ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διερεύνηση ενεργειακής απόδοσης και θερμικής άνεσης σε κατοικίες μέσω επεξεργασίας χρονοσειρών μετρήσεων ενεργειακής κατανάλωσης και ιδιοτήτων εσωτερικού αέρα

Σταύρος Ιλτσίδης
Μητρώο Σπουδαστή: ΤΜ20013

Γεώργιος Μιχ. Σταυρακάκης, Επίκ. Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Επιβλέπων Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντά μου επίκουρο καθηγητή **Σταυρακάκη Γεώργιο** για την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Προϊστάμενο του Τμήματος Περιβάλλοντος κο. Εμμανουήλ Φωτάκη Περιβαλλοντολόγο MSc του Δήμου Ηρακλείου, καθώς και τον Δήμο Ηρακλείου για την εμπιστοσύνη τους στην παροχή των δεδομένων για την εκπόνηση της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας για τις χρήσιμες συζητήσεις και τα πολύτιμα σχόλια, καθώς και τους ενοίκους των κατοικιών που συμμετείχαν στην καταγραφή δεδομένων. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την συνεχή παρουσία τους, αλλά και την ενθάρρυνση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης σε κατοικίες, στο Ηράκλειο Κρήτης. Κίνητρο για την παρούσα έρευνα αποτελεί η αυξανόμενη ανάγκη περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας και του ανθρακικού αποτυπώματος του κτηριακού τομέα, που στην Ευρωπαϊκή Ένωση αντιπροσωπεύει περίπου το 40% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης. Η θερμική άνεση εξετάζεται με βάση το καθιερωμένο μοντέλο Predicted Mean Vote/Predicted Percentage of Dissatisfied (PMV/PPD) του Fanger, το οποίο αποτελεί θεμέλιο για τα διεθνή πρότυπα ASHRAE 55, ISO 7730 και EN 15251. Η μεθοδολογία αφορά στην υπολογιστική επεξεργασία παραμέτρων κατανάλωσης ενέργειας και ιδιοτήτων εσωτερικού αέρα σε κατοικίες, οι οποίες βρίσκονται διαθέσιμες από την καταγραφή δεδομένων από οκτώ κατοικίες (τέσσερις το καλοκαίρι και τέσσερις τον χειμώνα), που κατέγραφαν ωριαία την εσωτερική θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και την ηλεκτρική κατανάλωση. Για σκοπούς ερμηνείας των μετρήσεων ιδιοτήτων αέρα με όρους θερμικής άνεσης αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο του προτύπου Predicted Mean Vote και αναπτύχθηκαν χρονοσειρές, διαγράμματα και χρονικές κατανομές του δείκτη PMV σε μορφή θερμικού χάρτη, ενώ εφαρμόστηκαν διαδικασίες κανονικοποίησης και πολυωνυμικής παλινδρόμησης για την ποσοτική διερεύνηση της σχέσης κατανάλωσης και θερμικής άνεσης. Τα αποτελέσματα εμφάνισαν μια μη γραμμική, καμπανοειδή σχέση μεταξύ δείκτη PMV και κατανάλωσης ενέργειας. Το καλοκαίρι η μέγιστη κατανάλωση παρατηρείται σε τιμές του δείκτη PMV = +1 έως +1.5, ενώ τον χειμώνα σε PMV = −1 έως −0.5, γεγονός που καταδεικνύει την μεγαλύτερη ανεπάρκεια των συστημάτων ψύξης να καλύψουν τις ανάγκες θερμικής άνεσης σε σχέση με τα συστήματα θέρμανσης την περίοδο του χειμώνα. Το προηγούμενο αποδεικνύεται και από τις χρονικές κατανομές του δείκτη PMV όπου προκύπτει μεγαλύτερη απόκλιση από τα επίπεδα θερμικής άνεσης την θερινή περίοδο. Οι χάρτες θερμότητας έδειξαν μικρή απόκλιση από τη ζώνη άνεσης κατά τη θερινή περίοδο, ενώ τον χειμώνα οι κατοικίες διατηρούνται πιο συχνά εντός αποδεκτών ορίων. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η συμπεριφορά των ενοίκων επηρεάζει καθοριστικά την ενεργειακή χρήση, καθώς συχνά όταν η δυσφορία έχει ήδη εμφανιστεί, τότε ενεργοποιούνται τα συστήματα θέρμανσης ή ψύξης, οδηγώντας σε αργοπορημένη απόκριση σε σχέση με τις θεωρητικές προβλέψεις.

Η συμβολή της εργασίας εστιάζεται παρακάτω:

1. Παρουσιάζει μια αναπαραγώγιμη μεθοδολογία υπολογισμού δεικτών άνεσης από επεξεργασία χρονοσειρών μετρήσεων θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού αέρα με χρήση Excel και Python.

2. Τεκμηριώνει, σε μεσογειακές συνθήκες, την απόκλιση του PMV από τις πραγματικές συνθήκες και την προσαρμοστική συμπεριφορά των ενοίκων.
3. Εισάγει καμπύλες αναφοράς που συνδέουν με διαφορετικούς τρόπους την κατανάλωση ενέργειας με τον δείκτη PMV, χρήσιμη για τον σχεδιασμό και την ενεργειακή διαχείριση κατοικιών.

Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι η βέλτιστη ενεργειακή στρατηγική δεν είναι η αυστηρή διατήρηση ουδετερότητας (PMV = 0), αλλά η αποδοχή ελαφρών αποκλίσεων που συνάδουν με την προσαρμοστικότητα των ενοίκων. Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη προσφέρει μια διαδεδομένη μεθοδολογία υπολογισμού δείκτη θερμικής άνεσης, θέτοντας βάση για την εξαγωγή βασικών εξισώσεων πρόβλεψης των αναμενόμενων συνθηκών θερμικής άνεσης από την ενεργειακή κατανάλωση του κτηριακού τομέα στο Ηράκλειο.

Λέξεις-κλειδιά: Θερμική άνεση, Δείκτης PMV/PPD, Κατανάλωση ενέργειας, Κατοικίες, Μεσογειακό κλίμα, Αισθητήρες χαμηλής παρεμβατικότητας, Ενεργειακή απόδοση

ABSTRACT

This thesis investigates the relationship between thermal comfort and electricity use in dwellings under the Mediterranean climate of Heraklion, Crete. The motivation stems from the pressing need to reduce energy demand and carbon emissions in the building sector, which accounts for a substantial share of Europe's energy use. Thermal comfort is assessed through the established Predicted Mean Vote / Predicted Percentage of Dissatisfied (PMV/PPD) framework introduced by Fanger and embedded in the ASHRAE 55, ISO 7730 and EN 15251 standards. The methodology concerns the computational processing of energy consumption parameters and indoor air properties in residential buildings, which are available from the recording of data from eight residential buildings (four in summer and four in winter), which recorded hourly indoor temperature, relative humidity and electricity consumption. For the purpose of interpreting air quality measurements in terms of thermal comfort, a computational model of the Predicted Mean Vote model was developed and time series, diagrams and time distributions of the PMV index in the form of a heat map were developed, while normalization and polynomial regression procedures were applied for the quantitative investigation of the relationship between consumption and thermal comfort. To quantify the comfort consumption linkage, normalization procedures and polynomial regressions were applied across bands of outdoor temperature. Results reveal a clear non-linear, bell-shaped relation between PMV and electricity use. In summer, peak consumption occurs in PMV values from +1 to +1.5, whereas in winter it occurs in PMV values from −1 to −0.5. The heat maps showed a small deviation from the comfort zone during the summer period, while in winter the residences are more often kept within acceptable limit. Temporal heatmaps show departures from the comfort zone during summer, while winter conditions remain more frequently within acceptable limits. Occupant behaviour plays a decisive role, explaining systematic deviations from idealized PMV-based predictions, because of the HVAC often activated once discomfort is already perceived (delayed response).

The contribution of the work is focused on the following:

1. It presents a reproducible methodology for calculating comfort indices from processing time series of temperature and relative humidity measurements of indoor air using Excel and Python.
2. empirical evidence, under Mediterranean conditions of adaptive occupant responses and PMV deviations in lived-in homes.

3. It introduces reference curves that link energy consumption to the PMV index in different ways, useful for the design and energy management of homes.

Findings suggest that strictly maintaining PMV = 0 is neither behaviourally realistic nor necessarily energy optimal. Instead, accepting modest deviations aligned with occupant adaptability can achieve "comfort with minimal energy." In this context, the study offers a widespread methodology for the calculation of thermal comfort index, laying the basis for the extraction of basic equations for the prediction of the expected thermal comfort conditions from the energy consumption of the building sector of Heraklion.

Keywords: Thermal comfort, PMV/PPD index, Energy consumption, Residential buildings, Mediterranean climate, Low-intrusive sensors, Energy performance

ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

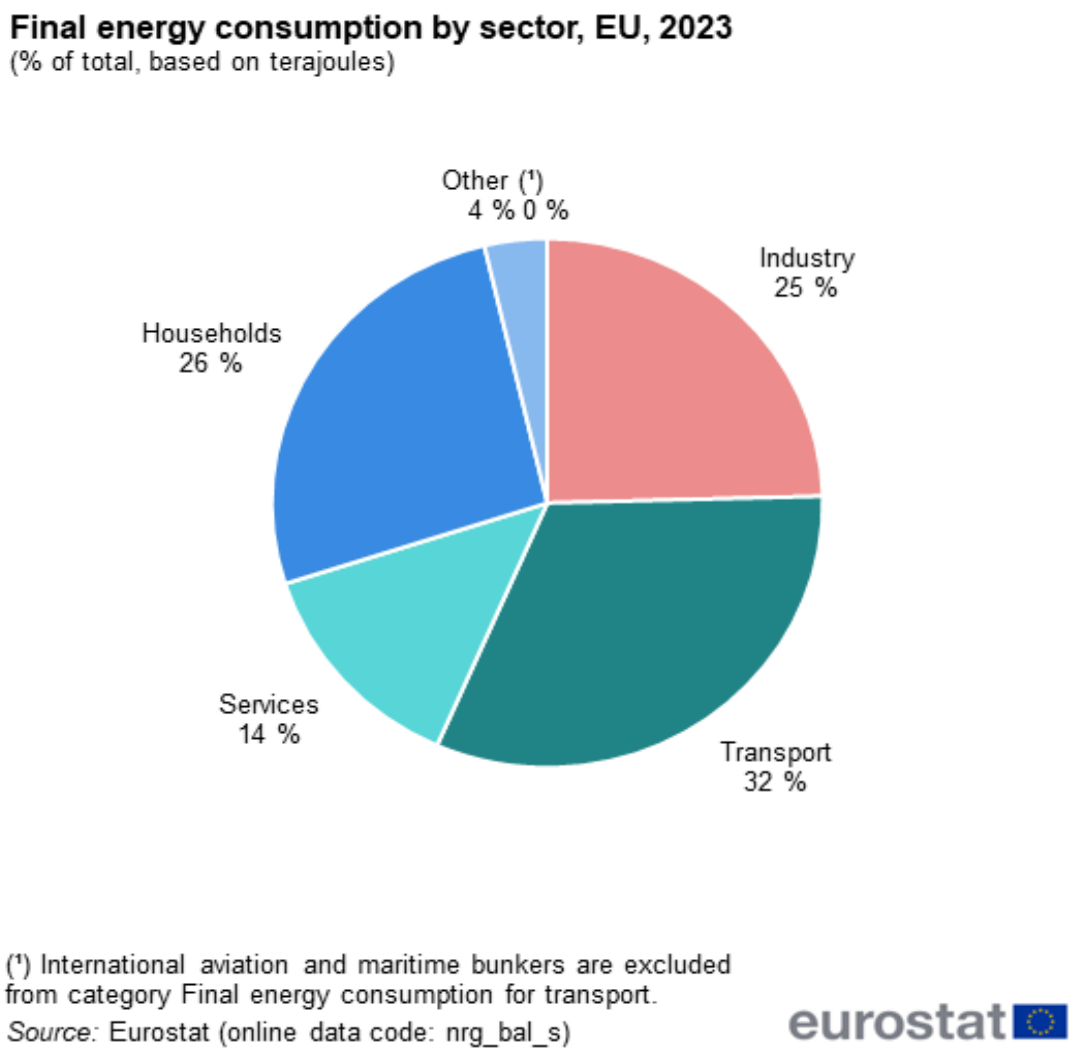
PMV	Predicted Mean Vote – Μέση Αναμενόμενη Θερμική Αποδοχή
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied – Προβλεπόμενο Ποσοστό Δυσφορίας.
MET	Metabolic Rate (M) – Ρυθμός μεταβολισμού του ανθρώπου.
CLO	Clothing Insulation – Θερμική μόνωση ενδυμασίας.
MRT	Mean Radiant Temperature – Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία.
ANSI	American National Standards Institute – Αμερικανικό Ινστιτούτο Εθνικών Προτύπων.
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Αμερικανική Ένωση Μηχανικών Θέρμανσης, Ψύξης και Κλιματισμού.
ISO	International Organization for Standardization – Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης.
EN	European Norm – Ευρωπαϊκό Πρότυπο.
IoT	Internet of Things – Διαδίκτυο των Πραγμάτων.
RFID	Radio-Frequency Identification – Αναγνώριση μέσω ραδιοσυχνοτήτων.
IEA EBC	International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities Programme – Πρόγραμμα της Διεθνούς Ενεργειακής Υπηρεσίας για Ενέργεια σε Κτίρια και Κοινότητες.
T_out	Εξωτερική θερμοκρασία αέρα (°C)
T_mrt	Μέση θερμοκρασία από ακτινοβολία(°C)
T_band1	Θεωρούμενο Εύρος Εξωτερικής Θερμοκρασίας 1 (°C)
T_band2	Θεωρούμενο Εύρος Εξωτερικής Θερμοκρασίας 2 (°C)
T_band3	Θεωρούμενο Εύρος Εξωτερικής Θερμοκρασίας 3 (°C)
E	Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά μονάδα Επιφάνειας (kWh/m^2)

