

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ
ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΕΠΙΧΡΙΣΜΑΤΩΝ ΟΣΟΝ
ΑΦΟΡΑ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ
ΔΩΜΑΤΩΝ

ΤΖΙΟΤΖΙΟΥ ΤΑΤΙΑΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΝΤΟΛΕΩΝ ΚΑΡΟΛΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κοντολέοντα Κάρολο Νικόλαο, για την καθοδήγηση, την πολύτιμη επιστημονική του συμβολή, τις εύστοχες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η στήριξή τους αποτέλεσε πολύτιμο εφόδιο για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του ενεργειακού σχεδιασμού, λόγω της εκτεταμένης συμμετοχής του κτιριακού τομέα στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και της ανάγκης περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στο πλαίσιο αυτό, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα αποτελούν μία καινοτόμο παθητική τεχνολογία, καθώς μεταβάλλουν δυναμικά την ηλιακή τους ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την επίδραση της θερμοκρασίας μετάβασης και του εύρους μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας στη θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά θερμοχρωμικών επιχρισμάτων που εφαρμόζονται σε δώμα κτιρίου. Αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις ιδιότητες, τους μηχανισμούς λειτουργίας και τις εφαρμογές των θερμοχρωμικών υλικών στον κτιριακό τομέα. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο, με το οποίο αξιολογήθηκαν έξι σενάρια μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας για δύο θερμοκρασίες μετάβασης (25 °C και 30 °C). Η διερεύνηση βασίστηκε στην ανάλυση της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού, της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας, της θερμικής ροής, καθώς και του ημερήσιου και ετήσιου ενεργειακού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η θερμοκρασία μετάβασης των 25 °C οδηγεί συστηματικά σε χαμηλότερες ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με τους 30 °C, λόγω της έγκαιρης ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού μηχανισμού κατά τη θερινή περίοδο. Η βέλτιστη ενεργειακή απόδοση επιτεύχθηκε για συνδυασμό θερμοκρασίας μετάβασης 25 °C και μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας από 0,4 σε 0,6, γεγονός που καταδεικνύει ότι η ενεργειακή αποτελεσματικότητα των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων δεν μεγιστοποιείται αποκλειστικά μέσω της αύξησης της ανακλαστικότητας, αλλά μέσω της κατάλληλης επιλογής της θερμοκρασίας μετάβασης και του εύρους μεταβολής της, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της εργασίας συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων και μπορούν να αξιοποιηθούν για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την εφαρμογή τους σε κτίρια που βρίσκονται σε μεσογειακές κλιματικές συνθήκες.

Λέξεις-κλειδιά: θερμοχρωμικά επιχρίσματα, ενεργειακή απόδοση κτιρίων, ηλιακή ανακλαστικότητα, θερμοκρασία μετάβασης

ABSTRACT

Improving the energy performance of buildings has become one of the major challenges in building energy design due to the significant contribution of the building sector to global energy consumption and the increasing need to reduce its environmental impact. In this context, thermochromic coatings have emerged as an innovative passive technology, as they dynamically modify their solar reflectance according to the surface temperature, thereby improving the thermal performance of buildings under varying climatic conditions. This thesis investigates the influence of transition temperature and solar reflectance variation on the thermal and energy performance of thermochromic roof coatings. A comprehensive literature review was initially conducted to examine the properties, operating principles, and building applications of thermochromic materials. Subsequently, a numerical model was developed to evaluate six different solar reflectance scenarios for two transition temperatures (25 °C and 30 °C). The assessment was based on the analysis of the thermochromic material response, equivalent outdoor temperature, heat flux, as well as the daily and annual energy loads per unit roof area. The results demonstrated that a transition temperature of 25 °C consistently achieved lower annual energy demands than 30 °C, owing to the earlier activation of the thermochromic mechanism during the cooling season. Furthermore, increasing the final solar reflectance did not necessarily result in the optimum overall energy performance. The optimum configuration corresponded to a solar reflectance variation from 0.4 to 0.6 combined with a transition temperature of 25 °C, highlighting that the maximum energy benefit is achieved through an appropriate balance between summer cooling demand reduction and winter solar heat gain utilization rather than by maximizing solar reflectance alone. The findings contribute to a better understanding of the energy performance of thermochromic roof coatings and provide useful guidance for their optimal design and application in buildings located in Mediterranean climatic regions.

Keywords: thermochromic coatings, building energy performance, solar reflectance, transition temperature, roof thermal performance.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT.....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	6
2.1.1 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	6
2.1.2 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	8
2.1.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΑΝΟΡΓΑΝΑ-ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	9
2.1.4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	10
2.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
2.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΣ (ΔΤ)	12
2.2.2 ΔΙΑΦΟΡΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔSR)	12
2.2.3 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ.....	13
2.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.....	13
2.2.5 ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ	13
2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	14
2.3.1 ΧΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	15
2.3.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ.....	20
2.3.3 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	22
2.3.4 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΟΞΕΙΔΙΩΝ	23
2.3.5 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΩΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	24
2.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ	25
2.4.1 ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΕΡΔΗ	25
2.4.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ.....	27
3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΟΥ ΔΩΜΑΤΟΣ	31
3.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	31
3.1.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	32
3.1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	33

3.1.3	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΘΟΛΟΥ	34
3.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	35
3.3	ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΣ ΟΡΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΟΥΡΑΝΟΥ	36
3.4	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	37
3.5	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	37
3.6	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ.....	38
3.7	ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	38
3.7.1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ.....	39
3.7.2	ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	39
3.7.3	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	40
3.7.4	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	42
4	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	45
4.1	ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	45
4.2	ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	49
4.3	ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ ΔΩΜΑΤΟΣ	63
4.4	ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	76
4.5	ΕΤΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	80
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.3.1 Φάσματα ανακλαστικότητας θερμοχρωμικών υλικών κατά την έγχρωμη τους κατάσταση [93]	16
Εικόνα 2.3.2 Φάσματα ανακλαστικότητας θερμοχρωμικών υλικών κατά την άχρωμη τους κατάσταση [93].....	17
Εικόνα 2.3.3 Διαδικασία χρωματικής μεταβολής των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [93]	17
Εικόνα 2.3.4 Ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στις χρωματισμένη και άχρωμη φάση (25 °C) [103]	18
Εικόνα 2.3.5 Ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στις χρωματισμένη και άχρωμη φάση (33 °C) [103]	19
Εικόνα 2.3.6 Ηλιακή ανακλαστικότητα δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [12,93, 94,100, 104, 106]	20
Εικόνα 2.3.7 Συνολική ετήσια ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια με θερμοχρωμικό επίχρισμα (TCM) διαφορετικών θερμοκρασιών μετάβασης. [99].....	21

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.7.1 Υπολογιζόμενη εσωτερική θερμοκρασία T_{in} για κάθε μήνα.	42
Σχήμα 4.1.1 Heatmap της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού για θερμοκρασία μετάβασης 25 °C.	46
Σχήμα 4.1.2 Heatmap της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού για θερμοκρασία μετάβασης 30 °C.	47
Σχήμα 4.2.1 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Ιανουάριο.	50
Σχήμα 4.2.2 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Φεβρουάριο.	51
Σχήμα 4.2.3 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Μάρτιο.	52
Σχήμα 4.2.4 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Απρίλιο.	53
Σχήμα 4.2.5 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Μάιο.	54
Σχήμα 4.2.6 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Ιούνιο.	55
Σχήμα 4.2.7 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Ιούλιο.	56
Σχήμα 4.2.8 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Αύγουστο.	57
Σχήμα 4.2.9 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Σεπτέμβριο.	58
Σχήμα 4.2.10 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Οκτώβριο.	59
Σχήμα 4.2.11 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Νοέμβριο.	60
Σχήμα 4.2.12 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος (Teq,corr) για τον μήνα Δεκέμβριο.	61
Σχήμα 4.3.1 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιανουάριο.	64
Σχήμα 4.3.2 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Φεβρουάριο.	65
Σχήμα 4.3.3 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Μάρτιο.	66
Σχήμα 4.3.4 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Απρίλιο.	67
Σχήμα 4.3.5 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιούνιο.	68
Σχήμα 4.3.6 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιούλιο.	69
Σχήμα 4.3.7 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Αύγουστο.	70
Σχήμα 4.3.8 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Οκτώβριο.	71
Σχήμα 4.3.9 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Νοέμβριο.	72
Σχήμα 4.3.10 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Δεκέμβριο.	73
Σχήμα 4.4.1 Ημερήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για την τυπική ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα (Ttr=25°C).	76
Σχήμα 4.4.2 Ημερήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για την τυπική ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα (Ttr=30°C).	77
Σχήμα 4.5.1 Ετήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας και τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού (25 °C και 30 °C).	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3.1 Ηλιακή ανακλαστικότητα δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [93].....	17
Πίνακας 2.3.2 Ηλιακή ανακλαστικότητα των δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με διαφορετικά χρώματα [103]	19
Πίνακας 3.1.1: Ωριαίες τιμές μέσης θερμοκρασίας για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]	33
Πίνακας 3.1.2: Ωριαίες τιμές μέσης ηλιακής ακτινοβολίας για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]	34
Πίνακας 3.1.3: Ωριαίες τιμές μέσης θερμοκρασίας ουράνιου θόλου για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]	35
Πίνακας 4.4.1 Ποσοστιαία μεταβολή του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων για τους θερινούς μήνες	79

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους καταναλωτές ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ παράλληλα ευθύνεται και για υψηλό ποσοστό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τον ενεργειακό τομέα [1, 2]. Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων των κτιρίων, σε συνδυασμό με την ανάγκη περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και προσαρμογής στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη στρατηγικών που στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιριακού αποθέματος [2, 3]. Στο πλαίσιο αυτό, οι παθητικές τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας συγκεντρώνουν ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς συμβάλλουν στη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων μέσω της βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του κελύφους, χωρίς να απαιτείται πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία τους [4].

Μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του κτιριακού κελύφους, το δώμα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου, καθώς αποτελεί την επιφάνεια που δέχεται τη μεγαλύτερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα στις περιοχές με θερμό και μεσογειακό κλίμα [5, 6]. Η αυξημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, ενισχύοντας τη μετάδοση θερμότητας προς το εσωτερικό του κτιρίου και αυξάνοντας τις απαιτήσεις ψύξης κατά τους θερινούς μήνες [5, 6]. Επιπλέον, η υπερθέρμανση των δωματίων συμβάλλει στην ενίσχυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (Urban Heat Island, UHI), το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλότερες θερμοκρασίες στις αστικές περιοχές σε σχέση με το περιβάλλον τους. Το φαινόμενο αυτό επιβαρύνει το τοπικό μικροκλίμα, αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας για ψύξη, υποβαθμίζει τις συνθήκες θερμικής άνεσης και μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [7, 8]. Για τον λόγο αυτό, η βελτίωση των θερμοφυσικών και οπτικών ιδιοτήτων των υλικών που εφαρμόζονται στα δώματα αποτελεί μία από τις αποτελεσματικότερες παθητικές στρατηγικές για τον περιορισμό των ψυκτικών φορτίων και τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων [4-6].

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες παθητικές τεχνικές βελτίωσης της θερμικής συμπεριφοράς των κτιρίων, μεταξύ των οποίων ιδιαίτερη θέση κατέχει η εφαρμογή ψυχρών υλικών (cool materials) και ειδικότερα ψυχρών δωματίων (cool roofs). Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή ηλιακή ανακλαστικότητα και υψηλή θερμική εκπεμπιμότητα, ιδιότητες που περιορίζουν την απορρόφηση της προσπίπτουσας

ηλιακής ακτινοβολίας και διευκολύνουν την αποβολή της αποθηκευμένης θερμότητας προς το περιβάλλον [9]. Ως αποτέλεσμα, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος, περιορίζεται η θερμική ροή προς το εσωτερικό του κτιρίου και μειώνονται οι απαιτήσεις ψύξης κατά τους θερινούς μήνες. Παράλληλα, η ευρεία εφαρμογή ψυχρών υλικών σε αστικές περιοχές μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, βελτιώνοντας τόσο το μικροκλίμα όσο και τις συνθήκες θερμικής άνεσης των κατοίκων [5, 9].

Παρά τα σημαντικά ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη τους, τα ψυχρά υλικά παρουσιάζουν έναν εγγενή περιορισμό, ο οποίος σχετίζεται με τη σταθερή τιμή της ηλιακής τους ανακλαστικότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ενώ η υψηλή ανακλαστικότητα είναι ιδιαίτερα ευεργετική κατά τη θερινή περίοδο, καθώς περιορίζει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και μειώνει τα ψυκτικά φορτία, κατά τους χειμερινούς μήνες μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό των παθητικών ηλιακών κερδών και, κατά συνέπεια, σε αύξηση των απαιτήσεων θέρμανσης. Η αντικρουόμενη αυτή συμπεριφορά αναδεικνύει ότι η βέλτιστη τιμή της ηλιακής ανακλαστικότητας δεν είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά εξαρτάται από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου [9-11].

Η ανάγκη αντιμετώπισης των περιορισμών των συμβατικών ψυχρών υλικών οδήγησε στην ανάπτυξη υλικών μεταβαλλόμενης ανακλαστικότητας, τα οποία έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται δυναμικά τις οπτικές τους ιδιότητες ως απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα. Μεταξύ αυτών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα θερμοχρωμικά υλικά, τα οποία μεταβάλλουν την ηλιακή τους ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας, χωρίς να απαιτείται εξωτερική παροχή ενέργειας ή σύστημα ελέγχου [12–14]. Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας υπερβεί μία προκαθορισμένη θερμοκρασία μετάβασης, το θερμοχρωμικό υλικό αυξάνει την ανακλαστικότητά του, περιορίζοντας την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και συμβάλλοντας στη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας και των απαιτήσεων ψύξης. Αντίθετα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες διατηρεί μικρότερη ανακλαστικότητα, επιτρέποντας μεγαλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και αξιοποίηση των παθητικών ηλιακών κερδών κατά τη χειμερινή περίοδο [13].

Η ενεργειακή απόδοση των θερμοχρωμικών υλικών δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό, αλλά εξαρτάται από ένα σύνολο παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού όσο και με τις συνθήκες εφαρμογής του. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία μετάβασης, το εύρος μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας, τα τοπικά κλιματικά

χαρακτηριστικά, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τα χαρακτηριστικά του κτιρίου επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα του θερμοχρωμικού μηχανισμού και, κατά συνέπεια, το συνολικό ενεργειακό όφελος που μπορεί να επιτευχθεί [13]. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών υλικών θα πρέπει να πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε εφαρμογής, ώστε να προσδιορίζονται οι καταλληλότερες προδιαγραφές σχεδιασμού και λειτουργίας τους [13].

Παρότι η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει τις δυνατότητες των θερμοχρωμικών υλικών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα σχετικά με τη συνδυαστική επίδραση της θερμοκρασίας μετάβασης και του εύρους μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας στην ενεργειακή συμπεριφορά των δωματίων υπό συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό μέσω συστηματικής παραμετρικής διερεύνησης των δύο αυτών χαρακτηριστικών, αξιολογώντας την επίδρασή τους στη θερμική απόκριση και στα ενεργειακά φορτία του δώματος. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία δεν περιορίζεται στην αξιολόγηση της απόδοσης των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων, αλλά συμβάλλει στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών που οδηγούν στη βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά, παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα για τον σχεδιασμό και την επιλογή θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε εφαρμογές κτιρίων.

Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η αποτελεσματική αξιοποίηση των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων προϋποθέτει την επιλογή κατάλληλων χαρακτηριστικών λειτουργίας, προσαρμοσμένων στις κλιματικές συνθήκες και στις ενεργειακές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής [13]. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της επίδρασης δύο κρίσιμων παραμέτρων των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων, της θερμοκρασίας μετάβασης και του εύρους μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας, στη θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά ενός δώματος. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση με στόχο την καταγραφή της υφιστάμενης γνώσης σχετικά με τα ψυχρά και τα θερμοχρωμικά υλικά, τους μηχανισμούς λειτουργίας τους και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή τους απόδοση. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο, με το οποίο αξιολογήθηκαν έξι διαφορετικά σενάρια ανακλαστικότητας για δύο θερμοκρασίες μετάβασης $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$ και $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάλυσης της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού, της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας, της θερμικής ροής, του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου και του ετήσιου ενεργειακού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας, με στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού θερμοκρασίας

μετάβασης και μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας για τις εξεταζόμενες κλιματικές συνθήκες, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της εφαρμογής θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε κτίρια.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στο πλαίσιο της αναζήτησης μεθόδων για μείωση των θερμικών απωλειών σε ένα κτίριο η επιστημονική κοινότητα στράφηκε προς τα θερμοχρωμικά υλικά. Ως θερμοχρωμισμός ορίζεται η ιδιότητα των υλικών να αλλάζουν το χρώμα τους ως αποτέλεσμα μιας αντιστρεπτής διαδικασίας μετασχηματισμού της μοριακής τους δομής η οποία ενεργοποιείται από μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος [14]. Η θερμοχρωμική μετάβαση συνοδεύεται από αντίστοιχες μεταβολές στις οπτικές ιδιότητες του υλικού και μπορεί να αξιοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών όπως στην παραγωγή θερμοχρωμικών μελανιών εκτύπωσης [15], υφασμάτων με ικανότητα αναστρέψιμης αλλαγής χρώματος [16], χρωματικών δεικτών και αισθητήρων θερμοκρασίας που απαιτείται άμεση και οπτικά ανιχνεύσιμη απόκριση σε θερμικά ερεθίσματα [17] αλλά και σε δομικά υλικά και επιστρώσεις υαλοπινάκων σε κουφώματα για τον δυναμικό έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας [18]. Τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα έχουν ακόμα ένα πεδίο εφαρμογής καθώς μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Σε μια περίοδο όπου η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κτιριακού τομέα αποτελεί επιτακτική ανάγκη, τα υλικά αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης των οπτικών χαρακτηριστικών των εξωτερικών επιφανειών, μειώνοντας την υπερθέρμανση κατά τους θερινούς μήνες και περιορίζοντας τις θερμικές απώλειες τον χειμώνα.

Ο θερμοχρωμισμός αποτελεί ένα φαινόμενο γνωστό ήδη από την αρχαιότητα, ενώ η συστηματική επιστημονική μελέτη του, τόσο σε αντιστρεπτές όσο και σε μη αντιστρεπτές μορφές, έχει ενταθεί σημαντικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1960, επεκτεινόμενη σταδιακά σε οργανικά, ανόργανα καθώς και υβριδικά θερμοχρωμικά συστήματα [19–21]. Η πρόοδος των νανοτεχνολογιών τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε σημαντική ανάπτυξη νέων υλικών με ελεγχόμενες και βελτιωμένες λειτουργικές ιδιότητες, διευρύνοντας το πεδίο εφαρμογών του [19]. Ένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικό παράδειγμα θερμοχρωμικού υλικού φυσικής προέλευσης είναι το ρουμπίνι, το οποίο σε θερμοκρασία δωματίου έχει κόκκινο χρώμα αλλά όταν θερμανθεί πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο μεταβάλλεται σε πράσινο [22]. Η διαδικασία αλλαγής χρώματος όμως είναι αντιστρεπτή και κατά την ψύξη γίνεται επαναφορά του αρχικού κόκκινου χρώματος [22]. Το φυσικό αυτό παράδειγμα αναδεικνύει με εντυπωσιακό τρόπο τη δυνατότητα των υλικών να μεταβάλλουν τις οπτικές τους ιδιότητες αντιστρεπτά υπό την επίδραση της θερμοκρασίας.

Βιβλιογραφικά έχουν γίνει προσπάθειες ανάλυσης και ποσοτικοποίησης της συμβολής των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στην μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων σε συνδυασμό με την επίτευξη της θερμικής άνεσης σε ένα κτίριο. Οι Meng et al. [23] αξιολόγησαν μεταβλητές θερμοχρωμικές επιστρώσεις συγκρίνοντάς τις με επικαλύψεις σταθερής ανακλαστικότητας, ενώ σε επόμενη εργασία προσομοίωσαν τη θερμική συμπεριφορά όψεων κτιρίων σε ετήσια βάση μέσω μοντέλου μεταφοράς θερμότητας με δυναμικά οπτικά χαρακτηριστικά [24]. Αντίστοιχα, οι Berardi et al. [25] έδειξαν ότι στον Καναδά τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα μπορούν να μειώσουν τις ανάγκες ψύξης ενός κτιρίου έως και 8.9%. Οι Fabiani et al. [26] απέδειξαν πειραματικά την συνεισφορά των θερμοχρωμικών υλικών στον περιορισμό του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας καταδεικνύοντας ως βέλτιστη θερμοκρασία μετάβασης του υλικού τους 25 °C. Λίγο αργότερα οι ίδιοι [27] μέσα από την ανάπτυξη ενός ρεαλιστικού μοντέλου επιβεβαίωσαν την συνεισφορά των ιδιαίτερων αυτών επιχρισμάτων στην θερμική άνεση των εσωτερικών χώρων ενός κτιρίου επιτυγχάνοντας μείωση της μέσης εσωτερικής θερμοκρασίας κατά 0.2-0.5 K την θερινή και κατά 0.5-0.6 K την χειμερινή περίοδο. Οι Hu και Yu [28] μελετώντας τις θερμοχρωμικές στέγες οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι με την χρήση αυτών είναι εφικτή η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά 7,7% και ο περιορισμός των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου κατά 28,5%. Γενικότερα, η πιο πρόσφατη ανασκόπηση των Hakami et al. [29] υπογραμμίζει την ταχεία πρόοδο στον τομέα των θερμοχρωμικών επιστρώσεων και επιβεβαιώνει τη σημασία τους στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών και κλιματικά προσαρμοστικών κτιρίων.

2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα θερμοχρωμικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, τα ανόργανα, τα οργανικά, τα πολυμερή και τα υβριδικά συστήματα.

2.1.1 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα ανόργανα θερμοχρωμικά υλικά εμφανίζουν θερμοχρωμική απόκριση σε ένα ιδιαίτερα ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα, που κυμαίνεται περίπου μεταξύ 70 και 500 °C [29]. Για τον κτιριακό τομέα και ειδικότερα σε τεχνολογίες βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα υλικά με θερμοκρασία μετάβασης κοντά στους 70°C. Σε αυτή την κατηγορία τα υλικά διακρίνονται για την μηχανική τους αντοχή, για την υψηλή θερμική σταθερότητα

κυρίως πάνω από τους 200°C και την σταθερότητα της κρυσταλλικής τους συμμετρίας στη διάρκεια ζωής τους που συμβάλει στην αντιστρεπτή διαδικασία μεταβολής χρώματος [29]. Τα μειονεκτήματα των ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών είναι ότι σε σχετικές υψηλές και σταθερές θερμοκρασίες μετάβασης εμφανίζουν και μη αναστρέψιμα χαρακτηριστικά [30] ενώ ένα ποσοστό αυτών παρουσιάζουν εκ φύσεως υψηλή τοξικότητα με αποτέλεσμα να απαιτείται η εφαρμογή επιπρόσθετων μέτρων προστασίας ώστε να αποφευχθεί η απελευθέρωση τους στο περιβάλλον [29]. Μερικά παραδείγματα ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών είναι οι ενώσεις Cu_2HgI_4 [31], ZnO [32], $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ [33], καθώς και τα VO_2 [34] και TiO_2 [35].

Το Cu_2HgI_4 είναι ένα ανόργανο θερμοχρωμικό υλικό που εμφανίζει αντιστρεπτή μεταβολή χρώματος. Σε θερμοκρασία δωματίου (300 K), η χρωματική παλέτα του υλικού παρουσιάζει ένα φωτεινό κόκκινο ενώ με την άνοδο της θερμοκρασίας στους 343 K μεταπίπτει σε σκοτεινή καφέ [36]. Λόγω της δυνατότητας αντιστρεπτής μεταβολής των χημικών του φάσεων κατά την ψύξη επιστρέφει η αρχική φωτεινοκόκκινη κατάσταση. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται σταδιακά και ολοκληρώνεται εντός περίπου 120 δευτερολέπτων. Στην περιοχή ισχυρής απορρόφησης ($\lambda < 730 \text{ nm}$), η διαπερατότητα μειώνεται σημαντικά, κυρίως λόγω της επίδρασης του συντελεστή απορρόφησης [37]. Για ένα τυπικό υμένιο Cu_2HgI_4 πάχους 0,858 μm , η ανάκλαση στην περιοχή του ορατού φάσματος κυμαίνεται μεταξύ 0,4 και 0,6, ενώ διαπερατότητα παρουσιάζει αντίστοιχα τιμές από 0,6-0,4 [37].

Το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) αποτελεί ένα ανόργανο θερμοχρωμικό υλικό με ιδιαίτερο ενδιαφέρον για θερμο-οπτικές εφαρμογές, λόγω του συνδυασμού υψηλής χημικής σταθερότητας, μη τοξικότητας, χαμηλού κόστους και υψηλής αντιδραστικότητας των σωματιδίων του [37-40]. Οι σκόνες TiO_2 στην περιοχή του ορατού φωτός δεν έχουν χαμηλή απορροφητικότητα, παρουσιάζοντας λευκό χρώμα, ενώ λειτουργούν ως ιδιαίτερα αποτελεσματικοί απορροφητές UV ακτινοβολίας, γεγονός που επιτρέπει την ενσωμάτωσή τους σε πολυμερικές επιστρώσεις με στόχο τη βελτίωση της αντοχής και της διάρκειας ζωής τους [41]. Το TiO_2 διαθέτει επίσης πολύ υψηλό σημείο τήξης ($\approx 1840^\circ\text{C}$) και χρησιμοποιείται ευρέως ως υλικό οπτικής επίστρωσης σε ποικίλες οπτικές διατάξεις και εφαρμογές [42,43]. Εμφανίζει σχετικά υψηλό θερμο-οπτικό συντελεστή, περίπου $-3,7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ στην περιοχή 18–120 °C στα 780 nm, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο για αισθητήρες θερμοκρασίας, λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει και υψηλό δείκτη διάθλασης ($\approx 2,00$ στα 626,5 nm), ο οποίος εξασφαλίζει επαρκή ανακλαστικότητα καθιστώντας περιττές τις πρόσθετες ανακλαστικές επιστρώσεις [44].

Το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) εμπλουτισμένο με χρώμιο (Cr) αποτελεί μια ανόργανη χημική ένωση που παρουσιάζει υψηλή μηχανική και θερμική αντοχή, καθώς και αναστρέψιμη θερμοχρωμική συμπεριφορά, κατά την οποία το χρώμα μεταβάλλεται σταδιακά από ροζ σε πράσινο ή γκρι με την αύξηση της θερμοκρασίας [17]. Η θερμοχρωμική αυτή μετάβαση λαμβάνει χώρα σε ευρύ θερμοκρασιακό εύρος, περίπου από 200 έως 900 °C [45], ενώ η θερμοκρασία έναρξης της μεταβολής εξαρτάται από τη συγκέντρωση του χρωμίου. Ενδεικτικά, σύσταση 5% Cr_2O_3 –95% Al_2O_3 παρουσιάζει μετάβαση από ροζ σε πράσινο περίπου στους 250 °C, ενώ σύσταση 10% Cr_2O_3 –90% Al_2O_3 από ροζ σε γκρι-πράσινο στους 400–450 °C [20].

Λεπτές επιστρώσεις θερμοχρωμικού οξειδίου του βανάδιου (VO_2) έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με φωτοκαταλυτικό TiO_2 για την κατασκευή «έξυπνων» παραθύρων [35,47]. Η διαπερατότητα του VO_2 παραμένει σχετικά υψηλή και σταθερή στο ορατό φάσμα, έως ότου η θερμοκρασία υπερβεί τη θερμοκρασία μετάβασης T_{tr} , οπότε η διαπερατότητα στην υπέρυθη περιοχή μειώνεται σημαντικά [35]. Στους 68 °C, το VO_2 μεταπίπτει σε τετραγωνική μεταλλική δομή, η οποία εμφανίζει υψηλή ανακλαστικότητα και μπορεί να ρυθμίζει αυτόματα τη ροή ηλιακής θερμότητας σε εξάρτηση από τη θερμοκρασία [35,47]. Η μεταβολή του μεγέθους των κόκκων ή η δόση λεπτών επιστρώσεων VO_2 με προσμίξεις όπως το βολφράμιο έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης και βελτιώνει τη ρύθμιση της ηλιακής ακτινοβολίας [29,47]. Η ενσωμάτωση προσμίξεων με μεγαλύτερες ατομικές ακτίνες από το ιόν V^{4+} ή η δημιουργία ελλείψεων V^{5+} στη δομή, όπως με μεταλλικά ιόντα υψηλής τιμής (W^{6+} , Nb^{5+} , Ti^{4+}), μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης T_c του VO_2 περίπου στους 25 °C [48]. Αντίθετα, προσμίξεις με μικρότερες ιοντικές ακτίνες, όπως Al^{3+} και Cr^{3+} , οδηγούν σε αύξηση της T_c του VO_2 [48].

2.1.2 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά, όπως οι σπιρολακτόνες, οι φθορανοί, τα σπιροπυράνια, οι ανίλες, οι υδραζόνες και τα φουλγίδια [49,50], παρουσιάζουν δυνατότητα ρύθμισης του χρώματος, χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης, υψηλή ευαισθησία και σχετικά χαμηλό κόστος [51]. Τα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές, όπως έξυπνες συσκευασίες, εκτυπώσεις ασφαλείας, βαφή υφασμάτων, παιχνίδια και εφαρμογές προώθησης προϊόντων [48,52,53], αλλά και σε εφαρμογές κτηριακών κελυφών, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της χαμηλής τοξικότητάς τους. Τα υλικά αυτά είναι

γνωστά και ως λευκοχρωστικές (leuco dyes) και συνήθως αποτελούνται από ένα σύστημα τριών συστατικών που περιλαμβάνει χρωμογόνο παράγοντα, εμφανιστή χρώματος και διαλύτη⁴³. Η μεταβολή του χρώματος προκαλείται όταν ο διαλύτης τήκεται, γεγονός που οδηγεί στη διάσπαση του συμπλόκου μεταξύ χρωστικής και εμφανιστή και συνεπώς στην απώλεια του χρώματος [54,55].

Τα θερμοχρωμικά συστήματα λευκοχρωστικών παρουσιάζουν αναστρέψιμη μετατροπή από έγχρωμη σε άχρωμη μορφή με την αύξηση της θερμοκρασίας. Κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης του διαλύτη, η χρωστική βρίσκεται σε πρωτονιωμένη μορφή ανοικτού δακτυλίου και σχηματίζει έγχρωμο σύμπλοκο λόγω του πολικού περιβάλλοντος του εμφανιστή [56], ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας και την τήξη του διαλύτη το σύστημα γίνεται ομογενές και ευνοείται η άχρωμη μορφή κλειστού δακτυλίου [56]. Κατά την ψύξη, ο διαλύτης στερεοποιείται και το σύμπλοκο χρωστικής–εμφανιστή επανασχηματίζεται.

Ένα από τα πιο μελετημένα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά είναι η κρυσταλλική ιώδης λακτόνη (Crystal Violet Lactone – CVL)[57,58], η οποία παρουσιάζει υψηλό συντελεστή απορρόφησης, έντονη χρωματικότητα και καλή διαλυτότητα σε έλαια[58,59], καθώς και σχετικά χαμηλό κόστος. Άλλα παραδείγματα οργανικών θερμοχρωμικών υλικών αποτελούν οι σπιρολακτόνες [60], οι φθορανοί [61], οι σπироοξαζίνες [62] και τα σπироπυράνια [56,63]. Τα σπироπυράνια μεταβάλλουν το χρώμα τους μέσω αντίδρασης ανοίγματος δακτυλίου υπό υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ οι δύο ισομερείς μορφές τους εμφανίζουν υψηλή θερμική σταθερότητα και μεγάλη αντοχή στη φωτοχημική κόπωση[64,65].

2.1.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΑΝΟΡΓΑΝΑ-ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα οργανικά–ανόργανα υβριδικά θερμοχρωμικά υλικά αποτελούν μια σημαντική κατηγορία υλικών, καθώς συνδυάζουν τις υψηλές ηλεκτρονικές ιδιότητες, τη μηχανική ακαμψία και τη θερμική σταθερότητα των ανόργανων δομών με τη λειτουργική ευελιξία και τη χημική προσαρμοστικότητα των οργανικών μορίων [67,68]. Η αλληλεπίδραση των οργανικών και ανόργανων φάσεων οδηγεί σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως μεγάλη δομική ποικιλία[60,61], δυνατότητα ρύθμισης του ενεργειακού χάσματος[63], ευκαμψία, μεγάλη απόσταση διάχυσης φορέων [59] και ευκολία επεξεργασίας [64]. Για τον λόγο αυτό, τα υλικά αυτά έχουν προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και χρησιμοποιούνται σε οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως φωτοβολταϊκά στοιχεία[66,67], φωτοεκπομπές [66] και λέιζερ [70,71]. Πολλά από τα υλικά αυτά εμφανίζουν θερμοχρωμική συμπεριφορά, η οποία αποδίδεται σε

μεταβολές της κρυσταλλικής δομής, όπως παραμορφώσεις του πλέγματος, θερμική διαστολή, αναδιάταξη ιόντων ή μεταβάσεις φάσης που προκαλούνται από μεταβολές της θερμοκρασίας [72]. Ιδιαίτερη κατηγορία οργανικών–ανόργανων υβριδικών υλικών αποτελούν τα υβριδικά περοβσκιτικά υλικά, στα οποία ανόργανα ανιόντα συνδυάζονται με οργανικά κατιόντα σχηματίζοντας δομές διαφορετικών διαστάσεων [73,74]. Τα ενεργειακά επίπεδα των οργανικών και ανόργανων τμημάτων μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα, επιτρέποντας τον σχεδιασμό υλικών με προσαρμοσμένες ιδιότητες [74]. Σε ορισμένες περιπτώσεις η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της απόστασης μεταξύ των ανόργανων στρωμάτων και προκαλεί μεταβολή χρώματος, όπως έχει παρατηρηθεί σε υβριδικά υλικά που μετατρέπονται από κίτρινα σε σκούρο κόκκινα με την αύξηση της θερμοκρασίας [74].

2.1.4 ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα πολυμερή θερμοχρωμικά υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: (α) πολυμερή με εγγενείς θερμοχρωμικές ιδιότητες, (β) πολυμερή που ενσωματώνουν θερμοχρωμικές χρωστικές, (γ) πολυμερή με θερμοευαίσθητα πρόσθετα και (δ) πολυμερή που περιέχουν θερμοευαίσθητες πρωτικές χρωστικές [22]. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι υγροκρυσταλλικοί και οι συζυγικοί πολυμερείς σχηματισμοί, οι οποίοι εμφανίζουν θερμοχρωμισμό λόγω μεταβολών στη δομή και στη συζυγία των ηλεκτρονικών δεσμών [22]. Οι χοληστερικοί υγροκρυσταλλικοί πολυμερείς σχηματισμοί αποτελούν από τα πλέον διαδεδομένα συστήματα και παρουσιάζουν μεταβολή χρώματος λόγω αλλαγής του βήματος της ελικοειδούς δομής τους με τη θερμοκρασία, η οποία επηρεάζει την ανάκλαση της ορατής ακτινοβολίας [75,76]. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων αποτελούν οι χοληστερικοί υγροκρύσταλλοι, τα πολυμερικά πηκτώματα και οι μικροενκαψυλωμένοι υγροκρύσταλλοι χαμηλού μοριακού βάρους [77,78,79]. Οι συζυγικοί πολυμερείς σχηματισμοί παρουσιάζουν επίσης εγγενή θερμοχρωμισμό λόγω μεταβολών στο μήκος συζυγίας των π-ηλεκτρονίων της πολυμερικής αλυσίδας, οι οποίες οδηγούν σε αλλαγές στην απορρόφηση της ορατής ακτινοβολίας [22,80]. Μικρές μεταβολές στη διαμόρφωση της πολυμερικής αλυσίδας, όπως αλλαγές στη στερεοϊσομέρεια κατά τη διάρκεια μεταβάσεων φάσης, μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μεταβολή χρώματος [80]. Τα περισσότερα συζυγικά πολυμερή παρουσιάζουν αναστρέψιμο θερμοχρωμισμό, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί μη αναστρέψιμη συμπεριφορά λόγω κινητικών φαινομένων [22]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πολυακετυλένια [81,82], τα πολυδιακετυλένια [83,84], τα πολυσιλάνια [85,86] και τα πολυθειοφαίνια [87,88].

Η πλέον διαδεδομένη τεχνολογικά κατηγορία θερμοχρωμικών πολυμερών είναι εκείνη που βασίζεται σε συστήματα μικροενθυλάκωσης λευκοβαφής, ενεργοποιητή, διαλύτη [22,77]. Σε χαμηλές θερμοκρασίες βρίσκονται συνήθως σε έγχρωμη στερεή μορφή, ενώ με αύξηση της θερμοκρασίας μετατρέπονται σε άχρωμη υγρή φάση [22]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα crystal violet lactone [22,77,89]. Η μικροενκαψούλωση των θερμοχρωμικών χρωστικών αποτελεί βασική τεχνολογική μέθοδο για την ενσωμάτωσή τους σε πολυμερικά επιχρίσματα [77].

Θερμοχρωμική συμπεριφορά μπορεί επίσης να προκύψει από την προσθήκη θερμοευαίσθητων υγροκρυσταλλικών υλικών σε μη θερμοχρωμική πολυμερική μήτρα, όπου η θερμοχρωμική απόκριση σχετίζεται με αναστρέψιμες μεταβάσεις φάσης των προσθέτων [75,90]. Επιπλέον, πολυμερικά υδροπηκτώματα που περιέχουν πρωτικές θερμοευαίσθητες χρωστικές εμφανίζουν θερμοχρωμισμό λόγω μεταβολών πρωτονίωσης–αποπρωτονίωσης που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία [22].

