



Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών & Βιώσιμου Σχεδιασμού

Π.Μ.Σ.: Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς συμβατικών δωματίων
υπό το πρίσμα της θεώρησης ευφών θερμοχρωμικών υλικών**

Δημήτριος Παπαγεωργίου

Διπλ. Αρχιτέκτων Μηχανικός Α.Π.Θ.

A.M.: 165165

Επιβλέπων Καθηγητής: Κάρολος-Νικόλαος Ι. Κοντολέων

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς συμβατικών δωματίων υπό
το πρίσμα της θεώρησης ευφύων θερμοχρωμικών υλικών**

Δημήτριος Παπαγεωργίου

Διπλ. Αρχιτέκτων Μηχανικός Α.Π.Θ.

A.M.: 165165

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κάρολος-Νικόλαος Ι. Κοντολέων

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Αθηνά Βιτοπούλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2026

«Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κάρολο Κοντολέων για την πολύτιμη και εμπειριστατωμένη καθοδήγησή του καθ' όλη την πορεία εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επίσης αφιερώνω την παρούσα εργασία στην οικογένειά μου, τους γονείς μου Ιωάννη και Κορνηλία καθώς και τον αδερφό μου Γρηγόρη, για την ηθική και έμπρακτη στήριξή τους σε κάθε βήμα που κάνω στη ζωή μου, όπως και στην ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.»

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς συμβατικών δωματίων υπό το πρίσμα της αξιοποίησης ευφύων θερμοχρωμικών υλικών ως δυναμικών επιστρώσεων του κτιριακού κελύφους. Η αυξανόμενη εκδήλωση φαινομένων όπως η αστική θερμική νησίδα, η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων και η ανάγκη εξασφάλισης συνθηκών θερμικής άνεσης καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων υλικών με δυνατότητα προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιείται αρχικά βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τα ζητήματα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών, τις βασικές οπτικές ιδιότητες των υλικών, τους βασικούς νόμους ακτινοβολίας καθώς και τις κύριες κατηγορίες, τα χαρακτηριστικά και τις αρχές λειτουργίας των θερμοχρωμικών υλικών. Στη συνέχεια αναπτύσσεται θεωρητικό-υπολογιστικό μοντέλο θερμικής ανάλυσης συμβατικού δώματος, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης μιας ιδεατής θερμοχρωμικής επίστρωσης επιχρίσματος στις επιφανειακές θερμοκρασίες, στις ροές θερμότητας και στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου κατά την περίοδο ενός έτους.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύουν τη δυνατότητα των θερμοχρωμικών υλικών να μεταβάλλουν δυναμικά τις οπτικές τους ιδιότητες συναρτήσει της θερμοκρασίας, συμβάλλοντας στον αποτελεσματικότερο έλεγχο των θερμικών κερδών και απωλειών του κτιριακού κελύφους. Η εφαρμογή τους στα δώματα δύναται να αποτελέσει μία πολλά υποσχόμενη παθητική στρατηγική βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, περιορισμού των ψυκτικών και θερμικών φορτίων και μετριασμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο δομημένο αστικό περιβάλλον.

Λέξεις – Κλειδιά

περιβαλλοντικός-βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων, παθητικά ηλιακά συστήματα κτιρίων, κτιριακό κέλυφος, δομικό στοιχείο, δώμα, ροή θερμότητας, ενεργειακό φορτίο, θερμικό φορτίο, ψυκτικό φορτίο, περιβαλλοντική απόκριση-συμπεριφορά, ευφυή υλικά, ψυχρά υλικά, θερμοχρωμικά υλικά, θερμοχρωμικό επίχρισμα, απόχρωση υλικού, οπτικές ιδιότητες, ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, εκπεμπτικότητα, ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία μετάβασης, επιφανειακή θερμοκρασία, ισοδύναμη θερμοκρασία

Master's Thesis

Evaluation of conventional flat roofs' thermal efficiency in light of intelligent thermochromic materials

Dimitrios Papageorgiou

Dipl. Architect Engineer A.U.Th.

Supervisor:

Karolos Nikolaos J. Kontoleon, Associate Professor, Department of Civil Engineering A.U.Th.

Abstract

This master's thesis investigates the thermal behavior of conventional flat roofs through the perspective of utilizing smart thermochromic materials as dynamic coatings for building envelopes. The increasing occurrence of phenomena such as the urban heat island effect, the high energy consumption of buildings, and the need to ensure thermal comfort conditions necessitate the development and application of innovative materials capable of adapting to changing environmental conditions.

Within the framework of this study, a literature review is initially conducted on issues related to the thermal and environmental response of building envelopes, the fundamental optical properties of materials, the basic laws of radiation, as well as the main categories, characteristics, and operating principles of thermochromic materials. Subsequently, a theoretical-computational thermal analysis model of a conventional flat roof is developed in order to investigate the influence of an idealized thermochromic coating layer on surface temperatures, heat fluxes, and the building's energy demands over the course of a year.

The results of the analysis highlight the ability of thermochromic materials to dynamically alter their optical properties as a function of temperature, thereby contributing to a more effective control of heat gains and losses through the building envelope. Their application on flat roofs may constitute a promising passive strategy for improving the energy performance of buildings, reducing cooling and heating loads, and mitigating the impacts of climate change within the built urban environment.

Keywords

environmental building design, passive solar building systems, building envelope, structural component, flat roof, heat transfer, energy load, heating load, cooling load, environmental behavior, intelligent materials, cool materials, thermochromic materials, thermochromic coating, material color, optical properties, reflectivity, absorptivity, emissivity, solar radiation, transition temperature, surface temperature, sol-air temperature

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	ii
Περιεχόμενα.....	iv
Εισαγωγή	vi
Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων	viii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xiii
 Κεφάλαιο 1. Βασικό ερευνητικό πλαίσιο διπλωματικής εργασίας.....	1
1.1 Το ζήτημα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών	1
1.1.1 Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας	1
1.1.2 Το ζήτημα της θερμικής άνεσης εντός των κτιρίων	3
1.1.3 Το ζήτημα της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων	4
1.1.4 Το ζήτημα του υψηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων	5
1.2 Ευφύη υλικά επενδύσεων με εφαρμογές σε κτιριακά κελύφη	6
1.2.1 Οπτικές ιδιότητες των υλικών.....	7
1.2.2 Βασικοί νόμοι ακτινοβολίας	9
1.2.3 Υλικά με δυναμική μεταβολή ιδιοτήτων	13
1.3 Κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση δομής διπλωματικής εργασίας ...	15
 Κεφάλαιο 2. Τα θερμοχρωμικά υλικά και τα κύρια χαρακτηριστικά τους	17
2.1 Ορισμός και οπτικές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών.....	17
2.1.1 Τι είναι τα θερμοχρωμικά υλικά	17
2.1.2 Οπτικές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών.....	18
2.2 Οργανικά θερμοχρωμικά υλικά	23
2.2.1 Leuco dyes	23
2.2.2 Υγροί κρύσταλλοι.....	25
2.2.3 Συζευγμένα πολυμερή.....	26
2.2.4 Φωτονικοί κρύσταλλοι.....	27
2.2.5 Βάσεις Schiff	28
2.2.6 Σπироπυράνια	29
2.3 Ανόργανα θερμοχρωμικά υλικά	32
2.3.1 Διοξείδιο του βαναδίου.....	32
2.3.2 Ανόργανα οξείδια	33
2.3.3 Κβαντικές τελείες	34
2.3.4 Πλασμονικά	35
2.3.5 Ιωδιούχος υδράργυρος.....	36
2.3.6 Υδροπηκτώματα	37
2.4 Σύνθετα θερμοχρωμικά υλικά.....	40
2.4.1 Περοβσκίτες.....	40
2.4.2 Συνδυασμός θερμοχρωμικών βαφών με τσιμέντο	41
2.4.3 Σύμπλεγμα βαφής-πολυμερούς.....	42
2.5 Εφαρμογές θερμοχρωμικών υλικών σε αδιαφανή δομικά στοιχεία	44
 Κεφάλαιο 3. Το μοντέλο θερμικής ανάλυσης και οι παράμετροί του	53
3.1 Το δομικό στοιχείο του δώματος	53
3.1.1 Το δώμα ως δομικό στοιχείο του κτιριακού κελύφους.....	53

3.1.2 Βασικές θερμικές ροές του δώματος	54
3.2 Περιγραφή πειραματικού μοντέλου θερμικής ανάλυσης	56
Κεφάλαιο 4. Θερμική ανάλυση εφαρμογής θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε κατασκευή συμβατικού δώματος	65
4.1 Σενάρια λειτουργίας του υλικού εφαρμογής	65
4.2 Επίδραση εφαρμογής του υλικού στη θερμική συμπεριφορά του δώματος.....	70
4.2.1 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο θέρμανσης.....	71
4.2.2 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο μετάβασης.....	76
4.2.3 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο ψύξης	79
4.3 Ενεργειακή συμπεριφορά του υλικού σε σχέση με το εσωτερικό του κτιρίου	84
4.3.1 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο σε περίοδο θέρμανσης	85
4.3.2 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο σε περίοδο ψύξης.....	91
4.3.3 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο έτους.....	94
Κεφάλαιο 5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και δυνατότητες μελλοντικής έρευνας.....	107
5.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	107
5.2 Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας	109
5.3 Συμπεράσματα	111
Βιβλιογραφία	113
Πηγές Εικόνων και Πινάκων	119

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς συμβατικών δωματίων υπό το πρίσμα της θεώρησης ευφύων θερμοχρωμικών υλικών» εστιάζει στη διερεύνηση των θερμικών ροών που αναπτύσσονται σε οριζόντια, αδιαφανή δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους, όπως είναι τα συμβατικά επίπεδα δώματα. Τα στοιχεία αυτά, αποτελούμενα από συνήθεις στρώσεις δομικών υλικών, εξετάζονται υπό την προοπτική ενσωμάτωσης μιας εξωτερικής στρώσης θεωρητικού θερμοχρωμικού επιχρίσματος, του οποίου οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται δυναμικά ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Η μεταβολή αυτή δύναται να επηρεάσει ουσιαστικά τις επιφανειακές θερμοκρασίες του δώματος, τις θερμικές ροές μέσω αυτού και, κατ' επέκταση, τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιριακού κελύφους.

Η διερεύνηση εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της αναζήτησης παθητικών τεχνολογιών που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, μέσω της αποτελεσματικότερης διαχείρισης των ανταλλαγών θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Στο πλαίσιο αυτό, τα ευφυή υλικά και ειδικότερα τα θερμοχρωμικά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν δυναμικά τις ιδιότητές τους ως απόκριση στις μεταβολές της θερμοκρασίας, συμβάλλοντας δυνητικά σε μία περισσότερο αποδοτική λειτουργία του κτιριακού κελύφους. Παράλληλα, η αναφορά σε συναφείς κατηγορίες ευφύων υλικών, όπως τα υπόλοιπα χρωμογενή υλικά και τα υλικά αλλαγής φάσης, επιτρέπει την τοποθέτηση των θερμοχρωμικών σε ένα ευρύτερο τεχνολογικό και ερευνητικό πλαίσιο.

Η συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση αναδεικνύει ότι, παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί ως προς την ανάπτυξη και την πειραματική διερεύνηση των θερμοχρωμικών υλικών, εξακολουθεί να υπάρχει σχετικά περιορισμένη γνώση σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο οι μεταβαλλόμενες οπτικές τους ιδιότητες επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά των κτιριακών κελυφών υπό διαφορετικές κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες σχετικές μελέτες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη και τον χαρακτηρισμό των ίδιων των υλικών, ενώ μικρότερη έμφαση δίνεται στη συστηματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους μέσω παραμετρικών αναλύσεων σε επίπεδο δομικού στοιχείου.

Με γνώμονα το παραπάνω ερευνητικό κενό, η παρούσα εργασία διερευνά, μέσω ενός απλοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου, την εφαρμογή θεωρητικών συμβατικών και θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε συμβατικό επίπεδο δώμα υπό προκαθορισμένες κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες. Η μελέτη εξετάζει την επίδραση της μεταβολής της ανακλαστικότητας, της θερμοκρασίας μετάβασης, της επιθυμητής θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου και των επικρατουσών κλιματικών συνθηκών στη θερμική απόκριση του δώματος, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων που καθορίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων και παρέχοντας χρήσιμη βάση για μελλοντικές ερευνητικές και εφαρμοσμένες προσεγγίσεις στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων.

Κατάλογος Εικόνων και Πινάκων

Εικόνες

Εικόνα 1: Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας	2
Εικόνα 2: Τα βασικά ζητήματα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών	6
Εικόνα 3: Οι βασικές οπτικές ιδιότητες ενός υλικού	8
Εικόνα 4: Διάγραμμα έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας – απόλυτης θερμοκρασίας για ένα μελανό σώμα σύμφωνα με το νόμο Stefan-Boltzmann	10
Εικόνα 5: Διάγραμμα έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας –μήκους κύματος ακτινοβολίας για ένα μελανό σώμα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, σύμφωνα με το νόμο του Planck	11
Εικόνα 6: Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής απορροφητικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών Α και Β σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας.....	21
Εικόνα 7: Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής ανακλαστικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών Α και Β σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας.....	22
Εικόνα 8: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης απαιτήσεων σε ενέργεια ψύξης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος.....	48
Εικόνα 9: Διάγραμμα ποσοστιαίας αύξησης απαιτήσεων σε ενέργεια θέρμανσης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος	49
Εικόνα 10: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος (για θέρμανση και ψύξη) που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος.....	50
Εικόνα 11: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 25°C	52

Εικόνα 12: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 33°C 52

Εικόνα 13: Διάγραμμα υπόδειξης βασικών μεγεθών και θερμικών ροών μεταξύ δώματος, εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και της θέσης του θερμοχρωμικού υλικού ... 63

Εικόνα 14: Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 25°C, στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια..... 68

Εικόνα 15: Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 25°C, στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια..... 69

Εικόνα 16: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο 72

Εικόνα 17: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο..... 72

Εικόνα 18: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Απρίλιο 73

Εικόνα 19: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Απρίλιο 74

Εικόνα 20: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Οκτώβριο 75

Εικόνα 21: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Οκτώβριο 75

Εικόνα 22: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Μάιο ...76

Εικόνα 23: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Μάιο ...77

Εικόνα 24: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Σεπτέμβριο 78

Εικόνα 25: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Σεπτέμβριο 78

Εικόνα 26: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούνιο ...79

Εικόνα 27: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούνιο ...80

Εικόνα 28: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούλιο ...81

Εικόνα 29: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούλιο ...81

Εικόνα 30: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Αύγουστο 82

Εικόνα 31: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Αύγουστο 83

Εικόνα 32: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιανουάριο 86

Εικόνα 33: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Φεβρουάριο 87

Εικόνα 34: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Μάρτιο 87

Εικόνα 35: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Νοέμβριο 88

Εικόνα 36: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Δεκέμβριο 88

Εικόνα 37: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Απρίλιο 89

Εικόνα 38: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Οκτώβριο 90

Εικόνα 39: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούνιο 91

Εικόνα 40: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούλιο 92

Εικόνα 41: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Αύγουστο 93

Εικόνα 42: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4$	95
Εικόνα 43: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6$	96
Εικόνα 44: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$	97
Εικόνα 45: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$	98
Εικόνα 46: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$	99
Εικόνα 47: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$	100
Εικόνα 48: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$	101
Εικόνα 49: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$	102
Εικόνα 50: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$	103
Εικόνα 51: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$	104
Εικόνα 52: Διάγραμμα συνολικού ετήσιου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας για την εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων	106

Πίνακες

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ιδιότητες οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	30
Πίνακας 2: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	31
Πίνακας 3: Βασικές οπτικές ιδιότητες ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	38
Πίνακας 4: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	39

Πίνακας 5: Βασικές οπτικές ιδιότητες σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	43
Πίνακας 6: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία	43
Πίνακας 7: Επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης εσωτερικού χώρου (Tindoor) [°C] κατοικίας στην Αθήνα σε μια τυπική μέρα για κάθε μήνα του έτους.....	58
Πίνακας 8: Ενεργοποίηση-επαναφορά αλλαγής απόχρωσης θερμοχρωμικού υλικού για μια τυπική ημέρα από κάθε μήνα του έτους	67
Πίνακας 9: Ώρες διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού υλικού για όλα τα ισχύοντα σενάρια	68

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

TCM	Θερμοχρωμικό υλικό
PCM	Υλικό αλλαγής φάσης
H/M	Ηλεκτρο-μηχανολογικός
UV	Υπεριώδης ακτινοβολία
NIR	Κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία
ρ/ρ_{sol}	Ανακλαστικότητα
$\alpha/\alpha_{\text{sol}}$	Απορροφητικότητα
ε	Εκπεμπτικότητα
τ	Διαπερατότητα
T	Θερμοκρασία
$T_{\text{tr}}/T_{\text{C}}$	Θερμοκρασία μετάβασης
T_{amb}	Θερμοκρασία ατμόσφαιρας-περιβάλλοντος
T_{sky}	Θερμοκρασία ουράνιου θόλου
$T_{\text{sol,air}}$	Ισοδύναμη θερμοκρασία
T_{indoor}	Θερμοκρασία εσωτερικού χώρου
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας
Q_{sol}	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
M	Ένταση εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας
Q	Ροή θερμότητας
E	Ενέργεια/ενεργειακό φορτίο
U	Συντελεστής θερμοπερατότητας
A	Επιφάνεια-εμβαδόν
Ra	Εξωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης
Ri	Εσωτερική αντίσταση θερμικής μετάβασης

Κεφάλαιο 1. Βασικό ερευνητικό πλαίσιο διπλωματικής εργασίας

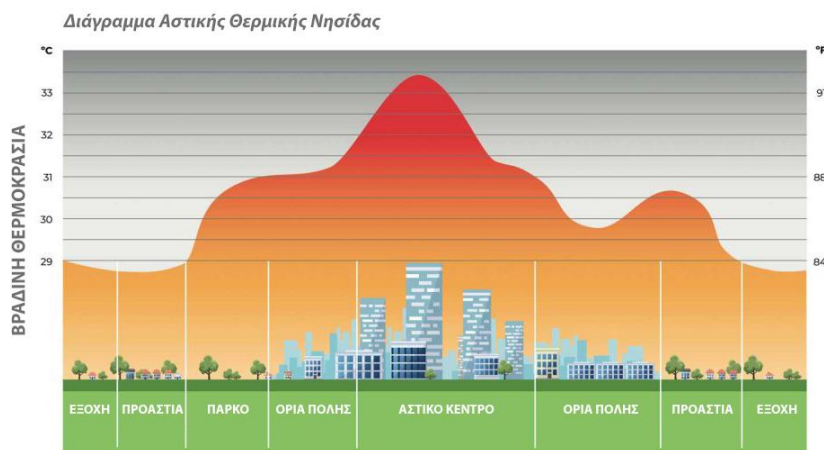
1.1 Το ζήτημα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών

Η κατασκευή των κτιριακών κελυφών (building envelopes) αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας στη διεθνή βιβλιογραφία, όσον αφορά την συζήτηση που προκύπτει γύρω από τα περιβαλλοντικά ζητήματα που δημιουργούνται εξαιτίας των ιδιοτήτων των υλικών των δομικών στοιχείων και της σύνδεσής τους με τις συνθήκες τόσο των εσωτερικών χώρων όσο και του εξωτερικού περιβάλλοντος (Mohamad Hata et al., 2016). Ειδικότερα σε αστικές περιοχές όπου επικρατούν περισσότερο δυναμικές σχέσεις μεταξύ του εκτεταμένου κτιριακού αποθέματος και των ιδιόμορφων περιβαλλοντικών συνθηκών που παρατηρούνται, ο ρόλος του κτιριακού κελύφους ως «χώρος διαμεσολάβησης» μεταξύ του ανθρώπου και του αστικού μικροκλίματος γίνεται εξαιρετικά κρίσιμος ως προς τη διαχείριση των θερμικών ισορροπιών (Mohamad Hata et al., 2016; Santamouris & Yun, 2020). Τα βασικότερα ζητήματα που προκύπτουν από την αδυναμία επαρκούς θερμικής απόκρισης και λειτουργίας των κτιριακών κελυφών στις πόλεις είναι: το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων, το υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κτιρίων και η δυσκολία εξασφάλισης συνθηκών θερμικής άνεσης των χρηστών (Santamouris & Yun, 2020; Garshasbi & Santamouris, 2018).

1.1.1 Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας

Ένα κρίσιμο ερευνητικό ζήτημα που αφορά την περιβαλλοντική απόκριση των κτιριακών κελυφών στον αστικό ιστό, πρόκειται για φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (urban heat island –UHI). Το φαινόμενο αυτό πρόκειται για το εκτενέστερα καταγεγραμμένο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής (Karlessi et al., 2009) και δηλώνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στις αστικές περιοχές, σε σύγκριση με χαμηλότερες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε άμεσα γειτονικές περιαστικές και υπαίθριες περιοχές κατά τα ίδια χρονικά διαστήματα (βλ. εικ. 1) (Ziaemehr et al., 2023; Mazzeo & Kontoleon, 2020). Το γεγονός αυτό οφείλεται σε παράγοντες, όπως η υψηλή ικανότητα απορρόφησης και εκπομπής θερμότητας των δομικών υλικών των κτιρίων, ο σχεδιασμός του αστικού υπαίθριου χώρου με σκληρά και υψηλής θερμοχωρητικότητας υλικά, η έλλειψη χώρων πρασίνου και υγρού στοιχείου καθώς και οι έντονες εκπομπές ρύπων λόγω της αυξανόμενης κυκλοφορίας οχημάτων και

βιομηχανικών δραστηριοτήτων (Ziaeeemehr et al., 2023; Giannaros & Melas, 2012). Ιδίως κατά τους θερινούς μήνες, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν διαρκείς καύσωνες και συγκεντρώσεις επιβλαβών σωματιδίων με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, κυρίως των ευπαθών ομάδων, των παιδιών και των ηλικιωμένων, στις περισσότερες περιπτώσεις μέσω καρδιοπαθειών, δερματικών και αναπνευστικών προβλημάτων και σε ακραίες περιπτώσεις, μέχρι και αύξηση της θνησιμότητας (Ziaeeemehr et al., 2023; Santamouris & Yun, 2020). Επιπρόσθετα, έχει καταγραφεί ότι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας προσφέρει υψηλότερη θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της πόλης, η οποία οδηγεί σε ιδανικότερες συνθήκες θερμικής άνεσης τη χειμερινή περίοδο, ωστόσο τα οφέλη τον χειμώνα είναι ελάχιστα σε σχέση με τις αρνητικές συνέπειες της θερινής περιόδου (Giannaros & Melas, 2012). Ήδη εδώ και πάνω από μια δεκαετία, περίπου το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει υπό την επιρροή της αστικής θερμικής νησίδας και ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία μέχρι το 2050 (Giannaros & Melas, 2012). Επιπλέον, περίπου πεντακόσιες χιλιάδες πόλεις σε όλο τον πλανήτη έχουν καταγραφεί να βιώνουν τις επιπτώσεις της αστικής θερμικής νησίδας, παρουσιάζοντας κατά μέσο όρο αυξημένη ανάγκη για ψύξη σε κτίρια εντός της πόλης κοντά στο 13% σε σχέση με κτίρια σε γειτονικές αγροτικές περιοχές εκτός πόλης (Kitsopoulou et al., 2024). Ορισμένα ενδεικτικά μέτρα αντιμετώπισης του φαινομένου είναι συνήθως η ελάττωση των ατμοσφαιρικών θερμοκρασιών μέσω της ύπαρξης μεγαλύτερων εκτάσεων πρασίνου και υγρού στοιχείου μέσα στον αστικό ιστό για την εντονότερη λειτουργία του φυσικού δροσισμού και της εξατμισοδιαπνοής των φυτών, καθώς και μέσω της χρήσης ψυχρών ή λιγότερο σκληρών υλικών και επιφανειών στο σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιριακών κελυφών και των δρόμων (Dabaieh et al., 2014; Hu et al., 2024).



Εικόνα 1: Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (πηγή: greenrooforganisation.org).

1.1.2 Το ζήτημα της θερμικής άνεσης εντός των κτιρίων

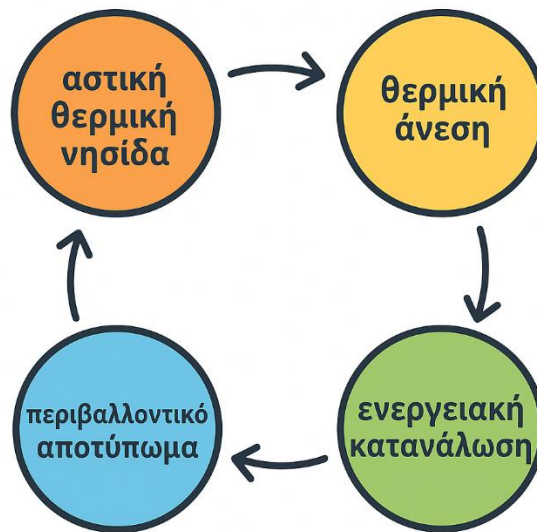
Ένα δεύτερο σημαντικό ζήτημα που αφορά την περιβαλλοντική απόκριση του κτιριακού κελύφους είναι η εξασφάλιση συνθηκών θερμικής άνεσης στους χώρους του κτιρίου. Η θερμική άνεση (thermal comfort) εκφράζει μια κατάσταση κατά την οποία οι θερμοκρασιακές και ατμοσφαιρικές συνθήκες σε ένα χώρο ανταποκρίνονται σε μεγάλο ποσοστό στην ικανοποίηση των χρηστών και προκαλούν την αίσθηση ευεξίας και τη θερμική ισορροπία του ανθρώπινου οργανισμού (Mansouri & Sriti, 2019). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού (ASHRAE), ως θερμική άνεση ορίζεται: «αυτή η συνθήκη του μυαλού που εκφράζει ικανοποίηση μέσα σε ένα θερμικό περιβάλλον» (ASHRAE, 2013). Η θερμική άνεση είναι ένα πολυσύνθετο ζήτημα που εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του χώρου, η θερμοκρασία και ταχύτητα του αέρα, τα επίπεδα υγρασίας, ο βαθμός ένδυσης και δραστηριότητας των χρηστών στο χώρο (ASHRAE, 2013; Granadeiro et al., 2020). Ωστόσο, ένα μείζον πρόβλημα στις σύγχρονες αστικές περιοχές και ειδικά σε όσες βρίσκονται σε θερμά ή τροπικά κλίματα είναι η ανεπαρκής ικανοποίηση θερμικής άνεσης εξαιτίας των ακραίων καιρικών συνθηκών όπως οι καύσωνες και οι έντονες βροχοπτώσεις (Athmani et al., 2023). Ως αποτέλεσμα, δαπανώνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και αερισμού με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, διότι υπάρχει αδυναμία του κτιριακού κελύφους να συνεισφέρει στην επιθυμητή ανά πάσα χρονική στιγμή διατήρηση θερμοκρασιών ισορροπιών και στη ρύθμιση των ροών θερμότητας και αερισμού με φυσικό τρόπο μέσω των δομικών στοιχείων (Mansouri & Sriti, 2019; Athmani et al., 2023). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ροή θερμότητας διαμέσου του κτιριακού κελύφους είναι ο σημαντικότερος παράγοντας εξασφάλισης της θερμικής άνεσης (Granadeiro et al., 2020). Ωστόσο, η ανάγκη των χρηστών να βιώνουν σε συνθήκες θερμικής άνεσης είναι συχνά συνδεδεμένη με την αυξημένη χρήση και λειτουργία συμβατικού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού όπως σώματα θέρμανσης ή ψύξης, ο οποίος είναι επιζήμιος ενεργειακά και περιβαλλοντικά. Έτσι κρίνεται ωφέλιμη η σταδιακή κατεύθυνση σε αρχές και πρακτικές βιοκλιματικού σχεδιασμού των κτιριακών κελυφών (Kitsopoulou et al., 2024). Επομένως, ο ρόλος του κτιριακού κελύφους και ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για διότι οφείλεται να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι περιβαλλοντικές συνθήκες του τόπου στον οποίο βρίσκεται όσο και η ίδια η χρήση και δραστηριότητα των ανθρώπων που βιώνουν στο κτίριο (Mansouri & Sriti, 2019).

1.1.3 Το ζήτημα της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων

Το επόμενο κρίσιμο ζήτημα που επηρεάζεται από τη σχέση των κτιριακών κατασκευών με το άμεσο εξωτερικό περιβάλλον είναι η αύξηση κατανάλωσης ενέργειας που εντοπίζεται στη λειτουργία του κτιριακού κελύφους. Τα κτίρια στην Ευρωπαϊκή Ένωση καταναλώνουν 40-50% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, εκ της οποίας το 40% αξιοποιείται για ανάγκες θέρμανσης και ψύξης (Butt et al., 2021; Sánchez & Vilà, 2022). Το αντίστοιχο ποσοστό ενέργειας για τη λειτουργία των κτιρίων σε παγκόσμιο επίπεδο ανέρχεται στο 30% (Kitsopoulou et al., 2024). Σε ζεστές κλιματικά περιοχές του πλανήτη, η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την λειτουργία μηχανικού κλιματισμού, ανέρχεται στο 70 με 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας των κτιρίων (Dabaieh et al., 2014). Στην Ελλάδα, η ενεργειακή κατανάλωση των κατοικιών αντιστοιχεί στο 28.8% της συνολικής τελικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας της χώρας (Kitsopoulou et al., 2024). Γενικότερα, διαπιστώνεται ότι η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας πραγματοποιείται κυρίως με την εκτεταμένη λειτουργία των Η/Μ εγκαταστάσεων των κτιρίων συχνότερα τη θερινή και χειμερινή περίοδο όπου παρατηρούνται περισσότερα ακραίες θερμοκρασίες και υπάρχει αμεσότερη ανάγκη για θέρμανση ή ψύξη των εσωτερικών χώρων (Garshasbi & Santamouris, 2018; Kontoleon et al., 2022). Η αδυναμία σχεδιασμού και κατασκευής του κτιριακού κελύφους προκειμένου να ελέγχει τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τις εναλλαγές ροών θερμότητας με το εσωτερικό χώρο και το εξωτερικό περιβάλλον οδηγεί στη λεγόμενη «ενεργειακή ποινή» (energy penalty), η οποία συνήθως εκφράζεται ως η επιπρόσθετη οικονομική συνεισφορά που απαιτείται για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών (Santamouris & Yun, 2020). Επομένως, το κτιριακό κέλυφος κατέχει κρίσιμο ρόλο στην ενεργειακή κατανάλωση λόγω της ανταλλαγής θερμικής ενέργειας με το εξωτερικό περιβάλλον (Hu et al., 2025). Ο κτιριακός τομέας σήμερα αποτελεί τη δραστηριότητα με την υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, περίπου στο 30-40% της παγκόσμιας ενέργειας και το 2040 εκτιμάται ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας του κτιριακού τομέα θα ανέλθει στις 38.4 PWh, ενώ το 2010 βρισκόταν στις 23.7 PWh (Garshasbi & Santamouris, 2018). Η συνολική κατανάλωση ενέργειας αναφέρεται τόσο στη λειτουργία, όσο και στη διαδικασία κατασκευής ή κατεδάφισης, εκ της οποίας το ποσοστό κατανάλωσης που ανταποκρίνεται στη λειτουργία και κατ' επέκταση στη χρήση συστημάτων θέρμανσης και κλιματισμού, ανέρχεται στο 50% (Athmani et al., 2023).

1.1.4 Το ζήτημα του υψηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων

Το τέταρτο και εξίσου ιδιαίτερο ζήτημα που προκύπτει από τον μη προσεγμένο σχεδιασμό και λειτουργία των κτιρίων είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνουν, πάλι ως απόρροια της ενεργειακής κατανάλωσης και των ατμοσφαιρικών φαινομένων που προκαλούνται από αυτά (Santamouris & Yun, 2020). Η αύξηση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας που προκαλείται από τις εκπομπές θερμότητας των δομικών υλικών και της βιομηχανίας, ο ανεπαρκής έλεγχος των ροών θερμότητας στα κτιριακά κελύφη και η συνεχής λειτουργία των Η/Μ εγκαταστάσεων οδηγεί στην έξαρση αρνητικών περιβαλλοντικών φαινομένων με επιδράσεις σε παγκόσμια κλίμακα, όπως η γενικότερη αύξηση θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η τρύπα του όζοντος και η εξασθένιση των φυσικών πόρων (Giannaros & Melas, 2012). Η ραγδαία άνοδος καύσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας και η μετέπειτα κατανάλωσή της στα κτίρια πρόκειται για ένα γεγονός που επηρεάζει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που οφείλονται στις έντονες εκπομπές ρύπων άνθρακα και μείωση του ορυκτού άνθρακα, για την επίτευξη θερμικής ισορροπίας στα κτιριακά κελύφη (Mazzeo & Kontoleon, 2020; Hakami, 2024). Το 2021, οι άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προέκυψαν από τη θέρμανση κτιρίων, αυξήθηκαν κατά 5.5% σε σχέση με την προηγούμενη χρονιά, αντιστοιχώντας σε 2.5 Gt διοξειδίου του άνθρακα, ποσό που ανταποκρίνεται στο 80% της συνολικής εκπομπής CO₂ των κτιρίων (Kitsopoulou et al., 2024). Όμως για την ενεργειακή κατανάλωση λόγω ψύξης, οι προβλέψεις είναι δυσοίωνες, καθώς προβλέπεται η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας για ψύξη σε κατοικίες να ανέλθει σε ποσοστό 35% μέχρι το 2050 και σε 61% μέχρι το 2100 (Kitsopoulou et al., 2024b). Ωστόσο, αποτελεί φιλόδοξη η προσπάθεια και η δέσμευση πολλών κρατών να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων σε όσον το δυνατόν χαμηλότερες τιμές ως τα μέσα του 21^{ου} αιώνα (Liu et al., 2022). Ήδη σε ένα διάστημα δεκαέξι ετών από το 2005 μέχρι το 2021, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω λειτουργίας των κτιρίων, μειώθηκε κατά 22% στην Ευρωπαϊκή Ένωση και κατά 54% στην Ελλάδα (Kitsopoulou et al., 2024). Συνεπώς, ο σχεδιασμός του κτιριακού κελύφους κατά τον οποίο έχουν μελετηθεί οι κλιματικές συνθήκες, η ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον και η πρόσβαση σε φυσικούς πόρους ή η ελάττωση της εξάρτησης από αυτούς όπως τα ορυκτά καύσιμα, ενέχει τη δυνατότητα να ελέγξει και να περιορίσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτιρίου (Liu et al., 2023; Kitsopoulou et al., 2024b).



Εικόνα 2: Τα βασικά ζητήματα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

1.2 Ευφυή υλικά επενδύσεων με εφαρμογές σε κτιριακά κελύφη

Η αντιμετώπιση των δυσμενών θερμικών ροών που εμφανίζονται στο κτιριακό κέλυφος αποτελεί ένα πρόβλημα το οποίο είναι άμεσα εξαρτώμενο από τα κλιματικά δεδομένα του τόπου όπου βρίσκεται ένα κτίριο καθώς και των υλικών κατασκευής των δομικών στοιχείων. Ανάλογα με τη περίοδο του χρόνου κατά την οποία θέλουμε να εξασφαλίσουμε καλύτερη θερμική άνεση και ενεργειακή απόδοση, είναι αναγκαία η σωστή ρύθμιση των θερμικών κερδών και απωλειών που επιτρέπουν τα δομικά στοιχεία και τα δομικά υλικά σε συναλλαγή με το περιβάλλον (Santamouris & Yun, 2020). Για την κατά το δυνατόν αποτελεσματικότερη διαχείριση των παραπάνω συνθηκών, αναπτύσσονται και παράγονται υλικά κυρίως υπό τη μορφή επιστρώσεων ή επενδύσεων, εκ των οποίων ορισμένα παρουσιάζουν «ευφυή» χαρακτηριστικά, όπως αυξημένη απόδοση ή μεταβολή των θερμικών και οπτικών τους ιδιοτήτων ή της υλικής τους κατάστασης, ανάλογα με τις επικρατέστερες συνθήκες (Soudian et al., 2020; Santamouris & Yun, 2020).

1.2.1 Οπτικές ιδιότητες των υλικών

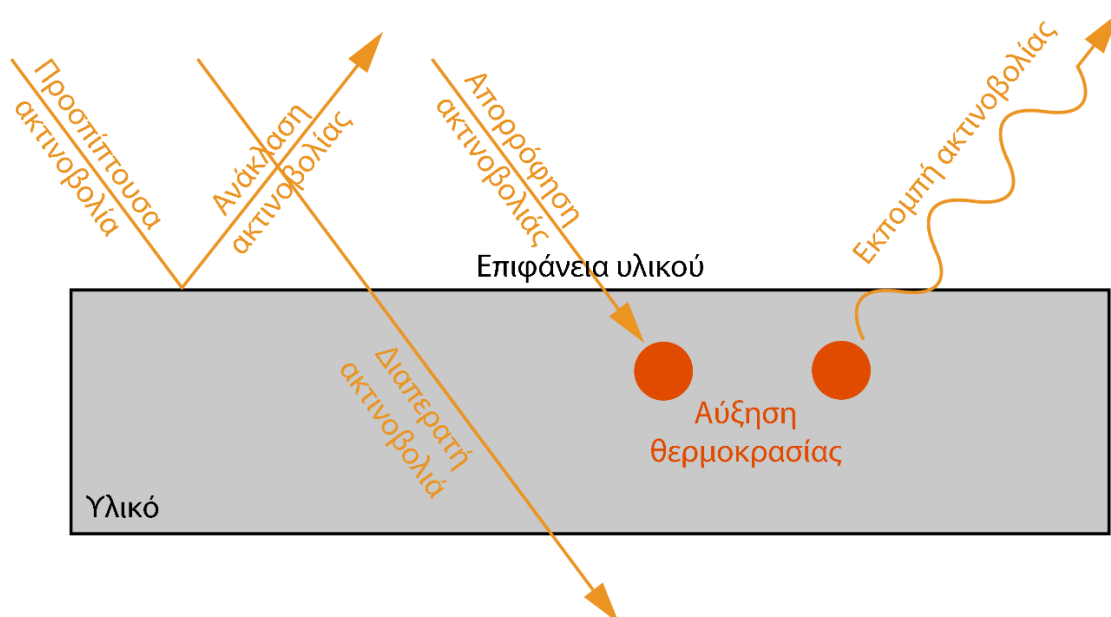
Οι οπτικές ιδιότητες (optical properties) των υλικών πρόκειται για φυσικά μεγέθη τα οποία εκφράζουν τη συμπεριφορά του υλικού σε σχέση με το φως και την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Οι βασικότερες οπτικές ιδιότητες των υλικών είναι οι εξής: ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, εκπεμπτικότητα και διαπερατότητα (βλ. εικ. 3) καθώς επίσης και επιμέρους χαρακτηριστικά εμφάνισης του υλικού, όπως: αδιαφάνεια, ημιδιαφάνεια, διαφάνεια, απόχρωση και λάμψη. Οι οπτικές ιδιότητες των υλικών εντοπίζονται και παρατηρούνται σε σύνδεση με το είδος και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας με την οποία αυτά αλληλοεπιδρούν, συνήθως στο φάσμα μεταξύ υπεριώδους, ορατής και υπέρυθρης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Καθώς η διείσδυση και αποβολή της ακτινοβολίας από και προς τα δομικά υλικά σημαίνει μεταφορά θερμικής ενέργειας, αυτό έχει ως συνέπεια τη μεταβολή των τοπικών θερμοκρασιών στα δομικά στοιχεία και στους χώρους με τους οποίους αυτά έρχονται σε επαφή (Kailas, 2015). Πιο συγκεκριμένα:

Ανακλαστικότητα (reflectivity ή reflectance - ρ) ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να ανακλά πίσω προς το άμεσο περιβάλλον ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Εκφράζεται συνήθως με τιμές από 0 έως 1 οι οποίες αντιπροσωπεύουν το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας σε σχέση με την προσπίπτουσα (0 έως 100%). Η συνηθέστερη περίπτωση καταγραφής και διερεύνησης της ανακλαστικότητας των υλικών παρατηρείται όταν μελετάται η έκθεση των επιφανειών των δομικών στοιχείων στην ηλιακή ακτινοβολία (Kailas, 2015; Hu et al., 2024).

Απορροφητικότητα (absorptivity ή absorptance - α) ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του και να το μετατρέπει εσωτερικά σε θερμότητα εντός των μορίων του. Εκφράζεται συνήθως με τιμές από 0 έως 1 που αντιπροσωπεύουν το ποσοστό της απορροφημένης ακτινοβολίας σε σχέση με την προσπίπτουσα (0 έως 100%). Ένα θεωρητικό ιδανικό μέλαν σώμα (black body) απορροφά το 100%. (Kailas, 2015; Hu et al., 2024).

Εκπεμπτικότητα (emissivity - ϵ) ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να απελευθερώνει θερμική ενέργεια υπό τη μορφή ακτινοβολίας, εξαιτίας της έντονης κίνησης των ηλεκτρονίων εντός του υλικού λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του. Η εκπεμπτικότητα εκφράζεται με τιμές από 0 έως 1, ως ποσοστό σε σύγκριση με ένα θεωρητικό ιδανικό μέλαν σώμα (black body), το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία που αντιστοιχεί στο 100% της θερμικής του ενέργειας, σε ίδιες θερμοκρασιακές συνθήκες με το υπό εξέταση υλικό (Kailas, 2015; Hu et al., 2024).

Διαπερατότητα (transmittance - τ) ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να δέχεται ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο διαπερνά τη μοριακή δομή του και δεν ανακλάται ούτε απορροφάται από αυτό. Εκφράζεται συνήθως με τιμές από 0 έως 1 που αντιπροσωπεύουν το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας σε σχέση με την προσπίπτουσα (0 έως 100%). Σε αδιαφανή υλικά ή δομικά στοιχεία, η διαπερατότητα έχει συνήθως μηδενική τιμή, εφόσον η μοριακή δομή τους δεν επιτρέπει σχεδόν καθόλου την ακτινοβολία να τα διαπεράσει. Το άθροισμα της ανακλαστικότητας, της απορροφητικότητας και της διαπερατότητας ενός σώματος είναι ίσο με τη μονάδα ($\rho + \alpha + \tau = 1$) (Kailas, 2015; Hu et al., 2024).

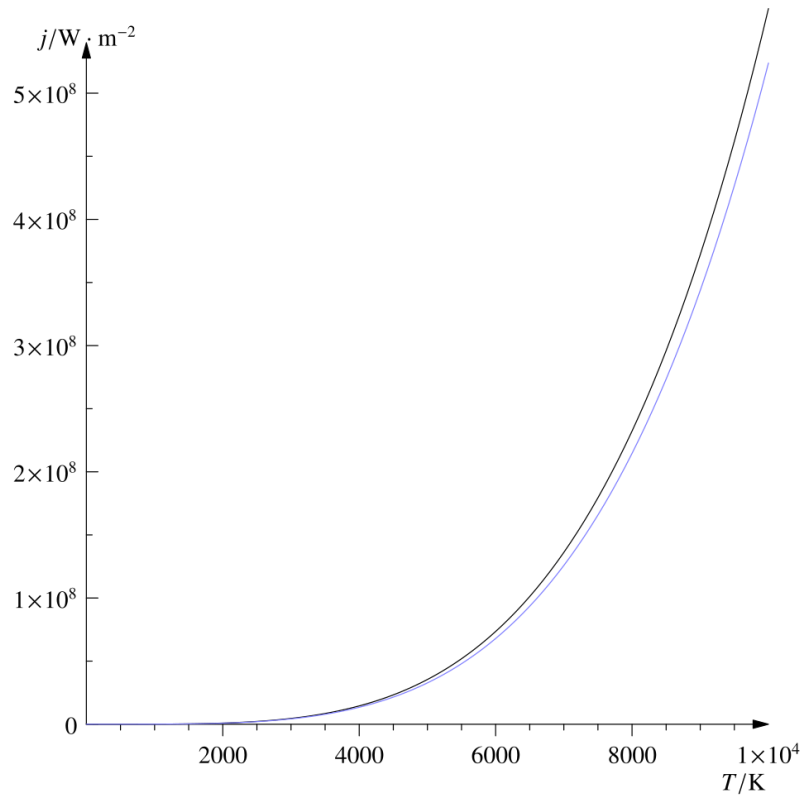


Εικόνα 3: Οι βασικές οπτικές ιδιότητες ενός υλικού (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

1.2.2 Βασικοί νόμοι ακτινοβολίας

Η συμπεριφορά των υλικών ως προς την εκδήλωση των οπτικών τους ιδιοτήτων και τη διαχείριση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ειδικότερα της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι ένα αντικείμενο που έχει απασχολήσει διαχρονικά την επιστημονική κοινότητα. Η ηλιακή ακτινοβολία πρόκειται για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που διαδίδεται από τον Ήλιο προς τη Γη μέσω του κενού στο διάστημα και προσπίπτει προς την επιφάνεια του πλανήτη και κατ' επέκταση στη φύση, στις πόλεις, στα κτίρια και τις επιφάνειες των υλικών τους. Το εύρος μήκους κύματος που καλύπτει η ηλιακή ακτινοβολία κυμαίνεται από 300 έως 2500nm, καλύπτοντας ένα μέρος του φάσματος της υπεριώδους (ultraviolet-UV) ακτινοβολίας (100-400nm), ολόκληρο το φάσμα της ορατής ακτινοβολίας (400-700nm) και της κοντινής υπέρυθρης (near infrared-NIR) ακτινοβολίας (700-2500nm) (Babb,2017; Κατσαφάδος, 2025). Για την ερμηνεία και τη συσχέτιση των οπτικών ιδιοτήτων, της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας που εμφανίζουν ή διαχειρίζονται τα υλικά σώματα, έχουν διατυπωθεί τέσσερις βασικοί νόμοι της ακτινοβολίας: ο νόμος των Stefan-Boltzmann, ο νόμος του Wien, ο νόμος του Planck και ο νόμος του Kirchhoff (Chasapis, 2015; Babb,2017).

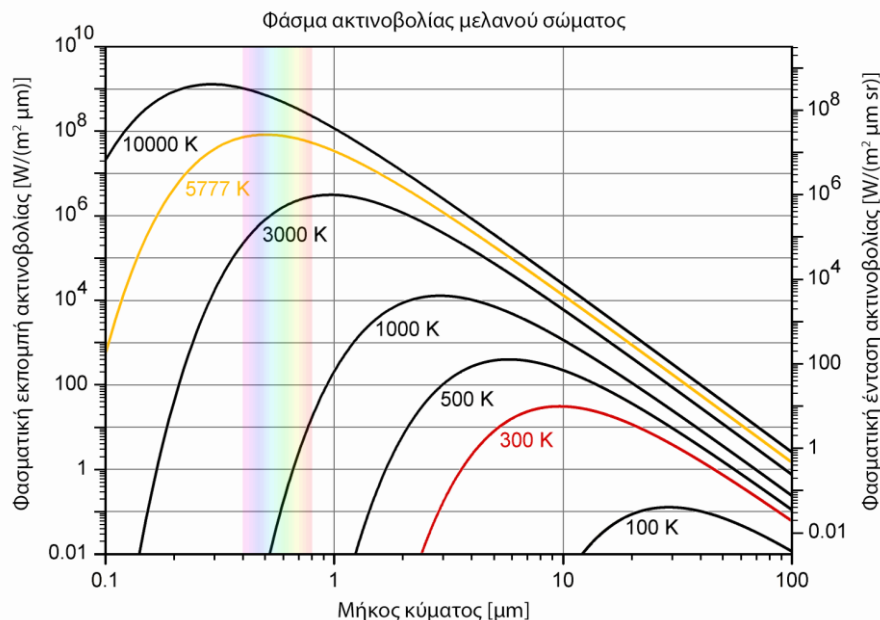
Νόμος των Stefan-Boltzmann: ο νόμος των Stefan-Boltzmann εκφράζει το γεγονός ότι όλα τα υλικά σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, εφόσον τη θερμοκρασία τους είναι μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός ($T>0K$). Επίσης, η ένταση της ακτινοβολίας (irradiance) που εκπέμπεται από ένα σώμα (μονάδα μέτρησης: W/m^2) είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος τη δεδομένη χρονική στιγμή (Chasapis, 2015; Babb, 2017). Σύμφωνα με το διάγραμμα που περιγράφει το νόμο (βλ. εικ. 4), ένα ιδανικό μέλαν σώμα, το οποίο έχει θεωρητικά τη δυνατότητα να εκπέμψει όλη την ακτινοβολία που έχει προηγουμένως απορροφήσει, όταν βρίσκεται σε θερμική ισορροπία (thermal equilibrium), δηλαδή γίνεται μηδενική καθαρή ανταλλαγή ή ροή θερμότητας μεταξύ αυτού και του άμεσου περιβάλλοντός του, εκπέμπει συγκεκριμένη ακτινοβολία για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας. Επομένως, η ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μελανό σώμα (με εκπεμπτικότητα=1) εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του. Αντίστοιχα, όλα τα υλικά σώματα στη φύση που έχουν εκπεμπτικότητα μικρότερη της μονάδας ($\epsilon<1$) λόγω της χημικής και μοριακής τους δομής, παρουσιάζουν ένταση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας αποκλειστικά εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία τους (Fattah, 2022; Κατσαφάδος, 2025).



Εικόνα 4: Διάγραμμα έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας – απόλυτης θερμοκρασίας για ένα μελανό σώμα σύμφωνα με το νόμο Stefan-Boltzmann (πηγή: wikipedia).