Πίνακας Περιοχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3
ABSTRACT 5
ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ 8
1. Εισαγωγή 10
2. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας 13
2.1. Δείκτης PMV και Μεθοδολογία Fanger 13
2.2. Πρότυπα Θερμικής Άνεσης: ASHRAE 55, ISO 7730 και EN 15251 14
2.3. Έρευνες Πεδίου σε Πραγματικές Κατοικίες και Επικύρωση του PMV 16
2.4. Θεωρητική εναντίον Πραγματική Ενεργειακή Συμπεριφορά και Θερμική Άνεση 17
2.5. Επίδραση της Συμπεριφοράς των Χρηστών σε Θερμική Άνεση και Κατανάλωση . 19
2.6. Χρήση Χαμηλής Παρεμβατικότητας Αισθητήρων σε In-Situ Μελέτες 20
3. Αντικείμενο της Εργασίας και Μεθοδολογία 22
3.1. Αντικείμενο της Εργασίας 22
3.2. Περιοχή Μελέτης και Περιγραφή Κατοικιών 23
3.2.1. Κλιματικά χαρακτηριστικά Ηρακλείου Κρήτης 23
3.2.2. Πολεοδομικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά 25
3.2.3. Περιγραφή των υπό μελέτη κατοικιών 27
3.3. Μεθοδολογία Καταγραφής Δεδομένων και Περιγραφή Μεταβλητών 30
3.4. Υπολογιστικές τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων 32
3.4.1. Υπολογισμός Δεικτών Θερμικής Άνεσης (PMV/PPD) – Μεθοδολογία 32
3.4.2. Επεξεργασία χρονοσειρών κατανάλωσης ενέργειας και PMV 37
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων 43
4.1. Διαγράμματα Χρονοσειρών (Time series plots) 43
4.2. Χρονικοί Θερμοχάρτες (Temporal heatmaps) 46
4.3. Εβδομαδιαία Διαγράμματα 52
4.4. Καμπυλόγραμμα Διαγράμματα 58
4.5. Ανάπτυξη μοντέλων συσχέτισης της κατανάλωσης ενέργειας και της θερμικής ενέργειας με παλινδρόμηση 64
5. Συμπεράσματα Συζήτηση αποτελεσμάτων και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα. 80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Υπολογιστικά εργαλεία Excel (Macros – VBA) 88
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας Αναπαραγωγής Διαγραμμάτων 107

1. Εισαγωγή

Η επιταχυνόμενη κλιματική αλλαγή, αποτέλεσμα των αυξημένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ασκεί πιέσεις για ριζικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας και το ανθρακικό αποτύπωμα όλων των τομέων. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ειδικότερα, ο κτηριακός τομέας καταναλώνει περίπου 40% (βλ. Εικόνα 1) της συνολικής ενέργειας και εκπέμπει το 36% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με την ενέργεια [1]. Είναι φανερό ότι οποιαδήποτε στρατηγική αντιμετώπισης της κλιματικής κρίσης και της ενεργειακής αστάθειας περνάει μέσα από τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και τη μείωση της κατανάλωσης στα νοικοκυριά [2]. Η επίτευξη αυτής της κατάστασης δεν είναι μόνο ζήτημα ποιότητας ζωής αλλά αποτελεί και οικονομική προτεραιότητα, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση ενός κτιρίου συνδέεται άμεσα με τις απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη προκειμένου να διατηρηθεί η θερμική άνεση. Είναι λοιπόν σημαντικό να συνδυαστεί η μείωση της ενεργειακής χρήσης με τη διατήρηση ή βελτίωση της θερμικής άνεσης των χρηστών [3], προκειμένου οι παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας να καθίστανται βιώσιμες και αποδεκτές.



Εικόνα 1. Τελική ενεργειακή κατανάλωση κατά τομέα.

Το μοντέλο PMV αναπτύχθηκε από τον Fanger και αποτελεί σήμερα το πλέον διαδεδομένο εργαλείο για την αξιολόγηση των συνθηκών θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους [4]. Βασίζεται στη συσχέτιση αντικειμενικών μετρήσεων του περιβάλλοντος με την υποκειμενική θερμική αίσθηση των χρηστών, προβλέποντας τη μέση θρμική αποδοχή μιας μεγάλης ομάδας ατόμων σε μια επτάβαθμη κλίμακα θερμικής αίσθησης, από το -3 ψυχρό έως το +3 θερμό, με το 0 να αντιπροσωπεύει τη θερμική ουδετερότητα [5]. Στόχος των μελετών θερμικής άνεσης είναι συχνά η διατήρηση του PMV σε ένα αποδεκτό εύρος. Πρέπει να σημειωθεί ότι, παρά τη γενική αποδοχή και χρησιμότητά του, ο δείκτης PMV δεν μπορεί να συλλάβει πλήρως την πολυπλοκότητα της ανθρώπινης θερμικής αντίληψης σε πραγματικές συνθήκες. Πολλές σύγχρονες έρευνες πεδίου έχουν δείξει ότι η θερμική άνεση των χρηστών επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, όπως τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κτιρίου, οι εκάστοτε συνθήκες του μικροκλίματος και κυρίως οι συνήθειες, η

ψυχολογία και προτιμήσεις των ενοίκων [3]. Με άλλα λόγια, η πραγματική θερμική ικανοποίηση των χρηστών συχνά αποκλίνει από την προβλεπόμενη μέσω PMV όταν δεν συνυπολογίζονται οι δυναμικές συμπεριφορές των ενοίκων. Αυτός είναι και ο λόγος που η εμπειρική διερεύνηση της θερμικής άνεσης σε πραγματικά κατοικημένους χώρους είναι απαραίτητη, ώστε να μπορούν να καταγραφούν οι αυθεντικές αντιδράσεις και προτιμήσεις των ανθρώπων στο φυσικό τους περιβάλλον.

Οι μελέτες πεδίου σε πραγματικά κτίρια αποτελούν πολύτιμο εργαλείο, καθώς επιτρέπουν την ακριβή αξιολόγηση της θερμικής άνεσης μέσω της άμεσης συλλογής στοιχείων από τους ίδιους τους χρήστες στους χώρους όπου ζουν και εργάζονται [6]. Συσκευές μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους μπορούν πλέον να εγκατασταθούν σε κατοικίες χωρίς να διαταράσσουν την καθημερινότητα των ενοίκων, καταγράφοντας ωριαία δεδομένα όπως η εσωτερική θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η κατανάλωση ενέργειας. Ο συνδυασμός αντικειμενικών μετρήσεων και υποκειμενικών αναφορών προσφέρει ένα ικανοποιητικό δεδομένο για την θερμική άνεση. Από τη μια πλευρά καταγράφεται η πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου και οι περιβαλλοντικές συνθήκες και από την άλλη, τεκμηριώνεται ο βαθμός ικανοποίησης ή δυσφορίας των ενοίκων. Στο πλαίσιο αυτό, αποκτά ξεχωριστή σημασία η μελέτη θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικές κατοικίες.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο για τη μετατροπή των χρονοσειρών ιδιοτήτων εσωτερικού αέρα στον δείκτη θερμικής άνεσης «Μέση Αναμενόμενη Θερμική Αποδοχή» (Predicted Mean Vote, PMV). Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιαστεί μια μεθοδολογία και να τεθούν οι βάσεις για την εξαγωγή βασικών εξισώσεων πρόβλεψης των αναμενόμενων συνθηκών θερμικής άνεσης από δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης σε κτήρια κατοικιών. Άξιο να αναφερθεί ακόμη είναι η διερεύνηση σε πραγματικές κατοικίες με χρήση χαμηλής παρεμβατικότητας αισθητήρων, η οποία δεν είναι μόνο τεχνικά εφικτή, αλλά και κοινωνικά ωφέλιμη, καθώς ευθυγραμμίζεται με την ανάγκη ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης των πολιτών σχετικά με την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Παράλληλα, η διανομή ερωτηματολογίων στους ενοίκους για την αποτίμηση της θερμικής άνεσης και των συνηθειών τους, όπως έχει αποδειχθεί και σε προηγούμενες μελέτες, μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες υπό μη-ελεγχόμενες συνθήκες διαβίωσης [7], φωτίζοντας την πραγματική σχέση μεταξύ θερμικής άνεσης και κατανάλωσης ενέργειας στα σύγχρονα νοικοκυριά.

Συνοψίζοντας, η αντιμετώπιση της κλιματικής και ενεργειακής κρίσης απαιτεί την εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας και θερμικής άνεσης στον κτηριακό τομέα λαμβάνοντας υπόψη τις συνήθειες των χρηστών. Η παρούσα εργασία συμβάλλει σε αυτό το πεδίο, μελετώντας εμπειρικά τις συνθήκες θερμικής

άνεσης και την αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση σε κατοικίες του Ηρακλείου αξιοποιώντας μετρήσεις σε κατοικίες τόσο την χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο από διαθέσιμη στη βιβλιογραφία βάση δεδομένων. Μέσα από συστηματική ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων, επιδιώκεται να αποτυπωθεί η συσχέτιση δείκτη άνεσης με την ενεργειακή κατανάλωση υπό πραγματικές συνθήκες, να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα του δείκτη PMV σε κατοικίες με μεσογειακό κλίμα, και να αναδειχθούν πιθανές ευκαιρίες βελτίωσης τόσο στην ενεργειακή συμπεριφορά των νοικοκυριών όσο και στον σχεδιασμό μελλοντικών κατοικιών με γνώμονα τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

2. *Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας*

2.1. Δείκτης PMV και Μεθοδολογία Fanger

Η έννοια της θερμικής άνεσης ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία το άτομο αισθάνεται ικανοποιημένο με το θερμικό περιβάλλον του. Ο Povl Ole Fanger υπήρξε πρωτοπόρος στην ποσοτικοποίηση της θερμικής άνεσης, αναπτύσσοντας το μοντέλο Predicted Mean Vote (PMV) τη δεκαετία του 1970. Ο δείκτης PMV (μέση αναμενόμενη θερμική αποδοχή) προβλέπει τη μέση τιμή της ψήφου θερμικής αίσθησης μιας μεγάλης ομάδας ατόμων, σε μια επταβάθμια κλίμακα από -3 ψυχρό έως +3 θερμό [8],[9]. Το μοντέλο PMV βασίζεται στο θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και λαμβάνει υπόψη έξι βασικούς παράγοντες: τη θερμοκρασία αέρα, τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία, την ταχύτητα αέρα, την υγρασία, το μεταβολισμό του ατόμου και τη θερμομόνωση της ένδυσης [10],[11]. Για δεδομένο συνδυασμό αυτών των παραγόντων, το PMV εκτιμά ποια θα ήταν η μέση αντίδραση (ψήφος) μιας μεγάλης ομάδας υπό αυτές τις συνθήκες.

Η μεθοδολογία Fanger περιλαμβάνει επίσης τον δείκτη Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), ο οποίος μετασχηματίζει το PMV στο ευκολότερα κατανοητό ποσοστό των ατόμων που αναμένεται να είναι βιώνουν θερμική δυσφορία. Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό στο πρότυπο ANSI/ASHRAE 55, το PPD είναι ‘’ένας δείκτης που παρέχει ποσοτική πρόβλεψη του ποσοστού των ατόμων που θα νιώθουν δυσφορία με το θερμικό περιβάλλον, όπως προσδιορίζεται από την τιμή PMV’’ [9]. Αναφέρει ότι ‘’η σχέση PMV-PPD είναι μη γραμμική. Σε ιδανικές συνθήκες ουδετερότητας PMV κοντά στο μηδέν το ελάχιστο δυνατό ποσοστό δυσαρεστημένων είναι περίπου 5%, που αντιστοιχεί σε 95% ικανοποιημένους (θεωρητικό μέγιστο)’’. Στην πράξη, έχει επισημανθεί ότι είναι δύσκολο να επιτευχθούν ποσοστά ικανοποίησης άνω του 80 με 90%, λόγω ποικίλων διαφορών μεταξύ ατόμων.

