργειακών χρήσεων.

6.3 Ετήσιες απαιτήσεις επιμέρους τελικών χρήσεων

Μετά την παρουσίαση της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης, εξετάζονται οι βασικές επιμέρους ενεργειακές χρήσεις του κτιρίου, με έμφαση στη θέρμανση και την ψύξη. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την καλύτερη ερμηνεία των διαφορών που παρατηρήθηκαν στη συνολική κατανάλωση, καθώς δείχνει αν η μεταβολή κάθε τύπου υαλοστασίου σχετίζεται κυρίως με τις απαιτήσεις θέρμανσης ή με τις απαιτήσεις ψύξης. Παράλληλα, παρουσιάζεται η ενεργειακή κατανάλωση για τη λειτουργία ανεμιστήρων και για τις ανάγκες εσωτερικού φωτισμού, ώστε να δοθεί πληρέστερη εικόνα των βασικών τελικών χρήσεων του κτιρίου.

6.3.1 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση

Στο Σχήμα 6-2 παρουσιάζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, για κάθε κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου. Η θέρμανση δίνεται ως συνολική τελική κατανάλωση της χρήσης θέρμανσης, ανεξάρτητα από τον ενεργειακό φορέα. Επομένως, στις περιπτώσεις όπου η θέρμανση καλύπτεται από περισσότερους από έναν φορείς, όπως ηλεκτρισμό και φυσικό αέριο, η τιμή που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στο άθροισμά τους.

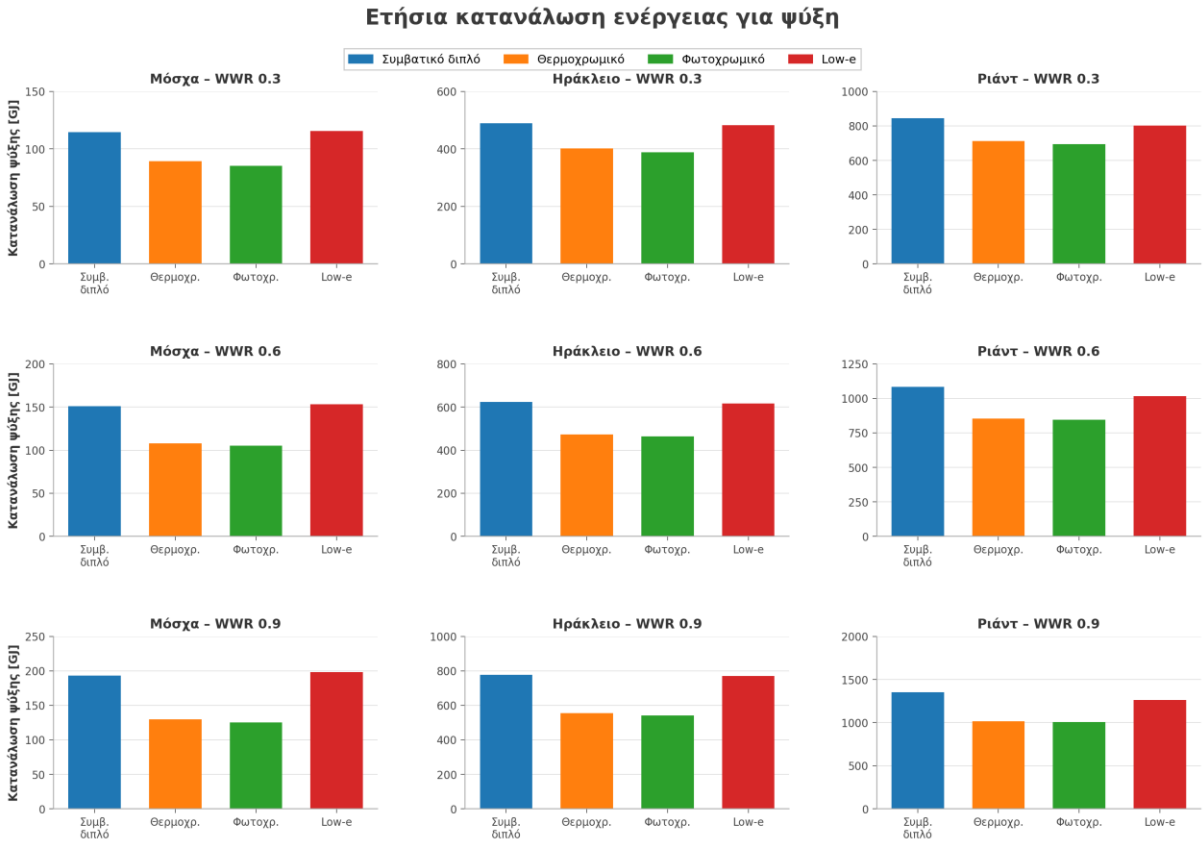


Σχήμα 6-2 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, η θέρμανση είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση της Μόσχας, ενώ στο Ηράκλειο και στο Ριάντ παραμένει πολύ χαμηλή σε απόλυτες τιμές. Στη Μόσχα, το low-e υαλοστάσιο εμφανίζει αισθητά χαμηλότερες απαιτήσεις θέρμανσης σε όλες τις τιμές WWR. Αντίθετα, το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο παρουσιάζουν υψηλότερη κατανάλωση θέρμανσης σε σχέση με το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο. Η διαφοροποίηση αυτή είναι κρίσιμη για την ερμηνεία της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς στο ψυχρότερο κλίμα. Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, οι διαφορές στη θέρμανση μεταξύ των υαλοστασίων είναι μικρές ως προς την απόλυτη τιμή τους. Επομένως, στα δύο αυτά κλίματα, η θέρμανση δεν αποτελεί τον βασικό παράγοντα που διαμορφώνει τις διαφορές της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης.

6.3.2 Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη

Στο Σχήμα 6-3 παρουσιάζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη για τους ίδιους συνδυασμούς κλίματος, WWR και τύπου υαλοστασίου.



Σχήμα 6-3 Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου

Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, η ψύξη αποτελεί σημαντικό μέρος της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης και παρουσιάζει σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των υαλοστασίων. Το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο εμφανίζουν χαμηλότερες απαιτήσεις ψύξης σε σχέση με το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο, ενώ η διαφορά γίνεται εντονότερη στις μεγαλύτερες τιμές WWR. Η τάση αυτή εξηγεί σε μεγάλο βαθμό τη μείωση της συνολικής κατανάλωσης που παρατηρήθηκε στα δυναμικά υαλοστάσια για τα θερμότερα κλίματα. Στη Μόσχα, τα δυναμικά υαλοστάσια μειώνουν επίσης την κατανάλωση ψύξης. Ωστόσο, η ψύξη έχει μικρότερη βαρύτητα σε σχέση με τη θέρμανση, με αποτέλεσμα η μείωσή της να μην αρκεί από μόνη της για να καθορίσει τη συνολική ενεργειακή εικόνα. Για τον λόγο αυτό, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων στη Μόσχα πρέπει να γίνεται κυρίως σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις θέρμανσης.

6.3.3 Συγκεντρωτική αποτύπωση επιμέρους τελικών χρήσεων

Για πληρέστερη αποτύπωση των αποτελεσμάτων, στους Πίνακας 6-2–Πίνακας 6-4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η συνολική ετήσια κατανάλωση, η ενεργειακή ένταση και οι βασικές επιμέρους τελικές χρήσεις για κάθε κλίμα. Οι πίνακες περιλαμβάνουν την κατανάλωση για θέρμανση, ψύξη, καθώς και για λειτουργία ανεμιστήρων και εσωτερικού φωτισμού. Τέλος, περιλαμβάνεται μία πρόσθετη στήλη για τις λοιπές τελικές χρήσεις.

Η στήλη «Λοιπές τελικές χρήσεις» προκύπτει ως η υπολειπόμενη διαφορά μεταξύ του Total Site Energy και των τεσσάρων βασικών μεγεθών που εξετάζονται χωριστά, δηλαδή της θέρμανσης, της ψύξης, των ανεμιστήρων και του εσωτερικού φωτισμού. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει κυρίως τον εσωτερικό

εξοπλισμό του κτιρίου, καθώς και τον εξωτερικό φωτισμό, τον εξωτερικό εξοπλισμό, τις αντλίες και τα συστήματα ζεστού νερού χρήσης. Οι χρήσεις αυτές διατηρούνται στους πίνακες για λόγους πληρότητας του ενεργειακού ισοζυγίου, αλλά δεν αποτελούν κύριο αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας μελέτης, καθώς δεν συνδέονται άμεσα με τη διαφοροποίηση του τύπου υαλοστασίου.

Πίνακας 6-2 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για το Ηράκλειο

WWR	Υαλοστάσιο	Συν. κατανάλωση [GJ]	Ενεργειακή ένταση [MJ/m²]	Θέρμανση [GJ]	Ψύξη [GJ]	Ανεμιστήρες [GJ]	Εσ. φωτισμός [GJ]	Λοιπές τελικές χρήσεις [GJ]
0.30	Συμβατικό διπλό	1732.61	347.76	9.19	490.04	110.67	230.31	892.40
	Low-e	1720.98	345.43	2.55	483.00	112.75	230.30	892.38
	Θερμοχρωμικό	1623.70	325.90	15.17	402.40	82.68	231.04	892.41
	Φωτοχρωμικό	1611.06	323.36	22.14	388.15	77.85	230.49	892.43
0.60	Συμβατικό διπλό	1903.04	381.97	10.82	623.49	146.05	230.30	892.38
	Low-e	1893.23	380.00	1.74	616.35	152.49	230.29	892.36
	Θερμοχρωμικό	1713.98	344.02	18.44	472.14	99.98	231.02	892.40
	Φωτοχρωμικό	1708.19	342.86	25.88	463.33	96.09	230.47	892.42
0.90	Συμβατικό διπλό	2108.80	423.27	19.83	776.27	190.22	230.09	892.39
	Low-e	2097.74	421.05	2.35	771.06	201.86	230.08	892.39
	Θερμοχρωμικό	1828.65	367.04	28.68	554.82	122.17	230.59	892.39
	Φωτοχρωμικό	1819.38	365.18	39.31	541.32	116.13	230.21	892.41

Πίνακας 6-3 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για τη Μόσχα

WWR	Υαλοστάσιο	Συν. κατανάλωση [GJ]	Ενεργειακή ένταση [MJ/m²]	Θέρμανση [GJ]	Ψύξη [GJ]	Ανεμιστήρες [GJ]	Εσ. φωτισμός [GJ]	Λοιπές τελικές χρήσεις [GJ]
0.30	Συμβατικό διπλό	2205.85	442.75	890.00	114.61	71.10	235.05	895.09
	Low-e	2001.56	401.74	686.68	115.49	69.41	234.98	895.00
	Θερμοχρωμικό	2226.68	446.93	947.72	89.50	57.01	237.29	895.16
	Φωτοχρωμικό	2243.19	450.24	971.68	85.41	55.23	235.70	895.17
0.60	Συμβατικό διπλό	2330.28	467.72	955.33	150.79	94.01	235.02	895.13
	Low-e	2009.26	403.29	633.12	153.45	92.74	234.96	894.99

	Θερμοχρωμικό	2357.06	473.10	1047.72	107.83	69.06	237.24	895.21
	Φωτοχρωμικό	2379.48	477.60	1075.62	105.03	67.95	235.66	895.22
0.90	Συμβατικό διπλό	2541.83	510.18	1095.74	193.10	123.61	234.22	895.16
	Low-e	2082.83	418.05	632.93	198.43	122.30	234.18	894.99
	Θερμοχρωμικό	2546.36	511.09	1200.79	129.59	85.03	235.71	895.24
	Φωτοχρωμικό	2577.07	517.26	1238.86	125.40	82.88	234.64	895.29

Πίνακας 6-4 Ετήσιες επιμέρους ενεργειακές τελικές χρήσεις για το Ριάντ

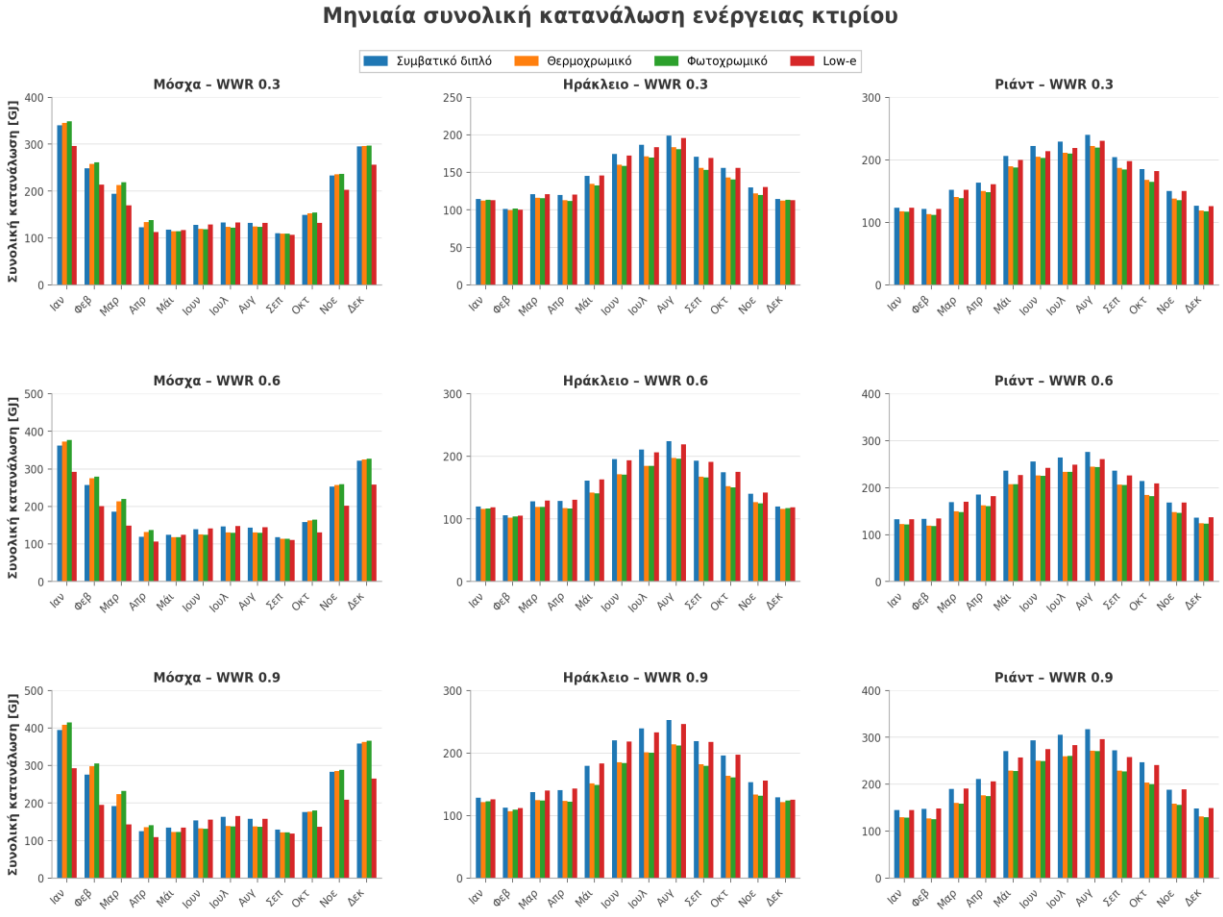
WWR	**Υαλοστάσιο**	**Συν. κατανάλωση [GJ]**	**Ενεργειακή ένταση [MJ/m²]**	**Θέρμανση [GJ]**	**Ψύξη [GJ]**	**Ανεμιστήρες [GJ]**	**Εσ. φωτισμός [GJ]**	**Λοιπές τελικές χρήσεις [GJ]**
0.30	Συμβατικό διπλό	2123.40	426.20	2.75	844.98	153.86	230.37	891.44
	Low-e	2075.62	416.61	0.80	802.76	150.27	230.37	891.42
	Θερμοχρωμικό	1961.34	393.67	4.82	712.64	121.58	230.89	891.41
	Φωτοχρωμικό	1938.18	389.02	6.25	693.79	116.28	230.47	891.39
0.60	Συμβατικό διπλό	2408.50	483.42	2.94	1083.77	199.99	230.37	891.43
	Low-e	2337.10	469.09	0.45	1017.61	197.25	230.36	891.43
	Θερμοχρωμικό	2129.28	427.38	5.78	854.72	146.52	230.87	891.39
	Φωτοχρωμικό	2117.19	424.95	6.77	845.82	142.76	230.46	891.38
0.90	Συμβατικό διπλό	2735.43	549.04	5.49	1350.80	257.44	230.26	891.44
	Low-e	2639.86	529.86	0.43	1261.51	256.21	230.25	891.46
	Θερμοχρωμικό	2327.49	467.16	9.48	1017.47	178.57	230.56	891.41
	Φωτοχρωμικό	2310.06	463.66	11.19	1004.45	172.70	230.32	891.40