Λόγω της ευκολίας εφαρμογής, της χαμηλής θερμοκρασίας επεξεργασίας και της δυνατότητας ενσωμάτωσης θερμοχρωμικών μικροκαψουλών, τα πολυμερικά θερμοχρωμικά υλικά θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές σε επιχρίσματα και γενικότερα στο κτηριακό κέλυφος.

2.2 ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ο μηχανισμός απόκρισης ενός θερμοχρωμικού υλικού εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές των οπτικών του ιδιοτήτων, όπως η απορροφητικότητα, η ανακλαστικότητα, η διαπερατότητα και η εκπεμπτικότητα, οι οποίες λαμβάνουν χώρα τόσο στην περιοχή του ορατού όσο και του εγγύς υπέρυθρου φάσματος [91]. Η αξιολόγηση και ο χαρακτηρισμός των οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών βασίζονται σε μία σειρά από βασικούς δείκτες και μεθόδους εκτίμησης, με κυριότερους το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής χρώματος, τη θερμική σταθερότητα, την ταχύτητα απόκρισης, τον βαθμό χρωματικής μεταβολής και την αναστρεψιμότητα του φαινομένου [92-95]. Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιούνται για την ποσοτική σύγκριση διαφορετικών θερμοχρωμικών συστημάτων και για την εκτίμηση της καταλληλότητάς τους σε πρακτικές εφαρμογές. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται συνοπτικά ένα σύνολο αναλυτικών και αξιολογικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη

διερεύνηση των οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών, με έμφαση στους κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά αλλαγής χρώματος και τη συνολική τους απόδοση.

2.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΕΥΡΟΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΣ (ΔT)

Ως θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής χρώματος (ΔT) ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης θερμοκρασίας στην οποία λαμβάνει χώρα η μεταβολή του χρώματος ενός θερμοχρωμικού υλικού και αντιπροσωπεύει το θερμοκρασιακό διάστημα εντός του οποίου το υλικό μεταβάλλει τις οπτικές του ιδιότητες [91]. Το μέγεθος του εύρους αυτού σχετίζεται άμεσα με παράγοντες όπως η χημική σύσταση, η κρυσταλλική δομή και η μέθοδος παρασκευής του υλικού. Κατά κανόνα, όσο μεγαλύτερο είναι το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής χρώματος, τόσο ευρύτερο είναι και το πεδίο εφαρμογών του υλικού, γεγονός που καθιστά την παράμετρο αυτή ιδιαίτερα σημαντική για την αξιολόγηση της καταλληλότητάς του σε κτιριακές εφαρμογές [96].

2.2.2 ΔΙΑΦΟΡΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔSR)

Ο δείκτης διαφοράς ηλιακής ανακλαστικότητας (ΔSR) αποτελεί μια ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδο για την αξιολόγηση της απόδοσης και των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών. Η ποσοτικοποίηση της ανακλαστικότητας των υλικών σε διαφορετικές θερμοκρασιακές συνθήκες και ο υπολογισμός της διαφοράς τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτης καταλληλότητας ενός υλικού για την εκάστοτε επιθυμητή εφαρμογή.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E424-71-2007 [97] η ανακλαστικότητα ενός επιστρωμένου υλικού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{cases} \Delta SR = SR_{colorless} - SR_{colored} \\ SR = \frac{\int S_{\lambda} r(\lambda) d\lambda}{\int S_{\lambda} d\lambda} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, $r(\lambda)$ η ανακλαστικότητα σε κάθε μήκος κύματος και S_{λ} η αναλογία ηλιακής ενέργειας σε διαφορετικά μήκη κύματος, όπως ορίζεται στο πρότυπο ASTM E424-71-2007 [84]. Η ανακλαστικότητα των επιφανειών υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ορατή περιοχή (380–780 nm) όσο και την εγγύς υπέρυθη περιοχή (780–2526 nm) του φάσματος [91].

2.2.3 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Η έννοια της σταθερότητας στα θερμοχρωμικά υλικά (TCMs) αναφέρεται στη διατήρηση της λειτουργικότητάς τους κατά τη διάρκεια παρατεταμένης χρήσης ή αποθήκευσης. Αποτελεί κρίσιμο κριτήριο για την εκτίμηση της απόδοσης των TCMs, καθώς η μακροχρόνια σταθερότητα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη βιωσιμότητα και την αξιοπιστία τους σε πρακτικές εφαρμογές. Για τη διερεύνηση και την αποτίμηση της σταθερότητας χρησιμοποιείται ένα σύνολο πειραματικών μεθόδων, όπως δοκιμές κυκλικής αντοχής, δοκιμές αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, εκθέσεις σε υπεριώδη ακτινοβολία και δοκιμές αντοχής σε συνθήκες υγρασίας και θερμότητας [91].

2.2.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Η ταχύτητα θερμικής απόκρισης (τ) ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα θερμοχρωμικό υλικό να μεταβεί από την αρχική του κατάσταση στην κατάσταση αλλαγής χρώματος. Αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες για την εκτίμηση της απόδοσης των θερμοχρωμικών υλικών, καθώς επηρεάζει άμεσα την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο στις μεταβολές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους σε πρακτικές εφαρμογές. Η ταχύτητα θερμικής απόκρισης σχετίζεται με παράγοντες όπως η θερμική αγωγιμότητα του υλικού, οι οπτικές του ιδιότητες και η μορφολογική του δομή [98].

Η ταχύτητα θερμικής απόκρισης μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln} \quad (2)$$

όπου t_1 και t_2 είναι οι χρονικές στιγμές στις οποίες οι τιμές απορρόφησης του δείγματος φτάνουν στις καταστάσεις 1 και 2 αντίστοιχα, ενώ A_1 και A_2 αντιστοιχούν στις αρχικές και τελικές τιμές απορρόφησης του δείγματος. Η παράμετρος αυτή επιτρέπει την ποσοτική σύγκριση της ταχύτητας απόκρισης διαφορετικών θερμοχρωμικών συστημάτων.

2.2.5 ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΟΤΗΤΑ

Η **αναστρεψιμότητα** (γ) αναφέρεται στην ικανότητα ενός θερμοχρωμικού υλικού να διατηρεί σταθερά τη συμπεριφορά αλλαγής χρώματος κατά τη διάρκεια πολλαπλών θερμικών κύκλων [13]. Αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους δείκτες για την εκτίμηση της απόδοσης των

θερμοχρωμικών υλικών, καθώς σε πρακτικές εφαρμογές απαιτείται η επαναλαμβανόμενη και αξιόπιστη μεταβολή των οπτικών τους ιδιοτήτων. Η εμφάνιση μη αναστρέψιμων μεταβολών κατά τη διαδικασία αλλαγής χρώματος δύναται να περιορίσει σημαντικά τη λειτουργικότητα και τη διάρκεια ζωής του υλικού. Η αναστρεψιμότητα μπορεί να αξιολογηθεί μέσω δοκιμών θερμικής καταπόνησης, όπως δοκιμές θερμικής κυκλικότητας και δοκιμές διατήρησης χρώματος [97,98].

Οι δοκιμές θερμικής κυκλικότητας περιλαμβάνουν την υποβολή των θερμοχρωμικών υλικών σε επαναλαμβανόμενους κύκλους θέρμανσης και ψύξης, προσομοιώνοντας τις πραγματικές θερμοκρασιακές συνθήκες στις οποίες ενδέχεται να εκτεθούν σε πρακτικές εφαρμογές. Μετά από κάθε κύκλο, η μεταβολή του χρώματος του υλικού όπως η απορρόφηση, η διαπερατότητα ή τα φασματικά χαρακτηριστικά καταγράφεται μέσω οπτικής παρατήρησης ή με τη χρήση οπτικών οργάνων μέτρησης. Μέσω της σύγκρισης των οπτικών ιδιοτήτων σε διαδοχικούς κύκλους, μπορεί να προσδιοριστεί ο βαθμός αναστρεψιμότητας του υλικού [13].

Συνολικά, η απόδοση των θερμοχρωμικών υλικών μπορεί να εκτιμηθεί βάσει ενός συνόλου δεικτών, όπως το θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής χρώματος, η σταθερότητα, η ταχύτητα θερμικής απόκρισης, ο βαθμός χρωματικής μεταβολής και η αναστρεψιμότητα. Η ολοκληρωμένη διερεύνηση των παραμέτρων αυτών είναι απαραίτητη για τη συνολική αποτίμηση της λειτουργικότητας των θερμοχρωμικών υλικών και για τη διαμόρφωση αξιόπιστων κριτηρίων εφαρμογής τους σε πραγματικές συνθήκες.

2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΧΤΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συμπεριφορά και η απόδοση των θερμοχρωμικών υλικών διαμορφώνονται τόσο από τις εγγενείς φυσικοχημικές τους ιδιότητες όσο και από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθενται. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κρίσιμες παράμετροι όπως η θερμοκρασία ενεργοποίησης της χρωματικής μετάβασης και οι τιμές ανακλαστικότητας στις διαφορετικές καταστάσεις του υλικού μπορούν να προσαρμοστούν με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής χρωστικών με συγκεκριμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως το χρώμα και η θερμοκρασία μετάβασης, καθώς και μέσω του ελέγχου της συγκέντρωσής τους σε κατάλληλα φορέα υλικά [12,25,93,99].

Τα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά έχουν προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον σε

μελέτες εφαρμογών, κυρίως λόγω των ιδιαίτερων πλεονεκτημάτων τους και ειδικότερα όσον αφορά τη χρήση τους σε κελύφη κτιρίων [22,94,100,101]. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή προσαρμοστικότητα χρώματος και έντονες χρωματικές μεταβολές ως απόκριση σε θερμικά ερεθίσματα. Μέσω της δυναμικής ρύθμισης της ανακλαστικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, συμβάλλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και στη μείωση του ανθρακικού τους αποτυπώματος. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη τις εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών, καθώς και τη διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για ενσωμάτωση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων στον κτιριακό τομέα, η παρούσα ενότητα εστιάζει κυρίως στα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι τα οργανικά θερμοχρωμικά συστήματα παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τη ρύθμιση των θερμοοπτικών τους ιδιοτήτων ιδίως της θερμοκρασίας μετάβασης, του εύρους αλλαγής χρώματος και της ανακλαστικότητας επιτρέποντας την προσαρμογή τους στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής [13].

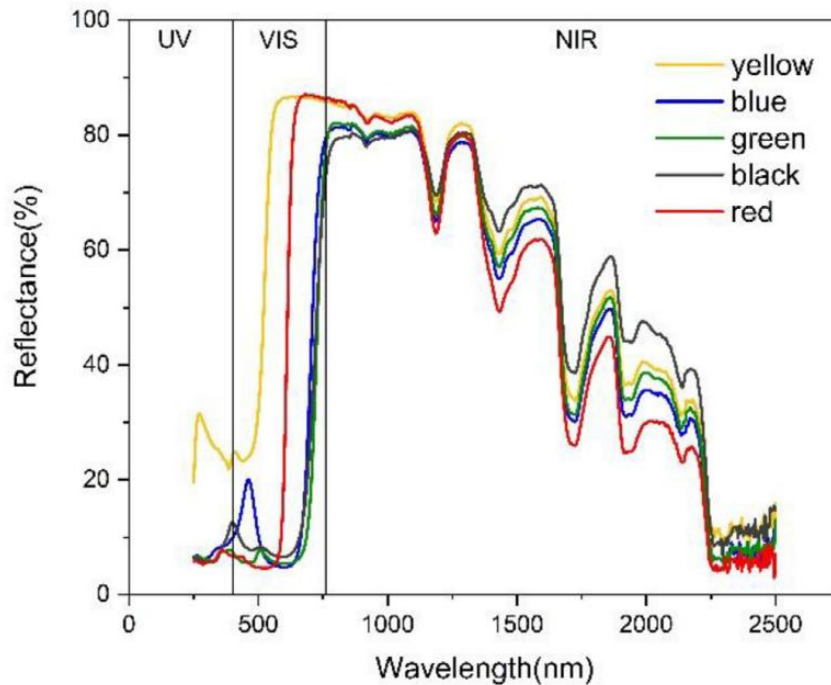
2.3.1 ΧΡΩΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ

Σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι θερμοχρωμικές επιστρώσεις βρίσκονται στη χρωματισμένη τους κατάσταση, ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας το χρώμα τους εξασθενεί σταδιακά. Τα φαινόμενα αυτά αποτυπώνονται σε πειραματικές μετρήσεις υπαίθριων συνθηκών, όπου παρατηρείται σαφής μεταβολή τόσο της χρωματικής απόδοσης όσο και της ηλιακής ανακλαστικότητας των υλικών.

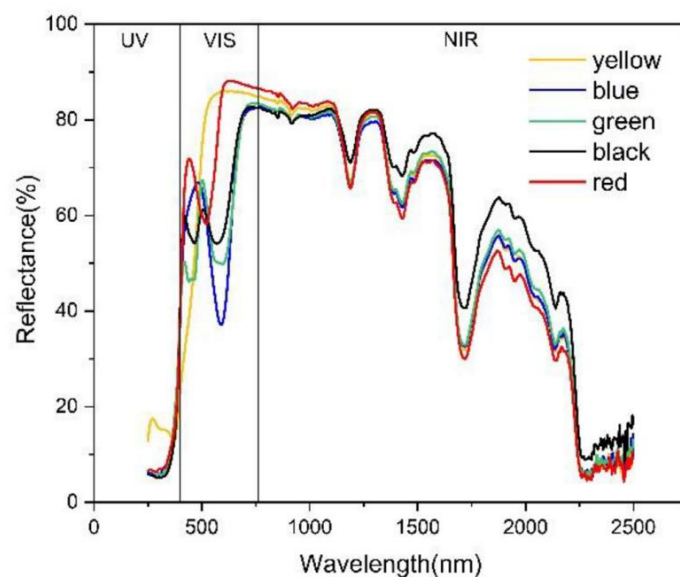
Σύμφωνα με τη μελέτη των Kalessi et al. [12], αναπτύχθηκαν θερμοχρωμικά επιχρίσματα με θερμοκρασία μετάβασης στους 30 °C, μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλων θερμοχρωμικών χρωστικών σε υλικό φορέα. Τα αποτελέσματα των φασματοσκοπικών μετρήσεων ανέδειξαν έντονη διαφοροποίηση της ηλιακής ανακλαστικότητας μεταξύ της χρωματισμένης και της άχρωμης κατάστασης, η οποία σχετίζεται άμεσα με το χρώμα του υλικού. Ειδικότερα, το πράσινο θερμοχρωμικό υλικό παρουσίασε τη μεγαλύτερη μεταβολή στην ανακλαστικότητα ($\Delta SR \approx 0,22$), ενώ το κίτρινο εμφάνισε τη μικρότερη, με τιμή περίπου 0,03.

Στο πείραμα των Zhang et al. [93] παρασκευάστηκαν θερμοχρωμικά επιχρίσματα σε πέντε διαφορετικά χρώματα (κόκκινο, κίτρινο, μπλε, πράσινο και μαύρο), με χρήση κατάλληλων προσμίξεων και πρόσθετων υλικών. Τα επιχρίσματα παρουσίαζαν θερμοκρασία μετάβασης στους 31 °C, κάτω από την οποία βρίσκονταν στη χρωματισμένη φάση, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες το χρώμα τους εξασθενούσε. Αντίστοιχα, στη συγκεκριμένη μελέτη η

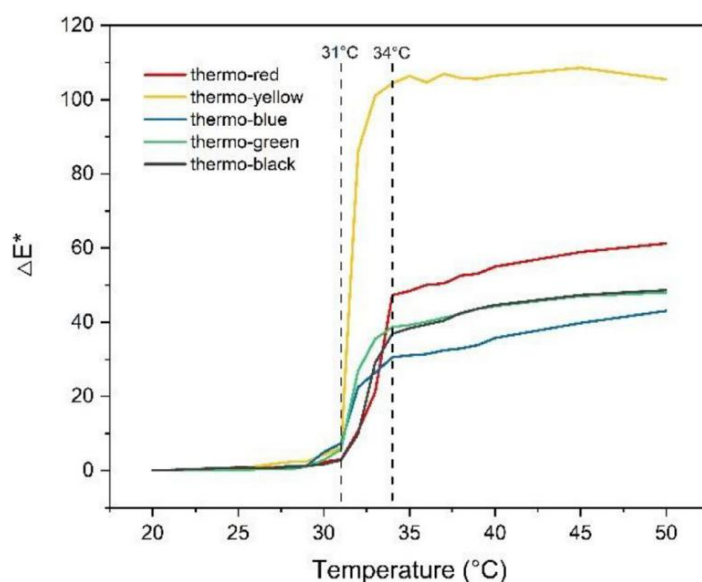
μεγαλύτερη διαφορά ηλιακής ανακλαστικότητας μεταξύ της έγχρωμης και της άχρωμης φάσης παρατηρήθηκε στο πράσινο θερμοχρωμικό επίχρισμα, με τιμή $\Delta SR = 0,30$, ενώ η μικρότερη διαφορά καταγράφηκε στο κίτρινο, με $\Delta SR = 0,07$. Πολύ κοντά στις μέγιστες τιμές βρέθηκαν επίσης τόσο το μαύρο με $\Delta SR = 0,29$ όσο και το μπλε με $\Delta SR = 0,28$.



Εικόνα 2.3.1 Φάσματα ανακλαστικότητας θερμοχρωμικών υλικών κατά την έγχρωμη τους κατάσταση [93]



Εικόνα 2.3.2 Φάσματα ανακλαστικότητας θερμοχρωμικών υλικών κατά την άχρωμη τους κατάσταση [93]

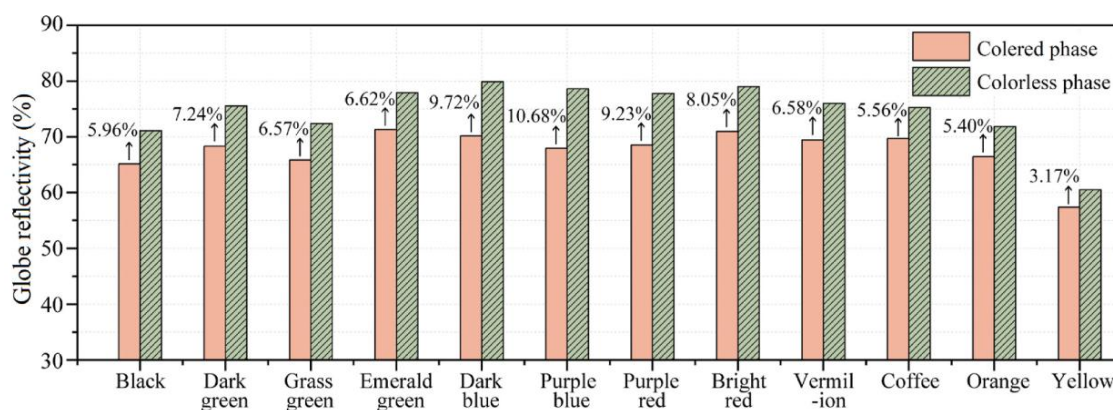


Εικόνα 2.3.3 Διαδικασία χρωματικής μεταβολής των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [93]

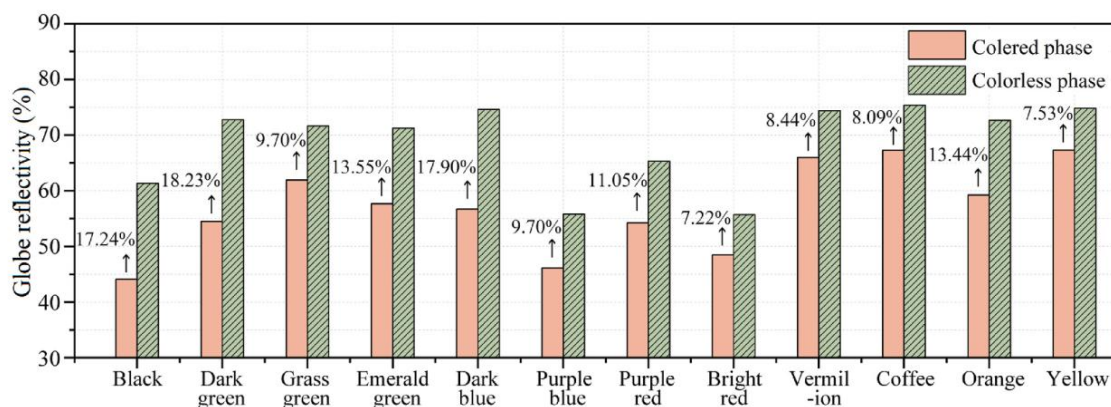
Samples	Solar reflectance (SR)		ΔSR
	Colored phase	Colorless phase	
Thermo-red	0.55	0.77	0.22
Thermo-yellow	0.7	0.77	0.07
Thermo-blue	0.44	0.72	0.28
Thermo-green	0.42	0.72	0.3
Thermo-black	0.41	0.7	0.29

Πίνακας 2.3.1 Ηλιακή ανακλαστικότητα δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [93]

Στη μελέτη των Liu et al. [103] παρασκευάστηκαν θερμοχρωμικά επιχρίσματα σε 12 διαφορετικά χρώματα πάνω σε φύλλα αλουμινίου πάχους 0,4 mm, με θερμοκρασίες μετάβασης 25 °C και 33 °C. Η ανάλυση των οπτικών τους ιδιοτήτων επικεντρώθηκε στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (780–2526 nm), το οποίο καλύπτει την κύρια θερμική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανακλαστικότητα αυξάνεται σημαντικά κατά τη μετάβαση από τη χρωματισμένη στην άχρωμη φάση, κυρίως στις περιοχές 1300–1600 nm και 1900–2100 nm, με μέγιστη αύξηση 16,8%–27,1%, ανάλογα με το χρώμα. Στη θερμοκρασία μετάβασης των 25 °C, η ανακλαστικότητα παρουσίασε έντονες διακυμάνσεις στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα, με τα πράσινα, μπλε και κόκκινα δείγματα να εμφανίζουν τη μεγαλύτερη αύξηση της ηλιακής ανακλαστικότητας (6,57%–10,68%), ενώ η κίτρινη απόχρωση σημείωσε τη μικρότερη αύξηση. Στη θερμοκρασία μετάβασης των 33 °C, η αύξηση της ανακλαστικότητας ήταν πιο έντονη, ιδιαίτερα για τα μαύρα, σκούρο πράσινα και σκούρο μπλε δείγματα, ενώ η φωτεινή κόκκινη απόχρωση παρουσίασε τη χαμηλότερη αύξηση, με τιμή έως 7,22%.



Εικόνα 2.3.4 Ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στις χρωματισμένη και άχρωμη φάση (25 °C) [103]



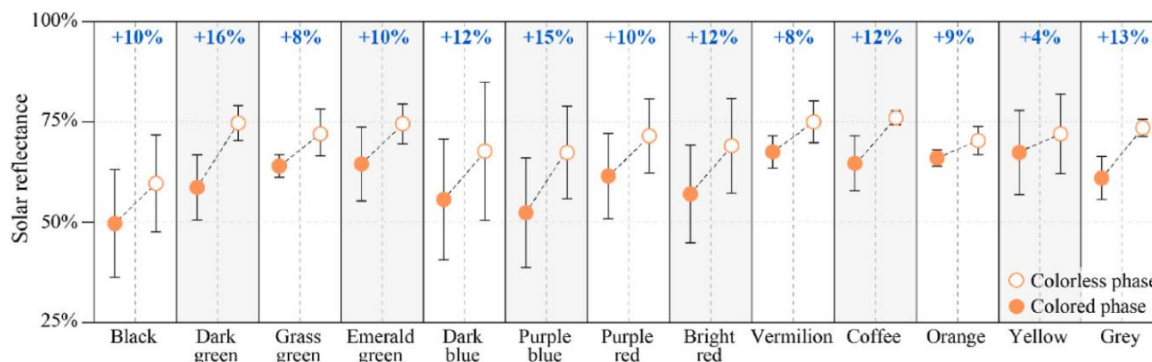
Εικόνα 2.3.5 Ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στις χρωματισμένη και άχρωμη φάση (33 °C)

[103]

Thermo-Sample	Color transition temperature at 25 °C			Color transition temperature at 33 °C		
	Colored phase	Colorless phase	Increased GR	Colored phase	Colorless phase	Increased GR
Black	65.13%	71.10%	5.96%	44.12%	61.36%	17.24%
Dark green	68.32%	75.56%	7.24%	54.54%	72.77%	18.23%
Grass green	65.85%	72.42%	6.57%	61.95%	71.65%	9.70%
Emerald green	71.30%	77.92%	6.62%	57.70%	71.25%	13.55%
Dark blue	70.17%	79.90%	9.72%	56.74%	74.64%	17.90%
Purple blue	67.97%	78.65%	10.68%	46.14%	55.84%	9.70%
Purple red	68.56%	77.79%	9.23%	54.26%	65.31%	11.05%
Bright red	70.97%	79.02%	8.05%	48.51%	55.73%	7.22%
Vermilion	69.43%	76.00%	6.58%	65.99%	74.42%	8.44%
Coffee	69.71%	75.27%	5.56%	67.30%	75.39%	8.09%
Orange	66.46%	71.86%	5.40%	59.25%	72.68%	13.44%
Yellow	57.35%	60.52%	3.17%	67.32%	74.85%	7.53%

Πίνακας 2.3.2 Ηλιακή ανακλαστικότητα των δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με διαφορετικά χρώματα [103]

Συμπερασματικά, και αναλύοντας περισσότερες μελέτες περίπτωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3-6, προκύπτει ότι τα θερμοχρωμικά υλικά παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της ηλιακής ανακλαστικότητας κατά τη μετάβαση από τη χρωματισμένη στην άχρωμη φάση. Η μέση ηλιακή ανακλαστικότητα κυμαίνεται μεταξύ 50,84% και 75,39%, με τις πιο σκούρες αποχρώσεις να εμφανίζουν ανώτερη θερμοχρωμική απόδοση, επιτυγχάνοντας διαφορές πάνω από 10%, ενώ οι ανοιχτόχρωμες επιστρώσεις σημειώνουν συνήθως αύξηση κάτω του 10%. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην ικανότητα των σκούρων χρωμάτων να απορροφούν και να ανακλούν διαφορετικά τμήματα του ηλιακού φάσματος, προκαλώντας μεγαλύτερη μεταβολή κατά τη φάση έγχρωμης-άχρωμης κατάστασης. Συνολικά, η στοχευμένη ρύθμιση των οπτικών ιδιοτήτων, σε συνδυασμό με την προσεκτική επιλογή χρωμάτων και θερμοκρασιών μετάβασης, καθιστά τα θερμοχρωμικά υλικά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές σε κτιριακά κελύφη, ενισχύοντας τόσο την ενεργειακή αποδοτικότητα όσο και την αισθητική των κτιρίων.



Εικόνα 2.3.6 Ηλιακή ανακλαστικότητα δειγμάτων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων [12,93, 94,100, 104, 106]

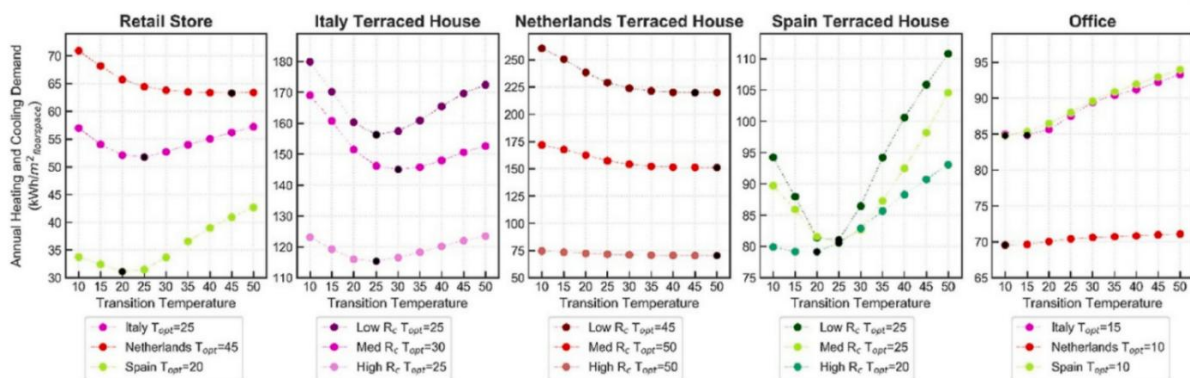
2.3.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ

Η θερμοκρασία μετάβασης αποτελεί έναν από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού των θερμοχρωμικών υλικών, καθώς καθορίζει το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο ενεργοποιείται η μεταβολή των οπτικών τους ιδιοτήτων και, κατ' επέκταση, η ενεργειακή τους απόδοση. Στη μελέτη των Liu et al. [97], παρουσιάζεται ξεκάθαρα η επίδραση της θερμοκρασίας μετάβασης στη θερμοχρωμική συμπεριφορά των επιχρισμάτων, καθώς η σύγκριση μεταξύ των δύο θερμοκρασιών (25 °C και 33 °C) δείχνει σημαντικές διαφοροποιήσεις στη διαφορά της ολικής ηλιακής ανακλαστικότητας (ΔGR) μεταξύ της χρωματισμένης και της άχρωμης φάσης. Ειδικότερα, για θερμοκρασία μετάβασης 25 °C, η ΔGR κυμαίνεται από 3,17% έως 10,68%, με το κίτρινο να παρουσιάζει τη μικρότερη διαφορά και το μωβ-μπλε τη μεγαλύτερη. Αντίθετα, στη θερμοκρασία μετάβασης των 33 °C, οι διαφορές ανακλαστικότητας αυξάνονται αισθητά, με τιμές που φτάνουν έως και 17%–18% για σκούρες αποχρώσεις όπως το μαύρο, το σκούρο πράσινο και το σκούρο μπλε.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η υψηλότερη θερμοκρασία μετάβασης οδηγεί σε εντονότερη οπτική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο φάσεων, γεγονός που ενισχύει τη δυναμική προσαρμογή της ανακλαστικότητας στις μεταβαλλόμενες θερμικές συνθήκες. Συνεπώς, η θερμοκρασία μετάβασης αποτελεί κρίσιμο σχεδιαστικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο το εύρος όσο και την ένταση της θερμοχρωμικής απόκρισης, και κατ' επέκταση το δυναμικό ενεργειακής εξοικονόμησης των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε κτιριακές εφαρμογές.

Οι Butt et al. [99], με στόχο τον προσδιορισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας μετάβασης βάσει της ελαχιστοποίησης της συνολικής ετήσιας ενεργειακής ζήτησης για θέρμανση και ψύξη,

πραγματοποίησαν προσομοιώσεις εξετάζοντας θερμοκρασίες μετάβασης από 10 °C έως 50 °C με βήμα 5 °C. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη δεν εμφανίζει άμεση συσχέτιση, καθώς το θερμικό φορτίο ενός κτιρίου καθορίζεται συνήθως είτε από τις ανάγκες θέρμανσης είτε από τις ανάγκες ψύξης. Η εικόνα 2.3-7 παρουσιάζει τη συνολική ετήσια ζήτηση ενέργειας (kWh/m²) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία μετάβασης των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων για διαφορετικούς τύπους κτιρίων και κλιματικές συνθήκες (Ιταλία, Ολλανδία, Ισπανία). Η βέλτιστη θερμοκρασία μετάβασης διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το κλίμα και τον τύπο του κτιρίου: σε ψυχρότερα κλίματα ευνοούνται υψηλότερες τιμές (έως 45–50 °C), σε θερμότερα χαμηλότερες (20–25 °C), ενώ σε περιοχές με πιο ισορροπημένες θερμικές απαιτήσεις εντοπίζεται σε ενδιάμεσο εύρος (25–30 °C). Στα κτίρια γραφείων, λόγω αυξημένων εσωτερικών θερμικών φορτίων, προκρίνονται ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες μετάβασης (10–15 °C). Συνεπώς, η ενεργειακή απόδοση των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων δεν βελτιστοποιείται σε μία ενιαία θερμοκρασία ενεργοποίησης, αλλά απαιτεί προσαρμογή στις εκάστοτε κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες.



Εικόνα 2.3.7 Συνολική ετήσια ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια με θερμοχρωμικό επίχρισμα (TCM) διαφορετικών θερμοκρασιών μετάβασης. [99]

Η μελέτη των Kitsoroulou et al. [101] έδειξε ότι η θερμοκρασία μετάβασης, δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα αλλάζουν χρώμα, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποτελεσματικότητά τους στις στέγες. Τα επιχρίσματα που αλλάζουν χρώμα σε θερμοκρασίες κοντά στη ρύθμιση θερμοκρασίας του κτιρίου κατά τη θερινή περίοδο (π.χ. 24–28 °C) παρουσίασαν τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη, ενώ επιχρίσματα που αλλάζουν χρώμα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (π.χ. 32–36 °C) περιορίζουν την αύξηση της ζήτησης θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο. Η βέλτιστη επιλογή θερμοκρασίας μετάβασης εξαρτάται από τη θερμομονωτική ικανότητα της στέγης: σε

στέγες με χαμηλή θερμομονωτική απόδοση τα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας μετάβασης είναι πιο αποτελεσματικά για τη συνολική ετήσια κατανάλωση, ενώ σε στέγες με υψηλή θερμομονωτική ικανότητα προτιμώνται οι χαμηλότερες τιμές. Συνολικά, η κατάλληλη ρύθμιση της θερμοκρασίας μετάβασης επιτρέπει στα θερμοχρωμικά υλικά να προσαρμόζουν δυναμικά την απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας, μεγιστοποιώντας την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την ψύξη χωρίς σημαντική αύξηση των θερμικών φορτίων για θέρμανση.

2.3.3 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Εκτός από τις θερμοχρωμικές χρωστικές που ενσωματώνονται στο ίδιο το υλικό, τα υποστρώματα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική απόδοση των θερμοχρωμικών συστημάτων. Η θερμική τους αγωγιμότητα επηρεάζει άμεσα τη δυναμική απόκριση, καθώς υλικά με υψηλή αγωγιμότητα επιταχύνουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας και, κατ' επέκταση, την ενεργοποίηση του μηχανισμού αλλαγής χρώματος [97]. Παράλληλα, η οπτική τους συμπεριφορά είναι ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι αδιαφανή ή έντονα ανακλαστικά υποστρώματα μπορούν να περιορίσουν τη διέλευση της ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του θερμοχρωμικού μηχανισμού [12]. Εξίσου κρίσιμη είναι η μηχανική τους αντοχή, η οποία συμβάλλει στη μακροχρόνια σταθερότητα και ανθεκτικότητα του υλικού υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τέλος, οι επιφανειακές ιδιότητες και οι διαφορές στους συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ φορέα και υποστρώματος πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά, ώστε να διασφαλίζεται η επαρκής πρόσφυση και να αποφεύγονται εσωτερικές τάσεις, αποκολλήσεις ή ρηγματώσεις κατά τις θερμοκρασιακές μεταβολές [105].

Σχετική πειραματική μελέτη [99] συνέκρινε τα φάσματα ηλιακής ανακλαστικότητας θερμοχρωμικών υλικών εφαρμοσμένων σε υποστρώματα γυαλιού και αλουμινίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στην περιοχή του ορατού φάσματος και τα δύο υποστρώματα παρουσιάζουν παρόμοια φασματική τάση ως προς τη μεταβολή μεταξύ άχρωμης και έγχρωμης φάσης. Ωστόσο, οι απόλυτες τιμές ανακλαστικότητας διαφοροποιούνται σημαντικά, καθώς το υπόστρωμα αλουμινίου εμφανίζει αισθητά υψηλότερα ποσοστά ανακλαστικότητας σε σύγκριση με το γυαλί στο ορατό φάσμα. Η διαφοροποίηση καθίσταται εντονότερη στην υπέρυθη περιοχή, όπου το αλουμίνιο παρουσιάζει περισσότερες και εντονότερες φασματικές κορυφές, καθώς και συνολικά αυξημένη ανακλαστικότητα, ενώ το γυάλινο υπόστρωμα εμφανίζει πιο ομαλή και χαμηλότερη φασματική απόκριση. Συνεπώς, η υψηλή εγγενής

ανακλαστικότητα του αλουμινίου ενισχύει τη συνολική ενεργειακή ανακλαστική συμπεριφορά του συστήματος, ενώ το γυαλί επιτρέπει την πιο σαφή αποτύπωση της συνεισφοράς του ίδιου του θερμοχρωμικού επιχρίσματος.

Στη μελέτη των Wang et al. [100] εξετάστηκαν δύο σενάρια με χρήση του ίδιου οργανικού θερμοχρωμικού υλικού, διαφοροποιούμενα ως προς το υπόστρωμα. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε πορώδες υμενικό υλικό ως βάση, ενώ στη δεύτερη επιλέχθηκε λευκή θερμομονωτική στρώση. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η επίτευξη θερμοκρασιακά προσαρμοζόμενης ακτινοβολιακής ψύξης μέσω θερμοχρωμικών υλικών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες των θερμοχρωμικών μικροκαψουλών, αλλά επηρεάζεται ουσιαστικά από τα χαρακτηριστικά της υποκείμενης στρώσης. Ειδικότερα, όσο υψηλότερη είναι η ηλιακή ανακλαστικότητα της βάσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητά της να ενισχύει και να μεγιστοποιεί το θερμορυθμιστικό αποτέλεσμα του συστήματος.

Τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση των θερμοχρωμικών υλικών σε διαφορετικά υποστρώματα επιφέρει διαφοροποιήσεις στις οπτικές και θερμικές ιδιότητες, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της προσεκτικής επιλογής των βάσεων για εφαρμογές με ενεργειακή αποδοτικότητα και μακροχρόνια σταθερότητα.

2.3.4 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΟΞΕΙΔΙΩΝ

Ένας επιπλέον παράγοντας που δύναται να ενισχύσει την απόδοση των θερμοχρωμικών υλικών είναι η ενσωμάτωση σωματιδίων οξειδίων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το TiO_2 . Η προσθήκη τους επιδρά ουσιαστικά στις ιδιότητες των επιχρισμάτων, μεταβάλλοντας τόσο τη συμπεριφορά στην έγχρωμη όσο και στην άχρωμη φάση. Μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της συγκέντρωσης και των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της θερμοχρωμικής απόκρισης και η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των δομικών εφαρμογών.