Νόμος του Wien: ο νόμος του Wien (ή αλλιώς νόμος μετατόπισης του Wien) εκφράζει το γεγονός ότι το μήκος κύματος στο οποίο παρατηρείται η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα, είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας του σώματος, μέσω μιας σταθερής σχέσης. Επομένως όσο θερμότερο είναι ένα σώμα, σε τόσο μικρότερο μήκος κύματος εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία (βλ. εικ. 5) (Babb, 2017; Fattah, 2022). Ο νόμος του Wien σε συνδυασμό με το νόμο Stefan-Boltzmann δικαιολογούν επιπλέον το γεγονός ότι η Γη ως ουράνιο σώμα εκπέμπει κατά προσέγγιση σαν μελανό σώμα θερμοκρασίας 300K με μέγιστο μήκος κύματος στο φάσμα της υπέρυθρης (infrared) ακτινοβολίας (700nm – 1mm), ενώ ο Ήλιος σαν μελανό σώμα θερμοκρασίας 5800K με μέγιστο μήκος κύματος στα 500nm του ορατού (visible) φάσματος ακτινοβολίας (βλ. εικ. 5) (Babb, 2017; Κατσαφάδος, 2025).

Νόμος του Planck: ο νόμος του Planck περιγράφει τη σχέση που έχει η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία σε συνάρτηση με το μήκος κύματος αυτής. Ο νόμος του Planck πρόκειται επί της ουσίας για μια μεταγενέστερη ερμηνεία της εκπεμπτικότητας των σωμάτων που προκύπτει από το συνδυασμό των νόμων Wien και Stefan-Boltzmann, εκφράζοντας ότι όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος και σε όλες τις θερμοκρασίες άνω του απόλυτου μηδενός, απλώς σε διαφορετικές εντάσεις εκπομπής (Chasapis, 2015; Κονταρίδης, 2022). Έτσι, σύμφωνα με το διάγραμμα που εκφράζει το νόμο του Planck για ένα μελανό σώμα (βλ. εικ. 5) επιβεβαιώνονται οι νόμοι Wien και Stefan-Boltzmann καθώς παρατηρείται ότι για ένα μελανό σώμα όταν βρίσκεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες οι μέγιστες εντάσεις ακτινοβολίας παρατηρούνται σε μικρότερα μήκη κύματος κοντά στην ορατή, κοντινή υπέρυθρη και υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ αντίθετα, οι μικρότερες εντάσεις παρατηρούνται όσο απομακρυνόμαστε από το μέγιστο της καμπύλης, δηλαδή όσο αυξάνεται ή μειώνεται το μήκος κύματος μακριά από το μέγιστο φάσμα κάθε φορά. Εφόσον οι συνθήκες αυτές ισχύουν για ένα μελανό σώμα, ο νόμος του Planck υποδηλώνει πως ισχύει και για όλα τα υπόλοιπα σώματα (Babb, 2017; Κονταρίδης, 2022).



Εικόνα 5: Διάγραμμα έντασης εκπεμπόμενης ακτινοβολίας –μήκους κύματος ακτινοβολίας για ένα μελανό σώμα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, σύμφωνα με το νόμο του Planck (πηγή: sun.org).

Νόμος του Kirchhoff: ο νόμος του Kirchhoff για τη θερμική ακτινοβολία περιγράφει τη συνθήκη ότι όταν ένα μέλαν σώμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία, έχει την ικανότητα να εκπέμπει όση ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απορροφάει. Επίσης, από αυτή τη συνθήκη προκύπτει ότι ένα σώμα έχει την ίδια ικανότητα απορρόφησης και εκπομπής στα ίδια μήκη κύματος και στις ίδιες θερμοκρασίες. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα όταν γνωρίζουμε την απορροφητικότητα ενός σώματος υπό δεδομένες συνθήκες, να γνωρίζουμε ταυτόχρονα και την εκπεμπτικότητα ενός σώματος και το αντίστροφο. Επίσης καθ' αυτόν τον τρόπο, δικαιολογείται και το γεγονός ότι ένα σώμα παρουσιάζει μέγιστη απορροφητικότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και θερμοκρασίες (Fattah, 2022; Καταφάδος, 2025). Ο νόμος του Kirchhoff λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος μεταξύ των βασικών οπτικών ιδιοτήτων ενός σώματος, καθώς η εκπεμπτικότητα (ϵ) συνδέεται με την απορροφητικότητα και το άθροισμα της ανακλαστικότητας (ρ), της απορροφητικότητας (α) και της διαπερατότητας (τ) ενός σώματος είναι ίσο με τη μονάδα ($\rho + \alpha + \tau = 1$). Επομένως, σε ένα αδιαφανές σώμα (διαπερατότητα $\tau = 0$), η απορροφητικότητα (α) και η ανακλαστικότητα (ρ) είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη που συνδέονται με τη σχέση: $\alpha + \rho = 1$, άρα προκύπτει ότι $\alpha = 1 - \rho$ και κατ' επέκταση λόγω του νόμου του Kirchhoff για ένα μέλαν σώμα σε θερμική ισορροπία ισχύει ότι $\epsilon = 1 - \rho$, δηλαδή επιτυγχάνεται επιπλέον συσχέτιση μεταξύ της εκπεμπτικότητας και της ανακλαστικότητας ενός σώματος. Ωστόσο, παρόλο που τα μεγέθη αυτά ικανοποιούν πλήρως αυτές τις σχέσεις για ένα μελανό σώμα σε θερμική ισορροπία, οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές όταν μελετάμε σώματα διαφορετικής εκπεμπτικότητας από το μελανό και σε μικρές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις (Babb, 2017; Fattah, 2022).

1.2.3 Υλικά με δυναμική μεταβολή ιδιοτήτων

Με την εξέλιξη της χημείας, της φυσικής και της επιστήμης των υλικών, η παγκόσμια βιομηχανία έχει καταφέρει να αναπτύξει τη δημιουργία και την παρασκευή ορισμένων υλικών, τα οποία έχουν τη δυνατότητα μεταβολής της υλικής τους κατάστασης ή των οπτικών τους ιδιοτήτων. Ορισμένα από αυτά τα υλικά έχουν ήδη φτάσει σε στάδιο παραγωγής και άλλα μελετώνται ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο. Στη διεθνή βιβλιογραφία μερικά από τα εν λόγω υλικά, κυρίως όσα εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία κτιρίων, ανήκουν στη γενικότερη κατηγορία των ψυχρών υλικών (cool materials) (Santamouris & Yun, 2020; Song et al., 2025).

Ψυχρά ονομάζονται τα υλικά τα οποία λόγω της χημικής τους σύστασης εμφανίζουν υψηλή ανακλαστικότητα και εκπνευτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και εφαρμόζονται κυρίως σε εξωτερικές επιφάνειες του κτιριακού κελύφους, σε άμεση επαφή με το περιβάλλον, προσφέροντας δροσισμό με φυσικό-παθητικό τρόπο. Προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα υλικό ψυχρό σύμφωνα με τα διεθνή στάνταρ, οφείλει να έχει ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μεγαλύτερη ή ίση με 0.7 και εκπνευτικότητα στο υπέρυθρο φάσμα ακτινοβολίας μεγαλύτερη ή ίση με 0.75 (Van Lith et al., 2018). Τέτοια υλικά είναι συνήθως βαφές, επιχρίσματα ή κονιάματα (Song et al., 2025; Ziaemehr et al., 2023). Οι εφαρμογές των ψυχρών υλικών στα κτιριακά κελύφη έχουν αποδείξει ότι συνεισφέρουν στην εξασφάλιση θερμικής άνεσης εντός των κτιρίων καθώς η ανακλαστικότητα και η εκπνευτικότητα είναι δυο μεγέθη που παίζουν καθοριστικό ρόλο στις επιφανειακές θερμοκρασίες των δομικών στοιχείων και κατ' επέκταση και στη θερμότητα που μεταφέρεται από τα εν λόγω δομικά στοιχεία προς το εσωτερικό χώρο του κτιρίου, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες (Dabaieh et al., 2014; Sánchez & Vilà, 2022). Η μείωση της εισερχόμενης θερμότητας στο κτιριακό κέλυφος τη θερινή περίοδο, οδηγεί και στην ελάττωση της ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη (Butt et al., 2021; Rawat & Singh, 2021). Αντίστοιχα, η χαμηλή εκπνευτικότητα των ψυχρών υλικών, εξυπηρετεί τη μικρότερη εκπομπή ακτινοβολίας προς την ατμόσφαιρα τις βραδινές ώρες, εμποδίζοντας την ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών στο περιβάλλον της πόλης και ελέγχοντας σε μεγαλύτερο βαθμό το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, πάντα όμως εξαρτώμενα από τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής και τον τρόπο κατασκευής του κτιρίου (Karlessi et al., 2009; Butt et al., 2021).

Ωστόσο, τα ευφυή ευμετάβλητα υλικά, δεν περιορίζονται μόνο σε εφαρμογές του τομέα κατασκευής των κτιρίων αλλά μπορούν έχουν και ευρύτερες καθημερινές ή βιομηχανικές χρήσεις. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι: τα υλικά αλλαγής φάσης (phase change materials – PCM), τα οποία αλλάζουν κατάσταση ύλης (στερεά, υγρή ή αέρια) ανάλογα με τη θερμοκρασία που δέχονται, τα φωσφορούχα υλικά (fluorescent materials) που συνδυάζουν την εκπνεπτικότητα θερμικής ενέργειας με την εκπομπή φωτός σε ορατή ακτινοβολία (Soudian et al., 2020; Ziaemehr et al., 2023) και τα χρωμογενή υλικά (chromogenic materials) τα οποία αλλάζουν απόχρωση ανάλογα με τη μεταβολή συγκεκριμένων περιβαλλοντικών συνθηκών. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν τα: φωτοχρωμικά υλικά (photochromic materials) που αλλάζουν απόχρωση εξαιτίας της ιδιότητας του φωτός που εμπεριέχει η ακτινοβολία που δέχονται, τα ηλεκτροχρωμικά υλικά (electrochromic materials), τα οποία αλλάζουν απόχρωση λόγω της εφαρμογής συγκεκριμένου ηλεκτρικού πεδίου σε αυτά, τα θερμοχρωμικά υλικά (thermochromic materials) στα οποία παρατηρείται αλλαγή χρώματος εξαιτίας αλλαγής της εσωτερικής τους θερμοκρασίας και τα χημοχρωμικά υλικά (chemochromic materials) τα οποία υφίστανται χρωματικές μεταβολές μέσα από συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις με την άμεση ατμόσφαιρα (Ferrara & Bengisu, 2014; Hossain et al., 2023). Τα θερμοχρωμικά υλικά, που είναι και η κύρια κατηγορία υλικών που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελούν μια κατηγορία η οποία βρίσκει, όπως ποικίλες εφαρμογές τόσο στον κτιριακό τομέα όσο και στη βιομηχανία παραγωγής προϊόντων (Ferrara & Bengisu, 2014).

1.3 Κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει και αναλύει το ρόλο και τη συνεισφορά των θερμοχρωμικών υλικών στη λειτουργία του κτιριακού κελύφους και πιο συγκεκριμένα σε υπό εξέταση ενδεικτικό αδιαφανές δομικό στοιχείο, μέσω μοντέλου προκαθορισμένων παραμέτρων και συνθηκών. Για την όσο το δυνατό πληρέστερη κατανόηση της φύσης και των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών, αλλά και της σχέσης τους με το κτιριακό κέλυφος και τις εφαρμογές τους επί αυτού, κρίνεται ωφέλιμη η περιγραφή ορισμένων βασικών ζητημάτων-προκλήσεων που αντιμετωπίζει ένα κτιριακό κέλυφος καθώς και να προσδιοριστούν ορισμένα βασικά ερευνητικά ερωτήματα τα οποία οδηγούν στην αποσαφήνιση

Τα κεντρικά ερωτήματα προς διερεύνηση που θα καθορίσουν και το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας διατυπώνονται ως εξής:

1. Τι είναι τα θερμοχρωμικά υλικά (TCM);
2. Ποιες είναι οι βασικές οπτικές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών;
3. Σε ποιες βασικές κατηγορίες χωρίζονται τα θερμοχρωμικά υλικά;
4. Πώς τα θερμοχρωμικά υλικά μπορούν να επηρεάσουν τη θερμική συμπεριφορά του δώματος στο κτιριακό κέλυφος;
5. Πως καθορίζουν οι μεταβολές των οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών τη θερμική απόκριση ενός συμβατικού δώματος, υπό προκαθορισμένες συνθήκες;
6. Πως καθορίζουν οι μεταβολές των οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υλικών το ενεργειακό αποτύπωμα ενός συμβατικού δώματος, υπό προκαθορισμένες συνθήκες;

Η δομή της διπλωματικής εργασίας, διαρθρώνεται στα εξής κεφάλαια:

- Εισαγωγή
- Κεφάλαιο 1: Βασικό ερευνητικό πλαίσιο διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο 1 διατυπώνονται τα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα και η δομή της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, γίνεται η περιγραφή των καίριων ζητημάτων-προκλήσεων που αφορούν τη θερμική και περιβαλλοντική απόκριση των κτιριακών κελυφών (φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας, ζήτημα θερμικής άνεσης, πρόβλημα υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και υψηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κτιρίων) και γίνεται διερεύνηση της έννοιας και του ρόλου των ευφυών υλικών με δυναμική μεταβολή

ιδιοτήτων, ορισμένων εκ των οποίων έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής στο κτιριακό κέλυφος.

- Κεφάλαιο 2: Τα θερμοχρωμικά υλικά και τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η ανάλυση της έννοιας των θερμοχρωμικών υλικών, των βασικών πεδίων και τρόπων εφαρμογής τους, των κυρίων κατηγοριών τους, των πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων και των βασικών οπτικών τους ιδιοτήτων. Επίσης διερευνάται ο ρόλος των θερμοχρωμικών υλικών στη θερμική απόκριση του κτιριακού κελύφους και η σχέση τους με τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας.
- Κεφάλαιο 3: Το μοντέλο θερμικής ανάλυσης και οι παράμετροί του. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι ροές θερμότητας που εντοπίζονται σε αδιαφανή δομικά στοιχεία δωματίων σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον και τον εσωτερικό χώρο του κτιριακού κελύφους. Διερευνάται η σημασία των οριακών-επιφανειακών θερμοκρασιών και των απαιτούμενων θερμικών αναγκών, ανάλογα με τη χρονική περίοδο και τις συνθήκες που πρέπει να επιτευχθούν. Εν συνεχεία, περιγράφεται το σενάριο πάνω στο οποίο βασίζεται το πειραματικό μοντέλο ανάλυσης μέσω του οποίου θα διερευνηθεί η απόδοση και θερμοχρωμικού υλικού σε κατασκευή συμβατικού δώματος, καθώς και οι βασικές συνθετικές παράμετροι του μοντέλου. Πρόκειται για μια μελέτη περίπτωσης (case study) η οποία θα πραγματοποιηθεί μέσω προσομοιώσεων όπου θα εισαχθούν τα υλικά-στρώσεις κατασκευής του δώματος, κλιματικά δεδομένα και ενδεικτικές τιμές οπτικών ιδιοτήτων, προκειμένου να εξαχθούν δεδομένα θερμοκρασιών.
- Κεφάλαιο 4: Θερμική ανάλυση εφαρμογής θερμοχρωμικών υλικών σε κατασκευή συμβατικού δώματος. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται καταγραφή και επεξήγηση των διαγραμμάτων που προκύπτουν από τη θερμική ανάλυση του μοντέλου, συγκρίνονται τιμές μεταξύ διαφορετικών εξεταζόμενων συνθηκών και υποπεριπτώσεων μεταβολής των παραμέτρων.
- Κεφάλαιο 5: Εξάγονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Περιγράφονται οι επιδράσεις που έχει προκαλέσει κάθε διαφοροποίηση παραμέτρων στη θερμική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου και αναφέρονται ενδεχόμενες δυνατότητες μελλοντικής έρευνας πάνω στην προσαρμογή των θερμοχρωμικών υλικών στα κτιριακά κελύφη. Επιπλέον, παραθέτονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας.
- Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 2. Τα θερμοχρωμικά υλικά και τα κύρια χαρακτηριστικά τους

2.1 Ορισμός και οπτικές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών

2.1.1 Τι είναι τα θερμοχρωμικά υλικά

Τα θερμοχρωμικά υλικά (thermochromic materials - TCM) αποτελούν μια υποκατηγορία των χρωμογενών υλικών και έχουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα να υφίστανται μεταβολές στην απόχρωσή τους, ανάλογα με τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη μοριακή τους δομή (Hossain et al., 2023). Η μεταβολή αυτή συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω χημικών αντιδράσεων κατά τις οποίες επιτυγχάνεται μεταφορά ηλεκτρονίων και φωτονίων σε διαφορετικές ενεργειακές ζώνες (band gaps) εντός των μορίων του υλικού, τα οποία διεγείρονται μέσω της θερμικής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα το υλικό εξαιτίας της νέας κρυσταλλικής και μοριακής του δομής, να εμφανίζει διαφορετικό τρόπο ανάκλασης, απορρόφησης ή εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σε διαφορετικό μήκος κύματος από αυτό που εξέπεμπε πριν την αλλαγή θερμοκρασίας (συνήθως μεταξύ του υπεριώδους, του ορατού και του υπέρυθρου φάσματος) και επομένως να αποκτά και διαφορετική απόχρωση (Apostolescu et al., 2021). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται θερμοχρωμισμός (thermochromism) και για κάθε υλικό πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ή εύρος θερμοκρασίας, λεγόμενη και ως «θερμοκρασία μετάβασης» (transition temperature), ανάλογα με τη σύσταση του υλικού και τις χημικές του ιδιότητες (Ferrara & Bengisu, 2014). Οι ιδιότητες του θερμοχρωμικού υλικού καθορίζουν επίσης το αν η μεταβολή απόχρωσής του μπορεί να πραγματοποιηθεί ακαριαία ή σε εκτενέστερη χρονική διάρκεια ή ακόμα αν αυτή είναι οριστική ή αναστρέψιμη (Crosby & Netravali, 2022). Τα θερμοχρωμικά υλικά στο μεγαλύτερο μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα οργανικά, τα ανόργανα και τα σύνθετα, ωστόσο υπάρχουν καταγεγραμμένες και διαφορετικές κατηγοριοποιήσεις όπως θερμοχρωμικά υλικά βασισμένα ή όχι σε βαφή (Hu et al., 2024; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα οργανικά και ανόργανα θερμοχρωμικά υλικά παρουσιάζουν εν γένει μοριακές θερμοχρωμικές ιδιότητες, ενώ τα σύνθετα συνήθως αποτελούνται από συνδυασμό υλικών όπου το ένα προσδίδει τη θερμοχρωμική ιδιότητα και τα υπόλοιπα δεν τη διαθέτουν (Garshasbi & Santamouris, 2018). Βασικές εφαρμογές των θερμοχρωμικών υλικών συναντώνται σε αρκετούς διαφορετικούς τομείς, όπως είναι: οι κτιριακές κατασκευές (συμπαγή δομικά στοιχεία, κουφώματα), η

κατασκευή οδοστρωμάτων, η δημιουργία φωτοηλεκτρικών κυττάρων, οι αισθητήρες θερμοκρασίας, η θέρμανση μετάλλων, οι καταλύτες χημικών αντιδράσεων, η χρήση σε οθόνες, σε βιοϊατρικά ή φαρμακευτικά προϊόντα και η δημιουργία υφασμάτων και χρωστικών ουσιών (Apostolescu et al., 2021; Crosby & Netravali, 2022).

2.1.2 Οπτικές ιδιότητες των θερμοχρωμικών υλικών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο θερμοχρωμισμός προκαλεί αλλαγές στην απόχρωση των θερμοχρωμικών υλικών εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών που υφίστανται οι μοριακές δομές τους. Ωστόσο, αυτή η μεταβολή απόχρωσης πηγάζει από την αλλαγή στον τρόπο διαχείρισης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, γεγονός που υποδηλώνει και τη μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων του υλικού (Soudian et al., 2020). Οι οπτικές ιδιότητες (optical properties) αποτελούν ίσως τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των θερμοχρωμικών υλικών, διότι έχουν καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο των θερμοκρασιακών μεταβολών που επιδρούν στα επιμέρους στοιχεία, προϊόντα και κατασκευές με τα οποία αυτά έρχονται σε εφαρμογή, ανάμειξη ή επαφή και για αυτόν ακριβώς το λόγο αναπτύσσονται και παράγονται και τα αντίστοιχα δομικά ή βιομηχανικά προϊόντα που τα εμπεριέχουν. Οι οπτικές ιδιότητες είναι δηλαδή ο βασικότερος λόγος αξιοποίησης και χρήσης των θερμοχρωμικών υλικών (Ferrara & Bengisu, 2014; Hossain et al., 2023). Για τις διάφορες κατηγορίες θερμοχρωμικών υλικών που αναφέρονται παρακάτω, καταγράφονται διαφορετικές οπτικές ιδιότητες οι οποίες σχετίζονται τόσο με τις αποχρώσεις που αυτά λαμβάνουν, τις θερμοκρασίες μετάβασης απόχρωσης αλλά και τη διαχείριση της ακτινοβολίας (ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, εκπεμπικότητα). Οι αναφερόμενες τιμές των οπτικών ιδιοτήτων στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν εκφράζονται πάντα με αριθμητικές ή ποσοστιαίες τιμές στο σύνολο της έρευνας που έχει μελετηθεί, αλλά σε πολλές περιπτώσεις περιγράφεται η σχέση τους με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης κάθε ξεχωριστό θερμοχρωμικό υλικό έχει τις δικές του μοναδικές τιμές οπτικών ιδιοτήτων λόγω της χημικής του σύστασης και του τρόπου παρασκευής του, οπότε ακόμα και στην ίδια κατηγορία υλικού οι τιμές που αναφέρονται είναι καθαρά ενδεικτικές και περιγραφικές ως τάξη μεγέθους για όλα τα υλικά της συγκεκριμένης κατηγορίας (π.χ. leuco dyes). Ο τρόπος που εκδηλώνεται η μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων στα θερμοχρωμικά υλικά παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοσή τους ως προς την προστασία του κτιριακού κελύφους. Η θερμοκρασία ή το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης, η δυνατότητα αναστρεψιμότητας του χρώματος, το πόσο έντονα ή

γρήγορα πραγματοποιείται η μεταβολή της απόχρωσης, η ανθεκτικότητα του υλικού αλλά και η ίδια η απόχρωση (για παράδειγμα κίτρινη ή πράσινη) είναι μερικά από τα βασικά κριτήρια επιλογής θερμοχρωμικού υλικού, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή του (Hu et al., 2024).

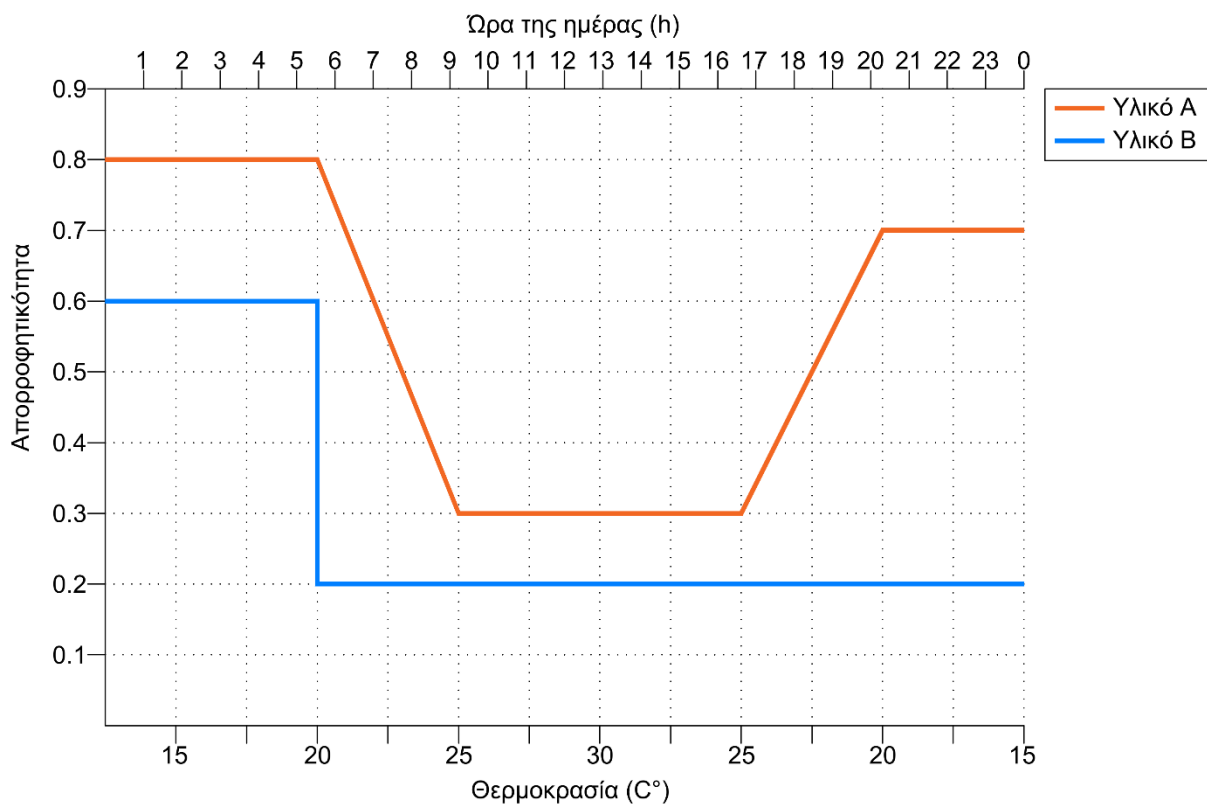
Όσον αφορά τα κτιριακά κελύφη, η επιλογή ενός θερμοχρωμικού υλικού είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις κλιματικές συνθήκες του τόπου που βρίσκεται το κτίριο, διότι αυτές είναι που καθορίζουν την συμπεριφορά του και την ανταλλαγή θερμότητας συνήθως μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας με το ίδιο το εξωτερικό περιβάλλον, μετριάζοντας και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (Karlessi et al., 2009). Σε αντίθεση με τα ψυχρά υλικά, η αποτελεσματικότητά των θερμοχρωμικών υλικών παρατηρείται εξίσου και στη χειμερινή και στη θερινή περίοδο, παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης των θερμοκρασιών μετάβασής τους προκειμένου να ελέγχονται με περισσότερη ακρίβεια οι επιφανειακές θερμοκρασίες των δομικών στοιχείων και οι θερμικές ροές από και προς το κτίριο και εν συνεχεία να ικανοποιούνται οι κατάλληλες συνθήκες θερμικής άνεσης ή ακόμα και να περιορίζεται η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου (Hu et al., 2024).

Σύμφωνα με τους νόμους της ακτινοβολίας, η εκπεμπτικότητα ενός σώματος αυξάνεται όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία του (Chasapis, 2015). Όμως στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάζονται θερμοχρωμικά υλικά ειδικότερα σε αδιαφανή στοιχεία, παρατηρείται ότι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους και φτάνει το σημείο μετάβασης, τότε η ανακλαστικότητά τους αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι η απορροφητικότητά τους μειώνεται εφόσον είναι αντιστρόφως ανάλογη της ανακλαστικότητας και επίσης μειώνεται και η εκπεμπτικότητά τους λόγω του νόμου του Kirchhoff (Babb, 2017). Εδώ δημιουργείται ένα παράδοξο, στο οποίο όμως έρχεται να δώσει απάντηση η αλλαγή χρώματος, διότι σε αυτή οφείλεται κυρίως η αύξηση της ανακλαστικότητας όπως επίσης και στο γεγονός ότι η μέγιστη εκπεμπτικότητα των περισσότερων υλικών δεν παρατηρείται στο ίδιο μήκος κύματος με την ηλιακή ακτινοβολία, αλλά περισσότερο στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Kitsoroulou et al., 2024). Τα θερμοχρωμικά υλικά στα κτιριακά κελύφη εμφανίζουν γενικά χαμηλές τιμές ανακλαστικότητας (και υψηλής απορροφητικότητας) πριν την έκθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία, λόγω της περισσότερο σκουρόχρωμης απόχρωσής τους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας και έκθεσης του θερμοχρωμικού υλικού στην ηλιακή ακτινοβολία, η ανακλαστικότητα του υλικού, λόγω μεταβολής σε πιο ανοιχτόχρωμη απόχρωση, αυξάνεται μέσα στο φάσμα της ορατής και της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας λαμβάνοντας μια μέγιστη τιμή, όπου το υλικό φτάνει και στη θερμοκρασία μετάβασης, είτε ακαριαία είτε σταδιακά (Liu et al., 2023).

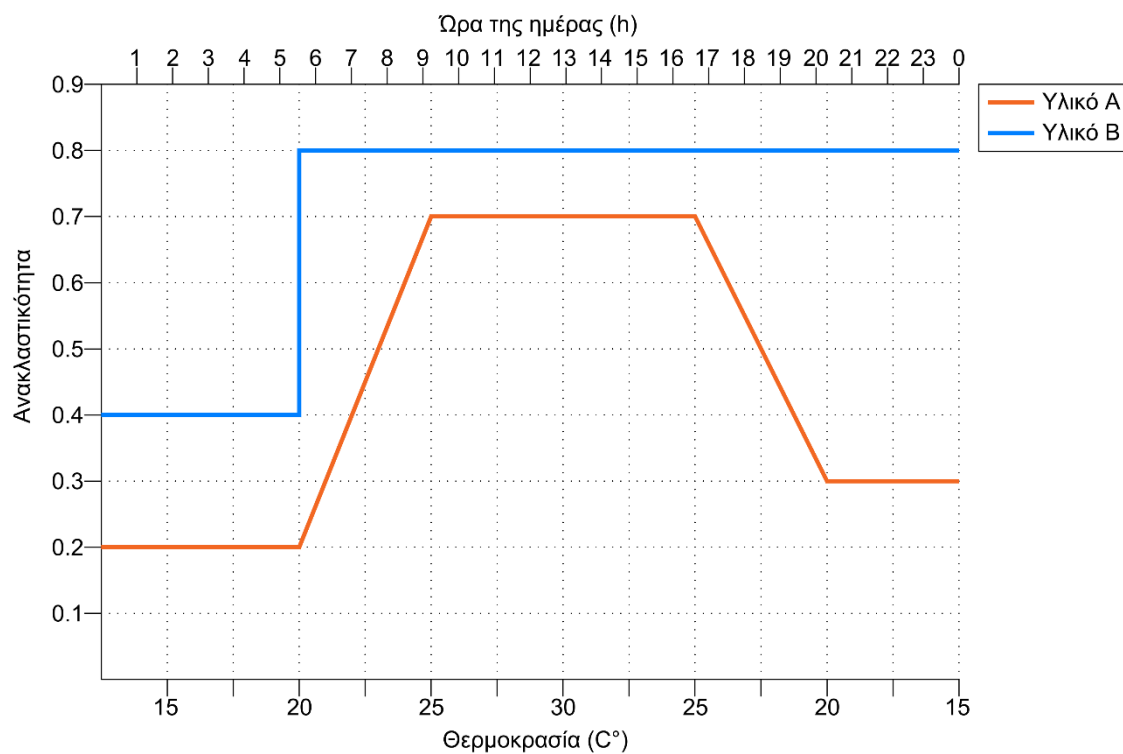
Όταν δύνει ο Ήλιος και η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία εξασθενεί, τότε μειώνεται η απόδοση της ανακλαστικότητας του υλικού καθώς δεν υπάρχει πλέον προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και με τη σειρά της έρχεται σε λειτουργία η εκπεμπτικότητα η οποία παρατηρείται να αποδίδει περισσότερο σε υπέρυθρη ακτινοβολία για υλικά με θερμοκρασίες κάτω των 300K (νόμος Planck) (Κονταρίδης, 2022), καθώς το υλικό έχει αποθηκεύσει θερμότητα στη διάρκεια της ημέρας και την επιστρέφει προς το περιβάλλον μέσω ακτινοβολίας λόγω χρονικής υστέρησης (Karlessi & Santamouris, 2013; Babb, 2017). Παρόλο που και οι δυο τιμές (απορροφητικότητα και εκπεμπτικότητα) είναι υψηλές τις βραδινές ώρες, η λειτουργία της δεύτερης υπερτερεί της πρώτης πάλι λόγω της έλλειψης της ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή το γεγονός ότι ένα σώμα έχει υψηλή ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα ή εκπεμπτικότητα σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, δεν σημαίνει ότι τις εκδηλώνει και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, επειδή υπάρχει η περίπτωση να μην επικρατούν οι απαραίτητες συνθήκες για την εκδήλωσή τους. Η ανακλαστικότητα και η απορροφητικότητα αποδίδουν περισσότερο όταν είναι περισσότερο έντονη και παρούσα η προσπίπτουσα ακτινοβολία από ένα ξένο σώμα (π.χ. τον Ήλιο) ενώ η εκπεμπτικότητα αποδίδει περισσότερο όταν το ίδιο το υλικό έχει αναπτύξει μια ιδανική υψηλή εσωτερική θερμοκρασία και όταν δημιουργείται η κατάλληλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του υλικού και του άμεσου περιβάλλοντος (Karlessi et al., 2009; Babb, 2017).

Στις εικόνες 6 και 7, απεικονίζονται ενδεικτικά οι τάσεις μεταβολής της απορροφητικότητας και της ανακλαστικότητας δύο τυχαίων-θεωρητικών θερμοχρωμικών υλικών (Α και Β) που εφαρμόζονται σε τυχαίο αδιαφανές δομικό στοιχείο (διαπερατότητα=0), συναρτήσει της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, σε τυχαίες κλιματικές συνθήκες. Γενικά, σε πολλές περιπτώσεις θερμοχρωμικών υλικών η μεταβολή της απορροφητικότητας εμφανίζεται ως αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής της ανακλαστικότητας κατά την αλλαγή θερμοκρασίας, έχοντας μια τάση οι οπτικές ιδιότητες να φτάνουν στις ελάχιστες ή μέγιστες τιμές όταν έχουν πλέον αγγίξει την απαραίτητη οριακή τιμή θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από το σε ποια χρονική στιγμή της ημέρας συμβαίνει αυτό ή αν οι θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει τα όρια της θερμοκρασίας μετάβασης (Garshasbi & Santamouris, 2018). Για παράδειγμα στην εικόνες 6 και 7, το υλικό Α παρουσιάζει σταδιακές, αντιστρόφως ανάλογες μεταβολές της απορροφητικότητάς και της ανακλαστικότητάς του σε εύρος θερμοκρασίας από 20 έως 25 °C, σε χρονική διάρκεια 4 ωρών, οι οποίες είναι αναστρέψιμες κατά τον ίδιο τρόπο μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, το υλικό Β παρουσιάζει πιο απότομες σε διαφορά τιμών μεταβολές απορροφητικότητας και ανακλαστικότητας, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία

μετάβασης (20 °C), χρονικά ακαριαίες σε συγκεκριμένη στιγμή της ημέρας (5:30 το πρωί) και οι μεταβολές αυτές είναι μη αναστρέψιμες. Καθώς κάθε θερμοχρωμικό υλικό χαρακτηρίζεται από τις μοναδικές τιμές των οπτικών του ιδιοτήτων και των τρόπων με τον οποίο αυτές επηρεάζονται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, στους συγκεντρωτικούς πίνακες που βρίσκονται στο τέλος κάθε κατηγορίας, παρατίθενται επιγραμματικά τα βασικότερα θερμοχρωμικά υλικά που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και οι κύριες ιδιότητές τους, δεδομένα τα οποία περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες ενότητες.



Εικόνα 6: Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής απορροφητικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών Α και Β σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 7: Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής ανακλαστικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών Α και Β σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

2.2 Οργανικά θερμοχρωμικά υλικά

2.2.1 Leuco dyes

Η πρώτη βασική κατηγορία θερμοχρωμικών υλικών είναι τα οργανικά (αποτελούμενα από χημικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα), ξεκινώντας από το περισσότερο διαδεδομένο από άποψη μελετών, τις leuco dyes. Οι leuco dyes όπως μαρτυρά και ο τίτλος τους (leuco=λευκό / dye=βαφή) πρόκειται για βαφές οι οποίες μεταβάλουν την απόχρωσή τους ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η χημική αντίδραση των στοιχείων που τις συγκροτούν. Η συνηθέστερη μετάβαση απόχρωσης των leuco dyes γίνεται από μια άχρωμη κατάσταση σε ένα συγκεκριμένο χρώμα (Garshasbi & Santamouris, 2018). Επιπλέον ορισμένες βαφές έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν διαδοχικά πολλαπλές αποχρώσεις όσο αυξάνεται ή μειώνεται η θερμοκρασία τους είτε μόνιμα είτε κατά αναστρέψιμο τρόπο (Crosby & Netravali, 2022). Οι leuco dyes αποτελούνται από τρία βασικά συνθετικά συστατικά: τον διαμορφωτή χρώματος (color former), συνήθως μια ένωση εστέρα, με πιο χαρακτηριστική την λακτόνη του κρυσταλλικού ιώδους (crystal violet lactone –CVL), τον ενεργοποιητή χρώματος (color developer), συνήθως ένα αδύναμο οξύ, όπως για παράδειγμα η δισφαινόλη Α (bisphenol A –BPA) και τον διαλύτη (solvent), συνήθως μια αλκοόλη, αιθέρας ή κετόνη. Η βασική αρχή λειτουργίας του θερμοχρωμικού υλικού στηρίζεται στην αντίδραση μεταξύ των παραπάνω τριών στοιχείων (Perez et al., 2020; Tatíčková et al., 2023). Ο διαμορφωτής χρώματος δίνει ηλεκτρόνια σε χημική αντίδραση με τον ενεργοποιητή, προσδίδοντας και καθορίζοντας την απόχρωση που πρόκειται να εμφανίσει το υλικό. Ο ενεργοποιητής χρώματος, δεχόμενος ηλεκτρόνια από τον διαμορφωτή, καθορίζει την ένταση του χρώματος. Ο διαλύτης ανάλογα με τη θερμοκρασία που πραγματοποιείται η χημική αντίδραση, βρίσκεται σε στερεή κατάσταση κατά την οποία η αρχική απόχρωση της βαφής είναι εμφανής, ή φτάνει σε σημείο τήξεως όπου μετατρέπεται σε υγρή κατάσταση και η βαφή αλλάζει απόχρωση ή γίνεται μερικώς ή ολικώς άχρωμη (Tatíčková et al., 2023; Nagare et al., 2024). Κατά αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της επιθυμητής θερμοκρασίας μετάβασης επιλέγοντας τις κατάλληλες χημικές ενώσεις, προκειμένου η βαφή να αλλάζει απόχρωση και ταυτόχρονα οπτικές ιδιότητες σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στις περισσότερες πειραματικές μελέτες, τα συστατικά στοιχεία της βαφής αναδεύονται με την κίνηση των χεριών, ενώ σε ορισμένες γίνεται και με τη μέθοδο της φυγοκέντρισης, προσφέροντας στο τελικό μείγμα μεγαλύτερη ομοιογένεια (Tatíčková et al., 2023). Οι συνηθέστερες ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάβασης που παρατηρούνται στις leuco dyes (βλ. πιν. 1) κυμαίνονται σε ένα

μεγάλο εύρος από -25 έως και 65 °C, ενώ δεν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί στις δυνατές αποχρώσεις (Nagare et al., 2024). Καθώς οι leuco dyes πρόκειται για το μόνο θερμοχρωμικό υλικό που έχει δοκιμαστεί σε συμπαγή δομικά στοιχεία κτιρίων (Tatíčkoná et al., 2023), έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζει εντονότερες μεταβολές ανακλαστικότητας στο ορατό φάσμα ακτινοβολίας και μέγιστη εκπεμπτικότητα σε υπέρυθρη ακτινοβολία (Garshasbi & Santamouris, 2018; Perez et al., 2020). Η συνθήκη αυτή αιτιολογεί και το γεγονός ότι σε αρκετές περιπτώσεις η απόχρωση της βαφής τείνει να εμφανίζεται ως λευκή ή άχρωμη, καθώς ανακλώνται ταυτόχρονα πολλαπλά μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας (Kitsoroulou et al., 2024). Η εφαρμογή των leuco dyes σε εξωτερικά δομικά στοιχεία όπως τοιχοποιίες και δώματα, εξυπηρετεί την προσαρμογή της ανακλαστικότητας, απορροφητικότητας και εκπεμπτικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας με στόχο την εξυπηρέτηση των θερμικών αναγκών του κτιρίου, προσαρμοσμένες στις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Για παράδειγμα, μια leuco dye μπορεί να αποκτήσει ανοικτές αποχρώσεις τη θερινή περίοδο όπου δέχεται υψηλές θερμοκρασίες και να ανακλά αποτελεσματικότερα την ηλιακή ακτινοβολία, μειώνοντας τη θερμική επιβάρυνση του κελύφους προσφέροντας δροσισμό στους χώρους του κτιρίου, ενώ το χειμώνα οι χαμηλές θερμοκρασίες μεταβάλουν σε περισσότερο σκούρες αποχρώσεις τις επιφάνειες των δομικών στοιχείων με αποτέλεσμα να απορροφάται περισσότερη ακτινοβολία και να διοχετεύεται προς το εσωτερικό του κτιρίου εξυπηρετώντας περισσότερο τα θερμικά κέρδη του (Nagare et al., 2024; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Ένα ακόμα πλεονέκτημα των leuco dyes (βλ. πιν. 2) είναι το χαμηλό κόστος παραγωγής τους. Όμως τα υλικά αυτά συνοδεύονται και από ορισμένα μειονεκτήματα, εκ των οποίων τα σημαντικότερα είναι η εξασθένιση των οπτικών ιδιοτήτων τους μετά από ένα χρονικό διάστημα (μερικές μέρες) λόγω φωτοαποδόμησης και έκθεσης στην υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, η οποία διαταράσσει τη χημική σύστασή τους και τα κάνει να διαλύονται ή να ξεθωιάζουν (Garshasbi & Santamouris, 2018; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Μια συνηθισμένη πρακτική για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η μικροενθλάκωση (microencapsulation) των θερμοχρωμικών υλικών σε οργανικά πολυμερή ώστε να τους παρέχεται προστασία από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορεί να βλάψουν τη δομή και την ανθεκτικότητά τους (Crosby & Netravali, 2022). Ορισμένες ενώσεις που βοηθούν στην προστασία των leuco dyes μέσω μικροενθλάκωσης είναι τα διοξείδια του πυριτίου (SiO_2) και του τιτανίου (TiO_2) (Nagare et al., 2024; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Για παράδειγμα, η επικάλυψη των leuco dyes με TiO_2 , έχει αποδείξει ότι η θερμική αγωγιμότητα του TiO_2 επιδρά στο ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία της βαφής και την απορρόφηση και τη διάχυση του φωτός μέσα

στη μοριακή δομή της, καθώς όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των μορίων του TiO_2 , τόσο ισχυρότερη είναι και η διάχυση του φωτός που προκαλούν και κατά συνέπεια η ακτινοβολία ανακλάται σε μικρότερα μήκη κύματος (Hu et al., 2024). Επιπλέον, η μικροενθλάκωση βαφής με TiO_2 καθιστά ακόμη πιο ανοιχτόχρωμη την απόχρωση της βαφής και κατά συνέπεια αυξάνει και την ανακλαστικότητα της, σε σύγκριση με την έλλειψη TiO_2 (Karlessi et al., 2009). Εκτός από τη βασικότερη εφαρμογή των leuco dyes σε κτιριακά κελύφη, επιπλέον εφαρμογές τους συναντώνται σε δημιουργία χρωστικών σε υφάσματα, σε αισθητήρες θερμοκρασίας και σε τεχνικές εκτυπώσεων (Hidalgo-Araujo et al., 2025).

2.2.2 Υγροί κρύσταλλοι

Οι υγροί κρύσταλλοι (liquid crystals -LC) πρόκειται για ένα υλικό το οποίο αποτελείται από κρυσταλλικές δομές οι οποίες ισορροπούν ανάμεσα σε στερεή και υγρή υλική κατάσταση. Η μοριακή τους δομή εμφανίζει μια στοιχειώδη τάξη που παρατηρείται σε στερεά υλικά όμως ταυτόχρονα και μια περισσότερο άτακτη κίνηση σωματιδίων που εντοπίζεται στα υγρά (Hossain et al., 2023). Η ανακάλυψη του θερμοχρωμισμού ως φαινόμενο οφείλεται στην ανακάλυψη των πρώτων υγρών κρυστάλλων το 1888 (Crosby & Netravali, 2022). Οι υγροί κρύσταλλοι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους θερμοτροπικούς (thermotropic) οι οποίοι μεταβάλλονται μοριακά μόνο λόγω θερμοκρασίας και τους λυοτροπικούς (lyotropic), των οποίων οι μοριακές μεταβολές γίνονται έπειτα από συνδυασμό θερμότητας και την προσθήκη ή αφαίρεση χημικών διαλυτών (Apostolescu et al., 2021). Συγκεκριμένα στη κατηγορία των θερμοτροπικών υγρών κρυστάλλων, η θερμότητα που αυτοί δέχονται προκαλεί μεταβολές στη στοίχιση και την ευθυγράμμιση των κρυσταλλικών μορίων αλλάζοντας το βαθμό διαφάνειας και τις γωνίες ανάκλασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Crosby & Netravali, 2022). Η διατάξεις των μορίων στις κρυσταλλικές δομές στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν συγκεκριμένες οργανωμένες μορφές (παράλληλες, σε στρώσεις ή ελικοειδής), γεγονός που επιτρέπει την πρόβλεψη των γωνιών και της κατεύθυνσης της ανακλώμενης ακτινοβολίας μετά από τη διέγερση των μορίων λόγω αλλαγής θερμοκρασίας (Apostolescu et al., 2021). Επίσης, όσο η θερμοκρασία των μορίων αυξάνεται, τόσο περισσότερο διαφέρουν τα ανακλώμενα μήκη κύματος και οι υγροί κρύσταλλοι μπορούν να εμφανίσουν περισσότερες αποχρώσεις του ορατού φάσματος ακτινοβολίας ή ακόμα και να περάσουν από αδιαφανή, σε ημιδιαφανή και διαφανή κατάσταση. Ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάβασης των υγρών κρυστάλλων (βλ. πιν. 1) είναι από -30 μέχρι 120 °C. Τα επίπεδα απορροφητικότητάς τους κυμαίνονται από 0.4 έως 0.8 σε ακτινοβολία μήκους κύματος 550-

640nm (Stasiek & Kowalewski, 2002). Η μέγιστη ανακλαστικότητα τους παρατηρείται σε ακτινοβολία μήκους κύματος 400-700nm ενώ σχετικά με την εκπνευτικότητα δεν καταγράφονται σταθερές πληροφορίες (Stasiek & Kowalewski, 2002). Οι μεταβολές απόχρωσης και οπτικών ιδιοτήτων των υγρών κρυστάλλων έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν και με αναστρέψιμο τρόπο, μειώνοντας αντίστοιχα τη θερμοκρασία τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι υγροί κρύσταλλοι να είναι ένα θερμοχρωμικό υλικό που μπορεί να δέχεται ευέλικτη μεταχείριση από τον άνθρωπο και να προσαρμόζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στις επιθυμητές προδιαγραφές θερμοκρασίας μετάβασης και οπτικές ιδιότητες, ανάλογα με τη χρήση του. (Stasiek & Kowalewski, 2002). Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα (βλ. πιν. 2) που έχουν οι υγροί κρύσταλλοι είναι ότι έχουν υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση, ωστόσο παρουσιάζουν τα μειονεκτήματα της σταδιακής μείωσης της απόδοσης των οπτικών τους ιδιοτήτων λόγω διαρκούς έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία και ενδεχόμενης χημικής μόλυνσης (Nagare et al., 2024). Επιπλέον το κόστος παραγωγής τους είναι σχετικά ακριβό, δεδομένο που δικαιολογεί σε ένα βαθμό και την ακριβέστερη απόδοσή τους. Οι επικρατέστερες εφαρμογές τους συναντώνται σε αισθητήρες θερμοκρασίας, οθόνες, φωτοηλεκτρικά κύτταρα, βαφές αλλά και σε κουφώματα (Garshasbi & Santamouris, 2018).

2.2.3 Συζευγμένα πολυμερή

Μια τρίτη υποκατηγορία οργανικών θερμοχρωμικών υλικών είναι τα συζευγμένα πολυμερή (conjugated polymers). Πρόκειται για ημιαγωγικά οργανικά πολυμερή των οποίων η μοριακή δομή χαρακτηρίζεται από εναλλασσόμενους απλούς και διπλούς «π» τροχιακούς δεσμούς άνθρακα που φιλοξενούν απεντοπισμένα ηλεκτρόνια τα οποία δεν ανήκουν σε ένα μόνο άτομο αλλά κινούνται ελεύθερα δημιουργώντας ένα συζευγμένο σύστημα κατά μήκος της πολυμερικής αλυσίδας (Garshasbi & Santamouris, 2018). Οι αλλαγές θερμοκρασίας προκαλούν ανακατανομή των ηλεκτρονίων και του μήκους του συζευγμένου συστήματος στην πολυμερική αλυσίδα, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι οπτικές ιδιότητες του πολυμερούς (Garshasbi & Santamouris, 2018). Για παράδειγμα, το πολυδιακετυλένιο (PDA) ένα αρκετά μελετημένο συζευγμένο πολυμερές, όσο δέχεται περισσότερη θερμότητα υφίσταται σταδιακή αλλαγή χρώματος από μπλε σε κόκκινο σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας μετάβασης (από 20 έως 200 °C) (βλ. πιν. 1) και αυξάνεται η απορροφητικότητά του κυρίως στο φάσμα της ορατής ακτινοβολίας, φτάνοντας μέγιστη τιμή περίπου σε μήκος κύματος 640nm (Apostolescu et al., 2021; Nagare et al., 2024). Η εκπνευτικότητα των πολυμερών παρατηρείται να αυξάνεται σε

ανάλογη σχέση με την απορροφητικότητα και να λαμβάνει μέγιστες τιμές σε μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Hossain et al., 2023). Επίσης, άλλες χρωματικές μεταβάσεις που μπορούν να εμφανίσουν τα συζευγμένα πολυμερή είναι από μωβ σε μπλε, ή από κόκκινο σε ροζ και κίτρινο (Hossain et al., 2023). Συνήθως η αλλαγή χρώματος δεν είναι εύκολα αναστρέψιμη και όταν έρχονται σε επαφή με τον αέρα υφίστανται γρήγορα οξείδωση, δυσχεραίνοντας την ανθεκτικότητά τους (Nagare et al., 2024). Μερικά όμως πλεονεκτήματα των συζευγμένων πολυμερών (βλ. πιν. 2) είναι το φθινό κόστος κατασκευής και η υψηλή τους αντίσταση στη φωτολεύκανση (Nagare et al., 2024). Οι συνηθέστερες χρήσεις τους εφαρμόζονται σε επικαλύψεις κουφωμάτων, σε βαφές, σε αισθητήρες θερμοκρασίας και στην αεροναυπηγική (Crosby & Netravali, 2022).