Από τους πίνακες προκύπτει ότι οι διαφοροποιήσεις της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης συνδέονται κυρίως με τη θέρμανση και την ψύξη, ενώ οι υπόλοιπες τελικές χρήσεις λειτουργούν συμπληρωματικά στην αποτύπωση του ενεργειακού ισοζυγίου. Οι ανεμιστήρες μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τις απαιτήσεις του συστήματος κλιματισμού, καθώς ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη μεταβολή των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Αντίθετα, ο εσωτερικός φωτισμός παρουσιάζει περιορισμένες διαφοροποιήσεις μεταξύ των σεναρίων, γεγονός που είναι αναμενόμενο, καθώς τα προγράμματα λειτουργίας και οι βασικές παραδοχές φωτισμού του κτιριακού μοντέλου διατηρήθηκαν σταθερές. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου υαλοστασίου δεν μπορεί να γίνει με βάση μία ενιαία ενεργειακή τάση, αλλά εξαρτάται από το κυρίαρχο φορτίο κάθε κλιματικής περιοχής.

6.4 Μηνιαία κατανομή ενεργειακών απαιτήσεων

Η ετήσια ανάλυση των προηγούμενων ενοτήτων συμπληρώνεται με τη μηνιαία κατανομή της κατανάλωσης, ώστε να αποτυπωθεί η εποχική συμπεριφορά των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Η ενότητα αυτή δεν αποσκοπεί σε νέα κατάταξη των υαλοστασίων, αλλά στη χρονική ανάλυση των διαφορών που ήδη παρατηρήθηκαν σε ετήσια βάση.

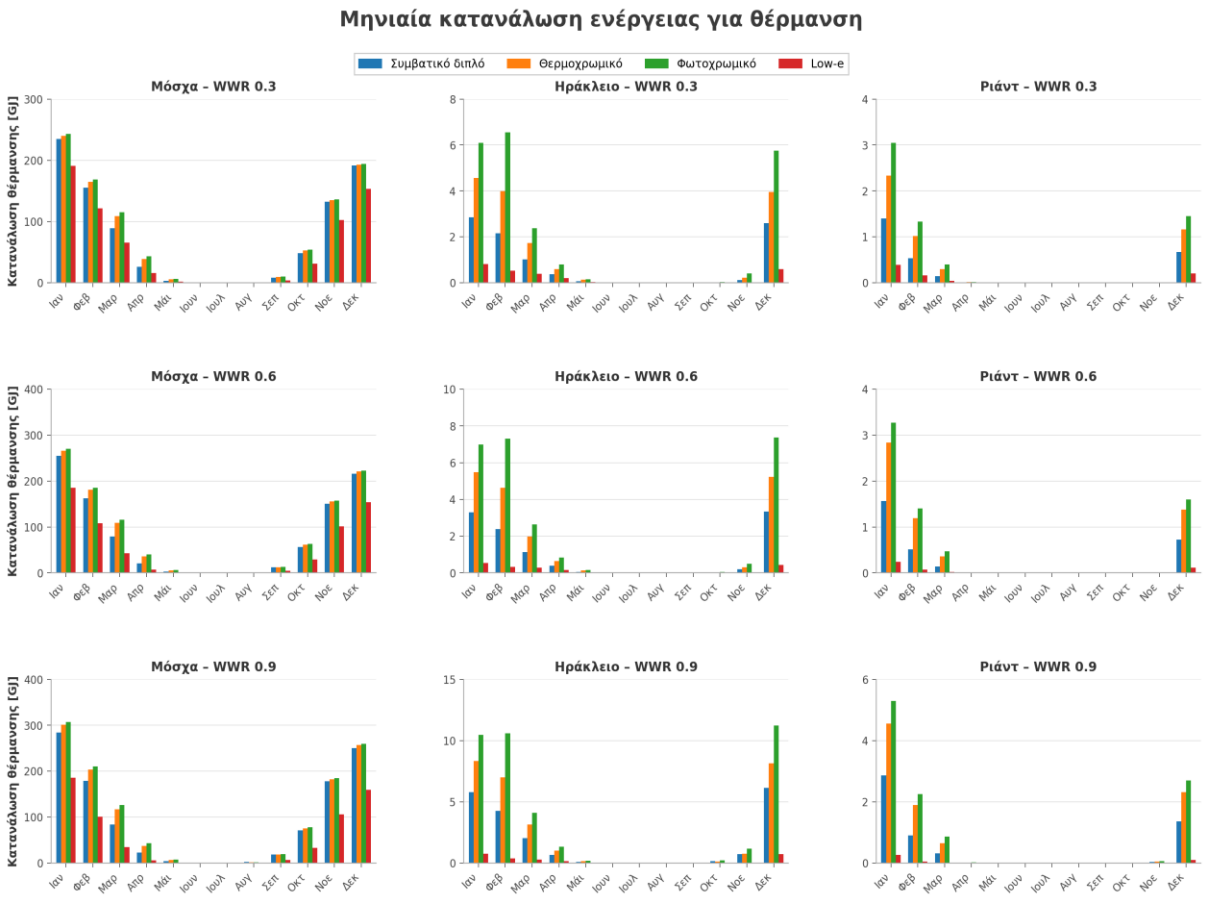
6.4.1 Μηνιαία συνολική κατανάλωση ενέργειας



Σχήμα 6-4 Μηνιαία συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου.

Η μηνιαία συνολική κατανάλωση ακολουθεί την εποχικότητα κάθε κλιματικής περιοχής. Στο Ηράκλειο οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κυρίως από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο, ενώ στο Ριάντ η περίοδος αυξημένης κατανάλωσης είναι μεγαλύτερης διάρκειας και εκτείνεται περίπου από την άνοιξη έως και τις αρχές του φθινοπώρου. Στη Μόσχα, αντίθετα, οι μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώνονται κυρίως στους χειμερινούς μήνες, από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο. Η μηνιαία εικόνα, επομένως, λειτουργεί συμπληρωματικά προς την ετήσια σύγκριση, δείχνοντας σε ποια περίοδο του έτους διαμορφώνονται οι κύριες ενεργειακές διαφοροποιήσεις.

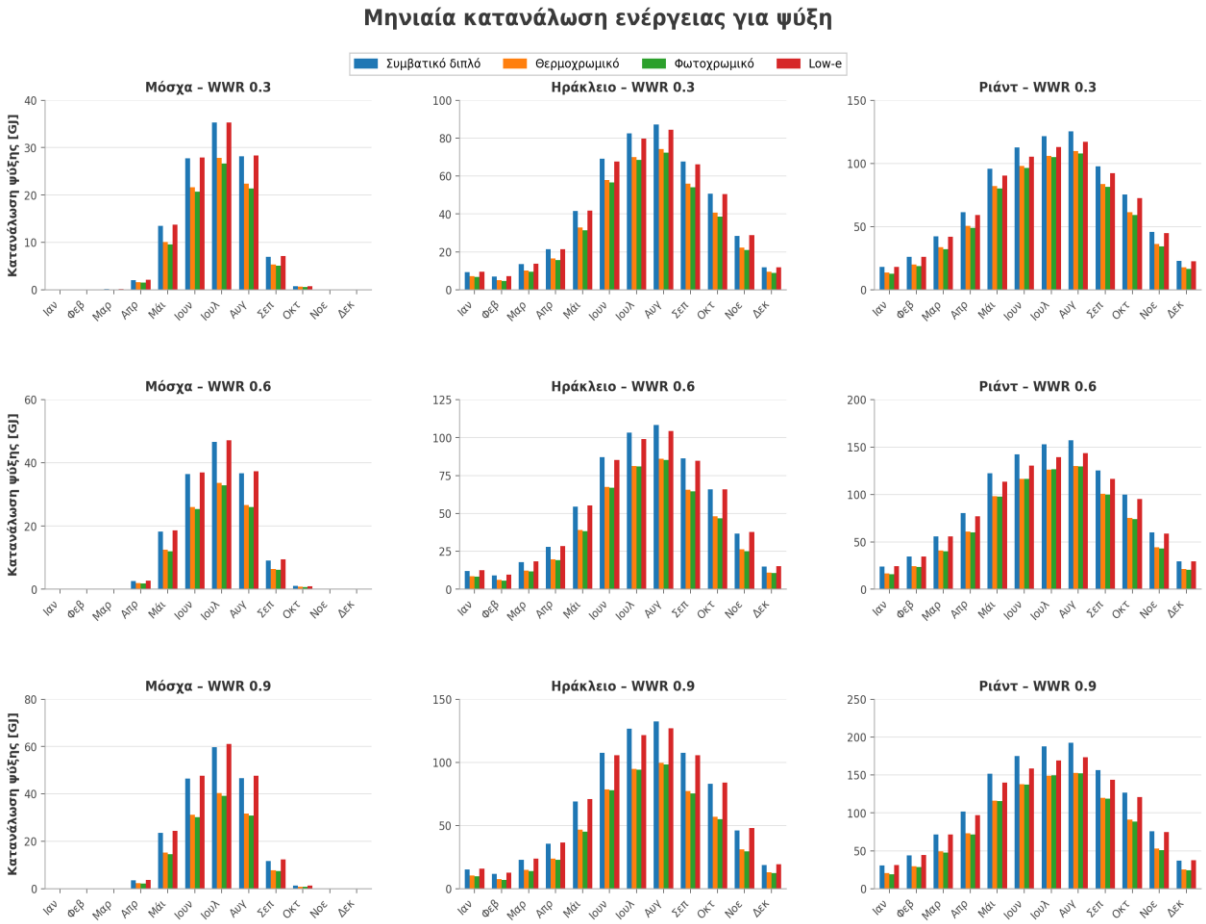
6.4.2 Μηνιαία κατανάλωση για θέρμανση



Σχήμα 6-5 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου.

Η μηνιαία κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση, όπως απεικονίζεται στα παραπάνω διαγράμματα, δείχνει ότι η σχετική κατανάλωση στη Μόσχα συγκεντρώνεται κυρίως από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο, με μέγιστες τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες. Στο Ηράκλειο η θέρμανση περιορίζεται σε μικρές τιμές, κυρίως τον χειμώνα και στις μεταβατικές περιόδους, ενώ στο Ριάντ παραμένει πρακτικά αμελητέα. Έτσι, το μηνιαίο διάγραμμα εξηγεί καλύτερα γιατί η θέρμανση επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική εικόνα κυρίως στο ψυχρότερο κλίμα.

6.4.3 Μηνιαία κατανάλωση για ψύξη



Σχήμα 6-6 Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για ψύξη ανά κλίμα, WWR και τύπο υαλοστασίου.

Η ενεργειακή κατανάλωση για ψύξη παρουσιάζει διαφορετική χρονική κατανομή ανά κλίμα. Στο Ηράκλειο αυξάνεται κυρίως από τον Μάιο έως τον Οκτώβριο, με υψηλότερες τιμές κατά τους θερινούς μήνες. Στο Ριάντ η ψυκτική περίοδος είναι πιο εκτεταμένη, καθώς η ψύξη εμφανίζεται σε σημαντικό επίπεδο στο μεγαλύτερο μέρος του έτους και κορυφώνεται το καλοκαίρι. Στη Μόσχα, αντίθετα, η ψύξη περιορίζεται κυρίως στους θερινούς μήνες και έχει μικρότερη συμμετοχή στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο. Συνολικά, η μηνιαία ανάλυση δεν αλλάζει την ετήσια εικόνα, αλλά την εξειδικεύει χρονικά, δείχνοντας πότε εμφανίζονται οι βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των υαλοστασίων.

6.5 Επίδραση του WWR στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση του λόγου παραθύρων προς εξωτερική τοιχοποιία (WWR) στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ενότητες, όπου η σύγκριση επικεντρώθηκε κυρίως στη συνολική απόδοση των υαλοστασίων ανά κλίμα, εδώ η έμφαση δίνεται στο πώς μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά όταν αυξάνεται η επιφάνεια των ανοιγμάτων. Η ανάλυση αυτή είναι σημαντική, καθώς η αύξηση του WWR οδηγεί γενικά σε

μεγαλύτερη ενεργειακή επιβάρυνση, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να αναδείξει εντονότερα τη σχετική συμβολή ορισμένων υαλοστασίων στον περιορισμό της κατανάλωσης.

Για τον σκοπό αυτό, στους Πίνακας 6-5–Πίνακας 6-7 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση για WWR 0,30, 0,60 και 0,90, καθώς και η ποσοστιαία αύξηση της κατανάλωσης μεταξύ των διαδοχικών τιμών WWR. Παράλληλα, δίνεται η σχετική μεταβολή κάθε υαλοστασίου ως προς το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο για την ίδια τιμή WWR. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται όχι μόνο η απόλυτη αύξηση της κατανάλωσης λόγω μεγαλύτερης γυάλινης επιφάνειας, αλλά και το κατά πόσο κάθε υαλοστάσιο περιορίζει αυτή την επιβάρυνση.

Πίνακας 6-5 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για το Ηράκλειο.