Στη μελέτη των Zhang et al. [94], επιλέχθηκε θερμοκρασία μετάβασης στους $31\text{ }^\circ\text{C}$ και κατασκευάστηκαν συνολικά 12 διαφορετικοί τύποι δειγμάτων, συνδυάζοντας τρεις περιεκτικότητες TCM (5%, 10% και 15% κ.β.) με τέσσερις περιεκτικότητες TiO_2 (0%, 5%, 10% και 15% κ.β.). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη TiO_2 οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ανακλαστικότητας, τόσο στην έγχρωμη όσο και στην άχρωμη φάση, σε σύγκριση με τα δείγματα χωρίς TiO_2 , ενώ η ιδιότητα αυτή ενισχυόταν σταδιακά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε TiO_2 . Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος των σωματιδίων TiO_2

επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τη φασματική ανακλαστικότητα των επιχρισμάτων, ανάλογα με την περιοχή του μήκους κύματος.

Η επίδραση της περιεκτικότητας σε TiO_2 στην ηλιακή ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων εξετάστηκε και από τους Zheng et al. [93], όπου διαπιστώθηκε ότι δείγματα με μεγαλύτερη ποσότητα TiO_2 , τα οποία εμφανίζουν πιο ανοιχτό χρωματισμό, παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ηλιακής ανακλαστικότητας σε σύγκριση με δείγματα χαμηλότερης περιεκτικότητας. Η ηλιακή ανακλαστικότητα αυξανόταν σταδιακά με την αύξηση της συγκέντρωσης TiO_2 , ενώ τα επιχρίσματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε μεταλλικά οξείδια παρουσίασαν καλύτερη απόδοση ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα.

Σύμφωνα με τους Song et al. [102], η κατανομή και το μέγεθος των σωματιδίων TiO_2 επηρεάζει καθοριστικά τις οπτικές ιδιότητες των επιχρισμάτων. Συγκεκριμένα, η αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων οδηγεί σε μείωση της ανακλαστικότητας στην ηλιακή και την ορατή περιοχή και σε μείωση της φωτεινότητας, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ανακλαστικότητα στην εγγύς υπέρυθη περιοχή. Η κύρια ζώνη ανάκλασης μετατοπίζεται προς μεγαλύτερα μήκη κύματος με την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων, γεγονός που ενισχύει την ανακλαστικότητα στην εγγύς υπέρυθη περιοχή και συμβάλλει στη βελτιστοποίηση «ψυχρών» επιχρισμάτων. Συνολικά, τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της επιλογής κατάλληλου μεγέθους σωματιδίων TiO_2 για τη βελτίωση των θερμοχρωμικών και ανακλαστικών ιδιοτήτων των επιχρισμάτων, καθιστώντας τα οξείδια βασικό παράγοντα στον σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών επιστρώσεων

2.3.5 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΩΣΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι μεταβολές στην περιεκτικότητα του χρωστικού υλικού στα θερμοχρωμικά επιχρίσματα μπορούν να οδηγήσουν σε ποικιλία οπτικών χαρακτηριστικών και μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων [103]. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση της σταθερότητας του υλικού, με βάση τις ιδιότητες αντοχής και ανθεκτικότητας. Κατά την ανάλυση της συμβολής του διοξειδίου του τιτανίου, διαπιστώθηκε ότι η μαζική αναλογία TCM επηρεάζει επίσης την ανακλαστικότητα των δειγμάτων [93]. Συγκεκριμένα, δείγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε TCM εμφανίζουν υψηλότερη ανακλαστικότητα στην περιοχή 560–1100 nm, ενώ στη ζώνη 1100–2500 nm η ανακλαστικότητα μειώνεται, με αποτέλεσμα η συνολική ανακλαστικότητα στο ηλιακό φάσμα να παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Ανάλογα ευρήματα αναφέρουν και οι Zheng et al. [93],

σύμφωνα με τους οποίους δείγματα με 10% TCM είχαν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα από δείγματα με 5% TCM σε απουσία TiO_2 .

Η επίδραση της συγκέντρωσης TCM εξαρτάται όχι μόνο από την ποσότητα του χρωστικού, αλλά και από το πάχος του επιχρίσματος. Μελέτες του Hu et al. [28] έδειξαν ότι η αύξηση του πάχους του TCM οδήγησε σε μείωση του θερμικού και του ψυκτικού φορτίου των κτιρίων, ενώ ταυτόχρονα περιορίστηκαν οι εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με την ενέργεια. Συνεπώς, τόσο η ποσότητα όσο και το πάχος του TCM αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της ηλιακής ανακλαστικότητας και της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

2.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟΝ ΚΤΙΡΙΑΚΟ ΤΟΜΕΑ

Τα θερμοχρωμικά υλικά με θερμική προσαρμοστικότητα αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μείωση της υπερθέρμανσης του εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων, ιδιαίτερα σε αστικά κέντρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τον χειμώνα. Η δυνατότητα αυτή φαίνεται να μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία των κτιρίων, γεγονός που καθιστά σκόπιμη τη διεξοδική διερεύνηση της μακροχρόνιας σταθερότητας των υλικών αυτών, καθώς και την αξιολόγηση της πρακτικής τους εφαρμογής σε πραγματικές αστικές συνθήκες.

2.4.1 ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΕΡΑΗ

Η στέγη, ως βασικό σημείο σύνδεσης του εσωτερικού με το εξωτερικό περιβάλλον και ταυτόχρονα κύριο στοιχείο ανταλλαγής θερμότητας των κτιρίων, παίζει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας και στην ενεργειακή κατανάλωση. Η εφαρμογή θερμοχρωμικών υλικών στα δώματα έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στη μελέτη των Hu et al. [28] αξιολογήθηκε η απόδοση δωματίων επικαλυμμένων με θερμοχρωμικά υλικά σε διάφορες κλιματικές ζώνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση θερμοχρωμικών υλικών μπορεί να μειώσει σημαντικά από 8.7–16.6 °C τη θερμοκρασία της επιφάνειας κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών και να την αυξήσει ελαφρώς, δηλαδή 1.4–2.6 °C, το χειμώνα συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO_2 .

Η μελέτη των Kailessi et al. [12] ανέδειξε ότι τα θερμοχρωμικά δώματα συμβάλλουν στη σταθεροποίηση των θερμικών ροών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Συγκεκριμένα, στα σενάρια που μελετήθηκαν, η μέση ημερήσια θερμοκρασία επιφάνειας το καλοκαίρι κυμάνθηκε από 31 έως 38,4 °C για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα και από 36,4 έως 48,5 °C για τα απλά επιχρίσματα, με διαφορές 5,4–12,1 °C. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η τεχνολογία αυτή βελτιώνει τη θερμική άνεση των ενοίκων και περιορίζει το φαινόμενο των αστικών θερμικών νησίδων σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Οι Zhang et al. [94] παρουσίασαν εμπειρικά δεδομένα που δείχνουν ότι τα θερμοχρωμικά δώματα μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις θερμοκρασίες υπό μέτριες κλιματικές συνθήκες, επιτυγχάνοντας μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Οι μέγιστες θερμοκρασιακές διαφορές που καταγράφηκαν μεταξύ των δειγμάτων κόκκινου, κίτρινου, μπλε, πράσινου και μαύρου θερμοχρωμικού υλικού σε σχέση με τα απλά λευκά δείγματα ήταν 0,66 °C, 0,36 °C, 1,11 °C, 1,68 °C και 1,53 °C αντίστοιχα. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των θερμοχρωμικών δωμάτων ως εργαλείο για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και τη βελτίωση της θερμικής άνεσης των ενοίκων.

Οι Yu et al. [109] παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα των θερμοχρωμικών υλικών στη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας και στον περιορισμό των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Συγκεκριμένα, οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας στεγών με θερμοχρωμικό επίχρισμα ήταν 30,9 °C και 32,2 °C αντίστοιχα, δηλαδή περίπου 1,9 °C και 2,4 °C χαμηλότερες σε σύγκριση με συμβατικές στέγες. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι οι στέγες με θερμοχρωμικά επιχρίσματα, λόγω της υψηλότερης ανακλαστικότητάς τους, απορροφούν μικρότερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας και διατηρούν χαμηλότερες θερμοκρασίες υπό θερινές συνθήκες.

Η εφαρμογή θερμοχρωμικών υλικών σε κατακόρυφα δομικά στοιχεία έχει επίσης απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα και έχει οδηγήσει σε εξίσου σημαντικά συμπεράσματα. Οι Liu et al. [107], μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, έδειξαν ότι τοίχοι με θερμοχρωμικά υλικά παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο, εμφανίζοντας χαμηλή απορρόφηση το καλοκαίρι και υψηλή τον χειμώνα σε σύγκριση με συμβατικά επιχρίσματα. Συγκεκριμένα, η μέγιστη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας μειώθηκε κατά περίπου 11–17 °C το καλοκαίρι και αυξήθηκε κατά περίπου 8–10 °C τον χειμώνα. Παράλληλα, η μέγιστη θερμική ροή στην εξωτερική επιφάνεια μειώθηκε κατά

περίπου 22–39 W/m² το καλοκαίρι και αυξήθηκε κατά περίπου 21–27 W/m² τον χειμώνα, γεγονός που επιβεβαιώνει τη δυναμική θερμική συμπεριφορά των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων.

Οι Meng et al. [23], μέσω μοντελοποίησης της θερμικής μεταφοράς με δυναμικά μεταβαλλόμενη ανακλαστικότητα, επιβεβαίωσαν ότι τα θερμοχρωμικά υλικά έχουν την ικανότητα να ρυθμίζουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση των θερμικών κερδών κατά περίπου 80% κατά τη χειμερινή περίοδο και μείωση κατά περίπου 20% το καλοκαίρι. Η ρυθμιστική αυτή συμπεριφορά οδήγησε σε αύξηση της μέγιστης και της μέσης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας κατά περίπου 1,7–7,0 °C και 1,2–1,9 °C αντίστοιχα τον χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι καταγράφηκε μείωση κατά περίπου 13,1–13,5 °C και 3,1–4,4 °C.

Οι Fabiani et al. [27], με μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Perugia, ανέπτυξαν και αξιολόγησαν θερμοχρωμικό επίχρισμα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θερμομόνωσης του κελύφους του κτιρίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή του θερμοχρωμικού υλικού οδήγησε σε μείωση της μέσης θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα κατά περίπου 0,2 °C και 0,5 °C κατά τη θερινή περίοδο για διαμορφώσεις υψηλής και χαμηλής θερμομόνωσης αντίστοιχα, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο παρατηρήθηκε αύξηση της μέσης εσωτερικής θερμοκρασίας κατά περίπου 0,5 °C και 0,6 °C αντίστοιχα.

2.4.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΕΡΔΗ

Ο βασικός στόχος των θερμοχρωμικών υλικών είναι η επίτευξη της θερμικής άνεσης των εσωτερικών χώρων ενός κτιρίου, μειώνοντας ταυτόχρονα τις ενεργειακές καταναλώσεις για την κάλυψη των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων. Αν και δεν παρουσιάζουν τη μέγιστη απόδοση σε όλους τους μήνες του έτους, η συνολική ενεργειακή τους συμπεριφορά αξιολογείται σε ετήσια βάση, χάρη στην ικανότητά τους να προσαρμόζουν τη θερμική τους απόκριση στις εποχικές μεταβολές.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Meng et al. [24], η εφαρμογή θερμοχρωμικών επιχρισμάτων οδήγησε σε μείωση των ψυκτικών και θερμικών φορτίων κατά περίπου 10,9% και 16,4% αντίστοιχα κατά τη θερινή περίοδο. Επιπλέον, σε ετήσια ανάλυση, επιχρίσματα μεταβαλλόμενης ανακλαστικότητας παρουσίασαν μειωμένα ψυκτικά και θερμικά φορτία κατά 2,45%, 16,67% και έως 46,46% σε σύγκριση με επιχρίσματα σταθερής ανακλαστικότητας.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Zhang et al. [94] έδειξαν ότι η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη σε επιχρίσματα με θερμοχρωμικά υλικά ήταν χαμηλότερη κατά περίπου 6,16–10,33 kWh/m² σε σύγκριση με συμβατικά επιχρίσματα. Ωστόσο, σε σύγκριση με ψυχρά έγχρωμα επιχρίσματα, η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη μπορεί να είναι αυξημένη κατά περίπου 1,33–5,5 kWh/m². Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα συμβάλλουν αποτελεσματικά στη μείωση των θερινών ψυκτικών φορτίων αλλά η συνολική ενεργειακή τους απόδοση πρέπει να αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη και τη χειμερινή περίοδο.

Κατά τη χειμερινή περίοδο, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα συμβάλλουν στη μείωση των θερμικών φορτίων μέσω της χαμηλότερης ηλιακής ανακλαστικότητας που παρουσιάζουν. Οι Meng et al. [24] έδειξαν ότι η ενεργειακή απόδοση των θερμοχρωμικών υλικών τον χειμώνα είναι σημαντική, αν και μικρότερη σε σχέση με τη θερινή περίοδο. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τα πειραματικά αποτελέσματα των Zhang et al. [93], σύμφωνα με τα οποία η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση σε επιχρίσματα με θερμοχρωμικά υλικά ήταν υψηλότερη κατά περίπου 1,35–6,05 kWh/m² σε σύγκριση με συμβατικά επιχρίσματα. Ωστόσο, σε σύγκριση με ψυχρά έγχρωμα επιχρίσματα, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ήταν μειωμένη κατά περίπου 2,06–6,76 kWh/m². Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα μπορούν να περιορίσουν τις ανάγκες θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο, καθώς απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Κατά τις μεταβατικές περιόδους της άνοιξης και του φθινοπώρου, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα παρουσιάζουν μικρή ή και μηδενική αρνητική επίδραση στη θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Αριθμητικές προσομοιώσεις των Meng et al. [24] έδειξαν ότι η χρήση θερμοχρωμικών υλικών δεν επηρεάζει αρνητικά την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων κατά τις περιόδους αυτές, γεγονός που τα καθιστά μια τεχνολογία ικανή να προσφέρει ενεργειακά οφέλη σε ετήσια βάση. Από μια συνολική ετήσια σκοπιά, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα επιτυγχάνουν συνεχή εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της δυναμικής ρύθμισης της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίστοιχα, δυναμικά θερμοχρωμικά συστήματα σε στέγες παρουσίασαν μειωμένα θερμικά και ψυκτικά φορτία σε σύγκριση με συμβατικές κατασκευές [28]. Σε κτίρια που βρίσκονται σε μικτές κλιματικές ζώνες, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα οδήγησαν σε εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 5,4% για θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο και 13,3% για ψύξη κατά τη θερινή περίοδο.

Σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα μπορούν να επιτύχουν εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της δυναμικής ρύθμισης της απορρόφησης και της ανάκλασης

της ηλιακής ακτινοβολίας, μειώνοντας τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων. Για παράδειγμα, οι Hu et al. [28] μελέτησαν την ετήσια ζήτηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, καθώς και τις σχετιζόμενες εκπομπές CO₂, σε τυπικούς χώρους γραφείων σε πέντε κλιματικές ζώνες της Κίνας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση από τη χρήση θερμοχρωμικών τοίχων ανήλθε περίπου σε 6% στο Πεκίνο, 1% στο Heilongjiang, 8% στο Nanjing, 30% στο Guangdong και 21% στο Kunming, σε σύγκριση με συμβατικά κτίρια.

Παράλληλα, μελέτες εφαρμογής σε κτίρια στη Σαγκάη και το Παρίσι [108] έδειξαν ότι τα θερμοχρωμικά υλικά παρουσιάζουν καλύτερη προσαρμοστικότητα στις κλιματικές συνθήκες της Σαγκάης, όπου παρατηρήθηκε μείωση των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση και ψύξη κατά περίπου 14,8% και 14,2% αντίστοιχα, για εύρος μεταβολής ανακλαστικότητας 10%–80%. Επιπλέον, η χρήση θερμοχρωμικών επιχρισμάτων οδήγησε σε μείωση της θερμικής δυσφορίας τόσο λόγω υπερθέρμανσης όσο και λόγω υπερβολικής ψύξης, με εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη έως περίπου 15% στη Σαγκάη και έως περίπου 7% στο Παρίσι.

Σε θερμές κλιματικές ζώνες, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα αποδεικνύονται ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη μείωση της ηλιακής θερμικής φόρτισης κατά τη θερινή περίοδο, χάρη στη μεγάλη ανακλαστικότητά τους. Σύμφωνα με προσομοιώσεις των Zheng et al. [93], η απόδοσή των επιχρισμάτων τους διαφέρει ανάλογα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Σε θερμά κλίματα, όπως στο Haïkou, αλλά και σε περιοχές με θερμούς χειμώνες και σχετικά δροσερά καλοκαίρια (Hangzhou, Beijing, Turpan), τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα υπερέχουν τόσο των συμβατικών όσο και των ψυχρών επιχρισμάτων, με μέγιστη βελτίωση στο Haïkou περίπου 48,75%.

Πειραματικές μελέτες των Yu et al. [109] επιβεβαίωσαν ότι η εφαρμογή θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε στέγες οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη. Η μέση ημερήσια κατανάλωση για κλιματισμό ήταν 0,327 kWh/m² σε θερμοχρωμική στέγη έναντι 0,442 kWh/m² σε συμβατική, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση περίπου 26% και μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 0,115 kg/m². Σε περιοχές με κυρίαρχη ανάγκη για ψύξη, η εξοικονόμηση μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη, ενώ η συνολική ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται σημαντικά σε σχέση με συμβατικά κτίρια.

Σε μικτές κλιματικές ζώνες, τα θερμοχρωμικά υλικά προσαρμόζονται στις εποχικές μεταβολές, προσφέροντας ενεργειακά οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι Gavira et al. [110] έδειξαν ότι επιχρίσματα με μεταβαλλόμενη ηλιακή απορροφητικότητα (από 0,65 σε 0,60 λόγω

θερμοκρασίας) οδήγησαν σε μείωση της ετήσιας ζήτησης ενέργειας κατά 3% και της μέγιστης ζήτησης θέρμανσης κατά 8% σε σύγκριση με επιχρίσματα σταθερών οπτικών ιδιοτήτων.

Αντίστοιχα, σε ξηρά και τροπικά κλίματα, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα μειώνουν σημαντικά τόσο τις ανάγκες θέρμανσης όσο και ψύξης των κτιρίων. Αριθμητικές μελέτες των Nematollahi et al. [111] έδειξαν ότι η εφαρμογή θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στις όψεις οδηγεί σε σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τα θερμικά φορτία κυριαρχούν [28].

Οι Kitsopoulou et al. [101] διερεύνησαν πέντε θερμοχρωμικά επιχρίσματα τα οποία εφαρμόστηκαν σε στέγες τυπικών ελληνικών κατοικιών, υπό κλιματικές συνθήκες Αθήνας και Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα επηρεάζουν σημαντικά τη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου κατά την περίοδο ψύξης. Η εφαρμογή επιχρισμάτων με εύρος μετάβασης 24–28 °C, η μέση θερμοκρασία μετάβασης των οποίων προσεγγίζει τη θερμοκρασία ρύθμισης του κτιρίου κατά το καλοκαίρι, οδήγησε σε εξοικονόμηση ενέργειας για ψύξη μεγαλύτερη του 43,6 % στην Αθήνα και 50 % στη Θεσσαλονίκη σε στέγες με χαμηλή θερμομονωτική ικανότητα ($U\text{-value} > 1 \text{ W/m}^2\text{K}$). Η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε στην Αθήνα κατά 2,19–17,13 % και στη Θεσσαλονίκη κατά 0,02–7,72 %, με την επιλογή του κατάλληλου θερμοχρωμικού υλικού να εξαρτάται από την τιμή U της στέγης. Ειδικότερα, θερμοχρωμικά υλικά με μέση θερμοκρασία μετάβασης 34 °C ήταν τα πιο αποδοτικά για χαμηλές τιμές U , ενώ για υψηλότερες τιμές U τα υλικά με θερμοκρασίες 32 °C και 30 °C παρουσίασαν καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, η μεγαλύτερη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας σημειώθηκε με θερμοχρωμικό υλικό μέσης θερμοκρασίας μετάβασης 26 °C.

Παρά τα σημαντικά ενεργειακά οφέλη, τα θερμοχρωμικά υλικά παραμένουν σήμερα σχετικά ακριβά και σπάνια χρησιμοποιούνται σε κτίρια [92]. Ωστόσο, η ευρύτερη υιοθέτηση και η μαζική παραγωγή αναμένεται να μειώσει το κόστος και να αξιοποιήσει πλήρως το δυναμικό τους για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στον κτιριακό τομέα.

3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΟΥ ΔΩΜΑΤΟΣ

Μετά τη θεωρητική διερεύνηση των θερμοχρωμικών υλικών και των μηχανισμών που καθορίζουν τη μεταβολή των οπτικών και θερμικών τους ιδιοτήτων, στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς δώματος κτιρίου στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση της επίδρασης ενός θερμοχρωμικού υλικού στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος και κατ' επέκταση στα θερμικά φορτία του κτιρίου, υπό πραγματικές μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ποσοτική αξιολόγηση, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών και την αλληλεπίδραση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ακτινοβολιακών ανταλλαγών με τον ουράνιο θόλο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη θερμοχρωμική ιδιότητα του υλικού, η οποία εισάγει μεταβλητότητα στην απορροφητικότητα της επιφάνειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, επηρεάζοντας άμεσα το ισοζύγιο ενέργειας του δώματος.

3.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

Το υπολογιστικό μοντέλο βασίζεται σε σύνολο κλιματικών δεδομένων που περιγράφουν τη χρονική μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών και καθορίζουν τη θερμική απόκριση του δώματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τρεις βασικές χρονοσειρές: η εξωτερική θερμοκρασία αέρα, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία ουράνιου θόλου [112].

Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τις κύριες διεγείρουσες παραμέτρους του συστήματος και καθορίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της εξωτερικής επιφάνειας. Η ανάλυση πραγματοποιείται για μία αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα, βασισμένη σε μέσες κλιματικές τιμές της περιοχής μελέτης. Για την αποτύπωση των γρήγορων μεταβολών των κλιματικών μεγεθών, οι διαθέσιμες ωριαίες τιμές μετασχηματίζονται σε δεδομένα υψηλότερης χρονικής ανάλυσης, με βήμα 15 λεπτών, μέσω κατάλληλης παρεμβολής. Η χρονική αυτή διακριτοποίηση επιτρέπει

την ακριβέστερη αναπαράσταση των αιχμών ηλιακής φόρτισης και των ταχέων θερμοκρασιακών μεταβολών που επηρεάζουν σημαντικά τη θερμική απόκριση του δώματος.

3.1.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Για κάθε αντιπροσωπευτική ημέρα του έτους χρησιμοποιούνται μέσες ωριαίες τιμές της εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα T_{amb} , οι οποίες καλύπτουν ένα πλήρες 24ωρο και προέρχονται από τυπικά κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης (Θεσσαλονίκη).

Προκειμένου να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η δυναμική θερμική απόκριση του δώματος, οι ωριαίες τιμές δεν χρησιμοποιούνται απευθείας στο υπολογιστικό μοντέλο. Αντί αυτού, εφαρμόζεται διαδικασία χρονικής παρεμβολής, μέσω της οποίας παράγεται αυξημένη χρονική ανάλυση με βήμα 15 λεπτών.

Η χρονική αυτή διακριτοποίηση επιτρέπει την καλύτερη προσομοίωση των ταχέων μεταβολών των περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδιαίτερα κατά τις ώρες έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, όπου η θερμική απόκριση της επιφάνειας παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία. Συνεπώς, κάθε αντιπροσωπευτική ημέρα περιγράφεται από 24 αρχικές ωριαίες τιμές θερμοκρασίας και στην συνέχεια μετατρέπονται σε 96 διακριτά χρονικά βήματα προσομοίωσης.

Η επιλογή χρονικού βήματος 15 λεπτών αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ αριθμητικής ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους, διασφαλίζοντας ικανοποιητική ανάλυση των θερμικών μεταβολών χωρίς υπερβολική επιβάρυνση του μοντέλου.

Στον Πίνακα 3-1 παρατίθενται οι ωριαίες μέσες τιμές των κλιματικών παραμέτρων για μία αντιπροσωπευτική ημέρα ανά μήνα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ετήσιας θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

ΩΡΑ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1:00	5,11	4,87	7,89	11,00	16,29	20,72	23,13	22,97	19,09	14,08	9,81	6,60
2:00	4,92	4,36	7,49	10,41	15,74	20,09	22,39	22,30	18,67	13,66	9,51	6,47
3:00	4,78	3,97	7,09	10,13	15,17	19,50	21,81	21,83	18,30	13,31	9,25	6,41
4:00	4,66	3,66	6,69	9,75	14,56	18,92	21,29	21,48	17,99	13,06	9,03	6,36
5:00	4,24	3,37	6,28	9,19	13,96	18,35	20,73	21,13	17,70	12,82	8,81	6,31
6:00	4,00	3,24	6,09	9,33	13,90	18,89	20,70	21,41	17,76	12,63	8,74	6,19
7:00	3,91	3,25	6,03	9,93	14,63	20,15	21,57	22,07	18,07	12,58	8,78	6,02
8:00	3,88	3,28	5,98	10,53	15,99	21,42	23,10	22,73	18,46	12,63	8,82	5,87
9:00	4,22	4,20	6,90	11,52	17,20	22,49	24,34	23,72	19,46	13,58	9,54	6,15
10:00	4,99	5,69	8,40	12,76	18,14	23,43	25,41	24,92	20,81	15,31	10,66	6,70
11:00	6,16	7,17	9,89	13,99	19,26	24,38	26,58	26,11	22,24	16,81	11,79	7,42
12:00	7,14	8,26	10,93	14,94	20,23	25,33	27,68	27,26	23,36	17,81	12,60	8,01
13:00	7,86	9,12	11,71	15,72	21,10	26,27	28,77	28,39	24,30	18,65	13,22	8,49
14:00	8,51	9,97	12,50	16,66	22,07	27,22	29,79	29,53	25,20	19,42	13,85	9,03
15:00	8,87	10,37	12,98	17,07	22,60	27,65	30,39	30,02	25,55	19,81	14,05	9,27
16:00	9,04	10,49	13,27	17,15	22,78	27,78	30,75	30,12	25,56	19,89	14,01	9,32
17:00	9,12	10,79	13,56	17,36	22,88	27,84	31,02	30,21	25,56	20,03	13,96	9,33
18:00	8,55	10,26	13,08	16,91	22,36	27,20	30,46	29,54	24,94	19,41	13,42	8,95
19:00	7,67	9,17	12,16	16,03	21,39	26,14	29,35	28,42	23,86	18,33	12,57	8,34
20:00	6,84	8,08	11,25	15,18	20,30	25,09	28,03	27,30	22,55	17,34	11,73	7,78

21:00	6,34	7,25	10,45	14,27	19,28	24,12	26,83	26,29	21,55	16,43	11,13	7,37
22:00	5,97	6,58	9,74	13,34	18,33	23,21	25,82	25,31	20,77	15,70	10,67	7,05
23:00	5,58	5,91	9,04	12,38	17,46	22,30	24,89	24,31	19,97	15,05	10,21	6,79
0:00	5,28	5,37	8,53	11,65	16,86	21,56	24,02	23,54	19,34	14,50	9,88	6,62

Πίνακας 3.1.1: Ωριαίες τιμές μέσης θερμοκρασίας για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]

3.1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Παράλληλα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μία από τις βασικές διεγείρουσες παραμέτρους του θερμικού συστήματος είναι η ηλιακή ακτινοβολία Q_{sol} (W/m^2), η οποία αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή θερμικών κερδών για την εξωτερική επιφάνεια του κτιριακού κελύφους. Η συνεισφορά της είναι καθοριστική στη διαμόρφωση της θερμοκρασιακής απόκρισης της επιφάνειας, ιδιαίτερα κατά τις ώρες υψηλής ηλιακής έντασης.

Για τη διασφάλιση της συμβατότητας με το υπόλοιπο υπολογιστικό μοντέλο, οι διαθέσιμες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας μετασχηματίζονται σε υψηλότερη χρονική ανάλυση, με χρονικό βήμα 15 λεπτών, αντίστοιχα με τη διαδικασία που εφαρμόζεται και για την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η εναρμόνιση της χρονικής διακριτοποίησης μεταξύ των επιμέρους κλιματικών μεγεθών εξασφαλίζει τη συνεκτική επίλυση του θερμικού ισοζυγίου του δώματος, αποφεύγοντας αριθμητικές ασυνέχειες και ενισχύοντας την ακρίβεια της δυναμικής προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη χρονική βάση δεδομένων, απαραίτητη για την αξιόπιστη σύζευξη των θερμικών και ακτινοβολιακών φαινομένων.

Στον Πίνακα 3-2 παρατίθενται οι ωριαίες μέσες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για μία αντιπροσωπευτική ημέρα ανά μήνα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των ηλιακών θερμικών κερδών της εξωτερικής επιφάνειας.

ΩΡΑ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00	0,00	0,00	0,00	4,26	21,42	33,00	22,88	7,68	0,20	0,00	0,00	0,00
7:00	0,00	0,00	9,52	48,57	109,43	141,08	114,01	65,87	29,70	8,85	0,00	0,00
8:00	4,08	19,93	75,47	164,53	258,17	306,11	272,36	209,89	138,49	70,78	19,67	5,03
9:00	48,66	116,00	217,30	317,94	424,26	495,22	454,49	395,46	301,22	195,60	94,99	49,45
10:00	139,96	252,01	370,73	460,77	570,53	666,43	617,28	572,44	460,77	323,16	195,92	129,67
11:00	223,94	369,94	491,44	568,46	676,78	793,58	742,64	711,87	585,06	420,90	280,70	201,03
12:00	220,58	445,66	569,05	637,80	735,78	858,17	835,49	800,28	659,04	481,80	334,03	253,77
13:00	315,51	465,36	588,11	653,26	740,60	858,87	870,73	826,39	672,78	490,34	339,99	270,62
14:00	295,28	430,84	549,64	615,52	698,06	804,47	845,95	788,90	627,97	447,53	299,29	247,50
15:00	233,57	361,02	468,35	536,11	629,41	722,85	769,80	695,72	535,73	364,99	226,22	189,47
16:00	140,54	253,00	343,92	413,81	513,23	591,09	638,87	550,59	396,36	240,84	124,49	103,87
17:00	48,95	126,36	197,13	266,38	359,89	424,86	464,14	370,01	230,42	105,94	32,91	23,90
18:00	3,37	27,45	70,90	124,70	195,31	254,77	269,99	187,48	85,08	16,55	0,67	0,00
19:00	0,00	0,00	6,65	26,36	63,94	102,76	105,34	53,53	9,08	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	0,21	5,91	15,68	15,20	3,66	0,00	0,00	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

23:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Πίνακας 3.1.2: Ωριαίες τιμές μέσης ηλιακής ακτινοβολίας για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]

3.1.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΘΟΛΟΥ

Πέραν των συμβατικών κλιματικών μεγεθών, στο υπολογιστικό μοντέλο εισάγεται και η θερμοκρασία ουράνιου θόλου T_{sky} , η οποία χρησιμοποιείται για την περιγραφή των ακτινοβολιακών ανταλλαγών μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος και του ουράνιου περιβάλλοντος, όπως έχει αναδειχθεί σε σχετικές μελέτες θερμικής ανάλυσης κτιριακών επιφανειών [113].

Σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία ουρανού δεν σχετίζεται με τα άμεσα ηλιακά κέρδη, αλλά με τις υπέρυθρες ακτινοβολιακές ροές που αναπτύσσονται μεταξύ της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας. Οι ακτινοβολιακές αυτές απώλειες καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικές κατά τις νυχτερινές ώρες ή υπό συνθήκες χαμηλής νεφοκάλυψης, όπου η θερμοκρασία του ουράνιου θόλου είναι αισθητά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία της επιφάνειας.

Στο πλαίσιο του ενεργειακού ισοζυγίου, η θερμοκρασία ουρανού λειτουργεί ως ακτινοβολιακός συνοριακός όρος, καθορίζοντας την καθαρή ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ δώματος και περιβάλλοντος [113]. Η επίδρασή της ενσωματώνεται μέσω κατάλληλων σχέσεων ακτινοβολίας και επηρεάζει άμεσα τη συνολική θερμική ισορροπία της επιφάνειας.

Η συμπερίληψη της θερμοκρασίας ουρανού στο μοντέλο κρίνεται απαραίτητη για την αξιόπιστη εκτίμηση των θερμικών απωλειών μέσω ακτινοβολίας, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι συγκρίσιμες ή και σημαντικότερες από τις συναγωγικές ανταλλαγές με τον περιβάλλοντα αέρα.

Στον Πίνακα Γ παρουσιάζονται οι αντίστοιχες οι ωριαίες μέσες τιμές της θερμοκρασίας ουράνιου θόλου, οι οποίες αξιοποιούνται για την εκτίμηση των ακτινοβολιακών ανταλλαγών μεταξύ του δώματος και του περιβάλλοντος.

ΩΡΑ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ
1:00	-7,39	-8,64	-6,22	-1,99	4,05	7,78	10,57	11,66	7,03	2,50	-2,52	-5,72
2:00	-7,49	-9,30	-6,89	-2,53	3,31	6,94	9,62	10,96	6,61	2,08	-2,78	-5,86
3:00	-7,64	-9,67	-7,38	-2,75	2,76	6,37	9,06	10,45	6,26	1,71	-3,01	-5,81
4:00	-7,86	-9,95	-7,70	-3,10	2,32	6,11	8,73	10,03	5,87	1,38	-3,11	-5,65
5:00	-8,29	-10,29	-8,09	-3,65	1,75	5,60	8,29	9,42	5,48	1,03	-3,26	-5,56
6:00	-8,54	-10,29	-8,20	-3,26	1,77	6,22	8,28	9,65	5,65	0,99	-3,09	-5,47
7:00	-8,44	-10,09	-8,26	-2,46	2,54	7,59	9,17	10,30	6,32	1,30	-2,71	-5,40
8:00	-8,37	-9,94	-8,25	-1,78	3,84	8,88	10,75	10,85	7,06	1,70	-2,30	-5,38
9:00	-8,94	-8,89	-7,21	-0,78	5,06	9,95	12,02	11,84	8,12	2,79	-1,44	-5,11
10:00	-6,97	-7,35	-5,59	0,48	6,14	10,96	13,16	13,13	9,53	4,60	-0,43	-4,61
11:00	-5,60	-5,91	-4,09	1,60	7,25	11,82	14,36	14,30	10,84	6,09	0,59	-3,88

12:00	-4,75	-4,93	-3,05	2,58	8,48	12,76	15,44	15,59	11,96	6,98	1,08	-3,42
13:00	-4,31	-4,22	-2,23	3,42	9,62	13,81	16,57	16,95	12,96	7,74	1,40	-3,11
14:00	-3,38	-3,38	-1,44	4,31	10,69	14,60	17,51	18,11	13,77	8,29	1,71	-2,85
15:00	-3,63	-2,91	-1,00	4,78	11,11	14,98	18,00	18,56	14,09	8,58	1,76	-2,69
16:00	-3,35	-2,76	-0,84	4,86	11,02	15,15	18,10	18,60	13,89	8,57	1,65	-2,58
17:00	-3,19	-2,52	-0,75	4,78	10,80	15,13	18,11	18,48	13,61	8,53	1,52	-2,57
18:00	-3,59	-3,05	-1,23	4,37	10,26	14,63	17,68	17,86	13,07	7,87	0,86	-2,91
19:00	-4,35	-4,10	-2,05	3,55	9,40	13,71	16,66	16,89	12,11	6,82	-0,17	-3,42
20:00	-5,10	-5,13	-2,82	2,62	8,32	12,67	15,39	15,68	10,82	5,82	-1,17	-3,97
21:00	-5,66	-5,97	-3,59	1,62	7,42	11,74	14,35	14,80	9,84	4,93	-1,69	-4,51
22:00	-6,11	-6,68	-4,34	0,50	6,45	10,62	13,33	13,98	8,97	4,20	-1,99	-5,04
23:00	-6,68	-7,42	-5,14	-0,67	5,53	9,49	12,36	12,99	7,96	3,42	-2,29	-5,58
0:00	-7,00	-7,97	-5,63	-1,41	4,89	8,73	11,51	12,21	7,32	2,81	-2,51	-5,87

Πίνακας 3.1.3: Ωριαίες τιμές μέσης θερμοκρασίας ουράνιου θόλου για μια τυπική ημέρα ανά μήνα [112]

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Για τη συνεκτίμηση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμική επιβάρυνση της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος, εισάγεται η έννοια της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας T_{eq} . Η έννοια αυτή επιτρέπει την αναγωγή των ηλιακών θερμικών κερδών σε ισοδύναμη αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, διευκολύνοντας τη διατύπωση του θερμικού ισοζυγίου.

$$T_{eq} = T_{amb} + a \cdot Q_{sol} \quad (3)$$

όπου:

T_{amb} : θερμοκρασία εξωτερικού αέρα

Q_{sol} : προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

a : συντελεστής απορροφητικότητας της επιφάνειας

Η παραπάνω σχέση εκφράζει τη συνολική θερμική επιβάρυνση που δέχεται το δώμα, συνδυάζοντας την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με τα ηλιακά θερμικά κέρδη. Η χρήση της ισοδύναμης θερμοκρασίας αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση σε απλοποιημένα μοντέλα θερμικής ανάλυσης, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα ενιαίο θερμοκρασιακό μέγεθος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συντελεστής απορροφητικότητας a , η οποία στην περίπτωση των θερμοχρωμικών υλικών δεν αποτελεί σταθερή ιδιότητα, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η μεταβλητότητα αυτή επηρεάζει άμεσα το μέγεθος των ηλιακών κερδών και, κατ' επέκταση, τη θερμική απόκριση της επιφάνειας, καθιστώντας το σύστημα μη γραμμικό.