2.2.4 Φωτονικοί κρύσταλλοι

Οι φωτονικοί κρύσταλλοι (photonic crystals) είναι τεχνητές νανοδομές οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την κίνηση του φωτός. Καθώς οι φωτονικοί κρύσταλλοι απορροφούν ακτινοβολία σε μήκη κύματος κυρίως κοντά στο ορατό φάσμα, μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης των μικροσωματιδίων που βρίσκονται μέσα τους, διατεταγμένα σε παράλληλα διαδοχικά επίπεδα, τα οποία ονομάζονται επίπεδα Bragg (Garshasbi & Santamouris, 2018). Ανάλογα με τον αριθμό των διαφορετικών κατευθύνσεων που παίρνει η ακτινοβολία όταν ανακλάται μέσα στους κρυστάλλους, αυτοί διακρίνονται σε μονοδιάστατοι, δισδιάστατοι ή τρισδιάστατοι (Garshasbi & Santamouris, 2018). Καθώς εκπέμπεται η τροχιά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που έχει διεισδύσει στον κρύσταλλο, τα μόριά του θερμαίνονται, μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης και εν συνεχεία οι οπτικές ιδιότητες του υλικού (Garshasbi & Santamouris, 2018). Ένα ενδεικτικό εύρος θερμοκρασίας μετάβασης χρώματος των φωτονικών κρυστάλλων (βλ. πιν. 1) είναι από 5 μέχρι 50 °C, η χαρακτηριστικότερη μεταβολή απόχρωσης γίνεται από μπλε σε κόκκινο με αύξηση της θερμοκρασίας, η μέγιστη ανακλαστικότητα παρατηρείται σε ακτινοβολία μήκους κύματος 474-560nm και η εκπνευτικότητα του υλικού κυμαίνεται από 0.6 έως 0.95 σε κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (Garshasbi & Santamouris, 2018). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των φωτονικών κρυστάλλων (βλ. πιν. 2) είναι η υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής για τους τρισδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους δεν είναι ακόμα αρκετά ανεπτυγμένες. Οι κυριότερες εφαρμογές τους εντοπίζονται σε φιλμ ως επικαλύψεις οδοστρωμάτων και όψεων κτιρίων (Garshasbi & Santamouris, 2018).

2.2.5 Βάσεις Schiff

Οι βάσεις Schiff (Schiff bases) είναι οργανικές ενώσεις που περιέχουν μια διπλή σύνδεση άνθρακα-αζώτου και προκύπτουν από την αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ μιας αλδεϋδης ή κετόνης και μιας πρωτοταγούς αμίνης με ταυτόχρονη αφαίρεση νερού. Οι βάσεις Schiff έχουν την ιδιότητα να παρουσιάζουν ταυτομέρεια εντός της δομής τους, δηλαδή εναλλακτικές δομές (ταυτομερή) των ίδιων μορίων που προκύπτουν από τις μετακινήσεις πρωτονίων μεταξύ διαφορετικών θέσεων σε άτομα αζώτου ή οξυγόνου (Hossain et al., 2023). Η θερμική διέγερση που δέχονται οι βάσεις Schiff, προκαλούν τις εν λόγω μετακινήσεις σωματιδίων διαταράσσοντας την ισορροπία και τη δομή στους δεσμούς των ταυτομερών και μεταβάλλοντας τις οπτικές ιδιότητές του υλικού (Garshasbi & Santamouris, 2018; Hossain et al., 2023). Οι ιδιότητες που αλλάζουν είναι κατά κύριο λόγο το χρώμα, συνήθως από κίτρινο σε κόκκινο και το αντίστροφο (βλ. πιν. 1) με θερμοκρασίες μετάβασης από 25 έως 250 °C, η απορροφητικότητα η οποία παρατηρείται να λαμβάνει μέγιστες τιμές κοντά στο 0.35 σε ακτινοβολία μήκους κύματος 350-400nm και η εκπνεμτικότητα, η οποία λαμβάνει μέγιστες τιμές σε ακτινοβολία μήκους κύματος 600-650nm (Mishra et al., 2018; Sreekumar et al., 2024). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των βάσεων Schiff (βλ. πιν. 2) είναι η υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση και η αναστροφή του θερμοχρωμισμού. Τα κύρια πεδία εφαρμογής τους είναι ως καταλύτες σε διάφορες οργανικές αντιδράσεις, σε βιολογικές και φαρμακευτικές εφαρμογές, καθώς και σε ανάπτυξη χρωστικών ουσιών (Garshasbi & Santamouris, 2018).

2.2.6 Σπιροπυράνια

Τα σπιροπυράνια (spiropyrans) είναι οργανικές ενώσεις, αποτελούμενες από δακτυλίους που συντίθενται από κυκλικούς εστέρες υδροκαρβοξυλικών οξέων (λακτόνες), εμφανίζοντας τόσο φωτοχρωμικές όσο και θερμοχρωμικές ιδιότητες (Crosby & Netravali, 2022). Οι θερμοκρασιακές μεταβολές και η έκθεση στο φως, ειδικότερα όταν παρατηρείται διείσδυση υπεριώδους ακτινοβολίας μέσα στο υλικό, προκαλούν την αλλαγή στη μοριακή δομή των λακτόνων, η οποία πραγματοποιείται από μια κλειστή μορφή (σπιροπυράνιο) υπό τη μορφή κλειστών δακτυλίων, προς τη δημιουργία μιας ανοικτής (μεροκυανικής) μορφής ανοικτών δακτυλίων, λόγω αποδυνάμωσης των μοριακών δεσμών και μεταφοράς πρωτονίων και ηλεκτρονίων (Nagare et al., 2024). Η μεταβολή χρώματος στα σπιροπυράνια (βλ. πιν. 1) γίνεται από άχρωμη σε διάφορες αποχρώσεις, με δυνατότητα αναστρεψιμότητας και επιτυγχάνεται σε ενδεικτικό εύρος θερμοκρασίας μετάβασης από 20 έως 80 °C (Hossain et al., 2023). Η μέγιστη απορροφητικότητα που λαμβάνουν παρατηρείται να συμβαίνει σε μήκος κύματος υπέρυθρης και ορατής ακτινοβολίας, ενώ η μέγιστη εκπεμπτικότητα ενδεικτικά σε ακτινοβολία μήκους κύματος 600-650nm (Kozelnko et al., 2023; Ji et al., 2025). Σημαντικά μειονεκτήματα των σπιροπυρανίων (βλ. πιν. 2) είναι όπως και σε άλλα οργανικά θερμοχρωμικά υλικά, η μείωση ισχύος των οπτικών ιδιοτήτων μετά από το πέρας μερικών ημερών λόγω φωτοαποδόμησης και συνεχούς έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία (Ji et al., 2025). Τα σπιροπυράνια χρησιμοποιούνται ως συστατικά μέρη στη σύνθεση πολυμερών και βρίσκουν κυριότερη πρακτική εφαρμογή σε αισθητήρες θερμοκρασίας και στη δημιουργία φωτοηλεκτρικών κυττάρων (Kozelnko et al., 2023).

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ιδιότητες οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία					
Κατηγορία υλικού	Ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάβασης	Συνήθεις αποχρώσεις μετάβασης	Απορροφητικότητα / Ανακλαστικότητα	Εκπεμπτικότητα	Πηγές - Αναφορές
Leuco dyes	(-25)-65 °C (ανάλογα με το είδος της βαφής)	διάφορες αποχρώσεις → άχρωμο (μπορεί και σε πολλαπλά στάδια χρωμάτων)	αλλαγή ανακλαστικότητας στο ορατό φάσμα ακτινοβολίας	μέγιστη εκπεμπτικότητα σε υπέρυθη ακτινοβολία	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Perez et al., 2020) (Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Nagare et al., 2024)
Υγροί Κρύσταλλοι (liquid crystals)	(-30)-120 °C	διάφορες αποχρώσεις, επίσης αλλαγή μεταξύ αδιαφανούς - ημιδιαφανούς και διαφανούς κατάστασης	απορροφητικότητα.: 0.4-0.8 σε ακτινοβολία μήκους κύματος 550-640 nm μέγιστη ανακλαστικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος 400-700 nm	δεν υπάρχουν σταθερές ενδεικτικές πληροφορίες	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023) (Stasiek & Kowalewski, 2002)
Συζευγμένα πολυμερή (conjugated polymers)	25-200 °C	διάφορες αποχρώσεις μεταξύ: μωβ → μπλε → κόκκινο → ροζ → κίτρινο	μέγιστη απορροφητικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος περίπου 640nm	εκπεμπτικότητα αναλόγως αυξανόμενη της απορροφητικότητας, μέγιστη τιμή σε υπέρυθη ακτινοβολία	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023)
Φωτονικοί κρύσταλλοι (photonic crystals)	5-50 °C	μπλε → κόκκινο	μέγιστη ανακλαστικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος 474-560nm	0.6-0.95 (σε κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία)	(Garshasbi & Santamouris, 2018)
Βάσεις schiff (schiff bases)	25-250 °C	κίτρινο → κόκκινο	μέγιστη απορροφητικότητα : 0.35 (σε ακτινοβολία μήκους κύματος 350-400nm)	μέγιστη εκπεμπτικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος 460-700nm	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Hossain et al., 2023) (Mishra et al., 2018) (Sreekumar et al., 2024)
Σπιροπυράνια (Spiropyrans)	20-80 °C	άχρωμο → διάφορες αποχρώσεις	μέγιστη απορροφητικότητα σε υπέρυθη και ορατή ακτινοβολία	μέγιστη εκπεμπτικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος 600-650nm	(Crosby & Netravali, 2022) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023) (Ji et al., 2025) (Kozelnko et al., 2023)

Πίνακας 1: Βασικές οπτικές ιδιότητες οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

Πίνακας 2: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία				
Κατηγορία υλικού	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Συνήθεις Εφαρμογές	Πηγές - Αναφορές
Leuco dyes	το μόνο θερμοχρωμικό υλικό που έχει δοκιμαστεί σε συμπαγή δομικά στοιχεία, χαμηλό κόστος παραγωγής, αναστρέψιμη αλλαγή απόχρωσης	εξασθένιση των οπτικών ιδιοτήτων μετά από μερικές μέρες φωτοαποδόμησης και έκθεσης στη UV ακτινοβολία	βαφές και επιχρίσματα σε δομικά στοιχεία κτιριακών κελυφών, υφάσματα, αισθητήρες θερμοκρασίας, εκτυπώσεις	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Perez et al., 2020) (Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Nagare et al., 2024)
Υγροί Κρύσταλλοι (liquid crystals)	ακριβέστερη προσαρμογή των οπτικών ιδιοτήτων, υψηλή αντίσταση στη φωτολευκανση αναστρέψιμη αλλαγή απόχρωσης	υψηλό κόστος παραγωγής, μείωση οπτικών ιδιοτήτων λόγω UV ακτινοβολίας και χημικής μόλυνσης	αισθητήρες θερμοκρασίας, οθόνες, φωτοηλεκτρικά κύτταρα, κουφώματα, βαφές	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023) (Stasiek & Kowalewski, 2002)
Συζευγμένα πολυμερή (conjugated polymers)	φθινό κόστος κατασκευής, υψηλή αντίσταση στη φωτολευκανση	οξείδωση σε επαφή με τον αέρα, χαμηλή δυνατότητα αντιστροφής χρώματος	επικαλύψεις σε κουφώματα, χρήσεις σε βαφές, σε αισθητήρες θερμοκρασίας και στην αεροναυπηγική	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023)
Φωτονικοί κρύσταλλοι (photonic crystals)	υψηλή αντίσταση στη φωτολευκανση	μη ανεπτυγμένες τεχνικές παραγωγής για τριδιάστατους φωτονικούς κρυστάλλους	φίλμ ως επικαλύψεις σε οδοστρώματα και όψεις κτιρίων	(Garshasbi & Santamouris, 2018)
Βάσεις schiff (schiff bases)	υψηλή αντίσταση στη φωτολευκανση, η αλλαγή απόχρωσης είναι αναστρέψιμη	δεν καταγράφονται	καταλύτες σε διάφορες οργανικές αντιδράσεις, βιολογικές και φαρμακευτικές εφαρμογές, ανάπτυξη χρωστικών ουσιών	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Hossain et al., 2023) (Mishra et al., 2018) (Sreekumar et al., 2024)
Σπироπυράνια (Spiropyrans)	η αλλαγή απόχρωσης είναι αναστρέψιμη	εξασθένιση των οπτικών ιδιοτήτων μετά από μερικές μέρες φωτοαποδόμησης και έκθεσης στη UV ακτινοβολία	σύνθεση πολυμερών φωτοηλεκτρικά κύτταρα αισθητήρες θερμοκρασίας	(Crosby & Netravali, 2022) (Nagare et al., 2024) (Hossain et al., 2023) (Ji et al., 2025) (Kozelnko et al., 2023)

Πίνακας 2: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

2.3 Ανόργανα θερμοχρωμικά υλικά

2.3.1 Διοξείδιο του βαναδίου

Το διοξείδιο του βαναδίου (vanadium dioxide -VO₂) αποτελεί ίσως το πιο διαδεδομένο από την κατηγορία των ανόργανων ενώσεων, που έχει απασχολήσει περισσότερο τη διεθνή έρευνα πάνω στα θερμοχρωμικά υλικά (Apostolescu et al., 2021; Crosby & Netravali, 2022). Πρόκειται για ένα υλικό που ανήκει στην ομάδα των ανόργανων οξειδίων (inorganic oxides), έχοντας τη βασική ιδιότητα να αλλάζει από μονωτική ή ημιαγωγική, μονοκλινική-κρυσταλλική δομή σε μεταλλική-τετραγωνική δομή όταν τα μόριά του ξεπερνούν τη θερμοκρασία μετάβασης (Apostolescu et al., 2021; Song et al., 2025). Η θερμοκρασία μετάβασης του VO₂ είναι εξαιρετικά ακριβής στους 68 °C (βλ. πιν. 3) και συμβαίνει σχεδόν ακαριαία (Pérez et al., 2021; Apostolescu et al., 2021). Η θερμότητα προκαλεί ένωση ή διαχωρισμό στους δεσμούς ηλεκτρονίων μεταξύ των ατόμων του βαναδίου, γεγονός που αλλάζει ολόκληρη τη μοριακή του δομή (Apostolescu et al., 2021). Κατά τη θερμοχρωμική μετάβαση το υλικό από άχρωμο μπορεί να εμφανίσει διάφορες αποχρώσεις ή ακόμα και πολλαπλά στάδια αποχρώσεων (όταν ενθυλακώνεται σε άλλα υλικά), εκ των οποίων οι συνηθέστερες βρίσκονται κοντά στα χρώματα του πράσινου, του μπλε, του καφέ και του κίτρινου (Pérez et al., 2021; Crosby & Netravali, 2022). Όταν το VO₂ βρίσκεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 68 °C, εμφανίζει μεγαλύτερη απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, σε τιμές από 0.6 έως 0.95 και σε μήκη κύματος της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αντίθετα, όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία μετάβασης, αυξάνεται η ανακλαστικότητά του πάλι σε μήκη κύματος της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας (Crosby & Netravali, 2022). Επιπλέον, η εκπεμπτικότητά του κυμαίνεται σε τιμές από 0.2 έως 0.4 σε χαμηλή θερμοκρασία και από 0.8 έως 0.9 σε υψηλή θερμοκρασία. Σημαντικό πλεονέκτημα του διοξειδίου του βαναδίου (βλ. πιν. 4) είναι ότι έχει μεγάλη αντίσταση στη φωτοαποδόμηση (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Το βασικότερο μειονέκτημά του όμως, είναι η επιβλαβής διαδικασία παρασκευής του με θερμική κατεργασία, η οποία μπορεί σε κάποιο βαθμό να δυσχεραίνει τις οπτικές του ιδιότητες. Για αυτό το λόγο, συνηθισμένη πρακτική αποτελεί η επικάλυψη και προστασία του VO₂ με άλλες ενώσεις όπως SiO₂ και TiO₂ επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και βελτιώνοντας την απόδοσή τους (Song et al., 2025; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Η κύρια χρήση του βρίσκεται εφαρμογή στη δημιουργία μεμβρανών-φιλμ οι οποίες τοποθετούνται σε υαλοπίνακες κουφωμάτων,

προσδίδοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση και αποτελεσματική απορρόφηση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας προσαρμοσμένης στις ανάλογες καιρικές συνθήκες (Hidalgo-Araujo et al., 2025).

2.3.2 Ανόργανα οξειδία

Εκτός από το διοξείδιο του βαναδίου, υπάρχουν και ορισμένες ακόμα ενώσεις που ανήκουν στα ανόργανα οξειδία και έχουν θερμοχρωμική συμπεριφορά, όπως για παράδειγμα το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) (Mostoni & Nisticò, 2025). Τα θερμοχρωμικά ανόργανα οξειδία πρόκειται για χημικές ενώσεις που αποτελούνται συνήθως από την ένωση οξυγόνου με χημικά στοιχεία μετάπτωσης (transition metals), έχοντας την ιδιότητα όταν δέχονται αλλαγή στη θερμοκρασία τους να μεταφέρονται ελεύθερα ηλεκτρόνια σθένους σε διαφορετικές ενεργειακές στάθμες δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο και αλλάζοντας την κρυσταλλική δομή των μορίων (Apostolescu et al., 2021). Καθ' αυτόν τον τρόπο, υφίσταται μεταβολή ο τρόπος ανάκλασης και απορρόφησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και κατά συνέπεια και η απόχρωση του ίδιου του οξειδίου. Οι αποχρώσεις που υπάρχει η δυνατότητα να προκύψουν από την αλλαγή θερμοκρασίας στα ανόργανα οξειδία είναι ποικίλες, με τις περισσότερες καταγεγραμμένες κοντά στο κίτρινο το πράσινο και το κόκκινο (Apostolescu et al., 2021). Η θερμοκρασία μετάβασης (βλ. πιν. 3) διαφέρει ανάλογα με το οξείδιο, όμως γενικά παρατηρείται μεγάλο εύρος κυμαινόμενο μεταξύ 20 και 460 °C. Η μέγιστη απορροφητικότητα παρατηρείται σε μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας και η μέγιστη εκπνευτικότητα σε μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Mostoni & Nisticò, 2025). Σε ορισμένα ανόργανα οξειδία υπάρχει η δυνατότητα αναστροφής χρώματος με την αντίστροφη αλλαγή θερμοκρασίας (βλ. πιν. 4) και η αντοχή των μορίων τους στην ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή (Apostolescu et al., 2021). Οι περισσότερες διαδεδομένες εφαρμογές των θερμοχρωμικών ανόργανων οξειδίων γίνονται σε κατασκευές οθονών, ως φωτοκαταλύτες αντιδράσεων, αισθητήρες θερμοκρασίας και στη δημιουργία συστημάτων καμουφλάζ (Mostoni & Nisticò, 2025; Apostolescu et al., 2021).

2.3.3 Κβαντικές τελείες

Οι κβαντικές τελείες (quantum dots) είναι ανόργανα μικροσωματίδια και πιο συγκεκριμένα ημιαγωγοί νανοκρύσταλλοι μεγέθους 2-10nm, που εκπέμπουν φως ανάλογα με τον τρόπο που χειρίζονται την απορροφούμενη ακτινοβολία που δέχονται (Garshasbi & Santamouris, 2018). Όσο η ακτινοβολία που δέχονται οι κβαντικές τελείες αυξάνει τη θερμοκρασία τους, μειώνεται το μέγεθός τους (κβαντικός περιορισμός) και προκαλείται εντονότερη διέγερση και μεταφορά ηλεκτρονίων από χαμηλότερες σε υψηλότερες ενεργειακές ζώνες (Garshasbi & Santamouris, 2018). Καθ' αυτόν τον τρόπο προκαλείται το φαινόμενο του φθορισμού (fluorescence) κατά το οποίο το υλικό απορροφά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συνήθως ορατή ή υπεριώδη και την επανεκπέμπει σε μεγαλύτερο μήκος κύματος μέσω φωτονίων χαμηλότερης ενέργειας. Όμως όσο μικρότερη είναι η διαφορά των ενεργειακών ζωνών (band gap) που δημιουργείται από τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων λόγω φθορισμού, τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος που επανεκπέμπεται. Αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις έχει ως αποτέλεσμα η απόχρωση και οι οπτικές ιδιότητες των κβαντικών τελειών να αλλάζει σημαντικά μετά από το φθορισμό χωρίς να δημιουργείται μεγάλο ενεργειακό χάσμα μεταξύ των ηλεκτρονίων (Garshasbi & Santamouris, 2018). Στη μελέτη του φθορισμού βοηθάει επίσης η μέτρηση της «κβαντικής απόδοσης» (quantum yield) που δηλώνει τον αριθμό των εκπεμπόμενων προς τον αριθμό των απορροφούμενων φωτονίων, διαφορά που προκαλείται λόγω ευαισθησίας σε θερμικές μεταβολές (Pérez et al., 2021). Ωστόσο, αν η θερμοκρασία των κβαντικών τελειών ξεπεράσει ένα θερμοκρασιακό όριο, αυτές δεν αντιδρούν το ίδιο ενεργά στην διερχόμενη ακτινοβολία και δεν υφίστανται πλέον αλλαγές των οπτικών τους ιδιοτήτων (Pérez et al., 2021). Ενδεικτικά, το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης των κβαντικών τελειών (βλ. πιν. 3) κυμαίνεται μεταξύ -50 και 250 °C, έχουν υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση και εμφανίζουν διάφορες αποχρώσεις οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια (Garshasbi & Santamouris, 2018). Οι κύριες εφαρμογές τους (βλ. πιν. 4) εντοπίζονται σε νανοθερμόμετρα και αν και έχουν εκφραστεί προοπτικές εφαρμογής τους στον κτιριακό τομέα, αυτό ακόμα δεν έχει συμβεί (Garshasbi & Santamouris, 2018).

2.3.4 Πλασμονικά

Τα πλασμονικά (plasmonics) πρόκειται για νανοσωματίδια τα οποία απορροφούν και συμπυκνώνουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυρίως του ορατού φάσματος, που προέρχεται από κύματα ταλάντωσης ηλεκτρονίων τα οποία έχουν διεγερθεί όντας βρισκόμενα σε επιφάνειες μορίων μετάλλων, όταν αυτές έρθουν σε επαφή με το φως (Garshasbi & Santamouris, 2018). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συντονισμός επιφανειακών πλασμονίων (surface plasmon resonance) και προκαλεί τη μεταβολή στο μέγεθος των νανοσωματιδίων και της απόστασης μεταξύ τους, η οποία οδηγεί με τη σειρά της σε εμφάνιση διαφορετικής απόχρωσης στην επιφάνεια του μετάλλου και μεταβολή των οπτικών της ιδιοτήτων. Οι πιο συνηθισμένες αποχρώσεις που παρατηρούνται (βλ. πιν. 3) βρίσκονται σε τόνους: μπλε, ερυθρούς, ροζ και μωβ (Garshasbi & Santamouris, 2018). Ωστόσο, καθώς η παραπάνω λειτουργία των πλασμονικών παραπέμπει περισσότερο σε χαρακτηριστικά φωτοχρωμισμού, ο συντονισμός επιφανειακών πλασμονίων μπορεί να ενεργοποιηθεί και από την επίδραση της θερμοκρασίας στα νανοσωματίδια, όταν αυτά ενσωματώνονται σε μια πολυμερική μήτρα (polymeric matrix). Ο δείκτης διάθλασης των πολυμερικών μητρών είναι ευαίσθητος στις θερμοκρασιακές μεταβολές και η μεταβολή του επηρεάζει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που δέχονται τα πλασμονικά νανοσωματίδια, δημιουργώντας έτσι ένα πλέον θερμοχρωμικό φαινόμενο (Garshasbi & Santamouris, 2018). Τα πλασμονικά έχουν εν γένει υψηλές τιμές απορροφητικότητας και εμφανίζουν μέγιστη εκπεμπτικότητα ενδεικτικά σε μήκος κύματος 598-645nm (Garshasbi & Santamouris, 2018). Ενδεικτικά στα πλασμονικά παρατηρείται ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας μετάβασης, από 30-210 °C. Τα πλασμονικά έχουν επίσης υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση, όμως βασικά μειονεκτήματα (βλ. πιν. 4) είναι ότι η διείδυση χημικών ενώσεων όπως H_2O , O_2 και SO επηρεάζουν αρνητικά τις ιδιότητες των νανοσωματιδίων και επίσης αυτά είναι τοξικά, πρόβλημα που μπορεί να αποφευχθεί μέσω της ενσωμάτωσής τους στα πολυμερή. Τα πλασμονικά χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή κουφωμάτων και σε φωτοηλεκτρικά κύτταρα (Garshasbi & Santamouris, 2018).

2.3.5 Ιωδιούχος υδράργυρος

Ο ιωδιούχος υδράργυρος (mercury iodide – HgI_2) είναι μια ακόμα ανόργανη χημική ένωση που παρουσιάζει θερμοχρωμικές ιδιότητες. Η μεταβολή θερμοκρασίας προκαλεί διαφοροποιήσεις στην κρυσταλλική δομή του υλικού, εξαιτίας της μετακίνησης και αλλαγής θέσης των ιόντων του ιωδίου γύρω από τα ιόντα του υδραργύρου λόγω αλλαγών στις ενεργειακές στάθμες των διεγερμένων ηλεκτρονίων (Ferrara & Bengisu, 2014). Σε αντίθεση με τα περισσότερα κοινά θερμοχρωμικά υλικά, ο ιωδιούχος υδράργυρος υφίσταται θερμοχρωμισμό όταν δέχεται προσπίπτουσα ακτινοβολία αρκετά μικρού μήκους κύματος, διαφορετικό από αυτά που χαρακτηρίζουν την ηλιακή ακτινοβολία, σε αρκετές περιπτώσεις ακόμα και σε ακτίνες γ (Omer et al., 2020). Επιπλέον, η θερμοκρασία μετάβασής του (βλ. πιν. 3) παρατηρείται σε υψηλές τιμές, κοντά στους 200°C και οι αποχρώσεις που εμφανίζει είναι από κίτρινο ή πορτοκαλί προς κόκκινο όσο η θερμοκρασία του αυξάνεται (Ferrara & Bengisu, 2014). Με την αύξηση της θερμοκρασίας και την εντονότερη επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η απορροφητικότητα του HgI_2 αυξάνεται σημαντικά, ενδεικτικά από τιμές κοντά στο 0.2 έως και τιμές κοντά στο 1 σε μήκος κύματος μεγαλύτερο από 450nm, ενώ αντίθετα η ανακλαστικότητα μειώνεται από τιμές κοντά 0.25 έως και τιμές κοντά στο 0.1 (Omer et al., 2020). Βασικό μειονέκτημα του HgI_2 (βλ. πιν. 4) είναι ότι εμφανίζει υψηλή ευαισθησία στο φως και ότι ως υλικό είναι εξαιρετικά τοξικό. Οι κύριες εφαρμογές του αξιοποιούνται σε διεργασίες θέρμανσης μετάλλων και ως ανιχνευτές ακτινοβολίας (Omer et al., 2020).

2.3.6 Υδροπηκτώματα

Τα υδροπηκτώματα (hydrogels) είναι πολυμερικά δίκτυα, δηλαδή πολυμερικές αλυσίδες που σχηματίζουν εγκάρσιους δεσμούς, στην περίπτωση αυτή δεσμούς υδρογόνου, έχοντας την ιδιότητα να μπορούν να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού λόγω της παρουσίας υδροφιλικών σωματιδίων στη μοριακή τους δομή (Crosby & Netravali, 2022). Πρόκειται για υλικά που εμφανίζουν τόσο θερμοχρωμικές όσο και θερμοτροπικές ιδιότητες, δηλαδή όταν θερμαίνονται τα μόριά του διογκώνονται και μεταβαίνουν από υγρή σε στερεή κατάσταση (Crosby & Netravali, 2022). Η αύξηση της θερμότητας ενεργοποιεί την εναλλαγή μεταξύ ισοτροπικών και ανισότροπων φάσεων στη μοριακή δομή των υδροπηκτωμάτων, σχηματίζοντας θερμοευαίσθητα μικροσκοπικά σωματίδια (μικκύλια) τα οποία επηρεάζουν την κατεύθυνση της σκέδασης του φωτός την απορροφητικότητα της ορατής ακτινοβολίας μετατρέποντάς τα από διαφανή σε αδιαφανή (Crosby & Netravali, 2022). Ένα ενδεικτικό εύρος θερμοκρασίας μετάβασης των υδροπηκτωμάτων όταν αυτά εφαρμόζονται σε υαλοπίνακες (βλ. πιν. 3) είναι από 32.5 μέχρι 43.5 °C και η απόχρωσή τους μεταβάλλεται από άχρωμη λόγω διαφάνειας σε αδιαφανή λευκή ή μπλε όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τους (Xu et al., 2024). Η αλλαγή διαφάνειας σε σχέση με τη θερμοκρασία καθιστά τα υδροπηκτώματα ιδανικά για χρήση ως μεμβράνες σε υαλοπίνακες κουφωμάτων, που είναι και το κυριότερο πεδίο εφαρμογής τους στον κτιριακό τομέα (βλ. πιν. 4) (Crosby & Netravali, 2022; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Οι επιστρώσεις μεμβρανών υδροπηκτωμάτων σε ενεργειακούς υαλοπίνακες εξυπηρετούν το μπλοκάρισμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω υψηλής θερμοκρασίας, επιτρέποντας τη διείσδυση της ορατής και υπεριώδους ακτινοβολίας και καθιστούν τους υαλοπίνακες διάφανους κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν παρατηρούνται χαμηλότερες θερμοκρασίες (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Λόγω της θερμοχρωμικής ιδιότητας των υδροπηκτωμάτων, οι ενεργειακοί υαλοπίνακες έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας σε σχέση με τους συμβατικούς (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Επίσης συχνά συνδυάζονται με το διοξείδιο του βαναδίου ώστε να βελτιώνεται η απόδοση των κουφωμάτων (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Η μέγιστη ανακλαστικότητα που εμφανίζουν τα υδροπηκτώματα σε εφαρμογή υαλοπινάκων είναι περίπου 0.8 σε ορατή και κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία μήκους κύματος 0.5-1μm (500-1000nm) και μέγιστη εκπνεμτικότητα 0.96 σε υπέρυθρη ακτινοβολία μήκους κύματος μεγαλύτερου από 2μm (2000nm) (Xu et al., 2024). Άλλες εφαρμογές των υδροπηκτωμάτων

συναντώνται σε παρασκευή υφασμάτων, αισθητήρες θερμοκρασίας ή ως επικάλυψη στη μεταφορά φαρμάκων (Crosby & Netravali, 2022).

Πίνακας 3: Βασικές οπτικές ιδιότητες ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία

Κατηγορία υλικού	Ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάβασης	Συνηθιστές αποχρώσεις μετάβασης	Απορροφητικότητα / Ανακλαστικότητα	Εκπεμπτικότητα	Πηγές - Αναφορές
Διοξείδιο του βαναδίου (VO ₂)	68 °C	άχρωμο → διάφορες αποχρώσεις (μπορεί και σε πολλαπλά στάδια χρωμάτων, συνήθως μπλε καφέ, πράσινο κίτρινο)	απορροφητικότητα.: 0.6-0.95 (σε κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία) κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης. Υψηλή ανακλαστικότητα σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο μετάβασης	0.2-0.4 (σε χαμηλή θερμοκρασία) 0.8-0.9 (σε υψηλή θερμοκρασία)	(Song et al., 2025) (Pérez et al., 2021) (Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021)
Ανόργανα Οξείδια (π.χ. ZnO)	20-460 °C	διάφορες αποχρώσεις μεταξύ: κίτρινο / πράσινο / κόκκινο	μέγιστη απορροφητικότητα σε μήκη κύματος ορατής ακτινοβολίας	μέγιστη εκπεμπτικότητα σε μήκη κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας	(Apostolescu et al., 2021) (Mostoni & Nisticò, 2025)
Κβαντικές τελείες (quantum dots)	(-50)-250 °C	διάφορες ρυθμιζόμενες αποχρώσεις	απορροφητικότητα φωτονίων σε μήκη κύματος υπεριώδους ακτινοβολίας	εκπομπή φωτονίων μεγαλύτερου μήκους κύματος (528-586nm)	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Pérez et al., 2021)
Πλασμονικά (plasmonics)	30-210 °C	μπλε, ερυθρές, ροζ και μωβ - εξαρτώμενες από την απόσταση των νανοσωματιδίων	γενικά υψηλές τιμές απορροφητικότητας	μέγιστη εκπεμπτικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος 598-645nm	(Garshasbi & Santamouris, 2018)
Ιωδιούχος υδράργυρος (HgI ₂)	200 °C	κίτρινο-πορτοκαλί → κόκκινο	0.2-1 (μέγιστη απορροφητικότητα σε ακτινοβολία μήκους κύματος >450nm) ανακλ.: 0.1-0.25	δεν υπάρχουν σταθερές ενδεικτικές πληροφορίες	(Ferrara & Bengisu, 2014) (Omer et al., 2020)
Υδροπηκτώματα (hydrogels)	32.5-43.5 °C	άχρωμο → λευκό	μέγιστη ανακλαστικότητα: 0.8 σε ακτινοβολία μήκους κύματος 500-1000nm (ορατή - κοντινή υπέρυθη)	μέγιστη εκπεμπτικότητα: 0.96 σε ακτινοβολία μήκους κύματος >2000nm (υπέρυθη)	(Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Xu et al., 2024)

Πίνακας 3: Βασικές οπτικές ιδιότητες ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

Πίνακας 4: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία				
Κατηγορία υλικού	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Συνήθεις Εφαρμογές	Πηγές - Αναφορές
Διοξείδιο του βαναδίου (VO ₂)	υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας λόγω κουφωμάτων και μείωση εσωτερικής θερμοκρασίας, μεγάλη αντίσταση στη φωτοαποδόμηση	επιβλαβής διαδικασία παρασκευής υλικού με θερμική κατεργασία, η οποία μπορεί να δυσχαιρένει τις οπτικές ιδιότητες	λεπτές μεμβράνες-φίλμ σε υαλοπίνακες κουφωμάτων	(Song et al., 2025) (Pérez et al., 2021) (Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Apostolescu et al., 2021)
Ανόργανα Οξειδία (π.χ. ZnO)	αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος, υψηλή αντοχή στην ηλιακή ακτινοβολία	δεν καταγράφονται	χρήση σε οθόνες, φωτοκαταλύτες αντιδράσεων, αισθητήρες θερμοκρασίας, συστήματα καμουφλάζ	(Apostolescu et al., 2021) (Mostoni & Nisticò, 2025)
Κβαντικές τελείες (quantum dots)	υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση και ακρίβεια ρύθμισης οπτικών ιδιοτήτων	δεν καταγράφονται	νανο-θερμόμετρα ενδεχόμενο μελλοντικής εφαρμογής στον κτιριακό τομέα	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Pérez et al., 2021)
Πλασμονικά (plasmonics)	ρύθμιση απόχρωσης με καθορισμό απόστασης των νανოსωματιδίων - συνδυασμός με πολυμερή, υψηλή αντίσταση στη φωτολεύκανση	διείσδυση χημικών ενώσεων όπως H ₂ O, O ₂ και SO ₂ επηρεάζουν τις ιδιότητες των νανοςωματιδίων αρκετά είναι τοξικά	χρήση σε κουφώματα, φωτοηλεκτρικά κύτταρα	(Garshasbi & Santamouris, 2018)
Ιωδιούχος υδράργυρος (HgI ₂)	δεν καταγράφονται	υψηλή ευαισθησία στο φως, υψηλή τοξικότητα	διεργασίες θέρμανσης μετάλλων, ανιχνευτές ακτινοβολίας	(Ferrara & Bengisu, 2014) (Omer et al., 2020)
Υδροπηκτώματα (hydrogels)	υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας λόγω κουφωμάτων και μείωση εσωτερικής θερμοκρασίας	δεν καταγράφονται	χρήση σε κουφώματα, υφάσματα, αισθητήρες θερμοκρασίας, επικάλυψη στη μεταφορά φαρμάκων	(Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Crosby & Netravali, 2022) (Xu et al., 2024)

Πίνακας 4: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

2.4 Σύνθετα θερμοχρωμικά υλικά

2.4.1 Περοβσκίτες

Οι περοβσκίτες (perovskites) πρόκειται για μια κατηγορία σύνθετων χημικών ενώσεων, αποτελούμενες από ανόργανα ανιόντα και οργανικά κατιόντα οι οποίες έχουν το κοινό χαρακτηριστικό ότι σχηματίζουν υβριδικές κρυσταλλικές δομές όμοιες με αυτή του ορυκτού με ονομασία «περοβσκίτης» (CaTiO_3) (Hossain et al., 2023). Πιο συγκεκριμένα, θερμοχρωμικές ιδιότητες εμφανίζουν οι περοβσκίτες που έχουν στη σύστασή τους αλογόνα (halide perovskites) (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Τα ενεργειακά επίπεδα των οργανικών και ανόργανων στοιχείων μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία στα διαφορετικά μοριακά στρώματα και ρυθμίζοντας τις μεταξύ τους αποστάσεις το οποίο επιτρέπει την αλλαγή χρώματος ή διαφάνειας αλλά και των οπτικών τους ιδιοτήτων. Γενικότερα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επικρατεί ο κανόνας ότι οι περοβσκίτες αλλάζουν από αδιαφανή ή σκουρόχρωμη κατάσταση προς διαφανή ή ανοιχτόχρωμη κατάσταση (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Εκτός από τη μετάβαση μεταξύ διαφανούς-αδιαφανούς, οι αποχρώσεις μεταξύ των οποίων μεταβάλλονται οι περοβσκίτες με την άνοδο θερμοκρασίας είναι ποικίλες, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, ωστόσο οι πιο συνηθισμένες είναι (βλ. πιν. 5) από σκούρο κοκκινωπό-καφέ σε κίτρινο ή από σκούρο κόκκινο σε ανοικτό πορτοκαλί (Hossain et al., 2023). Το εύρος θερμοκρασίας μετάβασης των περοβσκιτών διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, με ορισμένα να κυμαίνονται για παράδειγμα από 25 έως 28°C, από 35 έως 42 °C, από 80 έως 105 °C, ακόμα και μέχρι 160 °C (Liu et al., 2022; Hossain et al., 2023). Η κυριότερη πρακτική εφαρμογή των περοβσκιτών (βλ. πιν. 6) γίνεται όπως στα υδροπηκτώματα και το VO_2 στην κατασκευή επιφανειακών επιστρώσεων-μεμβρανών που τοποθετούνται σε υαλοπίνακες κουφωμάτων, αυξάνοντας την ενεργειακή τους απόδοση λόγω εμπόδισης διείσδυσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας μέσα στο κούφωμα και το εσωτερικό του κτιρίου (Liu et al., 2022; Hidalgo-Araujo et al., 2025). Επιπρόσθετα, οι περοβσκίτες εκτός από θερμοχρωμικές έχουν και φωτοβολταϊκές ιδιότητες, επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά από τη θερμική μετάβαση, λόγω απορρόφησης του φωτός που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία (Hidalgo-Araujo et al., 2025). Η μέγιστη ανακλαστικότητα παρατηρείται σε ορατή και κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία μήκους κύματος 500-620nm και η μέγιστη εκπνευτικότητα λαμβάνει τιμή περίπου 0.3 σε υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα που έχουν οι περοβσκίτες είναι η ευελιξία στη

ρύθμιση της απόχρωσης μετάβασης και το χαμηλό κόστος παραγωγής (Hidalgo-Araujo et al., 2025).

2.4.2 Συνδυασμός θερμοχρωμικών βαφών με τσιμέντο

Εκτός από τη μελέτη και εφαρμογή των θερμοχρωμικών βαφών (π.χ. leuco dyes, υγροί κρύσταλλοι ή συζευγμένα πολυμερή) σε καθαρή μορφή, με ή χωρίς προστασία μικροενθηκάλωσης, πάνω σε δομικά στοιχεία κτιρίων, έχουν πραγματοποιηθεί πειράσματα που αφορούν τη δοκιμή ανάμειξης θερμοχρωμικών βαφών με κονιάματα τσιμέντου προκειμένου να εξεταστούν οι οπτικές τους ιδιότητες. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών έχει παρατηρηθεί όμοια θερμική συμπεριφορά του μείγματος με τις βαφές όταν χρησιμοποιούνται ως επικάλυψη, δηλαδή ότι με την αύξηση θερμοκρασίας υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της ανακλαστικότητας και της εκπνεμτικότητας του μείγματος ενώ κατά τη μείωση θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση της απορροφητικότητας. Έτσι, παρόλο που το τσιμέντο είναι ένα υλικό με υψηλή θερμική απορροφητικότητα, οι οπτικές ιδιότητες των βαφών επιδρούν επιπρόσθετα ή ακυρωτικά στις ιδιότητες του τσιμέντου, ελαττώνοντας την απορροφητικότητά του σε υψηλές και αυξάνοντάς την σε χαμηλές θερμοκρασίες (έως και κατά 12%,) με μέγιστες τιμές να εντοπίζονται σε μήκη κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας (Perez et al., 2020; Soudian et al., 2020). Η εκπνεμτικότητα του μείγματος παρατηρείται επιπλέον αυξημένη, καθότι και αυτή επηρεάζεται από την υψηλή εκπνεμτικότητα του τσιμέντου. Επίσης, σε πολλά δοκιμαστικά μείγματα έχουν παρατηρηθεί μικρότερα εύρη θερμοκρασιών μετάβασης απ' ό,τι στις καθαρές βαφές, (βλ. πιν. 5) τα οποία ενδεικτικά κυμαίνονται από 30 μέχρι 45 °C (Perez et al., 2020). Η μετάβαση απόχρωσης γίνεται συνήθως από άχρωμη κατάσταση, όπου φαίνεται το καθαρό χρώμα του τσιμέντου, προς ποικίλες αποχρώσεις οι οποίες εξαρτούνται από τη σύνθεση της βαφής (Soudian et al., 2020). Επιπλέον βασικά πορίσματα που διαπιστώθηκαν (βλ. πιν. 6) είναι ότι τα κονιάματα κατάφεραν να ενισχύσουν την προστασία των βαφών από την φωτοαποδόμηση και την έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία καθυστερώντας το χρόνο στον οποίο ξεθωριάζει η απόχρωση της βαφής, ωστόσο η συνεχής έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία εξακολουθεί να ελαττώνει με περισσότερο γρήγορο ρυθμό την ανακλαστικότητα του υλικού (Soudian et al., 2020; Nagare et al., 2024).

2.4.3 Σύμπλεγμα βαφής-πολυμερούς

Μια ακόμη υποκατηγορία των σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών είναι ο συνδυασμός βαφής με πολυμερές (dye-polymer complex). Σε αυτή τη σύνθεση, οι θερμοκρασιακές μεταβολές μεταβάλλουν τον δείκτη pH της πολυμερικής μήτρας του υλικού και η βαφή υποδεικνύει το pH, καθώς αλλάζει η απόχρωσή της. Ένα παράδειγμα κατηγορίας πολυμερών που μπορεί να συνδυαστεί με βαφή είναι τα υδροπηκτώματα, τα οποία δέχονται αλλαγές στο pH τους με την αλλαγή θερμοκρασίας (Garshasbi & Santamouris, 2018). Η πλεοψηφία των μεταβάσεων χρώματος (βλ. πιν. 5) γίνονται σε ενδεικτικό εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 70 °C και οι αποχρώσεις διαφέρουν ανάλογα με τη σύνθεση του κάθε υλικού, με πιο συνηθισμένες αλλαγές από κίτρινο σε κόκκινο, από άχρωμο σε βιολετί και από κόκκινο σε βιολετί, όπως στην περίπτωση του συνδυασμού βαφής ανθοκυανίνης με πολυγαλακτικό οξύ (PLA), ο οποίος είναι ένας από τους περισσότερο εργαστηριακά δοκιμασμένους συνδυασμούς συμπλέγματος βαφής-πολυμερούς (Crosby & Netravali, 2022; Hossain et al., 2023). Η αλλαγή χρώματος στα συμπλέγματα βαφής-πολυμερούς είναι συνήθως αναστρέψιμη (βλ. πιν. 6) και κατά την άνοδο θερμοκρασίας, όταν το υλικό εκτίθεται σε μεγαλύτερες εντάσεις κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας, εκδηλώνει τις μέγιστες τιμές απορροφητικότητας και εκπεμπτικότητάς του (Crosby & Netravali, 2022). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των συμπλεγμάτων βαφής-πολυμερούς είναι η συνήθης προέλευσή τους από φυσικά υλικά, η υψηλή αντοχή σε εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και ότι είναι μη τοξικά (Crosby & Netravali, 2022; Hossain et al., 2023). Τα περισσότερα συμπλέγματα βρίσκονται ακόμα σε στάδιο εργαστηριακών δοκιμών, ωστόσο υπάρχει η προοπτική μελλοντικών εφαρμογών τους σε βιοϊατρικές εργασίες και προϊόντα (Hossain et al., 2023).

Πίνακας 5: Βασικές οπτικές ιδιότητες σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία					
Κατηγορία υλικού	Ενδεικτικές θερμοκρασίες μετάβασης	Συνήθεις αποχρώσεις μετάβασης	Απορροφητικότητα / Ανακλαστικότητα	Εκπεμπτικότητα	Πηγές - Αναφορές
Περοβσκίτες (perovskites)	διάφορα εύρη θερμοκρασίας μετάβασης μεταξύ 25-28 °C και 80-105 °C	σκούρο κόκκινο → ανοικτό πορτοκαλί σκούρο κοκκινωπό-καφέ → κίτρινο αδιαφανές → διαφανές	μέγιστη ανακλαστικότητα σε υπέρυθρη ακτινοβολία (μήκος κύματος 500-620nm)	μέγιστη εκπεμπτικότητα (περίπου 0.3) σε υπέρυθρη ακτινοβολία	(Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Hossain et al., 2023) (Liu et al., 2022)
Θερμοχρωμικές βαφές + τσιμέντο	30-45 °C	διάφορες αποχρώσεις → άχρωμο (μπορεί και σε πολλαπλά στάδια χρωμάτων)	μέγιστη απορροφητικότητα σε υπέρυθρη ακτινοβολία	επιρροή από υψηλή εκπεμπτικότητα τσιμέντου	(Perez et al., 2020) (Soudian et al., 2020) (Nagare et al., 2024)
Σύμπλεγμα βαφής- πολυμερούς (dye-polymer complex) (π.χ. PLA με βαφή ανθοκυανίνης)	20-70 °C	διάφορες μεταβολές αποχρώσεων κόκκινο → βιολετί (ανθοκυανιδής βαφή) κίτρινο → κόκκινο άχρωμο → βιολετί	μέγιστη απορροφητικότητα σε κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία	μέγιστη εκπεμπτικότητα κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Hossain et al., 2023)

Πίνακας 5: Βασικές οπτικές ιδιότητες σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

Πίνακας 6: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία				
Κατηγορία υλικού	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Συνήθεις Εφαρμογές	Πηγές - Αναφορές
Περοβσκίτες (perovskites)	αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος, υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας λόγω κουφωμάτων και μείωση εσωτερικής θερμοκρασίας	δεν καταγράφονται	χρήση σε κουφώματα	(Hidalgo-Araujo et al., 2025) (Hossain et al., 2023) (Liu et al., 2022)
Θερμοχρωμικές βαφές + τσιμέντο	προστασία της βαφής από την UV ακτινοβολία, εντονότερες αλλαγές ανακλ./απορ. στην κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία	γρηγορότερη μείωση ανακλαστικότητας αν υπάρχει συνεχής έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία	πιθανές εφαρμογές τσιμέντου: κτιριακά κελύφη, οδόστρωμα	(Perez et al., 2020) (Soudian et al., 2020) (Nagare et al., 2024)
Σύμπλεγμα βαφής- πολυμερούς (dye-polymer complex) (π.χ. PLA με βαφή ανθοκυανίνης)	αναστρέψιμη αλλαγή χρώματος, βαφή από φυσικά υλικά, μεγαλύτερη αντοχή σε εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, μη τοξικά	δεν καταγράφονται	εργαστηριακή δοκιμή - πιθανές μελλοντικές βιοιατρικές εφαρμογές	(Garshasbi & Santamouris, 2018) (Crosby & Netravali, 2022) (Hossain et al., 2023)

Πίνακας 6: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία (ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών που αναγράφονται σε αυτόν).