Υαλοστάσιο	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,30 [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,60 [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,90 [GJ]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,60 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,60→0,90 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,90 [%]**	**Σχετική μεταβολή έναντι συμβατικού 0,30 / 0,60 / 0,90 [%]**
Συμβατικό διπλό	1732,61	1903,04	2108,80	9,84	10,81	21,71	Σύστημα αναφοράς
Low-e	1720,98	1893,23	2097,74	10,01	10,80	21,89	-0,67 / -0,52 / -0,52
Θερμοχρωμικό	1623,70	1713,98	1828,65	5,56	6,69	12,62	-6,29 / -9,93 / -13,28
Φωτοχρωμικό	1611,06	1708,19	1819,38	6,03	6,51	12,93	-7,02 / -10,24 / -13,72

Στο Ηράκλειο, η αύξηση του WWR συνοδεύεται από αύξηση της συνολικής κατανάλωσης σε όλα τα υαλοστάσια, όπως είναι φανερό από τον Πίνακας 6-5. Η αύξηση αυτή είναι 21,71% στο συμβατικό διπλό και στο low-e υαλοστάσιο, ενώ περιορίζεται στο 12,62% στο θερμοχρωμικό και στο φωτοχρωμικό υαλοστάσιο. Επομένως, τα δυναμικά υαλοστάσια δεν οδηγούν σε χαμηλότερη απόλυτη κατανάλωση σε υψηλό WWR σε σχέση με το χαμηλότερο WWR, αλλά μειώνουν τον ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η κατανάλωση όταν μεγαλώνει η γυάλινη επιφάνεια.

Η ίδια τάση φαίνεται και από τη σχετική μεταβολή ως προς το συμβατικό υαλοστάσιο. Στο φωτοχρωμικό υαλοστάσιο, η μείωση της συνολικής κατανάλωσης αυξάνεται από -7,02% για WWR 0,30 σε -13,72% για WWR 0,90, ενώ αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο, από -6,29% σε -13,28%. Αυτό δείχνει ότι, όσο αυξάνεται το WWR, η σχετική συμβολή

των δυναμικών υαλοστασίων γίνεται πιο έντονη, παρότι η απόλυτη κατανάλωση εξακολουθεί να αυξάνεται.

Πίνακας 6-6 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για τη Μόσχα.

Υαλοστάσιο	**Συνολική κατανάλωση (WWR 0,30) [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση (WWR 0,60) [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση (WWR 0,90) [GJ]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,60 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,60→0,90 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,90 [%]**	**Σχετική μεταβολή έναντι συμβατικού 0,30 / 0,60 / 0,90 [%]**
Συμβατικό διπλό	2205,85	2330,28	2541,83	5,64	9,08	15,23	Σύστημα αναφοράς
Low-e	2001,56	2009,26	2082,83	0,38	3,66	4,06	-9,26 / -13,78 / -18,06
Θερμοχρωμικό	2226,68	2357,06	2546,36	5,86	8,03	14,36	+0,94 / +1,15 / +0,18
Φωτοχρωμικό	2243,19	2379,48	2577,07	6,08	8,30	14,88	+1,69 / +2,11 / +1,39

Στη Μόσχα, η επίδραση του WWR διαφοροποιείται σε σχέση με τα θερμότερα κλίματα. Το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο παρουσιάζει συνολική αύξηση 15,23% από WWR 0,30 σε WWR 0,90, ενώ το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο εμφανίζουν παρόμοια αύξηση, 14,36% και 14,88% αντίστοιχα. Αντίθετα, το low-e υαλοστάσιο παρουσιάζει πολύ μικρότερη αύξηση, μόλις 4,06%.

Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται και στη σχετική μεταβολή ως προς το συμβατικό υαλοστάσιο. Το low-e μειώνει τη συνολική κατανάλωση κατά -9,26% στο WWR 0,30, ενώ η μείωση φτάνει το -18,06% στο WWR 0,90. Αντίθετα, τα δυναμικά υαλοστάσια παραμένουν ελαφρώς υψηλότερα από το συμβατικό υαλοστάσιο σε όλες τις τιμές WWR. Συνεπώς, στο ψυχρότερο κλίμα, η αύξηση του WWR αναδεικνύει κυρίως τη σημασία του low-e υαλοστασίου, καθώς αυτό περιορίζει περισσότερο την αύξηση της συνολικής κατανάλωσης.

Πίνακας 6-7 Επίδραση του WWR στη συνολική κατανάλωση και στη σχετική μεταβολή των υαλοστασίων για το Ριάντ.

Υαλοστάσιο	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,30 [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,60 [GJ]**	**Συνολική κατανάλωση WWR 0,90 [GJ]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,60 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,60→0,90 [%]**	**Αύξηση κατανάλωσης 0,30→0,90 [%]**	**Σχετική μεταβολή έναντι συμβατικού 0,30 /**

							0,60 / 0,90 [%]
Συμβατικό διπλό	2123,40	2408,50	2735,43	13,43	13,57	28,82	Σύστημα αναφοράς
Low-e	2075,62	2337,10	2639,86	12,60	12,95	27,18	-2,25 / -2,96 / -3,49
Θερμοχρωμικό	1961,34	2129,28	2327,49	8,56	9,31	18,67	-7,63 / -11,59 / -14,91
Φωτοχρωμικό	1938,18	2117,19	2310,06	9,24	9,11	19,19	-8,72 / -12,10 / -15,55

Στο Ριάντ, η επίδραση του WWR είναι εντονότερη από όλα τα εξεταζόμενα κλίματα. Στο συμβατικό διπλό υαλοστάσιο, η συνολική κατανάλωση αυξάνεται κατά 28,82% από WWR 0,30 σε WWR 0,90, ενώ στο low-e η αντίστοιχη αύξηση είναι 27,18%. Αντίθετα, στο θερμοχρωμικό και στο φωτοχρωμικό υαλοστάσιο η αύξηση περιορίζεται σε 18,67% και 19,19% αντίστοιχα. Επομένως, στα θερμά κλίματα, η επιλογή υαλοστασίου επηρεάζει περισσότερο την ενεργειακή συνέπεια της αύξησης του WWR.

Η σχετική μεταβολή ως προς το συμβατικό υαλοστάσιο ενισχύει την ίδια εικόνα. Το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο μειώνει τη συνολική κατανάλωση κατά -8,72% στο WWR 0,30, ενώ η μείωση φτάνει το -15,55% στο WWR 0,90. Αντίστοιχα, το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο μεταβάλλεται από -7,63% σε -14,91%. Η αύξηση του WWR, επομένως, αυξάνει την απόλυτη κατανάλωση, αλλά τα χρωμογενή υαλοστάσια περιορίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό αυτή την αύξηση σε σχέση με το συμβατικό και το low-e υαλοστάσιο.

Συνολικά, η χαμηλότερη τιμή WWR οδηγεί στη μικρότερη απόλυτη κατανάλωση σε όλα τα κλίματα και για όλα τα υαλοστάσια. Με βάση το συγκεκριμένο ενεργειακό κριτήριο, δεν προκύπτει ότι η αύξηση του WWR είναι ευνοϊκή από μόνη της. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο αυξάνεται το WWR, γίνεται σημαντικότερη η επιλογή του κατάλληλου υαλοστασίου, καθώς οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων γίνονται πιο έντονες. Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, τα θερμοχρωμικά και φωτοχρωμικά υαλοστάσια περιορίζουν περισσότερο την αύξηση της κατανάλωσης, ενώ στη Μόσχα η αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται κυρίως στο low-e υαλοστάσιο. Επομένως, το WWR πρέπει να εξετάζεται πάντα σε συνδυασμό με το κλίμα και τον τύπο υαλοστασίου, καθώς η ενεργειακή επίδραση της γυάλινης επιφάνειας δεν είναι ίδια για όλα τα συστήματα.

6.6 Σύγκριση με αποτελέσματα βιβλιογραφίας

Στο παρόν τμήμα συγκεντρώνεται ένα σύνολο βιβλιογραφικών μελετών στις οποίες προηγμένα και χρωμογενή υαλοστάσια αξιολογούνται σε επίπεδο κτιρίου μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων ή συνδυασμού πειραματικών δεδομένων και ενεργειακής ανάλυσης. Οι μελέτες οργανώνονται ανά

τεχνολογική κατηγορία, ώστε να αποτυπωθούν οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, όπως το είδος του υαλοστασίου, το κτιριακό μοντέλο, το κλίμα, το WWR, το εργαλείο προσομοίωσης και οι δείκτες απόδοσης.

Το σύνολο αυτό χρησιμοποιείται ως βάση σύγκρισης με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Η σύγκριση δεν αφορά απόλυτη ταύτιση αριθμητικών τιμών, καθώς οι μελέτες διαφοροποιούνται ως προς το κτίριο, το κλίμα, το σύστημα υάλωσης, το WWR και τη στρατηγική προσομοίωσης. Αντίθετα, εξετάζεται αν οι τάσεις που προκύπτουν από την παρούσα ανάλυση συμφωνούν με τη γενικότερη βιβλιογραφική εικόνα για κάθε κατηγορία υαλοστασίου.

Πίνακας 6-8 Μελέτες αξιολόγησης θερμοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**
Θερμοχρωμικός πολυστρωματικός υαλοπίνακας Suntuitive Ni-LETC/PVB [60]	Giovannini et al. 2019	Μεμονωμένος χώρος γραφείου (3.6 m × 4.5 m × 2.7 m)	Νότια όψη	Abu Dhabi – BWh, θερμό ερημικό / ξηρό Turin – Cfa, υγρό υποτροπικό / εύκρατο μεσοθερμικό Östersund – Dfb, υγρό ηπειρωτικό / ψυχρό ηπειρωτικό κλίμα	0.50	EnergyPlus EMS + Daysim 4.0	Πρωτογενής ενέργεια, φυσικός φωτισμός	3–12% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, βελτίωση φυσικού φωτισμού
Πολυστρωματικό σύστημα αλογονιδικού περοβσκίτη/ concept IGU [39]	Rosales et al. 2023	12ώροφο μεσαίο κτίριο γραφείων	B/N/A/Δ	ΗΠΑ-IECC Zones 1–8	0.95	PVwindow, WINDOW 7, OpenStudio / EnergyPlus	Πρωτογενής ενέργεια, VT, SHGC	Εξοικονόμηση σε όλα τα κλίματα· ιδανική θερμοκρασία μετάβασης 20–27.5 °C
Διπλός υαλοπίνακας με βάση VO_2 [75]	Lu et al. 2025	11ώροφο πρότυπο κατοικίας ASHRAE	Προσανατολισμοί 0°–360°	Κίνα — 34 πόλεις σε κλιματικές περιοχές GB 50176–2016	0.30	EnergyPlus + BP neural network	Εξοικονόμηση ενέργειας, βέλτιστο Tc	Έως 20% εξοικονόμηση σε θερμά κλίματα· σχεδόν μηδενική ή αρνητική σε ψυχρά κλίματα
AlN/VO_2/AlN [76]	Wang et al. 2024	Χώρος γραφείου (6 m × 6 m × 3 m)	A/N/Δ/B (παραμετρική μελέτη)	Nanjing, Κίνα – υποτροπικό μουσωνικό κλίμα	0.60 (βελτιστοποιημένη περίπτωση)	COMSOL/ MATLAB + Rhino/EnergyPlus	Ενέργεια, UDI	Μέγιστη εξοικονόμηση 12.13%, ισορροπία ενέργειας/φυσικού φωτισμού
VO_2/BaF_2/Ag [77]	Hu et al. 2024	Θεωρητικό μοντέλο επιπέδου υαλοπίνακα	Δεν εφαρμόζεται	Παγκόσμια ανάλυση κλιματικών ζωνών	Δεν εφαρμόζεται	COMSOL + energy analysis	Tvis, εκπεμπτικότητα, εξοικονόμηση ενέργειας	>60 MJ/m² μέγιστη εξοικονόμηση, 83.8% διαμόρφωση εκπεμπτικότητας
SunSmart IGU (με βάση VO_2) [78]	Mann et al. 2022	Μονοκατοικία, διπλοκατοικία, κατοικία σε σειρά, διαμέρισμα	Δεν αναφέρεται	Ολλανδία/ Εύκρατο κλίμα	Δεν αναφέρεται	EnergyPlus v9.2.0	Ετήσια ενέργεια, εξοικονόμηση κόστους	16.7–37.1% ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας / μεγαλύτερο όφελος σε κτίρια με μεγαλύτερη επιφάνεια υαλοπινάκων

Πολυστρωματικός πολυμερικός υαλοπίνακας LETC [79]	Lee et al. 2013	Μεγάλο κτίριο γραφείων (περιμετρική ζώνη)	N/A/Δ	Chicago (θερμό/ψυχρό) και Houston (θερμό)	0.30–0.60 (βέλτιστο: 0.60)	EnergyPlus v7.0 + δοκιμή πεδίου	Ενέργεια HVAC, ηλιακή διαπερατότητα, θάμβωση	Εξοικονόμηση HVAC: 20–43% Chicago, 4–22% Houston (αυξάνει με την επιφάνεια παραθύρων)
Θερμοχρωμικό υαλοστάσιο παρούσας εργασίας	Παρούσα εργασία	Πρότυπο κτίριο γραφείων Medium Office	B/N/A/Δ	Ηράκλειο-, Μόσχα, Ριάντ/ μεσογειακό, ψυχρό και θερμό-ξηρό κλίμα	0.30 0.60 0.90	Optics/ LBNL WINDOW + EnergyPlus	Συνολική κατανάλωση, θέρμανση, ψύξη, ανεμιστήρες, εσωτερικός φωτισμός, επίδραση WWR	Μείωση συνολικής κατανάλωσης σε Ηράκλειο 6,29–13,28% και Ριάντ 7,63–14,91%, με εντονότερο όφελος σε υψηλότερο WWR. Στη Μόσχα δεν προκύπτει συνολική εξοικονόμηση, με μικρή αύξηση 0,18–1,15%

Πίνακας 6-9 Μελέτες αξιολόγησης ηλεκτροχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**
Ηλεκτροχρωμικός τριπλός υαλοπίνακας WO_3/NiW [34]	Oh et al. 2018	Κτίριο γραφείων	N/A/Δ	Incheon, Κορέα / ηπειρωτικό κλίμα	0.60	EnergyPlus v8.5	Ενέργεια, DGI, φωτισμός	Καλύτερη ισορροπία ενέργειας–φυσικού φωτισμού στα 300 W/m² solar control
Polyviologen/Zn mesh/$WO_3 \cdot 2H_2O$ EESD [35]	Sun et al. 2025	Μοντέλο γραφείου	Δεν αναφέρεται	Phoenix, Arizona, ΗΠΑ + όλα τα κλίματα των ΗΠΑ	0.40	EnergyPlus	Ενέργεια HVAC, SHGC, ετήσια/μηνιαία απόδοση	>10% ετήσια εξοικονόμηση HVAC έναντι low-E glass
PEDOT:PSS (SSC device) [37]	Zhao et al. 2022	Κτίριο γραφείων	Δεν αναφέρεται	16 παγκόσμιες τοποθεσίες + κύριες περιοχές της Κίνας	Δεν αναφέρεται	EnergyPlus	Ετήσια ενέργεια, CO_2, εσωτερική θερμοκρασία	Έως 20% συνολική εξοικονόμηση ενέργειας (μεγαλύτερη σε θερμά κλίματα)

Πίνακας 6-10 Μελέτες αξιολόγησης φωτοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**

Φωτοχρωμικό υαλοστάσιο spirooxazine / PMMA [61]	Cannavale et al. 2022	Μεσαίο κτίριο γραφείων	Α/Ν/Δ	Ιταλία (Brindisi – θερμό, Milan – ψυχρότερο) / ASHRAE 3A (Brindisi), 4A (Milan)	0.33	EnergyPlus (with EMS)	Ενέργεια, UDI, DGI	10–20% συνολική εξοικονόμηση ενέργειας (ανάλογα με το κλίμα), ισχυρή μείωση ψύξης και βελτίωση οπτικής άνεσης
Fe-WO_3 / PMMA film σε περιστρεφόμενο dual-mode DDP window [45]	Meng et al. 2024	Μοντέλο κτιρίου γραφείων	Δεν αναφέρεται	9 παγκόσμιες πόλεις / πολλαπλά κλίματα (θερμά έως ψυχρά)	Δεν αναφέρεται	DesignBuilder + Optics6	Ενέργεια, SHGC, Tlum	Έως 20% ετήσια εξοικονόμηση, εξοικονόμηση ψύξης έως 50.6%
Φωτοχρωμικό υαλοστάσιο παρούσας εργασίας	Παρούσα εργασία	Πρότυπο κτίριο γραφείων Medium Office	Β/Ν/Α/Δ	Ηράκλειο, Μόσχα, Ριάντ / μεσογειακό, ψυχρό και θερμό-ξηρό κλίμα	0.30 0.60 0.90	Optics/ LBNL WINDOW + EnergyPlus	Συνολική κατανάλωση, θέρμανση, ψύξη, ανεμιστήρες, εσωτερικός φωτισμός, επίδραση WWR	Μείωση συνολικής κατανάλωσης σε Ηράκλειο 7,02–13,72% και Ριάντ 8,72–15,55%, κυρίως λόγω μείωσης της ψύξης. Στη Μόσχα η συνολική κατανάλωση αυξάνεται κατά 1,39–2,11%.