Για τον υπολογισμό του PMV απαιτείται ο προσδιορισμός τουλάχιστον δύο προσωπικών παραμέτρων, συγκεκριμένα του ρυθμού μεταβολισμού (met) (που συναρτάται με τη δραστηριότητα του ατόμου) και τη θερμομόνωση της ένδυσης (clo). Ο ρυθμός μεταβολισμού αντιστοιχεί στην παραγωγή θερμικής ενέργειας από το σώμα ανάλογα τη σωματική δραστηριότητα που ασκείται. Στα πρότυπα καθορίζεται ότι 1 met ισοδυναμεί με 58,15 W/m², δηλαδή την ενέργεια που παράγει ανά μονάδα επιφανείας σώματος ένας καθιστός άνθρωπος σε κατάσταση ανάπαυσης (μέση επιφάνεια σώματος 1,8 m²), καθώς η θερμομόνωση της ένδυσης μετριέται σε μονάδες clo, όπου 1 clo = 0,155 m²·K/W [9]. Ο ορισμός του 1 clo αντιστοιχεί στη μόνωση που παρέχει μια τυπική ενδυμασία ώστε ένας μέσος ενήλικας σε κατάσταση ηρεμίας να διατηρεί θερμική ισορροπία σε περιβάλλον περίπου 21 °C. Σημειώνεται ότι ο επίσημος ορισμός της θερμικής μόνωσης ενδυμασίας αφορά ολόκληρο το σώμα, συμπεριλαμβανομένων των ακάλυπτων μερών.

Μια ακόμη βασική παράμετρος είναι η μέση θερμοκρασία από ακτινοβολία (Mean Radiant Temperature, MRT), η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας από τις περιβάλλουσες επιφάνειες. Σύμφωνα με το ANSI/ASHRAE 55-2017, η MRT ορίζεται ως "η θερμοκρασία ενός ομοιόμορφου μαύρου περιβλήματος που ανταλλάσσει με ένα άτομο την ίδια ποσότητα θερμότητας δια ακτινοβολίας όπως και ο πραγματικός χώρος" [9]. Δηλαδή, είναι η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στη μέση θερμική επίδραση όλων των επιφανειών του χώρου πάνω στον ανθρώπινο θερμικό ισοζύγιο. Η MRT μαζί με τη θερμοκρασία αέρα συνθέτουν τη θερμοκρασία λειτουργίας (operative temperature), που συχνά χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους. Συνολικά, το μοντέλο του Fanger (PMV/PPD) αποτέλεσε τη βάση πολλών σύγχρονων προτύπων αξιολόγησης θερμικής άνεσης και έχει επαληθευτεί κυρίως για περιβάλλοντα με ελεγχόμενες συνθήκες [12].

2.2. Πρότυπα Θερμικής Άνεσης: ASHRAE 55, ISO 7730 και EN 15251

Τα διεθνή πρότυπα έχουν υιοθετήσει και επεκτείνει τη μεθοδολογία του Fanger, ορίζοντας κριτήρια αποδεκτής θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους. Το αμερικανικό πρότυπο ANSI/ASHRAE 55 (Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy) καθορίζει συνθήκες θερμικής άνεσης για εσωτερικούς χώρους και περιλαμβάνει το μοντέλο PMV/PPD ως μία από τις μεθόδους αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, το ASHRAE 55-2017 ορίζει ότι για άτομα με ενδυμασία μεταξύ 0.5 και 1.0 clo και δραστηριότητα 1.0 με 1.3 met, το αποδεκτό εύρος θερμικής άνεσης αντιστοιχεί σε τιμές PMV μεταξύ -0,5 και +0,5. Σε αυτό το εύρος αναμένεται ότι η πλειονότητα (90%) των ατόμων θα είναι ικανοποιημένο με το περιβάλλον. Το

πρότυπο επισημαίνει επίσης ότι η μέθοδος PMV δεν ενδείκνυται για έντονη σωματική δραστηριότητα (2.0 met και μεγαλύτερες τιμές), διότι το μοντέλο δεν έχει πλήρως επικυρωθεί πειραματικά. Πέρα από το μοντέλο PMV, το ASHRAE 55 εισάγει εναλλακτικές μεθόδους, όπως το προσαρμοστικό μοντέλο θερμικής άνεσης για φυσικά αεριζόμενα κτίρια, επιτρέποντας μεγαλύτερα όρια θερμοκρασιακής άνεσης όταν οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν το περιβάλλον τους (π.χ. ανοίγοντας παράθυρα) [12].

Το Διεθνές Πρότυπο ISO 7730:2025 (Ergonomics of the thermal environment) υιοθετεί επίσης το μοντέλο PMV/PPD και προτείνει μια ταξινόμηση της ποιότητας του θερμικού περιβάλλοντος σε τρεις κατηγορίες άνεσης. Συγκεκριμένα, ορίζει: Κατηγορία Α για πολύ υψηλό επίπεδο άνεσης με $-0,2 \leq PMV \leq +0,2$ και $PPD < 6\%$, Κατηγορία Β για συνήθεις αποδεκτές συνθήκες με $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ και $PPD < 10\%$, και Κατηγορία Γ για αποδεκτή άνεση σε πιο ευρύ εύρος με $-0,7 \leq PMV \leq +0,7$ και $PPD < 15\%$ [10]. Οι κατηγορίες αυτές επιτρέπουν στον μελετητή να καθορίσει κριτήρια σχεδιασμού ανάλογα με το επίπεδο θερμικής ποιότητας που επιδιώκεται. Το ISO 7730 επίσης παρέχει αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού του PMV και παραρτήματα για εκτίμηση των μεταβολικών ρυθμών και της ενδυμασίας, εναρμονισμένα με τα πρότυπα ASHRAE.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το πρότυπο EN 15251:2007 (αναθεωρημένο ως EN 16798-1) εισάγει παραμέτρους εσωτερικού περιβάλλοντος για τον σχεδιασμό και αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής άνεσης. Το EN 15251 υιοθετεί τόσο το μοντέλο PMV/PPD όσο και το προσαρμοστικό μοντέλο. Καθορίζει κατηγορίες θερμικής άνεσης αντίστοιχες με της ISO 7730 για κλιματικά ελεγχόμενους χώρους, αλλά παράλληλα ορίζει προσαρμοστικές καμπύλες άνεσης για φυσικά αεριζόμενα κτίρια, όπου η αποδεκτή θερμοκρασία χώρου συνδέεται με τη μακροχρόνια μέση εξωτερική θερμοκρασία. Έτσι, σε θερμά κλίματα, το πρότυπο επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου εάν το κτίριο δεν κλιματίζεται και οι κάτοικοι μπορούν να προσαρμοστούν [11]. Αυτό υποδυκνύει ότι οι άνθρωποι ανέχονται και θεωρούν άνετες υψηλότερες θερμοκρασίες όταν έχουν συνηθίσει στο κλίμα και μπορούν να επέμβουν στο περιβάλλον τους, σε σύγκριση με τις αυστηρές προβλέψεις του PMV για πλήρως ελεγχόμενα περιβάλλοντα [7]. Η προσέγγιση αυτή ουσιαστικά γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ θεωρητικών μοντέλων και πραγματικής εμπειρίας θερμικής άνεσης σε κτίρια με φυσικό αερισμό.

Συνολικά, τα πρότυπα ASHRAE 55, ISO 7730 και EN 15251 αποτελούν βασικά πλαίσια αναφοράς για τη θερμική άνεση. Προσφέρουν επίσημους ορισμούς των δεικτών και θέτουν κριτήρια και μεθοδολογίες τόσο για σχεδιασμό, όσο και για αξιολόγηση υπαρχόντων χώρων. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία τονίζεται ότι η συμμόρφωση με τα πρότυπα αυτά είναι απαραίτητη αλλά όχι πάντα ικανή συνθήκη

για την επίτευξη ικανοποιητικής άνεσης, ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψιν ο ανθρώπινος παράγοντας και η πραγματική χρήση των κτιρίων.

2.3. Έρευνες Πεδίου σε Πραγματικές Κατοικίες και Επικύρωση του PMV

Πολλές μεταγενέστερες μελέτες πεδίου (ιδιαίτερα μετά το 2010) εξέτασαν κατά πόσο το μοντέλο PMV/PPD ευθυγραμμίζεται με την πραγματική θερμική αντίληψη χρηστών σε πραγματικές συνθήκες κατοίκησης. Τα ευρήματα δείχνουν ότι, σε πραγματικές κατοικίες, ενδέχεται να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικά επικρατούσας θερμικής άνεσης. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ότι το μοντέλο PMV τείνει να υπερεκτιμά το αίσθημα θερμικής δυσφορίας σε θερμά κλίματα όταν οι θερμοκρασίες ξεπερνούν κάποιο όριο. Σε πρόσφατη επιτόπια έρευνα γραφείων στην Κίνα, βρέθηκε ότι το PMV προέβλεπε πιο θερμή αίσθηση από αυτήν που πραγματικά εξέφραζαν οι χρήστες, όταν η ενεργός θερμοκρασία (operative temperature) ξεπερνούσε τους 28 °C [13]. Αυτό σημαίνει ότι οι άνθρωποι στην πράξη ένιωθαν πιο άνετα (δροσερότερα) από όσο θα προέβλεπε το μοντέλο, πιθανώς λόγω φαινομένων προσαρμογής (μέσω ενδυμασίας, ανεμιστήρων, αυξημένης ανοχής) με αποτέλεσμα η πραγματική θερμοκρασία άνεσής τους να είναι υψηλότερη από την προβλεπόμενη από το Fanger μοντέλο [13].

Στην Ελλάδα και ειδικότερα στο μεσογειακό κλίμα, έρευνες πεδίου σε κατοικίες επιβεβαιώνουν την ανάγκη προσαρμογής των θεωρητικών δεικτών. Πρόσφατη μελέτη στο Ηράκλειο Κρήτης, παρακολούθησε τη θερμική άνεση και κατανάλωση ενέργειας σε πραγματικές κατοικίες με τη χρήση αισθητήρων καταγραφής χαμηλής παρεμβατικότητας (in situ low-invasive αισθητήρες). Βρέθηκε ότι τον χειμώνα οι κατοικίες διατηρούνταν κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου εντός αποδεκτού εύρους άνεσης (69–93% των ωρών με $-1 \leq PMV \leq +1$), ενώ το καλοκαίρι το ποσοστό αυτό ήταν πολύ χαμηλότερο, περίπου 38–70% των ωρών [7]. Με άλλα λόγια, τους θερινούς μήνες παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις από τη θερμική άνεση, καθώς αρκετές ώρες οι εσωτερικές συνθήκες ήταν θερμότερες απ’ ό,τι θεωρείται ιδανικό. Οι ερευνητές απέδωσαν αυτή τη θερινή ασυμμετρία σε δύο κυρίως παράγοντες: (α) στην αυξημένη ανεκτικότητα και εξοικείωση των κατοίκων με το θερμό κλίμα (οι κάτοικοι της Κρήτης μπορεί να ανέχονται υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς να δηλώνουν δυσφορία, λόγω συνήθειας) και (β) σε διαφοροποιημένη χρήση συστημάτων ψύξης [7]. Η προαναφερόμενη ανεκτικότητα σε υψηλή θερμοκρασία επιβεβαιώνεται και από τον Fanger σε συνεργασία με τον Toftum, όπου είχε προτείνει την εισαγωγή ενός συντελεστή προσδοκίας (expectancy factor) στο μοντέλο PMV ειδικά για θερμά κλίματα και μη κλιματιζόμενα κτίρια, ώστε να τροποποιείται

η πρόβλεψη δυσφορίας λαμβάνοντας υπόψη την τοπική προσαρμογή των ατόμων. Εάν εφαρμοστεί ένας τέτοιος διορθωτικός παράγοντας (τιμή e < 1 για ζεστά κλίματα), το PMV/PPD μοντέλο προσαρμόζεται καλύτερα στις πραγματικές θερμικές αισθήσεις των κατοίκων το καλοκαίρι, όπως σημειώνεται και σε ελληνικές μελέτες μικροκλίματος [27].