3.3 ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΣ ΟΡΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΟΥΡΑΝΟΥ

Μετά τον υπολογισμό της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας, εισάγεται διορθωτικός όρος που λαμβάνει υπόψη τις ακτινοβολιακές ανταλλαγές μεταξύ της επιφάνειας του δώματος και του ουράνιου θόλου. Η ακτινοβολιακή ροή μεταξύ επιφάνειας και ουρανού περιγράφεται μέσω του νόμου Stefan–Boltzmann [114], σύμφωνα με τον οποίο η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας.

$$\Delta T_{cor} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{sky} + 273,15)^4 - (T_{eq} + 273,15)^4]}{h} \quad (4)$$

όπου:

T_{sky} : θερμοκρασία ουράνιου θόλου

T_{eq} : ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία

ε : συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας

σ : σταθερά Stefan–Boltzmann

h : συντελεστής συναγωγής

Οι θερμοκρασίες εκφράζονται σε βαθμούς Κελσίου και μετατρέπονται σε απόλυτη κλίμακα (Kelvin) με την προσθήκη του όρου 273,15, όπως απαιτείται από την εφαρμογή του νόμου Stefan–Boltzmann. Ο παραπάνω όρος εκφράζει τη μετατροπή της καθαρής ακτινοβολιακής ροής σε ισοδύναμη θερμοκρασιακή διόρθωση, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή της στο συνολικό θερμικό ισοζύγιο της επιφάνειας.

Η τελική διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία προκύπτει ως:

$$T_{eq,cor} = T_{eq} + \Delta T_{cor} \quad (5)$$

Η εισαγωγή του διορθωτικού αυτού όρου είναι κρίσιμη για την ακριβή αποτύπωση της θερμικής συμπεριφοράς του δώματος, καθώς λαμβάνει υπόψη τις υπέρυθρες ακτινοβολιακές ανταλλαγές με τον ουρανό, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη θερμική ισορροπία της επιφάνειας, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες.

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στο υπολογιστικό μοντέλο ενσωματώνεται ο μηχανισμός μεταβολής της απορροφητικότητας της εξωτερικής επιφάνειας, με στόχο την προσομοίωση της θερμοχρωμικής συμπεριφοράς του υλικού. Η απορροφητικότητα θεωρείται συνάρτηση της θερμοκρασίας και μεταβάλλεται γύρω από μία κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης. Συγκεκριμένα, για θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας μετάβασης, το υλικό βρίσκεται στην έγχρωμη φάση και παρουσιάζει υψηλότερη απορροφητικότητα, ενώ για θερμοκρασίες υψηλότερες της τιμής αυτής μεταβαίνει στην άχρωμη φάση, με μειωμένη συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η παραπάνω συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί με απλοποιημένο τρόπο μέσω μιας δυαδικής συνάρτησης:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{high}, & T < T_{tr} \\ \alpha_{low}, & T \geq T_{tr} \end{cases} \quad (6)$$

όπου:

α_{high} : απορροφητικότητα στην έγχρωμη φάση

α_{low} : απορροφητικότητα στην άχρωμη φάση

T_{tr} : θερμοκρασία μετάβασης

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την προσομοίωση της δυναμικής προσαρμογής του υλικού στις θερμικές συνθήκες, επηρεάζοντας άμεσα τα ηλιακά θερμικά κέρδη και, κατ' επέκταση, τη θερμική απόκριση του δώματος.

3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Για λόγους απλοποίησης, η ανάλυση πραγματοποιείται ανά μονάδα επιφάνειας ($A=1 \text{ m}^2$), με αποτέλεσμα το θερμικό φορτίο να εκφράζεται ως θερμική ροή. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανεξάρτητα από τη συνολική επιφάνεια του δώματος. Η θερμική ροή μέσω του δώματος υπολογίζεται με βάση τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού χώρου και της εξωτερικής επιφάνειας, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της διορθωμένης ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας:

$$q = U \cdot \Delta T \quad (7)$$

όπου:

q : θερμική ροή (W/m^2)

U : συντελεστής θερμοπερατότητας του δώματος

$$\Delta T = T_{int} - T_{eq,cor}$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει το καθαρό θερμικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας που μεταφέρεται μέσω του δώματος.

Το πρόσημο της θερμικής ροής υποδηλώνει τη φορά της μεταφοράς θερμότητας:

θετικές τιμές αντιστοιχούν σε θερμικά κέρδη του εσωτερικού χώρου

αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε θερμικές απώλειες

3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ

Η ενεργειακή απαίτηση για κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται με βάση τη θερμική ροή και τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος:

$$E = q \cdot \Delta t \quad (8)$$

όπου:

$$\Delta t = h/4 \text{ (χρονικό βήμα 15 λεπτών)}$$

Το μέγεθος E εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (Wh/m^2) για κάθε χρονικό βήμα.

Η επιλογή χρονικού βήματος 15 λεπτών επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της χρονικής μεταβολής των θερμικών φορτίων, ιδιαίτερα κατά τις περιόδους έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και κατά τη φάση μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού.

Η συνολική ημερήσια ενεργειακή απαίτηση προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τιμών.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος και τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας ή υλικών επιστρώσεων.

3.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι του υπολογιστικού μοντέλου καθώς και τα σενάρια προσομοίωσης που εξετάζονται, με στόχο την αξιολόγηση της

επίδρασης των θερμοχρωμικών υλικών στη θερμική συμπεριφορά του δώματος. Η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στη διερεύνηση δύο κρίσιμων χαρακτηριστικών των θερμοχρωμικών επιστρώσεων: της θερμοκρασίας μετάβασης και της μεταβολής της απορροφητικότητας, τα οποία καθορίζουν τη δυναμική απόκριση του υλικού στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

3.7.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ

Για τις ανάγκες της μελέτης εξετάζονται δύο διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας μετάβασης:

$$T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$$

$$T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$$

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να αντιπροσωπεύουν ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς βρίσκονται εντός του εύρους θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην εξωτερική επιφάνεια των δωματίων, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η διερεύνηση της επίδρασης του σημείου ενεργοποίησης της θερμοχρωμικής μετάβασης στη συνολική θερμική συμπεριφορά του συστήματος.

3.7.2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της θερμοχρωμικής λειτουργίας, εξετάζονται διαφορετικά σενάρια μεταβολής της απορροφητικότητας μεταξύ της έγχρωμης και της άχρωμης φάσης του υλικού.

Οι τιμές της απορροφητικότητας που χρησιμοποιούνται προέκυψαν βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων και συγκεκριμένα από την ανάλυση της Εικόνας 2.3, στην οποία παρουσιάζεται η ηλιακή ανακλαστικότητα θερμοχρωμικών επιχρισμάτων. Δεδομένου ότι η απορροφητικότητα (α) και η ανακλαστικότητα (SR) συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$\alpha=1-SR \quad (9)$$

οι αντίστοιχες τιμές απορροφητικότητας υπολογίστηκαν έμμεσα από τις τιμές ανακλαστικότητας του διαγράμματος, εξασφαλίζοντας ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των υλικών.

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

$\alpha:0.6 \rightarrow 0.5$

$\alpha:0.6 \rightarrow 0.4$

$\alpha:0.4 \rightarrow 0.3$

$\alpha:0.4 \rightarrow 0.2$

Οι διαφορετικές αυτές μεταβολές επιτρέπουν τη διερεύνηση της επίδρασης του εύρους αλλαγής της απορροφητικότητας στα θερμικά φορτία του δώματος.

Για λόγους σύγκρισης, εξετάζονται επιπλέον περιπτώσεις στις οποίες η απορροφητικότητα παραμένει σταθερή, προσομοιώνοντας συμβατικά υλικά χωρίς θερμοχρωμική συμπεριφορά:

$\alpha=0.6$

$\alpha=0.4$

Οι περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται ως βάση αναφοράς, επιτρέποντας την ποσοτική αξιολόγηση της επίδρασης της θερμοχρωμικής μεταβολής στη θερμική απόδοση του δώματος.

Η συνδυαστική μελέτη των παραπάνω σεναρίων επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας μετάβασης, την αξιολόγηση της σημασίας του εύρους μεταβολής της απορροφητικότητας αλλά και τη σύγκριση μεταξύ θερμοχρωμικών και συμβατικών υλικών

Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των συνθηκών υπό τις οποίες τα θερμοχρωμικά υλικά μπορούν να συμβάλουν αποτελεσματικά στη μείωση των θερμικών φορτίων και της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου.

3.7.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους του υπολογιστικού θερμικού μοντέλου, καθώς καθορίζει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και επηρεάζει άμεσα τη μεταφορά θερμότητας μέσω του δομικού κελύφους. Στην παρούσα εργασία, δεν υιοθετείται σταθερή θερμοκρασία σχεδιασμού, αλλά εφαρμόζεται το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης (Adaptive Thermal Comfort Model), σύμφωνα με το πρότυπο EN 16798-1 [115].

Το προσαρμοστικό μοντέλο βασίζεται στην παραδοχή ότι οι χρήστες ενός φυσικά αεριζόμενου κτιρίου προσαρμόζουν τη θερμική τους άνεση ανάλογα με τις επικρατούσες εξωτερικές

κλιματικές συνθήκες. Ως αποτέλεσμα, η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται συναρτήσει της μέσης εξωτερικής θερμοκρασίας.

Η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου T_{in} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{in} = 18.8 + 0.33 \cdot T_{rm} \quad (10)$$

όπου:

T_{in} : επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία (°C)

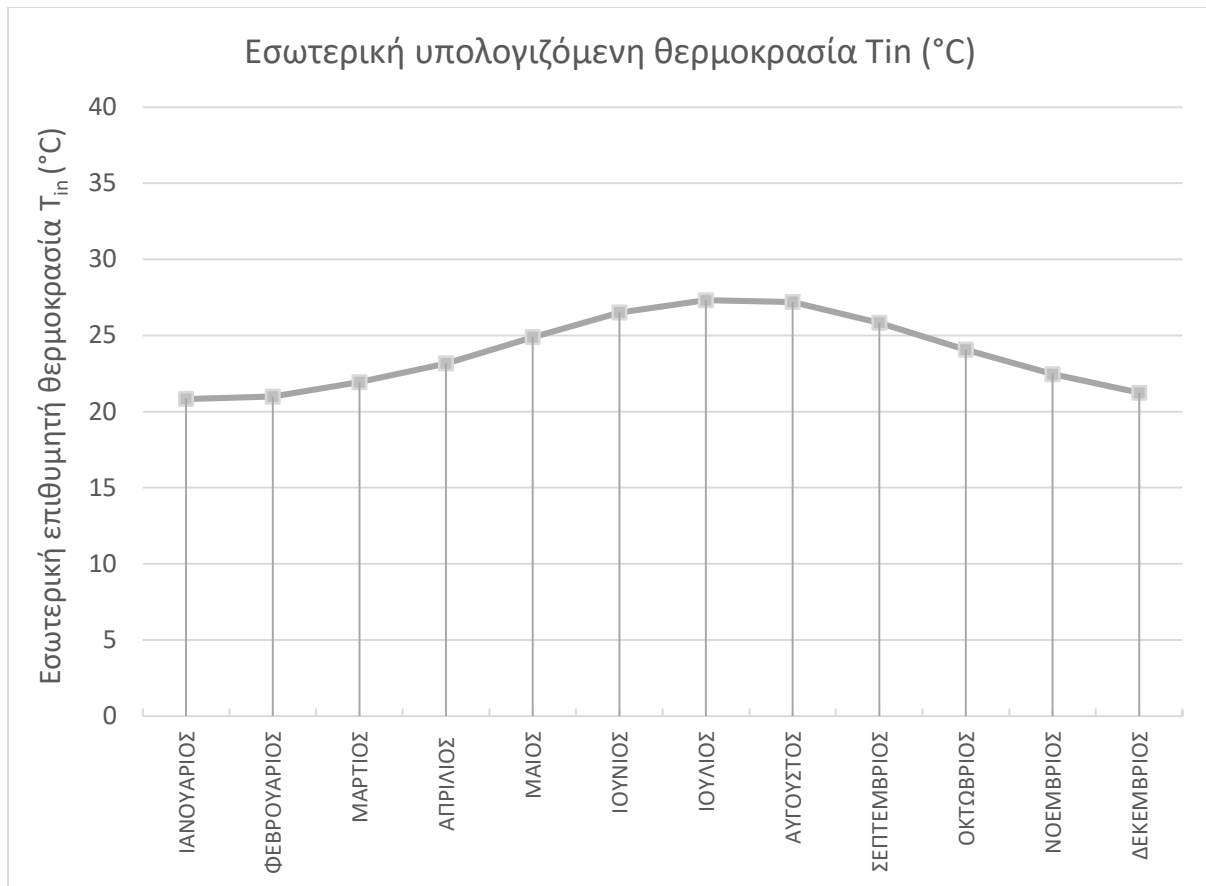
T_{rm} : εκτιμώμενη μέση εξωτερική θερμοκρασία (running mean outdoor temperature) (°C)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η παράμετρος T_{rm} , όπως ορίζεται στο πρότυπο EN 16798-1[115], δεν υπολογίζεται μέσω πλήρους εκθετικά σταθμισμένης χρονοσειράς ημερήσιων θερμοκρασιών, αλλά προσεγγιστικά με βάση αντιπροσωπευτικές μηνιαίες κλιματικές τιμές.

Συγκεκριμένα, για κάθε μήνα υπολογίζεται η μέση εξωτερική θερμοκρασία από τυπική αντιπροσωπευτική ημέρα (typical meteorological conditions), όπως προκύπτει από το αρχείο κλιματικών δεδομένων [112] της περιοχής μελέτης. Η τιμή αυτή λαμβάνεται ως χαρακτηριστική θερμοκρασία του εκάστοτε μήνα και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντίστοιχης εσωτερικής θερμοκρασίας άνεσης.

Η προσέγγιση αυτή αποτελεί απλοποιημένη μορφή του προτύπου, ωστόσο θεωρείται επαρκής για τον σκοπό της παρούσας ενεργειακής ανάλυσης, καθώς αποτυπώνει τη μηνιαία μεταβολή των θερμικών συνθηκών χωρίς την ανάγκη χρήσης πλήρους ωριαίας χρονοσειράς.

Οι υπολογιζόμενες τιμές της επιθυμητής θερμοκρασίας εσωτερικού περιβάλλοντος ανά μήνα παρουσιάζονται διαγραμματικά στο διάγραμμα 3.1, όπου αποτυπώνεται η εποχική μεταβολή της θερμοκρασίας άνεσης σε συνάρτηση με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 3.7.1 Υπολογιζόμενη εσωτερική θερμοκρασία T_{in} για κάθε μήνα.

3.7.4 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου υιοθετήθηκαν ορισμένες παραδοχές και απλοποιήσεις, με στόχο τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι βασικές παραδοχές της μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

- Τα κλιματικά δεδομένα προέρχονται από αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων μορφής EPW (EnergyPlus Weather File) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης και θεωρούνται αντιπροσωπευτικά των μέσων κλιματικών συνθηκών της περιοχής [112].
- Για κάθε μήνα χρησιμοποιείται μία αντιπροσωπευτική ημέρα, η οποία προκύπτει από τα διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα. Ως εκ τούτου, δεν εξετάζονται ακραία καιρικά φαινόμενα ή βραχυχρόνιες μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών.
- Οι ωριαίες τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων παρεμβάλλονται γραμμικά, ώστε να προκύψει χρονικό βήμα υπολογισμού διάρκειας 15 λεπτών.

- Η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου υπολογίζεται σύμφωνα με το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης του EN 16798-1 [115], με χρήση αντιπροσωπευτικών μηνιαίων μέσων εξωτερικών θερμοκρασιών αντί του πλήρους υπολογισμού της παραμέτρου T_{int} . Η προσέγγιση αυτή αποτελεί απλοποίηση της διαδικασίας που προβλέπεται από το πρότυπο και υιοθετείται για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης.
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των συμβατικών δομικών υλικών (πυκνότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία.
- Το εξεταζόμενο δομικό στοιχείο θεωρείται οριζόντιο δώμα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα.
- Η μεταφορά θερμότητας μέσω του δώματος θεωρείται μονοδιάστατη και πραγματοποιείται αποκλειστικά κατά τη διεύθυνση του πάχους του δομικού στοιχείου, παραλείποντας πλευρικές θερμικές ροές και την επίδραση θερμογεφυρών.
- Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δώματος λαμβάνεται ίσος με $U=0,40 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, σύμφωνα με τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της TOTEE 20701-1 [116] για εξωτερικές οριζόντιες επιφάνειες σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα στην Κλιματική Ζώνη Γ, στην οποία υπάγεται η Θεσσαλονίκη.
- Η συναγωγή και η ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, θεωρώντας ομοιόμορφες συνθήκες σε ολόκληρη την επιφάνεια του δώματος.
- Ο συντελεστής συναγωγής στην εξωτερική επιφάνεια θεωρείται σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και δεν εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου ή τις στιγμιαίες ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- Ο συντελεστής εκπομπής της εξωτερικής επιφάνειας θεωρείται σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Δεν λαμβάνονται υπόψη εσωτερικά θερμικά κέρδη από χρήστες, φωτισμό ή ηλεκτρικό εξοπλισμό, καθώς η εργασία επικεντρώνεται αποκλειστικά στην αξιολόγηση της επίδρασης του θερμοχρωμικού επιστρώματος στη θερμική συμπεριφορά του δώματος.
- Θεωρείται ότι οι ιδιότητες του θερμοχρωμικού υλικού δεν υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου και παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, με εξαίρεση τη μεταβολή της ηλιακής απορροφητικότητας, η οποία περιγράφεται από το μοντέλο που παρουσιάζεται στην αντίστοιχη ενότητα.

- Οι μήνες Μάιος και Σεπτέμβριος παρουσιάζονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας και θερμικής απόκρισης, ώστε να αναδειχθεί η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας του δώματος κατά τις μεταβατικές περιόδους του έτους ωστόσο, δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς της θερμικής ροής και του ενεργειακού φορτίου, καθώς θεωρούνται μεταβατικοί μήνες κατά τους οποίους, υπό τις κλιματικές συνθήκες της Θεσσαλονίκης, η λειτουργία συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης είναι περιορισμένη ή μηδενική. Η εξαίρεσή τους από την ενεργειακή αξιολόγηση επιτρέπει την αντικειμενικότερη αποτίμηση της επίδρασης του θερμοχρωμικού υλικού στις περιόδους όπου οι απαιτήσεις για ψύξη ή θέρμανση είναι ουσιαστικές.
- Κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος–Αύγουστος), όταν από τους υπολογισμούς προκύπτει θετική θερμική ροή, δηλαδή θεωρητική απαίτηση για θέρμανση, η τιμή αυτή λαμβάνεται ίση με μηδέν και δεν συνυπολογίζεται στο ενεργειακό φορτίο. Η παραδοχή αυτή υιοθετείται, καθώς η εμφάνιση απαίτησης θέρμανσης κατά τους θερινούς μήνες οφείλεται κυρίως στην επιλογή της εσωτερικής θερμοκρασίας αναφοράς, η οποία υπολογίζεται βάσει του προσαρμοστικού μοντέλου θερμικής άνεσης και ενδέχεται, υπό ορισμένες συνθήκες, να είναι υψηλότερη από την εξωτερική θερμοκρασία. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι επικρατούν αποδεκτές συνθήκες θερμικής άνεσης και, συνεπώς, οι συγκεκριμένες θερμικές ροές δεν συνεισφέρουν στο ενεργειακό φορτίο της θερινής περιόδου.

4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με βάση τα επεξεργασμένα κλιματικά δεδομένα και τις παραδοχές της μελέτης, υπολογίστηκε η διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος $T_{eq,corr}$, λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τις ακτινοβολιακές ανταλλαγές με τον ουράνιο θόλο. Η θερμοχρωμική συμπεριφορά του υλικού περιγράφηκε μέσω της μεταβολής της ανακλαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας μετάβασης, επιτρέποντας την αξιολόγηση διαφορετικών θερμοκρασιών μετάβασης και σεναρίων ανακλαστικότητας.

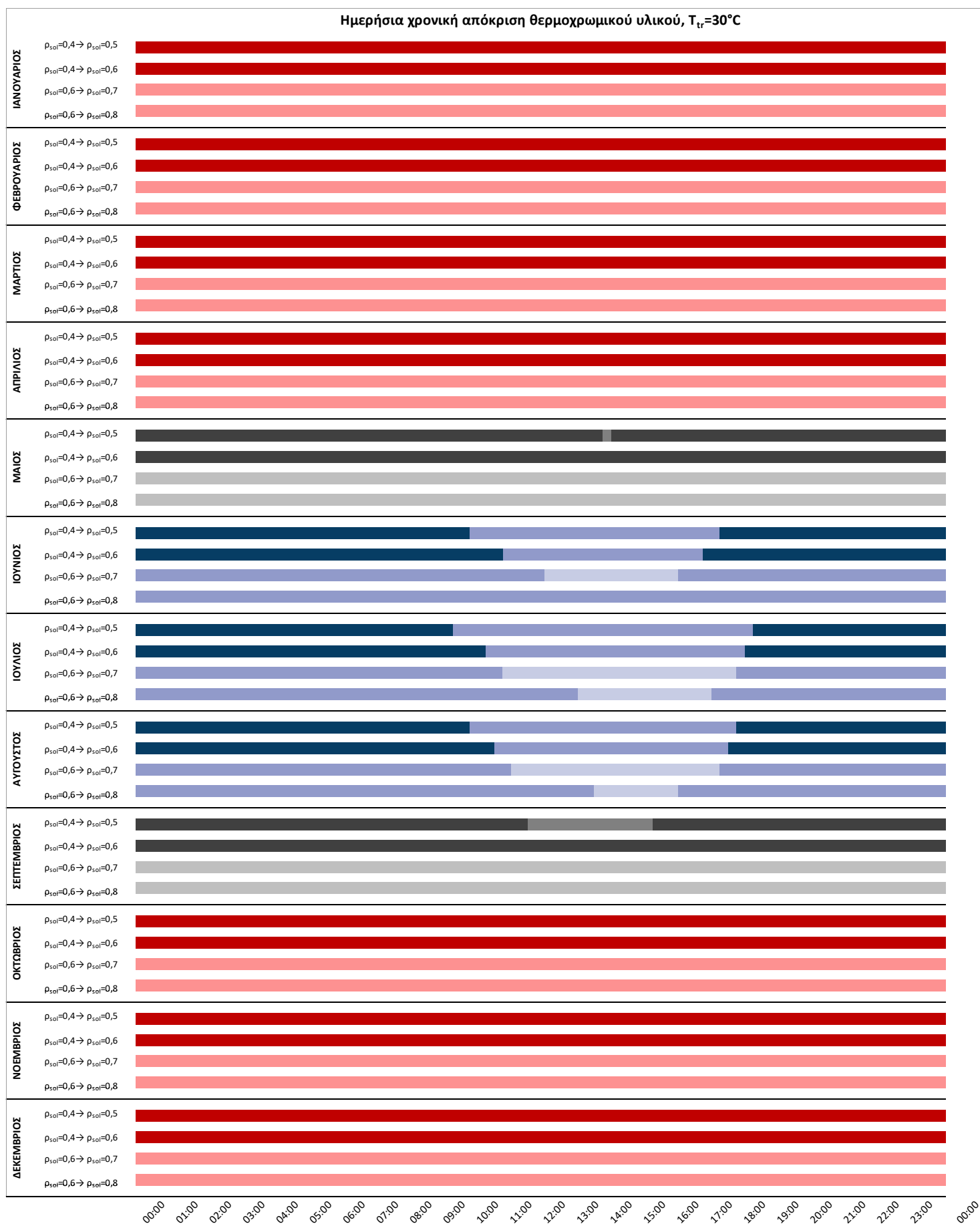
Με βάση την υπολογιζόμενη ισοδύναμη θερμοκρασία υπολογίστηκαν η θερμική ροή και το αντίστοιχο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας δώματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων και συγκρίνονται για τις διαφορετικές θερμοκρασίες μετάβασης και τα εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων στη θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά του δώματος.

4.1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΧΡΩΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Αρχικά εξετάζεται η χρονική απόκριση του θερμοχρωμικού υλικού για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης. Η απόκριση παρουσιάζεται με τη μορφή heatmap, στο οποίο αποτυπώνεται η χρονική διάρκεια ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού μηχανισμού για κάθε τυπική ημέρα του έτους. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των χρονικών περιόδων κατά τις οποίες το υλικό ενεργοποιείται και μεταβαίνει σε κατάσταση υψηλότερης ανακλαστικότητας, ανάλογα με την επιλεγμένη θερμοκρασία μετάβασης και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια παρατίθενται, στα Σχήματα 4.1.1 και 4.1.2, τα heatmaps για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης, 25 °C και 30 °C, αντίστοιχα, με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού.

Ημερήσια χρονική απόκριση θερμοχρωμικού υλικού, $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$ Σχήμα 4.1.1 Heatmap της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού για θερμοκρασία μετάβασης 25°C .



Σχήμα 4.1.2 Heatmap της χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού για θερμοκρασία μετάβασης 30°C .

Παρατηρώντας τα διαγράμματα χρονικής απόκρισης του θερμοχρωμικού υλικού διαπιστώνεται ότι η ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού παρουσιάζει έντονη εποχική εξάρτηση και πραγματοποιείται αποκλειστικά από τον Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο. Αντίθετα, κατά τους χειμερινούς μήνες (Οκτώβριος–Απρίλιος) το υλικό παραμένει στην έγχρωμη κατάσταση, καθώς η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος δεν υπερβαίνει το κρίσιμο θερμοκρασιακό όριο. Επιπλέον, η ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού λαμβάνει χώρα κατά το χρονικό διάστημα της ημέρας λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ παύει όταν οι συνθήκες αυτές εκλείψουν και η θερμοκρασία της επιφάνειας υποχωρήσει κάτω από τη θερμοκρασία ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού μηχανισμού.

Συγκρίνοντας τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης, παρατηρείται ότι για $T_{tr}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ο θερμοχρωμικός μηχανισμός ενεργοποιείται νωρίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας και παραμένει ενεργός για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με την περίπτωση $T_{tr}=30$, ιδιαίτερα κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Αντίθετα, για θερμοκρασία μετάβασης $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ η ενεργοποίηση περιορίζεται κυρίως στις ώρες μέγιστης ηλιακής επιβάρυνσης, καθώς απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία επιφάνειας για την έναρξη της θερμοχρωμικής μετάβασης. Για τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο παρατηρείται ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού για αρκετές ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας στην περίπτωση των $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αντίθετα, για την περίπτωση των $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ η θερμοχρωμική μεταβολή είναι σχεδόν μηδενική, καθώς το απαιτούμενο όριο ενεργοποίησης υπερβαίνεται μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα ή δεν επιτυγχάνεται καθόλου. Ωστόσο, σύμφωνα με τις παραδοχές της παρούσας μελέτης, οι συγκεκριμένοι μήνες δεν συμπεριλαμβάνονται στην αξιολόγηση του ενεργειακού φορτίου, καθώς θεωρούνται μεταβατικές και ενεργειακά ουδέτερες περιόδους.

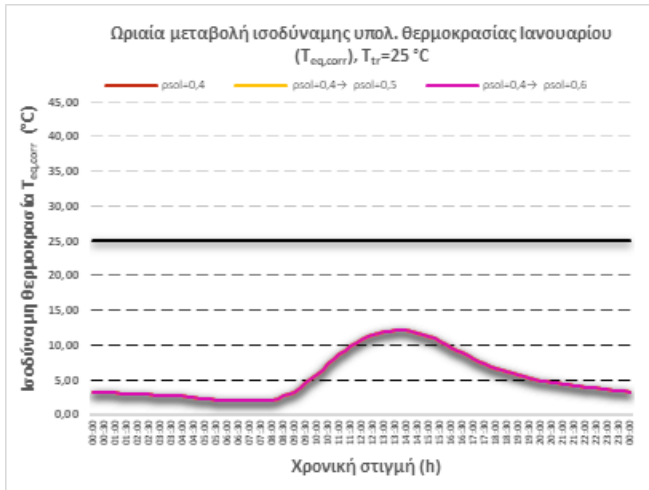
Επιπλέον, παρατηρείται ότι το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη ανακλαστικότητα συνεπάγεται μικρότερη απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας να αυξάνεται βραδύτερα και να υπερβαίνει τη θερμοκρασία μετάβασης για μικρότερο χρονικό διάστημα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της θερμοκρασίας μετάβασης $T_{tr}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, όπου η μετάβαση από την άχρωμη στην έγχρωμη κατάσταση πραγματοποιείται σχεδόν ταυτόχρονα για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κατά τις απογευματινές ώρες, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί σημαντικά και παύει να αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό θέρμανσης της επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία της επιφάνειας υποχωρεί κάτω από

τη θερμοκρασία μετάβασης σχεδόν την ίδια χρονική στιγμή για όλα τα σενάρια, ανεξάρτητα από τη διαφορά στην ανακλαστικότητα.

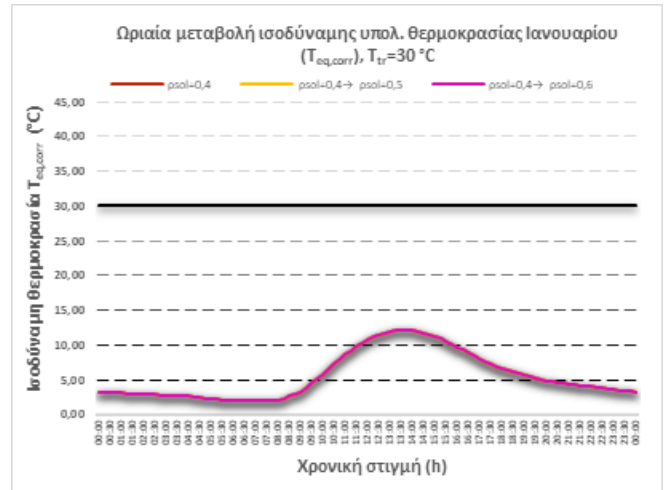
4.2 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ωριαία μεταβολή της διορθωμένης ισοδύναμης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$), όπως υπολογίστηκε από το αναπτυγμένο υπολογιστικό μοντέλο. Η ισοδύναμη θερμοκρασία αποτελεί το βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της θερμικής ροής, καθώς λαμβάνει υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση των κλιματικών συνθηκών και της θερμοχρωμικής συμπεριφοράς του υλικού.

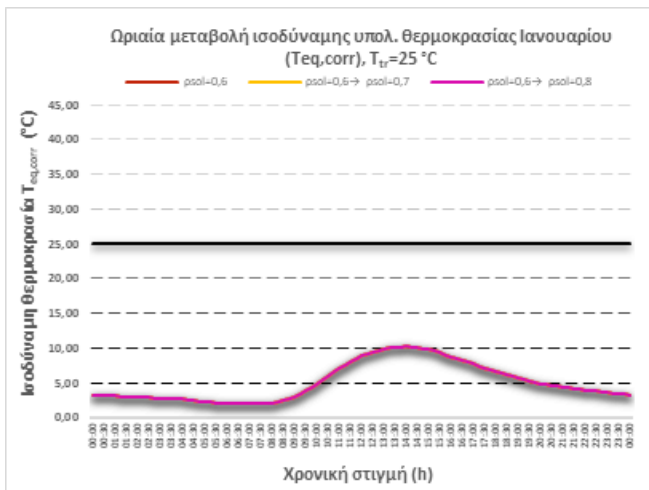
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα της ωριαίας μεταβολής της $T_{eq,corr}$ για κάθε μήνα του έτους, για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης (25 °C και 30 °C). Για λόγους ευκρίνειας, τα έξι σενάρια ανακλαστικότητας παρουσιάζονται σε δύο ομάδες των τριών σεναρίων, ώστε να διευκολύνεται η συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης τόσο της θερμοκρασίας μετάβασης όσο και της ανακλαστικότητας στη θερμική συμπεριφορά της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος. Ειδικότερα, τα σενάρια 1–3 αντιστοιχούν στις περιπτώσεις $\rho_{sol}=0,4$, $\rho_{sol}=0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{sol}=0,4 \rightarrow 0,6$, ενώ τα σενάρια 4–6 αντιστοιχούν στις περιπτώσεις $\rho_{sol}=0,6$, $\rho_{sol}=0,6 \rightarrow 0,7$ και $\rho_{sol}=0,6 \rightarrow 0,8$, αντίστοιχα.