Πίνακας 6-11 Μελέτες αξιολόγησης αεριοχρωμικών υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**
Αεριοχρωμικός διπλός υαλοπίνακας WO_3/Pd [63]	Feng et al. 2016	Ορθογωνικό 8ώροφο εμπορικό κτίριο γραφείων	Νότιο παράθυρο	Κίνα (5 πόλεις) / πολλαπλά κλίματα	0.45 Β/Ν, 0.30 Α/Δ	WINDOW 7 + eQUEST 3.64	Ενέργεια HVAC, SHGC	10.5% ετήσια εξοικονόμηση (Shanghai), 11.5% μείωση φορτίου HVAC / καλύτερο για κλίματα hot-summer/cold-winter
Αεριοχρωμικός υαλοπίνακας WO_3/Pt [72]	Morrey et al. 2023	10ώροφο κτίριο διαμερισμάτων	Αρχικός προσανατολισμός κτιρίου: 293° N + ανάλυση περιστροφής	Birmingham, UK / εύκρατο θαλάσσιο κλίμα, Cfb	0.30	WINDOW 7.8 + OpenStudio / EnergyPlus	Φορτίο HVAC, switching, προσανατολισμός	20.2% χαμηλότερο φορτίο HVAC έναντι DG, 12.7% έναντι EC
Υαλοπίνακας VGC με WO_3 και τροφοδότηση υδρογόνου [80]	Hussain 2024	Διώροφη ημι-ανεξάρτητη κατοικία	Δεν αναφέρεται	Ψυχρό/εύκρατο κλίμα (London) και θερμό/υποτροπικό κλίμα (New Delhi)	Δεν αναφέρεται	SketchUp + OPTICS6 + WINDOW 7.8 + EnergyPlus 9.6	U-value, SHGC, Tvis, θέρμανση, HVAC, ηλεκτρική ενέργεια	Έως 9.46% (London), 3.41% (New Delhi) συνολική εξοικονόμηση
Αεριοχρωμικό switchable mirror με βάση Mg–Y [81]	Liang et al. 2019	Τυπικός χώρος γραφείου (6	Νότιο παράθυρο	5 πόλεις στην Κίνα/ πολλαπλά κλίματα (SCZ, CZ,	0.60 της νότια	EnergyPlus	Ενέργεια, UDI, SHGC, switching	Έως 24.8% (Kunming), 11.1% (Guangzhou)

		m × 5 m × 3 m)		HSCWZ, TZ, HSWWZ)	ς όψης			συνολική εξοικονόμηση / κατάλληλο μόνο για cooling-dominated κλίματα

Πίνακας 6-12 Μελέτες αξιολόγησης στατικών φασματικά επιλεκτικών και low-e υαλοστασίων σε κτιριακές εφαρμογές

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**
Νανοφωτονική επίστρωση ενεργειακής αναβάθμισης SNG [82]	Berardi et al. 2019	Περιμετρικός χώρος / ζώνη όψης	Β/Α/Ν/Δ	Καναδάς (5 πόλεις) / πολλαπλά καναδικά κλίματα	0.3–1, περιπτώσεις fixed / operable / curtain wall	Optics + WINDOW + COMFEN	SHGC, U-value, EUI, θέρμανση, ψύξη	13–16% ετήσια εξοικονόμηση, 17–25% εξοικονόμηση θέρμανσης (υψηλότερο WWR αυξάνει τη ζήτηση· 0.3–0.5 έχει την καλύτερη συμπεριφορά)
Στατικό low-e υαλοστάσιο παρούσας εργασίας	Παρούσα εργασία	Πρότυπο κτίριο γραφείων Medium Office	Β/Ν/Α/Δ	Ηράκλειο, Μόσχα, Ριάντ / μεσογειακό, ψυχρό και θερμό-ξηρό κλίμα	0.30 0.60 0.90	Optics/ LBNL WINDOW + EnergyPlus	Συνολική κατανάλωση, θέρμανση, ψύξη, ανεμιστήρες, εσωτερικός φωτισμός, επίδραση WWR	Σημαντική μείωση συνολικής κατανάλωσης στη Μόσχα, 9,26–18,06%, κυρίως λόγω μείωσης της θέρμανσης. Περιορισμένη επίδραση στο Ηράκλειο, 0,52–0,67%, και μικρή μείωση στο Ριάντ, 2,25–3,49%.

Πίνακας 6-13 Συγκριτικές μελέτες αξιολόγησης ευφυών υαλοστασίων σε ελληνικά κτιριακά σενάρια

Υλικό / σύστημα υαλοπίνακα	**Συγγραφείς**	**Κτίριο / μοντέλο**	**Προσανατολισμός**	**Κλίμα / τοποθεσία**	**WWR**	**Εργαλείο**	**Δείκτες / αποτελέσματα**	**Κύρια ευρήματα / σχόλιο**
EC, SPD, LC, απλός θερμοχρωμικός, θερμοχρωμικός με low-e, υφιστάμενη κατάσταση [83]	Georgoudi 2021	Μονοκατοικία	30° από Βορρά	Καλαμαριά, Θεσσαλονίκη/ μεσογειακό	Δεν αναφέρεται	Ecotect + WINDOW 7.7.10	U, g, καθαρό ενεργειακό κέρδος	TC+low-e: χαμηλότερο U και g
Θερμοχρωμικοί, ηλεκτροχρωμικοί και συμβατικοί/στατικοί υαλοπίνακες [84]	Detsi 2019	Κτίριο γραφείων	Β/Ν/Α/Δ	Αθήνα, μεσογειακό	0.137, 0.273, 0.546	SketchUp/OpenStudio, EnergyPlus, WINDOW 7.6	θέρμανση, ψύξη, φωτισμός, ηλιακή ακτινοβολία, θερμικά κέρδη/απώλειες, CO_2	Low-e/τριπλοί: χαμηλότερη ετήσια κατανάλωση · TC/EC: μείωση ψύξης

Για τα θερμοχρωμικά υαλοστάσια, η βιβλιογραφία αναφέρει γενικά σημαντικότερη εξοικονόμηση σε θερμά ή ψυκτικά κυριαρχούμενα κλίματα, ενώ σε ψυχρότερες περιοχές το όφελος περιορίζεται ή μπορεί να αντιστραφεί. Ενδεικτικά, σε θερμοχρωμικά laminated συστήματα αναφέρονται εξοικονομήσεις της τάξης του 3–12%, σε συστήματα VO_2 πολυστρωματικής διάταξης περίπου 12%, ενώ σε θερμά κλίματα έχουν αναφερθεί και υψηλότερες τιμές, κοντά στο 20%. Η τάση αυτή συμφωνεί με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας: το θερμοχρωμικό υαλοστάσιο μειώνει τη συνολική κατανάλωση στο Ηράκλειο κατά 6,29–13,28% και στο Ριάντ κατά 7,63–14,91%, ενώ στη Μόσχα δεν εμφανίζει ενεργειακό όφελος και οδηγεί σε μικρή αύξηση της συνολικής κατανάλωσης. Επομένως, η θερμοχρωμική λειτουργία φαίνεται να είναι περισσότερο αποδοτική όταν η μείωση της ψύξης έχει μεγαλύτερη σημασία από την απώλεια ωφέλιμων ηλιακών κερδών.

Για τα φωτοχρωμικά υαλοστάσια, οι διαθέσιμες βιβλιογραφικές μελέτες δείχνουν επίσης ενδιαφέρον σε περιπτώσεις όπου η ηλιακή επιβάρυνση και η ψύξη είναι σημαντικές. Μελέτες σε συστήματα όπως spirooxazine/PMMA ή φωτοχρωμικά films με βάση WO_3 αναφέρουν συνολικές εξοικονομήσεις περίπου 10–20%, με βασικό πλεονέκτημα τη μείωση της ψύξης. Στην παρούσα εργασία, το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά στα δύο θερμότερα κλίματα, με μείωση συνολικής κατανάλωσης 7,02–13,72% στο Ηράκλειο και 8,72–15,55% στο Ριάντ. Οι τιμές αυτές είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις υψηλότερες βιβλιογραφικές αναφορές, αλλά ακολουθούν την ίδια γενική τάση. Αντίθετα, στη Μόσχα η συνολική κατανάλωση αυξάνεται κατά 1,39–2,11%, γεγονός που δείχνει ότι η μείωση της ψύξης δεν επαρκεί σε κλίμα όπου η θέρμανση έχει μεγαλύτερη βαρύτητα.

Για τα στατικά low-e ή φασματικά επιλεκτικά υαλοστάσια, η βιβλιογραφία τα παρουσιάζει ως ώριμες λύσεις κυρίως για τον περιορισμό θερμικών απωλειών και τη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς του κελύφους. Ενδεικτικά, για νανοφωτονικές ή φασματικά επιλεκτικές επιστρώσεις αναφέρονται ετήσιες εξοικονομήσεις περίπου 13–16% και μειώσεις θέρμανσης 17–25%, με την επίδραση του WWR να παραμένει κρίσιμη. Η ίδια τάση αποτυπώνεται έντονα στη Μόσχα, όπου το low-e υαλοστάσιο μειώνει τη συνολική κατανάλωση κατά 9,26–18,06%. Αντίθετα, στο Ηράκλειο η επίδρασή του είναι σχεδόν ουδέτερη, με μείωση μόλις 0,52–0,67%, ενώ στο Ριάντ η μείωση παραμένει περιορισμένη, 2,25–3,49%. Συνεπώς, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το low-e λειτουργεί αποτελεσματικότερα όταν η μείωση των θερμικών απωλειών έχει κεντρική σημασία, ενώ δεν προσφέρει αντίστοιχο όφελος σε κλίματα όπου κυριαρχεί η ανάγκη περιορισμού της ψύξης.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ακολουθούν τη γενική εικόνα της βιβλιογραφίας: τα δυναμικά χρωμογενή υαλοστάσια παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε κλίματα με αυξημένες απαιτήσεις ψύξης, ενώ τα low-e υαλοστάσια υπερέχουν σε κλίματα όπου η θέρμανση και οι θερμικές απώλειες είναι καθοριστικές. Παράλληλα, η αύξηση του WWR ενισχύει τη σημασία της επιλογής υαλοστασίου, καθώς οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων γίνονται εντονότερες όσο αυξάνεται η γυάλινη επιφάνεια.

6.7 Συνολική αποτίμηση ενεργειακής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων υαλοστασίων

Από τη συγκεντρωτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η επίδραση του τύπου υαλοστασίου στη συνολική κατανάλωση του κτιρίου εξαρτάται άμεσα από το κλίμα και από το ποσοστό υάλωσης. Η αύξηση του WWR οδηγεί γενικά σε υψηλότερη συνολική κατανάλωση, όμως ο βαθμός αύξησης διαφοροποιείται ανάλογα με το υαλοστάσιο. Για τον λόγο αυτό, η σύγκριση των συστημάτων

δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στις ιδιότητες του υαλοπίνακα, αλλά πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με το ενεργειακό προφίλ του κτιρίου.

Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, τα δυναμικά χρωμογενή υαλοστάσια παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μείωση της συνολικής κατανάλωσης σε σχέση με το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο. Στα δύο αυτά κλίματα, το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο μειώνουν κυρίως την κατανάλωση για ψύξη, με αποτέλεσμα η συνολική μείωση να γίνεται εντονότερη στα μεγαλύτερα WWR. Ενδεικτικά, στο υψηλότερο WWR η μείωση φτάνει περίπου το 13–14% στο Ηράκλειο και περίπου το 15–16% στο Ριάντ. Το low-e υαλοστάσιο παρουσιάζει μικρότερη επίδραση στα ίδια κλίματα, γεγονός που δείχνει ότι η στατική βελτίωση της θερμομονωτικής συμπεριφοράς δεν επαρκεί από μόνη της για να επιτύχει αντίστοιχο περιορισμό της κατανάλωσης ψύξης.

Στη Μόσχα παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά, καθώς η κατανάλωση για θέρμανση έχει μεγαλύτερη συμμετοχή στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Σε αυτή την περίπτωση, το low-e υαλοστάσιο οδηγεί στη μεγαλύτερη συνολική μείωση, η οποία φτάνει περίπου το 18% στο υψηλότερο WWR. Αντίθετα, τα θερμοχρωμικά και φωτοχρωμικά υαλοστάσια μειώνουν την κατανάλωση για ψύξη, αλλά η μείωση αυτή δεν αντισταθμίζει την αύξηση της κατανάλωσης για θέρμανση. Επομένως, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι η απόδοση κάθε υαλοστασίου καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ περιορισμού των ηλιακών κερδών, μείωσης της ψύξης και επίδρασης στις ανάγκες θέρμανσης.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη είχε ως αντικείμενο την αξιολόγηση χρωμογενών υαλοστασίων με στόχο τη διερεύνηση της συμβολής τους στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Η διερεύνηση δεν περιορίστηκε στη σύγκριση της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά βασίστηκε σε ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης που συνδύασε τη βιβλιογραφική καταγραφή, τη μηχανιστική ταξινόμηση, τη φασματική συμπεριφορά, τους λειτουργικούς περιορισμούς και την υπολογιστική προσομοίωση σε επίπεδο κτιρίου. Με τον τρόπο αυτό, τα χρωμογενή υαλοστάσια εξετάστηκαν όχι μόνο ως υλικά μεταβλητής διαπερατότητας, αλλά ως συστήματα των οποίων η ενεργειακή συνεισφορά εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στον μηχανισμό λειτουργίας τους και στις ανάγκες του εκάστοτε κτιρίου.