Πέρα από την προσαρμοστικότητα, οι έρευνες πεδίου φωτίζουν και άλλα πρακτικά ζητήματα στην εφαρμογή του PMV. Για παράδειγμα, η μέτρηση της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας (MRT) in situ είναι συχνά δύσκολη, και συχνά στις επιτόπιες μετρήσεις θεωρείται περίπου ίση με τη θερμοκρασία αέρα, κάτι που εισάγει σφάλμα όταν υπάρχει ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία [14]. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι το PMV αποδίδει καλύτερα για ήπιες συνθήκες και καθιστικές δραστηριότητες, ενώ σε περιπτώσεις υψηλότερης δραστηριότητας ή μεταβαλλόμενων συνθηκών μπορεί να αποκλίνει από τις υποκειμενικές ψήφους. Συνοψίζοντας τη βιβλιογραφία, η ακρίβεια του μοντέλου PMV σε πραγματικά κατοικημένους χώρους δεν είναι απόλυτη, απαιτείται επιβεβαίωση μέσω ερευνών πεδίου και ενδεχομένως βαθμονόμηση ή χρήση εναλλακτικών δεικτών (π.χ. προσαρμοστικών), ώστε να αποτυπώνεται καλύτερα η πραγματική εμπειρία άνεσης.

2.4. Θεωρητική εναντίον Πραγματική Ενεργειακή Συμπεριφορά και Θερμική Άνεση

Ένα κρίσιμο ζήτημα στη μελέτη κτιρίων είναι η απόκλιση ανάμεσα στην σχεδιαστική ενεργειακή απόδοση και στην πραγματική κατανάλωση που παρατηρείται μετά την κατοίκηση. Η απόκλιση της πραγματικής από την θεωρητικά εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοση έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών την τελευταία δεκαετία. Ως δείκτης απόκλισης συχνά αναφέρεται η διαφορά μεταξύ της αναμενόμενης (βάσει προτύπων ή προσομοιώσεων) και της πραγματικά μετρούμενης κατανάλωσης ενέργειας ενός κτιρίου. Σύμφωνα με πρόσφατες ανασκοπήσεις, κύριος παράγοντας της απόκλισης απόδοσης είναι ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή η διαφορετική συμπεριφορά και χρήση των συστημάτων από τους ενοίκους σε σχέση με τις παραδοχές του σχεδιασμού [15][16]. Έχει χαρακτηριστικά γραφτεί ότι «έχει διατυπωθεί η άποψη πως οι χρήστες είναι η κύρια αιτία του energy performance gap» [16], τονίζοντας την ανάγκη τα μοντέλα σχεδιασμού να ενσωματώσουν πιο ρεαλιστικές παραδοχές για τη συμπεριφορά των ενοίκων.

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί (για τον ΚΕΝΑΚ ή για πιστοποιήσεις ενεργειακής απόδοσης) συχνά απλοποιούν ή τυποποιούν τη χρήση του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουν συγκεκριμένα προφίλ θερμοκρασιών εσωτερικού, ώρες

λειτουργίας θέρμανσης/ψύξης, στάθμες φωτισμού, κ.α. Ενώ στην πραγματικότητα, οι ένοικοι μπορεί να μην θερμαίνουν ή ψύχουν όλους τους χώρους συνεχώς ή στην ίδια ένταση. Για παράδειγμα, μια κατοικία μπορεί θεωρητικά να σχεδιάζεται ώστε να διατηρεί 20 °C τον χειμώνα, όμως ο πραγματικός ένοικος ίσως επιλέγει χαμηλότερη θερμοκρασία τις περισσότερες ώρες για οικονομία, αποδεχόμενος ελαφριά δυσφορία. Αντίστοιχα, το καλοκαίρι μπορεί θεωρητικά να είχε προβλεφθεί χρήση κλιματισμού ώστε η θερμοκρασία να μην ξεπερνά τους 26 °C, αλλά στην πράξη οι κάτοικοι ενδέχεται να χρησιμοποιούν λιγότερο το κλιματιστικό, αφήνοντας τη θερμοκρασία να ανέλθει σε υψηλότερες θερμοκρασίες πριν το θέσουν σε λειτουργία [7]. Τέτοιες αποκλίσεις οδηγούν σε χαμηλότερη κατανάλωση, αλλά και σε διαφορετικό επίπεδο πραγματικής άνεσης από το προβλεπόμενο.

Μελέτες έχουν δείξει ότι σε ανακαινισμένα ή ενεργειακά αποδοτικά κτίρια, όπου το θερμικό κέλυφος και τα συστήματα είναι πολύ αποδοτικά, η συμπεριφορά των ενοίκων μπορεί να μεταβάλλει την κατανάλωση κατά απόλυτες τιμές 10-30% ή και περισσότερο [17]. Επιπλέον, ο τρόπος με τον οποίο οι ένοικοι αντιλαμβάνονται την άνεση τους επηρεάζει πώς χρησιμοποιούν τα συστήματα. Αναφορικά αν κάποιος θεωρεί άνετη μια χαμηλότερη θερμοκρασία το χειμώνα επειδή ντύνεται πιο βαριά, θα θερμάνει λιγότερο τον χώρο του συγκριτικά με κάποιον πιο ευαίσθητο στο κρύο [16]. Έρευνα αναφέρει ότι χαρακτηριστικά του νοικοκυριού καθώς και οι αντιλήψεις, αξίες και κίνητρα των ενοίκων είναι από τους σημαντικότερους καθοριστικούς παράγοντες της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Συνεπώς, δύο φαινομενικά όμοιες κατοικίες μπορούν να έχουν πολύ διαφορετική ενεργειακή κατανάλωση και επίπεδο άνεσης, ανάλογα με το πώς τις λειτουργούν οι χρήστες τους.

Στον επιστημονικό διάλογο, η αναγνώριση της απόκλισης απόδοσης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προσπαθειών για μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των χρηστών (π.χ. IEA EBC Annex 66 και 79). Καλύτερα μοντέλα χρήστη (occupant behavior models) ενσωματώνονται πλέον σε εργαλεία προσομοίωσης, επιχειρώντας να μειώσουν την αβεβαιότητα. Για παράδειγμα, λαμβάνονται υπόψη πιθανά μοτίβα κατοίκησης, πιθανότητες ανοίγματος παραθύρων σε σχέση με εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία, πιθανότητες ρύθμισης θερμοστάτη, χρήσης συσκευών [15]. Στόχος είναι να προσεγγίσουν οι θεωρητικές εκτιμήσεις περισσότερο τις πραγματικές, ώστε οι σχεδιαστές να λαμβάνουν πιο αξιόπιστες αποφάσεις και οι πολιτικές ενεργειακής απόδοσης να βασίζονται σε ρεαλιστικά δεδομένα. Η βιβλιογραφία συμφωνεί ότι για τη γεφύρωση αυτού του κενού, απαιτείται επιστημονική προσέγγιση, αφού βελτιώνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κτιρίων, αλλά και τη κατανόηση και καθοδήγηση της συμπεριφοράς των χρηστών.

2.5. Επίδραση της Συμπεριφοράς των Χρηστών σε Θερμική Άνεση και Κατανάλωση

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συμπεριφοράς είναι η χρήση θέρμανσης και ψύξης. Σε ορισμένες ελληνικές κατοικίες έχει παρατηρηθεί ότι οι ένοικοι τείνουν να χρησιμοποιούν το κλιματιστικό ή τη θέρμανση μόνο σε συγκεκριμένες ώρες (απόγευμα νωρίς το βράδυ). Στην προαναφερθείσα μελέτη του Ηρακλείου, διαπιστώθηκε ότι το καλοκαίρι η μεγαλύτερη κατανάλωση ρεύματος συνέβαινε όταν το PMV βρισκόταν στην περιοχή του 1 έως 1.5, υποδηλώνοντας ότι οι κάτοικοι ενεργοποιούσαν τα κλιματιστικά μόνο αφού ένιωθαν αρκετή ζέστη και όχι για να διατηρήσουν πλήρως ουδέτερες συνθήκες [7]. Αυτό οδήγησε σε μια αδυναμία επίτευξης άνεσης, δηλαδή οι χώροι παρέμεναν θερμότεροι από το ιδανικό για αρκετή ώρα, μέχρι οι χρήστες να αποφασίσουν να δράσουν. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι είτε η περιορισμένη συχνότητα χρήσης από πλευράς χρηστών, είτε η ανεπαρκής ισχύς των συστημάτων ψύξης, συνέβαλαν στο ότι το καλοκαίρι οι κατοικίες δεν έφταναν συχνά στο ιδανικό θερμικό επίπεδο, ενώ τον χειμώνα σε μια από τις κατοικίες που διέθετε αποδοτική αντλία θερμότητας [7], οι κάτοικοι διατήρησαν πιο σταθερά θερμικές συνθήκες κοντά στην ουδέτερη ζώνη, με αποτέλεσμα μικρότερες αποκλίσεις PMV μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού.

Η προσαρμοστική συμπεριφορά των ενοίκων παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο. Οι χρήστες δεν είναι παθητικοί δέκτες του περιβάλλοντος, αλλά μπορούν να αντιδράσουν για να βελτιώσουν την άνεσή τους χωρίς κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, να ανοίξουν ένα παράθυρο για δροσισμό, να καθίσουν σε σκιερό σημείο, να φορέσουν πιο ελαφριά ρούχα το καλοκαίρι ή να χρησιμοποιήσουν κουβέρτες τον χειμώνα, να πιουν ένα ζεστό ή κρύο ρόφημα. Τέτοιες συμπεριφορές προσαρμογής (behavioral adaptation) συμβάλλουν ώστε οι άνθρωποι να αισθάνονται άνετα σε ευρύτερο φάσμα θερμοκρασιών, μειώνοντας την ανάγκη για μηχανική θέρμανση ή ψύξη. Μελέτες έχουν τεκμηριώσει ότι οι ένοικοι μπορούν μέσω συμπεριφορικών, φυσιολογικών και ψυχολογικών προσαρμογών να διευρύνουν τη ζώνη άνεσής τους [18]. Για παράδειγμα, η αύξηση της ταχύτητας του αέρα με ανεμιστήρες μπορεί να βελτιώσει δραστικά την άνεση σε θερμό περιβάλλον (λόγω του εξατμιστικού δροσισμού), καθιστώντας ανεκτές θερμοκρασίες που αλλιώς θα θεωρούνταν υπερβολικές. Αντίστοιχα, η ενδυματολογική προσαρμογή μπορεί να αντισταθμίσει την αίσθηση για το κατοικούμενο περιβάλλον. Συνεπώς, όπου οι χρήστες επιδεικνύουν ενεργή προσαρμογή, μπορεί να επιτυγχάνεται ικανοποιητική θερμική άνεση με μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση. Αυτό έχει άμεσες συνέπειες και στην ενεργειακή απόδοση, όπως αναφέρει σχετική μελέτη, η εφαρμογή ευρύτερων ορίων αποδεκτών θερμοκρασιών (αποδοχή υψηλότερων θερινών θερμοκρασιών με

βάση το προσαρμοστικό μοντέλο) μπορεί να μειώσει σχεδόν στο μισό τις ώρες λειτουργίας κλιματισμού και την απαιτούμενη ενέργεια ψύξης [16].

Μια δέσμη έρευνας εστιάζει στη βελτίωση του PMV μέσω εξελιγμένων υπολογιστικών εργαλείων. Για παράδειγμα, οι Nian και Wang (2017) [16] πρότειναν έναν ανανεωμένο δείκτη PMV αξιοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για να προβλέψουν την άνεση σε πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο τους ενσωματώνει ένα RBF (Radial Basis Function) νευρωνικό δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης που μαθαίνει από δεδομένα πεδίου, επιτυγχάνοντας ταχύτερη και ακριβέστερη πρόβλεψη της θερμικής αίσθησης σε σύγκριση με τον κλασικό υπολογισμό του PMV. Πράγματι, τα αποτελέσματα έδειξαν εξαιρετική συμφωνία με τις πραγματικές ψήφους άνεσης (συντελεστής R^2 κοντά στο 0.99), υποδεικνύοντας ότι η προσέγγιση με τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ θεωρίας και πράξης σε δυναμικά περιβάλλοντα. Παρόμοιες απόπειρες αξιοποίησης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης υποδηλώνουν ότι η μοντελοποίηση της μη-γραμμικότητας και της πολυπλοκότητας των παραμέτρων άνεσης μπορεί να βελτιώσει αισθητά την προγνωστική ικανότητα σε πραγματικές συνθήκες.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η συμπεριφορά των χρηστών δεν επηρεάζεται μόνο από φυσικούς παράγοντες αλλά και από κοινωνικούς και γνωσιακούς. Η επίγνωση του κόστους της ενέργειας, οι συνήθειες (αερισμός δωματίου κάθε πρωί), οι θερμοφυσιολογικές κληρονομιές (ανεκτικότητα στο ζεστό κλίμα), καθώς και η πληροφόρηση αλλά και η εκπαίδευση των ενοίκων μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά το πώς αυτοί χρησιμοποιούν το σπίτι τους. Για τον λόγο αυτό, πολλές σύγχρονες προσεγγίσεις προτείνουν παρεμβάσεις συμπεριφορικές (behavioral interventions) παράλληλα με τις τεχνολογικές, ως μέσο βελτίωσης τόσο της άνεσης όσο και της αποδοτικότητας. Η ενημέρωση των χρηστών για τις ιδανικές πρακτικές (σωστός αερισμός, χρήση σκιάστρων, ρυθμίσεις θερμοστάτη) αλλά και η παροχή ανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες άνεσης και την κατανάλωση ενέργειας θεωρούνται πολλά υποσχόμενες πρακτικές για πιο βιώσιμη χρήση των κατοικιών.