2.5 Εφαρμογές θερμοχρωμικών υλικών σε αδιαφανή δομικά στοιχεία

Η αξιοποίηση και εφαρμογή των θερμοχρωμικών υλικών στα κτιριακά κελύφη πρόκειται για ένα ζήτημα το οποίο έχει απασχολήσει σε έναν τέτοιο βαθμό τη διεθνή επιστημονική κοινότητα στον τομέα των κτιριακών κατασκευών, της ενέργειας, του περιβάλλοντος και της ανάπτυξης υλικών, σχετικά ικανό ώστε να προσφέρει ορισμένα βασικά πορίσματα όσον αφορά τα οφέλη, τις αδυναμίες και τις ιδιαιτερότητές τους. Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης έρευνας εστιάζει στην πειραματική δοκιμή των θερμοχρωμικών υλικών, κυρίως βαφών (leuco dyes) σε εργαστηριακές συνθήκες, αξιοποιώντας μικρής κλίμακας δείγματα που δέχονται ακτινοβολία ή θερμοκρασιακές μεταβολές ή ακόμα και σενάρια προκαθορισμένων συνθηκών που εισάγονται ως δεδομένα σε επίπεδο προσομοιώσεων, όπως και η παρούσα διπλωματική εργασία. Η κύρια εφαρμογή θερμοχρωμικών υλικών σε αδιαφανή δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους όπως τοιχοποιίες και δώματα, δοκιμάζεται στις περισσότερες περιπτώσεις με τη χρήση επιχρισμάτων ή βαφών (συνήθως leuco dyes), οι οποίες χαρακτηρίζονται από θερμοκρασίες μετάβασης με τιμές που κυμαίνονται σε εύρη θερμοκρασιών του ατμοσφαιρικού αέρα και των δομικών στοιχείων. Ένα βασικό έναυσμα πειραματισμού πάνω στις θερμοχρωμικές βαφές ή επιχρίσματα προέρχεται από την ανάγκη ανάπτυξης ενός υλικού επικάλυψης δομικών στοιχείων που να έχει τη δυνατότητα να εξασφαλίζει ενεργειακά και θερμοκρασιακά οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως, σε ένα μεγάλο μέρος της υπάρχουσας έρευνας γίνεται διακριτή η σύγκριση μεταξύ θερμοχρωμικών επιχρισμάτων (thermochromic coatings) και ψυχρών υλικών (cool materials). Τα ψυχρά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα και εκπεμπτικότητα στα αντίστοιχα φάσματα ακτινοβολίας, μεγέθη που παραμένουν σταθερά για το υλικό για ολόκληρη σχεδόν τη χρονική διάρκεια ζωής τους. Η χρήση των ψυχρών υλικών έχει περισσότερη αποτελεσματικότητα τη θερινή περίοδο σε περιοχές με θερμά καλοκαίρια καθώς η μεγάλη τους ανακλαστικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και η μεγάλη εκπομπή θερμότητας ελαττώνουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες του κτιριακού κελύφους και κατ' επέκταση και την μεταφορά θερμότητας και τη θερμοκρασία εντός του κτιρίου (Karlessi et al., 2009; Butt et al., 2021). Όμως τη χειμερινή περίοδο σε ψυχρότερες καιρικές συνθήκες, τα ψυχρά υλικά εμποδίζουν την αναγκαία απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας που θα μπορούσε να συνεισφέρει στα θερμικά κέρδη του κτιριακού κελύφους, οδηγώντας στη λεγόμενη «θερμική ποινή» (heating penalty) η οποία εκφράζει την

αύξηση ενεργειακής κατανάλωσης για τη θέρμανση του κτιρίου (Butt et al., 2021). Αντίθετα, τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα-βαφές συνήθως διαθέτουν την ικανότητα να παρουσιάζουν μια δυναμική μεταβολή των οπτικών τους ιδιοτήτων σε σύγκριση με τις σταθερές οπτικές ιδιότητες των ψυχρών υλικών, προσφέροντας επιθυμητά οφέλη στη θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά τη χειμερινή περίοδο, διότι λαμβάνουν ανοικτές αποχρώσεις σε υψηλότερες και σκουρόχρωμες αποχρώσεις σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Butt et al., 2021).

Σύμφωνα με έρευνα των Granadeiro et al., η συγκριτική δοκιμή μεταξύ θερμοχρωμικών βαφών (με ελάχιστη ανακλαστικότητα: 0.05 και μέγιστη: 0.9) και συμβατικών βαφών, μόνιμα ανοικτόχρωμων (με ανακλαστικότητα: 0.9) και μόνιμα σκουρόχρωμων (με ανακλαστικότητα: 0.05) σε όλα τα δομικά στοιχεία κτιρίων κατοικιών τριών διαφορετικών πόλεων και χωρών (Μαδρίτη - Ισπανία, Πόρτο - Πορτογαλία και Άμπου Ντάμπι - Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) στη διάρκεια ενός έτους, έδειξε ότι στην περίπτωση των θερμοχρωμικών βαφών παρατηρήθηκαν συνολικά πτώσεις των εσωτερικών θερμοκρασιών του κτιρίου από 2.2 έως 11 °C σε σύγκριση με τις σκουρόχρωμες βαφές την περίοδο με ανάγκες για ψύξη και άνοδος θερμοκρασίας από 0.8 μέχρι 2.7 °C σε σύγκριση με τις ανοικτόχρωμες βαφές τη περίοδο που υπήρχε ανάγκη για θέρμανση. Κατά τις ημέρες του έτους που παρατηρήθηκαν οι περισσότερο ακραίες θερμοκρασίες, η απόδοση των θερμοχρωμικών βαφών ήταν σχεδόν όμοια με των συμβατικών βαφών (σκουρόχρωμων τις ψυχρότερες ημέρες και ανοικτόχρωμων τις θερμότερες ημέρες) (Granadeiro et al., 2020).

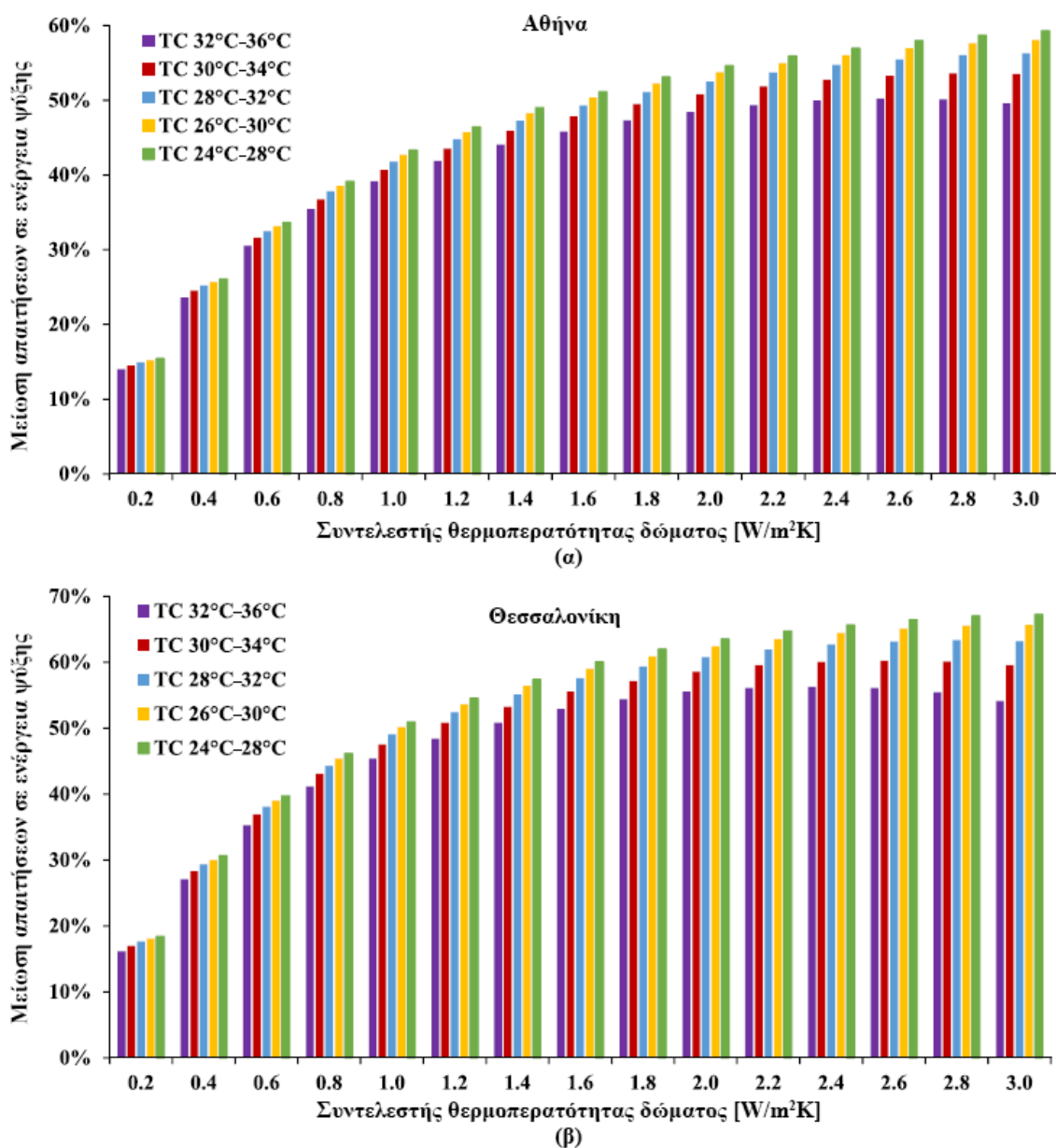
Μια δεύτερη έρευνα των Sánchez & Vilà σύγκρινε την εφαρμογή λευκής, μαύρης και μιας θερμοχρωμικής βαφής ως συνδυασμός των δύο, σε δώμα ενός τυπικού βιομηχανικού κτιρίου για τη διάρκεια ενός έτους, στη Βαρκελώνη και τη Μαδρίτη, δυο πόλεις που ανήκουν σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες της Ισπανίας, προκειμένου να εξεταστεί η ενεργειακή τους απόδοση. Οι πειραματισμοί εστίασαν στην εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας μετάβασης της θερμοχρωμικής βαφής ανάλογα με τη μέγιστη απόδοση της λευκής και της μαύρης, όπως επίσης και στις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση ή ψύξη του κτιρίου συναρτήσει της διαφορετικής θερμοπερατότητας του δώματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε δώματα μικρότερης θερμοπερατότητας η αλλαγή απόχρωσης του υλικού έχει μικρότερα οφέλη από τα δώματα μεγαλύτερης θερμοπερατότητας. Επιπλέον στη Βαρκελώνη η θερμοχρωμική βαφή οδηγεί σε υψηλότερα ενεργειακά κέρδη από τη λευκή κατά τους μήνες Σεπτέμβριο με Μάιο με εύρος κέρδους από 1.65 έως 15.89% και από τη μαύρη κατά τους μήνες Ιούνιο με Αύγουστο με εύρος κέρδους από 72.26 έως 86.68%, ενώ στη Μαδρίτη η θερμοχρωμική βαφή οδηγεί σε

υψηλότερα ενεργειακά κέρδη από τη λευκή κατά την περίοδο Οκτώβριο με Μάιο με εύρος κέρδους από 2.86 έως 13.72% και από τη μαύρη κατά την περίοδο Ιούνιο με Σεπτέμβριο με εύρος κέρδους από 29.27 έως 71.03% (Sánchez & Vilà, 2022). Επομένως, γίνεται εμφανής και η διαφορετική επιρροή που έχει η επιλογή του ίδιου θερμοχρωμικού υλικού σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες της ίδιας χώρας αναφορικά με τα ενεργειακά του οφέλη και την εποχιακή διάρκειά τους, καθώς εξαρτάται άμεσα από τα κλιματικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής εφαρμογής (Sánchez & Vilà, 2022).

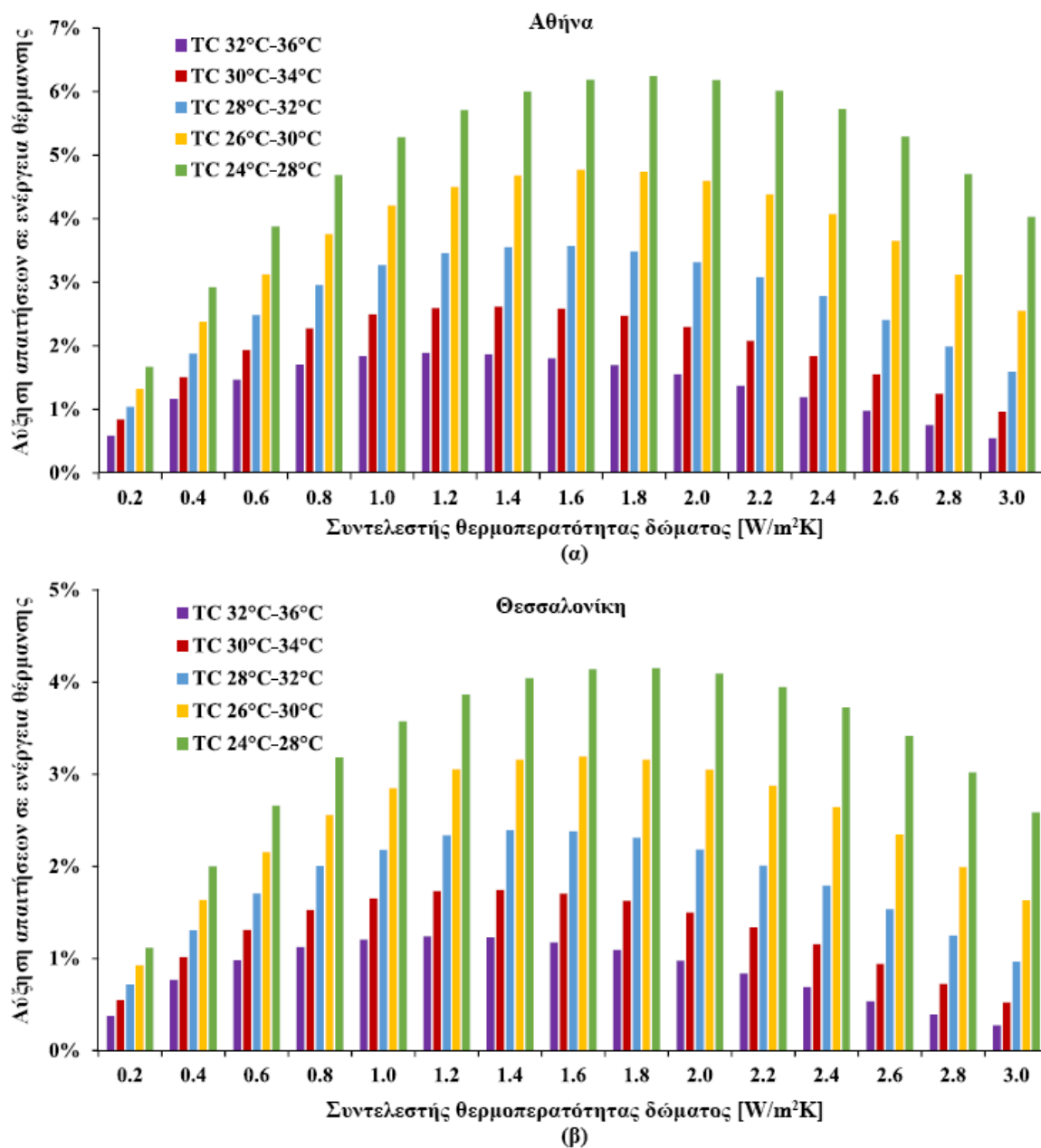
Ωστόσο είναι πιθανό το ενδεχόμενο, η βαφή ενός σταθερού χρώματος (σκούρου ή ανοικτού) να εξασφαλίζει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και ιδανικότερες επιφανειακές θερμοκρασίες από μια θερμοχρωμική βαφή σε περιόδους μέγιστων ή ελάχιστων θερμοκρασιών. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το εύρος τιμών που λαμβάνουν οι οπτικές ιδιότητες ενός θερμοχρωμικού υλικού σε σύγκριση με τις σταθερές τιμές των οπτικών ιδιοτήτων μιας μόνιμα ανοιχτόχρωμης ή σκουρόχρωμης βαφής, αλλά και από τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής και τις χρονικές περιόδους που υπάρχει περισσότερη ανάγκη για ενέργεια θέρμανσης ή ψύξης. Για παράδειγμα, σε περισσότερο τροπικές κλιματικές ζώνες του πλανήτη όπου κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους παρατηρούνται σταθερά υψηλές ή σταθερά χαμηλές θερμοκρασίες, ενδέχεται η χρήση θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στα κτιριακά κελύφη να μην έχει ικανοποιητικά οφέλη, από τη στιγμή που ένα κτίριο είναι σχεδόν μόνιμα εκτεθειμένο μόνο σε καύσωνες ή μόνο σε παγετώνες (Butt et al., 2021; Hu et al., 2024). Επιπλέον, καταγράφεται σε αρκετές μελέτες και το γεγονός ότι η ανθεκτικότητα μιας θερμοχρωμικής βαφής ενδέχεται να μειώνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα λόγω φωτοαποδόμησης, έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία ή ακόμα και λόγω συσσώρευσης σκόνης και μικροσωματιδίων στην επιφάνειά της, συνήθως με μια αρκετά απότομη πρώτη ελάττωση της απόδοσης τους πρώτους έξι μήνες και μια πιο σταδιακή φθορά της βαφής στους δώδεκα μήνες από την εφαρμογή της (Hu et al., 2024; Kitsopoulou et al., 2024b). Αυτό σημαίνει ότι σε αρκετές περιπτώσεις ενδέχεται να καθίσταται χρήσιμη η επιλογή μιας θερμοχρωμικής βαφής η οποία έχει υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, όπως θωράκιση με μικροενθλάκωση (microencapsulation), για παράδειγμα με τη χρήση TiO_2 , ή ανάμειξη με σταθεροποιητές UV ακτινοβολίας, τσιμεντοκονία ή άλλα συνδετικά υλικά, πρακτικές που ανεβάζουν το κόστος της σε σύγκριση με πιο τυπικές μονόχρωμες-στατικές βαφές (Karlessi & Santamouris, 2013; Kitsopoulou et al., 2024b).

Εκτός από τις τιμές των οπτικών ιδιοτήτων και τα κλιματικά δεδομένα, δυο ακόμη παράγοντες που καθορίζουν την καταλληλότητα ενός θερμοχρωμικού υλικού για την εφαρμογή σε ένα κτιριακό κέλυφος, είναι η θερμοκρασία μετάβασης και οι αποχρώσεις του. Η θερμοκρασία μετάβασης πρόκειται για τη θερμοκρασία που έχει το ίδιο το υλικό όταν μεταβάλλεται η απόχρωσή του και είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας ή του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται, διότι εξαρτάται και από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Μέσω προσομοιώσεων και πειραματισμών μπορεί να προβλεφθεί και να υπολογιστεί σε ένα βαθμό η αποθήκευση ή η απόρριψη θερμότητας του υλικού υπό δεδομένη ατμοσφαιρική θερμοκρασία και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, άρα και η μεταβολή της θερμοκρασίας του ίδιου του υλικού (Karlessi et al., 2009). Όμως η συμπεριφορά του υλικού ως προς την αποθήκευση (απορρόφηση) και απόρριψη (ανάκλαση ή εκπομπή) θερμότητας αλλάζει όταν αυτό φτάνει στη θερμοκρασίας μετάβασης, γεγονός που δυνητικά μπορεί να ευνοήσει ή να δυσχεραίνει και την θερμική απόκριση του κτιριακού κελύφους αν αυτό συμβαίνει σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες μέσα στο ίδιο έτος ή σε διαφορετικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων. Δηλαδή για παράδειγμα, μια χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης ενός υλικού μπορεί να ευνοεί την ανάκλαση ακτινοβολίας και θερμότητας του κτιρίου το καλοκαίρι από νωρίς, χωρίς να έχουν φτάσει ακόμα οι ώρες της ημέρας με τις υψηλότερες θερμοκρασίες ατμόσφαιρας, αλλά η ίδια θερμοκρασία μετάβασης το χειμώνα, να στερεί από το κτίριο την αναγκαία απορρόφηση ακτινοβολίας για θερμικά κέρδη ενώ η θερμοκρασία ατμόσφαιρας είναι ακόμα χαμηλή (Karlessi et al., 2009). Μελέτη των Kitsopoulou et al. δοκίμασε μέσω προσομοιώσεων ετήσιας ανάλυσης, την επιλογή θερμοχρωμικού υλικού ως επίστρωση δώματος σε κτίρια κατοικιών στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Στα σενάρια μελέτης υπήρχαν πέντε διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας μετάβασης του υλικού (24-28°C, 26-30°C, 28-32°C, 30-34°C, 32-36°C) και δεκαπέντε διαφορετικοί συντελεστές θερμοπερατότητας του δώματος (από 0.2 έως 3, με βήμα 0.2). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο υψηλότερος είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δώματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενεργειακή συνεισφορά του θερμοχρωμικού υλικού σε όλα τα εύρη θερμοκρασίας μετάβασης και ότι παρόλο που το μικρότερο εύρος θερμοκρασίας μετάβασης (24-28°C) προφέρει μεγαλύτερα ενεργειακά κέρδη και στις δυο πόλεις τη περίοδο ανάγκης για ψύξη (βλ. εικ. 9) και μικρότερα στην περίοδο ανάγκης για θέρμανση (βλ. εικ. 9), το πιο υψηλό εύρος (32-36°C) είναι αυτό που προσφέρει τα περισσότερα ενεργειακά κέρδη όταν συνδυαστούν οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης σε ετήσια βάση για δώμα με χαμηλότερες

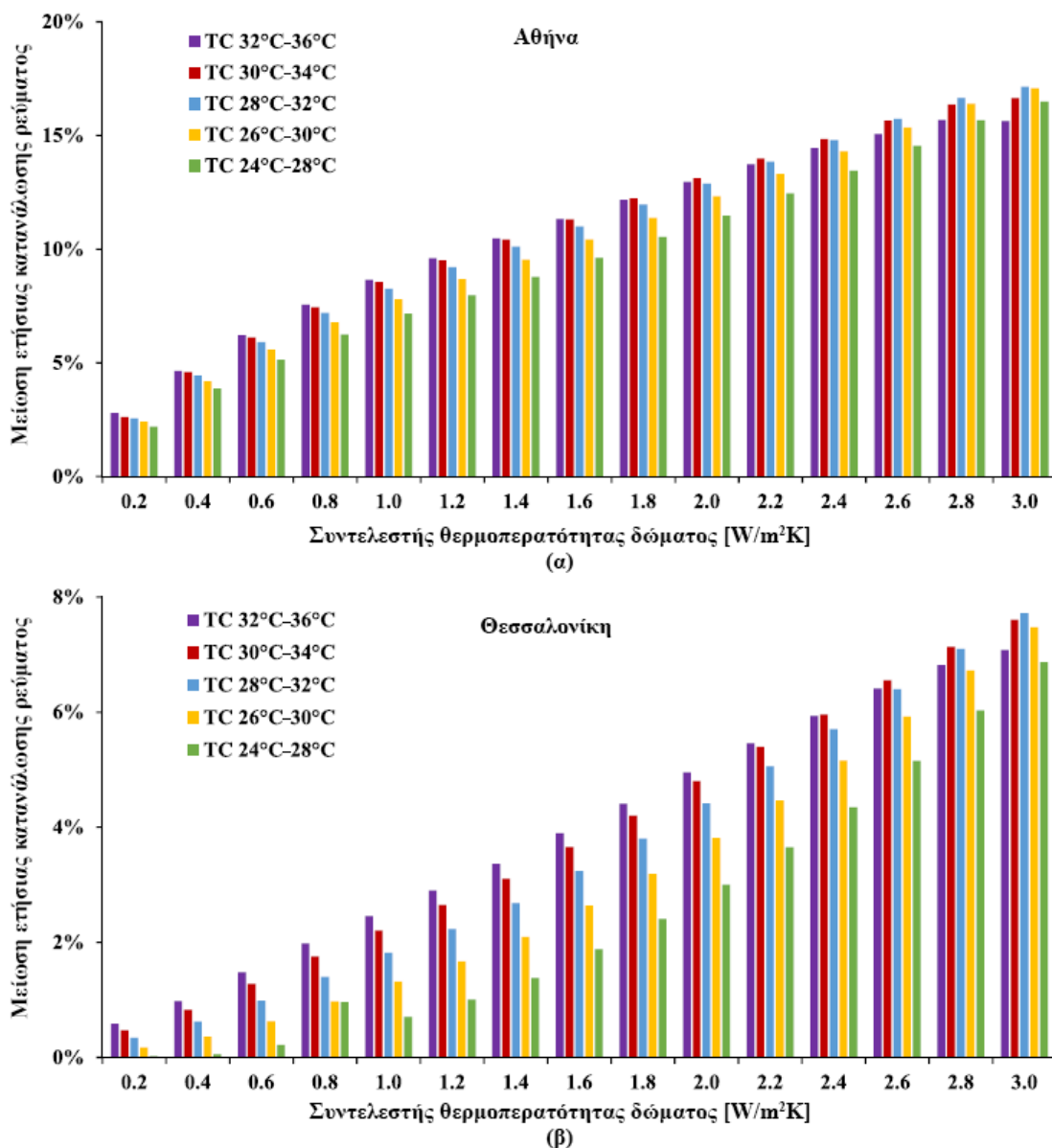
τιμές θερμοπερατότητας (0.2-2.2) και αντίστοιχα τα ενδιάμεσα εύρη (28-32°C, 30-34°C) για δώμα με υψηλότερες τιμές θερμοπερατότητας (2.2-3) (βλ. εικ. 10) (Kitsopoulou et al., 2024b).



Εικόνα 8: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης απαιτήσεων σε ενέργεια ψύξης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος (πηγή: Kitsopoulou et al., 2024).



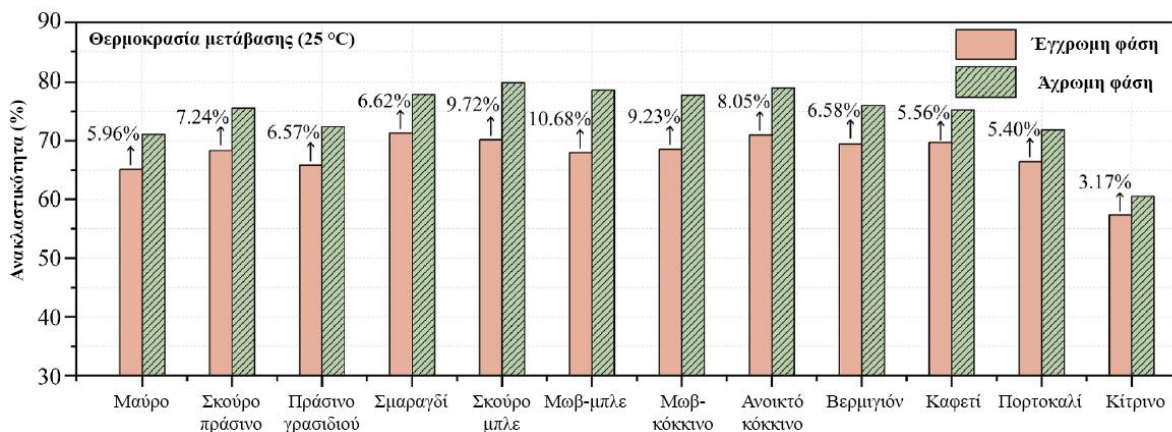
Εικόνα 9: Διάγραμμα ποσοστιαίας αύξησης απαιτήσεων σε ενέργεια θέρμανσης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος (πηγή: Kitsoroulou et al., 2024).



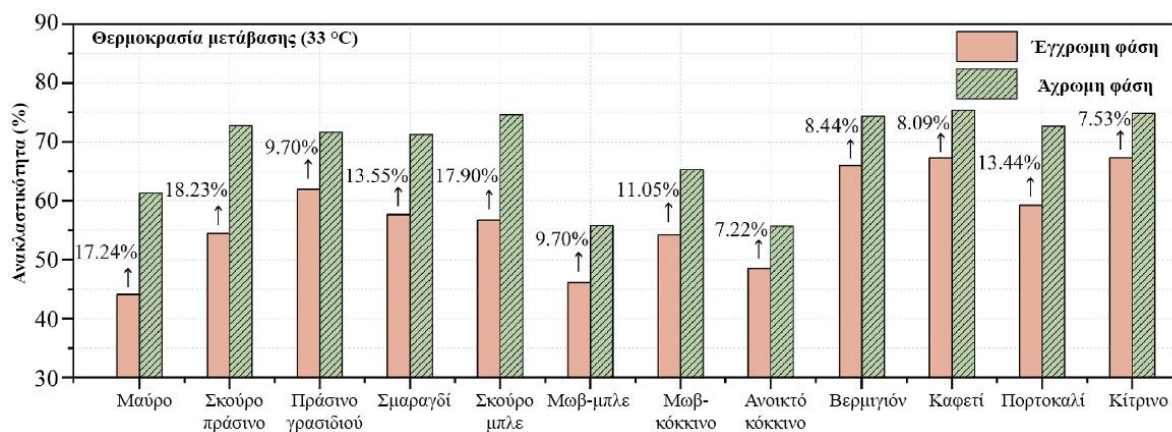
Εικόνα 10: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος (για θέρμανση και ψύξη) που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος (πηγή: Kitsopoulou et al., 2024).

Η απόχρωση του θερμοχρωμικού υλικού έχει σημαντικό ρόλο όσον αφορά τη διακύμανση των τιμών των οπτικών ιδιοτήτων του, καθώς κάθε χρώμα ανακλά ή απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία αποτελεσματικότερα σε διαφορετικό μήκος κύματος και εμφανίζει διαφορετικό βαθμό με τον οποίο ξεθωιάζει από μια επιφάνεια σε ίδιο χρονικό διάστημα. Έρευνα των Liu et al. ανέλυσε τη μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος εστιάζοντας στη θερμοκρασία μετάβασης και την επιλογή απόχρωσής του. Οι δοκιμές (βλ. εικ. 11 & 12) περιλάμβαναν δώδεκα διαφορετικές αποχρώσεις του υλικού (μαύρη, σκούρη πράσινη, πράσινη του γρασιδιού, σμαραγδί, σκούρη μπλε, μωβ-μπλε, μωβ-κόκκινη, ανοικτή κόκκινη, βερμιγιόν, καφετί, πορτοκαλί, κίτρινη) σε δυο φάσεις, μια σε χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία μετάβασης όπου η απόχρωση είχε πλήρη εμφάνιση και μια σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία μετάβασης όπου η απόχρωση έτεινε να ξεθωιάσει και να γίνει άχρωμη. Οι θερμοκρασίες μετάβασης ορίστηκαν σε δυο τιμές για όλες τις δοκιμές, στους 25 και στους 33°C. Τα αποτελέσματα (βλ. εικ. 11 & 12) έδειξαν ότι η ανακλαστικότητα του επιχρίσματος από την πλήρως έγχρωμη προς τη ξεθωριασμένη-άχρωμη κατάσταση με θερμοκρασία μετάβασης 25°C αυξήθηκε στο ελάχιστο κατά 3.17% για την κίτρινη απόχρωση και στο μέγιστο κατά 10.68% για την μωβ-μπλε απόχρωση. Με θερμοκρασία μετάβασης των 33°C, η ανακλαστικότητα του επιχρίσματος αυξήθηκε στο ελάχιστο κατά 7.22% για την ανοικτή κόκκινη και στο μέγιστο κατά 18.23% για τη σκούρη πράσινη απόχρωση. Επίσης, όλες οι αποχρώσεις που περιείχαν μπλε, πράσινο καθώς και η μαύρη εμφάνισαν αύξηση ανακλαστικότητας (και αντίστοιχα μείωση απορροφητικότητας) κατά 9.70 έως 18.23% συνολικά και για τις δυο θερμοκρασίες μετάβασης, διαπιστώνοντας ότι έχουν γενικότερα αποτελεσματικότερη απόδοση στη μεταβολή ανακλαστικότητας-απορροφητικότητας από τις υπόλοιπες αποχρώσεις που πλησιάζουν κοντά στο κίτρινο, το πορτοκαλί και το κόκκινο (Liu et al., 2023). Ωστόσο, η παραπάνω έρευνα αφορά επιχρίσματα τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβολές σκούρου και ανοικτού κρατώντας την ίδια βασική απόχρωση και όχι αλλαγή μεταξύ διαφορετικών αποχρώσεων στο ίδιο δείγμα υλικού (π.χ. μεταβολή από πράσινη σε κίτρινη απόχρωση), επομένως τα περιθώρια αλλαγής των οπτικών ιδιοτήτων είναι σχετικά περιορισμένα (π.χ. αύξηση ανακλαστικότητας από 0.5 σε 0.7) και κινούνται μέσα στις δυνατότητες της εκάστοτε συγκεκριμένης απόχρωσης. Δυνητικά θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε εργαστηριακό επίπεδο θερμοχρωμικά επιχρίσματα ή βαφές οι οποίες δεν θα προσδιορίζονται από την διατήρηση της ίδιας βασικής απόχρωσης πριν και μετά τη μετάβαση αλλά διαφορετικών αποχρώσεων που να επιτρέπουν και την εμφάνιση μεγαλύτερων διακυμάνσεων στη μεταβολή

των οπτικών ιδιοτήτων. Συνοψίζοντας, η επιλογή και η καταλληλότητα ενός θερμοχρωμικού υλικού για τη χρήση και εφαρμογή του σε δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους είναι μια πολυπαραγοντική διαδικασία, με κυριότερες παραμέτρους: τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής όπου βρίσκεται το κτίριο (θερμοκρασία ατμόσφαιρας και ηλιακή ακτινοβολία), των αναγκών και των περιόδων ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη, της σύγκρισης της απόδοσής τους σε σχέση με βαφές σταθερού χρώματος ή ψυχρά υλικά, τα χαρακτηριστικά και τη θερμοπερατότητα των δομικών στοιχείων εφαρμογής, της θερμοκρασίας μετάβασης τους και της απόχρωσής τους ως παράγοντα που επηρεάζει τις τιμές που λαμβάνουν οι οπτικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 11: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 25°C (πηγή: Liu et al., 2023).



Εικόνα 12: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 33°C (πηγή: Liu et al., 2023).

Κεφάλαιο 3. Το μοντέλο θερμικής ανάλυσης και οι παράμετροί του

3.1 Το δομικό στοιχείο του δώματος

3.1.1 Το δώμα ως δομικό στοιχείο του κτιριακού κελύφους

Το δώμα αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά δομικά στοιχεία ενός κτιριακού κελύφους. Συνήθως κατατάσσεται στα οριζόντια αδιαφανή εξωτερικά δομικά στοιχεία και πρόκειται για μια επίπεδη στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευή (ειδικά αν πρόκειται για περίπτωση συμβατικού δώματος), αποτελούμενη από διαδοχικές στρώσεις υλικών όπως: επίχρισμα εσωτερικού χώρου, πλάκα σκυροδέματος, θερμομόνωση, τσιμεντοκονία κλίσεων, υγρομόνωση και τελικό εξωτερικό επίχρισμα. Η επαφή του δώματος τόσο με το εσωτερικό όσο με το εξωτερικό περιβάλλον το καθιστά ένα δομικό στοιχείο που ευθύνεται σημαντικά για την διαχείριση των θερμικού ισοζυγίου μεταξύ του εσωτερικού του κτιρίου και της ατμόσφαιρας καθώς και τον έλεγχο των ροών θερμότητας που σε μεγαλύτερο ποσοστό προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία λόγω της άμεσης έκθεσης της επιφάνειας του δώματος (Mazzeo & Kontoleon, 2020). Ειδικά σε χαμηλού ύψους κτίρια (ενός ή δυο επιπέδων), το 60-70% της έκθεσης του κελύφους σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζεται από τη λειτουργία του δώματος (Mazzeo & Kontoleon, 2020). Σε χώρες με θερμό και ξηρό κλίμα, το δώμα είναι υπεύθυνο για ένα ενδεικτικό ποσοστό περίπου 70% των θερμικών κερδών που λαμβάνονται από το κτιριακό κέλυφος, ενώ το 27% λαμβάνεται από τις εξωτερικές συμπαγείς τοιχοποιίες και το 3% από τα οικοδομικά ανοίγματα-κουφώματα (Mansouri & Sriti, 2019). Επιπρόσθετα, σε συνθήκες με καθαρό ουρανό, το δώμα ενδέχεται τυπικά να έχει τη δυνατότητα υπό τις ανάλογες συνθήκες και επιλογή υλικών να απορροφήσει από το 20% μέχρι και το 95% της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται (Dabaieh et al., 2014). Κατά το σχεδιασμό ενός κτιρίου, η επιλογή των υλικών κατασκευής, της γεωμετρίας, της κλίσης και του προσανατολισμού του δώματος έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν σημαντικά την ενεργειακή του απόδοση και την προσαρμογή του στα τοπικά κλιματικά δεδομένα όσον αφορά την ικανοποίηση της θερμικής άνεσης των χρηστών (Mazzeo & Kontoleon, 2020).

3.1.2 Βασικές θερμικές ροές του δώματος

Οι βασικές θερμικές ροές ή διαφορετικά, οι τρόποι μεταφοράς θερμότητας (heat transfer modes) που εντοπίζονται συνήθως στις κατασκευές των δωματίων εκφράζουν τη ροή ενέργειας συνήθως μετατρεπόμενης από ηλιακή σε θερμική που αναπτύσσεται κατά κύριο λόγο από περιοχές υψηλότερης προς περιοχές χαμηλότερης θερμοκρασίας (Chasapis, 2015), από το εξωτερικό περιβάλλον προς το εσωτερικό του κτιρίου και αντίστροφα, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (Mazzeo & Kontoleon, 2020). Οι βασικότεροι τρόποι μεταφοράς θερμότητας που εντοπίζονται σε σημεία του κτιριακού κελύφους όπου υπάρχει δώμα, είναι οι ακόλουθες:

Μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής (conduction) (σε στερεό υλικό μέσο) κατά την οποία, τα μόρια που βρίσκονται στα θερμότερα σημεία του στερεού έχουν αυξημένο πλάτος ταλάντωσης και μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, την οποία την μεταφέρουν στα γειτονικά τους ψυχρότερα και πιο αδρανή μόρια, έως ότου τα μόρια ολόκληρου του στερεού έρθουν σε θερμοκρασιακή ισορροπία (Chasapis, 2015). Στην περίπτωση του δώματος ως στερεού υλικού μέσου, πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας που αναπτύσσεται μεταξύ των εσωτερικών στρώσεων του, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που εμφανίζεται στις δυο επιφάνειες των τελικών επιστρώσεων του δώματος που έρχονται σε επαφή με το εσωτερικό και το εξωτερικό περιβάλλον αντίστοιχα. (Mazzeo & Kontoleon, 2020; Görtz et al., 2022).

Μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής (convection) (σε ρευστό υλικό μέσο) η οποία παρατηρείται σε μόρια ρευστών τα οποία βρίσκονται διαρκώς σε κίνηση και μεταφέρουν την ενέργειά τους λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και πίεσης από θερμότερα χαμηλής πίεσης σε ψυχρότερα υψηλής πίεσης γειτονικά μόρια, όπως και στα στερεά (Chasapis, 2015). Στην περίπτωση του δώματος διακρίνονται δύο τέτοιες συνθήκες μεταφοράς. Η πρώτη συνθήκη πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας που αναπτύσσεται μεταξύ του επιφανειακού στρώματος αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος που έρχεται σε επαφή με την εξωτερικά εκτεθειμένη τελική επιφάνεια του δώματος και της επιφάνειας αυτής. Η δεύτερη συνθήκη πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της τελικής εσωτερικής επιφάνειας του δώματος και του επιφανειακού στρώματος αέρα με το οποίο έρχεται σε επαφή και βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου (Mazzeo & Kontoleon, 2020; Görtz et al., 2022).

Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (radiation) (μέσο το κενό), η οποία πραγματοποιείται λόγω της μετατροπής της θερμικής ενέργειας ενός σώματος σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και τη διάδοση αυτής μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προς ένα δεύτερο σώμα, το οποίο με τη σειρά του απορροφάει μέρος της ακτινοβολίας και την μετατρέπει ξανά σε θερμική ενέργεια (Chasapis, 2015). Στην περίπτωση του δώματος διακρίνονται τρεις τέτοιες συνθήκες μεταφοράς. Η πρώτη συνθήκη πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ήλιου και της εξωτερικής εκτεθειμένης επιφάνειας του δώματος λόγω της προσπίπτουσας άμεσης ή διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας (300-2500 nm) κυμαίνεται μεταξύ υπεριώδους, ορατής και υπέρυθρης. Η δεύτερη συνθήκη πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, μεταξύ του ουράνιου θόλου και της εξωτερικής εκτεθειμένης επιφάνειας του δώματος. Η τρίτη συνθήκη πρόκειται για τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, μεταξύ των επιφανειών του εσωτερικού χώρου του κτιρίου και της εσωτερικής τελικής επιφάνειας του δώματος. Η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας θεωρείται αυτή που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή των θερμικών συνθηκών του κτιρίου μέσω του δώματος (Mazzeo & Kontoleon, 2020; Görtz et al., 2022).

Η μελέτη και ανάλυση των τρόπων μεταφοράς θερμότητας που παρατηρούνται στο δώμα είναι απαραίτητη για τη σωστή επιλογή των υλικών κατασκευής του, καθώς λαμβάνονται υπόψη οι θερμικές (π.χ.: θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμοχωρητικότητα, πυκνότητα) και οπτικές ιδιότητες αυτών (π.χ.: ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, εκπνεμτικότητα, διαπερατότητα), προκειμένου να συνεισφέρουν στον αποτελεσματικότερο έλεγχο της ροής ενέργειας εντός και εκτός του κτιριακού κελύφους.

3.2 Περιγραφή πειραματικού μοντέλου θερμικής ανάλυσης

Για τη διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς θερμοχρωμικού υλικού σε κατασκευή συμβατικού δώματος κατοικίας, ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή ενός σεναρίου και των βασικών παραμέτρων οι οποίες θα εισαχθούν και θα περάσουν από διαδικασίες υπολογισμών. Πρόκειται για ένα ιδεατό θεωρητικό σενάριο στο οποίο δεν υπάρχει πραγματική πρακτική εφαρμογή ενός υλικού σε ένα υπαρκτό δώμα, αλλά όλα τα δεδομένα εξετάζονται σε υπολογιστικό επίπεδο μέσω προσομοιώσεων. Επίσης, το είδος του θερμοχρωμικού υλικού δεν αποσαφηνίζεται επ' ακριβώς ως προς τη χημική του σύσταση ή την απόχρωσή του (π.χ. αν είναι leuco dye ή αν έχει πράσινη απόχρωση) αλλά πρόκειται θεωρητικά για ένα επίχρισμα που τοποθετείται ως τελική επίστρωση στην εξωτερική επιφάνεια του υπό μελέτη δώματος. Η βασική περιοχή μελέτης στην οποία βρίσκεται το θεωρητικό κτίριο αναφοράς είναι η πόλη της Αθήνας, επομένως στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη κλιματικά δεδομένα της πόλης αυτής. Τα κλιματικά δεδομένα που κρίνονται απαραίτητα για τη διενέργεια των προσομοιώσεων είναι αντιπροσωπευτικά εύρη θερμοκρασιών ατμόσφαιρας-περιβάλλοντος (T_{amb} [°C]), θερμοκρασίας ουράνιου θόλου (T_{sky} [°C]) και μέσης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Q_{sol} [W/m²]) που παρατηρούνται κατά μια τυπική ημέρα για κάθε έναν από τους δώδεκα μήνες του έτους, με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Το υπό μελέτη δώμα του κτιρίου θεωρείται ότι έχει μοναδιαία επιφάνεια και χαρακτηρίζεται από σταθερό πάχος θερμομονωτικού υλικού και σταθερή τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας (U [W/(m²×K)]) ίση με 0,45 (μέγιστος επιτρεπόμενος U_{max} για εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφή) στην κλιματική ζώνη Β όπου ανήκει η Αθήνα) (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2017). Μια κατηγορία από τις βασικές παραμέτρους των προσομοιώσεων αποτελούν οι οπτικές ιδιότητες του θερμοχρωμικού επιχρίσματος: ανακλαστικότητα (ρ_{sol}) και απορροφητικότητα (α_{sol}) σε ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (shortwave radiation), οι οποίες μεταβάλλονται μεταξύ συγκεκριμένων τιμών σε προκαθορισμένα διακριτά στάδια. Πιο συγκεκριμένα, αναφορικά με την ανακλαστικότητα (ρ_{sol}) θα εξετασθούν οι ακόλουθες περιπτώσεις τιμών: 1) σταθερή τιμή στο 0,4. 2) μεταβολή από 0,4 σε 0,5. 3) μεταβολή από 0,4 σε 0,6. 4) σταθερή τιμή στο 0,6. 5) μεταβολή από 0,6 σε 0,7. 6) μεταβολή από 0,6 σε 0,8. Επομένως έχουμε συνολικά έξι περιπτώσεις για τον τρόπο με τον οποίο παραμένει σταθερή ή μεταβάλλεται η ανακλαστικότητα του επιχρίσματος. Στις περιπτώσεις 3,4,5 και 6 η μεταβολή της ανακλαστικότητας θεωρείται αναστρέψιμη. Επιπλέον, στις περιπτώσεις 1 και 2 όπου έχουμε σταθερή ανακλαστικότητα με τιμές 0,4 και 0,6, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι πρόκειται

για ένα συμβατικό και όχι θερμοχρωμικό επίχρισμα, εφόσον δεν είναι δυνατή η μεταβολή απόχρωσης και ανακλαστικότητας, οπότε στα αντίστοιχα σενάρια θα αναφέρεται ότι υπάρχει συμβατικό και όχι θερμοχρωμικό επίχρισμα. Οι τιμές απορροφητικότητας (α_{sol}) του υλικού θα υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση μέσω της σχέσης: $\alpha_{sol}=1-\rho_{sol}$, οπότε για παράδειγμα όταν το επίχρισμα έχει τιμή ανακλαστικότητας 0,4 τότε θα έχει τιμή απορροφητικότητας 0,6. Η εκπεμπτικότητα (ϵ) του δώματος σε μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία (longwave radiation) θα λαμβάνει σε όλες τις περιπτώσεις σταθερή τιμή ίση με 0,9. Η θερμοκρασία μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού (transition temperature - T_{tr}) θα ορίζεται από δυο διαφορετικές τιμές: 25 και 30°C, οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της Ελλάδας (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2017). Η επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης (indoor set point temperature) του εσωτερικού χώρου του κτιρίου (T_{indoor} [°C]) που βρίσκεται κάτω από την κατασκευή του δώματος, λαμβάνει ένα ενδεικτικό εύρος τιμών (ελάχιστη, μέση και μέγιστη – min, mean, max) στις οποίες θεωρείται ότι επιτυγχάνεται η εξασφάλιση θερμικής άνεσης των χρηστών, προσαρμοσμένες στις επιθυμητές συνθήκες για κάθε μήνα του έτους. Οι τιμές της T_{indoor} που χρησιμοποιούνται στα σενάρια παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (βλ. πιν. 7) για μια τυπική μέρα από κάθε μήνα του έτους και έχουν προκύψει σύμφωνα με προσεγγιστικές παραδοχές από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε περιοχές της Ελλάδας και άλλων χωρών της Μεσογείου (Tsilingiridis & Sotiropoulos, 1998; Spentzou et al., 2013; Paravantis & Santamouris, 2015; Barmeparesos et al., 2019; Al-Din & Saltik, 2025). Από τη διαδικασία συγκέντρωσης όλων των διαφορετικών περιπτώσεων σταθερής ή μεταβαλλόμενης ανακλαστικότητας (6 περιπτώσεις), θερμοκρασιών μετάβασης (2 περιπτώσεις), τιμών της T_{indoor} (3 τιμές) και των 12 μηνών του έτους, προκύπτουν συνολικά $6 \times 2 \times 3 \times 12 = 432$ διαφορετικά εξεταζόμενα σενάρια.

Πίνακας 7: Επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης εσωτερικού χώρου (Tindoor) [°C] κατοικίας στην Αθήνα σε μια τυπική μέρα για κάθε μήνα του έτους												
Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ	Σεπτ	Οκτ	Νοέμ	Δεκ
Ελάχιστη Tindoor (min) [°C]	18,5	21,5	22	22,5	24	25	27	26,5	25,5	22	21	20
Μέση Tindoor (mean) [°C]	20	22,5	23	24	25,5	26	28	27,5	26,5	23,5	22,5	21
Μέγιστη Tindoor (max) [°C]	21,5	23,5	24	25,5	27	27	29	28,5	27,5	25	24	22

Πίνακας 7: Επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης εσωτερικού χώρου (Tindoor) [°C] κατοικίας στην Αθήνα σε μια τυπική μέρα για κάθε μήνα του έτους (πηγές: Tsilingiridis & Sotiropoulos, 1998; Spentzou et al., 2013; Paravantis & Santamouris, 2015; Barmmparesos et al., 2019; Al-Din & Saltik, 2025).