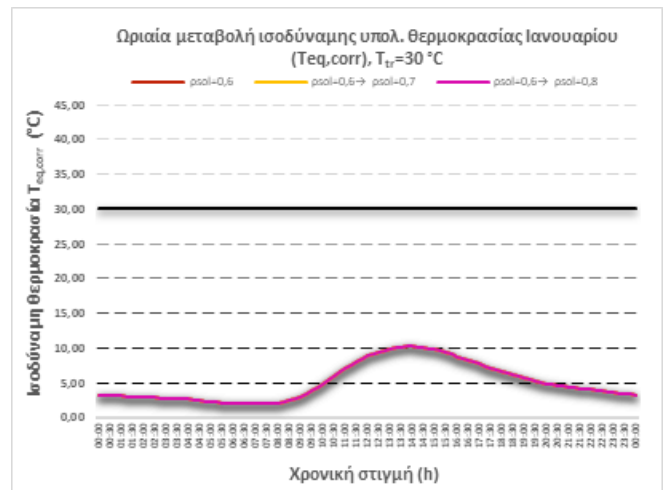
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

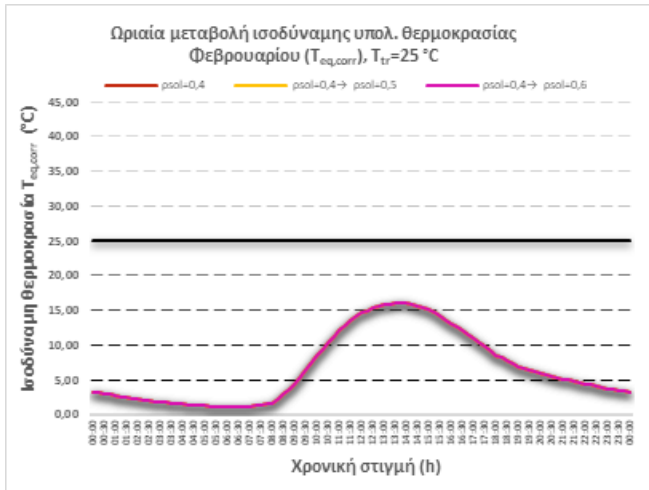
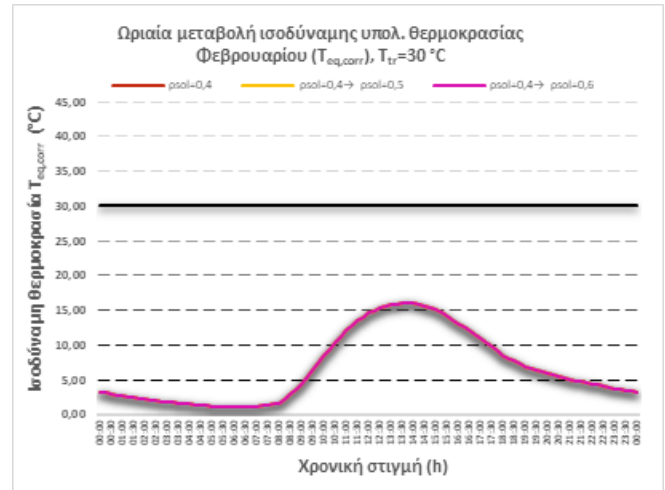
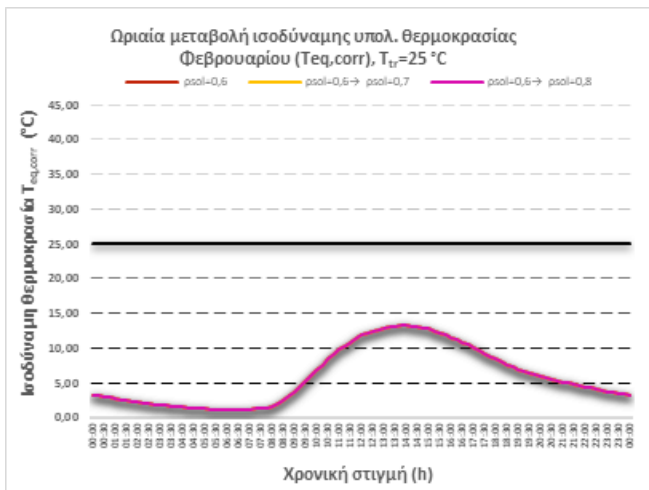
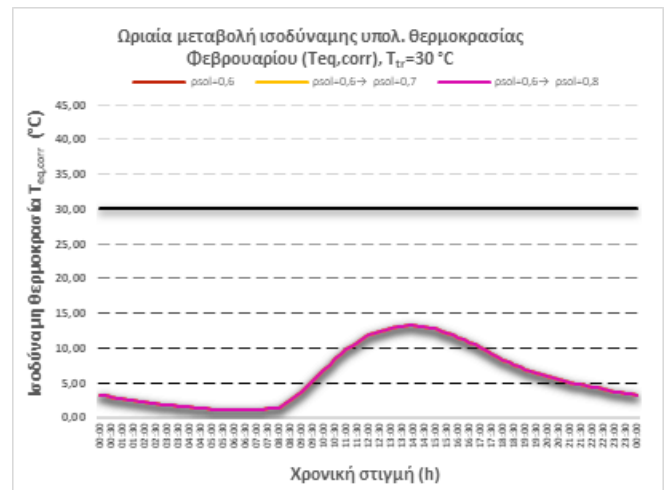


(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

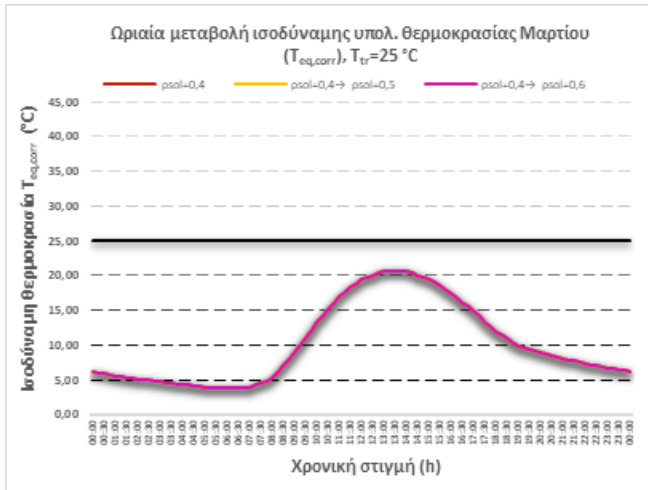
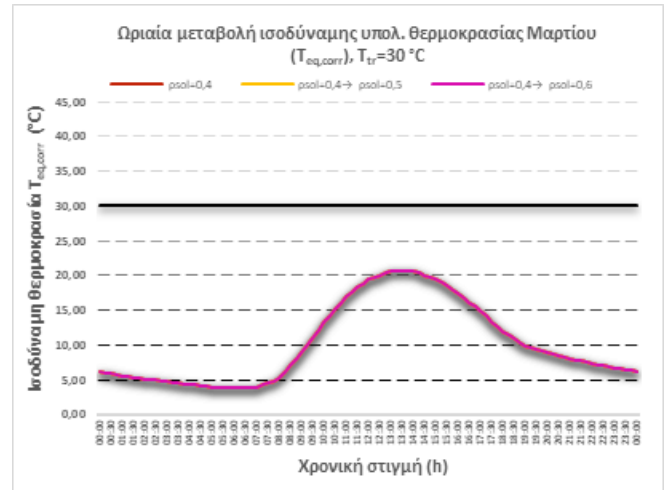
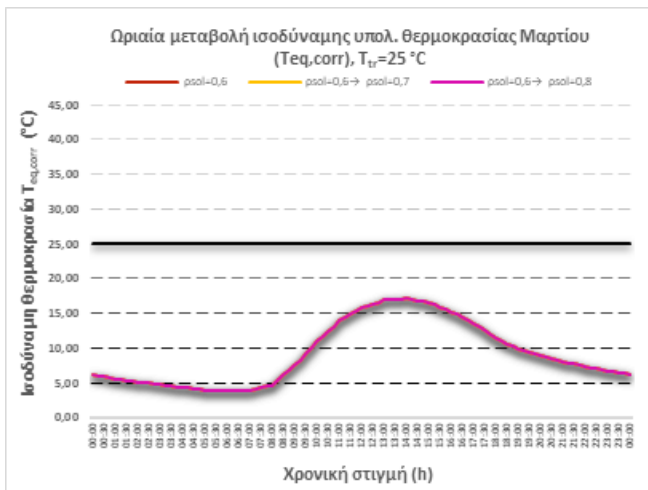
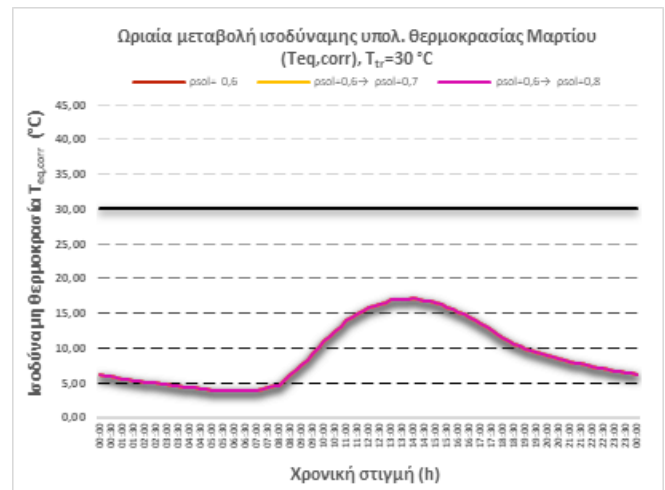


(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

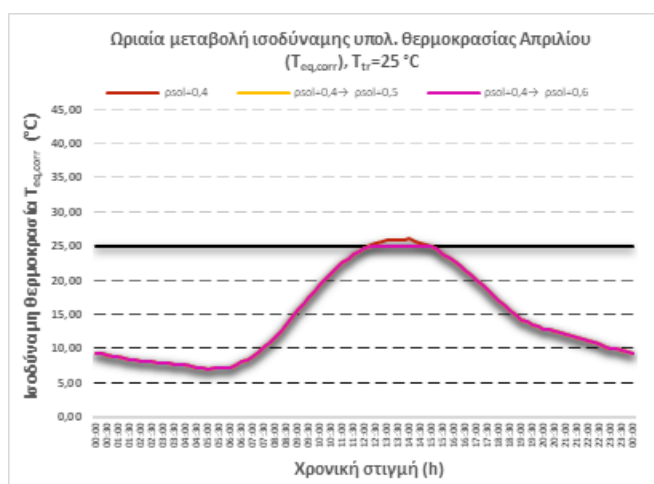
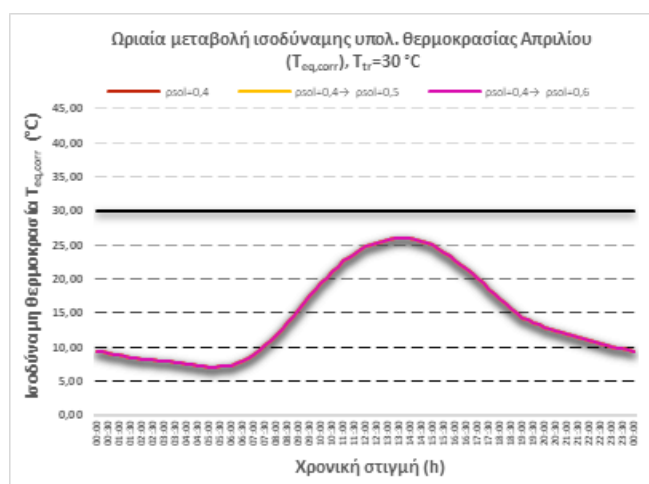
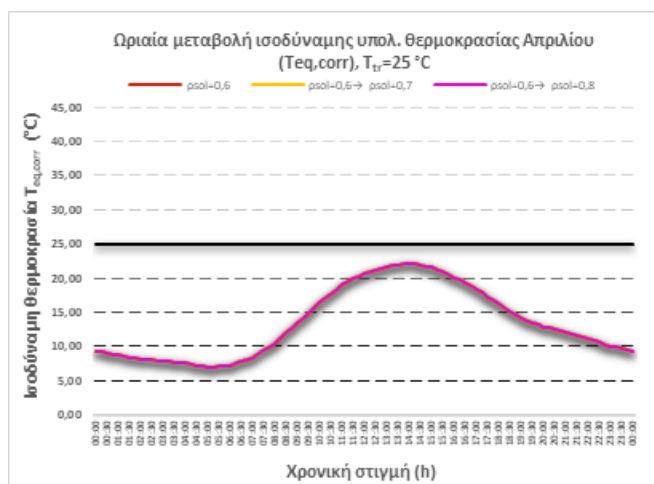
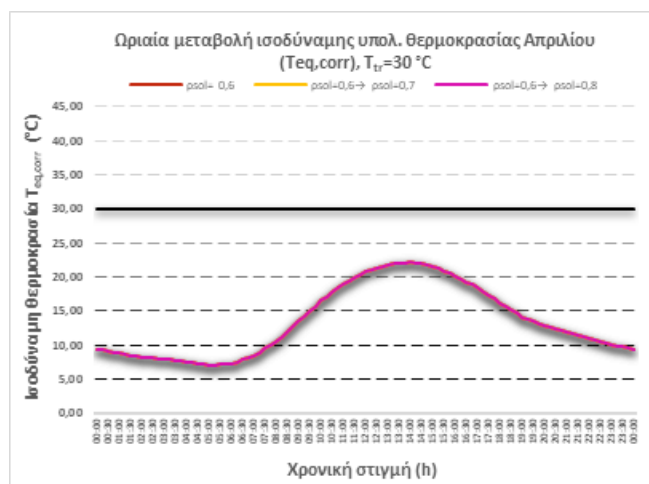
Σχήμα 4.2.1 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Ιανουάριο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

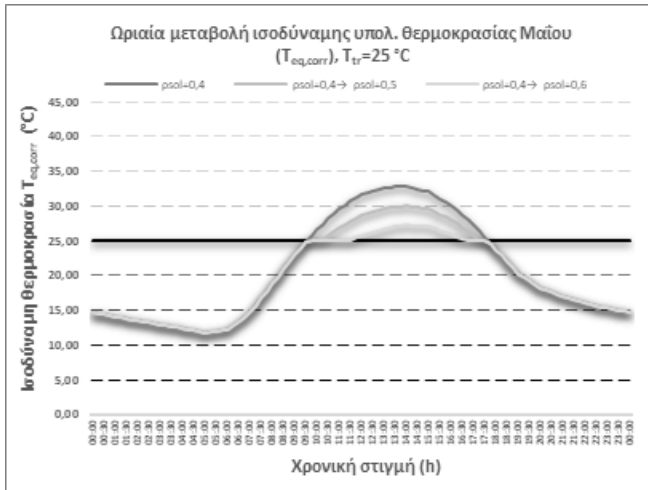
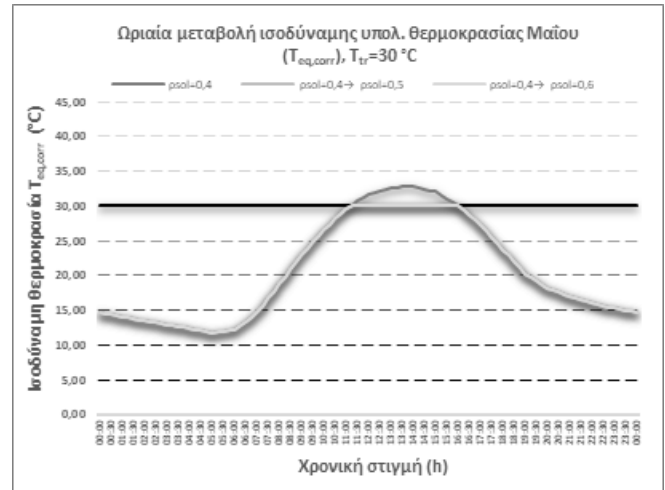
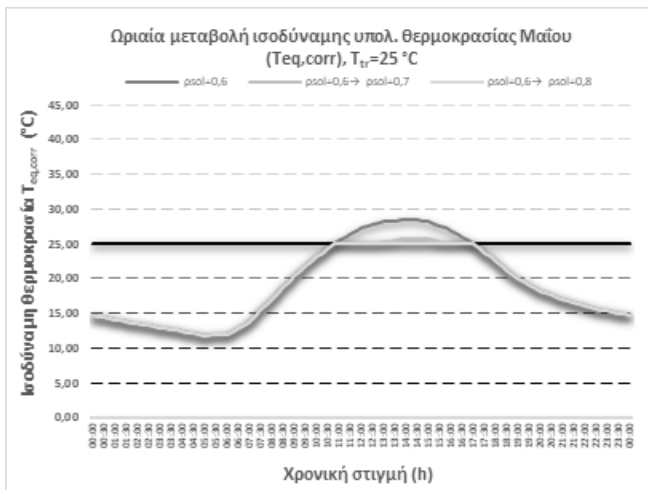
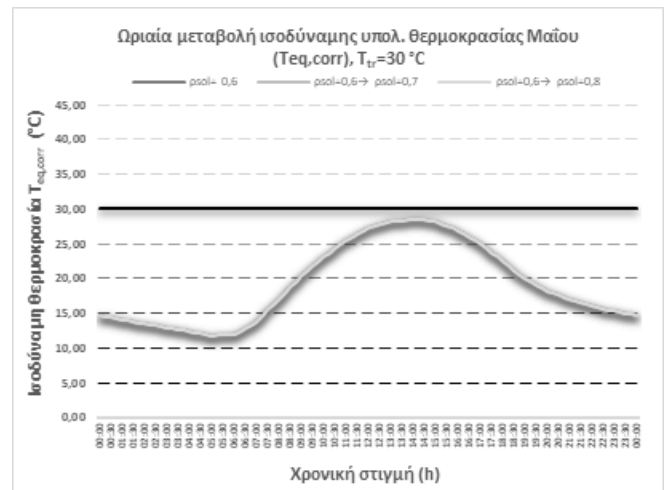
Σχήμα 4.2.2 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δόματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Φεβρουάριο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

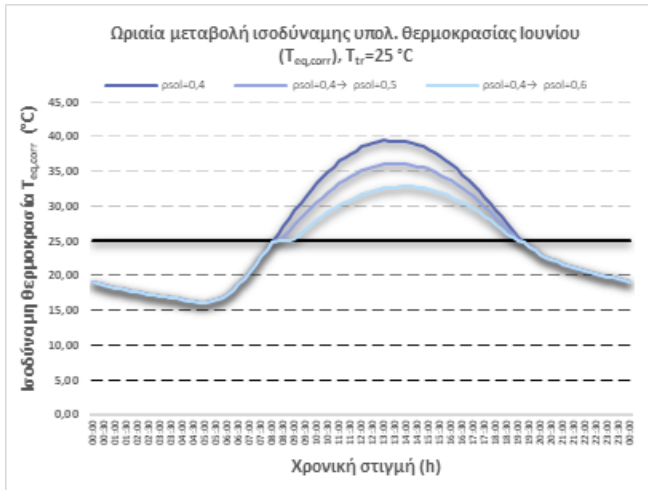
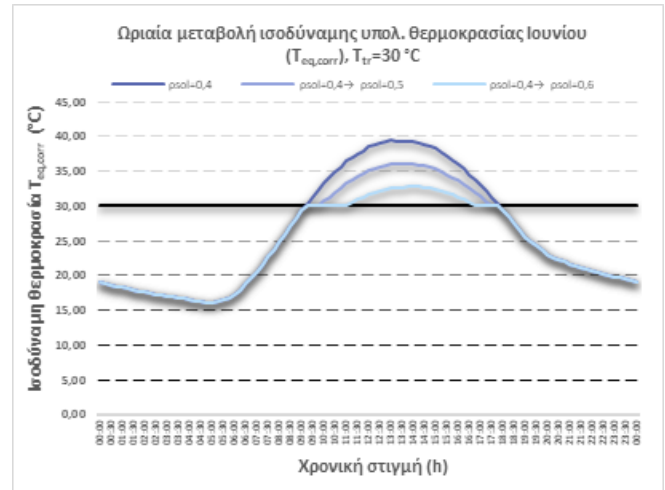
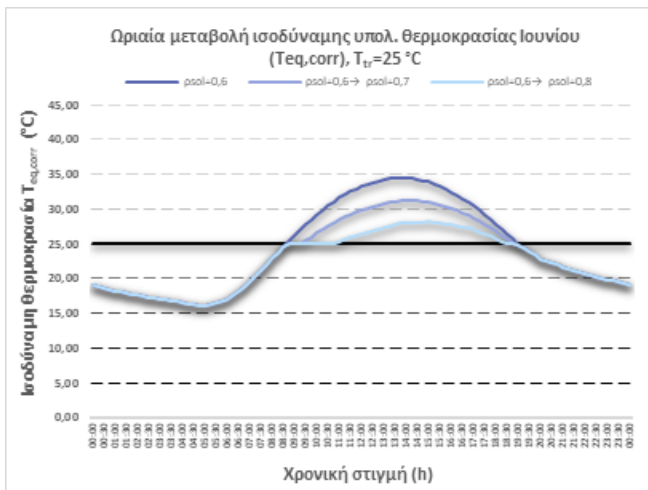
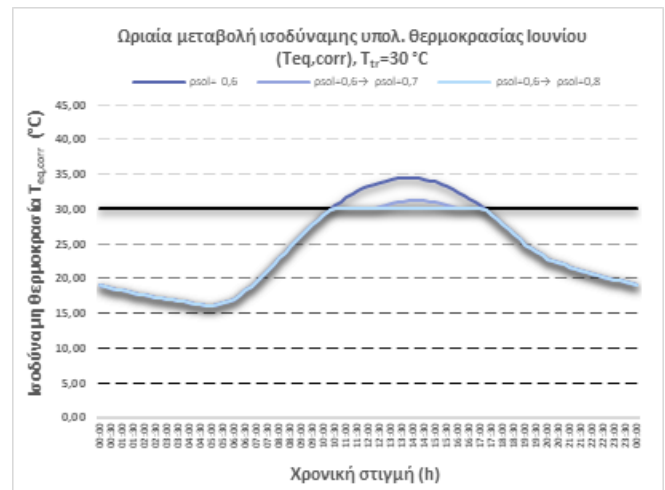
Σχήμα 4.2.3 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Μάρτιο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

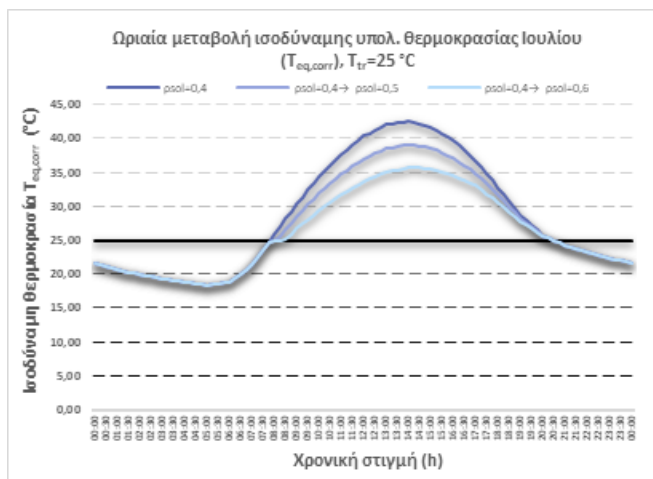
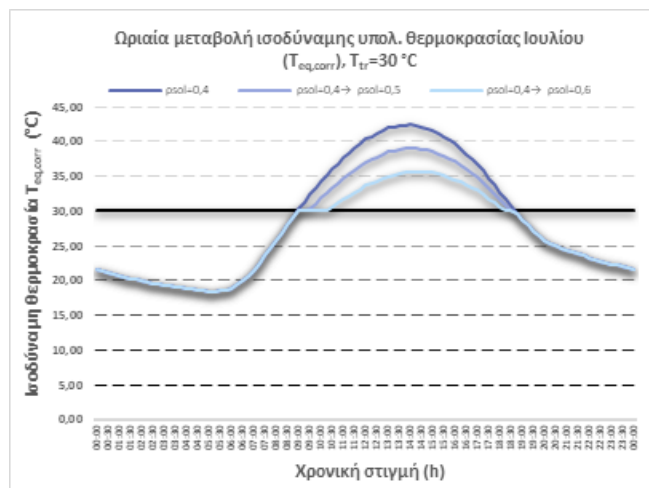
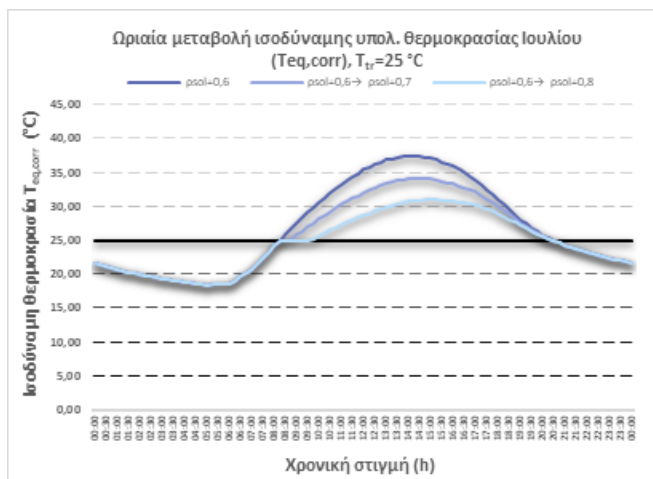
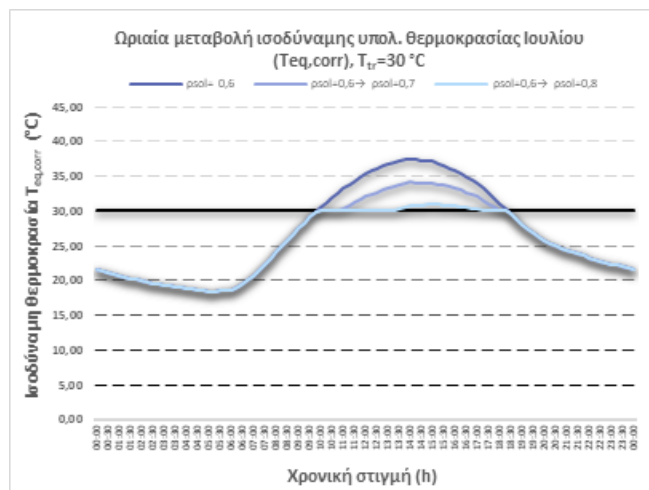
Σχήμα 4.2.4 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Απρίλιο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

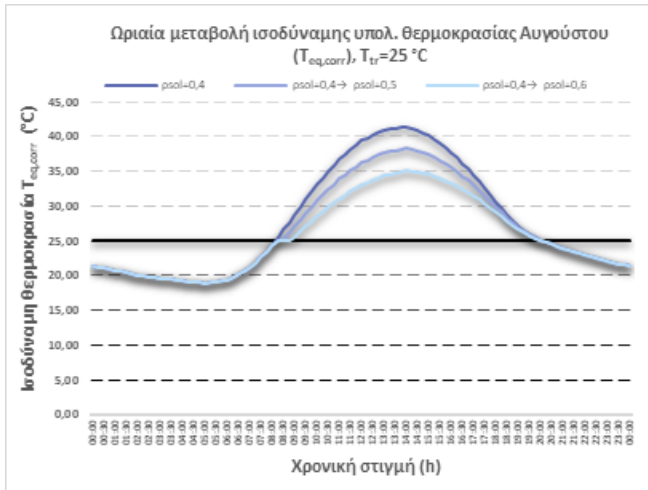
Σχήμα 4.2.5 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Μάιο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

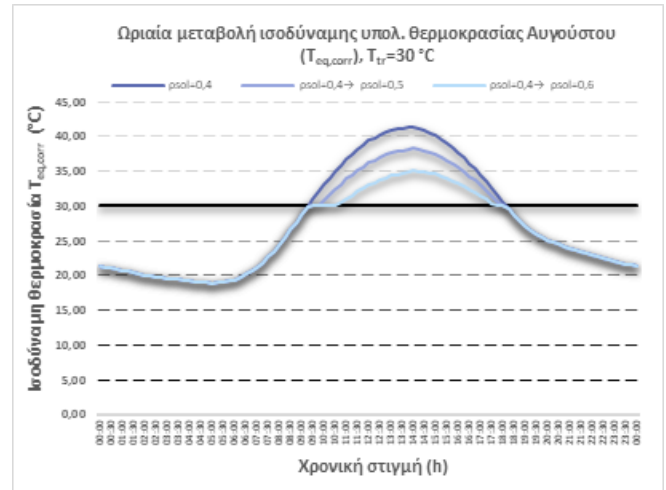
Σχήμα 4.2.6 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Ιούνιο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

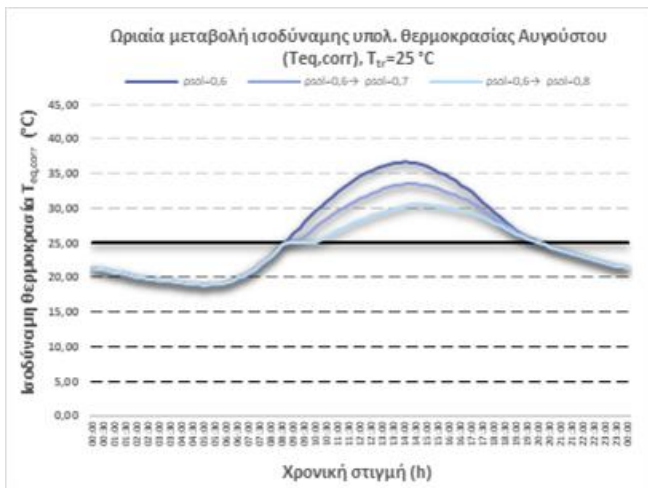
Σχήμα 4.2.7 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Ιούλιο.



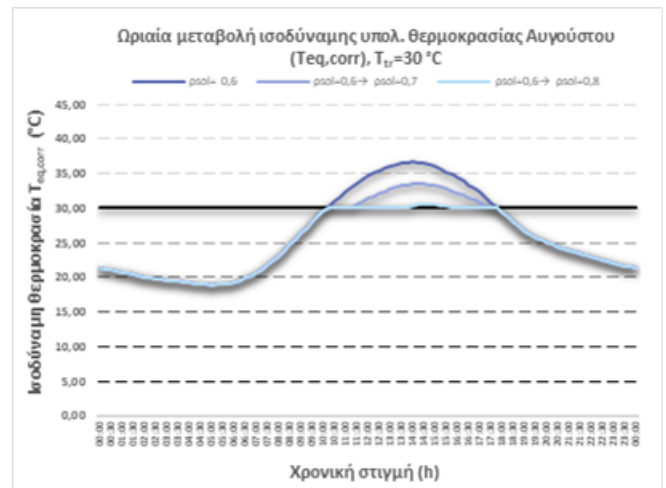
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

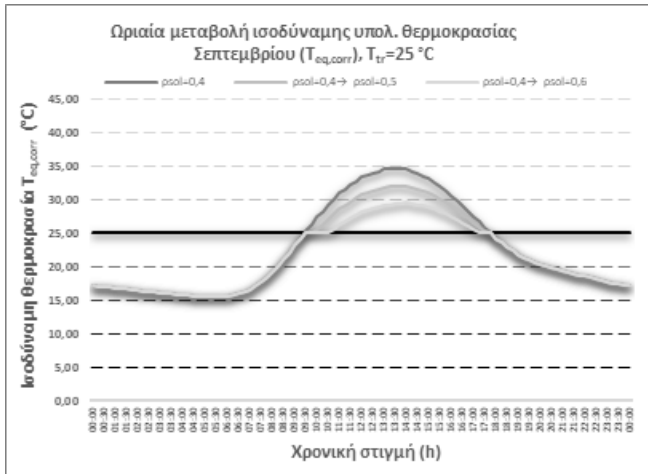
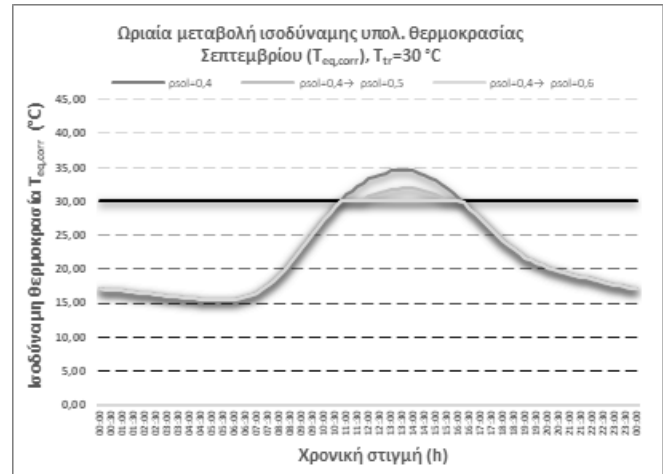
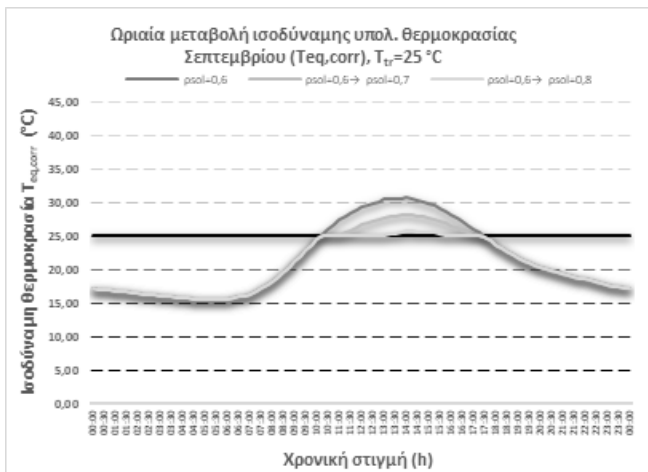
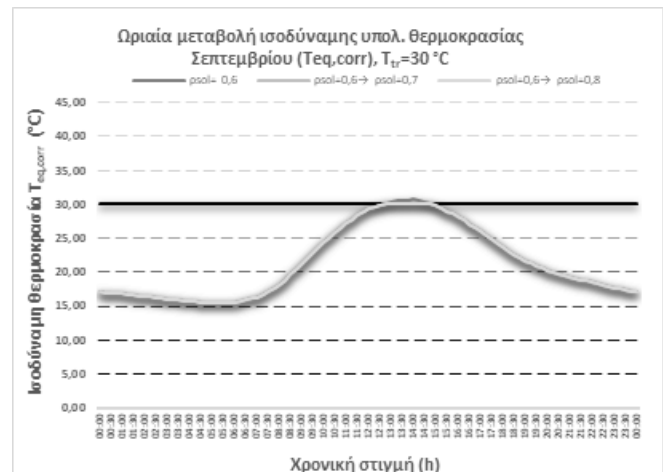


(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

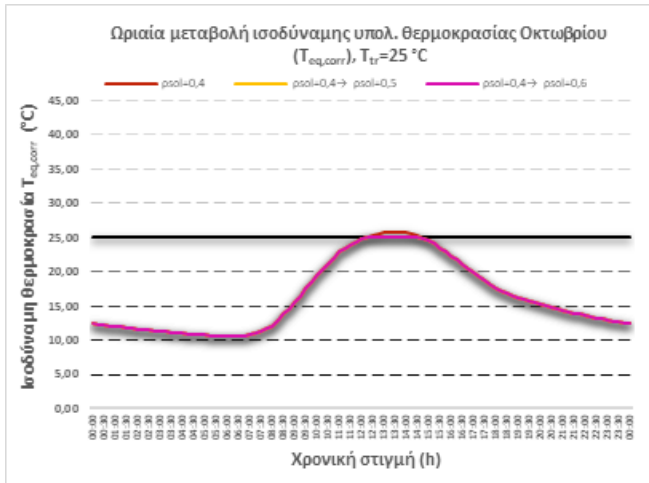
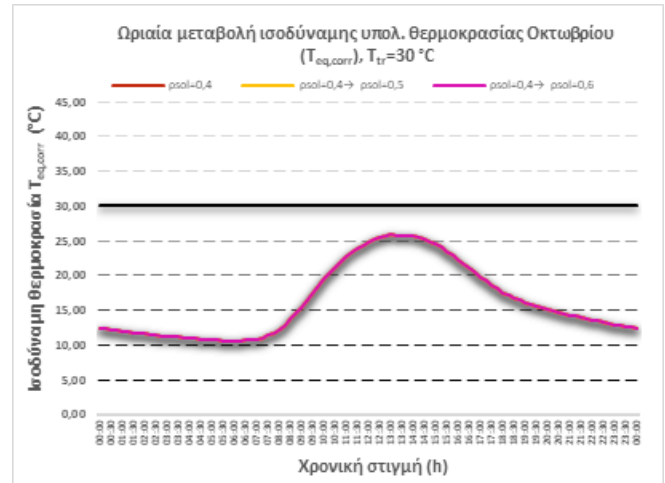
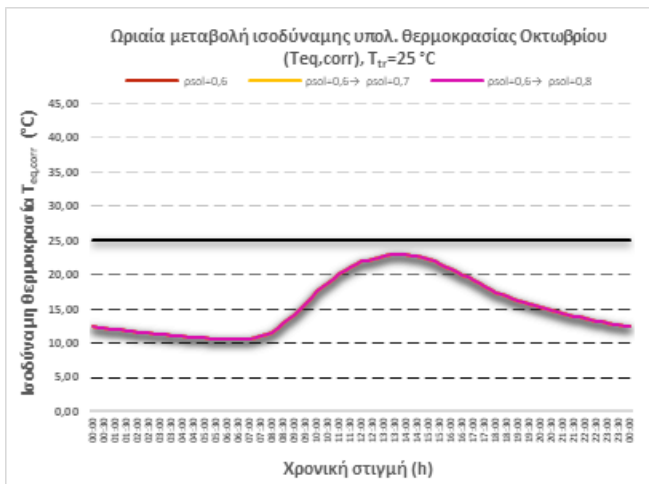
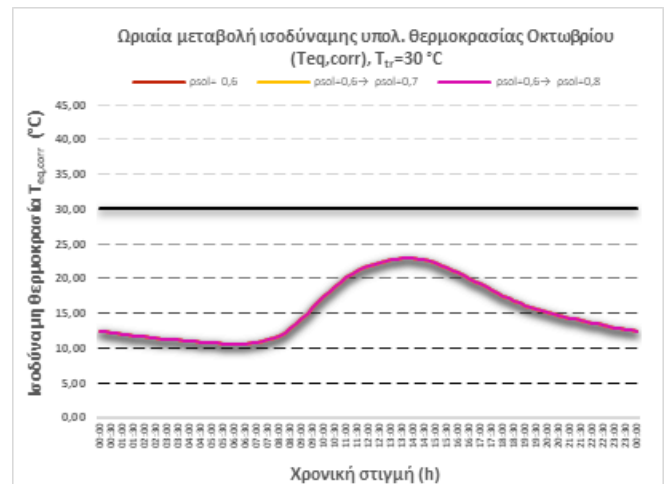


(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

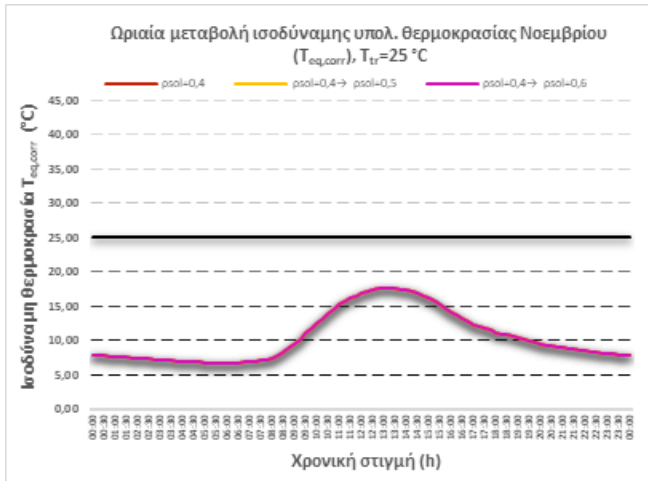
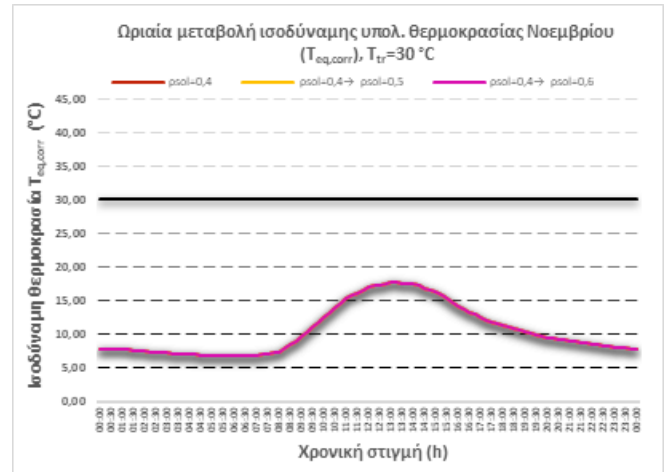
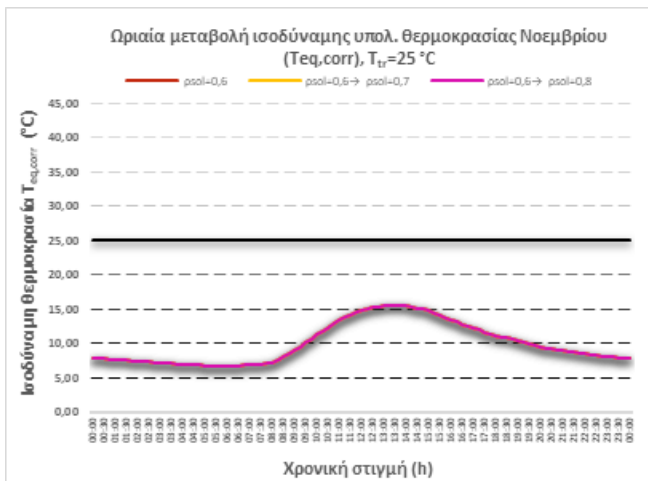
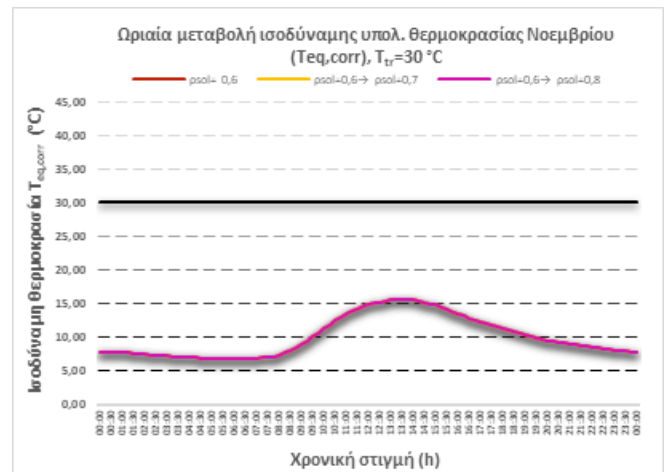
Σχήμα 4.2.8 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Αύγουστο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

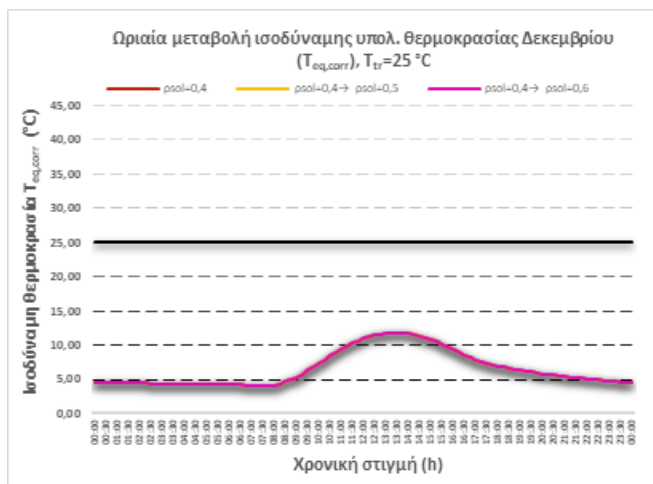
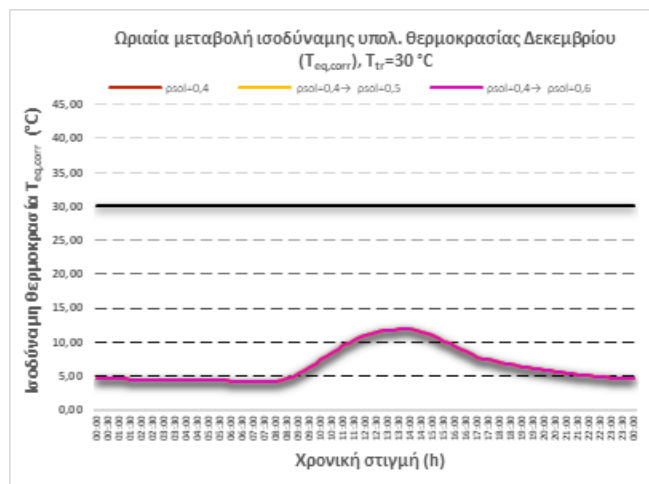
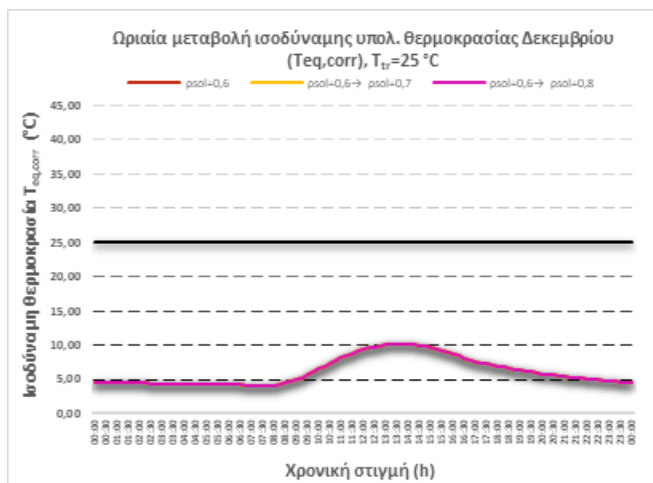
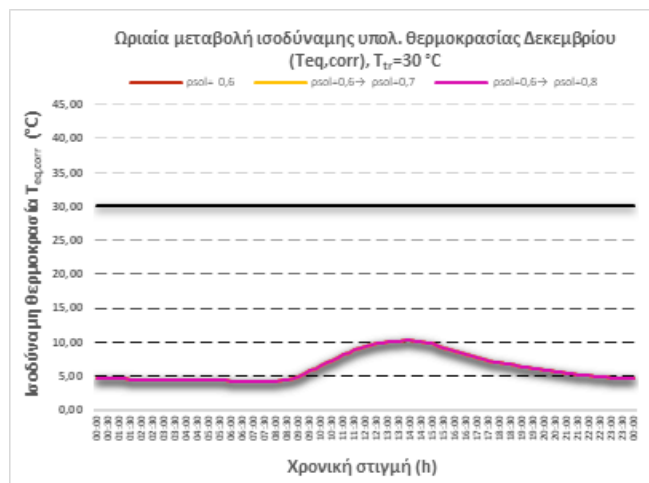
Σχήμα 4.2.9 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Σεπτέμβριο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.2.10 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Οκτώβριο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.2.11 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Νοέμβριο.