2.6. Χρήση Χαμηλής Παρεμβατικότητας Αισθητήρων σε In-Situ Μελέτες

Με την πρόοδο της τεχνολογίας αισθητήρων και IoT (Internet of Things), κατέστη εφικτό να διεξάγονται εκτεταμένες μετρήσεις σε κατοικημένους χώρους με ελάχιστη ενόχληση των ενοίκων. Οι αισθητήρες χαμηλής παρεμβατικότητας (low-intrusive sensors) είναι μικρές, ασύρματες συσκευές που μπορούν να εγκατασταθούν διακριτικά σε μια κατοικία για να καταγράφουν παραμέτρους όπως η θερμοκρασία,

η σχετική υγρασία, η ποιότητα αέρα ή η κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να διαταράσσουν την καθημερινότητα των χρηστών [7]. Συχνά τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα ή μπαταρία και μεταδίδουν δεδομένα μέσω Wi-Fi ή RFID σε μία βάση δεδομένων, εξασφαλίζοντας ότι δεν απαιτούν περίπλοκη καλωδίωση ούτε αλληλεπίδραση από τον ένοικο. Αυτό το χαρακτηριστικό εξασφαλίζει την αποδοχή των καταγραφικών από τους χρήστες και ελαχιστοποιεί την παρέμβαση, επιτρέποντας τη κανονική χρήση του χώρου κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Η αξία αυτής της προσέγγισης είναι πολυδιάστατη. Πρώτον, παρέχει συνεχή αντικειμενικά δεδομένα για το πραγματικό θερμικό περιβάλλον και τη χρήση ενέργειας ενός νοικοκυριού. Για παράδειγμα, στη μελέτη του Stavrakakis et al. (2025) [7] εγκαταστάθηκε σε κάθε κατοικία ένα σύστημα με έναν ασύρματο ενεργειακό μετρητή (για την ηλεκτρική κατανάλωση) και αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, που κατέγραφαν ωριαία δεδομένα όλο το εικοσιτετράωρο. Τα δεδομένα αυτά συγχρονίστηκαν με μετεωρολογικές πληροφορίες εξωτερικού κλίματος και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του PMV ανά ώρα και την ανάλυση των προτύπων κατανάλωσης σε σχέση με την θερμική άνεση. Δεύτερον, η χρήση τέτοιων συστημάτων επιτρέπει την ανάπτυξη βάσεων δεδομένων πραγματικών συνθηκών, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν πολύτιμες γνώσεις. Στη συγκεκριμένη εργασία, μέσω ειδικού αλγορίθμου επεξεργασίας, αναγνωρίστηκαν περίοδοι “επιλέξιμων” δεδομένων (όταν υπήρχε μη μηδενική κατανάλωση – ένδειξη ενεργής θέρμανσης/ψύξης) και αναλύθηκε η χρονοσειρά ώστε να βρεθούν συσχετίσεις μεταξύ κατανάλωσης και θερμικής άνεσης. Τα αποτελέσματα, όπως προαναφέρθηκε, ανέδειξαν συγκεκριμένες τάσεις που δεν θα ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν χωρίς παρατεταμένη επιτόπια μέτρηση.

Επιπλέον, οι χαμηλής παρεμβατικότητας αισθητήρες ανοίγουν τον δρόμο για δυναμική αλληλεπίδραση με τους χρήστες. Μερικά συστήματα συνοδεύονται από εφαρμογές που ενημερώνουν τον ένοικο σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση άνεσης ή την ενεργειακή του κατανάλωση. Αυτή η πληροφόρηση μπορεί να ενεργοποιήσει πιο ενσυνείδητη συμπεριφορά. Για παράδειγμα, αν ο ένοικος δει ότι η θερμοκρασία υπνοδωματίου του πέφτει κάτω από το όριο άνεσης τη νύχτα, μπορεί να ρυθμίσει ελαφρά τη θέρμανση ή τον εξαερισμό. Αν δει την κατανάλωση ρεύματος να κορυφώνεται, μπορεί να συνειδητοποιήσει την επίδραση της χρήσης συγκεκριμένων συσκευών ή του κλιματισμού. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα δεν χρησιμεύουν μόνο στους ερευνητές αλλά και στους ίδιους τους κατοίκους, βελτιώνοντας την επίγνωσή τους σχετικά με την εσωτερική περιβαλλοντική ποιότητα.

Συνοψίζοντας, η σύγχρονη βιβλιογραφία (2010+) υπογραμμίζει τη σημασία της επιτόπιας παρακολούθησης πραγματικών συνθηκών για τη μελέτη θερμικής

άνεσης και ενεργειακής συμπεριφοράς. Η χρήση διακριτικών, έξυπνων αισθητήρων έχει καταστεί μια βέλτιστη πρακτική για την συλλογή πολύτιμων δεδομένων, τα οποία αφενός επιβεβαιώνουν ή βελτιώνουν τα θεωρητικά μοντέλα (όπως το PMV) και αφετέρου βοηθούν στη διαμόρφωση πολιτικών και παρεμβάσεων που λαμβάνουν υπόψη τον ανθρώπινο παράγοντα. Όπως αναφέρει χαρακτηριστικά μια πρόσφατη μελέτη ανασκόπησης, υπάρχει έλλειψη ολοκληρωμένων δεδομένων σχετικά με τη συμπεριφορά των χρηστών και τις πραγματικές συνθήκες άνεσης, και η διεύρυνση τέτοιων βάσεων δεδομένων θεωρείται κρίσιμη για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατοικιών με παράλληλη διατήρηση ή και ενίσχυση της θερμικής άνεσης [16]. Οι αισθητήρες χαμηλής παρεμβατικότητας αποτελούν το εργαλείο κλειδί προς αυτή την κατεύθυνση, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ θεωρίας και πραγματικότητας στον τομέα της θερμικής άνεσης.

3. Αντικείμενο της Εργασίας και Μεθοδολογία

3.1. Αντικείμενο της Εργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν χρονοσειρές δεδομένων από οκτώ κατοικίες στο Ηράκλειο Κρήτης. Από κάθε κατοικία αντλήθηκε η καταγραφή ωριαίων τιμών: η εσωτερική θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ηλεκτρική κατανάλωση. Τα δεδομένα αυτά συγχρονίστηκαν με μετεωρολογικές μετρήσεις εξωτερικού περιβάλλοντος (όπως η εξωτερική θερμοκρασία), παρέχοντας μια ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της ενεργειακής χρήσης στις κατοικίες. Η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε κατά τη θερινή περίοδο από 1 Ιουνίου έως 30 Σεπτεμβρίου 2023 (με εξαίρεση μία κατοικία όπου η καταγραφή ολοκληρώθηκε στις 7 Σεπτεμβρίου) και κατά τη χειμερινή περίοδο από 26 Οκτωβρίου 2022 έως 30 Μαρτίου 2023.

Για την εκτίμηση της θερμικής άνεσης, υπολογίστηκε ο δείκτης Predicted Mean Vote (PMV) βάσει της μεθοδολογίας Fanger, όπως ορίζεται στο πρότυπο ASHRAE 55 και το διεθνές πρότυπο ISO 7730. Η υλοποίηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Excel με χρήση ενσωματωμένων μακροεντολών VBA (Visual Basic Applications), επιτρέποντας τον υπολογισμό του PMV ανά ώρα για τα δεδομένα κάθε κατοικίας. Ακολούθως, δόθηκε έμφαση στην επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων ώστε να αντιμετωπιστούν τυχόν ελλιπείς ή προβληματικές καταγραφές. Δεν εφαρμόστηκε τεχνική παρεμβολής για τη συμπλήρωση κενών τιμών, αντιθέτως, οι ελλιπείς εγγραφές επισημάνθηκαν ρητά ως κενές και εξαιρέθηκαν από τις ποσοτικές αναλύσεις. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν ανά θερμοκρασιακό

εύρος εξωτερικού αέρα, διακρίνοντας συνθήκες χαμηλών, μέσων και υψηλών εξωτερικών θερμοκρασιών. Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει τη διερεύνηση της σχέσης κατανάλωσης-άνεσης υπό διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες.

Για την ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης, αξιοποιήθηκε συνδυασμός εργαλείων Excel και Python. Αρχικά, το Excel χρησιμοποιήθηκε για την οργάνωση των δεδομένων, τον υπολογισμό βασικών μεταβλητών και τον καθαρισμό τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισήχθησαν σε περιβάλλον Python, όπου με τη χρήση κατάλληλων βιβλιοθηκών πραγματοποιήθηκε πιο λεπτομερής ανάλυση και δημιουργήθηκαν διαγράμματα. Τα διαγράμματα που παραχθήκαν τόσο σε Excel όσο και σε Python απεικονίζουν τις χρονικές μεταβολές των μεγεθών και αναδεικνύουν τις συσχετίσεις μεταξύ του δείκτη PMV και της κατανάλωσης ενέργειας. Μέσω αυτών των οπτικοποιήσεων κατέστη δυνατή η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η ηλεκτρική κατανάλωση μεταβάλλεται ως συνάρτηση των επιπέδων θερμικής άνεσης σε πραγματικές συνθήκες.

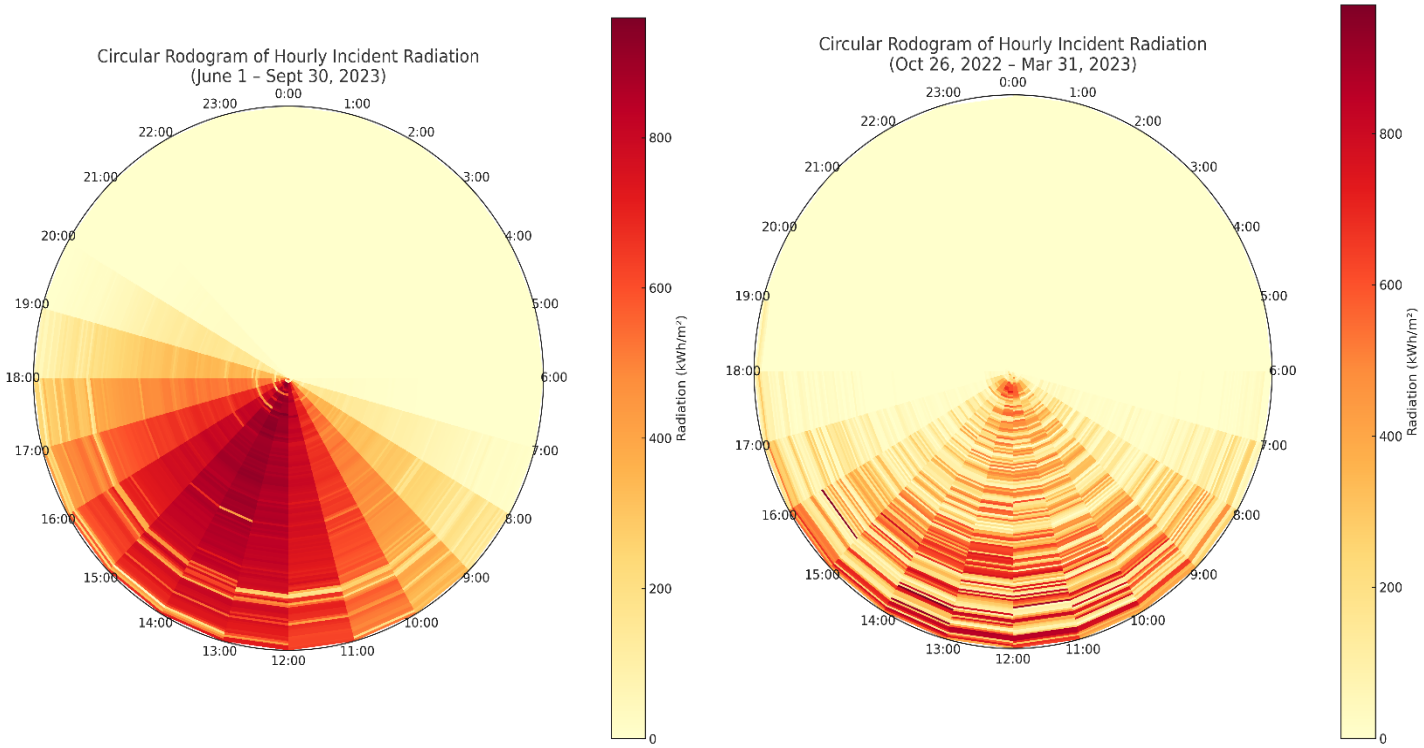
3.2. Περιοχή Μελέτης και Περιγραφή Κατοικιών

3.2.1. Κλιματικά χαρακτηριστικά Ηρακλείου Κρήτης

Το Ηράκλειο βρίσκεται στη βόρεια ακτή της Κρήτης και ανήκει κλιματολογικά στην κατηγορία του μεσογειακού κλίματος με ήπιους υγρούς χειμώνες και θερμά ξηρά καλοκαίρια. Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), το Ηράκλειο εντάσσεται στη θερμότερη κλιματική ζώνη Α [19]. Αυτό σημαίνει ότι οι θερμοκρασίες είναι σχετικά υψηλές τον χειμώνα και απαιτείται λιγότερη θέρμανση σε σύγκριση με βορειότερες περιοχές, ενώ αντίστοιχα οι ανάγκες ψύξης το καλοκαίρι είναι αυξημένες. Πράγματι, η μέση θερμοκρασία Ιανουαρίου καταγράφεται στους 12.1°C και τον Ιούλιο στους 26°C, ενώ η σχετική υγρασία κυμαίνεται τυπικά μεταξύ 55–67% [20]. Η ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή είναι από τις υψηλότερες στην Ελλάδα, ενδεικτικά, το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό στο Ηράκλειο προσεγγίζει τις 1.725 kWh/m² ετησίως, υπερβαίνοντας αυτό της Αθήνας 1.635 kWh/m² ή της Θεσσαλονίκης 1.465 kWh/m² [28]. Αυτό το υψηλό ηλιακό δυναμικό ευνοεί την αξιοποίηση ηλιακών συστημάτων (ηλιακών πάνελ, θερμοσιφώνων) αλλά συγχρόνως συνεπάγεται αυξημένα ηλιακά κέρδη στα κτήρια το καλοκαίρι.