Επιμέρους μεγέθη που κρίνονται απαραίτητα για την εύρεση των είναι οι συντελεστές θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα προς το εξωτερικό και το εσωτερικό περιβάλλον μέσω δώματος: $1/Ra=25 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ [$Ra=0,04 \text{ (m}^2 \times \text{K})/\text{W}$] και $1/Ri=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ [$Ri=0,1 \text{ (m}^2 \times \text{K})/\text{W}$] αντίστοιχα (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2017). Σημαντικό ρόλο στους υπολογισμούς παίζει επίσης και η λεγόμενη «ισοδύναμη θερμοκρασία» ($T_{\text{sol,air}}$ [°C]) η οποία πρόκειται για μια θεωρητική-αντιπροσωπευτική τιμή θερμοκρασίας αέρα, που θα έδινε ως αποτέλεσμα την ίδια τιμή ροής θερμότητας προς την εξωτερική επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου αν συνδυαζόταν η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής του δομικού στοιχείου με τον άμεσο ατμοσφαιρικό αέρα, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας σε συναλλαγή με τον ουράνιο θόλο και τις τυχόν επιμέρους επιφάνειες που μπορεί να περιβάλλουν το κτίριο (Olofsson et al., 2017). Επομένως, η $T_{\text{sol,air}}$ εκφράζει στην προκειμένη περίπτωση την θερμοκρασία της τελικής επιφάνειας του δώματος που βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, άρα και την θερμοκρασία του ίδιου του θερμοχρωμικού υλικού ως τελική επίστρωση. Η τιμή της ισοδύναμης θερμοκρασίας υπολογίζεται από τη σχέση 1:

$$1. \quad T_{sol,air} = T_{amb} + (a_{sol} \times Q_{sol} \times Ra)$$

όπου:

$T_{sol,air}$ [°C]: η ισοδύναμη θερμοκρασία που αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία της τελικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον

T_{amb} [°C]: η θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα του άμεσου εξωτερικού περιβάλλοντος

a_{sol} : η απορροφητικότητα της τελικής εξωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου, δηλαδή του θερμοχρωμικού υλικού

Q_{sol} [W/m²]: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο δομικό στοιχείο

Ra [(m²×K)/W]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα σε ροή θερμότητας μεταξύ δομικού στοιχείου και εξωτερικού περιβάλλοντος

Ωστόσο η αρχική τιμή της ισοδύναμης θερμοκρασίας επιδέχεται μια ελαφριά διόρθωση (ΔT_{corr} . [°C]) η οποία προκύπτει λόγω της συμπερίληψης της θερμοκρασίας του ουράνιου θόλου (T_{sky}), καθώς αυτή δεν υπάρχει στην σχέση 1 και καθορίζει σε ένα βαθμό την ροή θερμότητας μεταξύ δομικού στοιχείου και εξωτερικού περιβάλλοντος. Η τιμή της ΔT_{corr} . υπολογίζεται από τις σχέσεις 2 και 3, ακολουθώντας την εξίσωση του νόμου Stefan-Boltzmann για την ένταση της θερμικής ακτινοβολίας (M) που εκπέμπει ένα σώμα με θερμοκρασία T ($M = \varepsilon \times \sigma \times T^4$). Επί της ουσίας, βρίσκουμε την ένταση θερμικής ακτινοβολίας (M) που εκπέμπει η επιφάνεια του δώματος, χρησιμοποιώντας ως θερμοκρασία της επιφάνειας αυτής, τη διαφορά μεταξύ T_{sky} και $T_{sol,air}$, αφού πρώτα οι θερμοκρασίες μετατραπούν σε μονάδες Κέλβιν. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας την ένταση θερμικής ακτινοβολίας (M) με την αντίσταση θερμικής μετάβασης Ra , βρίσκουμε την ΔT_{corr} , όπως φαίνεται στη σχέση 3. Αφού έχει υπολογιστεί η ΔT_{corr} , η διορθωμένη πλέον ισοδύναμη θερμοκρασία ($T_{sol,air}$ (corr.)) προκύπτει αφαιρώντας την ΔT_{corr} . από την αρχική ισοδύναμη θερμοκρασία ($T_{sol,air}$) όπως φαίνεται στη σχέση 4:

2. $M = \varepsilon \times \sigma \times [(T_{sky} + 273,15)^4 - (T_{sol,air} + 273,15)^4]$
3. $\Delta T_{corr.} = M \times Ra$
4. $T_{sol,air (corr.)} = T_{sol,air} + \Delta T_{corr.}$

όπου:

$M [W/m^2]$: η ένταση θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπει η επιφάνεια του δώματος σε σχέση με την ανταλλαγή θερμότητας με τον ουράνιο θόλο

ε : η εκπεμπτικότητα της τελικής εξωτερικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου, δηλαδή η εκπεμπτικότητα του θερμοχρωμικού υλικού

σ : η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή $5,67 \times 10^{-8}$

$T_{sol,air} [^{\circ}C]$: η ισοδύναμη θερμοκρασία που αντιπροσωπεύει την θερμοκρασία της τελικής επιφάνειας του δομικού στοιχείου σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον

$T_{sky} [^{\circ}C]$: η θερμοκρασία του ουράνιου θόλου πάνω από το δομικό στοιχείο

$\Delta T_{corr.} [^{\circ}C]$: η ελαφριά απόκλιση που εφαρμόζεται ως διόρθωση στην αρχική ισοδύναμη θερμοκρασία

$Ra [(m^2 \times K)/W]$: η αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα σε ροή θερμότητας μεταξύ δομικού στοιχείου και εξωτερικού περιβάλλοντος

$T_{sol,air (corr.)} [^{\circ}C]$: η νέα διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία

Καθώς έχει υπολογιστεί η διορθωμένη-επιφανειακή θερμοκρασία του δώματος σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον, στη συνέχεια η $T_{sol,air (corr.)}$ συγκρίνεται με τη θερμοκρασία μετάβασης του θερμοχρωμικού υλικού προκειμένου να εξεταστεί για κάθε χρονικό βήμα αν το υλικό ενεργοποιείται και αλλάζει απόχρωση και οπτικές ιδιότητες (ανακλαστικότητα-απορροφητικότητα). Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει η $T_{sol,air (corr.)}$ τη συγκεκριμένη στιγμή να ξεπερνάει σε τιμή τη θερμοκρασία μετάβασης. Ωστόσο, το υλικό μπορεί να επανέλθει στην αρχικές του τιμές ανακλαστικότητας-απορροφητικότητας αν η $T_{sol,air (corr.)}$ ξαναπέσει κάτω από την θερμοκρασία μετάβασης σε σύγκριση με το προηγούμενο χρονικό βήμα. Όσο χρονικό διάστημα η $T_{sol,air (corr.)}$ βρίσκεται σε τιμή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας μετάβασης του υλικού,

τότε στη σχέση 1 εφαρμόζεται η νέα απορροφητικότητα (α_{sol}) λόγω ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού υλικού και προκύπτει νέα τιμή της $T_{sol,air (corr.)}$ από τις σχέσεις 2, 3 και 4.

Περνώντας στη ροή θερμότητας (Q – heat transfer) από το δώμα προς τον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της, η οποία προκύπτει μέσω της θεμελιώδους εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας ($Q = A \times U \times \Delta T$), όπως φαίνεται στη σχέση 5. Το ποσό ενέργειας που ανταλλάσσεται μεταξύ του δωματός και του εσωτερικού χώρου και εκφράζει την εν λόγω ροή θερμότητας, προκύπτει από τη σχέση 6, πολλαπλασιάζοντας τη ροή θερμότητας Q_i με 0,25 ώστε να προκύψει η ενέργεια (E_i) σε Wh, καθώς το χρονικό βήμα της κάθε προσομοίωσης είναι 15 λεπτά της ώρας. Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η T_{indoor} πρόκειται για την επιθυμητή θερμοκρασία που θέλουμε να διατηρήσουμε στον εσωτερικό χώρο κάτω από το δώμα. Επίσης, ένας θεμελιώδης κανόνας της θερμότητας είναι ότι ρέει πάντα από τα σώματα με υψηλότερες προς τα σώματα με χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η ροή θερμότητας (Q_i) και η ενέργεια (E_i) που λαμβάνουν τιμές με θετικό πρόσημο στους υπολογισμούς, εκφράζουν το γεγονός ότι η T_{indoor} είναι μεγαλύτερη της $T_{sol,air}$ στο δεδομένο χρονικό βήμα και άρα θερμότητα φεύγει από τον εσωτερικό χώρο προς το δώμα (απώλεια θερμότητας). Επομένως για να διατηρείται η T_{indoor} χρειάζεται να υπάρξει θερμικό ενεργειακό κέρδος προς τον εσωτερικό χώρο και οι τιμές δηλώνουν το θερμικό φορτίο (heating load) που απαιτείται για τη διατήρηση της T_{indoor} . Αντίθετα, οι τιμές των Q_i και E_i με αρνητικό πρόσημο εκφράζουν ότι η T_{indoor} είναι μικρότερη της $T_{sol,air}$ και άρα υπάρχει μεγαλύτερη ροή θερμότητας από το δώμα προς το εσωτερικό του κτιρίου (θερμικό κέρδος). Επομένως ισχύει το γεγονός ότι απαιτείται η εκροή θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δώμα και οι τιμές δηλώνουν το ψυκτικό φορτίο (cooling load) που απαιτείται για να διατηρηθεί η θερμοκρασία T_{indoor} εντός του κτιρίου:

$$5: Q = A \times U \times (T_{indoor} - T_{sol,air (corr.)})$$

$$6: E_i = Q_i \times 0,25$$

$$7: E = \sum_{t=0}^{t=24h} E_i \times \Delta t$$

όπου:

Q [W]: η ροή θερμότητας μεταξύ δωματός και εσωτερικού χώρου, Q_i : η ροή θερμότητας σε διάστημα 15 λεπτών.

A [m^2]: η επιφάνεια του δομικού στοιχείου (στην περίπτωση αυτή μοναδιαία)

$U [W/(m^2 \times K)]$: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δώματος

$T_{\text{indoor}} [^{\circ}C]$: η επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης εσωτερικού χώρου

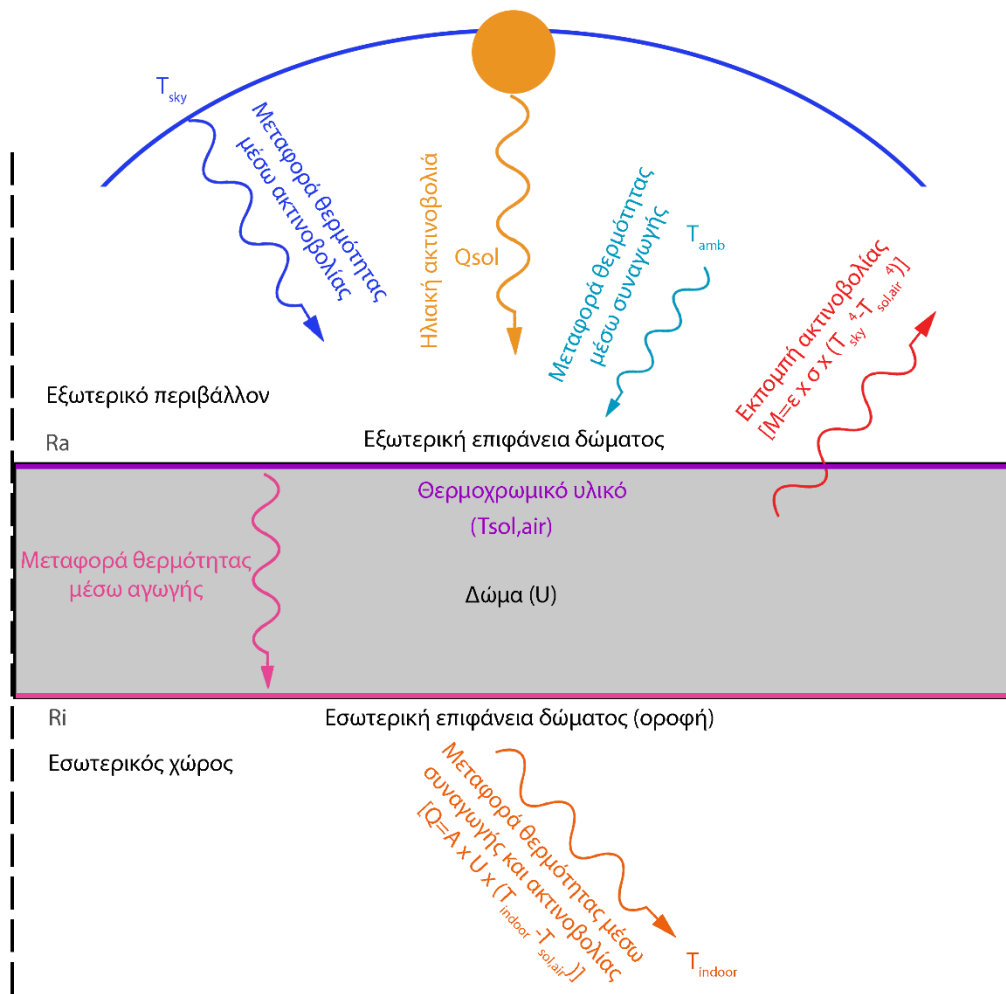
$T_{\text{sol,air (corr.)}} [^{\circ}C]$: η διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία

$E_i [Wh]$: η ενέργεια που μεταφέρεται σε διάστημα 15 λεπτών λόγω της ροής θερμότητας

$E [Wh]$: η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται σε χρονικό διάστημα ολόκληρης της τυπικής ημέρας

Η συνολική ενέργεια (E) που απαιτείται σε ένα ολόκληρο 24ωρο προκειμένου να διατηρείται η T_{indoor} λόγω της ροής θερμότητας μέσω του δώματος, προκύπτει από το άθροισμα όλων των επιμέρους τιμών ενέργειας που έχουμε για κάθε 15 λεπτά της ώρας μέσα στην τυπική ημέρα (όπως φαίνεται στη σχέση 7). Για να υπολογιστεί αντίστοιχα η ετήσια συνολική ενέργεια, χρησιμοποιείται η παραδοχή ότι η ενέργεια (24ώρου) της τυπικής ημέρας του κάθε μήνα πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό ημερών του κάθε μήνα (28 τον Φεβρουάριο, 30 ή 31 για τους υπόλοιπους μήνες) και στη συνέχεια εφόσον προκύψει η αθροιστική ενέργεια για κάθε μήνα, αυτές αθροίζονται πάλι μεταξύ τους ώστε να υπολογιστεί η συνολική ετήσια ενέργεια. Η συνολική ετήσια ενέργεια εκφράζει την ενέργεια που απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για τη διατήρηση της T_{indoor} . Ωστόσο, επειδή οι T_{indoor} έχουν διαφορετικές τιμές για κάθε μήνα, δημιουργούνται τρεις κατηγορίες που ανταποκρίνονται: 1) σε όλες τις ελάχιστες ($\min$), 2) σε όλες τις μέσες (mean) και 3) σε όλες τις μέγιστες τιμές ($\max$) της T_{indoor} μαζί, για ένα έτος. Δηλαδή θεωρείται ότι για όλο το έτος ο χρήστης επιθυμεί είτε μόνο τις ελάχιστες, είτε μόνο τις μέσες είτε μόνο τις μέγιστες T_{indoor} και όχι πιο περίπλοκους συνδυασμούς αυτών.

Στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. εικ. 13) φαίνονται τα κύρια κλιματικά και θερμοκρασιακά μεγέθη και ροές θερμότητας που εκφράζουν τη θερμική συμπεριφορά του δώματος σε αλληλεπίδραση με το εξωτερικό και το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου, όπως περιγράφονται και στο σύνολο αυτού του κεφαλαίου. Το θερμοχρωμικό επίχρισμα ως πρώτη επιφανειακή ζώνη προστασίας του κτιριακού κελύφους παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των θερμικών ροών του δώματος, ο οποίος ωστόσο εξαρτάται άμεσα από τις κλιματικές συνθήκες της κάθε χρονικής περιόδου.



Εικόνα 13: Διάγραμμα υπόδειξης βασικών μεγεθών και θερμικών ροών μεταξύ δώματος, εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και της θέσης του θερμοχρωμικού υλικού (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Τα κύρια συμπεράσματα που θα προκύψουν από τη θερμική ανάλυση αφορούν: 1) την αποσαφήνιση του ρυθμού ενεργοποίησης του θερμοχρωμικού υλικού σε κάθε μήνα ανάλογα με την θερμοκρασία μετάβασης και τα κλιματικά δεδομένα, 2) τον τρόπο με τον οποίο το θερμοχρωμικό υλικό επηρεάζει την ισοδύναμη θερμοκρασία του υπό μελέτη δομικού στοιχείου μέσω της δομικής μεταξύ διαφορετικών τιμών ανακλαστικότητας-απορροφητικότητας, 3) τη ροή θερμότητας και ενέργειας που συμβαίνει μεταξύ του δώματος και του εσωτερικού χώρου, επιδιώκοντας να επιτευχθούν οι εκάστοτε επιθυμητές θερμοκρασίες εντός του κτιρίου κάθε μήνα. Συνεπώς, σκοπός των προσομοιώσεων είναι η όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση και συσχέτιση του τρόπου λειτουργίας του θερμοχρωμικού υλικού και της των παραμέτρων που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά του σε ένα σχετικά ρεαλιστικό σενάριο συνθηκών ενός κτιριακού κελύφους, και πιο συγκεκριμένα στην κατασκευή ενός συμβατικού δώματος κατοικίας, με πεδίο αναφοράς τις κλιματικές συνθήκες της Αθήνας και τις ανάγκες που προκύπτουν για θερμική άνεση και ενεργειακή κατανάλωση, σε ετήσια βάση.

Κεφάλαιο 4. Θερμική ανάλυση εφαρμογής θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε κατασκευή συμβατικού δώματος

4.1 Σενάρια λειτουργίας του υλικού εφαρμογής

Όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το επίχρισμα που εφαρμόζεται στην εξωτερική τελική επιφάνεια του δώματος εμφανίζει θερμική συμπεριφορά η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος και στη συγκεκριμένη περίπτωση το κλίμα της Αθήνας. Στα συνολικά σενάρια, χρησιμοποιείται συμβατικό επίχρισμα με σταθερές τιμές ανακλαστικότητας (ρ_{sol}) της ηλιακής ακτινοβολίας 0,4 και 0,6 σε όλο το εικοσιτετράωρο καθώς και θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη ανακλαστικότητα από 0,4 σε 0,5, από 0,4 σε 0,6, από 0,6 σε 0,7 και από 0,6 σε 0,8. Επίσης οι μεταβολές αυτές θεωρούνται αναστρέψιμες. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα, ότι αν το υλικό έχει μεταβαλλόμενη ανακλαστικότητα από 0,4 σε 0,5 και θερμοκρασία μετάβασης 25°C , τότε όταν η θερμοκρασία του επιχρίσματος ανέβει πάνω από τους 25°C η ανακλαστικότητα από 0,4 γίνεται 0,5 και όταν ξανακατέβει κάτω από 25°C , επανέρχεται στην τιμή 0,4. Για την εκτίμηση της δυνατότητας ενεργοποίησης, της ώρας και της διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και κατ' επέκταση αλλαγής της ανακλαστικότητας του επιχρίσματος σε κάθε τυπική μέρα των διαφορετικών μηνών του έτους, λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές τιμές που λαμβάνει η διορθωμένη ισοδύναμη θερμοκρασία ($T_{sol,air(corr.)}$) σε όλα τα δυνατά σενάρια. Ωστόσο, για τον καλύτερο έλεγχο σταθερότητας της ισοδύναμης θερμοκρασίας κατά τη μετάβαση του θερμοχρωμικού υλικού, εφαρμόζεται η εξής παραδοχή: όταν η ισοδύναμη θερμοκρασία του υλικού ($T_{sol,air(corr.)}$) για την αρχική ανακλαστικότητα (π.χ. $\rho_{sol1}=0,4$) είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία μετάβασης ($T_{tr}=25$ ή 30°C) και η αντίστοιχη ισοδύναμη θερμοκρασία για τη νέα ανακλαστικότητα (π.χ. $\rho_{sol2}=0,5$) είναι μικρότερη της T_{tr} , τότε το υλικό αποκτά και διατηρεί ως ισοδύναμη θερμοκρασία την T_{tr} , διαφορετικά, η ισοδύναμη θερμοκρασία αποκτά τιμή που ανταποκρίνεται στη νέα ανακλαστικότητα (ρ_{sol2}). Αυτή η παραδοχή επιλέγεται για να περιοριστούν σφάλματα που προκύπτουν όσον αφορά την παράδοση εναλλαγή τιμών στην ισοδύναμη θερμοκρασία, καθώς αυτή εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από την ανακλαστικότητα του υλικού. Δηλαδή, αν για παράδειγμα το θερμοχρωμικό υλικό τη χρονική στιγμή $t1$ έχει: $T_{sol,air}=24,5^{\circ}\text{C}<T_{tr}$ με $\rho_{sol}=0,4$ (πριν τη μετάβαση), την χρονική στιγμή $t2$ έχει: $T_{sol,air}=T_{tr}=25^{\circ}\text{C}$ με $\rho_{sol}=0,4$ (σημείο μετάβασης) και τη χρονική στιγμή $t3$ (μετά τη μετάβαση) έχει: $T_{sol,air}=23^{\circ}\text{C}<T_{tr}$ με $\rho_{sol}=0,5$, δημιουργείται παράδοξο, καθώς πρακτικά, παρόλο που η νέα

ανακλαστικότητα ρ_{sol} λόγω της εξίσωσης έριξε την τιμή της $T_{sol,air}$ κάτω από την τιμή T_{tr} , είναι αδύνατον το υλικό να έχει και να μπορεί να διατηρήσει ως ανακλαστικότητα την $\rho_{sol}=0,5$ ενώ η $T_{sol,air}$ είναι πλέον πάλι μικρότερη της T_{tr} , διότι πάλι βρίσκεται σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο μετάβασης και θα έπρεπε η ρ_{sol} να είναι ίση με 0,4. Στον πίνακα 8 (βλ. πιν. 8) έπειτα από υπολογισμούς και ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων προκύπτει ότι αν θεωρήσουμε ως 100% όλα τα σενάρια εφαρμογής θερμοχρωμικού επιχρίσματος (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα συμβατικά επιχρίσματα με σταθερή ανακλαστικότητα), τότε τα ποσοστά σεναρίων όπου παρατηρείται ενεργοποίηση της αλλαγής απόχρωσης έχουν ως εξής:

- 1) Θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβολή της ρ_{sol} από 0.4 σε 0,5 ή 0,6 και T_{tr} : 25°C: 14,6%
- 2) Θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβολή της ρ_{sol} από 0.6 σε 0,7 ή 0,8 και T_{tr} : 25°C: 12,5%
- 3) Θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβολή της ρ_{sol} από 0.4 σε 0,5 ή 0,6 και T_{tr} : 30°C: 12,5%
- 4) Θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβολή της ρ_{sol} από 0.6 σε 0,7 ή 0,8 και T_{tr} : 30°C: 8,4%
- 5) Σενάρια όπου δεν ενεργοποιείται καθόλου η αλλαγή της απόχρωσης και της ρ_{sol} : 52%

Τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα ενεργοποιούν την αλλαγή της απόχρωσης και της ανακλαστικότητάς τους συνολικά σε ποσοστό 48% από όλα τα δυνατά σενάρια, δηλαδή σε ελαφρώς λιγότερες από τις μισές των περιπτώσεων που εξετάζονται για αυτά. Το θερμοχρωμικό επίχρισμα με αρχική ανακλαστικότητα $\rho_{sol}:0,4$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ έχει το μεγαλύτερο ποσοστό ενεργοποίησης ενώ το αντίστοιχο με αρχική ανακλαστικότητα $\rho_{sol}:0,6$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$, έχει το μικρότερο ποσοστό ενεργοποίησης. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι κατά τους μήνες: Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο το θερμοχρωμικό επίχρισμα δεν ενεργοποιεί σε καμία περίπτωση την αλλαγή απόχρωσης, στους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο Αύγουστο και Σεπτέμβριο, το επίχρισμα ενεργοποιεί αλλαγή απόχρωσης σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ στο μήνα Απρίλιο η ενεργοποίηση συμβαίνει μόνο για την περίπτωση με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ και T_{tr} : 25°C και στους μήνες Μάιο και Οκτώβριο ενεργοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την περίπτωση με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ και $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 8: Ενεργοποίηση - επαναφορά αλλαγής απόχρωσης θερμοχρωμικού υλικού				
Μήνας	Θερμοκρασία μετάβασης: 25°C		Θερμοκρασία μετάβασης: 30°C	
	$\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5 /$ $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$	$\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,7 /$ $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$	$\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5 /$ $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$	$\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,7 /$ $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$
Ιανουάριος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Φεβρουάριος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Μάρτιος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Απρίλιος	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Μάιος	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Ιούνιος	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Ιούλιος	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Αύγουστος	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Σεπτέμβριος	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Οκτώβριος	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Νοέμβριος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Δεκέμβριος	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι

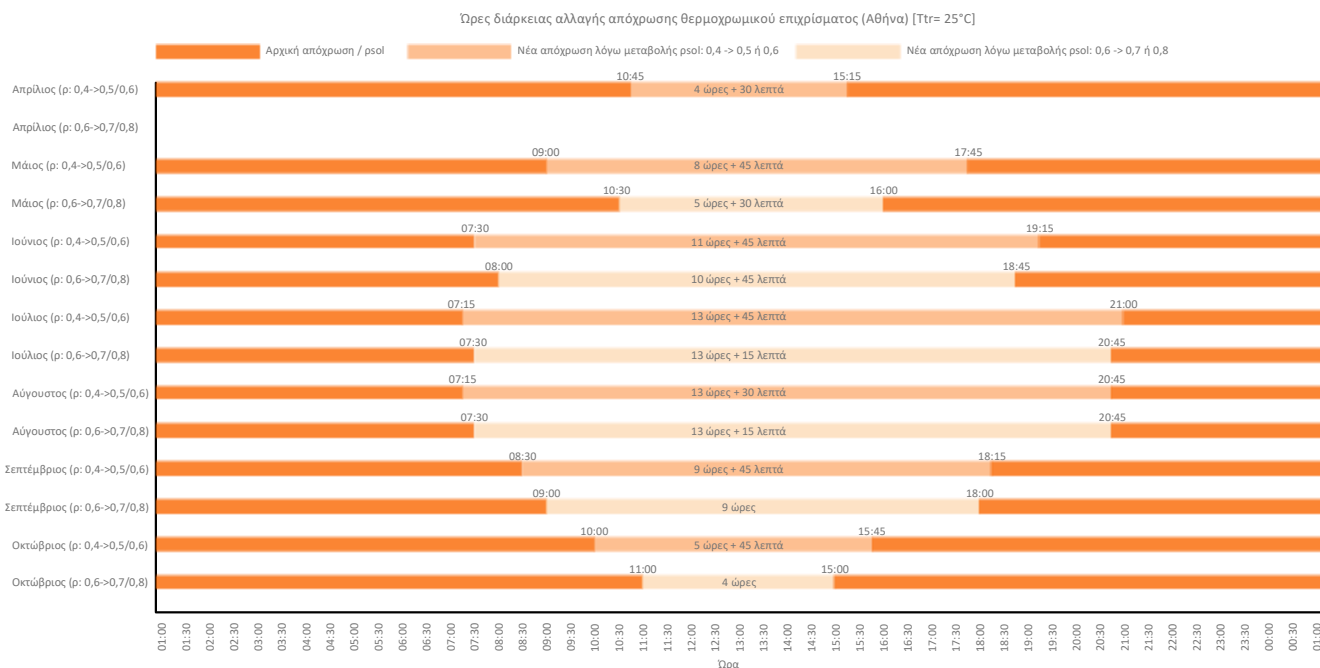
Πίνακας 8: Ενεργοποίηση-επαναφορά αλλαγής απόχρωσης θερμοχρωμικού υλικού για μια τυπική ημέρα από κάθε μήνα του έτους (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Έχοντας πλέον ως δεδομένα τα σενάρια και τους μήνες όπου παρατηρείται η ενεργοποίηση αλλαγής απόχρωσης του θερμοχρωμικού επιχρίσματος, μια ακόμη πληροφορία που κρίνεται σημαντική για την αποσαφήνιση της λειτουργίας του υλικού είναι και η διάρκεια ισχύος της αλλαγμένης απόχρωσης, πριν αυτή επαναφερθεί στην αρχική της κατάσταση και το ίδιο συμβεί και για τιμές ανακλαστικότητας (ρ_{sol}). Στον πίνακα 9 (βλ. πιν. 9) φαίνονται οι ώρες αλλαγής και έπειτα επαναφοράς της απόχρωσης και ανακλαστικότητας του υλικού καθώς και η χρονική διάρκεια κατά την οποία είναι σε ισχύ η εν λόγω αλλαγή. Στα διαγράμματα των εικόνων 14 και 15 (βλ. εικ. 14 & 15) γίνονται ακόμα περισσότερο κατανοητά τα χρονικά διαστήματα όπου συμβαίνουν οι μεταβολές απόχρωσης και ανακλαστικότητας του θερμοχρωμικού επιχρίσματος στον κύκλο μιας ημέρας. Ο μήνας στον οποίο εντοπίζονται οι μεγαλύτερες διάρκειες για όλα τα σενάρια είναι ο Ιούλιος με μέγιστη λειτουργία του θερμοχρωμικού υλικού στις 13 ώρες και 45 λεπτά (από τις 07:15 έως τις 21:00) όταν αυτό έχει αρχική $\rho_{sol}:0,4$ και $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$. Μετά τον Ιούλιο κατά φθίνουσα σειρά σε τιμές ωρών διάρκειας ακολουθούν ο Αύγουστος, ο Ιούνιος, ο Σεπτέμβριος, ο Μάιος και στο τέλος έρχονται ο Απρίλιος και ο Οκτώβριος κατά περιπτώσεις. Η μικρότερη από όλες διάρκειες αλλαγμένων ιδιοτήτων εντοπίζεται τον Οκτώβριο, όπου για αρχική $\rho_{sol}:0,4$ και $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ η αλλαγή διαρκεί μόνο για 1 ώρα και ένα τέταρτο κατά τις μεσημεριανές ώρες (12:00-13:15). Επιπλέον, οι

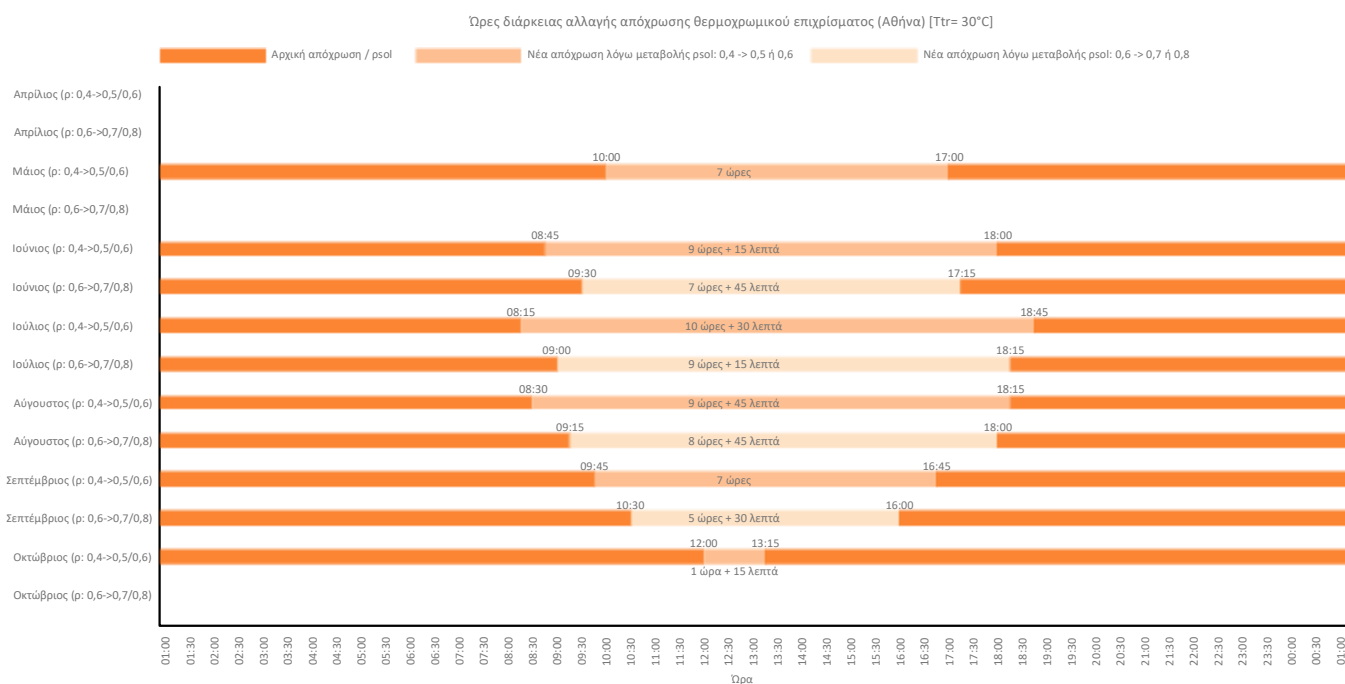
περιπτώσεις με αρχική ανακλαστικότητα $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ εμφανίζουν μεγαλύτερες διάρκειες αλλαγής και ακολουθούν με φθίνουσα σειρά οι περιπτώσεις: αρχική $\rho_{\text{sol}}:0,6$ και $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$, αρχική $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$ και αρχική $\rho_{\text{sol}}:0,6$ και $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 9: Ώρες διάρκειας αλλαγής απόχρωσης θερμοχρωμικού υλικού				
Μήνας	Θερμοκρασία μετάβασης: 25°C		Θερμοκρασία μετάβασης: 30°C	
	$\rho_{\text{sol}}: 0,4 \rightarrow 0,5$ / $\rho_{\text{sol}}: 0,4 \rightarrow 0,6$	$\rho_{\text{sol}}: 0,6 \rightarrow 0,7$ / $\rho_{\text{sol}}: 0,6 \rightarrow 0,8$	$\rho_{\text{sol}}: 0,4 \rightarrow 0,5$ / $\rho_{\text{sol}}: 0,4 \rightarrow 0,6$	$\rho_{\text{sol}}: 0,6 \rightarrow 0,7$ / $\rho_{\text{sol}}: 0,6 \rightarrow 0,8$
Απρίλιος	10:45-15:15 (4:30 ώρες)	-	-	-
Μάιος	09:00-17:45 (8:45 ώρες)	10:30-16:00 (5:30 ώρες)	10:00-17:00 (7 ώρες)	-
Ιούνιος	07:30-19:15 (11:45 ώρες)	08:00-18:45 (10:45 ώρες)	08:45-18:00 (9:15 ώρες)	09:30-17:15 (7:45 ώρες)
Ιούλιος	07:15-21:00 (13:45 ώρες)	07:30-20:45 (13:15 ώρες)	08:15-18:45 (10:30 ώρες)	09:00-18:15 (9:15 ώρες)
Αύγουστος	07:15-20:45 (13:30 ώρες)	07:30-20:45 (13:15 ώρες)	08:30-18:15 (9:45 ώρες)	09:15-18:00 (8:45 ώρες)
Σεπτέμβριος	08:30-18:15 (9:45 ώρες)	09:00-18:00 (9 ώρες)	09:45-16:45 (7 ώρες)	10:30-16:00 (5:30 ώρες)
Οκτώβριος	10:00-15:45 (5:45 ώρες)	11:00-15:00 (4 ώρες)	12:00-13:15 (1:15 ώρες)	-

Πίνακας 9: Ώρες διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού υλικού για όλα τα ισχύοντα σενάρια (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 14: Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 25°C , στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 15: Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 30°C, στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

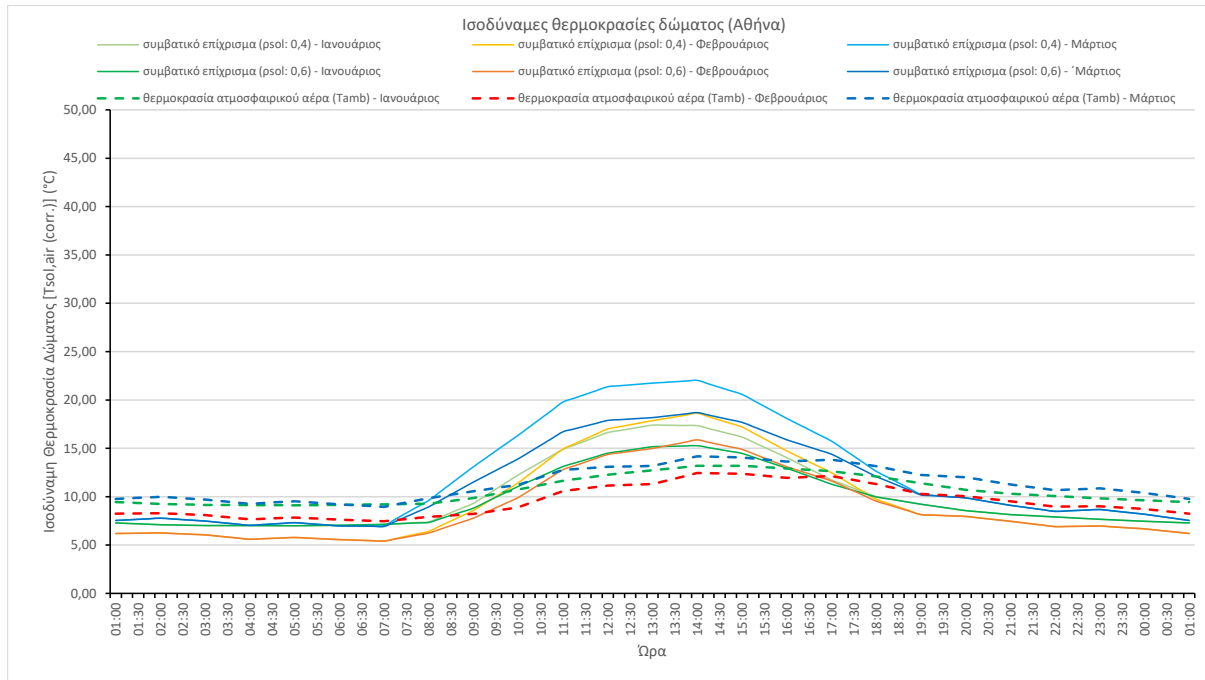
Η χρονική διάρκεια ισχύος κατά την οποία παρατηρείται η αλλαγή απόχρωσης και ανακλαστικότητας του θερμοχρωμικού επιχρίσματος μέσα στο έτος, φαίνεται να συμβαίνει κυρίως τους θερινούς μήνες και ελάχιστα από τα μέσα μέχρι το τέλος της άνοιξης και από την αρχή μέχρι τα μέσα του φθινοπώρου. Το θερμοχρωμικό επίχρισμα κατά τη χειμερινή περίοδο δεν έχει πρακτικά διαφορά με το συμβατικό, διότι η ισοδύναμη θερμοκρασία δεν φτάνει ποτέ στην τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης, προκειμένου να αλλάξουν οι ιδιότητές του. Ωστόσο παραμένει υπό διερεύνηση η σύγκριση της απόδοσης που πρόκειται να παρατηρηθεί μεταξύ των δυο βασικών τιμών ανακλαστικότητας ρ_{sol} (0,4 και 0,6) καθώς και το κατά πόσο μικρό ή μεγάλο βαθμό η απόδοση του θερμοχρωμικού επιχρίσματος τους θερινούς μήνες, επηρεάζει τη συνολική ετήσια απόδοση του υλικού σε σχέση με τα συμβατικά επιχρίσματα, για τις διαφορετικές τιμές ανακλαστικότητας που συναντώνται σε όλα τα αναφερόμενα σενάρια.

4.2 Επίδραση εφαρμογής του υλικού στη θερμική συμπεριφορά του δώματος

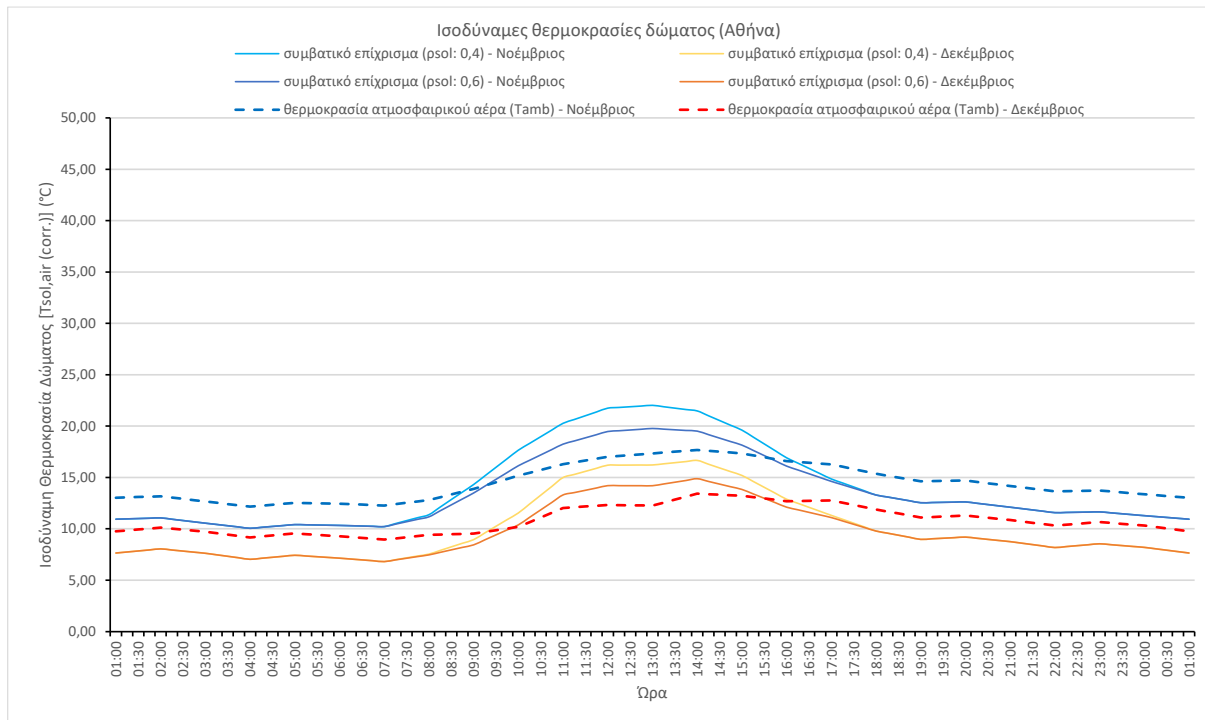
Η έκθεση του δώματος και κατ'επέκταση του υλικού επιχρίσματος στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι φυσικό να επηρεάζει την θερμοκρασία του υλικού. Η χρήση της ισοδύναμης θερμοκρασίας δώματος ($T_{sol,air}$) στην προκειμένη περίπτωση αναλαμβάνει το ρόλο ως την τιμή θερμοκρασίας που αντιπροσωπεύει την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος στο υλικό. Όλες οι τιμές, εφόσον πρόκειται για πειραματικά δεδομένα, αφορούν την κατασκευή ιδεατού δώματος με μοναδιαία επιφάνεια σε θεωρητικό κτίριο κατοικίας, εφαρμόζοντας στο εξωτερικό περιβάλλον κλιματικά δεδομένα της πόλης της Αθήνας. Για την ανάλυση και τη διερεύνηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς του υλικού που εφαρμόζεται στην κατασκευή του δώματος σε ετήσια βάση, κρίνεται χρήσιμος ο διαχωρισμός του έτους σε τρεις διακριτές περιόδους, σύμφωνα με ενδεικτικές-γενικές τάσεις ανάγκης και αξιοποίησης ενέργειας για θέρμανση ή ψύξη στα κτίρια της πόλης της Αθήνας: 1) περίοδος θέρμανσης, όπου συμπεριλαμβάνονται οι μήνες Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος, Οκτώβριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος κατά τους οποίους η οικιακή χρήση ενέργειας γίνεται κυρίως για την κάλυψη θέρμανσης, 2) περίοδος μετάβασης, όπου συμπεριλαμβάνονται οι μήνες: Μάιος και Σεπτέμβριος, κατά τους οποίους θεωρείται συνήθως αποδεκτή η εξωτερική ατμοσφαιρική θερμοκρασία, ακόμα και όταν αυτή έχει αισθητή διαφορά σε σύγκριση με την επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου και δεν κρίνεται η απαραίτητη η ενεργειακή κατανάλωση ούτε για θέρμανση ούτε για ψύξη, 3) περίοδος ψύξης, όπου συμπεριλαμβάνονται οι μήνες: Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος κατά τους οποίους γενικά παρατηρούνται υψηλές ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες και έντονη ανάγκη οικιακής ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη.

4.2.1 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο θέρμανσης

Ξεκινώντας από την περίοδο θέρμανσης και πιο συγκεκριμένα για τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο (βλ. εικ. 16, 17), όπου δεν παρατηρείται διαφορά μεταξύ συμβατικού και θερμοχρωμικού επιχρίσματος, εξετάζονται μόνο δυο περιπτώσεις, αυτές που το υλικό έχει μόνιμα σταθερή ανακλαστικότητα αλλά με δυο διαφορετικές τιμές: $\rho_{sol}=0,4$ και $\rho_{sol}=0,6$. Πιο συγκεκριμένα, τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο (βλ. εικ. 16), οι ισοδύναμες θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν καμία από τις δυο θεωρούμενες θερμοκρασίες μετάβασης (25 και 30°C) με τον Μάρτιο να εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες από τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Οι ώρες όπου οι τιμές της $T_{sol,air}$ ξεπερνούν τις τιμές ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (T_{amb}) είναι ελαφρώς διαφορετικές από μήνα σε μήνα, όπου τον Ιανουάριο παρατηρείται από τις 08:30 μέχρι τις 16:30, τον Φεβρουάριο από τις 09:00 μέχρι τις 17:30 και τον Μάρτιο από τις 08:00 μέχρι τις 18:00. Σε μια τυπική ημέρα τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο (βλ. εικ. 17) παρατηρούνται παρόμοιες τάσεις διακύμανσης των τιμών ισοδύναμης θερμοκρασίας όπου πάλι δεν φτάνουν τις θερμοκρασίες μετάβασης, με τις ισοδύναμες θερμοκρασίες του Νοεμβρίου να είναι αισθητά υψηλότερες από του Δεκεμβρίου καθώς επίσης και για τους δυο μήνες, οι τιμές της $T_{sol,air}$ για $\rho_{sol}=0,4$ να είναι ελαφρώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες για $\rho_{sol}=0,6$ και περίπου από τις 08:30 έως και τις 16:30 για ένα οκτάωρο εντός της ημέρας, να ξεπερνούν και τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα (T_{amb}). Μια επιπλέον γενική παρατήρηση και για τις επόμενες ενότητες, είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις τόσο συμβατικών όσο και θερμοχρωμικών επιχρισμάτων και σε όλους τους μήνες του έτους, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ παρατηρούνται τις μεσημεριανές ώρες της ημέρας κατά προσέγγιση από τις 12:00 έως τις 14:00, ενώ οι ελάχιστες σε χρονικό διάστημα από τις ύστερες νυχτερινές έως τις πρώτες πρωινές ώρες, κατά προσέγγιση από τις 03:00 έως τις 05:00.

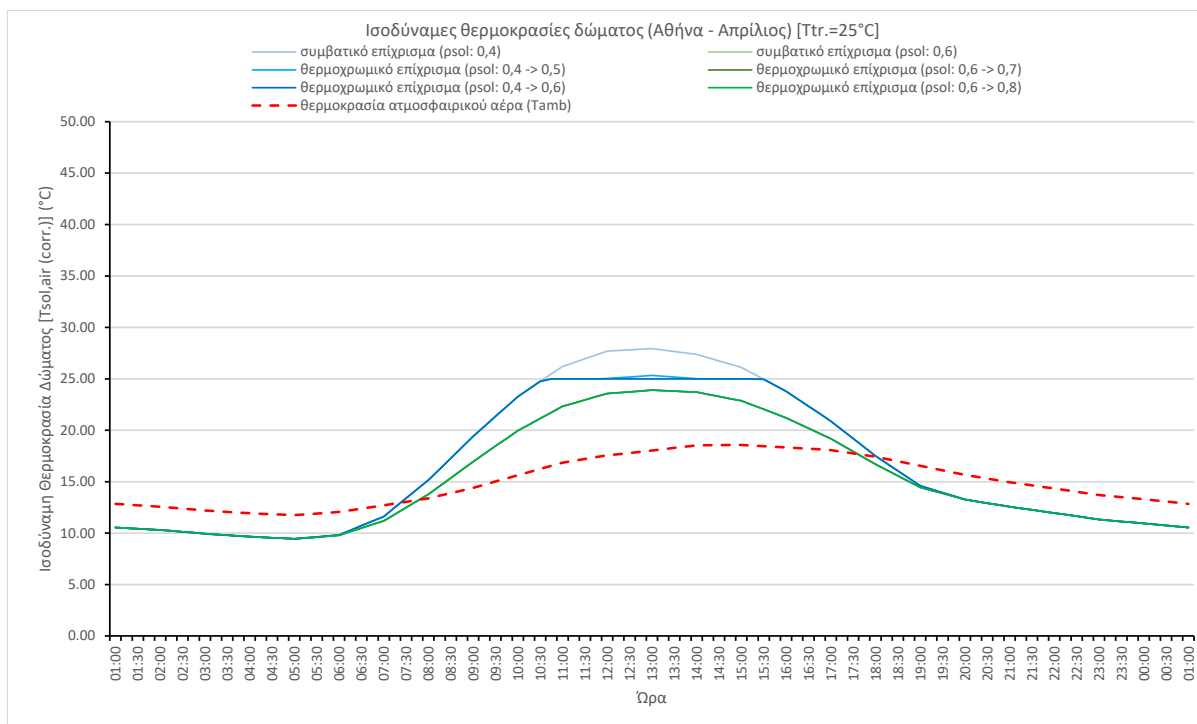


Εικόνα 16: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

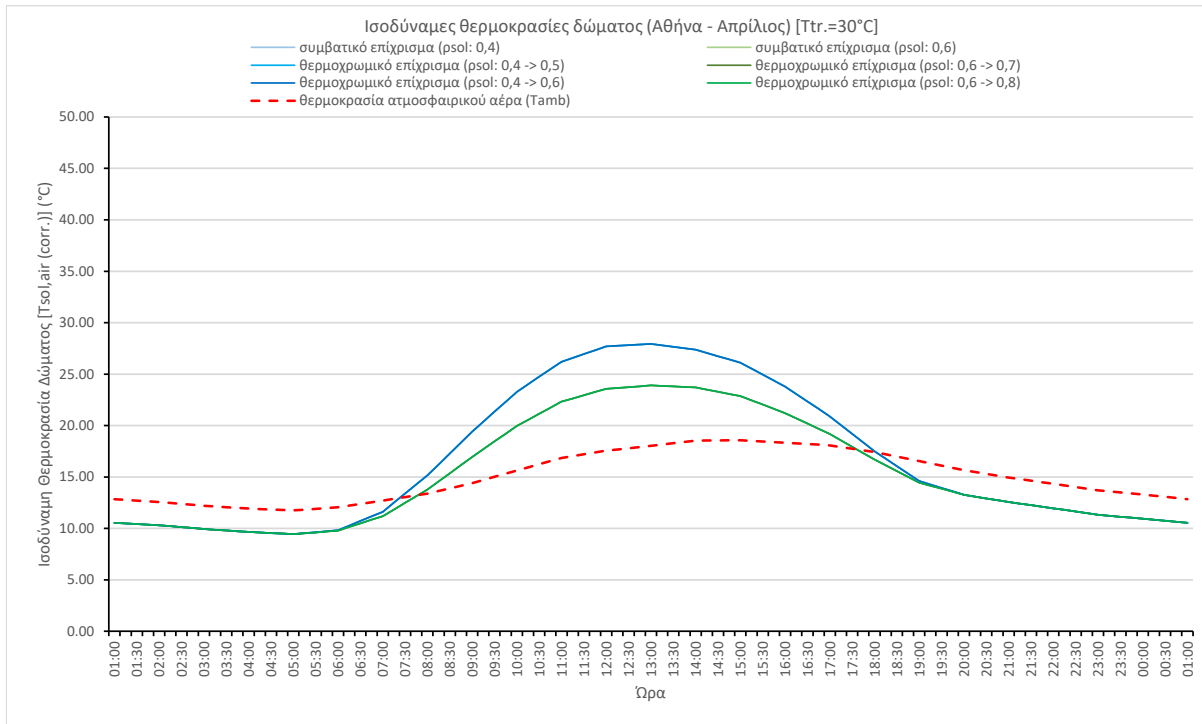


Εικόνα 17: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Κατά το μήνα Απρίλιο εξετάζουμε δυο περιπτώσεις σχετικά με τις τιμές της $T_{sol,air}$. Πρώτη την περίπτωση όπου εφαρμόζονται τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με T_{tr} στους 25°C (βλ. εικ. 18), όπου η ενεργοποίηση όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, γίνεται μόνο στα επιχρίσματα με αλλαγή ανακλαστικότητας από $\rho_{sol}:0,4$ σε $\rho_{sol}:0,5$ και από $\rho_{sol}:0,4$ σε $\rho_{sol}:0,6$ με τις $T_{sol,air}$ να παραμένουν σταθερά ή πολύ κοντά στους 25°C κατά τις ώρες αλλαγής καθώς η $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4$ φτάνει οριακά μέχρι τους $27,5^{\circ}\text{C}$. Για τα επιχρίσματα (συμβατικό και θερμοχρωμικά) με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, η $T_{sol,air}$ δεν φτάνει σε καμία στιγμή της ημέρας τους 25°C , οπότε δεν γίνεται και καμία θερμοχρωμική μετάβαση. Όσον αφορά την περίπτωση όπου η T_{tr} είναι στους 30°C (βλ. εικ. 19), οι τιμές της $T_{sol,air}$ των συμβατικών και θερμοχρωμικών επιχρίσματος που έχουν την ίδια αρχική ή σταθερή ανακλαστικότητα μεταξύ τους ($\rho_{sol}:0,4$ και $\rho_{sol}:0,6$ αντίστοιχα) παραμένουν ταυτόσημες όλο το 24ωρο και δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στα θερμοχρωμικά επιχρίσματα, εφόσον οι ισοδύναμες θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν το σημείο μετάβασης των 30°C . Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Απριλίου από τις 07:30 μέχρι τις 18:15, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 08:15 μέχρι τις 17:45.