Από τη μηχανιστική αξιολόγηση προκύπτει ότι η απόδοση ενός χρωμογενούς υαλοστασίου ή υαλοπίνακα δεν ερμηνεύεται επαρκώς μόνο από το ερέθισμα που προκαλεί τη μετάβαση. Το κρίσιμο στοιχείο είναι ο τρόπος με τον οποίο ο μηχανισμός μετάβασης διαμορφώνει τη μεταβολή της διαπερατότητας και το αν η μεταβολή αυτή αφορά κυρίως την ορατή περιοχή, την εγγύς υπέρυθρη περιοχή ή ευρύτερο τμήμα του ηλιακού φάσματος. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, επειδή δύο συστήματα που ανήκουν στην ίδια γενική τεχνολογική οικογένεια μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική ενεργειακή σημασία, ανάλογα με το φασματικό εύρος και την ένταση της μεταβολής τους. Επομένως, η μηχανιστική ταξινόμηση δεν λειτουργεί απλώς ως τρόπος οργάνωσης των τεχνολογιών, αλλά ως μέσο ερμηνείας της φασματικής τους λειτουργίας.

Η αξιολόγηση των λειτουργικών περιορισμών έδειξε επίσης ότι η φασματική μεταβολή δεν αρκεί από μόνη της για να θεωρηθεί ένα σύστημα κατάλληλο για εφαρμογή σε υαλοστάσιο. Η αντιστρεψιμότητα, η σταθερότητα, η ανθεκτικότητα και η δυνατότητα επαναλαμβανόμενης μετάβασης επηρεάζουν άμεσα το κατά πόσο μια χρωμογενής τεχνολογία μπορεί να αξιοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Συνεπώς, ένα σύστημα μπορεί να εμφανίζει ενδιαφέρουσα οπτική ή φασματική απόκριση, αλλά να παραμένει λιγότερο ώριμο για κτιριακή χρήση εάν δεν τεκμηριώνεται επαρκώς η λειτουργική του αξιοπιστία. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύει την ανάγκη για συνδυασμένη αξιολόγηση μηχανισμού μετάβασης, φασματικής μεταβολής και πρακτικής καταλληλότητας.

Με βάση το παραπάνω πλαίσιο, η ενεργειακή προσομοίωση αποτέλεσε το στάδιο στο οποίο η φασματική και λειτουργική συμπεριφορά των επιλεγμένων υαλοστασίων συνδέθηκε με την κατανάλωση ενός κτιρίου γραφείων. Η σύγκριση με συμβατικό διπλό υαλοστάσιο και με στατικό low-e υαλοστάσιο επέτρεψε να αξιολογηθεί αν η δυναμική μεταβολή της διαπερατότητας προσφέρει ουσιαστικό πλεονέκτημα έναντι μιας καθιερωμένης στατικής λύσης. Έτσι, η προσομοίωση δεν λειτουργεί απλώς ως αριθμητική σύγκριση τεσσάρων υαλοστασίων, αλλά ως έλεγχος του κατά πόσο η φασματική μεταβολή των χρωμογενών συστημάτων μεταφράζεται σε πραγματική μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων στο κτίριο.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα χρωμογενή υαλοστάσια παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε κλίματα όπου η κατανάλωση για ψύξη αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής κατανάλωσης. Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, το θερμοχρωμικό και το φωτοχρωμικό υαλοστάσιο οδήγησαν σε σαφή μείωση της συνολικής κατανάλωσης σε σχέση με το συμβατικό διπλό υαλοστάσιο, με το όφελος να γίνεται εντονότερο στα μεγαλύτερα WWR. Ενδεικτικά, στο WWR 0,90 η μείωση φτάνει περίπου το 13–14% στο Ηράκλειο και το 15–16% στο Ριάντ. Τα δύο χρωμογενή συστήματα εμφάνισαν παρόμοια συνολική

συμπεριφορά, με το φωτοχρωμικό να παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη μείωση στα δύο θερμότερα κλίματα, χωρίς όμως να προκύπτει μεγάλη διαφοροποίηση έναντι του θερμοχρωμικού.

Η σύγκριση με το low-e υαλοστάσιο ανέδειξε ότι η στατική βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων δεν οδηγεί πάντα στο ίδιο αποτέλεσμα με τη δυναμική μεταβολή της διαπερατότητας. Στο Ηράκλειο και στο Ριάντ, το low-e υαλοστάσιο είχε περιορισμένη συνολική επίδραση σε σχέση με τα χρωμογενή, καθώς δεν προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες ανάγκες περιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις περιόδους αυξημένης ψύξης. Αντίθετα, στη Μόσχα, όπου η κατανάλωση για θέρμανση είναι καθοριστική, το low-e υαλοστάσιο ήταν αποδοτικότερο, με μείωση της συνολικής κατανάλωσης που φτάνει περίπου το 18% στο WWR 0,90. Στην ίδια περίπτωση, τα χρωμογενή υαλοστάσια μειώνουν την κατανάλωση για ψύξη, αλλά αυτό δεν επαρκεί ώστε να προκύψει συνολική ενεργειακή βελτίωση.

Η διερεύνηση του WWR ανέδειξε ότι η γυάλινη επιφάνεια επηρεάζει άμεσα το μέγεθος του οφέλους που μπορεί να προσφέρει κάθε τύπος υαλοστασίου. Όσο αυξάνεται το WWR, η επιλογή υαλοστασίου γίνεται πιο κρίσιμη, καθώς αυξάνεται η επίδραση της διαπερατότητας και των θερμικών ιδιοτήτων στη συνολική κατανάλωση. Στα θερμότερα κλίματα, τα χρωμογενή υαλοστάσια περιόρισαν την αύξηση της κατανάλωσης που προκαλεί η μεγαλύτερη γυάλινη επιφάνεια, ενώ στη Μόσχα η ίδια παράμετρος ανέδειξε περισσότερο την αποτελεσματικότητα του low-e. Ενδεικτικά, από WWR 0,30 σε 0,90 η αύξηση της συνολικής κατανάλωσης στα χρωμογενή παρέμεινε περίπου στο 13% στο Ηράκλειο και στο 19% στο Ριάντ, ενώ στα στατικά συστήματα ήταν σημαντικά υψηλότερη. Επομένως, το WWR δεν πρέπει να εξετάζεται αποκομμένα από το κλίμα και τον τύπο υαλοστασίου, αλλά ως παράμετρος που ενισχύει ή περιορίζει την επίδραση κάθε τεχνολογίας ανάλογα με το κλιματικό πλαίσιο.

Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι τα χρωμογενή υαλοστάσια μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά η καταλληλόλητά τους δεν είναι γενική για κάθε κλιματική περίπτωση. Στα θερμότερα κλίματα της παρούσας εργασίας, η δυναμική μείωση της διαπερατότητας συνδέεται με σαφές ενεργειακό όφελος, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερα WWR. Αντίθετα, στο ψυχρότερο κλίμα, η διατήρηση των ωφέλιμων ηλιακών κερδών και ο περιορισμός των θερμικών απωλειών αποδεικνύονται σημαντικότεροι παράγοντες. Επομένως, η επιλογή χρωμογενών υαλοστασίων πρέπει να βασίζεται σε συνδυαστική αξιολόγηση του μηχανισμού λειτουργίας, της φασματικής απόκρισης, της λειτουργικής αξιοπιστίας, του κλίματος και του WWR, και όχι σε μια γενική θεώρηση της τεχνολογίας ως ενεργειακά αποδοτικής ανεξάρτητα από το πλαίσιο εφαρμογής.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

• Περαιτέρω ανάπτυξη και εμπλουτισμός της μηχανισμοκεντρικής ταξινόμησης των χρωμογενών υαλοστασίων, με ένταξη περισσότερων συστημάτων και νεότερων τεχνολογικών διατάξεων. Με αυτόν τον τρόπο, το πλαίσιο αξιολόγησης θα μπορούσε να γίνει πιο πλήρες και να καλύπτει εκτενέστερα υβριδικές ή σύνθετες αρχιτεκτονικές υαλοστασίων.

• Επέκταση της ενεργειακής προσομοίωσης σε περισσότερες κλιματικές ζώνες και σε μελλοντικά κλιματικά σενάρια, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση των χρωμογενών υαλοστασίων υπό διαφορετικές συνθήκες θέρμανσης και ψύξης.

• Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε διαφορετικούς τύπους κτιρίων, όπως κατοικίες, ξενοδοχεία, εκπαιδευτικά ή εμπορικά κτίρια, όπου διαφοροποιούνται τα ωράρια λειτουργίας, τα εσωτερικά φορτία και οι απαιτήσεις θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού.

• Προσομοίωση περισσότερων χρωμογενών και υβριδικών υαλοστασίων, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων που συνδυάζουν δυναμική μεταβολή διαπερατότητας με low-e ή άλλα φασματικά επιλεκτικά στοιχεία.

• Επέκταση της αξιολόγησης πέρα από τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση, με ενσωμάτωση δεικτών οπτικής άνεσης, θάμβωσης, θερμικής άνεσης κοντά στα ανοίγματα και περιβαλλοντικής επίδρασης, όπως οι εκπομπές CO_2.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] "Buildings - Energy System," IEA. [Online]. Available: https://www.iea.org/energy-system/buildings

[2] "HVAC, Water Heating, and Appliances R&D," Energy.gov. [Online]. Available: https://www.energy.gov/cmei/buildings/articles/hvac-water-heating-and-appliances-rd

[3] "Building envelope - Energy Education.". Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Building_envelope

[4] R. Liang, Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson, and Y. Wu, "Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China," *Energy and Buildings*, vol. 176, pp. 216–231, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.009.

[5] K. Allen, K. Connelly, P. Rutherford, and Y. Wu, "Smart windows—Dynamic control of building energy performance," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 535–546, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.12.093.

[6] S. Wu *et al.*, "Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings," *CR-PHYS-SC*, vol. 4, no. 5, May 2023, doi: 10.1016/j.xcrp.2023.101370.

[7] "ISO/DIS 9050(en), Glass in building — Determination of luminous and solar characteristics of glazing." [Online]. Available: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:9050:dis:ed-3:v1:en

[8] R. Loonen and J. Hensen, *Smart Windows with Dynamic Spectral Selectivity – A Scoping Study*. 2015. doi: 10.26868/25222708.2015.2185.

[9] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. 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 and Solar Cells*, vol. 94, no. 2, pp. 87–105, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2009.08.021.

[10] "Glass in building - Determination of luminous and solar characteristics of glazing - Part 1: non-light-scattering materials | ELOT." . [Online]. Available: https://eshop.elot.gr/en/product/108688

[11] "ΕΛΟΤ EN 673:2025 | ELOT.". Available: https://eshop.elot.gr/en/product/107783

[12] "ISO 15099:2003," ISO. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/26425.html

[13] "Energy Performance Ratings for Windows, Doors, and Skylights," Energy.gov. [Online]. Available: https://www.energy.gov/energysaver/energy-performance-ratings-windows-doors-and-skylights

[14] "Window Types and Technologies," Energy.gov. [Online]. Available: https://www.energy.gov/energysaver/window-types-and-technologies

[15] W. J. Hee *et al.*, "The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 323–343, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.020.

[16] X. Liu and Y. Wu, “A review of advanced architectural glazing technologies for solar energy conversion and intelligent daylighting control,” *ARIN*, vol. 1, no. 1, p. 10, Aug. 2022, doi: 10.1007/s44223-022-00009-6.

[16] “3 Main Benefits of Low E Windows,” Harvey Windows & Doors. [Online]. Available: https://harveywindows.com/inspiration/ideas-advice/3-main-benefits-of-low-e-windows-harvey-windows-doors

[18] “Buy Glass How grey, bronze, green and blue tinted glass manufactured.”. [Online]. Available: https://www.buyglass.in/blog/glass/22/How-are-grey-bronze-green-and-blue-tinted-glass-manufactured

[19] L. M. Wheeler *et al.*, “Switchable photovoltaic windows enabled by reversible photothermal complex dissociation from methylammonium lead iodide,” *Nat Commun*, vol. 8, no. 1, p. 1722, Nov. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-01842-4.

[20] “Solarvolt Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Glass System Earns Top Product of the Year Honors from Environment + Energy Leader | Vitro Architectural Glass.”. [Online]. Available: https://www.vitroglazings.com/about/news/solarvolt-building-integrated-photovoltaic-bipv-glass-system-earns-top-product-of-the-year-honors-from-environment-plus-energy-leader/

[21] H. Teixeira, A. Rodrigues Moret, D. Aelenei, and M. G. Gomes, “Literature review of solar control smart building glazing: Technologies, performance, and research insights,” *Building and Environment*, vol. 274, p. 112784, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2025.112784.

[22] M. Casini, “Active dynamic windows for buildings: A review,” *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 923–934, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.12.049.

[23] Y. Ke *et al.*, “Smart Windows: Electro-, Thermo-, Mechano-, Photochromics, and Beyond,” *Advanced Energy Materials*, vol. 9, no. 39, p. 1902066, Oct. 2019, doi: 10.1002/aenm.201902066.

[24] “How Smart Windows Work,” HowStuffWorks. [Online]. Available: https://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window.htm

[25] A. Georg, W. Graf, R. Neumann, and V. Wittwer, “Mechanism of the gasochromic coloration of porous WO3 films,” *Solid State Ionics*, vol. 127, no. 3, pp. 319–328, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0167-2738(99)00273-8.

[26] K. Yoshimura, C. Langhammer, and B. Dam, “Metal hydrides for smart window and sensor applications,” *MRS Bulletin*, vol. 38, no. 6, pp. 495–503, Jun. 2013, doi: 10.1557/mrs.2013.129.

[27] K. Yoshimura, Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima, and M. Okada, “Preparation and characterization of gasochromic switchable-mirror window with practical size,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 12, pp. 2138–2142, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2009.03.023.

[28] M. Ozel and C. Ozel, “Effect of window-to-wall-area ratio on thermal performance of building wall materials in Elazığ, Turkey,” *PLOS ONE*, vol. 15, no. 9, p. e0237797, Sep. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0237797.

[29] H.-C. Lu, B. Z. Zydlewski, B. Tandon, S. A. Shubert-Zuleta, and D. J. Milliron, “Understanding the Role of Charge Storage Mechanisms in the Electrochromic Switching Kinetics of Metal Oxide Nanocrystals,” *Chem. Mater.*, vol. 34, no. 12, pp. 5621–5633, Jun. 2022, doi: 10.1021/acs.chemmater.2c00930.