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.2.12 Ωριαία μεταβολή της ισοδύναμης υπολογιζόμενης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας του δώματος ($T_{eq,corr}$) για τον μήνα Δεκέμβριο.

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων της υπολογιζόμενης $T_{eq,corr}$ διαπιστώνεται ότι η θερμική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου παρουσιάζει σημαντική εποχική διαφοροποίηση, η οποία εξαρτάται τόσο από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες όσο και από τη θερμοκρασία μετάβασης και το εξεταζόμενο σενάριο ανακλαστικότητας του θερμοχρωμικού υλικού.

Κατά τους μήνες ανάγκης θερμικού φορτίου (Οκτώβριος–Απρίλιος), η υπολογιζόμενη ισοδύναμη θερμοκρασία παραμένει γενικά χαμηλότερη από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης, τόσο για τα θερμοχρωμικά όσο και για τα συμβατικά σενάρια, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.2.1–4.2.4 και 4.2.10–4.2.12. Ως αποτέλεσμα, ο θερμοχρωμικός μηχανισμός δεν

ενεργοποιείται και το υλικό παραμένει στην έγχρωμη κατάστασή του, χωρίς να παρατηρούνται ουσιαστικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Εξαιρέση αποτελούν οι μήνες Απρίλιος και Οκτώβριος, όπου για περιορισμένο χρονικό διάστημα η υπολογιζόμενη ισοδύναμη θερμοκρασία υπερβαίνει τους 25 °C μόνο στην περίπτωση του σεναρίου σταθερής ανακλαστικότητας $\rho_{sol}=0,4$, όπως φαίνεται στα υποδιαγράμματα 4.2.4(α) και 4.2.10(α). Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν πραγματοποιείται θερμοχρωμική μετάβαση, καθώς πρόκειται για συμβατικό υλικό με σταθερή ανακλαστικότητα.

Η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού γίνεται ιδιαίτερα εμφανής κατά τους θερινούς μήνες Ιούνιο έως Αύγουστο (Σχήματα 4.2.6-4.2.8), όπου η ισοδύναμη θερμοκρασία υπερβαίνει συστηματικά τη θερμοκρασία μετάβασης. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τελική τιμή της ανακλαστικότητας μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση, τόσο χαμηλότερες είναι οι μέγιστες τιμές της υπολογιζόμενης ισοδύναμης θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία περιορίζει την απορρόφηση θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του δώματος και συνεπώς μειώνει τη θερμική της επιβάρυνση. Η παραπάνω τάση επιβεβαιώνεται σε όλα τα εξεταζόμενα διαγράμματα, όπου το σενάριο που οδηγεί στη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα εμφανίζει συστηματικά τις χαμηλότερες τιμές της $T_{eq,corr}$, ενώ αντίθετα τα σενάρια με μικρότερη μεταβολή της ανακλαστικότητας παρουσιάζουν υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες. Αντίστοιχη συμπεριφορά προκύπτει και κατά τη συνολική σύγκριση των έξι εξεταζόμενων σεναρίων, γεγονός που αναδεικνύει ότι η αύξηση της ανακλαστικότητας αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα περιορισμού της θερμικής επιβάρυνσης της εξωτερικής επιφάνειας. Η παραπάνω τάση επιβεβαιώνεται σε όλα τα εξεταζόμενα διαγράμματα, όπου το σενάριο που οδηγεί στη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα εμφανίζει συστηματικά τις χαμηλότερες τιμές της $T_{eq,corr}$, ενώ αντίθετα τα σενάρια με μικρότερη μεταβολή της ανακλαστικότητας παρουσιάζουν υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες. Αντίστοιχη συμπεριφορά προκύπτει και κατά τη συνολική σύγκριση των έξι εξεταζόμενων σεναρίων, γεγονός που αναδεικνύει ότι η αύξηση της ανακλαστικότητας αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα περιορισμού της θερμικής επιβάρυνσης της εξωτερικής επιφάνειας.

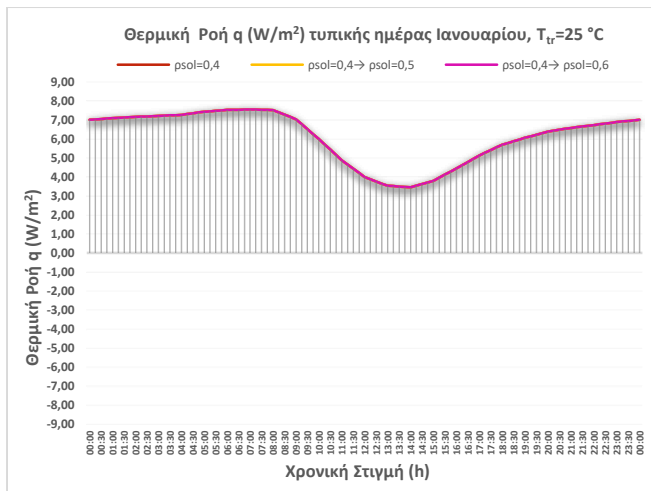
Η σύγκριση των υποδιαγραμμάτων (α) με (β) και (γ) με (δ), τα οποία αντιστοιχούν στις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης, δείχνει ότι η $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$ οδηγεί σε συχνότερη και μεγαλύτερης διάρκειας ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται χαμηλότερες τιμές της υπολογιζόμενης ισοδύναμης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, για θερμοκρασία μετάβασης 30 °C η ενεργοποίηση

πραγματοποιείται μόνο όταν η επιφάνεια αναπτύξει υψηλότερες θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη χρονική διάρκεια λειτουργίας του θερμοχρωμικού υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο μήνας Ιούνιος, όπου στο Σχήμα 4.2.6(δ), για το σενάριο ανακλαστικότητας $\rho_{sol}=0,6 \rightarrow 0,8$, ο θερμοχρωμικός μηχανισμός δεν ενεργοποιείται, καθώς η υπολογιζόμενη ισοδύναμη θερμοκρασία προσεγγίζει, χωρίς να υπερβαίνει, τη θερμοκρασία μετάβασης των 30 °C. Ως αποτέλεσμα, το υλικό παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας στην αρχική του κατάσταση.

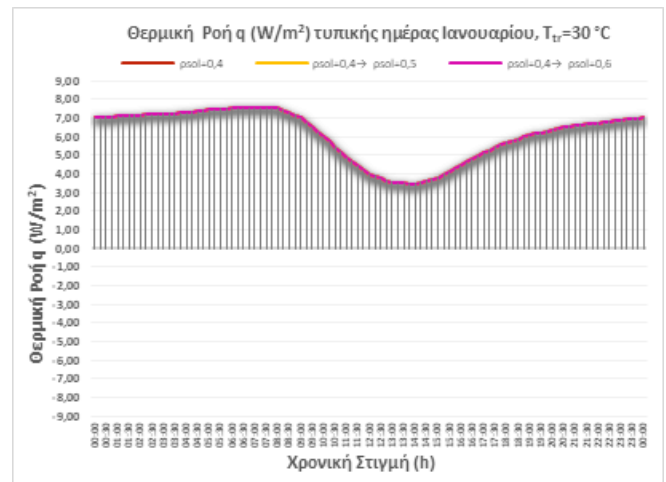
4.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΡΟΗ ΔΩΜΑΤΟΣ

Στη συνέχεια της ανάλυσης εξετάζεται η ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής μέσω του δώματος, η οποία υπολογίζεται με βάση τη διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας ($T_{eq,corr}$) και την εσωτερική θερμοκρασία αναφοράς. Η θερμική ροή αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της θερμικής συμπεριφοράς του δομικού στοιχείου, καθώς εκφράζει τον στιγμιαίο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μέσω του δώματος και συνδέεται άμεσα με τις απαιτήσεις θέρμανσης ή ψύξης του κτιρίου. Επομένως, η ανάλυσή της επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων του υλικού στη θερμική απόδοση του δώματος και αποτελεί το ενδιάμεσο στάδιο για τον υπολογισμό του αντίστοιχου ενεργειακού φορτίου.

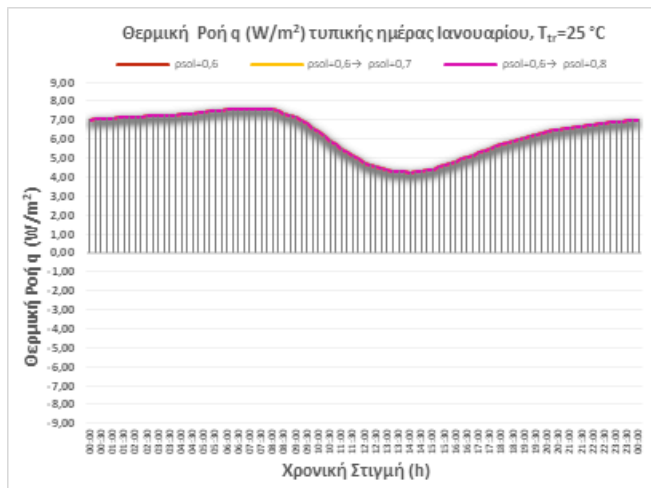
Ακολούθως παρατίθενται τα διαγράμματα της ωριαίας μεταβολής της θερμικής ροής για κάθε μήνα του έτους, για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης (25 °C και 30 °C). Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, τα έξι εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας παρουσιάζονται σε δύο ομάδες των τριών σεναρίων, ώστε να διευκολύνεται η συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης της θερμοκρασίας μετάβασης και της ανακλαστικότητας στη θερμική συμπεριφορά του δώματος.



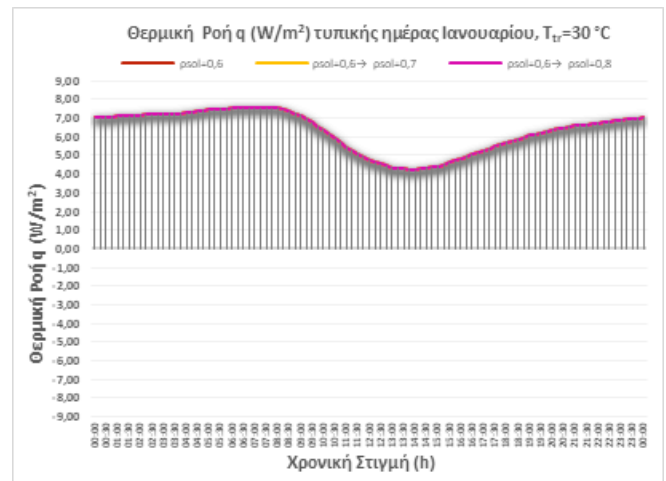
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

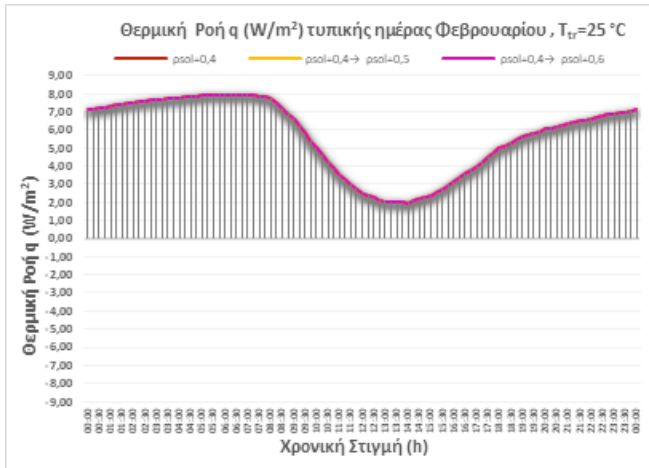
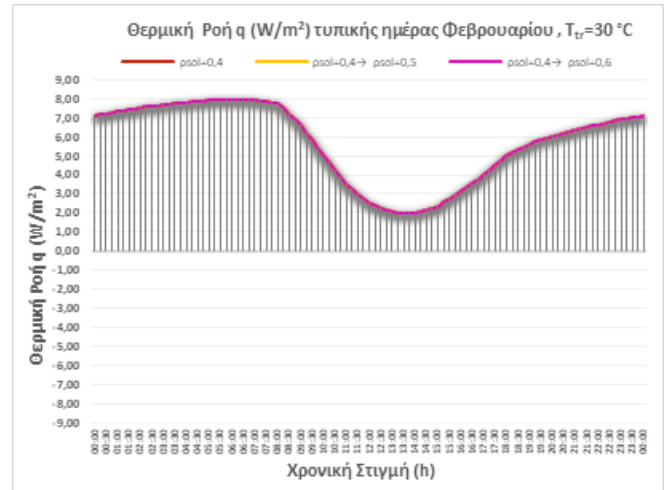
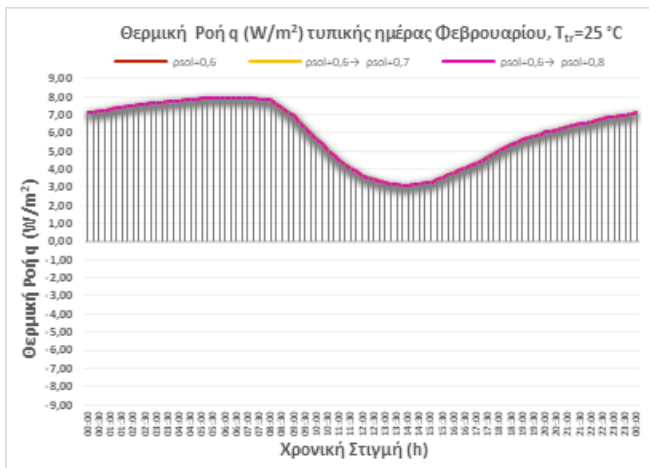
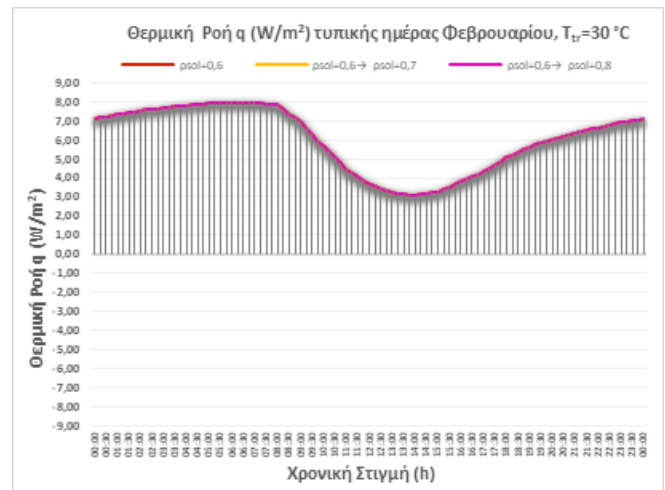


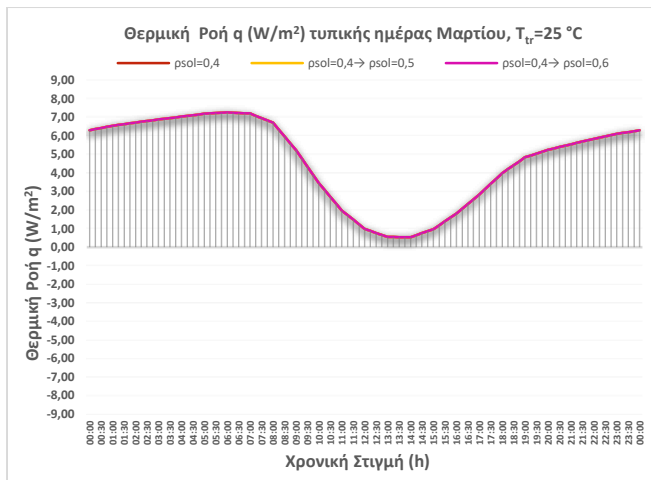
(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6



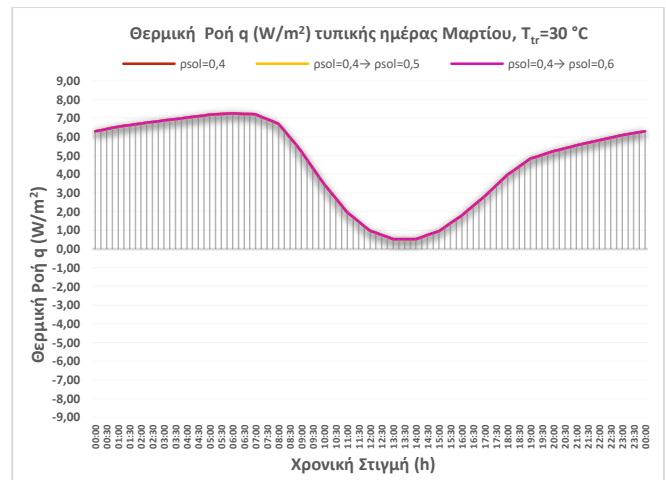
(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.3.1 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιανουάριο

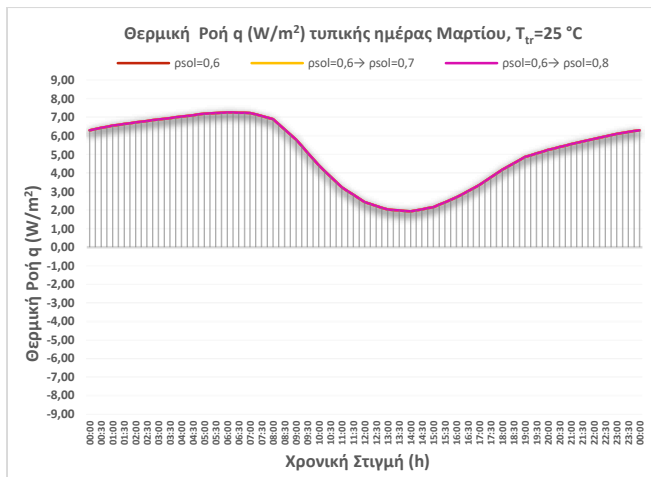
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6Σχήμα 4.3.2 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Φεβρουάριο



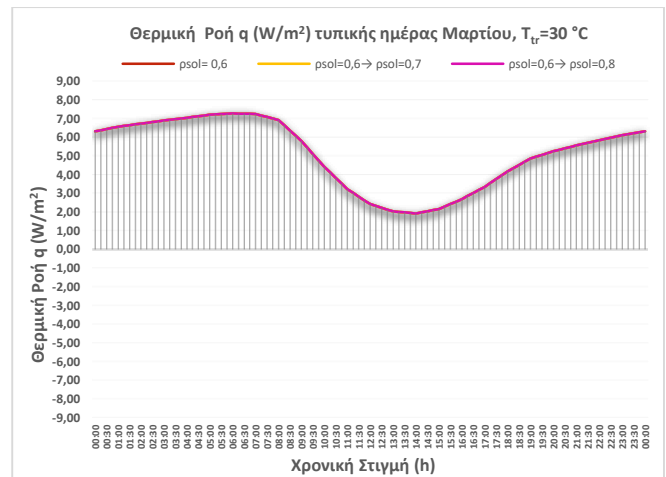
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

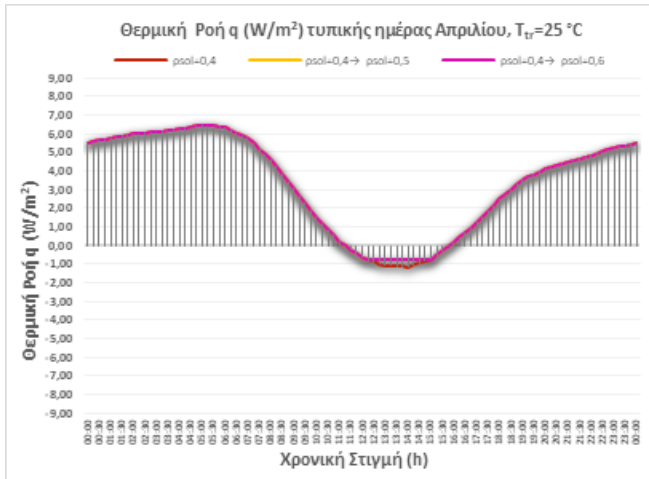
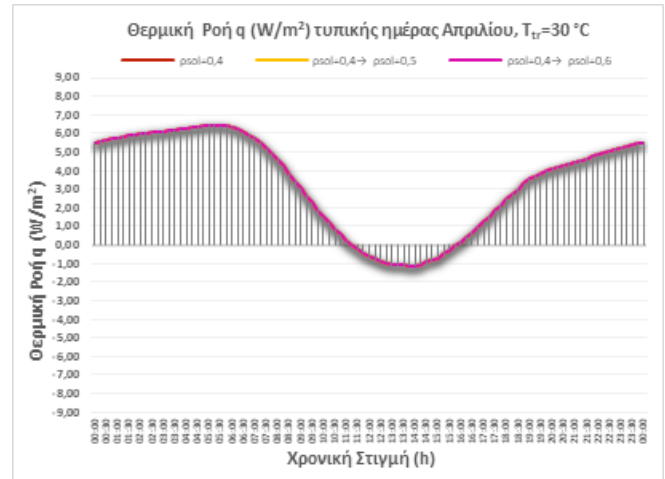
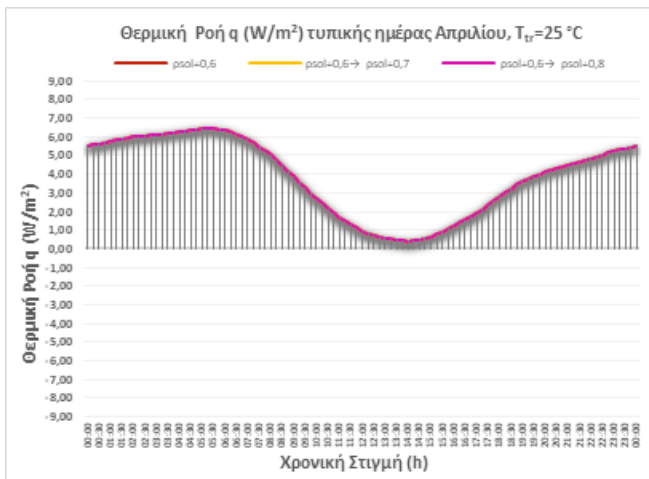
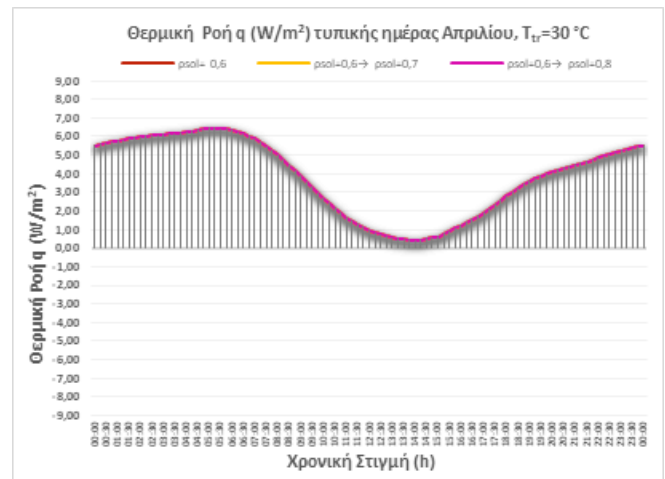


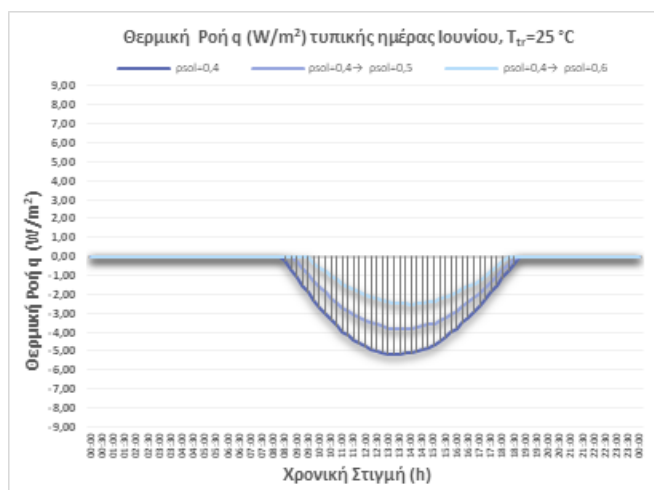
(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6



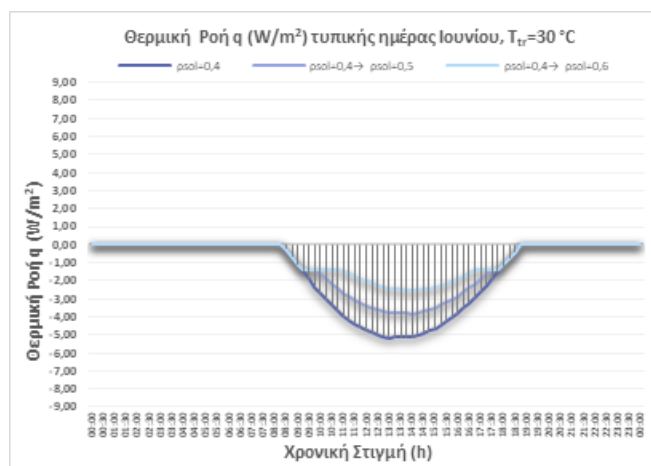
(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.3.3 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Μάρτιο

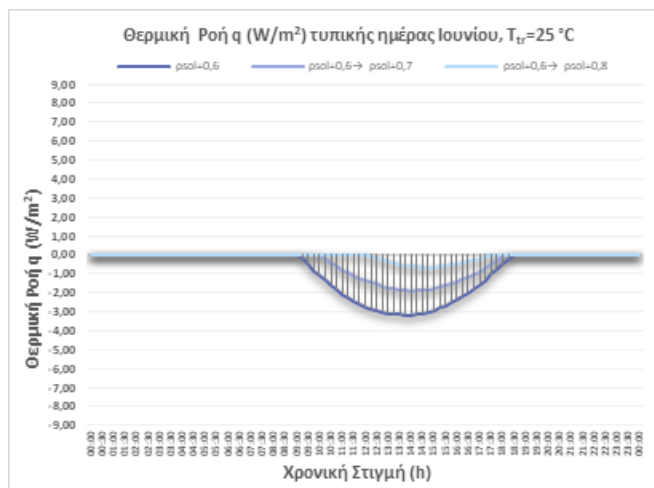
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6Σχήμα 4.3.4 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Απρίλιο



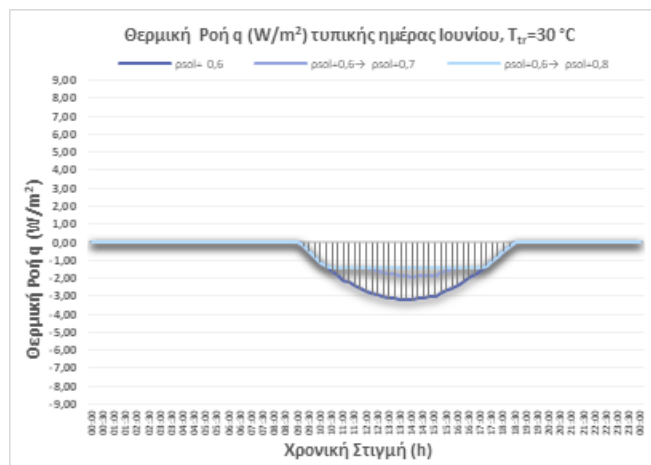
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

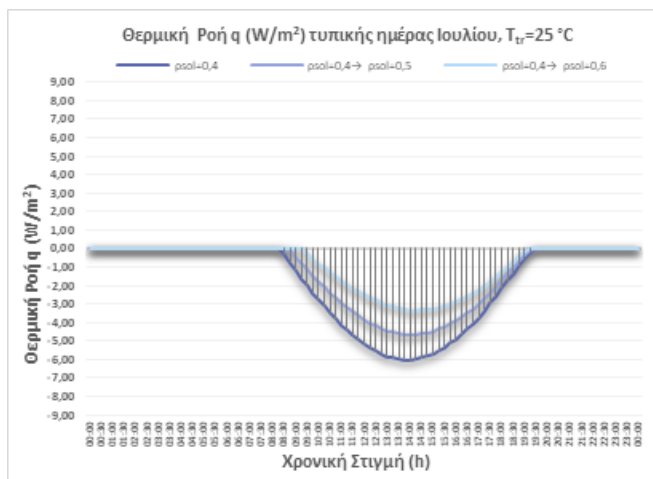
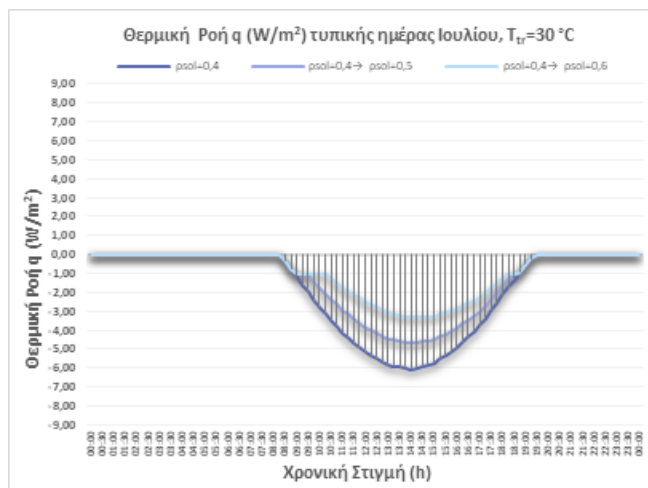
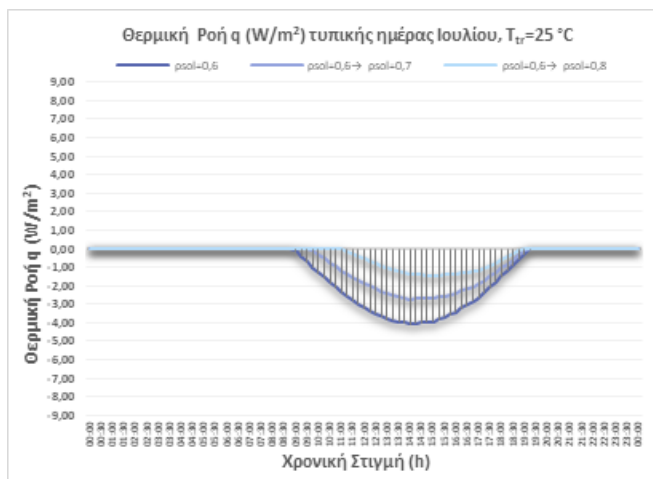
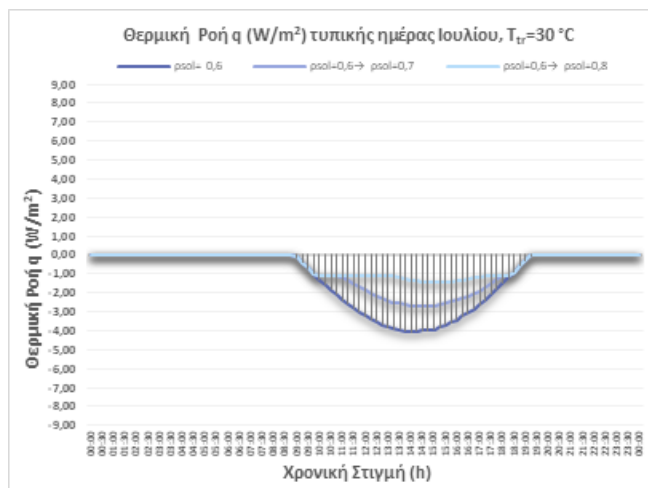


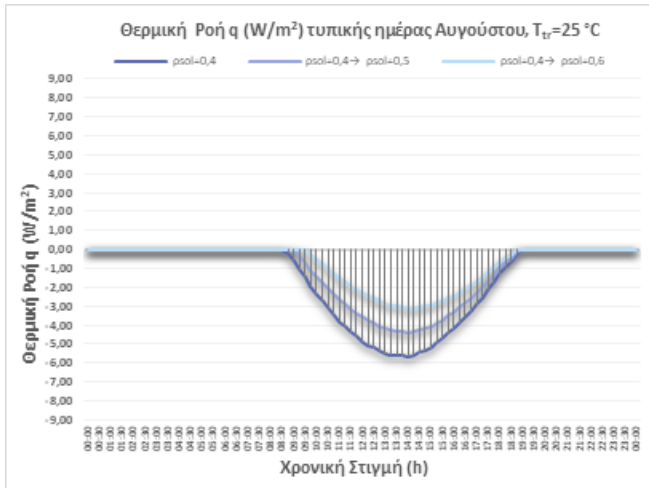
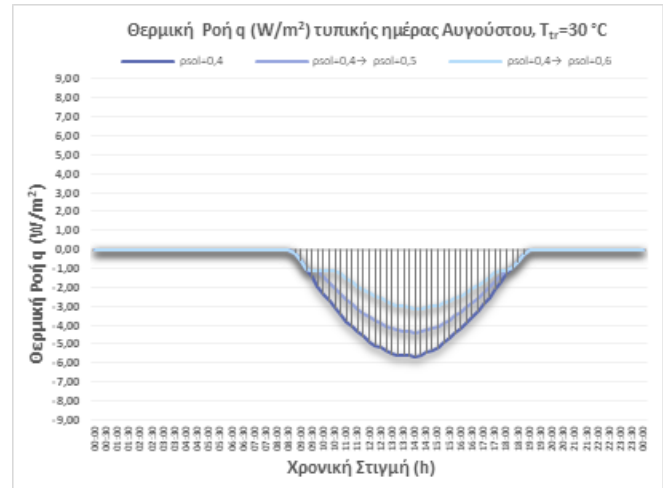
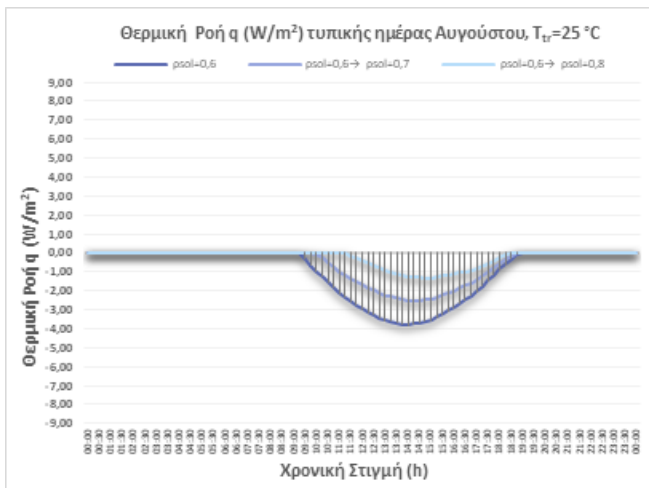
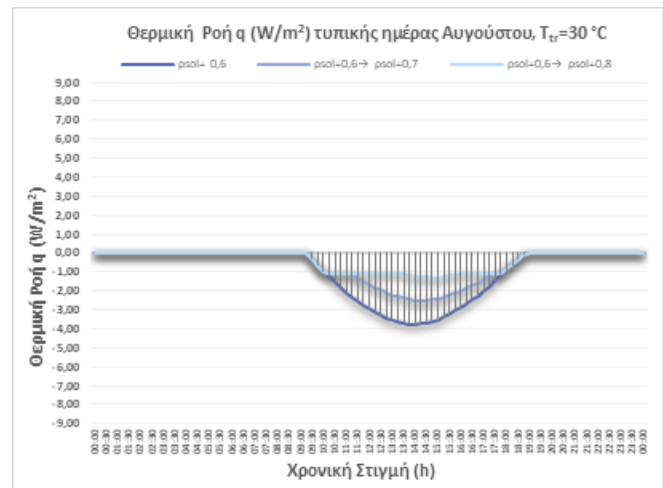
(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