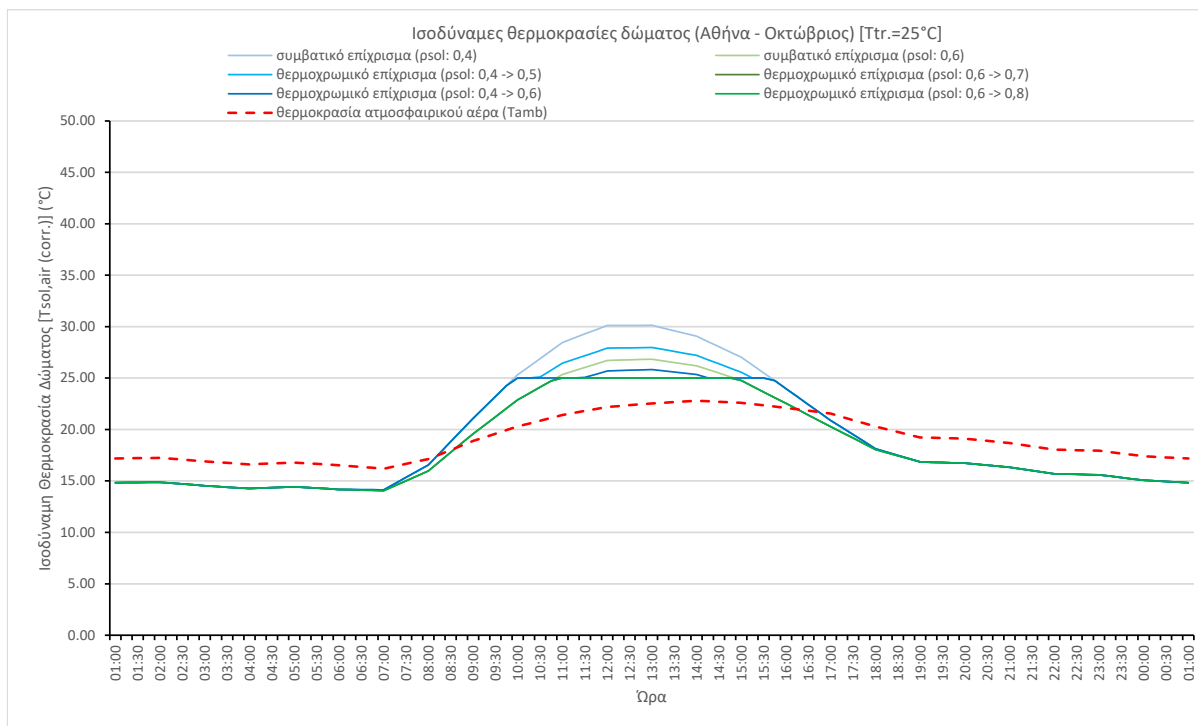


Εικόνα 18: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Απρίλιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

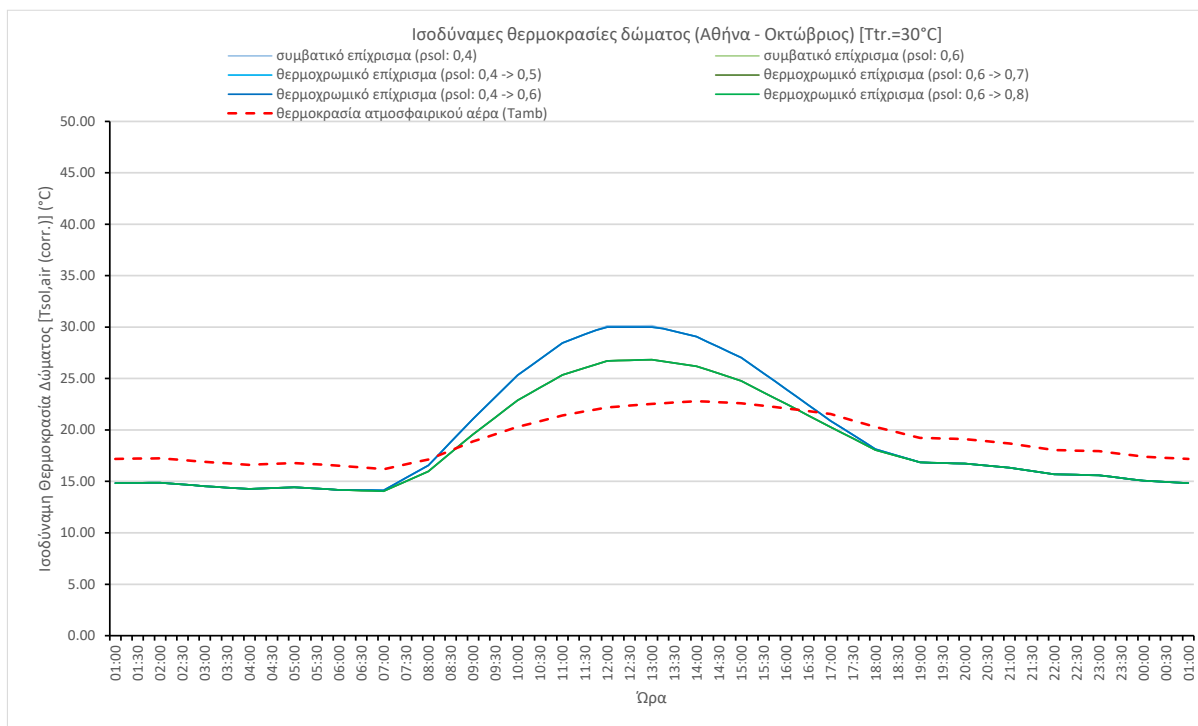


Εικόνα 19: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Απρίλιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Κατά το μήνα Οκτώβριο, όσον αφορά τα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 20), γίνεται εμφανές ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση, πιο συγκεκριμένα για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από 2,1-4,3°C χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά 1,8°C χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 21), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται μόνο στα επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,4$, με τις μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ να έχουν την πολύ μικρή διαφορά των 0,13°C χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$, η οποία φαίνεται ανεπαίσθητα στο διάγραμμα. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ φτάνουν μέχρι τους 26,8°C οπότε δεν ξεπερνούν τους 30°C που απαιτούνται για τη θερμοχρωμική μετάβαση. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Οκτωβρίου από τις 08:15 μέχρι τις 16:45, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 08:45 μέχρι τις 16:15.



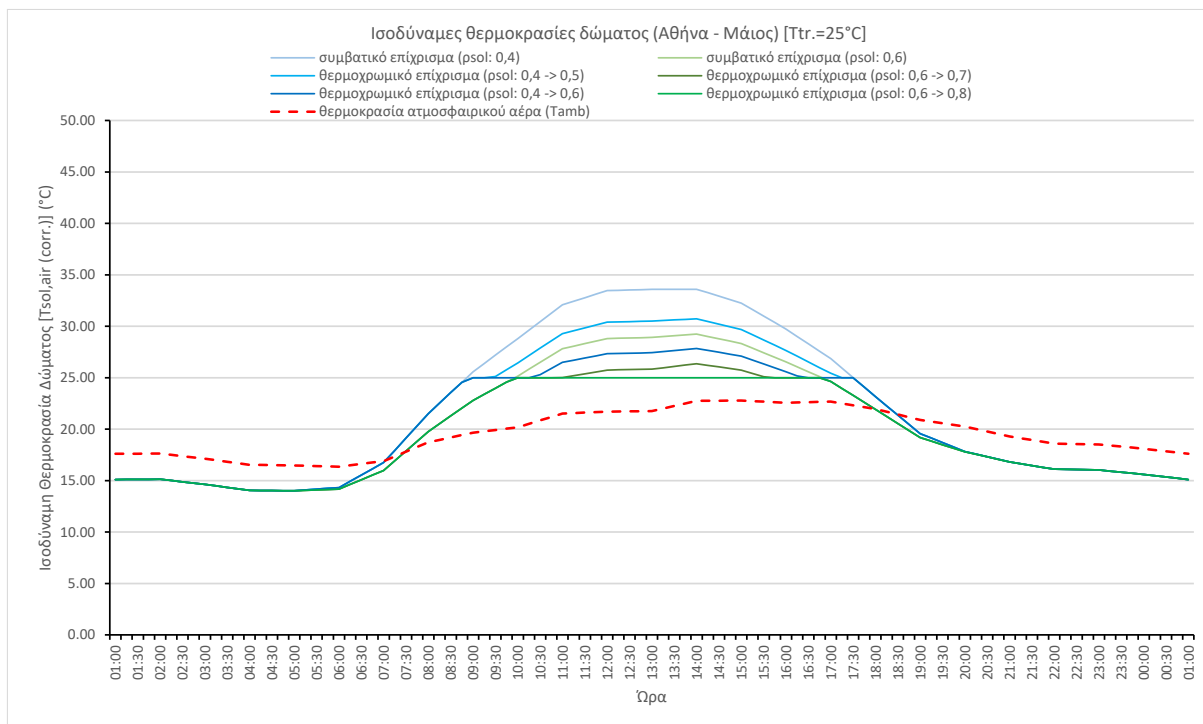
Εικόνα 20: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Οκτώβριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



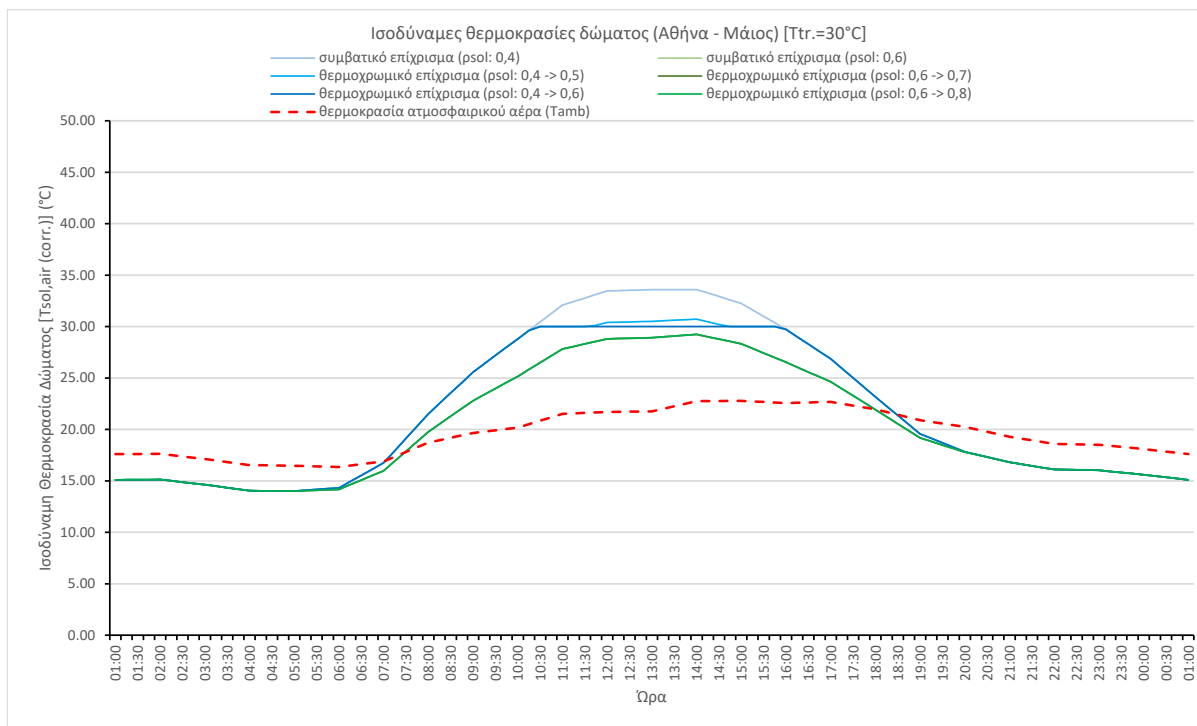
Εικόνα 21: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Οκτώβριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

4.2.2 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο μετάβασης

Στην περίοδο μετάβασης ανήκουν δύο μήνες του έτους, ο Μάιος και ο Σεπτέμβριος. Κατά το Μάιο και στα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 22) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση, καθώς για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3-6^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3-4,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 23), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται μόνο στα επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,4$, με τις μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ να έχουν διαφορά από $3-3,6^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ φτάνουν μέχρι τους $29,2^{\circ}\text{C}$ οπότε δεν ξεπερνούν τους 30°C που απαιτούνται για τη θερμοχρωμική μετάβαση. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Μαΐου από τις 07:15 μέχρι τις 18:15, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 07:30 μέχρι τις 18:00.

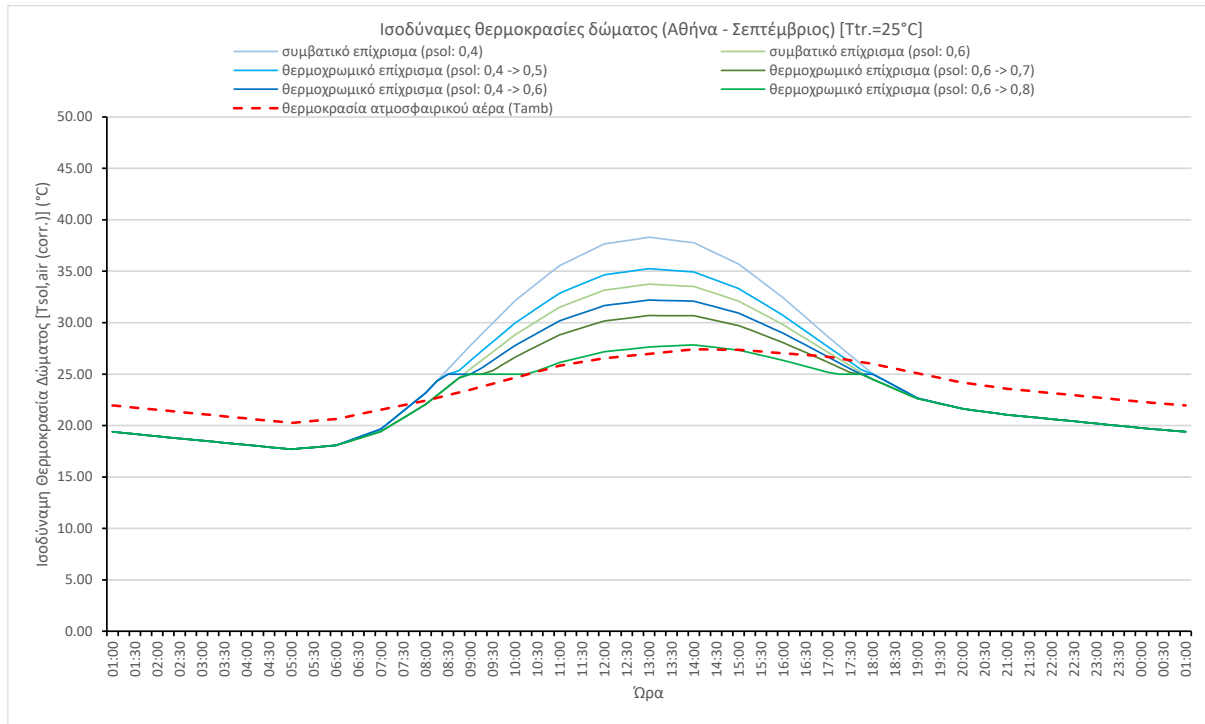


Εικόνα 22: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Μάιο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

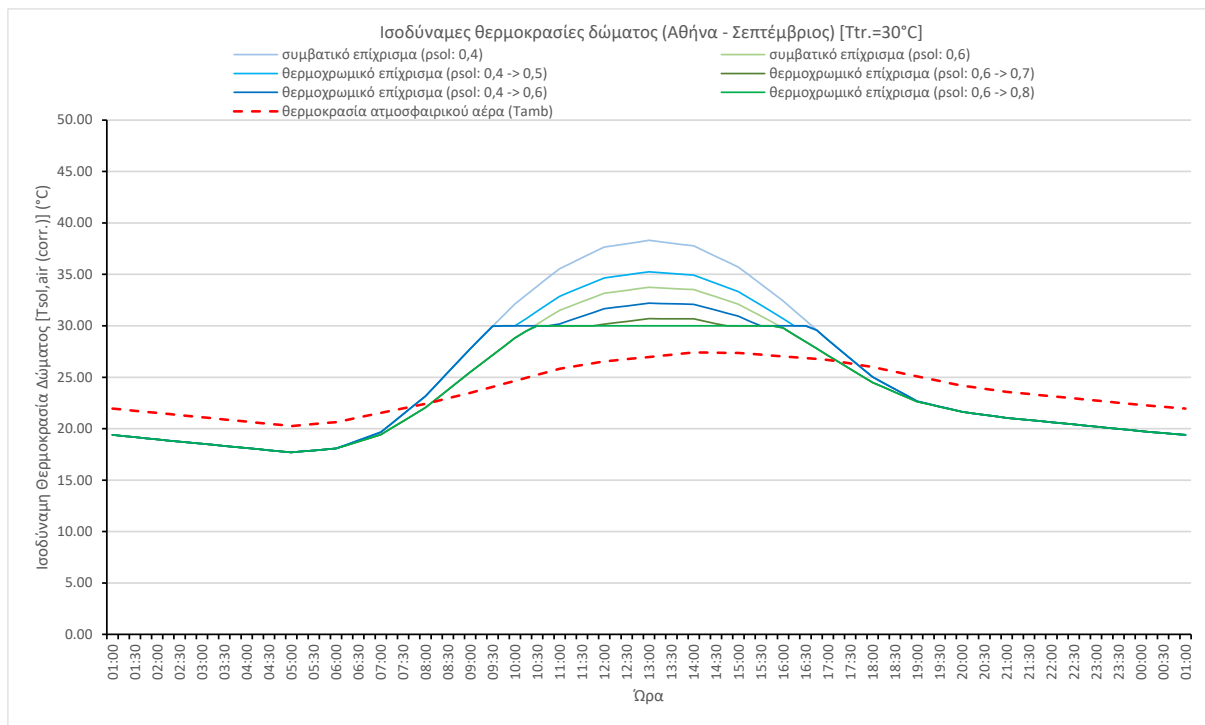


Εικόνα 23: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Μάιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Περνώντας στον δεύτερο από τους δυο μήνες μετάβασης, το μήνα Σεπτέμβριο και πιο συγκεκριμένα στα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 24) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση, καθώς για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από 3-6,1°C χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά επίσης από 3-6,1°C χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 25), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται πάλι τόσο στα επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,4$ όσο και στα επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,6$. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ έχουν διαφορά από 3-6,1°C χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ έχουν διαφορά από 3-3,7°C χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Σεπτεμβρίου από τις 07:45 μέχρι τις 17:30, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 08:15 μέχρι τις 16:45-15:00.



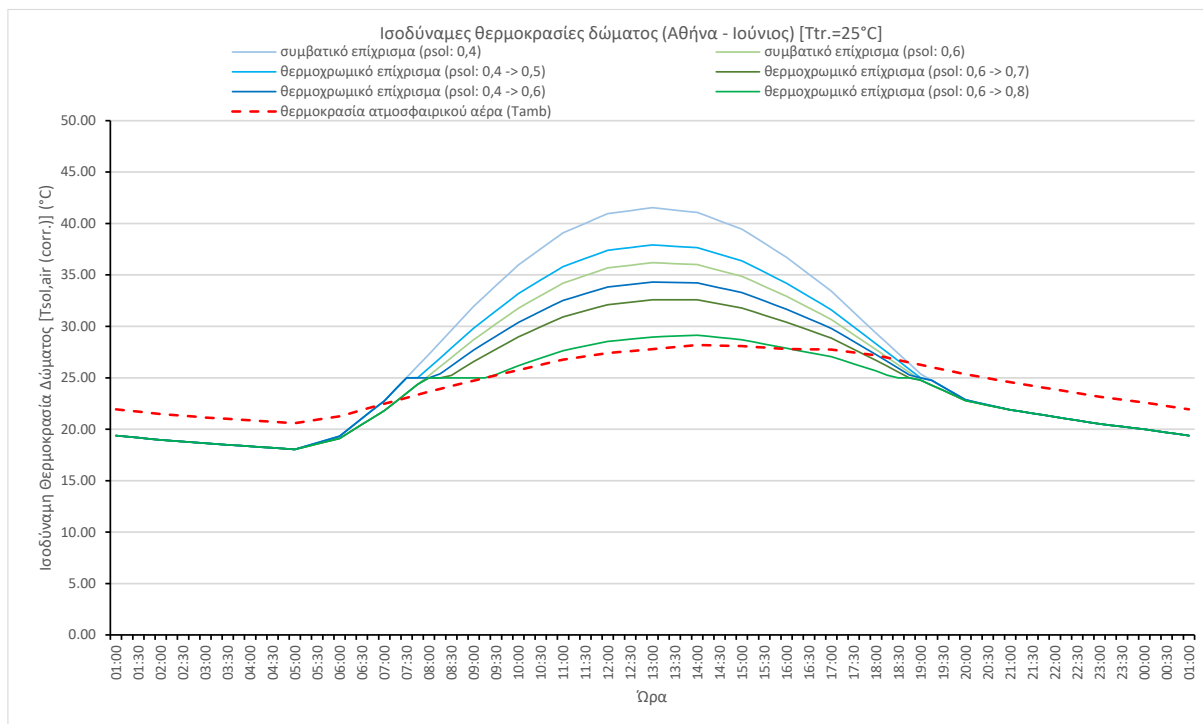
Εικόνα 24: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Σεπτέμβριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



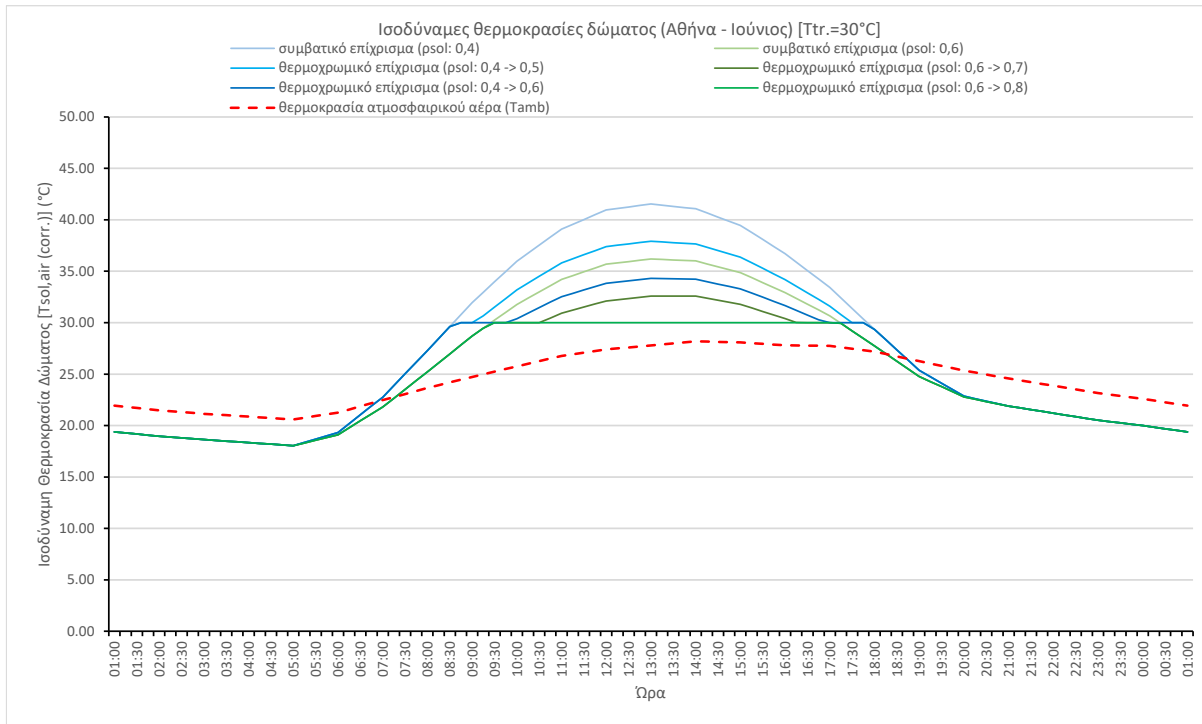
Εικόνα 25: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Σεπτέμβριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

4.2.3 Διακύμανση ισοδύναμης θερμοκρασίας σε περίοδο ψύξης

Στην περίοδο ψύξης κατηγοριοποιούνται τρεις μήνες του έτους: ο Ιούνιος, ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Τον Ιούνιο και πιο συγκεκριμένα στα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 26) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3,6-7,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά επίσης από $3,6-7,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 27), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται πάλι σε όλες τις περιπτώσεις. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ έχουν διαφορά από $3,6-7,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ έχουν διαφορά από $3,6-6,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Ιουνίου από τις 07:00 μέχρι τις 18:15-18:45, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 07:30 μέχρι τις 17:45-18:30.

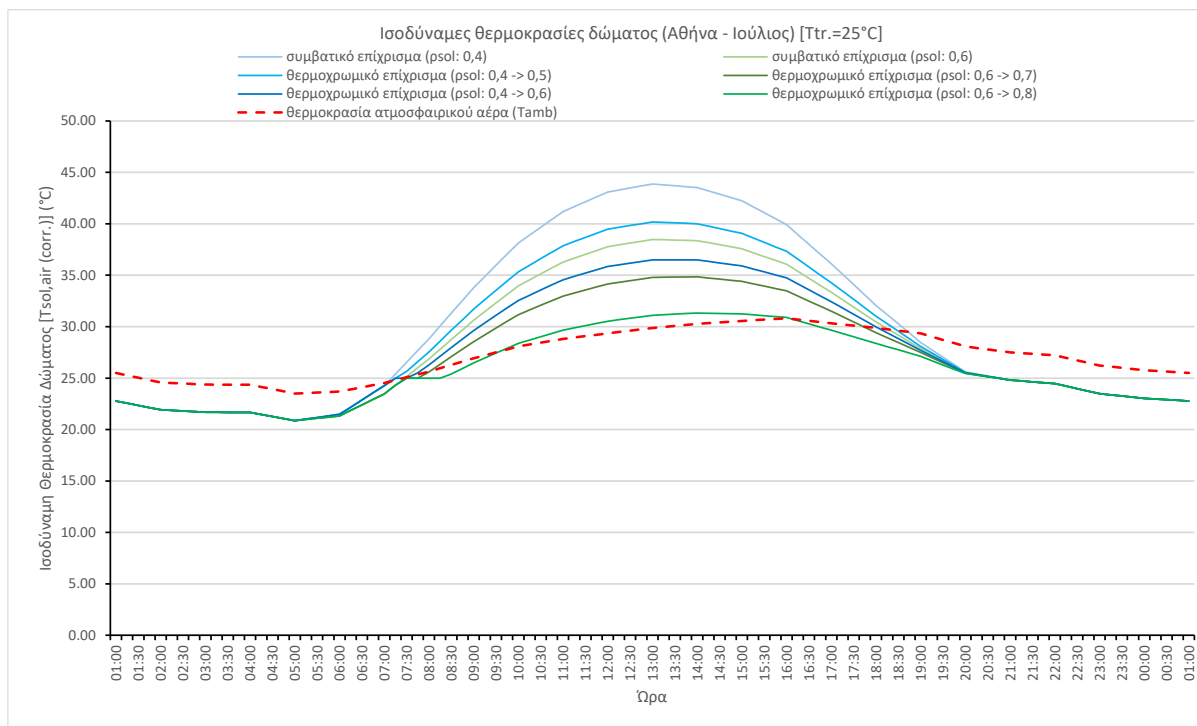


Εικόνα 26: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούνιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

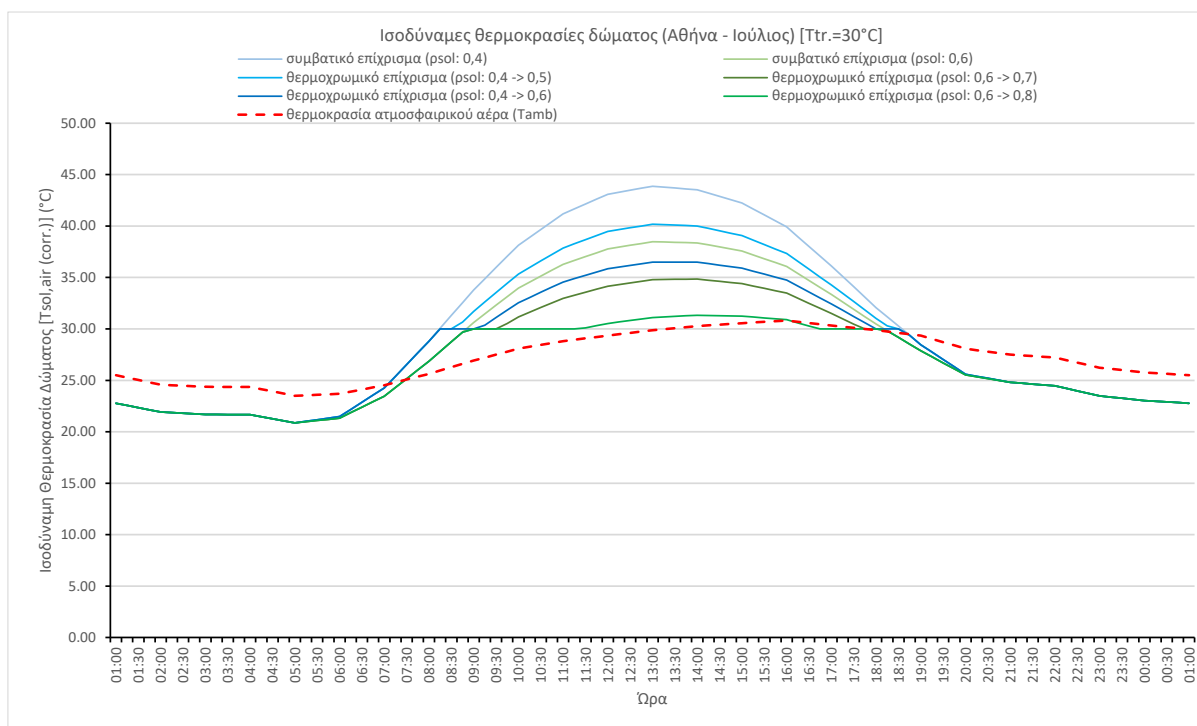


Εικόνα 27: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούνιο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Τον Ιούλιο, στα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 28) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3,7-7,4^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3,6-7,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 29), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται πάλι σε όλες τις περιπτώσεις. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ έχουν διαφορά από $3,7-7,4^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ έχουν διαφορά από $3,6-7,2^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Ιουλίου από τις 07:15 μέχρι τις 18:30-18:45, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 07:30-09:45 μέχρι τις 16:15-18:30.

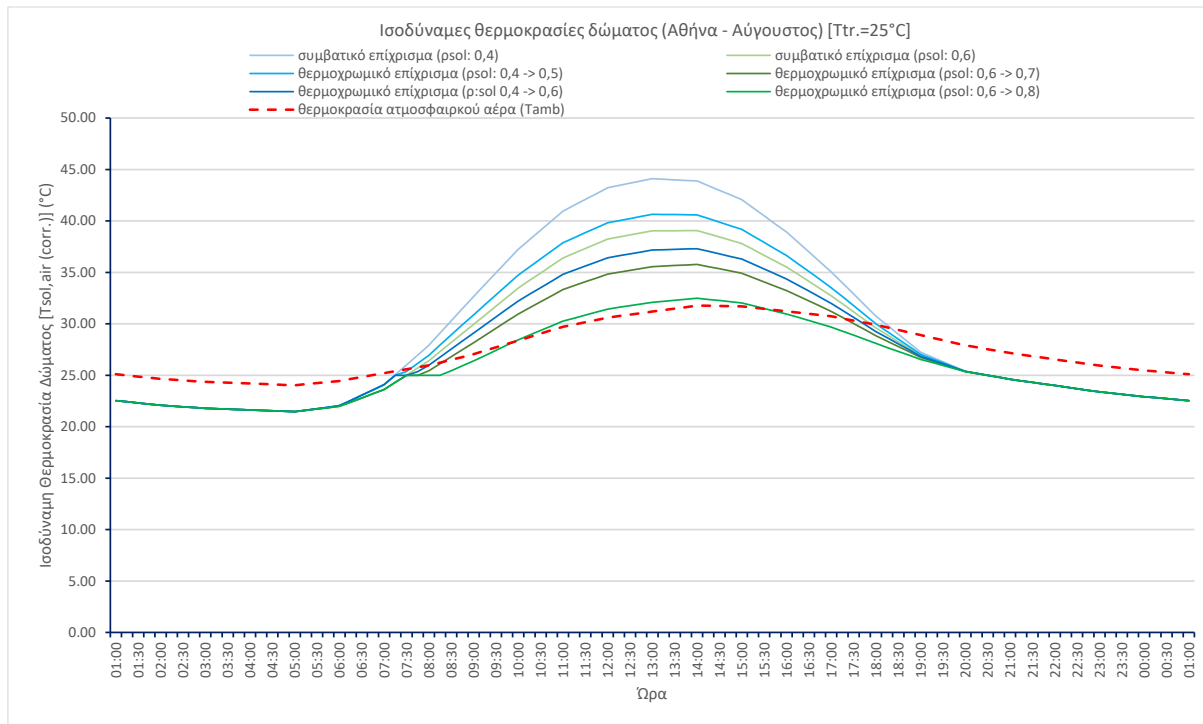


Εικόνα 28: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούλιο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

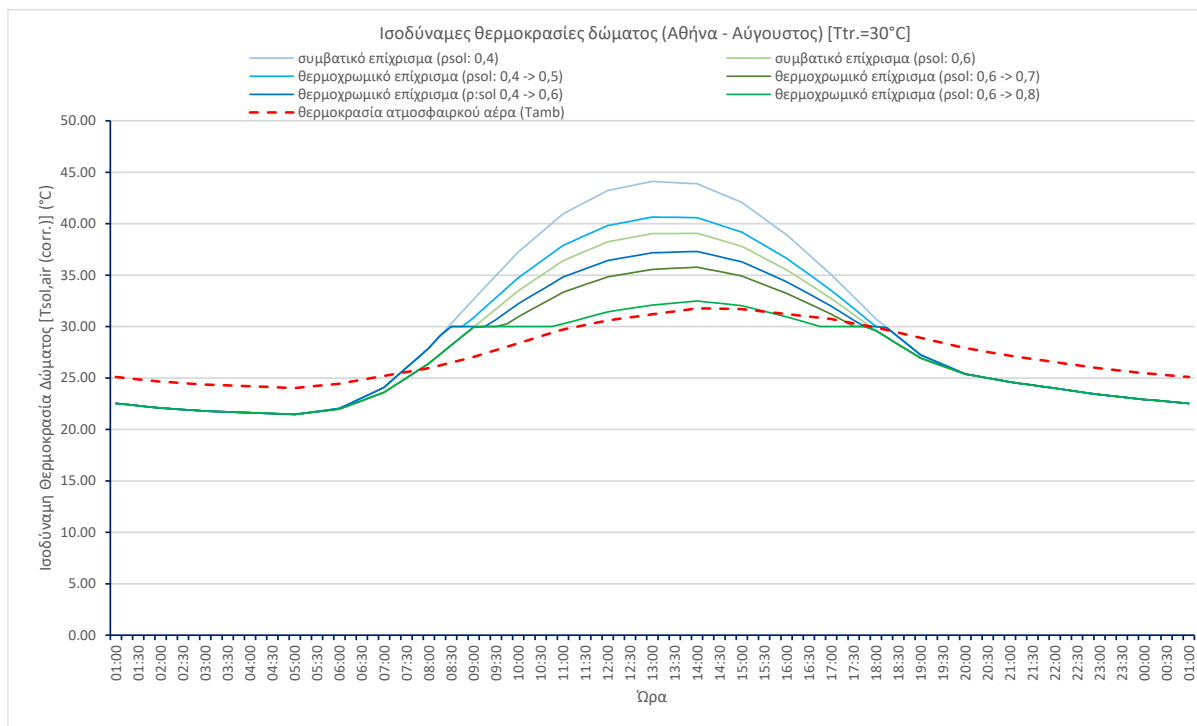


Εικόνα 29: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούλιο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Τον Αύγουστο, στα επιχρίσματα με $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 30) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχει θερμοχρωμική μετάβαση. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3,5-6,8^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη σε σχέση με την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Για τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$, οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ έχουν διαφορά από $3,3-6,6^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από την μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Στα επιχρίσματα με $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ (βλ. εικ. 31), θερμοχρωμική μετάβαση παρατηρείται πάλι σε όλες τις περιπτώσεις. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ έχουν διαφορά από $3,5-6,8^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$. Οι μέγιστες τιμές της $T_{sol,air}$ των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με αρχική $\rho_{sol}:0,6$ έχουν διαφορά από $3,3-6,6^{\circ}\text{C}$ χαμηλότερη από τη μέγιστη $T_{sol,air}$ του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$. Τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,4$ εμφανίζουν μεγαλύτερη $T_{sol,air}$ από την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (T_{amb}) του Αυγούστου από τις 07:30-08:00 μέχρι τις 17:45-18:30, ενώ τα αντίστοιχα με $\rho_{sol}:0,6$ από τις 08:00-10:00 μέχρι τις 15:45-18:00.



Εικόνα 30: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Αύγουστο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 31: Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Αύγουστο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

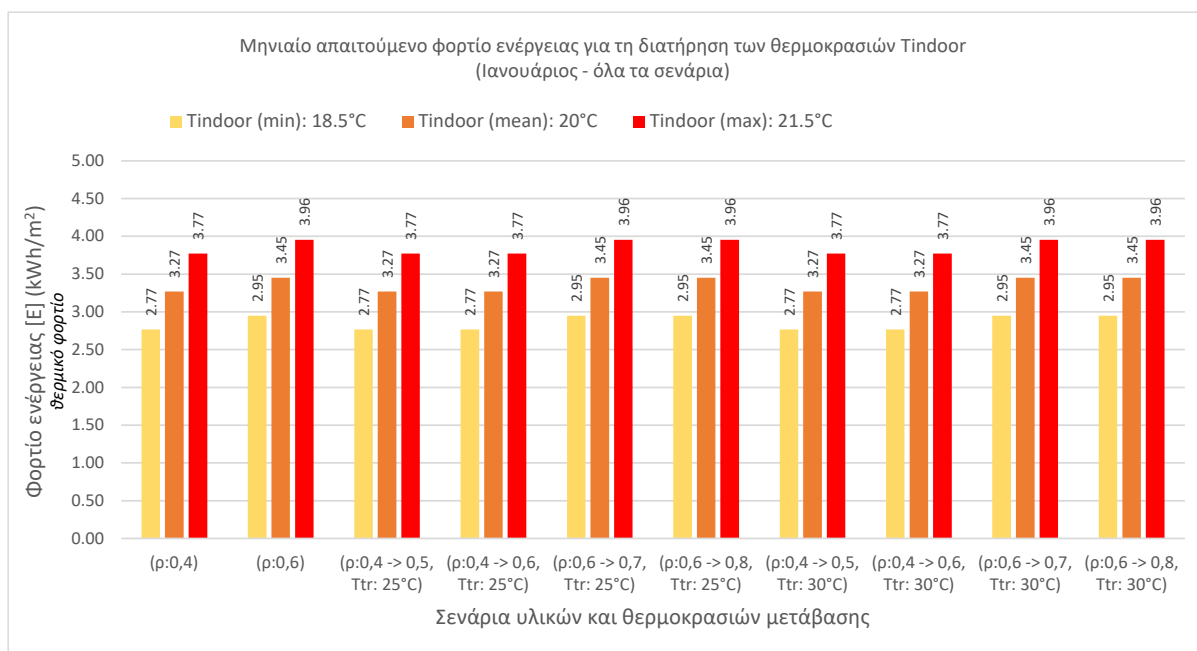
4.3 Ενεργειακή συμπεριφορά του υλικού σε σχέση με το εσωτερικό του κτιρίου

Σε αυτήν την ενότητα αναλύονται τα φορτία ενέργειας (E) που απαιτούνται για τη διατήρηση των θερμοκρασιών εσωτερικού χώρου που θεωρούνται επιθυμητές για κάθε μήνα του έτους, όπως αυτά προκύπτουν από την εφαρμογή των διαφορετικών συμβατικών και θερμοχρωμικών επιχρισμάτων. Ο αναφερόμενος εσωτερικός χώρος κατοικίας θεωρείται ότι βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κατασκευή του δώματος και η εσωτερική πλευρά των δομικών στρώσεων του δώματος θεωρείται η οροφή του εν λόγω χώρου. Κάθε μήνας του έτους χαρακτηρίζεται από τρεις επιλεγμένες τιμές επιθυμητών θερμοκρασιών εσωτερικού χώρου (T_{indoor} , ελάχιστη-min, μέση-mean και μέγιστη-max), όπως αυτές έχουν υποδειχθεί παραπάνω, στον πίνακα 7 της ενότητας 3.2. Η ενότητα 4.3 χωρίζεται σε 3 υποενότητες: η πρώτη αφορά τα ενεργειακά φορτία σε περίοδο θέρμανσης (μήνες: Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Απρίλιος, Οκτώβριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος), η δεύτερη αφορά τα ενεργειακά φορτία σε περίοδο ψύξης (μήνες: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος) και η Τρίτη υποενότητα αφορά τη σύγκριση και ανάλυση των ενεργειακών φορτίων συγκριτικά για όλο το έτος. Η περίοδος μετάβασης (μήνες: Μάιος και Σεπτέμβριος) δεν συμπεριλαμβάνεται σε αυτή την ενότητα, διότι όπως αναφέρεται παραπάνω και στην ενότητα 4.2, η εξωτερική ατμοσφαιρική θερμοκρασία θεωρείται συνήθως αποδεκτή για τη θερμική άνεση ακόμα και όταν αυτή έχει αισθητή διαφορά σε σύγκριση με την επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου που έχει οριστεί και δεν κρίνεται απαραίτητη η ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη. Η μονάδα μέτρησης του απαιτούμενου ενεργειακού φορτίου που χρησιμοποιείται στα διαγράμματα της ενότητας είναι η kWh/m^2 , η οποία εκφράζει τις κιλοβατώρες που απαιτούνται για τη διατήρηση της T_{indoor} στο χρονικό διάστημα ολόκληρου του εκάστοτε μήνα ανά μονάδα επιφάνειας του δώματος, έχοντας λάβει υπόψη τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται ολόκληρο το εικοσιτετράωρο στην ατμόσφαιρα και στα επιχρίσματα του δώματος. Οι θετικές τιμές σε αποχρώσεις του κίτρινου, κόκκινου και πορτοκαλί εκφράζουν ενεργειακό φορτίο για θέρμανση (heating load), ενώ οι αρνητικές τιμές σε αποχρώσεις του μπλε εκφράζουν ενεργειακό φορτίο για ψύξη (cooling load). Οι τιμές σε αποχρώσεις του πρασίνου στο τελευταίο συγκεντρωτικό διάγραμμα του έτους στην υποενότητα 4.3.3, εκφράζουν αθροιστικό ενεργειακό φορτίο για θέρμανση και ψύξη μαζί.

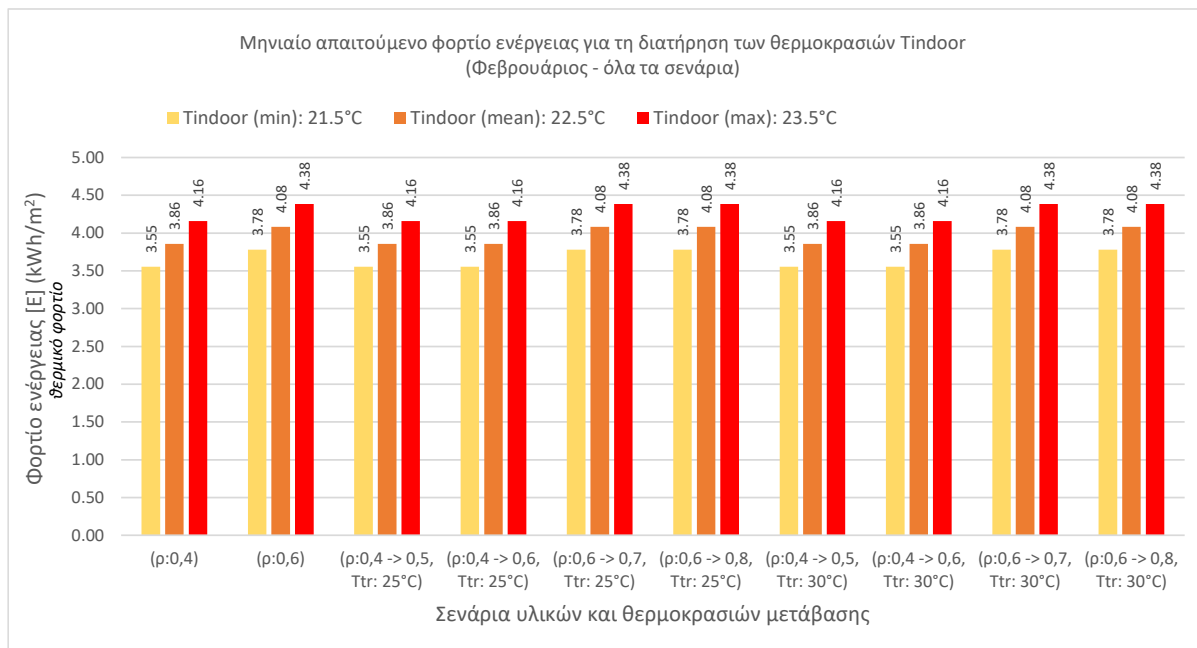
4.3.1 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο σε περίοδο θέρμανσης

Ξεκινώντας πάλι από την περίοδο θέρμανσης, στους μήνες όπου δεν συμβαίνει καθόλου θερμοχρωμική μετάβαση του υλικού (Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος), κάθε διάγραμμα ενεργειακού φορτίου-σεναρίου υλικών (βλ. εικ. 32-36), έχει δυο σετ τιμών, ένα για σταθερή ή αρχική $\rho_{sol}:0,4$ και ένα για σταθερή ή αρχική $\rho_{sol}:0,6$, με τρεις τιμές ενεργειακού φορτίου στο καθένα, για T_{indoor} (min, mean και max). Καθώς η θερμοχρωμική μετάβαση δεν συμβαίνει σε καμία περίπτωση στους εν λόγω μήνες, δεν υπάρχει διαφορά στα ενεργειακά φορτία, όταν έχω για παράδειγμα συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{sol}:0,4$, ή θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ ή θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$. Ωστόσο κρίνεται σημαντική η απεικόνιση όλων των σεναρίων στα διαγράμματα, διότι σε επίπεδο ολόκληρου του έτους, υπάρχει η πιθανότητα να εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά ως προς τα απαιτούμενα φορτία ενέργειας. Επίσης, τα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία για όλους τους μήνες χωρίς θερμοχρωμική μετάβαση είναι θερμικά φορτία και παρατηρείται ότι αυτά έχουν πάντα μικρότερες τιμές (kWh/m^2) στα σενάρια με επιχρίσματα σταθερής ή αρχικής $\rho_{sol}:0,4$ σε σύγκριση με όσα έχουν σταθερή ή αρχική $\rho_{sol}:0,6$, το οποίο είναι λογικό διότι η μικρότερη τιμή ανακλαστικότητας του επιχρίσματος επιτρέπει αντίστροφα μεγαλύτερη απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως εισέρχονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας εντός του κτιρίου και ο εσωτερικός χώρος χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να θερμανθεί από την περίπτωση που θα είχαμε μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο δώμα. Επιπλέον, σε όλα τα σενάρια, το θερμικό φορτίο που απαιτείται για τη διατήρηση της $T_{indoor(min)}$ είναι πάντα μικρότερο από το αντίστοιχο που χρειάζεται για τη διατήρηση της $T_{indoor(mean)}$, που με τη σειρά του είναι μικρότερο από το θερμικό φορτίο που απαιτείται για τη διατήρηση της $T_{indoor(max)}$. Αυτό συμβαίνει, επειδή όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία χώρου που επιθυμούμε να διατηρηθεί, τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για θέρμανση του χώρου, γεγονός το οποίο παρακάτω στην περίοδο ψύξης εκδηλώνεται διαφορετικά. Η μικρότερη τιμή απαιτούμενου μηνιαίου θερμικού φορτίου για διατήρηση της $T_{indoor(min)}$ εντοπίζεται το Νοέμβριο ($E=2,23 kWh/m^2$) για $T_{indoor(min)}: 21^{\circ}C$ και για τα επιχρίσματα με σταθερή ή αρχική $\rho_{sol}:0,4$. Η μεγαλύτερη τιμή αντίστοιχα εντοπίζεται το Φεβρουάριο ($E=3,78 kWh/m^2$) για $T_{indoor(min)}: 21,5^{\circ}C$ και για τα επιχρίσματα με σταθερή ή αρχική $\rho_{sol}:0,6$. Όσον αφορά τη διατήρηση της $T_{indoor(mean)}$, το ελάχιστο θερμικό φορτίο παρατηρείται πάλι το μήνα Νοέμβριο για $\rho_{sol}:0,4$ και $T_{indoor(mean)}: 22,5^{\circ}C$ με τιμή: $E=2,72 kWh/m^2$, ενώ το μέγιστο πάλι το Φεβρουάριο για $\rho_{sol}:0,6$ και $T_{indoor(mean)}: 22,5^{\circ}C$ με τιμή $E=4,08$

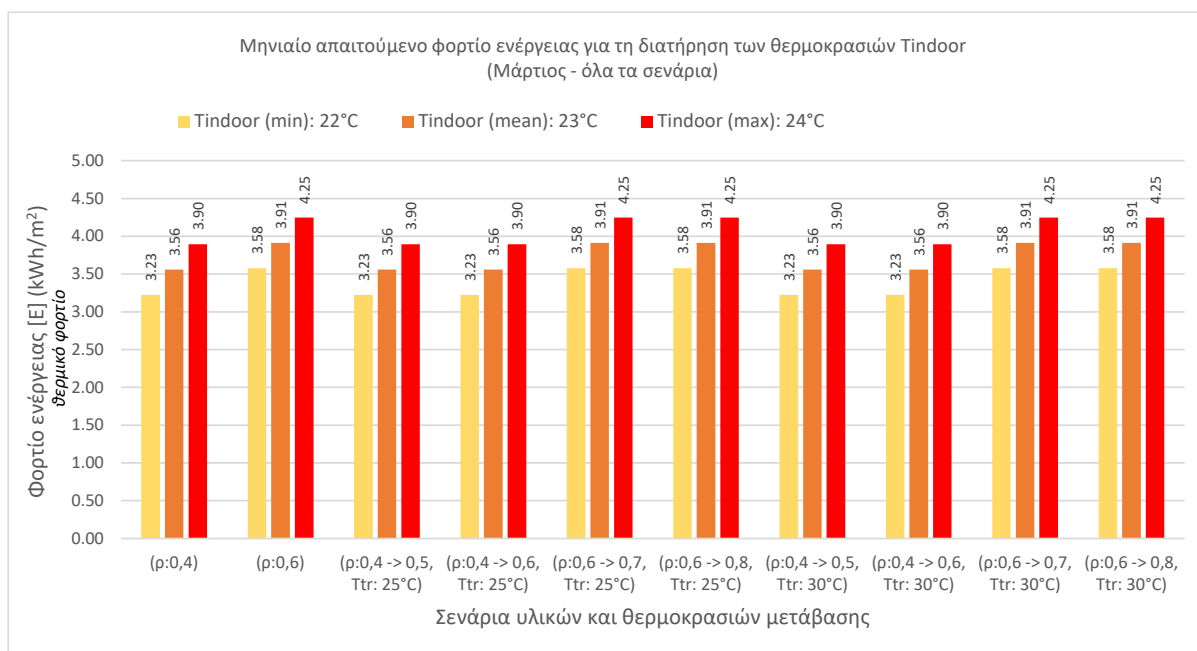
kWh/m². Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που το Νοέμβριο και το Φεβρουάριο έχει τεθεί ίδια τιμή για την $T_{\text{indoor(average)}}: 22,5^{\circ}\text{C}$, υπάρχει σημαντική διαφορά στις τιμές του θερμικού φορτίου που απαιτείται για αυτούς τους δυο μήνες, γεγονός που οφείλεται τόσο στις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον, όσο και στις τιμές ανακλαστικότητας των επιχρισμάτων. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(max)}}$, το μικρότερο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται το Νοέμβριο ($E=3,2 \text{ kWh/m}^2$) για $T_{\text{indoor(max)}}: 24^{\circ}\text{C}$ στα επιχρίσματα με σταθερή ή αρχική $\rho_{\text{sol}}: 0,4$, ενώ η μεγαλύτερη τιμή αντίστοιχα εντοπίζεται το Φεβρουάριο ($E=4,38 \text{ kWh/m}^2$) για $T_{\text{indoor(max)}}: 23,5^{\circ}\text{C}$ και για τα επιχρίσματα με σταθερή ή αρχική $\rho_{\text{sol}}: 0,6$.