[30] W. Cheng *et al.*, "Solution-Deposited Solid-State Electrochromic Windows," *iScience*, vol. 10, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.isci.2018.11.014.

[31] M. Riganti, G. Li Castri, V. Serra, M. Manca, and F. Favoino, "Energy saving potential of advanced dual-band electrochromic smart windows for office integration," *Energy and Buildings*, vol. 327, p. 115084, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115084.

[32] B. Z. Zydlewski and D. J. Milliron, "Dual-Band Electrochromic Devices Utilizing Niobium Oxide Nanocrystals," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 19, pp. 24920–24928, May 2024, doi: 10.1021/acsami.4c02997.

[33] S. Zhang, S. Cao, T. Zhang, and J. Y. Lee, "Plasmonic Oxygen-Deficient TiO2-x Nanocrystals for Dual-Band Electrochromic Smart Windows with Efficient Energy Recycling," *Adv Mater*, vol. 32, no. 43, p. e2004686, Oct. 2020, doi: 10.1002/adma.202004686.

[34] M. Oh, J. Park, S. Roh, and C. Lee, "Deducing the Optimal Control Method for Electrochromic Triple Glazing through an Integrated Evaluation of Building Energy and Daylight Performance," *Energies*, vol. 11, no. 9, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11092205.

[35] F. Sun *et al.*, "Fast-switching dual-cathode electrochromic smart windows for year-round building energy savings," *Nat Commun*, vol. 16, no. 1, p. 9569, Oct. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-64962-2.

[36] D. Ma, A. Lee-Sie Eh, S. Cao, P. S. Lee, and J. Wang, "Wide-Spectrum Modulated Electrochromic Smart Windows Based on MnO2/PB Films," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 1, pp. 1443–1451, Jan. 2022, doi: 10.1021/acsami.1c20011.

[37] Y. Zhao *et al.*, "Smart windows built with a conductive polymer with net zero energy consumption," *Cell Reports Physical Science*, vol. 3, no. 10, p. 101100, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.xcrp.2022.101100.

[38] Y. Du *et al.*, "Study on the halide effect of MA4PbX6·2H2O hybrid perovskites – From thermochromic properties to practical deployment for smart windows," *Materials Today Physics*, vol. 23, p. 100624, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.mtphys.2022.100624.

[39] B. A. Rosales *et al.*, "Thermochromic Halide Perovskite Windows with Ideal Transition Temperatures," *Advanced Energy Materials*, vol. 13, no. 12, p. 2203331, Mar. 2023, doi: 10.1002/aenm.202203331.

[40] J. Lin *et al.*, "Thermochromic halide perovskite solar cells," *Nature Mater*, vol. 17, no. 3, pp. 261–267, Mar. 2018, doi: 10.1038/s41563-017-0006-0.

[41] S. Liu *et al.*, "Mask-inspired moisture-transmitting and durable thermochromic perovskite smart windows," *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, p. 876, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-45047-y.

[42] M. Bourdin *et al.*, "Investigation on the coloring and bleaching processes of WO 3-x photochromic thin films," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 8, Jun. 2020, doi: 10.1039/D0TC02170A.

[43] T. He and J. Yao, "Photochromism in composite and hybrid materials based on transition-metal oxides and polyoxometalates," *Progress in Materials Science*, vol. 51, no. 6, pp. 810–879, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.pmatsci.2005.12.001.

[44] Y. Badour, V. Jubera, I. Andron, C. Frayret, and M. Gaudon, “Photochromism in inorganic crystallised compounds,” *Optical Materials: X*, vol. 12, p. 100110, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.omx.2021.100110.

[45] W. Meng *et al.*, “Photochromic Thermoelectric Smart Window for Season-Adaptive Solar Heat and Daylight Management,” *Advanced Functional Materials*, vol. 34, no. 38, p. 2402494, 2024, doi: 10.1002/adfm.202402494.

[46] A. J. J. Kragt and J. S. van der Burgt, “Smart photochromic glass films: the evolution in glass performance,” Apr. 24, 2025, *Research Square*. doi: 10.21203/rs.3.rs-6221722/v1.

[47] K. Khaled and U. Berardi, “Full-scale assessment of a liquid CsWO3-SnO2 near-infrared shielding coating and a nanoceramic WO3 photochromic window film for in-situ window retrofits,” *Building and Environment*, vol. 269, p. 112447, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.112447.

[48] H. Arslan *et al.*, “Anion vacancy-induced photochromism and lattice relaxation in yttrium oxyhydride,” *Commun Mater*, vol. 6, no. 1, p. 154, Jul. 2025, doi: 10.1038/s43246-025-00868-2.

[49] X. Dong, Y. Lu, X. Liu, L. Zhang, and Y. Tong, “Nanostructured tungsten oxide as photochromic material for smart devices, energy conversion, and environmental remediation,” *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 53, p. 100555, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2022.100555.

[50] L. Calvi *et al.*, “Thermochromic glass laminates comprising W/VO2 nanoparticles obtained by wet bead milling: An in-depth study of the switching performance,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 257, p. 112350, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112350.

[51] J. Yoon, K.-S. Kim, and W.-K. Hong, “Thermochromic Vanadium Dioxide Nanostructures for Smart Windows and Radiative Cooling,” *Chemistry – A European Journal*, vol. 30, no. 43, p. e202400826, 2024, doi: 10.1002/chem.202400826.

[52] D. Vernardou, D. Louloudakis, E. Spanakis, N. Katsarakis, and E. Koudoumas, “Thermochromic amorphous VO2 coatings grown by APCVD using a single-precursor,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 128, pp. 36–40, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.04.033.

[53] D. Mann *et al.*, “Approaching the Theoretical Maximum Performance of Highly Transparent Thermochromic Windows,” *Energies*, vol. 16, no. 13, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16134984.

[54] B. Li *et al.*, “A facile one-step annealing route to prepare thermochromic W doped VO2(M) particles for smart windows,” *Ceramics International*, vol. 46, no. 11, Part A, pp. 18274–18280, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.05.042.

[55] S. Loquai, B. Baloukas, O. Zabeida, J. E. Klemberg-Sapieha, and L. Martinu, “HiPIMS-deposited thermochromic VO2 films on polymeric substrates,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 155, pp. 60–69, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2016.04.048.

[56] M. Kaufman, J. Vlček, J. Houška, S. Farrukh, and S. Haviar, “Design and Scalable Synthesis of Thermochromic VO2-Based Coatings for Energy-Saving Smart Windows with Exceptional Optical Performance,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 42, pp. 57268–57276, Oct. 2024, doi: 10.1021/acsami.4c05696.

[57] D. Kolenatý, J. Vlček, T. Bárta, J. Rezek, J. Houška, and S. Haviar, “High-performance thermochromic VO2-based coatings with a low transition temperature deposited on glass by a

scalable technique," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 11107, Jul. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-68002-5.

[58] Z. Yu *et al.*, "Facile Solution Process of VO2 Film with Mesh Morphology for Enhanced Thermochromic Performance," *Materials*, vol. 15, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15124129.

[59] J. M. Obrero *et al.*, "Enhanced Luminous Transmission and Solar Modulation in Thermochromic VO2 Aerogel-like Films via Remote Plasma Deposition," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 17, no. 39, pp. 55172–55188, Oct. 2025, doi: 10.1021/acsami.5c07264.

[60] L. Giovannini, F. Favoino, A. Pellegrino, V. R. M. Lo Verso, V. Serra, and M. Zinzi, "Thermochromic glazing performance: From component experimental characterisation to whole building performance evaluation," *Applied Energy*, vol. 251, p. 113335, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113335.

[61] A. Cannavale *et al.*, "Energy and daylighting performance of building integrated spirooxazine photochromic films," *Solar Energy*, vol. 242, pp. 424–434, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2021.10.058.

[62] H. Teixeira, A. Moret Rodrigues, D. Aelenei, I. Ferreira, and M. G. Gomes, "Solar-optical and thermal behavior of photochromic glazing: Small-scale testing under real sky conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 456, p. 139309, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139309.

[63] W. Feng, L. Zou, G. Gao, G. Wu, J. Shen, and W. Li, "Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 144, pp. 316–323, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.09.029.

[64] S. Xue *et al.*, "Nanoporous WO3 Gasochromic Films for Gas Sensing," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 4, no. 8, pp. 8368–8375, Aug. 2021, doi: 10.1021/acsanm.1c01557.

[65] Y. Yamada, M. Miura, K. Tajima, M. Okada, and K. Yoshimura, "Optical switching durability of switchable mirrors based on magnesium–yttrium alloy thin films," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 117, pp. 396–399, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.06.050.

[66] Y. Yamada, S. Bao, K. Tajima, M. Okada, and K. Yoshimura, "Optical properties of switchable mirrors based on magnesium-calcium alloy thin films," *Applied Physics Letters*, vol. 94, pp. 191910–191910, May 2009, doi: 10.1063/1.3138130.

[67] Y. Liu *et al.*, "Improved optical properties of switchable mirrors based on Pd/Mg-TiO2 films fabricated by magnetron sputtering," *Materials & Design*, vol. 144, pp. 256–262, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.023.

[68] Y. Huang *et al.*, "Electrochromic Materials Based on Ions Insertion and Extraction," *Advanced Optical Materials*, vol. 10, no. 4, p. 2101783, 2022, doi: 10.1002/adom.202101783.

[69] "Perovskite Smart Windows: The Light Manipulator in Energy-Efficient Buildings - Liu - 2024 - Advanced Materials - Wiley Online Library." [Online]. Available: https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202306423

[70] R. Maheshan, "Study of photochromic response of encapsulated oxygen-containing yttrium hydride thin films".

[71] Y.-X. Ji, S.-Y. Li, G. A. Niklasson, and C. G. Granqvist, “Durability of thermochromic VO2 thin films under heating and humidity: Effect of Al oxide top coatings,” *Thin Solid Films*, vol. 562, pp. 568–573, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.tsf.2014.03.043.

[72] H. S. K. Morrey and A. Ghosh, “Energy assessment of gasochromic smart windows for a high-rise apartment block in a temperate climate,” *Journal of Building Engineering*, vol. 84, p. 108625, May 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108625.

[73] J. L. Slack, J. C. W. Locke, S.-W. Song, J. Ona, and T. J. Richardson, “Metal hydride switchable mirrors: Factors influencing dynamic range and stability,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 4, pp. 485–490, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.02.015.

[74] “Prototype Building Models | Building Energy Codes Program.” . [Online]. Available: https://www.energycodes.gov/prototype-building-models

[75] Y. Lu, H. Wang, X. Tian, M. Wang, W. Zhou, and J. Gao, “Optimizing transition temperatures for thermochromic smart windows via neural networks coupling simulation,” *Energy and Buildings*, vol. 329, p. 115295, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115295.

[76] J. Wang, G. Li, and D. Zhao, “Multi-objective optimization of an anti-reflection AlN/VO2/AlN thermochromic window for building energy saving,” *Energy*, vol. 288, p. 129798, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2023.129798.

[77] L. Hu, H. Zhu, K. Lu, C. Wang, L. Liu, and L. Ma, “Theoretical investigation of VO2 smart window with large-scale dynamic infrared emittance adjustment for adaptive thermal management,” *Solar Energy*, vol. 277, p. 112734, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112734.

[78] D. Mann *et al.*, “SunSmart – The First Affordable, Energy Optimized Smart Window,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1085, no. 1, p. 012060, Sep. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1085/1/012060.

[79] E. S. Lee, X. Pang, S. Hoffmann, H. Goudey, and A. Thanachareonkit, “An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 116, pp. 14–26, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.03.043.

[80] S. N. Hussain and A. Ghosh, “Highly insulated hydrogen powered vacuum gasochromic smart windows for energy-efficient buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 97, p. 110855, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.110855.

[81] R. Liang *et al.*, “Investigation of Mg-Y coated gasochromic smart windows for building applications,” *Build. Simul.*, vol. 12, no. 1, pp. 99–112, Feb. 2019, doi: 10.1007/s12273-018-0483-3.

[82] U. Berardi, “Light transmittance characterization and energy-saving analysis of a new selective coating for in situ window retrofit,” *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 25, no. 9, pp. 1152–1163, Oct. 2019, doi: 10.1080/23744731.2019.1620546.

[83] Α. Γ. Γεωργούδη, “Ενεργειακή απόδοση ευφυών υαλοπινάκων: case study μονοκατοικία στην Καλαμαριά,” Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2021. Accessed: Jun. 16, 2026. [Online]. Available: https://ikee.lib.auth.gr/record/333355

[84] Μ.-Π. Δέτση and M.-P. Detsi, “Ενεργειακή προσομοίωση θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια,” Jan. 2020, doi: 10.26240/heal.ntua.17387.

[85] K. Gorantla, S. Shaik, K. J. Kontoleon, D. Mazzeo, V. R. Maduru, and S. V. Shaik, “Sustainable reflective triple glazing design strategies: Spectral characteristics, air-conditioning cost savings, daylight factors, and payback periods,” *Journal of Building Engineering*, vol. 42, p. 103089, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103089.

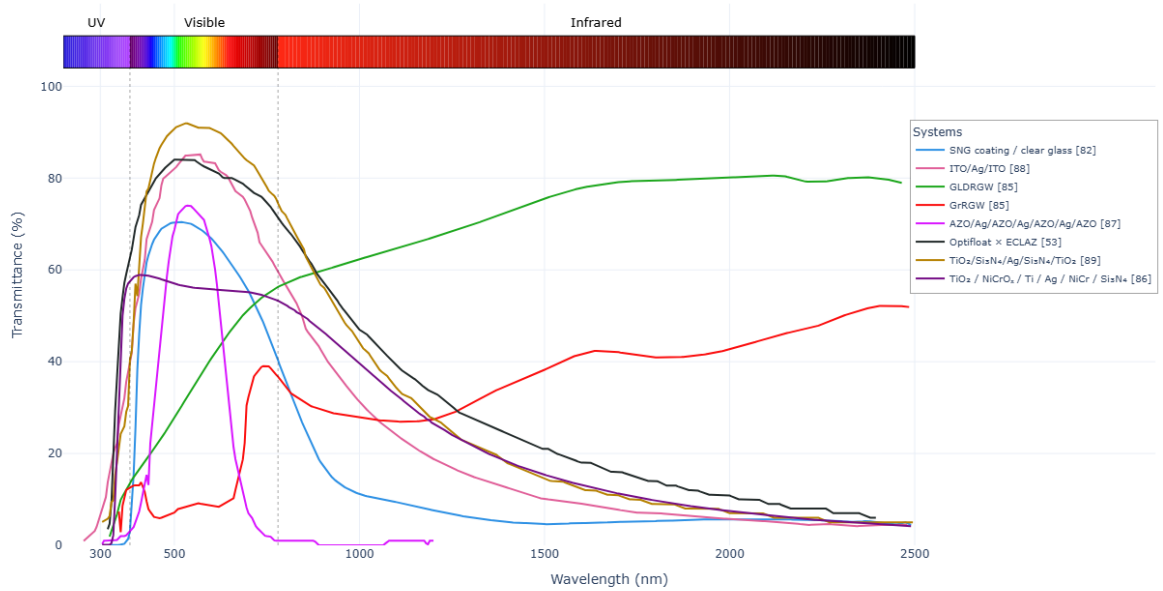
[86] W. Zhu, D. Tong, J. Xu, Y. Liu, and J. Ma, “Multifunctional composite multilayer coatings on glass with self-cleaning, hydrophilicity and heat-insulating properties,” *Thin Solid Films*, vol. 526, pp. 201–211, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.tsf.2012.11.015.