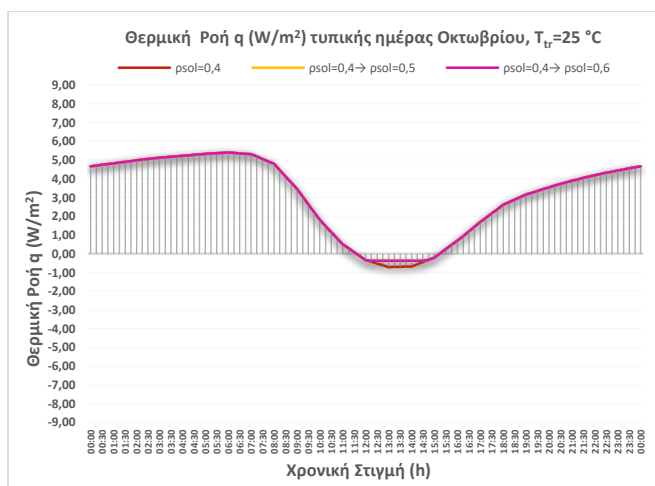


(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

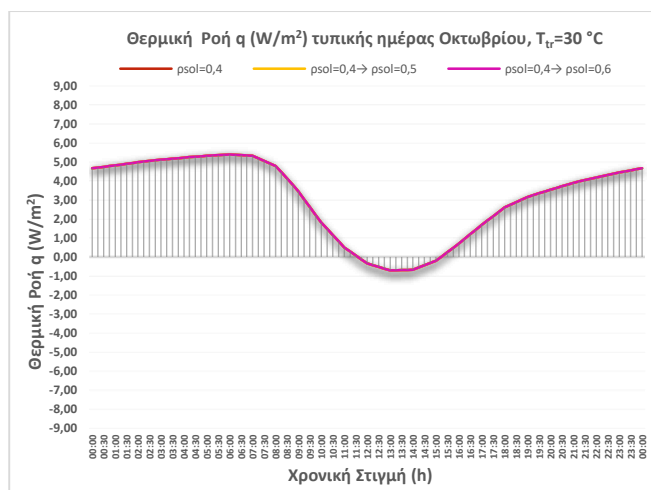
Σχήμα 4.3.5 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιούνιο

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6Σχήμα 4.3.6 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Ιούλιο

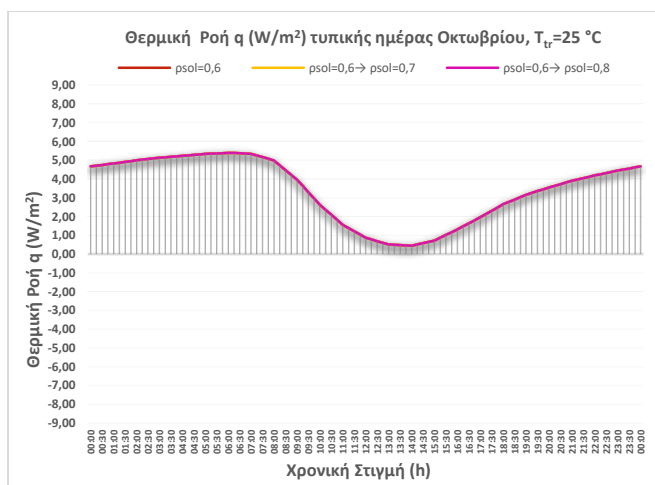
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6Σχήμα 4.3.7 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Αύγουστο



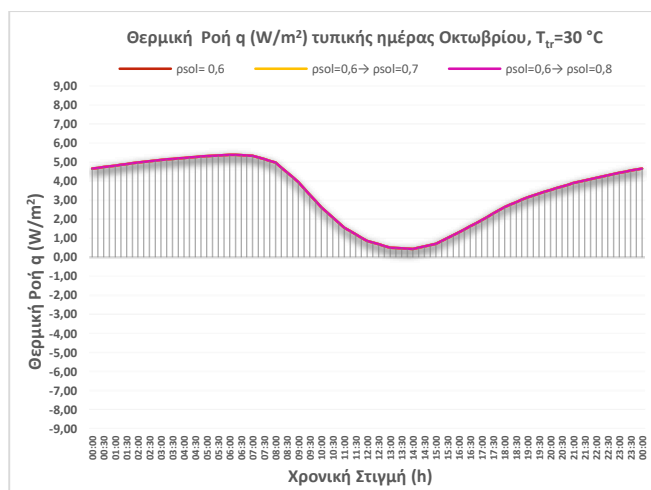
(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3



(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3

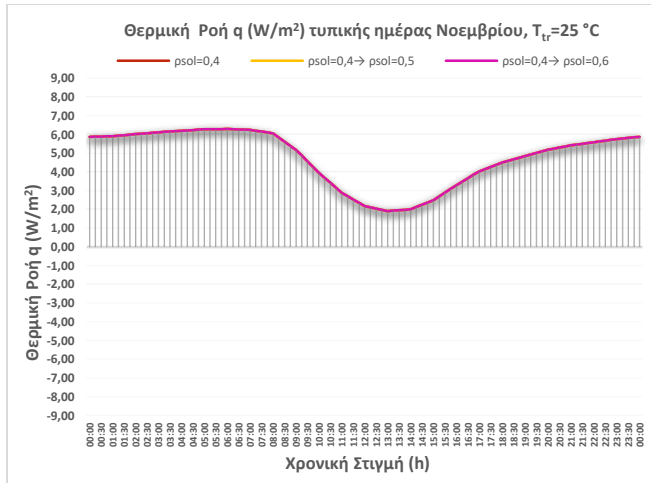
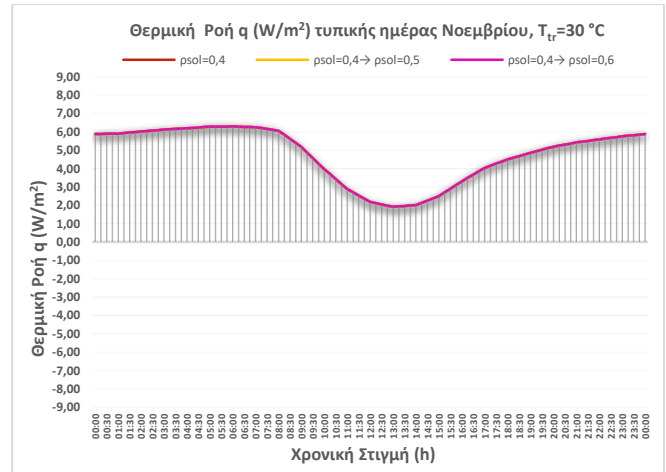
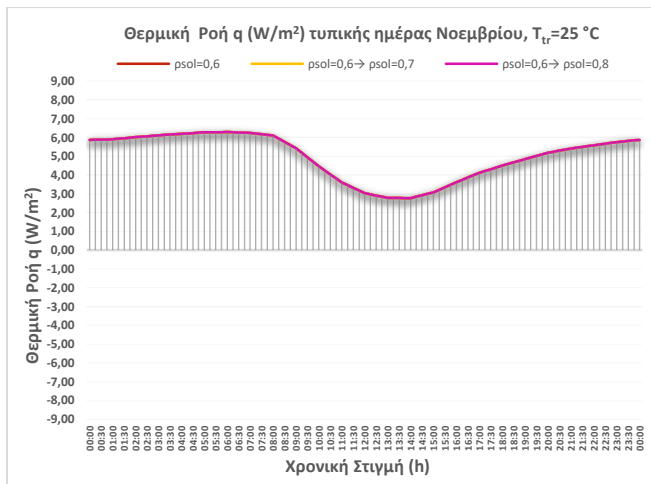
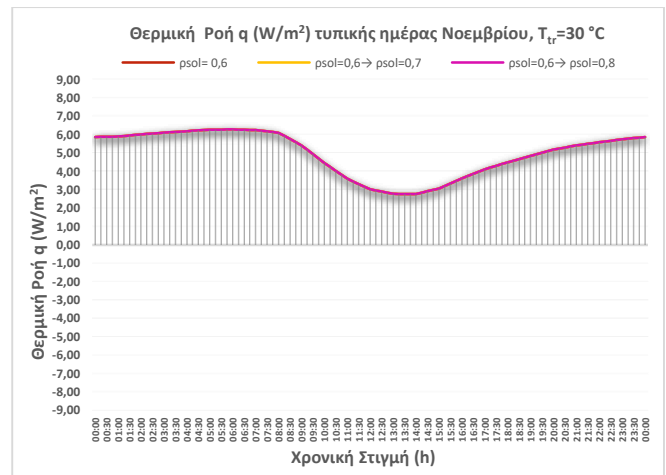


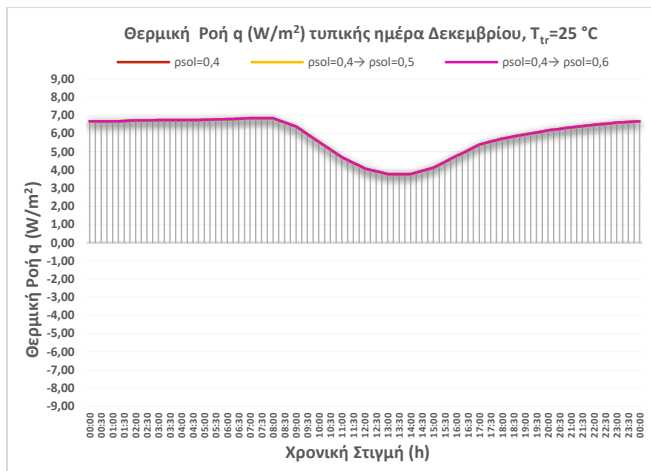
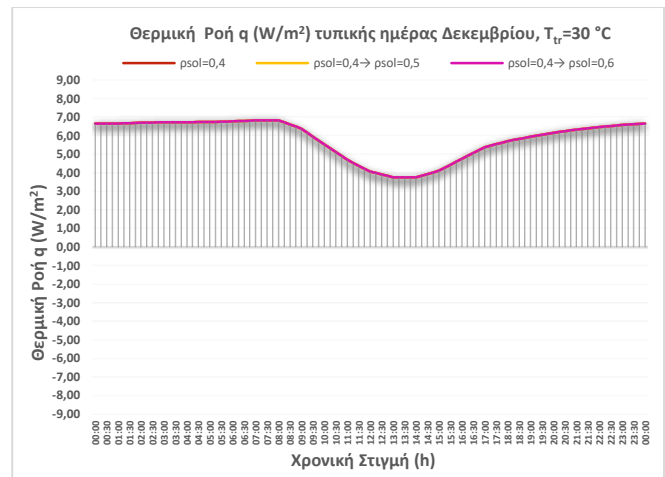
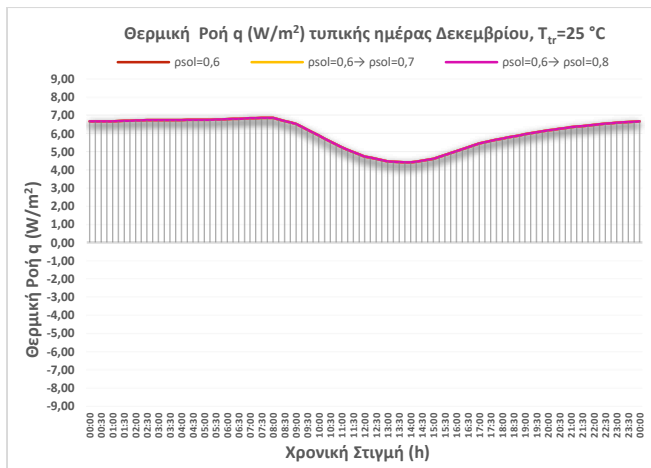
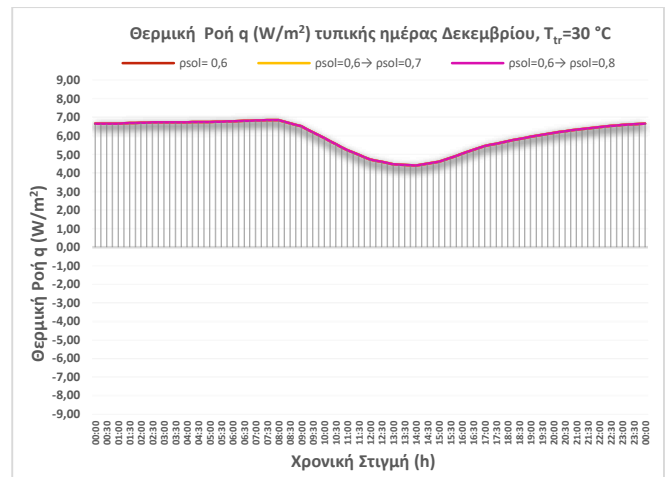
(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6



(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6

Σχήμα 4.3.8 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Οκτώβριο

(α) $T_{tr}=25^\circ C$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^\circ C$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^\circ C$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^\circ C$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6Σχήμα 4.3.9 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Νοέμβριο

(α) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(β) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 1–3(γ) $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6(δ) $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, σενάρια ανακλαστικότητας 4–6*Σχήμα 4.3.10 Ωριαία μεταβολή της θερμικής ροής (q) μέσω του δώματος για τον μήνα Δεκέμβριο.*

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων της ωριαίας μεταβολής της θερμικής ροής διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά της μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, ακολουθώντας τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες και τη λειτουργία του θερμοχρωμικού υλικού. Κατά τους μήνες ανάγκης θερμικού φορτίου (Οκτώβριος–Απρίλιος), η θερμική ροή λαμβάνει κατά κύριο λόγο θετικές τιμές, γεγονός που υποδηλώνει ανάγκη θέρμανσης για τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας αναφοράς, η οποία έχει υπολογιστεί σύμφωνα με το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες, η θερμική ροή λαμβάνει κυρίως αρνητικές τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν στις απαιτήσεις ψύξης του κτιρίου.

Κατά τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο (Σχήματα 4.3.1–4.3.3 και 4.3.11–4.3.12), οι καμπύλες της θερμικής ροής εμφανίζουν ουσιαστικά ταυτόσημη συμπεριφορά για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας και για τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης. Η θερμική ροή παραμένει θετική καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι θερμοκρασίες της εξωτερικής επιφάνειας δεν είναι επαρκείς ώστε να ενεργοποιηθεί ο θερμοχρωμικός μηχανισμός. Ως αποτέλεσμα, δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ των θερμοχρωμικών και των συμβατικών σεναρίων, καθώς το υλικό παραμένει στην έγχρωμη κατάσταση του καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Οι μήνες Απρίλιος και Οκτώβριος (Σχήματα 4.3.4 και 4.3.10) αποτελούν μεταβατικές περιόδους μεταξύ θέρμανσης και ψύξης και παρουσιάζουν την πρώτη διαφοροποίηση στη συμπεριφορά της θερμικής ροής. Ειδικότερα, για θερμοκρασία μετάβασης 25 °C εμφανίζονται αρνητικές τιμές θερμικής ροής για περιορισμένο χρονικό διάστημα μόνο στα σενάρια 1–3, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη αρχική ανακλαστικότητα. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στη μεγαλύτερη απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες της εξωτερικής επιφάνειας και, κατά συνέπεια, στην αντιστροφή της φοράς της θερμικής ροής κατά τις ώρες μέγιστης ηλιακής επιβάρυνσης. Αντίθετα, για θερμοκρασία μετάβασης 30 °C δεν παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά, καθώς η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας παραμένει χαμηλότερη από το όριο ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού υλικού.

Η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού γίνεται ιδιαίτερα εμφανής κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος–Αύγουστος), όπου η θερμική ροή λαμβάνει κυρίως αρνητικές τιμές, υποδηλώνοντας αυξημένες απαιτήσεις ψύξης του κτιρίου. Από τη σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τελική τιμή της ανακλαστικότητας μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση, τόσο μικρότερες είναι οι απόλυτες τιμές της αρνητικής θερμικής ροής. Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στη μειωμένη απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας από την εξωτερική επιφάνεια του δώματος, γεγονός που περιορίζει τη θερμική επιβάρυνσή της και, κατά συνέπεια, μειώνει το ψυκτικό φορτίο που διέρχεται μέσω του δομικού στοιχείου.

Η παραπάνω τάση επιβεβαιώνεται σε όλα τα εξεταζόμενα διαγράμματα, όπου το σενάριο με τη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα εμφανίζει συστηματικά τις χαμηλότερες απόλυτες τιμές θερμικής ροής. Αντίθετα, τα σενάρια με μικρότερη μεταβολή της ανακλαστικότητας

παρουσιάζουν μεγαλύτερες αρνητικές θερμικές ροές, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη θερμική επιβάρυνση του δώματος. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται τόσο στη σύγκριση των σεναρίων 1–3 όσο και των σεναρίων 4–6, αναδεικνύοντας τη σημαντική συμβολή της αυξημένης ανακλαστικότητας στον περιορισμό των απαιτήσεων ψύξης.

Συγκρίνοντας τα υποδιαγράμματα των δύο εξεταζόμενων θερμοκρασιών μετάβασης, προκύπτει ότι η περίπτωση $T_{tr}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ οδηγεί σε συχνότερη και μεγαλύτερης διάρκειας ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού. Ως αποτέλεσμα, η επιφάνεια παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε κατάσταση αυξημένης ανακλαστικότητας, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη μείωση των απόλυτων τιμών της θερμικής ροής. Αντίθετα, για θερμοκρασία μετάβασης $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ η ενεργοποίηση πραγματοποιείται μόνο όταν η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας υπερβεί το αντίστοιχο όριο ενεργοποίησης, με αποτέλεσμα το θερμοχρωμικό υλικό να παραμένει ενεργό για μικρότερο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, η αυξημένη ανακλαστικότητα αξιοποιείται για λιγότερες ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, γεγονός που περιορίζει τη μείωση της θερμικής ροής μέσω του δώματος.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων για θερμοκρασία μετάβασης $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ αποτελεί η εμφάνιση τμημάτων σχεδόν σταθερής θερμικής ροής για ορισμένο χρονικό διάστημα, τα οποία παρατηρούνται αποκλειστικά στα θερμοχρωμικά σενάρια και όχι στα αντίστοιχα συμβατικά σενάρια σταθερής ανακλαστικότητας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας προσεγγίζει το όριο ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού υλικού χωρίς να το υπερβαίνει άμεσα. Κατά το διάστημα αυτό η ανακλαστικότητα του υλικού παραμένει αμετάβλητη, με αποτέλεσμα η θερμική ροή να μεταβάλλεται ελάχιστα έως ότου ενεργοποιηθεί ο θερμοχρωμικός μηχανισμός. Αντίστοιχη συμπεριφορά αναμένεται και για θερμοκρασία μετάβασης $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, χωρίς όμως να είναι εμφανής στα διαγράμματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοχρωμική μετάβαση πραγματοποιείται σε χρονική στιγμή κατά την οποία η υπολογιζόμενη ισοδύναμη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας δεν έχει ακόμη υπερβεί την εσωτερική θερμοκρασία αναφοράς. Κατά συνέπεια, δεν έχουν ακόμη εμφανιστεί απαιτήσεις ψύξης και το αντίστοιχο τμήμα της καμπύλης δεν αποτυπώνεται ως περιοχή σταθερής αρνητικής θερμικής ροής.

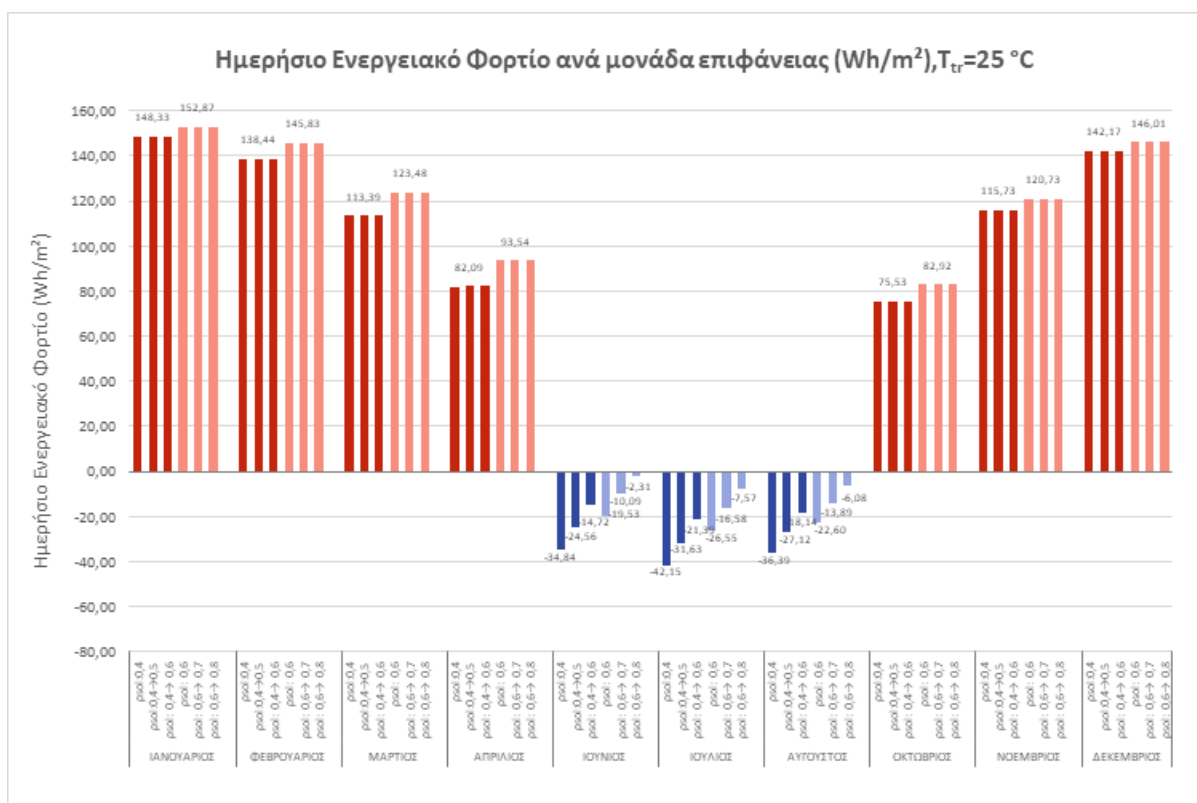
Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού στη θερμική ροή δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη μέγιστη τιμή ανακλαστικότητας που επιτυγχάνεται μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση, αλλά και από τη χρονική στιγμή και τη διάρκεια ενεργοποίησης του μηχανισμού. Επομένως, η επιλογή της θερμοκρασίας μετάβασης

αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη θερμική απόδοση του δώματος, καθώς καθορίζει τον βαθμό αξιοποίησης των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων του υλικού κατά τη διάρκεια της ημέρας.

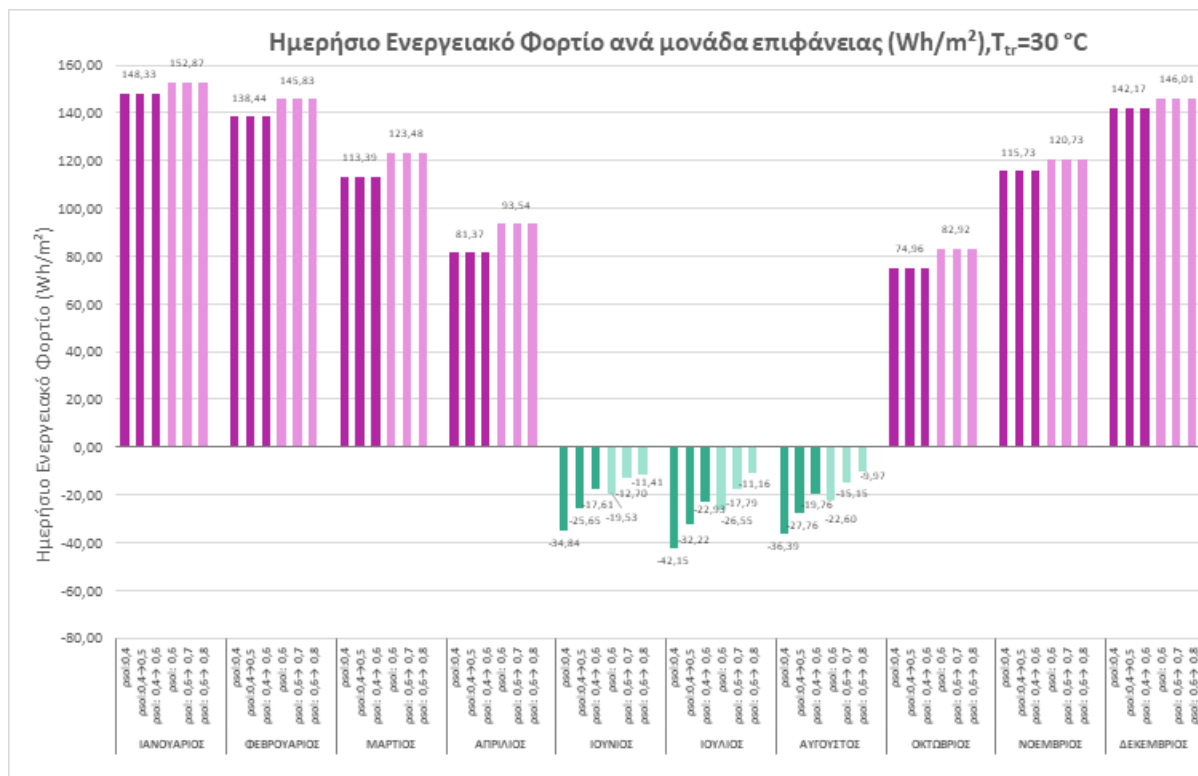
4.4 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στη συνέχεια της ανάλυσης εξετάζεται το ημερήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος, το οποίο υπολογίζεται από τη θερμική ροή για κάθε χρονικό βήμα των 15 λεπτών και εκφράζει τη συνολική ημερήσια ενεργειακή απαίτηση ανά μονάδα επιφάνειας για την τυπική ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα. Το μέγεθος αυτό αποτελεί βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της επίδρασης των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων του υλικού στη θερμική απόδοση του δώματος.

Ακολουθώς παρουσιάζονται τα διαγράμματα του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας για κάθε εξεταζόμενο μήνα και για τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης (25 °C και 30 °C). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας, ώστε να αξιολογηθεί συγκριτικά η επίδραση τόσο της θερμοκρασίας μετάβασης όσο και της μεταβολής της ανακλαστικότητας στις ημερήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του δώματος.



Σχήμα 4.4.1 Ημερήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για την τυπική ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα (T_{tr}=25°C).



Σχήμα 4.4.2 Ημερήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για την τυπική ημέρα κάθε εξεταζόμενου μήνα (T_{tr}=30°C).

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας διαπιστώνεται ότι η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού διαφοροποιείται σημαντικά ανάμεσα στη χειμερινή και τη θερινή περίοδο. Κατά τους μήνες θέρμανσης, το ημερήσιο ενεργειακό φορτίο παρουσιάζει μικρή ή και μηδενική διακύμανση μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες οι αποκλίσεις αυξάνονται σημαντικά, αναδεικνύοντας τη συμβολή του θερμοχρωμικού υλικού στον περιορισμό των απαιτήσεων ψύξης του κτιρίου.

Κατά τους μήνες της περιόδου θέρμανσης (Ιανουάριος–Μάρτιος και Νοέμβριος–Δεκέμβριος), το θερμοχρωμικό υλικό δεν ενεργοποιείται, καθώς η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας παραμένει χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης. Ως αποτέλεσμα, τα σενάρια με την ίδια αρχική ανακλαστικότητα εμφανίζουν πρακτικά ταυτόσημες τιμές ημερήσιου ενεργειακού φορτίου, ανεξάρτητα από την τελική τιμή της ανακλαστικότητας μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση. Εξαιρέση αποτελούν ο Απρίλιος και ο Οκτώβριος για θερμοκρασία μετάβασης T_{tr}=25°C, όπου παρατηρείται περιορισμένη ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού κατά τις θερμότερες ώρες της ημέρας. Ως αποτέλεσμα, εμφανίζονται μικρές αποκλίσεις στο ημερήσιο ενεργειακό φορτίο μεταξύ των θερμοχρωμικών σεναρίων, οι οποίες όμως

παραμένουν ιδιαίτερα περιορισμένες. Αντίθετα, για θερμοκρασία μετάβασης $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$ δεν παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά, καθώς οι θερμοκρασίες της εξωτερικής επιφάνειας δεν υπερβαίνουν το απαιτούμενο όριο μετάβασης. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου παραμένουν ουσιαστικά ίδιες με εκείνες των αντίστοιχων σεναρίων σταθερής ανακλαστικότητας.

Υπενθυμίζεται ότι οι μήνες Μάιος και Σεπτέμβριος δεν παρουσιάζονται στα διαγράμματα του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου, καθώς, σύμφωνα με την παραδοχή της παρούσας μελέτης, δεν συμμετέχουν στην ενεργειακή αξιολόγηση λόγω του μεταβατικού χαρακτήρα τους.

Η επίδραση του θερμοχρωμικού υλικού γίνεται ιδιαίτερα εμφανής κατά τους θερινούς μήνες (Ιούνιος–Αύγουστος), όπου παρατηρείται σημαντική μείωση των απαιτήσεων ψύξης όσο αυξάνεται η τελική τιμή της ανακλαστικότητας μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση. Η σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων δείχνει ότι το ημερήσιο ενεργειακό φορτίο μειώνεται συστηματικά όσο αυξάνεται η τελική τιμή της ανακλαστικότητας. Επομένως, τα ενεργειακά ευνοϊκότερα αποτελέσματα καταγράφονται στα σενάρια 3 ($\rho_{sol}=0,4\rightarrow 0,6$) και 6 ($\rho_{sol}=0,6\rightarrow 0,8$), τα οποία εμφανίζουν τις χαμηλότερες απόλυτες τιμές ημερήσιου ενεργειακού φορτίου κατά τους θερινούς μήνες. Αντίθετα, τα σενάρια σταθερής ανακλαστικότητας (1 και 4) οδηγούν στις υψηλότερες απαιτήσεις ψύξης, ενώ τα σενάρια 2 και 5 παρουσιάζουν ενδιάμεση ενεργειακή συμπεριφορά. Η κατάταξη αυτή διατηρείται σταθερή και για τους τρεις θερινούς μήνες, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η αύξηση της τελικής ανακλαστικότητας αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα περιορισμού του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου.

Προκειμένου να αποτιμηθεί ποσοτικά η επίδραση της μεταβολής της ανακλαστικότητας στις απαιτήσεις ψύξης, υπολογίστηκε η ποσοστιαία μείωση του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου μεταξύ των διαδοχικών σεναρίων ανακλαστικότητας για τους θερινούς μήνες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.1 και επιτρέπουν την άμεση σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης των εξεταζόμενων σεναρίων για τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης.

.Μήνας	T_{tr}	1→2	1→3	2→3	4→5	4→6	5→6
Ιούνιος	25 °C	29,51%	57,75%	40,07%	48,34%	88,17%	77,11%
Ιούλιος	25 °C	24,96%	49,25%	32,37%	37,02%	71,49%	54,72%
Αύγουστος	25 °C	25,47%	50,15%	33,11%	38,54%	73,10%	56,23%
Ιούνιος	30 °C	26,38%	49,45%	31,35%	34,97%	41,58%	10,16%
Ιούλιος	30 °C	23,56%	45,60%	28,83%	32,99%	57,97%	37,27%
Αύγουστος	30 °C	23,72%	45,70%	28,82%	32,96%	55,88%	34,19%

Πίνακας 4.4.1 Ποσοστιαία μεταβολή του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου μεταξύ των εξεταζόμενων σεναρίων για τους θερινούς μήνες

Από τα ποσοστά του Πίνακα 4.4.1 προκύπτει ότι η αύξηση της τελικής ανακλαστικότητας συνοδεύεται από συστηματική μείωση του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου για όλους τους θερινούς μήνες και για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες μετάβασης. Παράλληλα, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της ανακλαστικότητας μεταξύ δύο διαδοχικών σεναρίων, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ενεργειακό όφελος που επιτυγχάνεται. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση καταγράφεται στη σύγκριση των σεναρίων 4 και 6 για τον μήνα Ιούνιο και θερμοκρασία μετάβασης 25 °C, όπου το ημερήσιο ενεργειακό φορτίο μειώνεται κατά 88,17 %. Η ιδιαίτερα υψηλή αυτή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι το σενάριο 6 εμφανίζει πολύ μικρό υπολειπόμενο ψυκτικό φορτίο ($-2,31 \text{ Wh/m}^2$), γεγονός που οδηγεί σε ιδιαίτερα μεγάλη ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το σενάριο 4 ($-19,53 \text{ Wh/m}^2$).

Αντίθετα, οι μικρότερες ποσοστιαίες μεταβολές εμφανίζονται μεταξύ των διαδοχικών σεναρίων με μικρότερη μεταβολή της ανακλαστικότητας, όπως στις συγκρίσεις 1→2 και 5→6 για θερμοκρασία μετάβασης 30 °C. Στις περιπτώσεις αυτές, η αύξηση της ανακλαστικότητας είναι μικρότερη ή η ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού υλικού πραγματοποιείται για περιορισμένο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο ενεργειακό όφελος.

Συνολικά, ο πίνακας επιβεβαιώνει ότι το ενεργειακό όφελος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τελική τιμή της ανακλαστικότητας, αλλά και από τη θερμοκρασία μετάβασης, η οποία καθορίζει τη χρονική διάρκεια κατά την οποία το υλικό παραμένει στην κατάσταση αυξημένης ανακλαστικότητας. Για τον λόγο αυτό, οι μεγαλύτερες ποσοστιαίες μειώσεις καταγράφονται συστηματικά για θερμοκρασία μετάβασης 25 °C, όπου το θερμοχρωμικό υλικό ενεργοποιείται νωρίτερα και αξιοποιεί αποτελεσματικότερα τις υψηλές θερινές θερμοκρασίες.

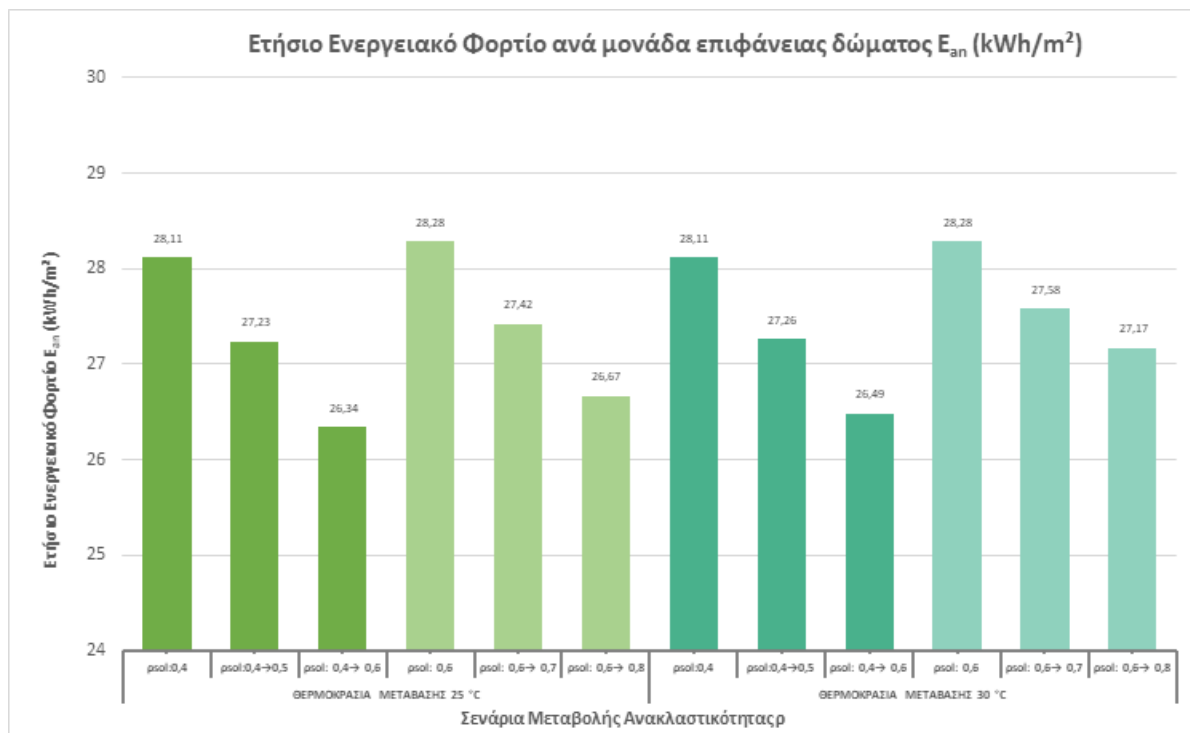
Παράλληλα, η σύγκριση των δύο θερμοκρασιών μετάβασης δείχνει ότι για όλα τα θερμοχρωμικά σενάρια οι τιμές του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου είναι συστηματικά χαμηλότερες στην περίπτωση $T_H=25^\circ\text{C}$ σε σχέση με την περίπτωση $T_H=30^\circ\text{C}$. Η διαφορά αυτή γίνεται περισσότερο εμφανής στα σενάρια με μεγαλύτερη μεταβολή της ανακλαστικότητας, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων του υλικού και οδηγεί σε μεγαλύτερο περιορισμό των απαιτήσεων ψύξης. Αντίθετα, στα σενάρια σταθερής ανακλαστικότητας (1 και 4) οι τιμές παραμένουν αμετάβλητες μεταξύ των δύο περιπτώσεων, καθώς δεν πραγματοποιείται θερμοχρωμική μετάβαση.