Για την οπτικοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στη χρονική περίδο ενδιαφέροντος, είτε τη θερινή ή χειμερινή περίοδο, χρησιμοποιήθηκαν κυκλικά ροδογράμματα που απεικονίζουν την ωριαία προσπίπτουσα ακτινοβολία στην τοποθεσία του Ηρακλείου (Δορυφόρος SARAH2/SARAH3) [28]. Τα διαγράμματα αυτά παρέχουν μια εικόνα της ημερήσιας και εποχικής διακύμανσης της ηλιακής

έντασης, συνδυάζοντας τη διάσταση της ώρας (περιμετρική τοποθέτηση) με το μέγεθος της ακτινοβολίας kWh/m² (χρωματική κλίμακα).



Εικόνα 2: Ροδογράμματα (Rodogram) της ωριαίας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην υπό μελέτη περιοχή για δύο διακριτές περιόδους. Αριστερά: Θερμή περίοδος (1 Ιουνίου – 30 Σεπτεμβρίου 2023), Δεξιά: Ψυχρή περίοδος (26 Οκτωβρίου 2022 – 31 Μαρτίου 2023).

Αυτή η απεικόνιση της ηλιακής έντασης μπορεί να δώσει μια αρχική υπόθεση στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα για το πότε αναμένεται να χρησιμοποιηθούν τα ενεργειακά συστήματα των κατοικιών, δηλαδή την συμπεριφορά των κατοίκων, αλλά και που αναμένεται να υπάρχει μεγαλύτερη ενεργειακή ένταση με στόχο την επίτευξη θερμικής άνεσης (PMV κοντά στο μηδέν).

Οι περίοδοι θέρμανσης και ψύξης στο Ηράκλειο διαφοροποιούνται σημαντικά από άλλες περιοχές. Ο χειμώνας είναι σύντομος και ήπιος, η ανάγκη για θέρμανση επικεντρώνεται κυρίως από τον Δεκέμβριο έως τον Φεβρουάριο. Οι βαθμοημέρες θέρμανσης (HDD) στην περιοχή είναι περίπου 700 (βάση 18°C), δηλαδή σχεδόν το μισό σε σχέση με πόλεις της βόρειας Ελλάδας όπως η Θεσσαλονίκη 1.600 HDD [20] (Πίνακες 3.7,3.8 της αναφοράς). Αντίθετα, η περίοδος δροσισμού εκτείνεται από τα τέλη της άνοιξης έως τις αρχές του φθινοπώρου με υψηλές θερμοκρασίες από τον Ιούνιο έως και τον Σεπτέμβριο, δημιουργώντας σημαντικές απαιτήσεις σε ψύξη (αυξημένες βαθμοημέρες ψύξης). Συνολικά, το κλίμα του Ηρακλείου συνεπάγεται μικρό φορτίο θέρμανσης και υψηλότερο φορτίο ψύξης για τις κατοικίες. Ωστόσο, οι ήπιες χειμερινές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τη σχετικά υψηλή υγρασία μπορεί

να προκαλούν αίσθημα δυσφορίας ή ανάγκη για θέρμανση κυρίως για την αντιμετώπιση της υγρασίας. Αντίστοιχα, το καλοκαίρι η θαλάσσια αύρα τα βράδια συχνά μετριάζει τη ζέστη, αλλά τις ημέρες απαιτείται σκίαση και μηχανική ψύξη για διατήρηση συνθηκών θερμικής άνεσης.

3.2.2. Πολεοδομικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά

Το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου παρουσιάζει πυκνή δόμηση, ιδιαίτερα στο ιστορικό και εμπορικό κέντρο της πόλης, όπου τα κτήρια είναι συνεχόμενα και πολυώροφα. Η κατοικία στην πόλη αποτελείται κυρίως από πολυκατοικίες με διαμερίσματα και λιγότερο από μονοκατοικίες, με εξαίρεση ορισμένες περιφερειακές συνοικίες και προάστια όπου συναντώνται χαμηλότερα κτήρια ή μεμονωμένες κατοικίες. Η τυπολογία του οικιστικού ιστού χαρακτηρίζεται από τυπική αρχιτεκτονική με επίπεδες στέγες και κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με τοιχοπληρώσεις από τούβλα. Οι περισσότερες πολυκατοικίες του κέντρου κατασκευάστηκαν κατά τη μεταπολεμική περίοδο ανάπτυξης (1960–1980), ενώ μεταγενέστερη οικιστική εξάπλωση συνέχισε προς τα προάστια τις δεκαετίες 1990–2000. Ως αποτέλεσμα, μεγάλο μέρος των κατοικιών είναι αρκετά παλαιό και ανεγέρθηκε πριν θεσπιστούν απαιτήσεις θερμομόνωσης. Συγκεκριμένα, πάνω από το 50% των κατοικιών της χώρας (και αντίστοιχα μεγάλο ποσοστό στο Ηράκλειο) έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980 εποχή που δεν υπήρχαν υποχρεωτικά μέτρα θερμομόνωσης. Επιπλέον, πολλές από αυτές (πάνω από 84%) κατατάσσονται σε χαμηλές ενεργειακές κλάσεις (Γ – Η) στα Πιστοποιητικά Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) [21]. Κατά συνέπεια, πολλά κτήρια διαθέτουν ελάχιστη ή καθόλου θερμομόνωση στο κέλυφός τους, γεγονός που επιβαρύνει την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Μετά το 2010, με την εφαρμογή του ΚΕΝΑΚ, οι νέες κατασκευές ακολουθούν βελτιωμένα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, όμως αυτές οι νεόδμητες κατοικίες αποτελούν ακόμα μικρό ποσοστό του συνολικού αποθέματος [22].

Η πολεοδομική οργάνωση του Ηρακλείου χαρακτηρίζεται από σχετικά στενούς δρόμους στο κέντρο και νότιο προσανατολισμό οικοδομικών τετραγώνων που δεν είναι ενιαία σχεδιασμένος, αλλά έχει προκύψει. Αυτό σημαίνει ότι ο προσανατολισμός των κτηρίων και των ανοιγμάτων τους ποικίλλει. Πολλά διαμερίσματα σε πολυκατοικίες έχουν περιορισμένα ανοίγματα σε μία κύρια όψη (πρόσοψη ή πίσω όψη), γεγονός που μπορεί να δυσχεραίνει τον φυσικό αερισμό και φωτισμό σε ορισμένους χώρους. Ωστόσο, η πυκνή δόμηση προσφέρει και ορισμένα παθητικά οφέλη, όπως σκίαση από γειτονικά κτήρια που μειώνει τα ηλιακά φορτία το καλοκαίρι. Η αστική πυκνότητα, από την άλλη, περιορίζει τα διαθέσιμα οικόπεδα

για φύτευση και δημιουργία χώρων πρασίνου, που θα μπορούσαν να μετριάσουν το φαινόμενο αστικής θερμικής νησίδας.

Όσον αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οι περισσότερες κατοικίες μετά τη δεκαετία του 1960 είναι δομημένες με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα και πληρωματικούς τοίχους από συμπαγή ή διάτρητα τούβλα. Στις παλαιότερες κατοικίες (νεοκλασικά ή παραδοσιακά σπίτια πριν το 1950) συναντώνται και πέτρινοι φέροντες τοίχοι. Οι τυπικές πολυκατοικίες της περιόδου 1960-1980 έχουν λεπτούς τοίχους χωρίς θερμομόνωση, μονούς υαλοπίνακες σε μεταλλικά κουφώματα και γενικά χαμηλές ενεργειακές επιδόσεις. Αντιθέτως, στις σύγχρονες κατασκευές μετά το 2010 εφαρμόζονται θερμομονωτικά υλικά σε τοίχους και δώματα, θερμοδιακοπτόμενα κουφώματα με διπλά ενεργειακά τζάμια, καθώς και πιο εξελιγμένα συστήματα θέρμανσης-ψύξης. Παρ' όλα αυτά, η ενεργειακή απόδοση αυτών των κτηρίων παραμένει μέτρια συγκριτικά με τα σημερινά πρότυπα.

Οι ενεργειακές παρεμβάσεις που συνήθως εφαρμόζονται στο υπάρχον οικιστικό απόθεμα του Ηρακλείου ευθυγραμμίζονται με τις τάσεις πανελλαδικά. Δεδομένου του ζεστού κλίματος, πολύ δημοφιλής είναι η εγκατάσταση ηλιακών θερμοσιφώνων στις στέγες για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης η Κρήτη παρουσιάζει από τα υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης ηλιακών θερμικών συστημάτων στην Ελλάδα. Επίσης, πολλοί ιδιοκτήτες έχουν αντικαταστήσει τα παλαιά κουφώματα με νέα διπλά τζάμια και έχουν προσθέσει κλιματιστικά (αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα) για ψύξη και θέρμανση. Η εξωτερική θερμομόνωση σε τοίχους (θερμοπρόσοψη) και η μόνωση δωμάτων αποτελούν παρεμβάσεις που κερδίζουν έδαφος μέσω προγραμμάτων όπως το «Εξοικονομώ», αν και στο ήπιο κλίμα της Κρήτης το οικονομικό όφελος από τη θερμομόνωση είναι μικρότερο σε σχέση με ψυχρές περιοχές, γεγονός που κάνει ορισμένους ιδιοκτήτες διστακτικούς στην επένδυση. Συνολικά, στο Ηράκλειο παρατηρείται αύξηση στις ενεργειακές αναβαθμίσεις. Τυπικά περιλαμβάνουν αντικατάσταση κουφωμάτων, προσθήκη μόνωσης όπου εφικτό, εγκατάσταση αποδοτικότερων λεβήτων ή αντλιών θερμότητας για θέρμανση, τοποθέτηση ηλιακών θερμοσιφώνων, καθώς και χρήση λαμπτήρων LED και αποδοτικών κλιματιστικών.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η θέρμανση και ψύξη των κατοικιών. Λόγω του ήπιου χειμώνα, αρκετές κατοικίες στο Ηράκλειο δεν διέθεταν κεντρική θέρμανση με θερμαντικά σώματα ή είχαν συστήματα που λειτουργούσαν περιορισμένα. Παραδοσιακά, πολλές κατοικίες χρησιμοποιούσαν ξυλόσομπες ή τζάκια για τη θέρμανση χώρων, ενώ σήμερα επικρατεί η χρήση ηλεκτρικών τοπικών κλιματιστικών μονάδων (inverter) που λειτουργούν ως κύρια θέρμανση σε συνδυασμό με ψύξη το καλοκαίρι. Σε πολυκατοικίες των δεκαετιών 1970–1990 όπου υπάρχει εγκατεστημένο κεντρικό σύστημα θέρμανσης (συνήθως λεβητας πετρελαίου), συχνά η λειτουργία του

έχει περιοριστεί ή αντικατασταθεί σε επίπεδο διαμερισμάτων από αυτόνομα κλιματιστικά, λόγω κόστους καυσίμου και ήπιου κλίματος. Αντίστοιχα, η ψύξη ήταν παραδοσιακά φυσική (μέσω διαμπερούς αερισμού τις νυχτερινές ώρες, ανεμιστήρων οροφής) αλλά με τις ολοένα υψηλότερες θερμοκρασίες και το βιοτικό επίπεδο, σχεδόν κάθε σύγχρονο σπίτι διαθέτει μία ή περισσότερες κλιματιστικές μονάδες. Ο προσανατολισμός των κτιρίων στο Ηράκλειο δεν ήταν πάντα βέλτιστος για παθητικό δροσισμό, όμως η θαλάσσια αύρα βοηθά πολλές περιοχές της πόλης.