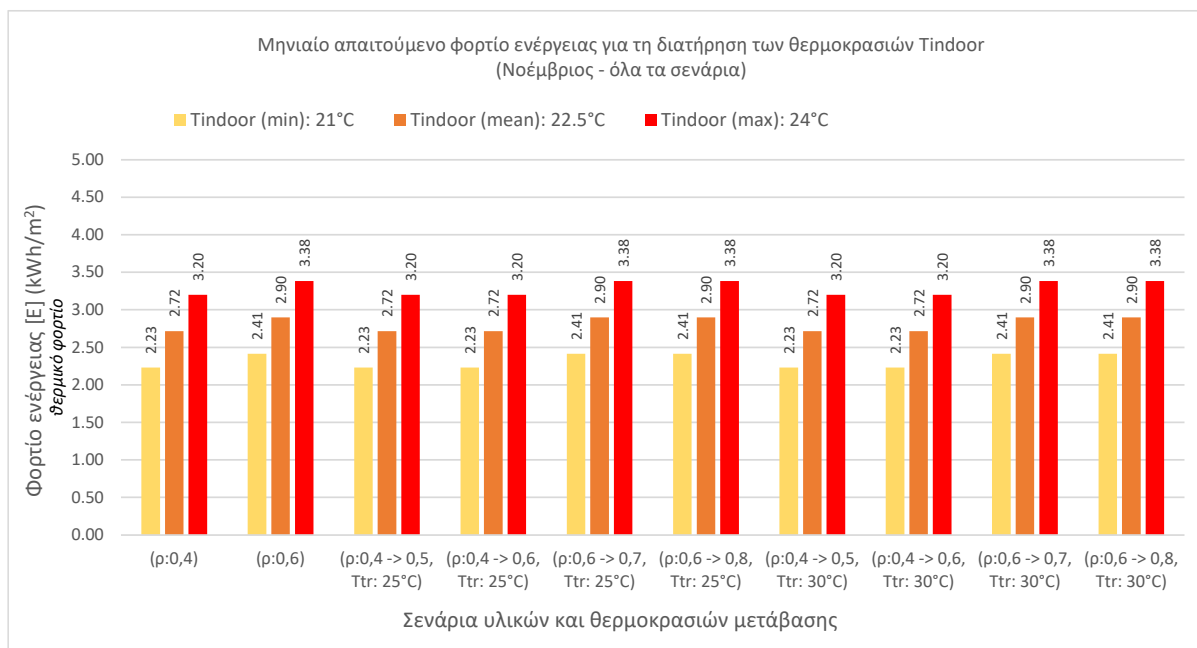
Εικόνα 32: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιανουάριο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



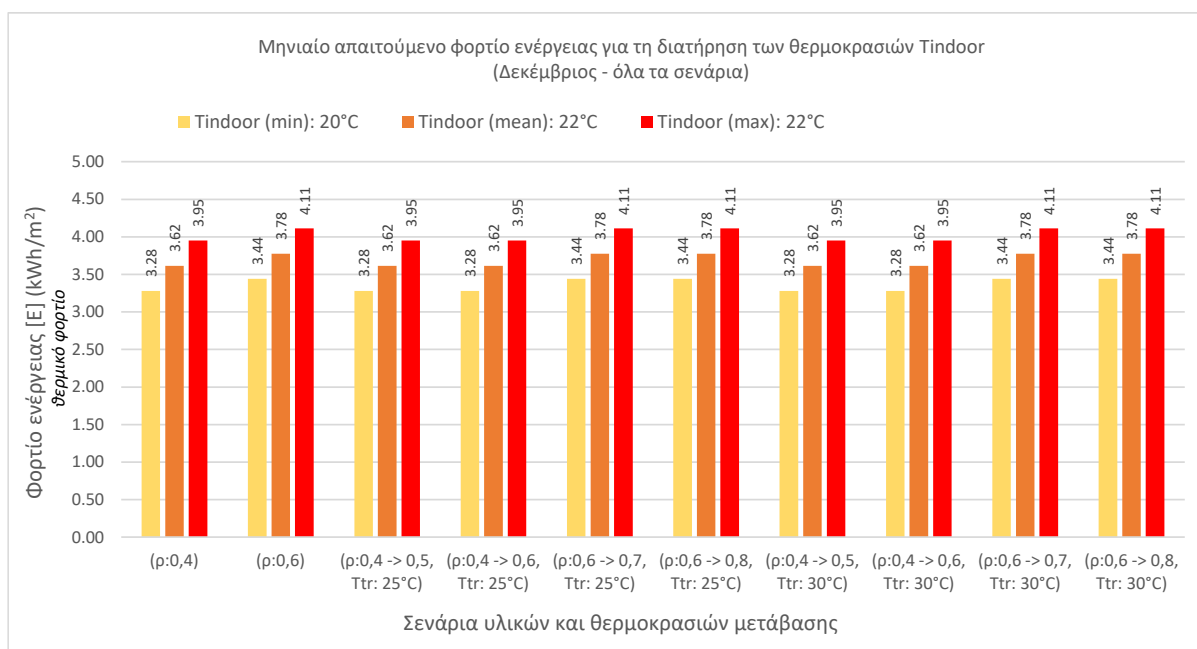
Εικόνα 33: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Φεβρουάριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



Εικόνα 34: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Μάρτιο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

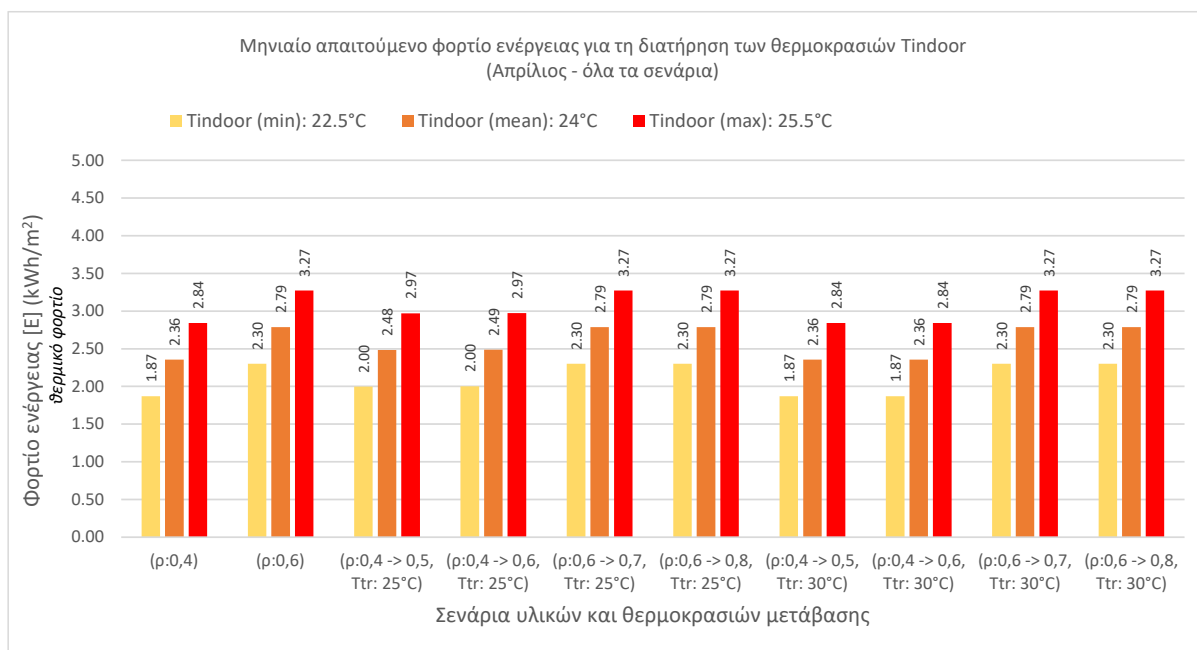


Εικόνα 35: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Νοέμβριο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).



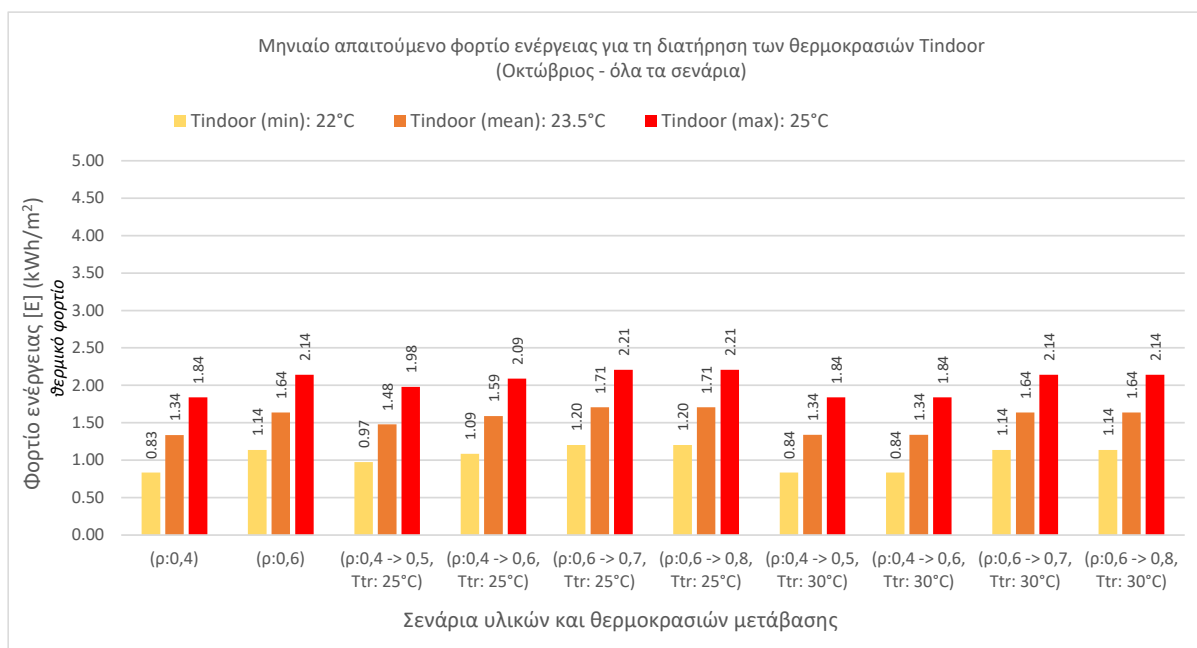
Εικόνα 36: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Δεκέμβριο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Εξετάζοντας το μήνα Απρίλιο (βλ. εικ. 37), ο οποίος επίσης ανήκει στην περίοδο θέρμανσης, τα απαιτούμενα θερμικά φορτία είναι κοινά για τα σενάρια επιχρισμάτων όπου δεν συμβαίνει θερμοχρωμική μετάβαση και έχουν την ίδια ρ_{sol} , όπως για παράδειγμα όλα τα επιχρίσματα με αρχική $\rho_{sol}:0,6$. Από όλα τα σενάρια, μικρότερο θερμικό φορτίο για διατήρηση της $T_{indoor(min)}:22,5^{\circ}$ απαιτείται όταν εφαρμόζεται το συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4$ ή τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$ (στα οποία δεν συμβαίνει θερμοχρωμική μετάβαση), με τιμή ενεργειακού φορτίου: $E=1,87 \text{ kWh/m}^2$. Το μεγαλύτερο ενεργειακό φορτίο για τη διατήρηση της $T_{indoor(min)}$ παρατηρείται στην εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων με $\rho_{sol}:0,6$ έχοντας τιμή: $E=2,3 \text{ kWh/m}^2$. Περνώντας στη διατήρηση της $T_{indoor(mean)}:24^{\circ}C$, μικρότερο ενεργειακό φορτίο εντοπίζεται ξανά στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4$ και στα θερμοχρωμικά επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$ και τιμή: $E=2,36 \text{ kWh/m}^2$. Μεγαλύτερο θερμικό φορτίο για διατήρηση της $T_{indoor(mean)}$ σημειώνεται πάλι στα επιχρίσματα με $\rho_{sol}:0,6$ έχοντας τιμή: $E=2,79 \text{ kWh/m}^2$. Αναφορικά με την $T_{indoor(max)}:25,5^{\circ}C$, μικρότερο θερμικό φορτίο εντοπίζεται στην εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4$ ή των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$ και τιμή $E=2,86 \text{ kWh/m}^2$, ενώ αντίθετα, μεγαλύτερο θερμικό φορτίο παρατηρείται στην εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων με $\rho_{sol}:0,6$ με τιμή $E=3,27 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 37: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Απρίλιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

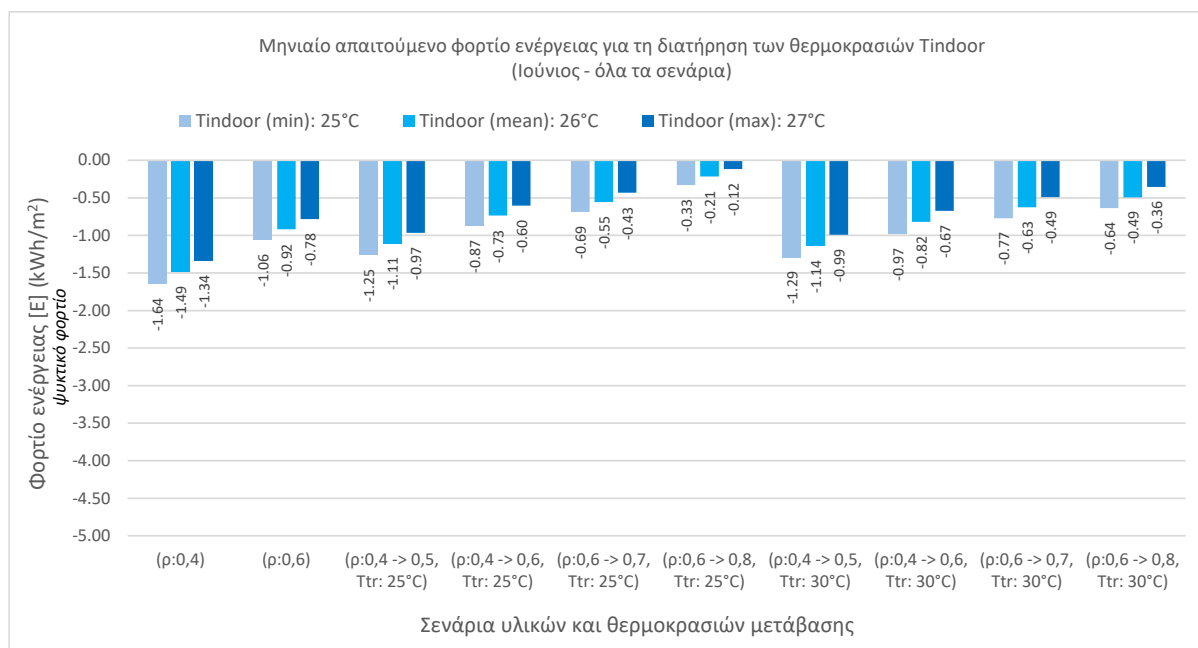
Περνώντας στον τελευταίο υπό διερεύνηση μήνα της περιόδου θέρμανσης, τον Οκτώβριο (βλ. εικ. 38), το μόνα θερμοχρωμικά επιχρίσματα που δεν υφίστανται θερμοχρωμική μετάβαση είναι αυτά με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ με $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$ και έτσι έχουν ίδιες τιμές θερμικών φορτίων με το συμβατικό επίχρισμα σταθερής $\rho_{\text{sol}}:0,6$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(min)}}:22^{\circ}\text{C}$, μικρότερο θερμικό φορτίο επιφέρει η εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=0,83 \text{ kWh/m}^2$, ενώ μεγαλύτερο θερμικό φορτίο, η εφαρμογή των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=2,09 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(mean)}}:23,5^{\circ}\text{C}$, μικρότερο θερμικό φορτίο σημειώνεται πάλι στην εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=1,34 \text{ kWh/m}^2$, ενώ μεγαλύτερο θερμικό φορτίο, ξανά στην εφαρμογή των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=1,71 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(max)}}:25^{\circ}\text{C}$, μικρότερο θερμικό φορτίο εντοπίζεται άλλη μια φορά στην εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ και $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=1,84 \text{ kWh/m}^2$, ενώ μεγαλύτερο θερμικό φορτίο, επίσης στην εφαρμογή των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ έχοντας τιμή $E=2,21 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 38: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Οκτώβριο (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

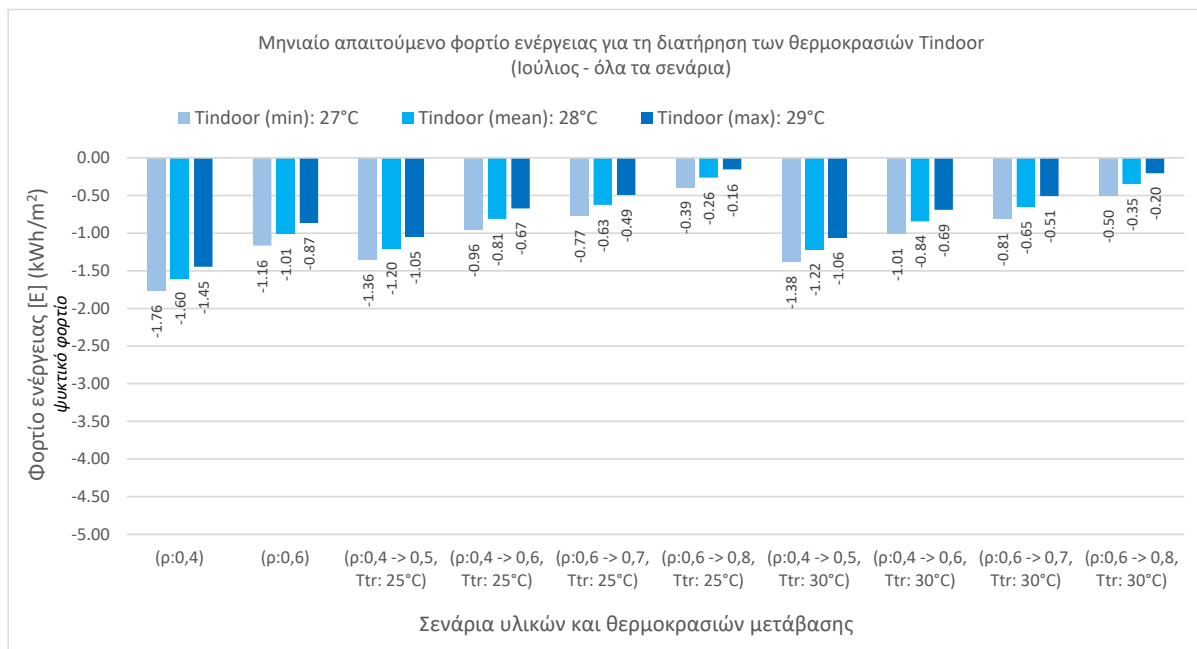
4.3.2 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο σε περίοδο ψύξης

Στην περίοδο ψύξης ανήκουν όπως αναφέρεται και παραπάνω, οι θερινοί μήνες Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος. Καθώς κλιματικά αυτή την περίοδο αναπτύσσονται στην ατμόσφαιρα υψηλές θερμοκρασίες, τα απαιτούμενα φορτία ενέργειας εξυπηρετούν την ανάγκη για ψύξη του εσωτερικού χώρου, επομένως πρόκειται για ψυκτικά φορτία. Επίσης και τους τρεις θερινούς μήνες, όλα τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα εμφανίζουν τη δυνατότητα μετάβασης όπως έχει υποδειχθεί παραπάνω και στην ενότητα 4.1. Ξεκινώντας από το μήνα Ιούνιο (βλ. εικ. 39), για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(min)}}:25^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή φορτίου $E=0,33 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το αντίστοιχο μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,64 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(mean)}}:26^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο σημειώνεται πάλι στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,21 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο ξανά στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,49 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor(max)}}:27^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται ξανά στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,12 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο επίσης στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,34 \text{ kWh/m}^2$.



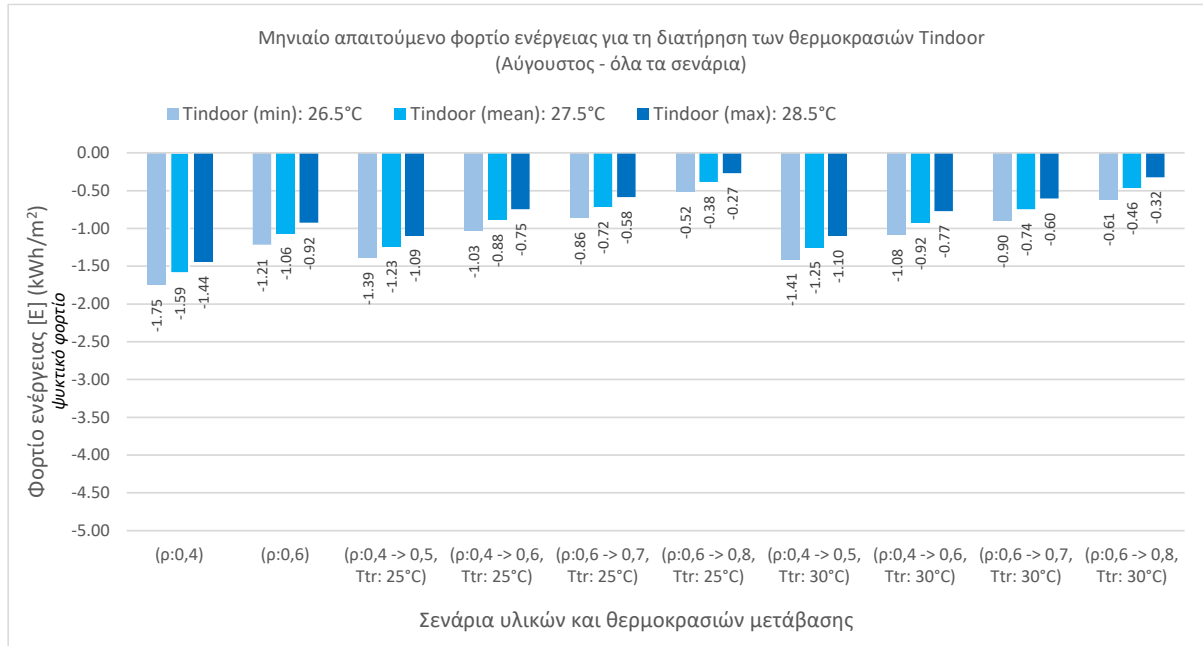
Εικόνα 39: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούνιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Συνεχίζοντας στο μήνα Ιούλιο (βλ. εικ. 40), για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{min})}:27^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,39 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,76 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{mean})}:28^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο παρατηρείται ξανά στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,26 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο πάλι στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,60 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{max})}:29^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο σημειώνεται επίσης στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,16 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο πάλι στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,45 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 40: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούλιο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Κατά το μήνα Αύγουστο (βλ. εικ. 41), για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{min})}:26,5^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,52 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο ψυκτικό φορτίο προκύπτει από την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,75 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{mean})}:27,5^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται πάλι στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,38 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο επίσης στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,59 \text{ kWh/m}^2$. Για τη διατήρηση της $T_{\text{indoor}(\text{max})}:28,5^{\circ}\text{C}$, το μικρότερο απαιτούμενο μηνιαίο ψυκτικό φορτίο σημειώνεται ξανά στο θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$ και τιμή $E=0,27 \text{ kWh/m}^2$, ενώ το μεγαλύτερο παρατηρείται πάλι στο συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και τιμή $E=1,44 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 41: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Αύγουστο (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

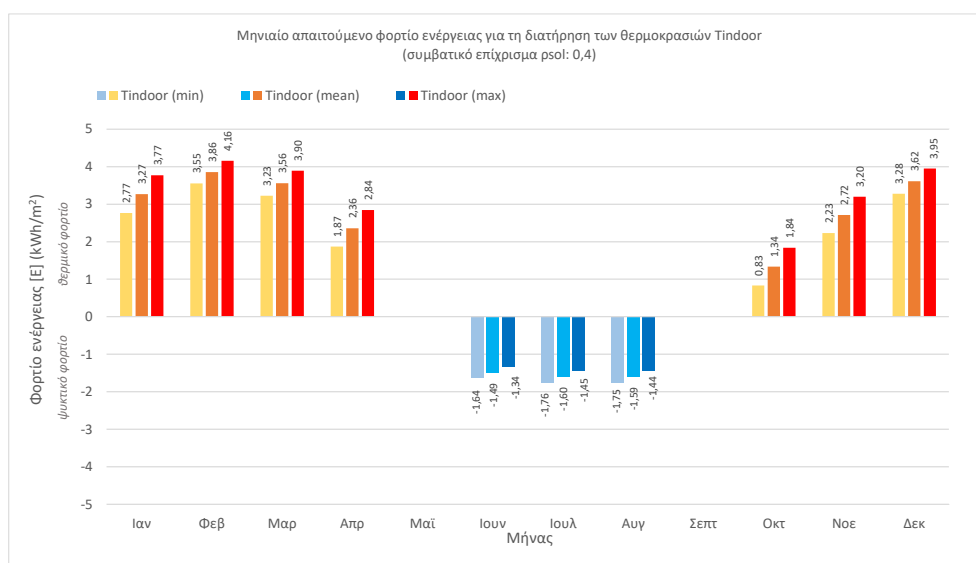
4.3.3 Απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο έτους

Σε αυτή την υποενότητα, παραθέτονται σε επίπεδο έτους, οι τιμές φορτίου ενέργειας για τις περιόδους θέρμανσης και ψύξης μαζί, ως προς τα διαφορετικά σενάρια επιχρισμάτων που εφαρμόζονται στο δώμα. Τα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν στόχο να αποσαφηνίσουν τη διαφορά στην ενεργειακή συμπεριφορά που προκύπτει στην εφαρμογή τόσο μεταξύ συμβατικών και θερμοχρωμικών επιχρισμάτων, θερμοχρωμικών επιχρισμάτων με ίδιες αρχικές και τελικές ανακλαστικότητες αλλά διαφορετικές θερμοκρασίες μετάβασης, όσο και μεταξύ εφαρμογής των επιχρισμάτων σε περίοδο θέρμανσης και ψύξης. Μια ακόμη βασική παρατήρηση που πρέπει να σημειωθεί εδώ, είναι ότι οι T_{indoor} (min, mean, max) που αναφέρονται στα παρακάτω διαγράμματα, αντιπροσωπεύουν και αντιστοιχούν στις αντίστοιχες επιλεγμένες τιμές που έχουν οριστεί για τον κάθε μήνα ξεχωριστά (όπως και παραπάνω) και δεν σχετίζονται μεταξύ τους όσον αφορά τη σύγκριση διαφορετικών μηνών. Οι περιπτώσεις που ακολουθούν εφόσον απεικονίζονται σε επίπεδο έτους, είναι όσα και τα βασικά σενάρια επιχρισμάτων, δηλαδή δέκα, τα οποία επαναλαμβάνονται ότι είναι τα εξής:

- 1) συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,4$
- 2) συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,6$
- 3) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 4) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 5) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 6) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 7) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 8) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 9) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 10) θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ και θερμοκρασία μετάβασης $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$

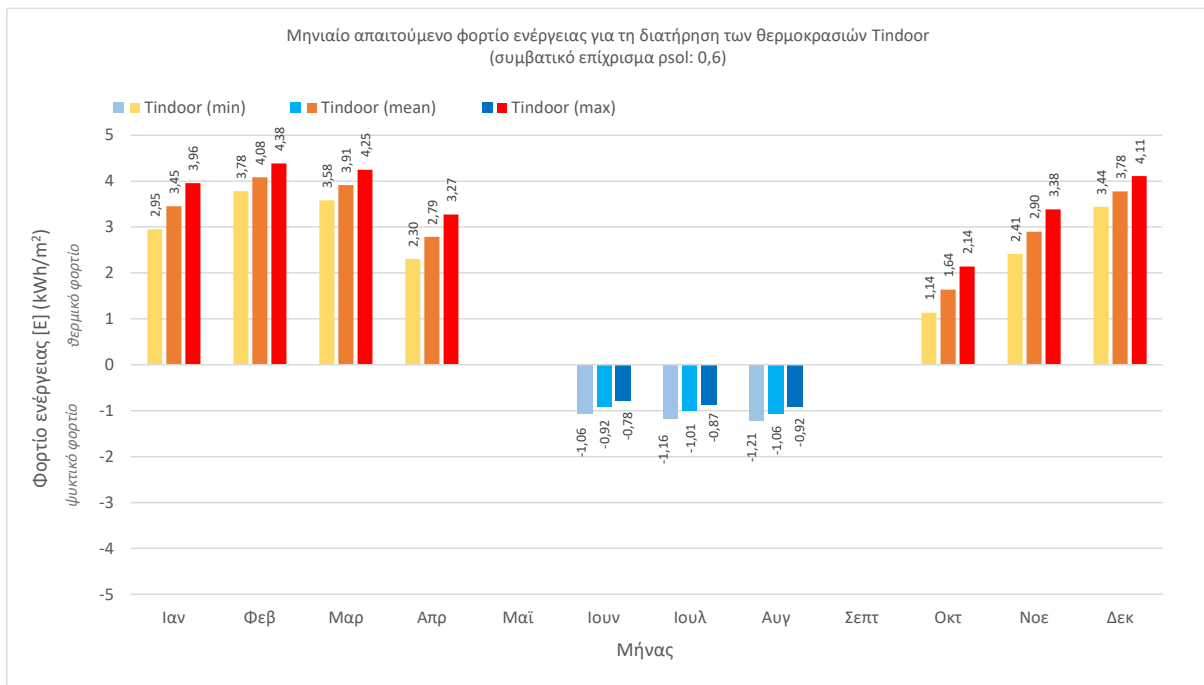
Επιπλέον γενικά στα διαγράμματα παρατηρείται ότι στους μήνες που απαιτείται θερμικό φορτίο, το μικρότερο χρειάζεται για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor}(\text{min})}$ ενώ το μεγαλύτερο για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor}(\text{max})}$. Αντίθετα κατά τους μήνες με ψυκτικό φορτίο, το μικρότερο απαιτείται για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor}(\text{max})}$ ενώ το μεγαλύτερο για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor}(\text{min})}$.

Ξεκινώντας από το σενάριο 1 (βλ. εικ. 42), για το συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,4$ και συγκρίνοντας πρώτα όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Μάρτιος, Δεκέμβριος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Αύγουστος, Ιούλιος. Για τις $T_{\text{indoor}(\text{min})}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $0,83 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,55 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,64 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούλιο με τιμή $1,76 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{\text{indoor}(\text{mean})}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,34 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,86 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,49 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούλιο με τιμή $1,60 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{\text{indoor}(\text{max})}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,84 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,16 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,34 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούλιο με τιμή $1,45 \text{ kWh/m}^2$.



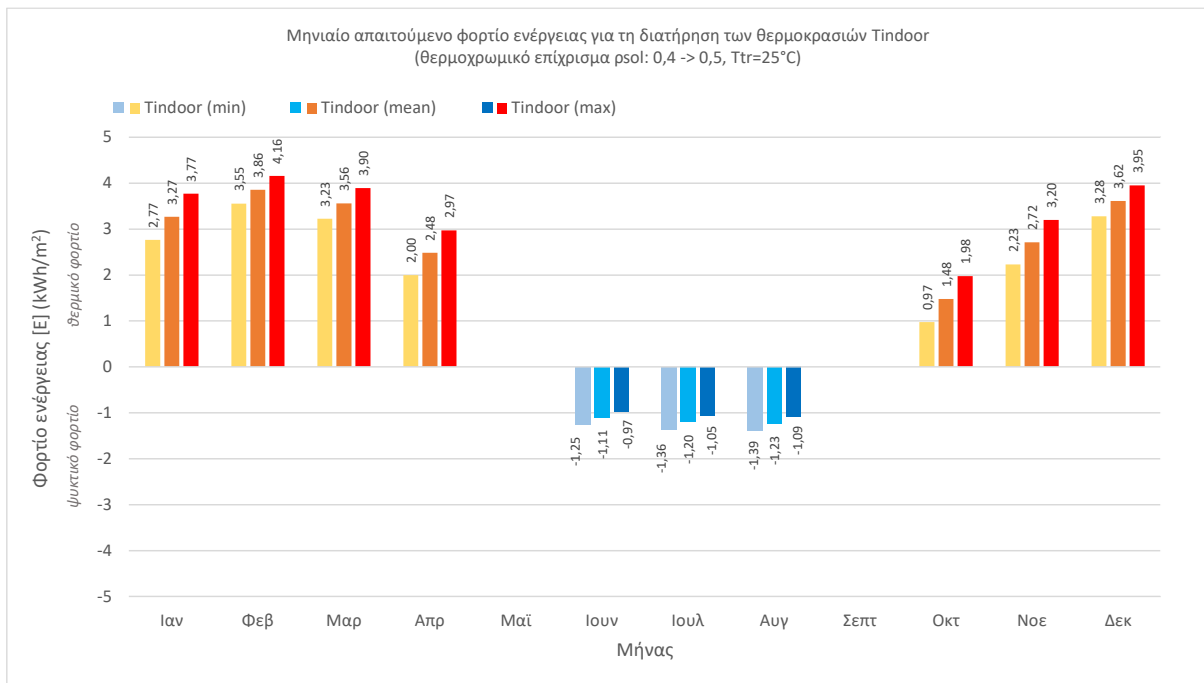
Εικόνα 42: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{\text{sol}}:0,4$ (πηγή: ίδια επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 2 (βλ. εικ. 43), για το συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{sol}:0,6$ συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,38 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,06 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,21 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,64 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,08 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,92 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,06 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,25 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,78 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,06 \text{ kWh/m}^2$.



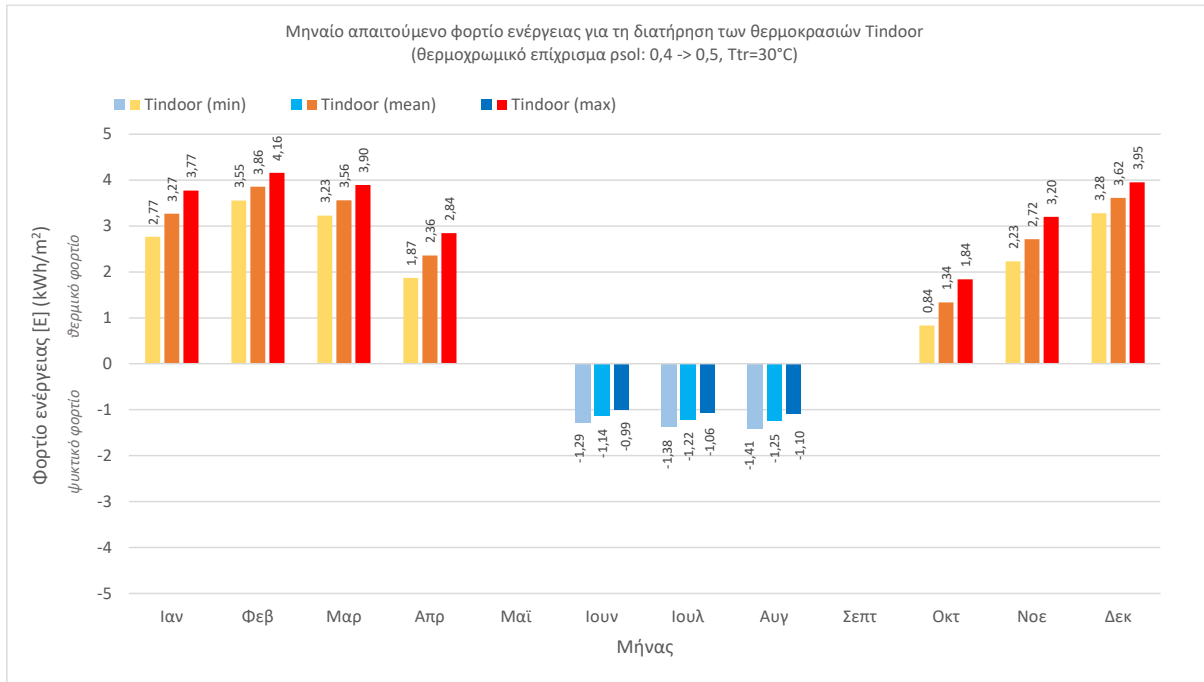
Εικόνα 43: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 3 (βλ. εικ. 44), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Μάρτιος, Δεκέμβριος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $0,97 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,55 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,25 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,39 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,48 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,86 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,11 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,23 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,98 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,16 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,97 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,09 \text{ kWh/m}^2$.



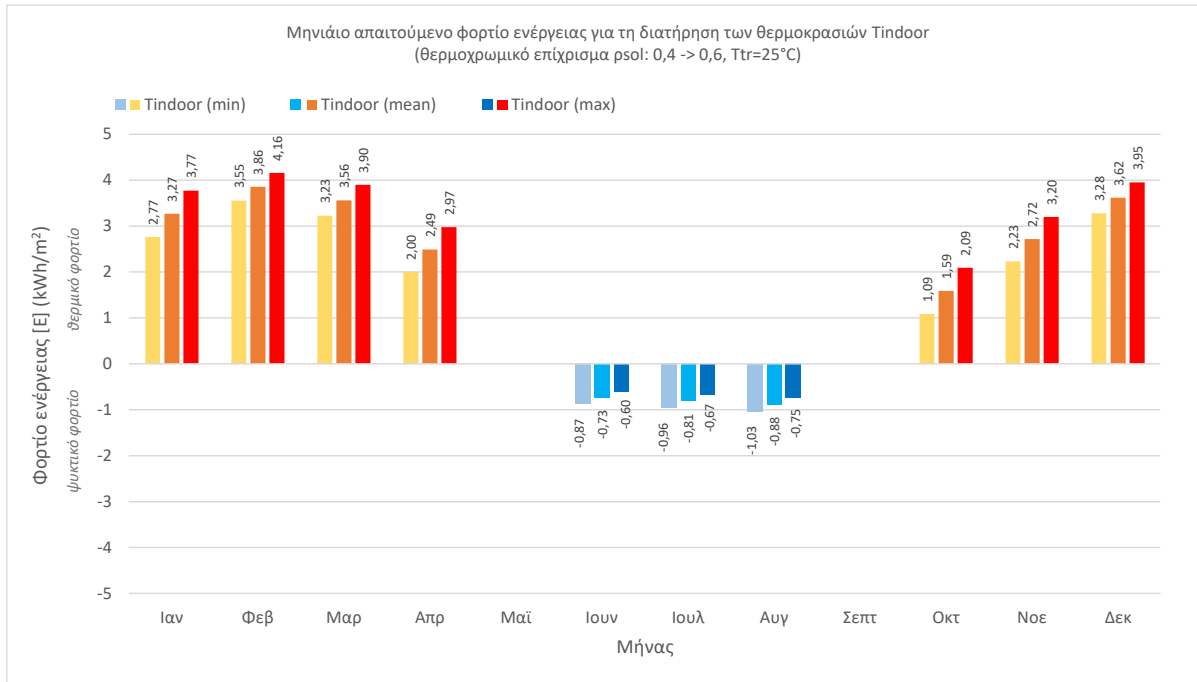
Εικόνα 44: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 4 (βλ. εικ. 45), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Μάρτιος, Δεκέμβριος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $0,84 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,55 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,29 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,41 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,34 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,86 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $1,14 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,25 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,84 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,16 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,99 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,10 \text{ kWh/m}^2$.



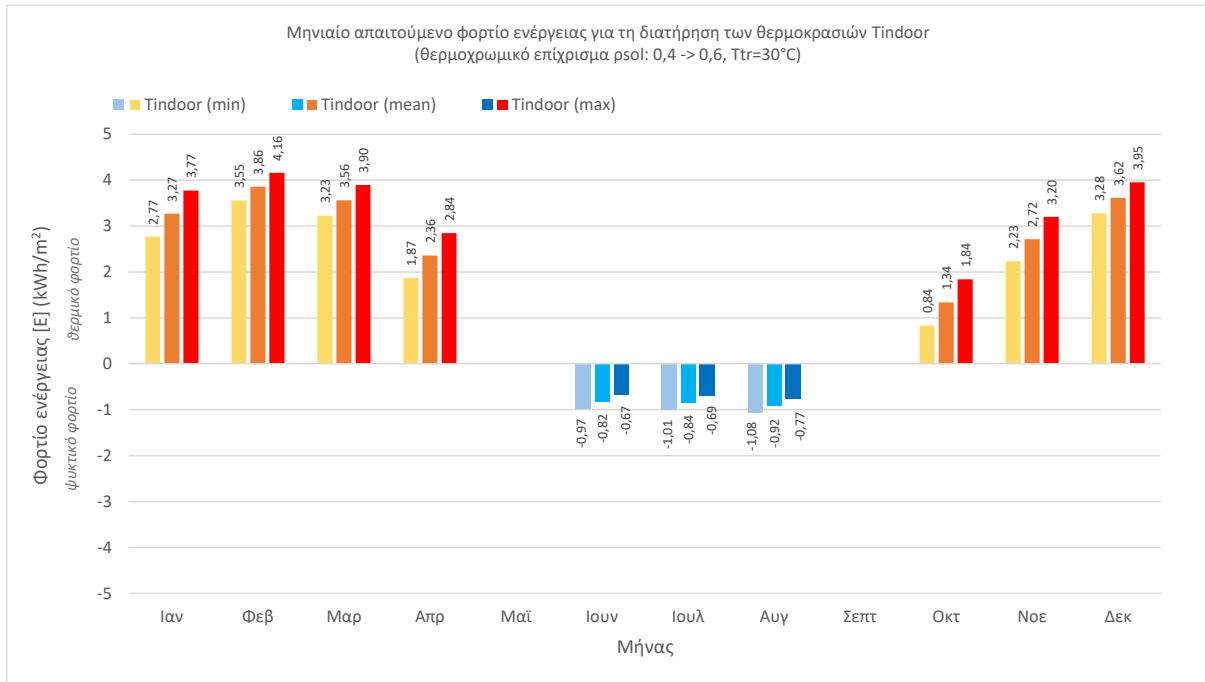
Εικόνα 45: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 5 (βλ. εικ. 46), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}\text{C}$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Μάρτιος, Δεκέμβριος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,09 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,55 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,87 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,03 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,59 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,86 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,73 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,88 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,09 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,16 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,60 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,75 \text{ kWh/m}^2$.



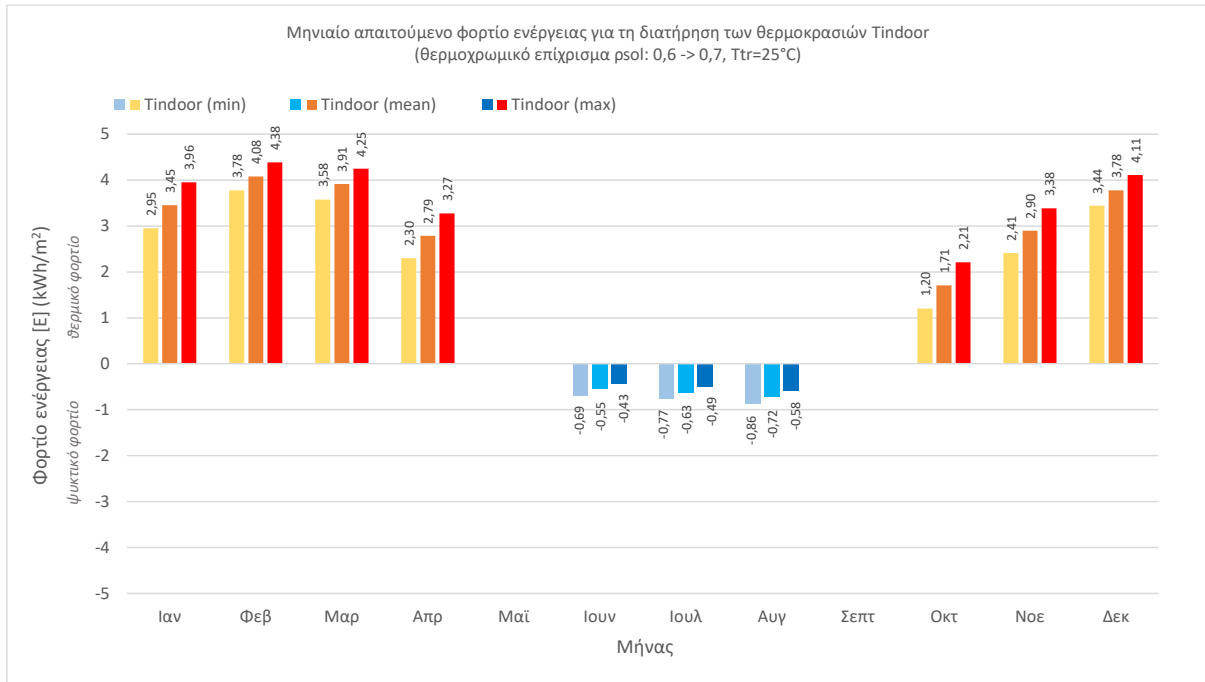
Εικόνα 46: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}\text{C}$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 6 (βλ. εικ. 47), για το θερμοχρωμικό επίχρυσμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Μάρτιος, Δεκέμβριος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $0,84 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,55 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,97 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $1,08 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,34 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,86 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,82 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,92 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,84 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,16 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,67 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,77 \text{ kWh/m}^2$.