Συνολικά, η ανάλυση του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου καταδεικνύει ότι η ενεργειακή συμπεριφορά του δώματος επηρεάζεται ουσιαστικά από τον συνδυασμό της θερμοκρασίας μετάβασης και του εύρους μεταβολής της ανακλαστικότητας του θερμοχρωμικού υλικού. Η χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης $T_H=25^{\circ}\text{C}$, σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα, οδηγεί στον αποτελεσματικότερο περιορισμό των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων, χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά τις απαιτήσεις θέρμανσης κατά τους χειμερινούς μήνες. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η επιλογή των θερμοχρωμικών χαρακτηριστικών του υλικού μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του δώματος κατά τη θερινή περίοδο.

4.5 ΕΤΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του δώματος και ως απόρροια όλων υπολογισμών και αναλύσεων που προηγήθηκαν σε αυτή την ενότητα εξετάζεται το ετήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας και τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού. Το μέγεθος αυτό προκύπτει από τη συνδυαστική αξιολόγηση των ημερήσιων ενεργειακών φορτίων των αντιπροσωπευτικών ημερών κάθε μήνα και εκφράζει τη συνολική ετήσια ενεργειακή απαίτηση του δώματος ανά μονάδα επιφάνειας.

Στο Σχήμα 4.5.1 παρουσιάζεται το ετήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας και τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού (25°C και 30°C). Το διάγραμμα επιτρέπει την άμεση σύγκριση της συνολικής ετήσιας ενεργειακής απόδοσης των εξεταζόμενων σεναρίων, αναδεικνύοντας τη συνδυασμένη επίδραση της αρχικής και τελικής ανακλαστικότητας καθώς και της θερμοκρασίας μετάβασης στο συνολικό ενεργειακό φορτίο του δώματος.



Σχήμα 4.5.1 Ετήσιο ενεργειακό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια ανακλαστικότητας και τις δύο θερμοκρασίες μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού (25 °C και 30 °C).

Από την παρατήρηση του Σχήματος 4.5.1 διαπιστώνεται ότι το ετήσιο ενεργειακό φορτίο επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία μετάβασης όσο και από τα χαρακτηριστικά ανακλαστικότητας του θερμοχρωμικού υλικού. Για κάθε ομάδα εξεταζόμενων σεναρίων, η εφαρμογή θερμοχρωμικού υλικού οδηγεί σε μικρότερο ετήσιο ενεργειακό φορτίο σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο σταθερής ανακλαστικότητας, ενώ η σταδιακή αύξηση της τελικής ανακλαστικότητας συνοδεύεται από διαδοχική μείωση των ετήσιων ενεργειακών απαιτήσεων. Η τάση αυτή παρατηρείται τόσο στην ομάδα των σεναρίων με αρχική ανακλαστικότητα $rsol=0,4$ όσο και στην αντίστοιχη ομάδα με αρχική ανακλαστικότητα $rsol=0,6$, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η μεταβολή της ανακλαστικότητας κατά τη διάρκεια του έτους συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του δώματος.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, τόσο για θερμοκρασία μετάβασης 25 °C όσο και για 30 °C, το χαμηλότερο ετήσιο ενεργειακό φορτίο δεν αντιστοιχεί στο σενάριο με τη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα, αλλά στο σενάριο 3 ($rsol=0,4 \rightarrow 0,6$, $T_{tr}=25^\circ\text{C}$) το οποίο παρουσιάζει ετήσιο ενεργειακό φορτίο 26,34 kWh/m². Αντίθετα, το σενάριο 6 ($rsol=0,6 \rightarrow 0,8$, $T_{tr}=25^\circ\text{C}$), παρότι διαθέτει υψηλότερη τελική ανακλαστικότητα και εμφανίζει μικρότερα ψυκτικά φορτία κατά τους θερινούς μήνες, παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερο ετήσιο ενεργειακό φορτίο (26,83 kWh/m²). Η συμπεριφορά αυτή καταδεικνύει ότι η συνολική ενεργειακή απόδοση δεν

εξαρτάται αποκλειστικά από τον περιορισμό των απαιτήσεων ψύξης, αλλά από την ισορροπία μεταξύ των απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης κατά τη διάρκεια του έτους. Η υψηλότερη αρχική ανακλαστικότητα ($\rho_{sol}=0,6$) περιορίζει αποτελεσματικότερα την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη θερινή περίοδο, μειώνοντας τα ψυκτικά φορτία. Ωστόσο, κατά τους μήνες θέρμανσης περιορίζει και τα παθητικά ηλιακά κέρδη του δώματος, οδηγώντας σε ελαφρώς αυξημένες απαιτήσεις θέρμανσης και, τελικά, σε υψηλότερο συνολικό ετήσιο ενεργειακό φορτίο.

Η σύγκριση των δύο θερμοκρασιών μετάβασης δείχνει ότι για όλα τα θερμοχρωμικά σενάρια η περίπτωση των 25°C οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές ετήσιου ενεργειακού φορτίου σε σχέση με την περίπτωση των 30°C . Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής στα σενάρια με μεγαλύτερη μεταβολή της ανακλαστικότητας και επιβεβαιώνει ότι η χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης επιτρέπει αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων του υλικού σε ετήσια βάση. Αντίθετα, στα σενάρια σταθερής ανακλαστικότητας (1 και 4) δεν παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιπτώσεων, καθώς η απουσία θερμοχρωμικής μετάβασης καθιστά τη θερμοκρασία μετάβασης χωρίς επίδραση στο ετήσιο ενεργειακό αποτέλεσμα.

Συνολικά, η αξιολόγηση του ετήσιου ενεργειακού φορτίου καταδεικνύει ότι η ενεργειακή απόδοση του θερμοχρωμικού δώματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη μέγιστη τιμή της ανακλαστικότητας που επιτυγχάνεται μετά τη μετάβαση, αλλά από τον συνδυασμό της αρχικής ανακλαστικότητας, της θερμοκρασίας μετάβασης και της χρονικής διάρκειας λειτουργίας του θερμοχρωμικού υλικού. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη ενεργειακή συμπεριφορά επιτυγχάνεται όταν εξισορροπούνται αποτελεσματικά οι απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση της συμβολής των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στη θερμική απόκριση των δωματίων, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασής τους στις ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο θερμικής συμπεριφοράς, μέσω του οποίου εξετάστηκε η λειτουργία θερμοχρωμικών επιχρισμάτων διαφορετικής θερμοκρασίας μετάβασης και διαφορετικού εύρους μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση αντιπροσωπευτικές ημερήσιες κλιματικές συνθήκες για κάθε μήνα του έτους και περιλάμβανε τη μελέτη της χρονικής απόκρισης του υλικού, της ισοδύναμης εξωτερικής θερμοκρασίας, της θερμικής ροής, του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου και, τελικά, του ετήσιου ενεργειακού φορτίου ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κατέδειξε ότι τα θερμοχρωμικά υλικά αποτελούν μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες προσαρμοζόμενων επιφανειών για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, καθώς έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν δυναμικά την ηλιακή τους ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από παραμέτρους όπως η θερμοκρασία μετάβασης και το εύρος μεταβολής της ανακλαστικότητας, οι οποίες δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς για τις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας. Η παρούσα εργασία συνέβαλε στη διερεύνηση των παραμέτρων αυτών μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης διαφορετικών θερμοχρωμικών σεναρίων.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο επέτρεψε τη συστηματική διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας μετάβασης και της μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας στη θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά του δώματος. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης έξι διαφορετικών σεναρίων ανακλαστικότητας και δύο θερμοκρασιών μετάβασης, εξετάζοντας τη λειτουργία του θερμοχρωμικού υλικού σε ωριαία, ημερήσια και ετήσια βάση. Η προσέγγιση αυτή κατέστησε δυνατή τη συνολική αποτίμηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου, καθώς και την ανάδειξη του συνδυασμού χαρακτηριστικών που οδηγεί στη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση του δώματος.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων κατέδειξε ότι η λειτουργία του θερμοχρωμικού υλικού μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του έτους, ακολουθώντας τις εκάστοτε κλιματικές συνθήκες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας παραμένει

χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης, με αποτέλεσμα το υλικό να διατηρεί την αρχική του ανακλαστικότητα και να παρουσιάζει συμπεριφορά αντίστοιχη με εκείνη των συμβατικών επιχρισμάτων. Αντίθετα, κατά τους θερινούς μήνες, η ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού οδηγεί σε αύξηση της ανακλαστικότητας, περιορίζοντας την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώθηκε στη μείωση της ισοδύναμης υπολογιζόμενης εξωτερικής θερμοκρασίας, στη μείωση της θερμικής ροής μέσω του δώματος και, κατ' επέκταση, στη μείωση του ημερήσιου ενεργειακού φορτίου, επιβεβαιώνοντας τη θετική συμβολή των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στον περιορισμό των απαιτήσεων ψύξης του κτιρίου.

Η αξιολόγηση του ετήσιου ενεργειακού φορτίου επιβεβαίωσε ότι η θερμοκρασία μετάβασης αποτελεί καθοριστική παράμετρο για την ενεργειακή απόδοση των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων. Ειδικότερα, η θερμοκρασία μετάβασης $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$ οδήγησε συστηματικά σε χαμηλότερες ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις σε σχέση με την περίπτωση $T_{tr}=30^{\circ}\text{C}$, καθώς η πρωιμότερη ενεργοποίηση του θερμοχρωμικού μηχανισμού επέτρεψε την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση της αυξημένης ανακλαστικότητας κατά τη θερινή περίοδο. Η μεγαλύτερη χρονική διάρκεια λειτουργίας του υλικού σε κατάσταση υψηλής ανακλαστικότητας είχε ως αποτέλεσμα τον αποτελεσματικότερο περιορισμό της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και, κατ' επέκταση, τη μείωση των συνολικών απαιτήσεων ψύξης, γεγονός που αποτυπώθηκε στο μικρότερο ετήσιο ενεργειακό φορτίο.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της εργασίας είναι ότι η βέλτιστη ετήσια ενεργειακή απόδοση δεν επιτυγχάνεται από το σενάριο με τη μεγαλύτερη τελική ανακλαστικότητα, αλλά από εκείνο που εξασφαλίζει την αποτελεσματικότερη ισορροπία μεταξύ των απαιτήσεων θέρμανσης και ψύξης. Συγκεκριμένα, το Σενάριο 3 ($\rho_{sol}=0,4 \rightarrow 0,6$, $T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$) παρουσίασε το μικρότερο ετήσιο ενεργειακό φορτίο από όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αύξηση της ανακλαστικότητας μετά τη θερμοχρωμική μετάβαση πρέπει να συνδυάζεται με κατάλληλη αρχική ανακλαστικότητα. Αντίθετα, η υιοθέτηση ιδιαίτερα υψηλής αρχικής ανακλαστικότητας, παρότι περιορίζει αποτελεσματικότερα τα θερινά ψυκτικά φορτία, οδηγεί σε περιορισμό των παθητικών ηλιακών κερδών κατά τη χειμερινή περίοδο και τελικά σε λιγότερο ευνοϊκή ετήσια ενεργειακή συμπεριφορά.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας επιβεβαιώνουν ότι τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα αποτελούν μια ιδιαίτερα ελπιδοφόρα παθητική τεχνολογία για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των δωματίων, υπό την προϋπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά τους επιλέγονται με γνώμονα τις κλιματικές συνθήκες εφαρμογής και τις ενεργειακές απαιτήσεις

του κτιρίου. Η συστηματική αξιολόγηση διαφορετικών συνδυασμών θερμοκρασίας μετάβασης και μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας ανέδειξε ότι δεν υπάρχει μία βέλτιστη λύση για όλες τις εφαρμογές, αλλά ότι η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Για τις κλιματικές συνθήκες της Θεσσαλονίκης, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο κατάλληλος συνδυασμός των χαρακτηριστικών του θερμοχρωμικού επιχρίσματος μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του ετήσιου ενεργειακού φορτίου. Επομένως, η μεθοδολογία και τα ευρήματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν ως εργαλείο υποστήριξης κατά τον σχεδιασμό και την επιλογή θερμοχρωμικών επιχρισμάτων για κτίρια που βρίσκονται σε περιοχές με αντίστοιχα κλιματικά χαρακτηριστικά, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικότερων εφαρμογών.

Παρά τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων, η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των συμπερασμάτων. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά για τις κλιματικές συνθήκες της Θεσσαλονίκης και βασίστηκε σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες μετάβασης και σενάρια μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας, ενώ η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω υπολογιστικού μοντέλου χωρίς πειραματική επαλήθευση. Συνεπώς, ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων ενδέχεται να διαφοροποιείται για άλλες κλιματικές συνθήκες ή διαφορετικά χαρακτηριστικά κτιρίων.

Οι περιορισμοί αυτοί δημιουργούν προοπτικές για περαιτέρω έρευνα. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να επεκτείνουν την παρούσα προσέγγιση εξετάζοντας διαφορετικές κλιματικές ζώνες, εναλλακτικές θερμοκρασίες μετάβασης, μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της ηλιακής ανακλαστικότητας, καθώς και την επίδραση πρόσθετων παραμέτρων, όπως η θερμική μάζα της κατασκευής, ο φυσικός αερισμός και η πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. International Energy Agency. (2024). Buildings. <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
2. United Nations Environment Programme. (2024). 2024 global status report for buildings and construction. <https://globalabc.org/resources/publications/2024-global-status-report-buildings-and-construction>
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
4. Elaouzy, Y., & El Fadar, A. (2022). Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112828. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112828>
5. Santamouris, M. (2014). Cooling the cities: A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Solar Energy, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
6. Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. Energy and Buildings, 39(11), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>
7. Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research: Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact: Synergies with global climate change. Energy and Buildings, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
8. Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva III, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban heat island: Mechanisms, implications, and possible remedies. Annual Review of Environment and Resources, 40, 285–307. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>
9. Levinson, R., & Akbari, H. (2010). Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: Conserving energy, saving money, and reducing emissions of greenhouse gases and air pollutants. Energy Efficiency, 3(1), 53–109. <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9038-2>
10. Levinson, R., Akbari, H., Konopacki, S., & Bretz, S. (2005). Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements. Energy Policy, 33(2), 151–170. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00206-4)
11. Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings—Past, present and future. Energy and Buildings, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
12. Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., & Livada, I. (2009).

- Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83(4), 538–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>
13. Hu, C., Ge, L., & Meng, X. (2024). Applications of thermochromic material in opaque building envelopes: A comprehensive review. *Materials Today Sustainability*, 28, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.101009>
 14. Verhoeven, J. W. (1996). Glossary of terms used in photochemistry (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, 68(12), 2223-2286.
 15. Kulčar, R., Friškovec, M., Hauptman, N., Vesel, A., & Gunde, M. K. (2010). Colorimetric properties of reversible thermochromic printing inks. *Dyes and pigments*, 86(3), 271-277.
 16. Zhang, W., Ji, X., Zeng, C., Chen, K., Yin, Y., & Wang, C. (2017). A new approach for the preparation of durable and reversible color changing polyester fabrics using thermochromic leuco dye-loaded silica nanocapsules. *Journal of materials chemistry C*, 5(32), 8169-8178.
 17. Yu, C., Zhang, Y., Cheng, D., Li, X., Huang, Y., & Rogers, J. A. (2014). All-elastomeric, strain-responsive thermochromic color indicators. *small*, 10(7), 1266-1271.
 18. Cui, Y., Ke, Y., Liu, C., Chen, Z., Wang, N., Zhang, L., ... & Long, Y. (2018). Thermochromic VO₂ for energy-efficient smart windows. *Joule*, 2(9), 1707-1746.
 19. Zhou, Q. M., Deng, Z. R., Yu, S. S., Wang, L., Duan, H. B., Zou, Y., & Ren, X. M. (2018). Dual Emissions and Thermochromic Luminescence Behavior of Chloroplumbate Organic–Inorganic Hybrid Crystals. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2018(33), 3748-3756.
 20. Day, J. H. (1963). Thermochromism. *Chemical Reviews*, 63(1), 65-80.
 21. Day, J. H. (1968). Thermochromism of inorganic compounds. *Chemical Reviews*, 68(6), 649-657.
 22. Seeboth, A., Lotzsch, D., Ruhmann, R., & Muehling, O. (2014). Thermochromic Polymers • Function by Design. *Chemical reviews*, 114(5), 3037-3068.
 23. Meng, X., Meng, L., & Wang, J. H. (2022). Energy-saving contribution of the thermochromic coating in exterior walls in hot-summer and cold-winter zone. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 710–719.
 24. Meng, X., Wang, J. H., & Liu, S. H. (2022). Comparative analysis between constant and variable solar radiation reflectivity for exterior walls in the hot-summer and cold-winter zone. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 571–580.
 25. Berardi, U., Garai, M., & Morselli, T. (2020). Preparation and assessment of the potential energy savings of thermochromic and cool coatings considering inter-building effects. *Solar Energy*, 209, 493–504.

26. Fabiani, C., Pisello, A. L., Bou-Zeid, E., Yang, J., & Cotana, F. (2019). Adaptive measures for mitigating urban heat islands: The potential of thermochromic materials to control roofing energy balance. *Applied Energy*, 247, 155–170.
27. Fabiani, C., Castaldo, V. L., & Pisello, A. L. (2020). Thermochromic materials for indoor thermal comfort improvement: Finite difference modeling and validation in a real case-study building. *Applied Energy*, 262, 114147.
28. Hu, J. Y., & Yu, X. (2019). Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions. *Solar Energy*, 193, 866–877.
29. Hakami, A., Srinivasan, S. S., Biswas, P. K., Krishnegowda, A., Wallen, S. L., & Stefanakos, E. K. (2022). Review on thermochromic materials: Development, characterization, and applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(2), 377–402.
30. Mehta, S., Kushwaha, A., Kisannagar, R. R., & Gupta, D. (2020). Fabrication of a reversible thermochromism based temperature sensor using an organic–inorganic composite system. *RSC Advances*, 10(36), 21270–21276.
31. Yang, J., & Sweeney, D. (1979). Infrared holography using the thermochromic material Cu_2HgI_4 . *Applied Optics*, 18(14), 2398–2406.
32. Willett, R. D., Haugen, J. A., Lebsack, J., & Morrey, J. (1974). Thermochromism in copper(II) chlorides: Coordination geometry changes in tetrachlorocuprate(II) anions. *Inorganic Chemistry*, 13(10), 2510–2513. geometry changes in tetrachlorocuprate (2-) anions. *Inorganic chemistry*, 13(10), 2510-2513.
33. Nguyen, D. K., Lee, H., & Kim, I.-T. (2017). Synthesis and thermochromic properties of Cr-doped Al_2O_3 for a reversible thermochromic sensor. *Materials*, 10(5), 476. <https://doi.org/10.3390/ma10050476>
34. Wen, C., Feng, L., Li, Z., Bai, J., Wang, S., Gao, X., ... & Yao, W. (2024). A review of the preparation, properties and applications of VO_2 thin films with the reversible phase transition. *Frontiers in Materials*, 11, 1341518. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1341518>
35. Ji, Y., Mattsson, A., Niklasson, G. A., Granqvist, C. G., & Österlund, L. (2019). Synergistic TiO_2/VO_2 window coating with thermochromism, enhanced luminous transmittance, and photocatalytic activity. *Joule*, 3(10), 2457–2471. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.006>
36. Lumsden, M., Steinitz, M., & McAlduff, E. J. (1995). Phase transitions involving vacancy ordering in two metal mercuric iodides, Ag_2HgI_4 and Cu_2HgI_4 . *Journal of Applied Physics*, 77(11), 6039–6041.
37. Salem, A. M., El-Gendy, Y. A., Sakr, G. B., & Soliman, W. Z. (2008). Optical properties of thermochromic Cu_2HgI_4 thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(2), 025311. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/2/025311>
38. Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). TiO_2 photocatalysis: A historical overview and future prospects. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12), 8269–

8285. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8269>

39. Chen, C. H., Kelder, E. M., & Schoonman, J. (1999). Electrostatic sol-spray deposition (ESSD) and characterisation of nanostructured TiO₂ thin films. *Thin Solid Films*, 342(1–2), 35–41.
40. Gouttebaron, R., Cournelissen, D., Snyders, R., Dauchot, J. P., Wautelet, M., & Hecq, M. (2000). XPS study of TiO_x thin films prepared by d.c. magnetron sputtering in Ar–O₂ gas mixtures. *Surface and Interface Analysis*, 30(1), 527–530.
41. ASTM International. (1996). ASTM E903-96: Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres. ASTM International.
42. Macleod, H. A. (1986). *Thin film optical filters* (2nd ed.). Adam Hilger.30. A.J. Moses, *Optical Materials Properties*, Hughes Aircraft Company, Culver City, CA, 1971.
43. Gülşen, G., & İnci, M. N. (2002). Thermal optical properties of TiO₂ films. *Optical Materials*, 18(4), 373–381.
44. Belykh, A. V., Efremov, A. M., & Mikhailov, M. D. (2012). Thermochromic material (European Patent No. EP 1405890 B1). European Patent Office.
45. Salek, G., Devoti, A., Lataste, E., Demourgues, A., Garcia, A., Jubera, V., & Gaudon, M. (2016). Optical properties versus temperature of Cr-doped γ- and α-Al₂O₃: Irreversible thermal sensors application. *Journal of Luminescence*, 179, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2016.06.034>
46. Miller, M. J., & Wang, J. (2016). Multilayer ITO/VO₂/TiO₂ thin films for control of solar and thermal spectra. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 154, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.026>
47. Phillips, G. K. (2000, April). Combining thermochromics and conventional inks to deter document fraud. In *Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques III* (Vol. 3973, pp. 99–104). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.390013>
48. Rao, N. M. (2016). Biomedical application of thermochromic liquid crystals and leuco dyes for temperature monitoring in the extremities (Doctoral dissertation, Kent State University).
49. Samat, A., & Lokshin, V. (2002). Thermochromism of organic compounds. In H. S. Dürr & H. Bouas-Laurent (Eds.), *Organic photochromic and thermochromic compounds* (Vol. 2, pp. 415–466). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-46938-X_9
50. Cheng, Y., Zhang, X., Fang, C., Chen, J., & Wang, Z. (2018). Discoloration mechanism, structures and recent applications of thermochromic materials via different methods: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(12), 2225–2234. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.07.007>
51. White, M. A., & LeBlanc, M. (1999). Thermochromism in commercial products. *Journal of Chemical Education*, 76(9), 1201. <https://doi.org/10.1021/ed076p1201>

52. Christie, R. M., Robertson, S., & Taylor, S. (2007). Design concepts for a temperature-sensitive environment using thermochromic colour change. *Colour: Design & Creativity*, 1(1), Article 5.41. Panák, O., Držková, M., & Kaplanová, M. (2015). Insight into the evaluation of colour changes of leuco dye based thermochromic systems as a function of temperature. *Dyes and Pigments*, 120, 279-287.
53. Tang, H., MacLaren, D. C., & White, M. A. (2010). New insights concerning the mechanism of reversible thermochromic mixtures. *Canadian Journal of Chemistry*, 88(11), 1063–1070. <https://doi.org/10.1139/V10-065>
54. Christie, R. M. (2013). Chromic materials for technical textile applications. In R. A. Scott (Ed.), *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles* (pp. 3–36). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097613.1.3>
55. Gaḡor, A., Węclawik, M., Bondzior, B., & Jakubas, R. (2015). Periodic and incommensurately modulated phases in a (2-methylimidazolium) tetraiodobismuthate(III) thermochromic organic–inorganic hybrid. *CrystEngComm*, 17(17), 3286–3296. <https://doi.org/10.1039/C5CE00170E>
56. Zhao, X. C., Fu, Y. K., Lei, Y. L., et al. (2022). Crystal structure and thermochromic behavior of the quasi-0D lead-free organic–inorganic hybrid compounds (C₇H₉NF)₈M₄I₁₆ (M = Bi, Sb). *Journal of Alloys and Compounds*, 899, 163278. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163278>
57. Dong, Q. F., Fang, Y. J., Shao, Y. C., et al. (2015). Electron-hole diffusion lengths >175 μm in solution-grown CH₃NH₃PbI₃ single crystals. *Science*, 347(6225), 967–970. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5760>
58. Taylor, W. V., Cammack, C. X., Shubert, S. A., et al. (2019). Thermoluminescent antimony-supported copper-iodo cuboids: Approaching NIR emission via high crystallographic symmetry. *Inorganic Chemistry*, 58(24), 16330–16345. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b02456>
59. Zhang, Y., Tso, C. Y., Iñigo, J. S., et al. (2019). Perovskite thermochromic smart window: Advanced optical properties and low transition temperature. *Applied Energy*, 254, 113690. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113690>
60. Ianoșev, S., Lazău, R., Suba, M., et al. (2009). Synthesis and characterization of some thermoresistant pigments based on the Al³⁺ → Cr³⁺ substitution. *Studia Universitatis Babeș-Bolyai Chimia*, 54(1), 189–201.
61. Islam, M. J., Shahjahan, M., Yuyama, K., et al. (2020). Remote tuning of bandgap and emission of lead perovskites by spatially controlled halide exchange reactions. *ACS Materials Letters*, 2(4), 403–408. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.0c00027>
62. Chen, R., Cheng, Z., Hu, Y., et al. (2020). Discarded clothing acrylic yarns: Low-cost raw materials for deformable carbon nanofibers applied to flexible sodium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 359, 136988. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136988>. Tang, X., Wang, X., Hu, T., et al. (2020). Concerted regulation on vertical orientation and film quality of two-dimensional Ruddlesden-Popper perovskite layer for efficient solar cells. *Science*

China Chemistry, 63, 1675–1683.

63. Arora, N., Dar, M. I., Hinderhofer, A., et al. (2017). Perovskite solar cells with CuSCN hole extraction layers yield stabilized efficiencies greater than 20%. *Science*, 358(6364), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.aam5655>
64. Grancini, G., & Nazeeruddin, M. K. (2019). Dimensional tailoring of hybrid perovskites for photovoltaics. *Nature Reviews Materials*, 4(1), 4–22. <https://doi.org/10.1038/s41578-018-0065-0>
65. Zang, C., Xu, M., Zhang, L., et al. (2021). Organic–inorganic hybrid thin-film light-emitting devices: Interfacial engineering and device physics. *Journal of Materials Chemistry C*, 9, 1484–1519. <https://doi.org/10.1039/D0TC05017K>
66. Deng, W., Fang, H., Jin, X., et al. (2018). Organic–inorganic hybrid perovskite quantum dots for light-emitting diodes. *Journal of Materials Chemistry C*, 6, 4831–4841. <https://doi.org/10.1039/C8TC00599F>
67. Xing, G., Mathews, N., Lim, S., et al. (2014). Low-temperature solution-processed wavelength-tunable perovskites for lasing. *Nature Materials*, 13, 476–480. <https://doi.org/10.1038/nmat3911>
68. Zhu, H., Fu, Y., Meng, F., et al. (2015). Lead halide perovskite nanowire lasers with low lasing thresholds and high-quality factors. *Nature Materials*, 14(6), 636–642. <https://doi.org/10.1038/nmat4271>
69. Ghalsasi, P., Garg, N., Deo, M. N., et al. (2015). The role of Jahn–Teller distortion in insulator-to-semiconductor phase transition in organic–inorganic hybrid compound (p-chloroanilinium)₂CuCl₄ at high pressure. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(48), 32204–32210. <https://doi.org/10.1039/C5CP05476A>
70. Mitzi, D. B. (2001). Templating and structural engineering in organic–inorganic perovskites. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 1–12. <https://doi.org/10.1039/B007070J>
71. Fu, H., Jiang, C., Luo, C., et al. (2021). A quasi-two-dimensional copper-based organic–inorganic hybrid perovskite with reversible thermochromism and ferromagnetism. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2021(47), 4984–4989. <https://doi.org/10.1002/ejic.202100840>
72. Goodby, J. W. (1991). Chirality in liquid crystals. *Journal of Materials Chemistry*, 1(3), 307–318. <https://doi.org/10.1039/JM991010030763>. Finkelmann, H., & Rehage, G. (1980). Investigations on liquid crystalline polysiloxanes. II. Optical properties of cholesteric phases and influence of the flexible spacer on the mobility of the mesogenic groups. *Die Makromolekulare Chemie Rapid Communications*, 1(12), 733–740.
73. Sage, I. (2011). Thermochromic liquid crystals. *Liquid Crystals*, 38(11–12), 1551–1561. <https://doi.org/10.1080/02678292.2011.614709>
74. Yamagishi, T. A., & Sixou, P. (1995). Preparation and characteristics of cholesteric gel from pentyl ether of hydroxypropyl cellulose. *Polymer*, 36(11), 2315–2317.

[https://doi.org/10.1016/0032-3861\(95\)90939-J](https://doi.org/10.1016/0032-3861(95)90939-J)

75. Hikmet, R. A. M., & Polesso, R. (2002). Patterned multicolor switchable cholesteric liquid crystal gels. *Advanced Materials*, 14(7), 502–504. [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(20020404\)14:7<502::AID-ADMA502>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-4095(20020404)14:7<502::AID-ADMA502>3.0.CO;2-U)
76. Park, H., Lee, J. S., Choi, H., Ahn, D. J., & Kim, J. M. (2007). Rational design of supramolecular conjugated polymers displaying unusual colorimetric stability upon thermal stress. *Advanced Functional Materials*, 17(17), 3447–3455. <https://doi.org/10.1002/adfm.200700307>
77. Lam, J. W. Y., Luo, J., Dong, Y., Cheuk, K. K. L., & Tang, B. Z. (2002). Functional polyacetylenes: Synthesis, thermal stability, liquid crystallinity, and light emission of polypropiolates. *Macromolecules*, 35(22), 8288–8299. <https://doi.org/10.1021/ma0207878>
78. Lam, J. W. Y., & Tang, B. Z. (2005). Functional polyacetylenes. *Accounts of Chemical Research*, 38(9), 745–754. <https://doi.org/10.1021/ar0401559>
79. Chen, X., & Yoon, J. (2011). A thermally reversible temperature sensor based on polydiacetylene: Synthesis and thermochromic properties. *Dyes and Pigments*, 89(3), 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2010.12.009>
80. Wang, H., Han, S., Hu, Y., Qi, Z., & Hu, C. (2017). Polydiacetylene-based periodic mesoporous organosilicas with colorimetric reversibility under multiple stimuli. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 517, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.12.060>
81. Miller, R. D., Wallraff, G. M., Baier, M., Cotts, P. M., Shukla, P., Russell, T. P., & Hwang, D. M. (1991). The solution and solid-state thermochromism of unsymmetrically substituted polysilanes. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 1(4), 505–530. <https://doi.org/10.1007/BF00697930>
82. Sanji, T., Sakamoto, K., Sakurai, H., & Ono, K. (1999). A statistical model for the cooperative thermochromic transition of polysilanes. *Macromolecules*, 32(11), 3788–3794. <https://doi.org/10.1021/ma981855h74>. Lucht, B., Euler, W., & Gregory, O. (2002). Investigation of the thermochromic properties of polythiophenes in host polymers. *Polymer Preprints*, 43(1), 59–60.
83. Zhao, X. (2005). Synthesis, characterization and structure dependence of thermochromism of polythiophene derivatives. *Journal of Materials Science*, 40(13), 3423–3428. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-2653-8>
84. Aklujkar, P. S., & Kandasubramanian, B. (2021). A review of microencapsulated thermochromic coatings for sustainable building applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00421-4>
85. Ohkawa, S., Yang, F., Kawabata, K., & Goto, H. (2013). Synthesis of polymers from chiral monomers in chiral liquid crystals. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 3586–3591. <https://doi.org/10.1002/app.38593>
86. Soudian, S., Berardi, U., & Laschuk, N. (2020). Development and thermal-optical

- characterization of a cementitious plaster with phase change materials and thermochromic paint. *Solar Energy*, 205, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.051>
87. Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
 88. Zhang, Y., Zhang, Y., Yang, J., & Zhang, X. (2020). Energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings. *Energy and Buildings*, 215, 109920. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109920>
 89. Xing, H., Shu, X., Hong, B., Wang, N., Wang, W., & Wang, G. P. (2023). Recent progress in color-preserving radiative cooling: Multispectral control in visible and infrared wavelength. *Materials Today Physics*, 38, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2023.101242>
 90. zkayalar, S., Adıgüzel, E., Aksoy, S. A., & Alkan, C. (2020). Reversible color-changing and thermal-energy storing nanocapsules of three-component thermochromic dyes. *Materials Chemistry and Physics*, 252, 123162. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123162>
 91. ASTM International. (2007). ASTM E424-71: Standard test methods for solar energy transmittance and reflectance (terrestrial) of sheet materials. ASTM International.
 92. Xi, Y., Xu, S., & Zhang, J. (2022). Reversible thermochromic composites for intelligent adjustment of solar reflectance. *Materials Chemistry and Physics*, 276, 125372. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125372>. Zhang, Z., Liu, Y., Yang, K., Chen, D., Li, S., & Li, Z. (2022). Reversible thermochromic microencapsulated phase change materials for enhancing functionality of silicone rubber materials. *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126564.
 93. Zheng, S., Xu, Y., Shen, Q., & Yang, H. (2015). Preparation of thermochromic coatings and their energy saving analysis. *Solar Energy*, 112, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.011>
 94. Zhang, Y., & Zhai, X. (2019). Preparation and testing of thermochromic coatings for buildings. *Solar Energy*, 191, 540–548. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.006>
 95. Liu, H., Jiang, T., Wang, F., Ou, J., & Li, W. (2021). Thermochromic superhydrophobic coatings for building energy conservation. *Energy and Buildings*, 251, 111374. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111374>
 96. Pu, Y., & Fang, J. (2022). Preparation and thermochromic behavior of low-temperature thermochromic microcapsule temperature indicators. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 653, 129889. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129889>
 97. Liu, S., Liu, Z., Wang, J., Ding, X., & Meng, X. (2023). Effect of the material color on optical properties of thermochromic coatings employed in buildings. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102916. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102916>

98. Liu, S., Wang, J., & Meng, X. (2022). Spectral properties of retro-reflective materials from experimental measurements. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102434. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102434>
99. Butt, A. A., de Vries, S. B., Loonen, R. C. G. M., Hensen, J. L. M., Stuijver, A., van den Ham, J. E., & Erich, B. S. J. (2021). Investigating the energy saving potential of thermochromic coatings on building envelopes. *Applied Energy*, 291, 116788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116788>
100. Wang, J., Xie, M., An, Y., Tao, Y., Sun, J., & Ji, C. (2022). All-season thermal regulation with thermochromic temperature-adaptive radiative cooling coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 246, 111883. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111883>
101. Kitsopoulou, A., Bellos, E., Sammouris, C., Lykas, P., Vrachopoulos, M. G., & Tzivanidis, C. (2024). A detailed investigation of thermochromic dye-based roof coatings for Greek climatic conditions. *Journal of Building Engineering*, 84, 108570. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108570>
102. Song, J., Qin, J., Qu, J., Song, Z., Zhang, W., Xue, X., ... & Wu, X. (2014). The effects of particle size distribution on the optical properties of titanium dioxide rutile pigments and their applications in cool non-white coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.062>
103. Saber, H. H. (2021). Experimental characterization of reflective coating material for cool roofs in hot, humid and dusty climate. *Energy and Buildings*, 242, 110993. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110993>
104. Calovi, M., Zanardi, A., & Rossi, S. (2023). Improvement of the thermal efficiency of organic roof coatings through design aimed at increasing the durability of thermochromic pigments. *Progress in Organic Coatings*, 185, 107928. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107928>
105. Arulprakasajothi, M., Susanth, B., Kumar, K. N., & Reddy, A. M. M. (2021). Thermal management on external surfaces by thermochromic materials. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4666–4670. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.453>
106. Hu, J. Y., & Yu, X. (2019). Thermal and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions. *Solar Energy*, 193, 866–877. (Πρόκειται για την ίδια αναφορά με την υπ' αριθ. 28 και καλό είναι να διαγραφεί ως διπλότυπο.)
107. Liu, S. H., Wang, J. H., & Meng, X. (2022). Influence of thermochromic coatings on the thermal performance of the multi-layer wall by numerical simulation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 1366–1374.
108. Wang, C., Zhu, Y., & Guo, X. F. (2019). Thermally responsive coating on building heating and cooling energy efficiency and indoor comfort improvement. *Applied Energy*, 253, 113506. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113506>
109. Yu, J. Y., Gao, Y. F., & Xie, Y. L. (2022). Thermal insulation performance of thermochromic paint roofs in hot summer and cold winter regions. *Building Science*, 38(4), 79–84. (In Chinese).

110. Galocha, M. J. G., Olagaray, G. P., Román, C. A. A., & Guerrero, A. M. (2020). Thermochromic mortar façade coating: Impact on the building energy performance. *Informes de la Construcción*, 72, e356. <https://doi.org/10.3989/ic.74208>
111. Nematollahi, A. H., Fathi, S., & Mahravan, A. (2024). Investigating the energy-saving potential of using thermochromic coatings on opaque and transparent elements of educational buildings. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(12), 18157–18170. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32340-4>
112. U.S. Department of Energy. (n.d.). EnergyPlus weather data: Thessaloniki, Greece (IWECC). https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/GRC/GRC_Thessaloniki.166220_IWECC
113. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
114. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.
115. European Committee for Standardization. (2019). EN 16798-1:2019: Energy performance of buildings—Ventilation for buildings—Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. European Committee for Standardization.
116. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. (2017). Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με την αναθεώρηση του Κ.Ε.Ν.Α.Κ. (2017) (Α' έκδ.). Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.