3.2.3. Περιγραφή των υπό μελέτη κατοικιών

Στην παρούσα μελέτη γίνεται επεργασία για 8 επιλεγμένες κατοικίες στο Ηράκλειο, ως προς τις διαθέσιμες χρονοσειρές μετρήσεων κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εσωτερικού αέρα. Το δείγμα περιλαμβάνει κατοικίες διαφόρων τύπων και χαρακτηριστικών, ώστε να εξαχθούν αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα. Τέσσερις από αυτές τις κατοικίες παρακολουθήθηκαν κατά τη χειμερινή περίοδο (τέλος Οκτωβρίου 2021 – Μάρτιος 2022) και άλλες τέσσερις κατά τη θερινή περίοδο (Ιούνιος – Σεπτέμβριος 2023), καλύπτοντας έτσι τόσο τη φάση θέρμανσης όσο και τη φάση ψύξης. Παρακάτω στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κατοικίας περιλαμβάνοντας δομικά, λειτουργικά και ενεργειακά στοιχεία. Για καθεμία κατοικία δίνονται πληροφορίες για τον τύπο και το μέγεθός της, το έτος κατασκευής, τον αριθμό δωματίων και ενοίκων, τυχόν ενεργειακές αναβαθμίσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά την αρχική κατασκευή, τα κύρια δομικά χαρακτηριστικά του κελύφους (τοίχοι και κουφώματα) καθώς και τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης, την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ), τον φωτισμό και άλλο σχετικό εξοπλισμό. Πίνακας απο [7].

Χειμερινή Περίοδος (26 Οκτωβρίου – 30 Μαρτίου)

Χαρακτηριστικά	**Κατοικία W-1**	**Κατοικία W-2**	**Κατοικία W-3**	**Κατοικία W-4**
Τύπος	Διαμέρισμα σε πολυκατοικία	Διαμέρισμα σε διώροφη οικοδομή	Μονοκατοικία	Διαμέρισμα σε χαμηλή πολυκατοικία
Εμβαδόν (m²)	125	167	166	200
Έτος κατασκευής	1987	2000	2006	1986

Υπνοδωμάτια	3	3	4	4
Ένοικοι	3	2	5	4
Τοιχοποιία	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση
Ανοίγματα	Διπλοί υαλοπίνακες 6mm, αλουμινένιο πλαίσιο	Διπλοί υαλοπίνακες 12mm, αλουμινένιο πλαίσιο	Διπλοί υαλοπίνακες 12mm, PVC πλαίσιο	Διπλοί υαλοπίνακες 3mm, αλουμινένιο πλαίσιο
Κύριο σύστημα θέρμανσης	2 Κλιματιστικά / Απόγευμα (1h), Βράδυ (1h)	Κεντρική Αντλία Θερμότητας / Συνεχής λειτουργία σε σταθερό set-point	Κεντρική Αντλία Θερμότητας / Απόγευμα (3h), Βράδυ (3h)	4 Κλιματιστικά / Συνεχής λειτουργία σε σταθερό set-point
Δευτερεύον σύστημα θέρμανσης	Καυστήρας πετρελαίου	N/A	N/A	Ενεργειακό τζάκι
Ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ)	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα
Φωτισμός	Λαμπτήρες πυρακτώσεως	LED	LED	LED
Άλλα συστήματα	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Πλυντήριο πιάτων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Πλυντήριο πιάτων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, στεγνωτήριο, Πλυντήριο πιάτων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, στεγνωτήριο, Πλυντήριο πιάτων, Εξοπλισμός μαγειρικής

Πίνακας 1. Πληροφορίες για τις εξεταζόμενες κατοικίες χειμερινής περιόδου.

Θερινή Περίοδος (1 Ιουνίου – 30 Σεπτεμβρίου)

Χαρακτηριστικά	**Κατοικία S-1**	**Κατοικία S-2**	**Κατοικία S-3**	**Κατοικία S-4**
Τύπος	Διώροφη κατοικία	Διαμέρισμα σε πολυκατοικία	Διαμέρισμα σε πολυκατοικία	Διαμέρισμα σε πολυκατοικία
Εμβαδόν (m^2)	95	75	87	55
Έτος κατασκευής	1980-1990	Πριν το 1980	1997	2005
Υπνοδωμάτια	2	2	2	1
Ένοικοι	3	1	3	2
Τοιχοποιία	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση	Τούβλο-μπετόν, μονωμένο	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση	Τούβλο-μπετόν, ανεπαρκής μόνωση
Ανοίγματα	Διπλοί υαλοπίνακες 12mm, PVC πλαίσιο	Μονός υαλοπίνακας, αλουμινένιο πλαίσιο	Διπλοί υαλοπίνακες 6mm, αλουμινένιο πλαίσιο	Διπλοί υαλοπίνακες 12mm, αλουμινένιο πλαίσιο
Κύριο σύστημα θέρμανσης	3 Κλιματιστικά /Συνεχής λειτουργία σε σταθερό set-point	1 Κλιματιστικό / Συνεχής λειτουργία σε σταθερό set-point	3 Κλιματιστικά /Πρωί σε σταθερό set-point	1 Κλιματιστικό / Βράδυ
Δευτερεύον σύστημα θέρμανσης	N/A	N/A	Ηλεκτρική θερμάστρα	Ηλεκτρική θερμάστρα
Ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ)	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα	Ηλιακός θερμοσίφωνας με ηλεκτρικό θερμαντήρα	Ηλεκτρικός θερμαντήρας (15 λεπτά το βράδυ)	Ηλεκτρικός θερμαντήρας (15 λεπτά το βράδυ)
Φωτισμός	LED	LED	LED, Αλογόνου	LED

Άλλα συστήματα	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Πλυντήριο πιάτων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Εξοπλισμός μαγειρικής	TV, Ψυγείο, Πλυντήριο ρούχων, Εξοπλισμός μαγειρικής

Πίνακας 2. Πληροφορίες για τις εξεταζόμενες κατοικίες καλοκαιρινής περιόδου.

3.3. Μεθοδολογία Καταγραφής Δεδομένων και Περιγραφή Μεταβλητών

Όπως προαναφέρθηκε, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο προηγούμενης ερευνητικής δουλειάς (βλ. έρευνα [7]). Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην αριθμητική επεξεργασία των μετρήσεων προς εξαγωγή συμπερασμάτων ενεργειακού ελέγχου των κατοικιών. Ωστόσο, για την πληρότητα της παρούσας μελέτης κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί εν συντομία η μεθοδολογία καταγραφής των μετρούμενων παραμέτρων. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε επιλεγμένες κατοικίες με καταγραφή των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν το θερμικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν και καταγράφηκαν σε ωριαία χρονικά διαστήματα οι εξής μεταβλητές: εσωτερική θερμοκρασία αέρα °C, σχετική υγρασία % και ηλεκτρική κατανάλωση του νοικοκυριού. Οι δύο πρώτες παράμετροι αποτελούν κρίσιμους περιβαλλοντικούς δείκτες της θερμικής άνεσης, σύμφωνα και με τα διεθνή πρότυπα. Η ηλεκτρική κατανάλωση καταγράφηκε για τη διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της κατοικίας σε συνάρτηση με τις συνθήκες άνεσης.

Για την θερμοκρασία και υγρασία χρησιμοποιήθηκαν απλοί καταγραφείς περιβάλλοντος (data loggers). Οι συσκευές αυτές ήταν επαρκούς ακρίβειας, με τυπικό εύρος μέτρησης θερμοκρασίας περίπου 0–55 °C και ακρίβεια ±0.5 °C, ενώ για τη σχετική υγρασία κάλυπταν εύρος 10–95% RH με ακρίβεια περίπου ±5% (στους 25 °C) [7]. Όλοι οι αισθητήρες βαθμονομήθηκαν πριν την εγκατάσταση, τοποθετήθηκαν εντός των χώρων, μακριά από άμεση ηλιακή ακτινοβολία ή πηγές θερμότητας (καλοριφέρ), και κατέγραφαν συνεχώς σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (log interval). Τα δεδομένα αποθηκεύονταν για περαιτέρω ανάλυση. Παράλληλα, η ηλεκτρική κατανάλωση του εκάστοτε νοικοκυριού παρακολουθήθηκε μέσω κατάλληλου αισθητηρίου κατανάλωσης, ώστε να υπάρχει χρονική αντιστοίχιση των ενεργειακών δεδομένων με τις εσωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες [23].

Στην επεξεργασία των δεδομένων δόθηκε έμφαση στον εντοπισμό τυχόν ελλιπών καταγραφών. Δεν εφαρμόστηκε καμία τεχνική παρεμβολής (interpolation)

για τη συμπλήρωση κενών τιμών. Αντίθετα, τα ελλιπή δεδομένα επισημάνθηκαν ρητά ως ελλιπή και εξαιρέθηκαν από ποσοτικές αναλύσεις όπου ήταν απαραίτητο. Απαραίτητο ήταν στην ομαδοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε εβδομάδιαίο βήμα για την δημιουργία κάποιων διαγραμμάτων. Η υπόθεση στην παρούσα εργασία είναι ότι πάνω από 12 συνολικές "κενές" ωριαίες τιμές σε μια εβδομάδα η συγκεκριμένη εβδομάδα θα τίθεται ως με "Μη Επαρκή Δεδομένα". Αυτή η μεθοδολογία υιοθετήθηκε απο το Σταυρακάκη [7], ώστε να μην εισαχθούν τεχνητά στοιχεία ή μεροληψίες στα αποτελέσματα λόγω εκτιμώμενων τιμών και μειωθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Οι σχετικά λίγες αυτές τιμές (λόγω στιγμιαίας αστοχίας αισθητήρα ή απώλειας σήματος) παρουσιάζονται στα διαγράμματα ως κενά ή ειδική σήμανση, δίνοντας μια σαφή εικόνα της διαθεσιμότητας των δεδομένων χωρίς να αλλοιώνεται η χρονική σειρά.

Αξιοσημείωτοί περιορισμοί:

- Μονοσημειακή μέτρηση ανά κατοικία: Σε κάθε κατοικία, οι μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας προέρχονται από έναν μόνο αισθητήρα σε ένα δωμάτιο. Αυτό σημαίνει ότι υποθέτηκαν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την κατοικία, ή τουλάχιστον ότι το επιλεγμένο δωμάτιο (συνήθως το καθιστικό) αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τον χώρο όπου βρίσκονται οι ένοικοι τις περισσότερες ώρες. Στην πράξη, μπορεί να υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ δωματίων. Οι αποκλίσεις αυτές δεν αποτυπώνονται στα δεδομένα. Επιπλέον, δεν καταγράφηκαν τοπικές συνθήκες όπως θερμοκρασία κοντά στο δάπεδο σε σχέση με το ύψος κεφαλιού, που θα επέτρεπαν εκτίμηση τοπικής δυσφορίας [24]. Λόγω του ενός αισθητήρα ανά σπίτι αυτός ο περιορισμός ήταν αναπόφευκτος. Για να ενισχυθεί, επιλέχθηκε μια αντιπροσωπευτική θέση αισθητήρα, ώστε οι μετρήσεις να αντικατοπτρίζουν κατά το δυνατόν το γενικό περιβάλλον του χώρου. Τέλος, αναγνωρίζεται ότι λεπτομερέστερη καταγραφή (πολλαπλοί αισθητήρες ανά δωμάτιο ή ανά κατοικία) θα μπορούσε να αποδώσει πληρέστερη εικόνα, κάτι που θα μπορέσει να αποτελέσει σύσταση για μελλοντική έρευνα.
- Μέτρηση μόνο ηλεκτρικής κατανάλωσης: Όπως περιγράφηκε, σε κάθε κατοικία μετρήθηκε η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση. Δεν υπήρχε διαχωρισμός ως προς το είδος χρήσης (θέρμανση σε σχέση με άλλες συσκευές) ούτε καταγραφή άλλων μορφών ενέργειας (αν μια κατοικία είχε και τζάκι ή κατανάλωση πετρελαίου για θέρμανση, αυτό δεν καταγράφηκε). Αυτός είναι ένας σημαντικός περιορισμός ως προς τη διερεύνηση της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς. Στις περισσότερες χειμερινές κατοικίες, παρότι η κύρια θέρμανση γινόταν

ηλεκτρικά, υπήρχαν κάποιες περίοδοι όπου οι ένοικοι χρησιμοποίησαν δεύτερες πηγές (τζάκι), με αποτέλεσμα να διατηρούν άνεση χωρίς ταυτόχρονη ηλεκτρική κατανάλωση. Στις περιπτώσεις αυτές, το μοντέλο μας (που συσχετίζει PMV με ηλεκτρική κατανάλωση) αδυνατεί να αποδώσει την πραγματική ενεργειακή συνεισφορά αυτών των πηγών. Για παράδειγμα, εντοπίστηκαν εβδομάδες τον χειμώνα όπου ο PMV παρέμεινε κοντά στο ουδέτερο ενώ η ηλεκτρική κατανάλωση ήταν μηδενική, ένδειξη ότι πιθανώς χρησιμοποιήθηκε θέρμανση με ξύλα ή άλλο καύσιμο. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, κατά την ανάλυση εφαρμόστηκε ο κανόνας αποκλεισμού που περιγράφηκε (μη συμπερίληψη εβδομάδων με ώρες μηδενικών τιμών) [7]. Ωστόσο, γενικότερα, αυτός ο περιορισμός υπογραμμίζει ότι τα αποτελέσματά μας αφορούν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για επίτευξη άνεσης. Μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση θα απαιτούσε μετρήσεις όλων των ροών ενέργειας (επιμέρους μετρητές καυσίμων, διακριτή μέτρηση A/C σε σχέση με των λοιπών συσκευών) [25]. Η παρούσα μεθοδολογία, παρ' όλους τους περιορισμούς, κρίνεται ωστόσο ρεαλιστική και πρακτική για εφαρμογές, καθώς χρησιμοποίησε απλό εξοπλισμό και παρείχε χρήσιμα αποτελέσματα σε πραγματικές συνθήκες μη ελεγχόμενης συμπεριφοράς χρηστών [7].