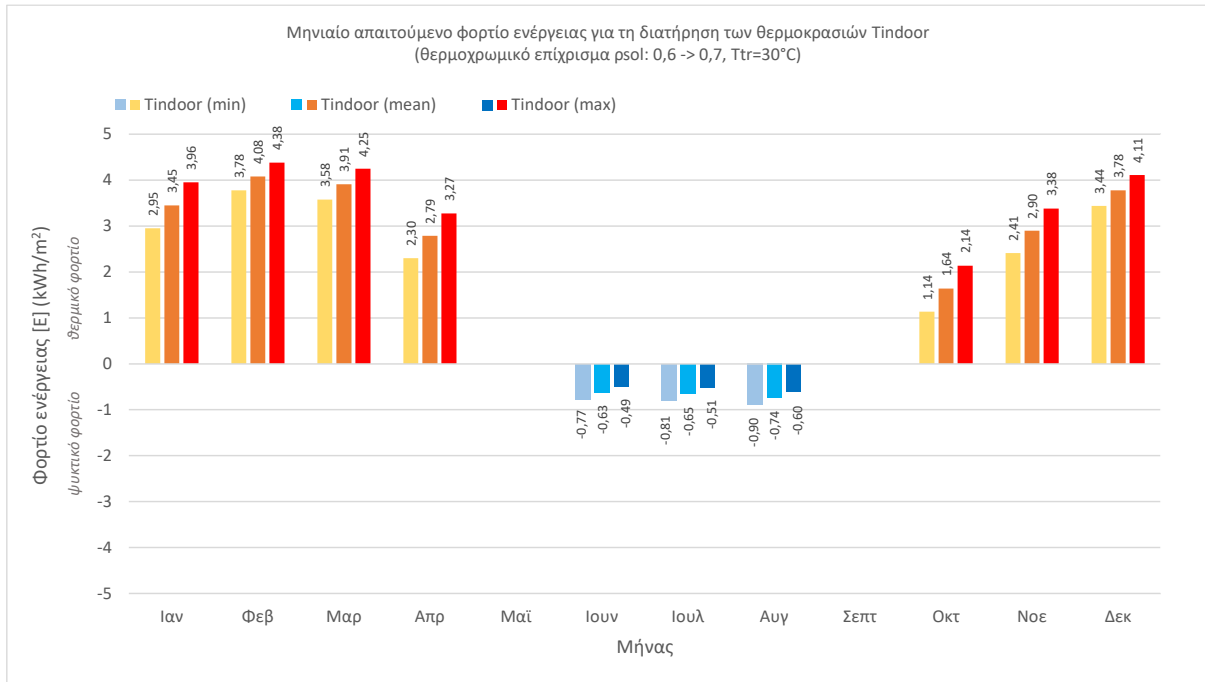
Εικόνα 47: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 7 (βλ. εικ. 48), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,2 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,78 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,69 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,86 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,71 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,08 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,55 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,72 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,21 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,38 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,43 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,58 \text{ kWh/m}^2$.



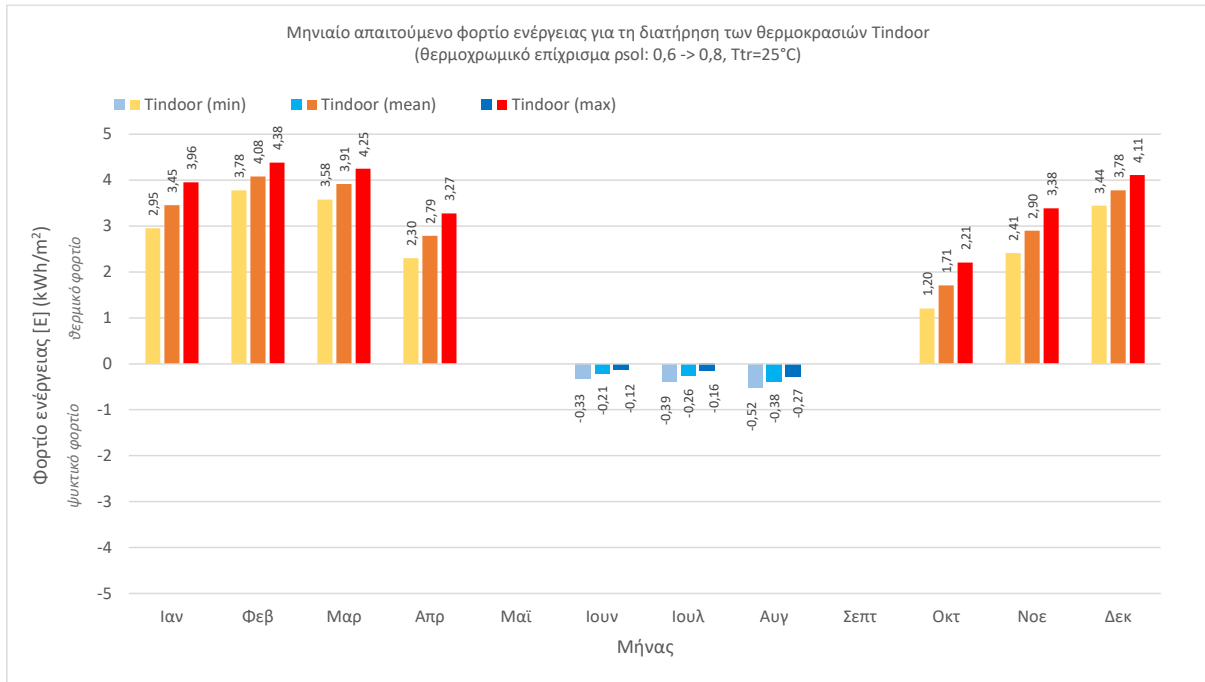
Εικόνα 48: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 8 (βλ. εικ. 49), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,78 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,77 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,90 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,64 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,08 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,63 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,74 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,38 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,49 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,60 \text{ kWh/m}^2$.



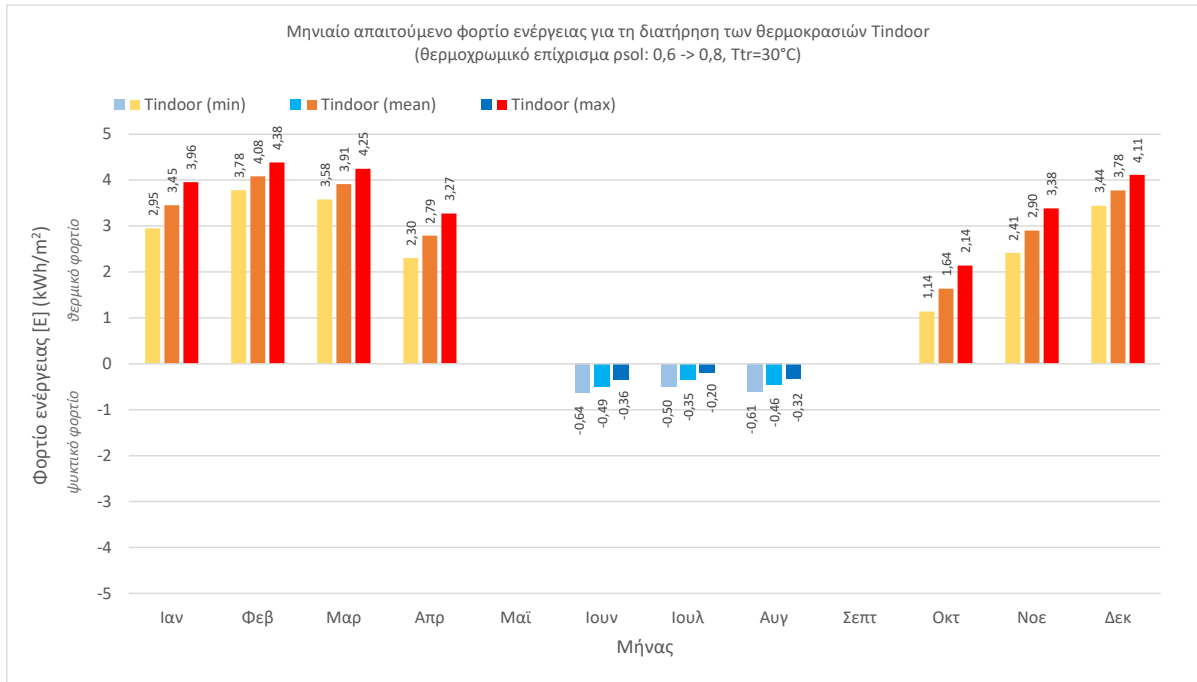
Εικόνα 49: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 9 (βλ. εικ. 50), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,2 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,78 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,33 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,52 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,71 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,08 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,21 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,38 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,21 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,38 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή $0,12 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Αύγουστο με τιμή $0,27 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 50: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}: 25^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Στο σενάριο 10 (βλ. εικ. 51), για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$, συγκρίνοντας όλους τους μήνες της περιόδου θέρμανσης, οι μήνες όπου εντοπίζονται από τα μικρότερα προς τα μεγαλύτερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία κατά αύξουσα σειρά είναι: Οκτώβριος, Απρίλιος, Νοέμβριος, Ιανουάριος, Δεκέμβριος, Μάρτιος και Φεβρουάριος. Αντίστοιχα, στην περίοδο ψύξης οι μήνες σε αύξουσα σειρά είναι: Ιούλιος, Αύγουστος, Ιούνιος. Για τις $T_{indoor(min)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $3,78 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εμφανίζεται τον Ιούλιο με τιμή $0,5 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούνιο με τιμή $0,64 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(mean)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $1,64 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,08 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούλιο με τιμή $0,35 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούνιο με τιμή $0,49 \text{ kWh/m}^2$. Για τις $T_{indoor(max)}$ το ελάχιστο απαιτούμενο θερμικό φορτίο παρατηρείται τον Οκτώβριο με τιμή $2,14 \text{ kWh/m}^2$ και το μέγιστο τον Φεβρουάριο με τιμή $4,38 \text{ kWh/m}^2$. Το ελάχιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο εντοπίζεται τον Ιούλιο με τιμή $0,2 \text{ kWh/m}^2$ ενώ το μέγιστο τον Ιούνιο με τιμή $0,36 \text{ kWh/m}^2$.



Εικόνα 51: Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}: 0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}: 30^{\circ}C$ (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Συγκεντρώνοντας το συνολικό φορτίο ενέργειας (θερμικό+ψυκτικό) που απαιτείται για τη διατήρηση των T_{indoor} σε ολόκληρο το έτος και για τα δέκα σενάρια επιχρισμάτων (βλ. εικ. 52), παρατηρείται ότι όλες οι τιμές ενεργειακού φορτίου του διαγράμματος είναι διαφορετικές μεταξύ τους τόσο μεταξύ των διαφορετικών T_{indoor} (min, mean, max) όσο και μεταξύ των διαφορετικών σεναρίων, καθώς οι τιμές επηρεάζονται από την ενεργειακή συμπεριφορά των επιχρισμάτων σε όλους τους μήνες που ανήκουν στις περιόδους θέρμανσης και ψύξης. Σύμφωνα με το διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι και για τις τρεις T_{indoor} (min, mean, max) επικρατεί το ίδιο σενάριο χαμηλότερου και το ίδιο σενάριο υψηλότερου απαιτούμενου ενεργειακού φορτίου για όλο το έτος. Τα χαμηλότερα απαιτούμενα ετήσια φορτία ενέργειας, δηλαδή το βέλτιστο σενάριο από όλα ισχύει για το θερμοχρωμικό επίχρισμα με μεταβαλλόμενη $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$, με τιμές για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor(min)}}: 20,82 \text{ kWh/m}^2$, των $T_{\text{indoor(mean)}}: 23,3 \text{ kWh/m}^2$ και των $T_{\text{indoor(max)}}: 25,79 \text{ kWh/m}^2$. Αντίθετα, τα υψηλότερα απαιτούμενα ετήσια φορτία ενέργειας, δηλαδή το δυσμενέστερο σενάριο από όλα ισχύει για το συμβατικό επίχρισμα με σταθερή $\rho_{\text{sol}}:0,6$, με τιμές για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor(min)}}: 23,04 \text{ kWh/m}^2$, των $T_{\text{indoor(mean)}}: 25,54 \text{ kWh/m}^2$ και των $T_{\text{indoor(max)}}: 28,07 \text{ kWh/m}^2$. Τα υπόλοιπα οκτώ σενάρια επιχρισμάτων κατανέμονται από το περισσότερο προς το λιγότερο ενεργειακά ευνοϊκό ως εξής:

Για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor(min)}}$

- 1) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 2) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 3) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 4) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 5) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 6) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 7) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 8) συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4$.

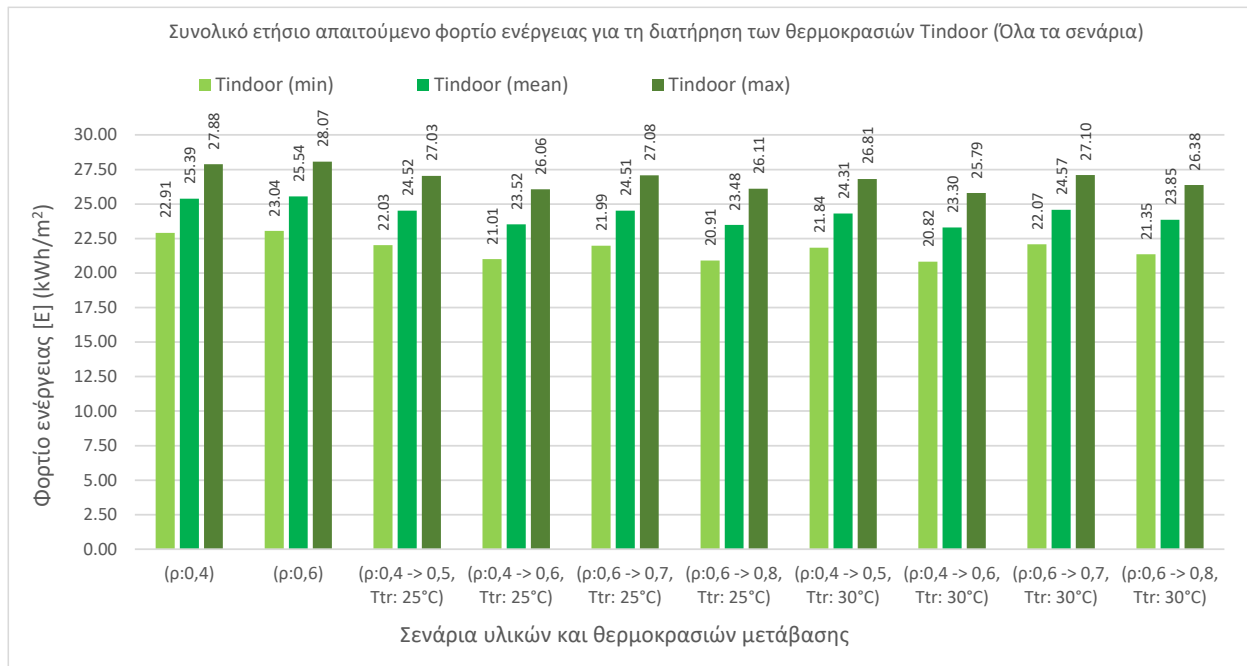
Για τη διατήρηση των $T_{\text{indoor(mean)}}$

- 1) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 2) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{\text{tr}}:25^{\circ}\text{C}$
- 3) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$
- 4) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{\text{sol}}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{\text{tr}}:30^{\circ}\text{C}$

- 5) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 6) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 7) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$
- 8) συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4$.

Για τη διατήρηση των $T_{indoor(max)}$

- 1) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 2) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 3) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$
- 4) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$
- 5) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 6) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}C$
- 7) θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:30^{\circ}C$
- 8) συμβατικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4$.



Εικόνα 52: Διάγραμμα συνολικού ετήσιου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας για την εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων (πηγή: ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο).

Κεφάλαιο 5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και δυνατότητες μελλοντικής έρευνας

5.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Καθώς έχουν παρατεθεί τα αποτελέσματα του πειραματικού μοντέλου για την εφαρμογή συμβατικών και θερμοχρωμικών επιχρισμάτων σε δώμα κατοικίας στην πόλη της Αθήνας, προκύπτουν τα εξής βασικά πορίσματα:

- 1) Τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα ενεργοποιούν τη μετάβασή τους όσον αφορά την αλλαγή απόχρωσης και οπτικών ιδιοτήτων, μόνο σε ορισμένους μήνες του χρόνου, κυρίως από τον Απρίλιο μέχρι και τον Οκτώβριο, καθώς τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο, εμφανίζουν λειτουργία όμοια με τα συμβατικά επιχρίσματα της ίδιας ανακλαστικότητας-απορροφητικότητας, διότι η ισοδύναμη θερμοκρασία ($T_{\text{sol,air}}$) του δώματος δεν καταφέρνει να αγγίξει τα όρια της θερμοκρασίας μετάβασης (T_{tr}) του υλικού.
- 2) Οι ισοδύναμες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο δώμα κατά την εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων είναι ως επί το πλείστον μεγαλύτερες από την θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα που χαρακτηρίζει κάθε μήνα σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο από τις πρώτες πρωινές έως και τις πρώτες απογευματινές ώρες και για μεγαλύτερη διάρκεια τους θερινούς μήνες από το υπόλοιπο έτος.
- 3) Η ισοδύναμη θερμοκρασία του δώματος έχει υψηλότερες τιμές κατά τη θερινή περίοδο σε σύγκριση με το υπόλοιπο έτος, λόγω της επίδρασης σε αυτήν, της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας (T_{amb}), της θερμοκρασίας του ουράνιου θόλου (T_{sky}) και της ηλιακής ακτινοβολίας (Q_{sol}) και είναι σχεδόν συνεχώς υψηλότερη όταν εφαρμόζονται επιχρίσματα με μεγαλύτερες τιμές ανακλαστικότητας, όπως για παράδειγμα $\rho_{\text{sol}}:0,4$ ή $0,4 \rightarrow 0,5$ σε σύγκριση με επιχρίσματα με μικρότερες τιμές ανακλαστικότητας, για παράδειγμα $\rho_{\text{sol}}:0,6$ ή $0,6 \rightarrow 0,7$.
- 4) Διερευνώντας την ενεργειακή συμπεριφορά του δώματος ως προς το απαιτούμενο φορτίο ενέργειας που προκύπτει από την εφαρμογή κάθε επιχρίσματος, για τη διατήρηση της ορισμένης επιθυμητής θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου κάτω από το δώμα (T_{indoor}), διαπιστώνεται ότι το καλύτερο δυνατό σενάριο με τα χαμηλότερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία για ολόκληρο το έτος, εντοπίζεται στην εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με μεταβολή ανακλαστικότητας από $\rho_{\text{sol}}:0,4$ σε $\rho_{\text{sol}}:0,6$

και θερμοκρασία μετάβασης $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$. Αντίθετα το δυσμενέστερο σενάριο με τα υψηλότερα απαιτούμενα ενεργειακά φορτία για όλο το έτος, εντοπίζεται στην εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με σταθερή ανακλαστικότητα $\rho_{sol}:0,6$.

- 5) Από τα διαγράμματα των απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων σε επίπεδο έτους, συμπεραίνεται ότι η εφαρμογή όλων των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων στο δώμα είναι ευνοϊκότερη από την εφαρμογή των δυο συμβατικών επιχρισμάτων που εξετάζονται.
- 6) Από την ανάλυση των απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων για δεδομένες τιμές των T_{indoor} σε διαφορετικούς μήνες, προκύπτει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, παρόλο που μια ορισμένη τιμή της T_{indoor} είναι ίδια για δυο διαφορετικούς μήνες, ενδέχεται το απαιτούμενο ενεργειακό φορτίο για τη διατήρησή της να είναι διαφορετικό από μήνα σε μήνα, ακόμα και στην εφαρμογή του ίδιου επιχρίσματος, καθώς αυτή η συνθήκη επηρεάζεται και από τα κλιματικά δεδομένα που ανταποκρίνονται σε κάθε μήνα.
- 7) Όσο χαμηλότερες είναι οι επιθυμητές τιμές θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου T_{indoor} , τόσο χαμηλότερα φορτία ενέργειας χρειάζονται για τη διατήρησή τους κατά τους μήνες που απαιτούνται θερμικά φορτία, ανεξάρτητα από το ποιο επίχρισμα εφαρμόζεται στο δώμα. Αντίθετα, τους μήνες όπου απαιτούνται ψυκτικά φορτία, όσο υψηλότερες είναι η επιθυμητές T_{indoor} , τόσο μικρότερα φορτία ενέργειας απαιτούνται για τη διατήρησή τους.
- 8) Η εφαρμογή ενός επιχρίσματος μπορεί να είναι ευνοϊκότερη ή δυσμενέστερη σε σύγκριση με ενός άλλου, όταν αυτή εξετάζεται σε επίπεδο εφαρμογής ενός μήνα αντί σε επίπεδο έτους. Επιπλέον, το ίδιο μπορεί να ισχύει και στην περίπτωση που συγκρίνονται τα φορτία ενέργειας από διαφορετικά επιχρίσματα στον ίδιο ή σε διαφορετικούς μήνες. Για παράδειγμα, το θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ το οποίο διαπιστώθηκε ότι είναι το βέλτιστο για όλο το έτος συνολικά, δεν είναι το βέλτιστο για τον Ιούνιο ή για τον Ιούλιο, καθώς σε αυτούς τους μήνες ενεργειακά ευνοϊκότερο είναι το θερμοχρωμικό επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$. Ωστόσο, παραμένοντας στους δυο ίδιους μήνες γίνεται ακόμη μια παρατήρηση, ότι παρόλο που όλα τα επιχρίσματα εκτός από ένα προκαλούν υψηλότερα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία στον Ιούλιο απ' ότι στον Ιούνιο, το επίχρισμα με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ είναι το μόνο που προκαλεί υψηλότερο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο τον Ιούνιο απ' ότι τον Ιούλιο. Επομένως, η χρονική περίοδος εφαρμογής του υλικού στο δώμα αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση του κατάλληλου επιχρίσματος. Όμως στην πραγματικότητα η εφαρμογή ενός εξωτερικού επιχρίσματος στην

κατασκευή ενός δώματος είναι μια επέμβαση με σχετικά μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα, οπότε η επιλογή που έχει τη δυνατότητα να προσφέρει μεγαλύτερο ενεργειακό οφέλος σε επίπεδο έτους είναι και η αποτελεσματικότερη εφόσον εξετάζεται περισσότερο διαχρονικά.

5.2 Δυνατότητες μελλοντικής έρευνας

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει ορισμένα βασικά γνωρίσματα και προοπτικές των θερμοχρωμικών υλικών, τις κατηγορίες τους, το πεδίο εφαρμογής τους, της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς τους ως εξωτερικά επιχρίσματα του κτιριακού κελύφους και πιο συγκεκριμένα στο αδιαφανές δομικό στοιχείο του συμβατικού δώματος σε κλιματικές συνθήκες της πόλης της Αθήνας ως μελέτη περίπτωσης. Γενικότερα τα θερμοχρωμικά υλικά που έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε κτιριακές κατασκευές και ειδικότερα τα θερμοχρωμικά επιχρίσματα προβλέπεται να κατέχουν μελλοντικά ένα σημαντικό ρόλο στη προστασία των κτιριακών κελυφών από τις εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας που διαθέτουν ως προς τη προσαρμογή των οπτικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με άλλα συμβατικά υλικά επικάλυψης ή θωράκισης των κτιρίων. Παρόλο που η παραγωγή και η πρακτική εφαρμογή των κτιριακών θερμοχρωμικών υλικών στη σημερινή πραγματικότητα δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη, σε επίπεδο έρευνας γίνεται αξιοσημείωτη πρόοδος ως προς τη μελέτη και την ανάλυση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων τους. Ωστόσο, προκειμένου τα εν λόγω υλικά να καταφέρουν αποκτήσουν μια περισσότερο διαδεδομένη και σαφή θέση ανάμεσα στις καθιερωμένες και επιλεγμένες πρακτικές υιοθέτησης παθητικών ηλιακών συστημάτων των κτιρίων, κρίνεται σημαντικό να διερευνηθούν ακόμα πιο εμπεριστατωμένα οι εφαρμογές τους σε ρεαλιστικά σενάρια, σε ποικίλες κλιματικές ζώνες του πλανήτη καθώς και διαφορετικούς τύπους κτιρίων σχετικά με τις χρήσεις και την κατασκευή των κελυφών τους, τα οποία ενδέχεται να δώσουν χρήσιμες απαντήσεις σχετικά με την ιδανικότερη προσαρμογή των οπτικών ιδιοτήτων, οι οποίες εξαρτώνται με τη σειρά τους από τις χημικές συνθέσεις των υλικών. Σε δεύτερο επίπεδο, η καταλληλότητα συγκεκριμένων θερμοχρωμικών επιχρισμάτων για εφαρμογή συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές και τύπους κτιρίων, ενδέχεται να καθορίσει επιπλέον τόσο την έρευνα πάνω στη διαδικασία παραγωγής όσο και τον τρόπο μεταφοράς και εγκατάστασής τους, εξάγωντας πληροφορία η οποία έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τη δημιουργία των

κατάλληλων μονάδων, μέσων και εργαλείων, προκειμένου αυτή η πρακτική να περάσει στην καθημερινή πραγματικότητα της τεχνολογίας των κατασκευών.

5.3 Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι τα θερμοχρωμικά υλικά αποτελούν μία συνεχώς εξελισσόμενη κατηγορία ευφών υλικών, με σημαντικές προοπτικές εφαρμογής στον κτιριακό τομέα και ιδιαίτερα στα αδιαφανή δομικά στοιχεία του κελύφους μέσω θερμοχρωμικών επιχρισμάτων και βαφών. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η ενεργειακή τους απόδοση επηρεάζεται από πλήθος παραμέτρων, όπως οι μεταβολές των οπτικών ιδιοτήτων, η θερμοκρασία μετάβασης και οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες που προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματική λειτουργία των κτιρίων.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία ανέπτυξε ένα απλοποιημένο μοντέλο θερμικής ανάλυσης συμβατικού δώματος με εφαρμογή θεωρητικών θερμοχρωμικών επιχρισμάτων, με πεδίο εφαρμογής ένα ιδεατό κτίριο κατοικίας στην πόλη της Αθήνας. Η επιλογή θεωρητικών υλικών και προκαθορισμένων κλιματικών και κατασκευαστικών παραμέτρων επέτρεψε τη συστηματική διερεύνηση της επίδρασης των μεταβαλλόμενων οπτικών ιδιοτήτων του επιχρίσματος, εστιάζοντας στη μεταβολή της ανακλαστικότητας, της θερμοκρασίας μετάβασης και της επιθυμητής θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων κατέδειξε ότι η θερμική απόκριση του δώματος επηρεάζεται ουσιαστικά από τον συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων. Η μεταβολή της ανακλαστικότητας και της θερμοκρασίας μετάβασης επηρεάζει σημαντικά τις θερμικές ροές μέσω του δώματος και, κατ' επέκταση, τις απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου, ενώ η επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των ενεργειακών απαιτήσεων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ενεργειακή απόδοση ενός θερμοχρωμικού επιχρίσματος δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό του υλικού, αλλά εξαρτάται άμεσα από τις κλιματικές και λειτουργικές συνθήκες εφαρμογής του.

Παρά τους περιορισμούς της μελέτης, οι οποίοι σχετίζονται με τη χρήση θεωρητικών θερμοχρωμικών υλικών, την εφαρμογή απλοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου και την εξέταση ενός ιδεατού κτιρίου σε μία μόνο κλιματική περιοχή, η εργασία συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μεταβαλλόμενων οπτικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων και της θερμικής συμπεριφοράς των δωματίων, επιβεβαιώνοντας τις δυνατότητές τους ως παθητικής τεχνολογίας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων.

Μελλοντική ερευνητική προσπάθεια θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην αξιοποίηση πειραματικών δεδομένων πραγματικών θερμοχρωμικών υλικών, στη διερεύνηση διαφορετικών κλιματικών περιοχών, τύπων κτιρίων και δομικών στοιχείων, καθώς και στην ανάπτυξη πιο σύνθετων δυναμικών μοντέλων που θα λαμβάνουν υπόψη περισσότερες παραμέτρους της θερμικής συμπεριφοράς των υλικών. Η περαιτέρω εξέλιξη και αξιολόγηση των θερμοχρωμικών επιχρισμάτων αναμένεται να ενισχύσει τον ρόλο τους στον βιοκλιματικό και ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό των κτιρίων, συμβάλλοντας στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και στη βελτίωση της θερμικής άνεσης των χρηστών.

Βιβλιογραφία

1. Al-Din, S. S. M., & Saltik, B. (2025). *Regulating Indoor Comfortable Temperature Limits for Sustainable Architectural Design in Mediterranean Climates*. Buildings, 15(6). Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings15060899>
2. Apostolescu, G. A., Vizitiu, M. A., Cernatescu, C., Cobzaru, C., Tataru-Farmus, R.-E., & Apostolescu, N. (2021). *Thermochromic Materials: Oxides with Applications in Intelligent Technologies*. Universita Tehnica, 'Gheorghe Asachi' Din Iasi, 67(71). Ανακτήθηκε από https://www.bipcic.icpm.tuiasi.ro/pdf/2021/1/bipi_cic_2021_1_05.pdf
3. ASHRAE—American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2013). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2013—Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Ανακτήθηκε από <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
4. Athmani, W., Sriti, L., Dabaieh, M., & Younsi, Z. (2023). *The Potential of Using Passive Cooling Roof Techniques to Improve Thermal Performance and Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Arid Regions*. Buildings, 13. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13010021>
5. Babb, D. (2017). *PennState College of Earth and Mineral Sciences. Department of Meteorology and Atmospheric Science. Meteo 101. Understanding Weather Forecasting. The Four Laws of Radiation*. Ανακτήθηκε από https://www.e-education.psu.edu/meteo101/13_p3.html
6. Barmmparesos, N., Papadaki, D., Karalis, M., Fameliari, K., & Asimakopoulos, M. N. (2019). *In Situ Measurements of Energy Consumption and Indoor Environmental Quality of a Pre-Retrofitted Student Dormitory in Athens*. Energies, 12(11). Doi: <https://doi.org/10.3390/en12112210>
7. Butt, A. A., de Vries, S. B., Loonen, R. C. G. M., Hensen, J. L. M., Stuijver, A., van den Ham, J. E. J., & Erich, B. S. J. F. (2021). *Investigating the energy saving potential of thermochromic coatings on building envelopes*. Applied Energy, 291(116788). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116788>
8. Chasapis, D. (2015). *Laboratory exercises in physics*. Kallipos, Open Academic Editions. Doi: <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-787>
9. Crosby, P. H. N., & Netravali, A. N. (2022). *Green Thermochromic Materials: A Brief Review*. Advanced Sustainable Systems, 6(9). Doi: <https://doi.org/10.1002/adsu.202200208>
10. Dabaieh, M., Wanas, O., Hegazy, M. A., & Johansson, E. (2014). *Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal*

- performance in residential buildings. Energy and Buildings, 89(142–152). Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.034>*
11. Fattah, A. (2022). *Al-Mustansiriyah University. College of Science. Department of Atmospheric Sciences. First Course. Principle Solar Radiation. Lecture Two. Radiation Laws.* Ανακτήθηκε από https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/6/6_2022_01_27!08_03_04_PM.pdf
 12. Ferrara, M., & Bengisu, M. (2014). *Materials that Change Color Smart Materials, Intelligent Design.* Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. PoliMi Springer Briefs Ανακτήθηκε από <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-00290-3>
 13. Garshasbi, S., & Santamouris, M. (2018). *Using advanced thermochromic technologies in the built environment: Recent development and potential to decrease the energy consumption and fight urban overheating.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 191. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.10.023>
 14. Giannaros, T. M., & Melas, D. (2012). *Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece.* Atmospheric Research, 118. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.006>
 15. Görtz, J., Jürgensen, J., Stolz, D., Wieprecht, S., & Terheiden, K. (2022). *Energy load prediction on structures and buildings-Effect of numerical model complexity on simulation of heat fluxes across the structure/environment interface.* Applied Energy, 326. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119981>
 16. Granadeiro, V., Almeida, M., Souto, T., Leal, V., Machado, J., & Mendes, A. (2020). *Thermochromic Paints on External Surfaces: Impact Assessment for a Residential Building through Thermal and Energy Simulation.* Energies, 13(8). Doi: <https://doi.org/10.3390/en13081912>
 17. Hakami, A. (2024). *Impact of Various Thermochromic Materials for Thermal Storage Applications on Multilayer Thin Film Coatings.* 8th International Conference on Energy Harvesting, Storage, and Transfer (EHST 2024), Toronto, Canada. Doi: <https://doi.org/10.11159/ehst24.131>
 18. Hidalgo-Araujo, A. C., Salomao, R., & Berardi, U. (2025). *Thermochromic materials for building Applications: Overview through a bibliometric analysis.* Solar Energy, 293. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113491>
 19. Hossain, S., Sadoh, A., & Ravindra, N. M. (2023). *Principles, properties and preparation of thermochromic materials.* Material Science & Engineering International Journal, 7(3). Doi: <https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00218>
 20. Hu, C., Fukuda, H., Liu, F., & Gao, Y. (2025). *Optimization of thermochromic materials parameters to improve energy efficiency in hot summer and cold winter regions.* Case Studies in Thermal Engineering, 72(106354). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106354>

21. Hu, C., Ge, L., & Meng, X. (2024). *Applications of thermochromic material in opaque building envelopes: A comprehensive review*. *Materials Today Sustainability*, 28(101009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.101009>
22. Ji, S., Wang, M., Chengdong, S., Zou, Y., & Gao, J. (2025). *Preparation and performance of thermochromic solid-solid phase change materials based on negative photochromic spiropyran*. *Polymer*, 318. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127995>
23. Kailas, S. V. (2015). *Material Science. IISc Bangalore courses. Chapter 17. Optical Properties*. Indian Institute of Science. Ανακτήθηκε από <https://nptel.ac.in/courses/112108150>
24. 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>
25. Karlessi, T., & Santamouris, M. (2013). *Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions*. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1). Doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt027>
26. Kitsopoulou, A., Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2024). *An Up-to-Date Review of Passive Building Envelope Technologies for Sustainable Design*. *Energies*, 17(16). Doi: <https://doi.org/10.3390/en17164039>
27. 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108570>
28. Kontoleon, K. J., Saboor, S., Mazzeo, D., Ahmad, J., & Cuce, E. (2022). *Thermal sensitivity and potential cooling-related energy saving of masonry walls through the lens of solar heat-rejecting paints at varying orientations*. *Applied Energy*, 329. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120264>
29. Kozlenko, A. S., Ozhogin, I. V., Pugachev, A. D., Lukyanova, M. B., El-Sewify, I. M., & Lukyanov, B. S. (2023). *A Modern Look at Spiroprans: From Single Molecules to Smart Materials*. *Topics in Current Chemistry*, 381(8). Doi: <https://doi.org/10.1007/s41061-022-00417-2>
30. Liu, S., Li, Y., Wang, Y., Yu, K. M., Huang, B., & Tso, C. Y. (2022). *Near-Infrared-Activated Thermochromic Perovskite Smart Windows*. *Advanced Science*, 9(14). Doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202106090>
31. 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102916>

32. Liu, S., Wang, J., & 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. Doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac118>
33. Mansouri, K., & Sriti, L. (2019). *The Effects of Envelope Building Materials on Thermal Comfort and Energy Consumption. Case of Hot and Dry Climate*. 2nd International Conference on Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2019), Alanya, Turkey. Doi: <https://doi.org/10.38027/ICCAUA20190013>
34. Mazzeo, D., & Kontoleon, K. J. (2020). *The role of inclination and orientation of different building roof typologies on indoor and outdoor environment thermal comfort in Italy and Greece*. Sustainable Cities and Society, 60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102111>
35. Mishra, D. K., Singha, U. K., Das, A., Dutta, S., Kar, P., Chakraborty, A., Sen, A., & Sinha, B. (2018). *DNA Binding, amelioration of oxidative stress, and molecular docking study of Zn(II) metal complex of a new Schiff base ligand*. Journal of Coordination Chemistry, 7(14). Doi: <https://doi.org/10.1080/00958972.2018.1476687>
36. Mohamad Hata, R., Hassan, R., Arshad, F., & Idayu, H. (2016). *Effect of Solar Radiation to the Building Materials Properties: A Review*. Scientific Research Journal, 13. Doi: <https://doi.org/10.24191/srj.v13i2.5450>
37. Mostoni, S., & Nisticò, R. (2025). *New Advances into Nanostructured Oxides, 2nd Edition*. Inorganics, 13(2). Doi: <https://doi.org/10.3390/inorganics13020060>
38. Nagare, S. M., Hakami, A., Biswas, P. K., Stefanakos, E. K., & Srinivasan, S. S. (2024). *A review of thermochromic materials for coating applications: Production, protection, and degradation of organic thermochromic materials*. Journal of Coatings Technology and Research, 22. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11998-024-00982-9>
39. Olofsson, T., Anders Ohlsson, K. E., & Östin, R. (2017). *Measurement of the environmental temperature using the sol-air thermometer*. Energy Procedia, 132(357–362). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.632>
40. Omer, N. K., Zamel, R. S., & Hussein, A. M. A. (2020). *Study the effect of gamma-ray irradiation on the optical properties of HgI₂ thin film using method solvent evaporation*. Physica Scripta, 96(1). Doi: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/abc982>
41. Paravantis, J. A., & Santamouris, M. (2015). *An analysis of indoor temperature measurements in low- and very-low-income housing in Athens, Greece*. Advances in Building Energy Research, 10(1). Doi: <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1014842>

42. Perez, G., Mota-Heredia, C., Sánchez-García, J. A., & Guerrero, A. (2020). *Compatibility between thermochromic pigments and Portland cement-based materials*. Construction and Building Materials, 251. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119038>
43. Pérez, G., Serra, V., Garshasbi, S., Favoino, F., Sirvent, P., Shah, K. W., La Roche, P., Galán, I., & Santamouris, M. (2021). *Innovative approaches to thermochromic materials for adaptive building envelopes*. Journal of Physics: Conference Series. 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021). Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012132>
44. Rawat, M., & Singh, R. N. (2021). *A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions*. Energy and Built Environment, 3(3). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>
45. Sánchez, E. C., & Vilà, D. M. (2022). *Thermochromic Materials as Passive Roof Technology: Their Impact on Building Energy Performance*. Energies, 15(6). <https://doi.org/10.3390/en15062161>
46. Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2020). *Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island*. Renewable Energy, 161. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109>
47. Song, G., Zhang, K., Zhang, Y., Jiao, S., & Gong, Y. (2025). *A temperature-adaptive radiative cooling coating enabled by thermochromic powders for all-season building energy savings*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 83. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104649>
48. Soudian, S., Berardi, U., & Laschuk, N. O. (2020). *Effects of Long-Term UV Exposure on the Performance of Cement Plasters Integrated with Thermochromic Paint and PCMs for Building Facade Applications*. XV International Conference on Durability of Building Materials and Components DBMC 2020, Barcelona, Barcelona, Spain. Doi: <https://doi.org/10.23967/dbmc.2020.163>
49. Spentzou, E., Cook, M., & Emmitt, S. (2013). *Enhancing Indoor Comfort in Existing Apartment Buildings in Athens Using Natural Ventilation*. 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Ανακτήθηκε από https://www.researchgate.net/publication/267310144_Enhancing_Indoor_Comfort_in_Existing_Apartment_Buildings_in_Athens_Using_Natural_Ventilation
50. Sreekumar, A., Manoj, K. K., Priyanka, S., Parvathy, P. S., & Sivan, A. (2024). *Fluorene-based Schiff bases with potent absorption and emissive characteristics*. Materials Today. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.088>
51. Stasiek, J. A., & Kowalewski, T. A. (2002). *Thermochromic liquid crystals applied for heat transfer research*. Opto-Electronics Review, 10(1). Doi: <https://doi.org/10.1117/12.472179>

52. Tatíčková, Z., Kudlaček, J., Zoubek, M., & Kuchař, J. (2023). *Behaviour of Thermochromic Coatings under Thermal Exposure*. *Coatings*, 13(3). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13030642>
53. Tsilingiridis, G., & Sotiropoulos, V. (1998). *Three-year measurements of ambient and indoor air temperatures in Solar Village-3, Athens, Greece*. *Energy and Buildings*, 28(127–136). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00017-6)
54. Van Lith, R., Entrop, A. G. (Bram), & Halman, J. I. M. (2018). *Assessment of the thermal performance of holistic flat roof systems of industrial buildings*. *Journal of Construction Engineering Management & Innovation*, 1. Doi: <https://doi.org/10.31462/jcemi.2018.01001017>
55. Xu, G., Lu, Y., Zhou, X., Moloto, N., Liu, J., Kure-Chu, S.-Z., Hihara, T., Zhang, W., & Sun, Z. (2024). *Thermochromic hydrogel-based Energy Efficient Smart Windows: Fabrication, Mechanisms, and Advancements*. *Materials Horizons*, 11(20). Doi: <https://doi.org/10.1039/D4MH00903G>
56. Ziaemehr, B., Jandaghian, Z., Ge, H., Lacasse, M., & Moore, T. (2023). *Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review*. *Buildings*, 13. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>
57. Κατσαφάδος, Π. (2025). *Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο. Τμήμα Γεωγραφίας. Διαλέξεις. Κλιματική Αλλαγή*. Ανακτήθηκε από <https://eclass.hua.gr/modules/document/file.php/GEO131/Διαλέξεις-Lectures/Katsafados.climatechange.v2025.pdf>
58. Κονταρίδης, Δ. (2022). Πανεπιστήμιο Πατρών. *Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα. Φυσικοχημεία I. Ενότητα 2 Αδυναμίες της Κλασικής Μηχανικής*. Ανακτήθηκε από <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CMNG2172/Αδυναμίες%20της%20Κλασικής%20Μηχανικής/2-Αδυναμίες%20της%20Κλασικής%20Μηχανικής.pdf>
59. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. (2017). *Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017. Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των Κτηρίων*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Ορυκτών Πρώτων Υλών. Ανακτήθηκε από http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak/files/TOTEE_20701-2_2017_TEE_1st_Edition.pdf

Πηγές Εικόνων και Πινάκων

Εικόνες

Εικόνα 1: *Urban Heat Island Diagram* [διάγραμμα]. (2023). greenrooforganization.org. Ανακτήθηκε από <https://www.greenrooforganisation.org/2023/06/23/green-roofs-and-the-urban-heat-island-effect/>

Εικόνα 2: Παπαγεωργίου Δ. (2026). *Τα βασικά ζητήματα θερμικής και περιβαλλοντικής απόκρισης των κτιριακών κελυφών* [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 3: Παπαγεωργίου Δ. (2026). *Οι βασικές οπτικές ιδιότητες ενός υλικού* [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 4: *Total emitted energy of a black body as a function of its temperature* [διάγραμμα]. (2026). Wikipedia. Ανακτήθηκε από https://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law

Εικόνα 5: *Wien's displacement law showing the relationship between emitted radiation and the temperature of a black body* [διάγραμμα]. (2024). sun.org. Ανακτήθηκε από <https://www.sun.org/encyclopedia/black-body-radiation>

Εικόνα 6: Παπαγεωργίου Δ. (2026). *Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής απορροφητικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών A και B σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας* [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 7: Παπαγεωργίου Δ. (2026). *Γράφημα ενδεικτικής μεταβολής ανακλαστικότητας δυο θεωρητικών-τυχαίων θερμοχρωμικών υλικών A και B σε αδιαφανές δομικό στοιχείο, συναρτήσει της θερμοκρασίας στη χρονική διάρκεια μιας ημέρας* [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 8: 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108570> Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης απαιτήσεων σε ενέργεια ψύξης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος [διάγραμμα]

Εικόνα 9: 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108570> Διάγραμμα ποσοστιαίας αύξησης απαιτήσεων σε ενέργεια θέρμανσης που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος [διάγραμμα]

Εικόνα 10: 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108570> Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος (για θέρμανση και ψύξη) που προκύπτει από την εφαρμογή θερμοχρωμικού επιχρίσματος με ελάχιστη ανακλαστικότητα 0.42 και μέγιστη ανακλαστικότητα 0.72, σε 5 διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών μετάβασης (TC), το οποίο εφαρμόζεται σε δώμα κατοικίας στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, με 15 διαφορετικούς συντελεστές θερμοπερατότητας δώματος [διάγραμμα]

Εικόνα 11: 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102916> Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 25°C [διάγραμμα]

Εικόνα 12: 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). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102916> Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής ανακλαστικότητας δοκιμαστικών δειγμάτων θερμοχρωμικού επιχρίσματος σε διαφορετικές αποχρώσεις, με θερμοκρασία μετάβασης 33°C [διάγραμμα]

Εικόνα 13: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα υπόδειξης βασικών μεγεθών και θερμικών ροών μεταξύ δώματος, εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και της θέσης του θερμοχρωμικού υλικού [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 14: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 25°C, στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 15: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ωρών διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού επιχρίσματος με θερμοκρασία μετάβασης 30°C, στον κύκλο μιας ημέρας (24 ώρες) για όλα τα ισχύοντα σενάρια [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 16: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 17: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή συμβατικού επιχρίσματος τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 18: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Απρίλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 19: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Απρίλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 20: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Οκτώβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 21: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Οκτώβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 22: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Μάιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 23: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Μάιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 24: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Σεπτέμβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 25: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Σεπτέμβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 26: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούνιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 27: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούνιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 28: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Ιούλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 29: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Ιούλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 30: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 25°C το μήνα Αύγουστο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 31: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα ισοδύναμης θερμοκρασίας – ώρας τυπικής ημέρας για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων με θερμοκρασία μετάβασης 30°C το μήνα Αύγουστο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 32: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιανουάριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 33: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Φεβρουάριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 34: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Μάρτιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 35: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Νοέμβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 36: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Δεκέμβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 37: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Απρίλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 38: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Οκτώβριο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 39: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούνιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 40: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρισμάτων το μήνα Ιούλιο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 41: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας-σεναρίων υλικών, για την εφαρμογή όλων των διαφορετικών επιχρίσμάτων το μήνα Αύγουστο [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 42: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 43: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του συμβατικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 44: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 45: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,5$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 46: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 47: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,4 \rightarrow 0,6$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 48: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 49: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,7$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 50: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:25^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 51: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα μηνιαίου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας– μηνών έτους, για την εφαρμογή του θερμοχρωμικού επιχρίσματος με $\rho_{sol}:0,6 \rightarrow 0,8$ σε $T_{tr}:30^{\circ}\text{C}$ [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Εικόνα 52: Παπαγεωργίου Δ. (2026). Διάγραμμα συνολικού ετήσιου απαιτούμενου φορτίου ενέργειας για την εφαρμογή όλων των επιχρισμάτων [διάγραμμα] Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Πίνακες

Πίνακας 1: *Βασικές οπτικές ιδιότητες οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία* [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Stasiek & Kowalewski, 2022), (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Mishra et al., 2018), (Perez et al., 2020), (Apostolescu et al., 2021), (Crosby & Netravali, 2022), (Hossain et al., 2023), (Kozelnko et al., 2023), (Nagare et al., 2024), (Sreekumar et al., 2024), (Hidalgo-Araujo, et al., 2025), (Ji et al., 2025).

Πίνακας 2: *Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά οργανικών θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία* [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Stasiek & Kowalewski, 2022), (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Mishra et al., 2018), (Perez et al., 2020), (Apostolescu et al., 2021), (Crosby & Netravali, 2022), (Hossain et al., 2023), (Kozelnko et al., 2023), (Nagare et al., 2024), (Sreekumar et al., 2024), (Hidalgo-Araujo, et al., 2025), (Ji et al., 2025).

Πίνακας 3: *Βασικές οπτικές ιδιότητες ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία* [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Ferrara & Bengisu, 2014), (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Omer et al., 2020), (Apostolescu et al., 2021), (Pérez et al., 2021), (Crosby & Netravali, 2022), (Xu et al., 2024), (Hidalgo-Araujo et al., 2025), (Mostoni & Nisticò, 2025), (Song et al., 2025).

Πίνακας 4: *Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά ανόργανων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία* [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και

δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Ferrara & Bengisu, 2014), (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Omer et al., 2020), (Apostolescu et al., 2021), (Pérez et al., 2021), (Crosby & Netravali, 2022), (Xu et al., 2024), (Hidalgo-Araujo et al., 2025), (Mostoni & Nisticò, 2025), (Song et al., 2025).

Πίνακας 5: Βασικές οπτικές ιδιότητες σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Perez et al., 2020), (Soudian et al., 2020), (Crosby & Netravali, 2022), (Liu et al., 2022), (Hossain et al., 2023), (Nagare et al., 2024), (Hidalgo-Araujo et al., 2025).

Πίνακας 6: Βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά σύνθετων θερμοχρωμικών υλικών στη διεθνή βιβλιογραφία [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Garshasbi & Santamouris, 2018), (Perez et al., 2020), (Soudian et al., 2020), (Crosby & Netravali, 2022), (Liu et al., 2022), (Hossain et al., 2023), (Nagare et al., 2024), (Hidalgo-Araujo et al., 2025).

Πίνακας 7: Επιθυμητή θερμοκρασία άνεσης εσωτερικού χώρου (*Tindoor*) [$^{\circ}\text{C}$] κατοικίας στην Αθήνα σε μια τυπική μέρα για κάθε μήνα του έτους [πίνακας]. Ο πίνακας αποτελεί σύνθεση στοιχείων από τη βιβλιογραφία και δημιουργήθηκε από τον συγγραφέα βάσει δεδομένων των αναφερόμενων μελετών: (Tsilingiridis & Sotiropoulos, 1998), (Spentzou et al., 2013), (Paravantis & Santamouris, 2015), (Barmmparesos et al., 2019), (Al-Din & Saltik, 2025).

Πίνακας 8: Ενεργοποίηση-επαναφορά αλλαγής απόχρωσης θερμοχρωμικού υλικού για μια τυπική ημέρα από κάθε μήνα του έτους [πίνακας]. Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Πίνακας 9: Ώρες διάρκειας αλλαγής απόχρωσης και ανακλαστικότητας θερμοχρωμικού υλικού για όλα τα ισχύοντα σενάρια [πίνακας]. Ιδία επεξεργασία, προσωπικό αρχείο.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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