[87] N. Herguedas and E. Carretero, “Evaluation of low-emissivity coatings with single, double, and triple silver layers,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 263, p. 112592, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112592.

[88] C. Bianchi, A. C. Marques, R. C. da Silva, T. Calmeiro, and I. Ferreira, “Near infrared photothermoelectric effect in transparent AZO/ITO/Ag/ITO thin films,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 24313, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-03766-y.

[89] Y. Yang *et al.*, “Improvement of optical properties and thermal stability in the TiO2/Si3N4/Ag/Si3N4/TiO2 low-emissivity coating,” *Materials Today Energy*, vol. 51, p. 101875, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.mtener.2025.101875.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Στατικά φασματικά επιλεκτικά και low-e συστήματα αναφοράς



Σχήμα Α-1 Διάγραμμα φασματικής διαπερατότητας στατικών φασματικά επιλεκτικών και low-e συστημάτων υάλωσης που καταγράφηκαν ως πιθανές λύσεις αναφοράς.

Σημείωση: *Τα συστήματα αυτά δεν εμφανίζουν μεταβολή οπτικής κατάστασης και χρησιμοποιούνται μόνο ως στατική βάση σύγκρισης για τα δυναμικά χρωμογενή υαλοστάσια.*

Πίνακας Α-1 Σύνοψη στατικών φασματικά επιλεκτικών και low-e συστημάτων υάλωσης που καταγράφηκαν ως πιθανές λύσεις αναφοράς, με βάση το βασικό υλικό, το δευτερεύον συστατικό, την ύπαρξη ή μη μεταφερόμενου είδους και την αρχή οπτικού ελέγχου.

Σύστημα	**Βασικό υλικό**	**Δευτερεύον συστατικό**	**Αρχή οπτικού ελέγχου**
Optifloat × ECLAZ [53]	Εμπορικό γυαλί με low-e επίστρωση (ECLAZ)	Διαυγές επίπεδο γυαλί (Optifloat Clear)	Στατική φασματικά επιλεκτική / low-e οπτική διήθηση
GrRGW [85]	Εμπορικό γκρι ανακλαστικό γυαλί	Δεν αναφέρεται ρητά	Στατική φασματικά επιλεκτική μετάδοση/ανάκλαση μέσω ανακλαστικού υαλοπίνακα

GLDRGW [85]	Εμπορικό χρυσό ανακλαστικό γυαλί	Δεν αναφέρεται ρητά	Στατική φασματικά επιλεκτική μετάδοση/ανάκλαση μέσω ανακλαστικού υαλοπίνακα
SNG coating / clear glass [82]	Επιλεκτική επίστρωση SketchNanoGard (SNG) εφαρμοζόμενη σε υγρή μορφή	Διαυγές γυαλί	Στατική φασματικά επιλεκτική επίστρωση ηλιακού ελέγχου
TiO_2 / $NiCrO_x$ / Ti / Ag / NiCr / Si_3N_4 [86]	Πολυστρωματική επίστρωση MLSS: TiO_2 / $NiCrO_x$ / Ti / Ag / NiCr / Si_3N_4	Γυάλινο υπόστρωμα	Παρεμβολή λεπτών υμενίων και ανάκλαση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τη στρώση Ag
AZO/Ag/AZO/Ag/AZO/Ag/AZO [87]	Τριπλή Ag low-e πολυστρωματική δομή: AZO/Ag/AZO/Ag/AZO/Ag/AZO	Low-iron soda-lime glass (Pilkington Optiwhite™)	Low-e έλεγχος μέσω πολυστρωματικής παρεμβολής και ανάκλασης υπέρυθρης ακτινοβολίας
ITO/Ag/ITO [88]	ITO/Ag/ITO	Υπόστρωμα βοριοπυριτικού γυαλιού	Low-e απόκριση μέσω παρεμβολής οξειδίου–μετάλλου–οξειδίου και ανάκλασης υπέρυθρης ακτινοβολίας
TiO_2/Si_3N_4/Ag/Si_3N_4/TiO_2 [89]	TiO_2/Si_3N_4/Ag/Si_3N_4/TiO_2	Γυάλινο υπόστρωμα	Low-e απόκριση μέσω πολυστρωματικής οπτικής παρεμβολής και ανάκλασης υπέρυθρης ακτινοβολίας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Επιλογή ισοδύναμης αναπαράστασης και ενδιάμεσων θερμοκρασιακών καταστάσεων θερμοχρωμικού υαλοστασίου

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα συμπληρωματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή της ισοδύναμης ψυχρής και θερμής κατάστασης του θερμοχρωμικού υαλοστασίου, καθώς και οι ενδιάμεσες θερμοκρασιακές καταστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.

Β.1 Δεδομένα συστήματος αναφοράς

Πίνακας Β-1 Βασικά δεδομένα θερμοχρωμικού συστήματος αναφοράς ZrO_2 / VO_2(W) / ZrO_2 (180,69,180).

Δείκτης	Τιμή
Cold Tvis/Tlum	49.5 %
Cold Tsol	40.8 %
Hot Tvis/Tlum	46.0 %
Hot Tsol	29.9 %
ΔTvis	3.5
ΔTsol	10.9

Το σύστημα αναφοράς εμφανίζει μικρή μεταβολή στην ορατή διαπερατότητα και εντονότερη μεταβολή στην ηλιακή διαπερατότητα. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή ισοδύναμης αναπαράστασης δεν βασίστηκε μόνο στην εγγύτητα των συνολικών τιμών Tvis και Tsol, αλλά και στη φασματική περιοχή στην οποία εμφανίζεται η κύρια μεταβολή.

Β.2 Υποψήφιες ισοδύναμες καταστάσεις

Για την επιλογή της ισοδύναμης ψυχρής και θερμής κατάστασης αξιολογήθηκαν διαθέσιμες καταχωρήσεις υάλωσης, οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στο υπολογιστικό περιβάλλον WINDOW/Optics.

Για κάθε υποψήφιο ζεύγος ψυχρής και θερμής κατάστασης υπολογίστηκε η φασματική μεταβολή της διαπερατότητας:

$$\Delta T(\lambda) = Tcold(\lambda) - Thot(\lambda)$$

$Tcold(\lambda)$ = φασματική διαπερατότητα της ψυχρής κατάστασης στο μήκος κύματος λ

$T_{\mathrm{hot}}(\lambda)$ = φασματική διαπερατότητα της θερμής κατάστασης στο μήκος κύματος λ

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση φασματική μεταβολή σε συγκεκριμένο φασματικό εύρος:

$$\overline{\Delta T}_{range} = \frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}[Tcold(\lambda) - Thot(\lambda)]d\lambda}{\lambda 2 - \lambda 1}$$

Οι περιοχές που εξετάστηκαν ήταν:

- συνολικό εύρος: 380–2500 nm,
- ορατή περιοχή: 380–780 nm,
- εγγύς υπέρυθρη περιοχή: 780–2500 nm.

Ο λόγος της μεταβολής στην ορατή περιοχή προς τη μεταβολή στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή χρησιμοποιήθηκε ως ένδειξη του αν η μεταβολή κάθε συνδυασμού εμφανίζεται κυρίως στην ορατή ή στην υπέρυθρη περιοχή.

Β.3 Υποψήφιες ισοδύναμες καταστάσεις υάλωσης και συνδυασμοί σύγκρισης

Πίνακας Β-2 Υποψήφιες καταχωρήσεις για την ισοδύναμη αναπαράσταση του θερμοχρωμικού υαλοστασίου.

Κατάσταση	**Υποψήφια καταχώρηση**
Ψυχρή / διαυγής	COOL-LITE ST 150 6mm
Ψυχρή / διαυγής	YAC0150_6
Θερμή / ενεργοποιημένη	VE385
Θερμή / ενεργοποιημένη	ts50_2
Θερμή / ενεργοποιημένη	YSD2250_6
Θερμή / ενεργοποιημένη	YRE0146_6

Οι υποψήφιες ψυχρές και θερμές καταστάσεις συνδυάστηκαν μεταξύ τους και συγκρίθηκαν με το θερμοχρωμικό σύστημα αναφοράς. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στον **Error! Reference source not found.**.

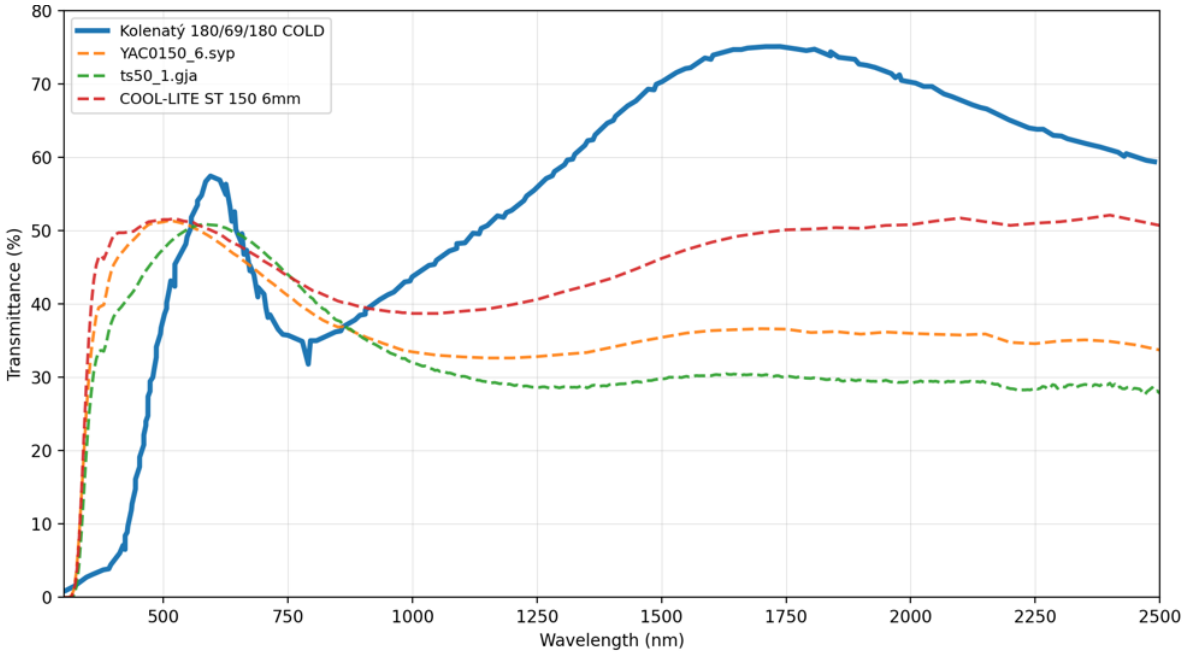
Πίνακας Β-3 Σύγκριση συνδυασμών ισοδύναμων ψυχρών και θερμών καταστάσεων.

Συνδυασμός	**Μέση ΔT 380–2500 nm (%)**	**ΔT ορατής περιοχής (%)**	**ΔT εγγύς υπέρυθρης περιοχής (%)**	**Λόγος ορατής/NIR**	**Ερμηνεία**
ZrO_2 / VO_2(W) / ZrO_2 (180,69,180)	26,22	1,94	31,86	0,06	Σύστημα αναφοράς
COOL-LITE ST150 + VE385	29,00	5,34	34,50	0,15	Καλύτερη αριθμητική προσέγγιση της συνολικής και NIR μεταβολής
COOL-LITE ST150 + ts50_2	27,85	12,89	31,32	0,41	Καλή NIR μεταβολή, αλλά αυξημένη ορατή μεταβολή

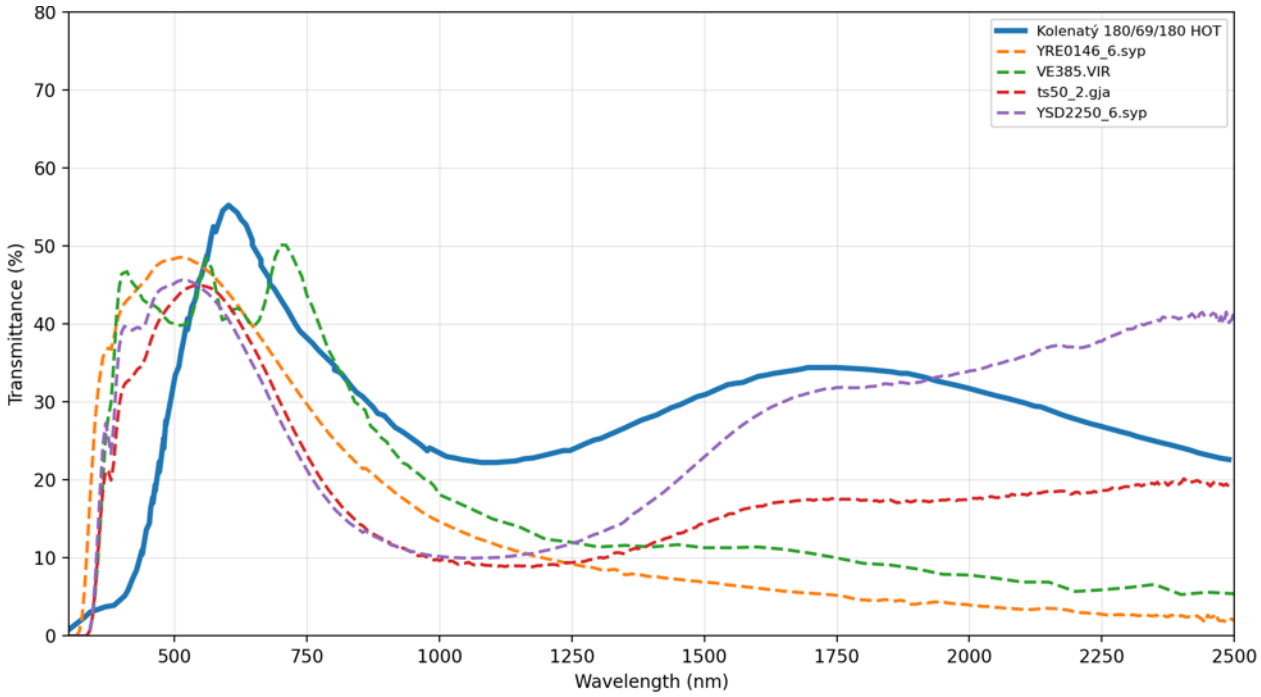
YAC0150 + VE385	19,48	3,73	23,14	0,16	Χαμηλότερη ορατή/NIR αναλογία, αλλά ασθενέστερη συνολική μεταβολή
YAC0150 + YRE0146	23,23	5,80	27,29	0,21	Αποδεκτή αριθμητική εναλλακτική, όχι βέλτιστη φασματική μορφή
COOL-LITE ST150 + YSD2250	19,29	12,43	20,88	0,60	Ασθενής NIR μεταβολή και αυξημένη συμμετοχή ορατής περιοχής
YAC0150 + YSD2250	9,75	10,92	9,51	1,15	Μη αντιπροσωπευτικός συνδυασμός, με υψηλή ορατή συμμετοχή
COOL-LITE ST150 + YRE0146	31,72	7,48	38,63	0,19	Ισχυρή μεταβολή, πιθανή υπερεκτίμηση της NIR απόκρισης

Με βάση τα παραπάνω, ο συνδυασμός COOL-LITE ST150 6 mm + VE385 επιλέχθηκε ως η πλησιέστερη διαθέσιμη ισοδύναμη αναπαράσταση της συνολικής και κυρίως υπέρυθρης θερμοχρωμικής μεταβολής.

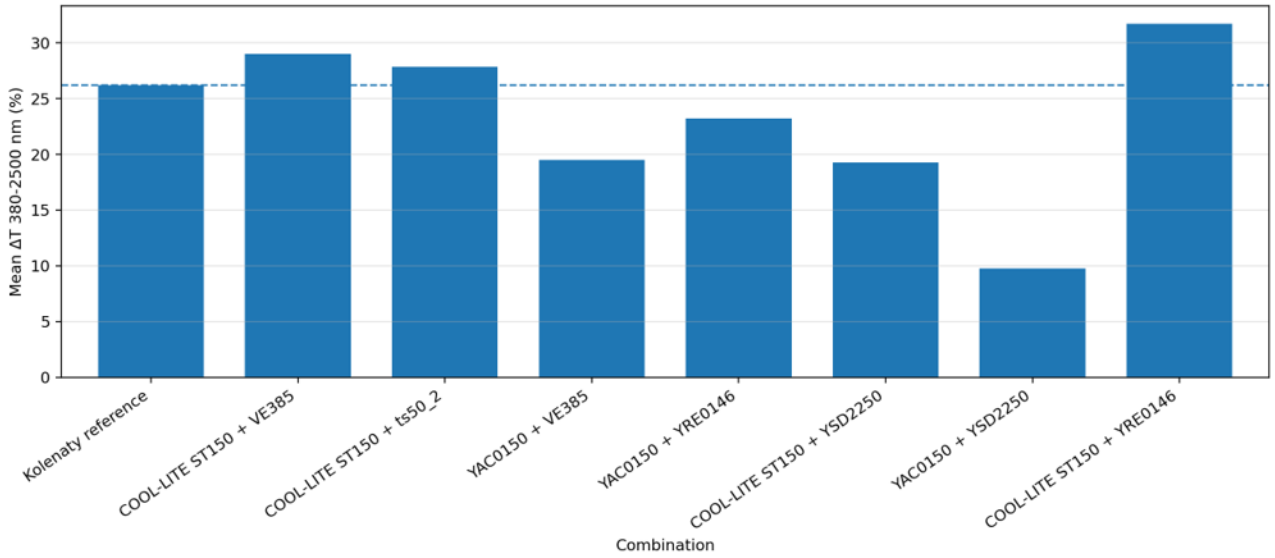
Β.4 Διαγράμματα τεκμηρίωσης επιλογής



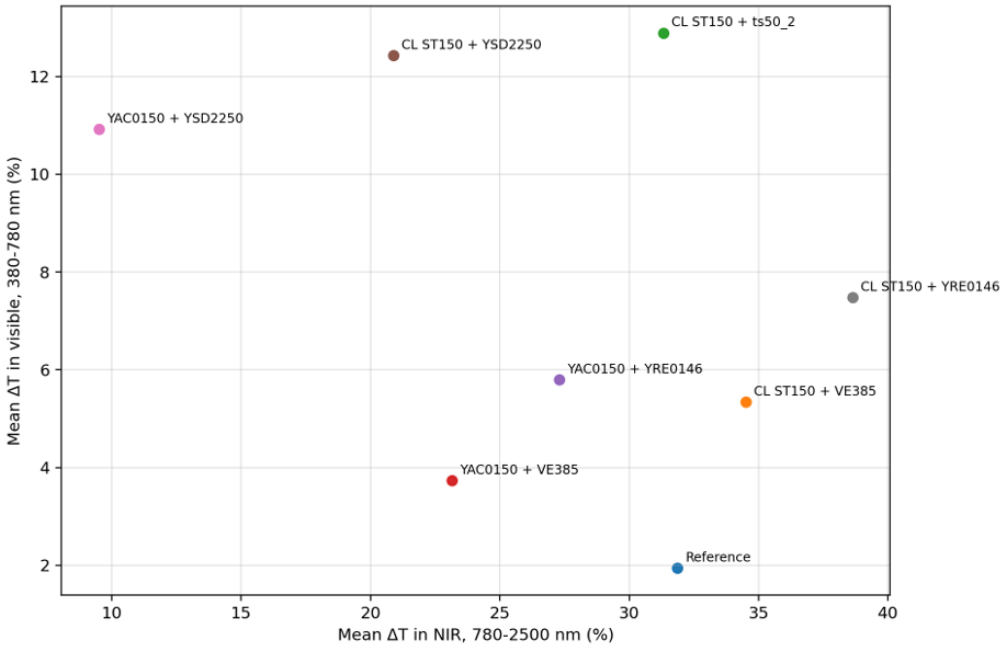
Σχήμα Β-1 Σύγκριση υποψήφιων ψυχρών καταστάσεων με το ψυχρό φάσμα αναφοράς.



Σχήμα Β-2 Σύγκριση υποψήφιων θερμών καταστάσεων με το θερμό φάσμα αναφοράς.



Σχήμα Β-3 Συνολική μέση φασματική μεταβολή των υποψήφιων συνδυασμών.



Σχήμα Β-4 Θέση των υποψήφιων συνδυασμών σε σχέση με το θερμοχρωμικό σύστημα αναφοράς.

Β.5 Ενδιάμεσες θερμοκρασιακές καταστάσεις

Για τη δημιουργία των ενδιάμεσων θερμοκρασιακών καταστάσεων χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα μεταβολής της διαπερατότητας στα 2500 nm ως προς τη θερμοκρασία, το οποίο δίνεται για το σύστημα αναφοράς ZrO_2 / VO_2(W) / ZrO_2 (180,69,180). Το διάγραμμα περιλαμβάνει κλάδο θέρμανσης και κλάδο ψύξης λόγω της υστέρησης της θερμοχρωμικής μετάβασης, ενώ η θερμοκρασία μετάβασης του συγκεκριμένου συστήματος δίνεται περίπου στους 20 °C.

Από τους δύο κλάδους υπολογίστηκε μία μέση καμπύλη μετάβασης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ποσοστού συμμετοχής της ψυχρής και της θερμής ισοδύναμης κατάστασης σε κάθε θερμοκρασιακό σημείο. Η μέση αυτή καμπύλη δεν αποτελεί νέα φασματική ιδιότητα του υαλοστασίου, αλλά αριθμητική βάση για τη δημιουργία των ενδιάμεσων καταστάσεων του μοντέλου.\

Η μέση τιμή της διαπερατότητας στα 2500 nm υπολογίστηκε ως:

$$T2500, mean(T) = \frac{T2500, heating(T) + T2500, cooling(T)}{2}$$

όπου:

$T_{2500,\mathrm{mean}}(T)$= μέση τιμή διαπερατότητας στα 2500 nm στη θερμοκρασία T

$T_{2500,\mathrm{heating}}(T)$= τιμή διαπερατότητας στα 2500 nm στον κλάδο θέρμανσης

$T_{2500,\mathrm{cooling}}(T)$= τιμή διαπερατότητας στα 2500 nm στον κλάδο ψύξης

Στη συνέχεια, το ποσοστό συμμετοχής της θερμής κατάστασης υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$fhot(T) = \frac{T2500, cold - T2500, mean(T)}{T2500, cold - T2500, hot}$$

όπου:

$f_{\mathrm{hot}}(T)$= ποσοστό συμμετοχής της θερμής κατάστασης στη θερμοκρασία T

$T_{2500,\mathrm{cold}}$= τιμή διαπερατότητας στα 2500 nm της ψυχρής κατάστασης

$T_{2500,\mathrm{hot}}$= τιμή διαπερατότητας στα 2500 nm της θερμής κατάστασης

Το ποσοστό συμμετοχής της ψυχρής κατάστασης προκύπτει ως:

$$fcold(T) = 1 - fhot(T)$$

όπου:

$f_{\mathrm{cold}}(T)$= ποσοστό συμμετοχής της ψυχρής κατάστασης στη θερμοκρασία T

Με βάση τα ποσοστά αυτά, οι ιδιότητες κάθε ενδιάμεσης κατάστασης προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή μεταξύ της ψυχρής και της θερμής ισοδύναμης κατάστασης:

$$P(T) = fcold(T)Pcold + fhot(T)Phot$$

όπου:

$P(T)$= τιμή της ιδιότητας στην ενδιάμεση θερμοκρασιακή κατάσταση

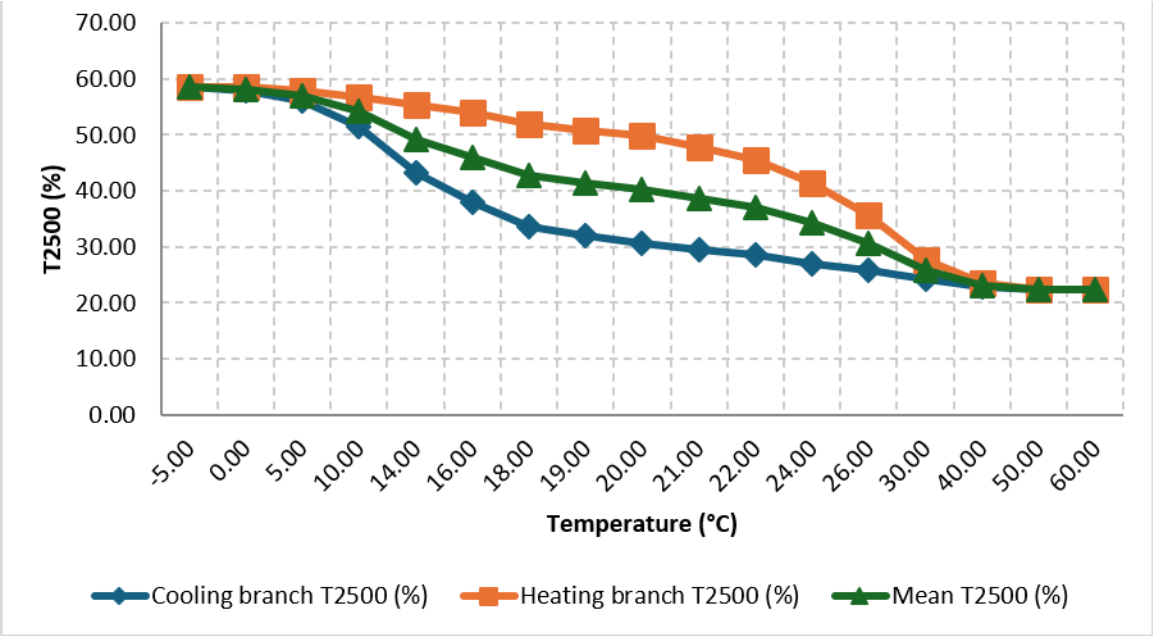
P_{cold}= τιμή της ιδιότητας στην ψυχρή ισοδύναμη κατάσταση

P_{hot}= τιμή της ιδιότητας στη θερμή ισοδύναμη κατάσταση

Οι θερμοκρασιακές καταστάσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα Α.x. Η κατανομή των θερμοκρασιακών σημείων είναι πυκνότερη στην περιοχή γύρω από τη θερμοκρασία μετάβασης, ώστε να αποδοθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η μεταβολή της συμμετοχής ψυχρής και θερμής κατάστασης.

Πίνακας Β-4 Ποσοστά συμμετοχής ψυχρής και θερμής κατάστασης στις ενδιάμεσες θερμοκρασιακές καταστάσεις.

Θερμοκρασία [°C]	**T2500 κατά την ψύξη [%]**	**T2500 κατά τη θέρμανση [%]**	**Μέση T2500 [%]**	**Συμμετοχή ψυχρής κατάστασης**	**Συμμετοχή θερμής κατάστασης**
-5	58,66	58,66	58,66	1,000	0,000
0	57,81	58,61	58,21	0,988	0,012
5	56,06	57,80	56,93	0,952	0,048
10	51,45	56,86	54,15	0,876	0,124
14	43,20	55,27	49,23	0,741	0,259
16	38,07	53,98	46,02	0,652	0,348
18	33,67	52,00	42,83	0,564	0,436
19	32,07	50,86	41,46	0,527	0,473
20	30,69	49,83	40,26	0,494	0,506
21	29,48	47,77	38,62	0,449	0,551
22	28,58	45,50	37,04	0,405	0,595
24	26,99	41,45	34,22	0,327	0,673
26	25,79	35,70	30,74	0,232	0,768
30	24,28	27,55	25,92	0,099	0,901
40	22,81	23,52	23,17	0,023	0,977
50	22,50	22,50	22,50	0,005	0,995
60	22,33	22,33	22,33	0,000	1,000



Σχήμα Β-5 Καμπύλη μετάβασης και ποσοστά συμμετοχής ψυχρής/θερμής κατάστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Χρόνος εκτέλεσης προσομοιώσεων

Πίνακας C-1 Χρόνος εκτέλεσης προσομοιώσεων ανά τύπο υαλοστασίου και κλιματική περιοχή για WWR = 0,3.

Τύπος Υαλοστασίου	Ηράκλειο	Μόσχα	Ριάντ
Clear	29.17s	28.47s	38.33s
Thermochromic	26.59s	35.22s	34.01s
Photochromic	26.54s	28.62s	33.80s
Low-E	28.90s	27.56s	37.47s

Πίνακας C-2 Χρόνος εκτέλεσης προσομοιώσεων ανά τύπο υαλοστασίου και κλιματική περιοχή για WWR = 0,6.

Τύπος Υαλοστασίου	Ηράκλειο	Μόσχα	Ριάντ
Clear	25.00s	30.92s	42.73s
Thermochromic	41.81s	34.70s	37.03s
Photochromic	35.44s	29.87s	37.00s
Low-E	33.63s	29.67s	41.66s

Πίνακας C-3 Χρόνος εκτέλεσης προσομοιώσεων ανά τύπο υαλοστασίου και κλιματική περιοχή για WWR = 0,9.

Τύπος Υαλοστασίου	Ηράκλειο	Μόσχα	Ριάντ
Clear	26.50s	32.65s	47.18s
Thermochromic	37.16s	36.19s	40.46s

Photochromic	53.00s	31.60s	40.65s
Low-E	37.96s	31.66s	48.12s