3.4. Υπολογιστικές τεχνικές επεξεργασίας των μετρήσεων

3.4.1. Υπολογισμός Δεικτών Θερμικής Άνεσης (PMV/PPD) – Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη για την αξιολόγηση της θερμικής άνεσης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης PMV (Predicted Mean Vote), σε συνδυασμό με τον PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), όπως ορίζονται στο πρότυπο ASHRAE 55 και το διεθνές πρότυπο ISO 7730 [9][10]. Σύμφωνα με τη θεωρία του Fanger, ο PMV υπολογίζεται μέσω μιας σύνθετης εξίσωσης θερμικής ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη έξι βασικές μεταβλητές: (i) τον μεταβολισμό (M, σε met), (ii) τη θερμική μόνωση του ρουχισμού (I_cl, σε clo), (iii) τη θερμοκρασία αέρα (T_a), (iv) τη μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (T_mr), (v) την ταχύτητα του αέρα V και (vi) τη σχετική υγρασία R.H. (ή εναλλακτικά την μερική πίεση υδρατμών) του περιβάλλοντος. Όταν οι παράγοντες αυτοί είναι γνωστοί ή εκτιμημένοι, μπορεί να προβλεφθεί η θερμική αίσθηση του ανθρώπου ως προς ολόκληρο το σώμα υπολογίζοντας τον **PMV** από:

$$\mathrm{PMV} = (0.303 * \mathrm{e}^{(-0.036 * \mathrm{M}) + 0.028}) * \mathrm{TL} \quad (1)$$

Όπου M ο μεταβολισμός (W/m^2), TL το θερμικό ολικό ισοζύγιο (W/m^2)

Το **θερμικό ισοζύγιο TL** αποτελείται απο τον μεταβολισμό M, το έργο W και ροές ενέργειας:

$$\mathrm{TL} = \mathrm{M} - \mathrm{W} - (\mathrm{HL1} + \mathrm{HL2} + \mathrm{HL3} + \mathrm{HL4} + \mathrm{HL5}) \quad (2)$$

Οι **οποίες** υπολογίζονται από:

$$\mathrm{HL1} = \mathrm{Fcl} \cdot \mathrm{Hc} \cdot (\mathrm{Tcl\text{-}Tair}) \quad (3)$$

$$\mathrm{HL2} = \text{-}5{,}67 * 10^{-8} \cdot 0.698 \cdot \mathrm{Fcl} \cdot [(\mathrm{Tcl} + 273)^4 + (\mathrm{Trad} + 273^4)] \quad (4)$$

$$\mathrm{HL3} = \text{-}3.05 \cdot [5.73 - 0.000699 \cdot (\mathrm{M\text{-}W}) - \mathrm{Pa}] + 0.42 \cdot [(\mathrm{M\text{-}W}) - 58.15] \quad (5)$$

$$\mathrm{HL4} = \text{-}0.0014 \cdot \mathrm{M} \cdot (34\text{-}\mathrm{Tair}) \quad (6)$$

$$\mathrm{HL5} = 0.0173 \cdot \mathrm{M} \cdot (5.87\text{-}\mathrm{Pa}) \quad (7)$$

Για τον υπολογισμό του PMV στη παρούσα μελέτη, υιοθετήθηκαν οι κατευθυντήριες οδηγίες του προτύπου ASHRAE 55-2017 [9]. Οι απαιτούμενες παράμετροι εισόδου προέρχονταν είτε από τις μετρήσεις είτε από παραδοχές βάσει προτύπου. Συγκεκριμένα, έγιναν οι εξής παραδοχές (σταθερές τιμές) για τις προσωπικές μεταβλητές και άλλους συντελεστές, βάσει τυπικών σεναρίων κατοικιών:

Ρυθμός Μεταβολισμού M (Met): 1.2 met. Επιλέχθηκε τιμή που αντιστοιχεί σε ελαφρά δραστηριότητα καθημερινών οικιακών συνθηκών (καθιστική δραστηριότητα ή ήπια εργασία). Η τιμή 1.2 met ($69.78\ W/m^2$) είναι εντός της περιοχής ήπιων δραστηριοτήτων που προβλέπουν τα πρότυπα (τυπικό εύρος 1–1.5 met για καθιστούς ενήλικες) [24]

Θερμική μόνωση ρουχισμού I_cl (clo): Στο παρόν μοντέλο υιοθετήθηκαν διαφορετικές σταθερές τιμές clo ανά εποχή, σύμφωνα με την εποχική ενδυμασία των ενοίκων. Συγκεκριμένα ορίστηκε I_cl **=** 1.0 clo για τις ψυχρές περιόδους (χειμώνας), 0.75 clo για τις ενδιάμεσες περιόδους (άνοιξη/φθινόπωρο) και **0**.5 clo για τις θερμές περιόδους (καλοκαίρι). Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με τις συνήθεις τιμές που χρησιμοποιούνται σε μελέτες θερμικής άνεσης για χειμερινό και θερινό ντύσιμο [8]. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι συχνά υιοθετούνται απλουστευτικά μόνον δύο

επίπεδα ρουχισμού, περίπου 1 clo για τον χειμώνα και 0.5 clo για το καλοκαίρι. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε και μια ενδιάμεση τιμή (0.75 clo) για τις μεταβατικές εποχές, ώστε η μετάβαση να μην είναι απότομη. Στις εξισώσεις εμφανίζεται ο (F_cl**)** λόγος επιφάνειας ένδυσης προς επιφάνεια σώματος, όπου υπολογίζεται απο μία τμηματικά ορισμένη συνάρτηση:

$$F_cl = \begin{cases} 1 + 1.29 \cdot I_{cl}, & I_{cl} < 0.078 \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl}, & I_{cl} \geq 0.078 \end{cases} \quad (8)$$

Μέση θερμοκρασία από ακτινοβολία T_mr (°C): Δεν υπήρχε απευθείας μέτρηση. Για τον λόγο αυτό, ορίστηκε ότι η Tmr προσεγγίζει την θερμοκρασία αέρα, με μικρή διορθωτική απόκλιση βάσει εμπειρικού συντελεστή από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι στον υπό μελέτη οικιακό χώρο η T_mr ισούται με:

$$T_mr = 1{,}216 \cdot T_air - 5.20 \quad (9)$$

(στα περισσότερα σημεία ενός χώρου κατοικίας οι επιφάνειες βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τον αέρα). Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε από επεξεργασία στοιχείων από προηγούμενη έρευνα [26]. Με την προαναφερόμενη τεχνική αντιμετωπίζεται η μάλλον "επιπόλαια" παραδοχή T_mr = T_a η οποία απλοποιεί τον υπολογισμό του PMV, είναι όμως αποδεκτή για σχετικά ομοιόμορφα θερμικά περιβάλλοντα χωρίς έντονες ασυμμετρίες ακτινοβολίας [28].

Τάση ατμών Pa (kPa): Η τάση ατμών είναι μια θεμελιώδης παράμετρος στην αξιολόγηση της θερμικής άνεσης, καθώς ποσοτικοποιεί την πραγματική ποσότητα υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα. Παίζει κρίσιμο ρόλο στον υπολογισμό της απώλειας θερμότητας από την εξάτμιση του ανθρώπινου σώματος, ειδικά μέσω της εφίδρωσης. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πίεσης υδρατμών (kPa) δίνεται από τον τύπο:

$$Pa = \frac{R.H. \cdot 10 \cdot e^{16.6536 - \frac{4030.183}{T_{air} + 235}}}{1000} \quad (10)$$

Ταχύτητα εσωτερικού αέρα (V): Θεωρήθηκε σταθερή 0.15 m/s σε όλους τους χώρους και περιόδους. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε σχεδόν μηδενική αισθητή κίνηση αέρα (φυσικό εξαερισμό μέσω χαραμάδων ή ανοιγμάτων χωρίς ισχυρά ρεύματα) και είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές των προτύπων για αποδεκτές συνθήκες άνεσης (συνήθως <0.2 m/s) [9]. Υποτέθηκε ότι δεν χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες ή άλλες πηγές υπολογίσιμων ρευμάτων αέρα στον χώρο τις περιόδους των μετρήσεων.

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (Hc): Ο συντελεστής είναι μια κρίσιμη παράμετρος στην αξιολόγηση θερμικής άνεσης, καθώς διέπει το ρυθμό ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος αέρα. Η αξία του Hc επηρεάζεται απο την ταχύτητα αέρα για αυτό χρησιμοποιείται ευρέως η διατύπωση που παρέχεται απο τον Fanger.

$$\mathrm{Hc} = 12.1 \cdot \sqrt{\mathrm{V}} \tag{11}$$

Έργο (W): θεωρείται μηδέν, διότι θεωρείται ότι το υποκείμενο δεν ασκεί σωματικό έργο μέσα στην κατοικία (M=1.2 MET).

Αντίστοιχα, ο δείκτης PPD υπολογίζεται ως συνάρτηση του PMV και εκφράζει το ποσοστό των ατόμων που αναμένεται να νιώθουν δυσαρέσκεια (αίσθηση υπερβολικού ψύχους ή θέρμου) υπό συγκεκριμένες συνθήκες [10]. Ο PPD ουσιαστικά ποσοτικοποιεί το επίπεδο θερμικής δυσφορίας που αντιστοιχεί σε μια τιμή PMV.Στην πράξη, ο υπολογισμός του PPD γίνεται μέσω μιας εμπειρικής εξίσωσης που συνδέει τον PMV με το ποσοστό δυσαρεστημένων. Σύμφωνα με τη σχέση του προτύπου ISO 7730/ASHRAE 55, η οποία προέκυψε από πειραματικά δεδομένα, ο PPD δίνεται από τη εξίσωση:

$$\mathrm{PPD} = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot \mathrm{PMV} - 0.2179 \cdot \mathrm{PMV}^2) \tag{12}$$

όπου το αποτέλεσμα εκφράζεται σε ποσοστό (%) δυσαρεστημένων. Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό, με τον PMV κάθε χρονικής στιγμής ως είσοδο, ώστε να εκτιμηθεί το αντίστοιχο PPD.

Με βάση τα παραπάνω, ο υπολογισμός του PMV και του PPD για κάθε χρονική στιγμή των μετρήσεων έγινε με χρήση φύλλων Excel και κώδικα Python

(Παράρτημα Α , Β). Η υλοποίηση ακολούθησε τους αλγορίθμους του προτύπου ASHRAE 55-2017, εφαρμόζοντας τις εξισώσεις και παραμέτρους που περιγράφηκαν. Δεδομένου του αλγορίθμου τα δεδομένα εισόδου (θερμοκρασία, υγρασία) διαβάστηκαν από τα αρχεία καταγραφής και για κάθε εγγραφή χρόνου υπολογίστηκε η τιμή PMV βάσει της εξαρχής καθορισμένης μεθόδου. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η αντίστοιχη τιμή PPD. Τα αποτελέσματα οργανώθηκαν σε νέες χρονοσειρές (PMV(t) και PPD(t)), οι οποίες αναλύθηκαν περαιτέρω στο επόμενο στάδιο.

Πίνακας 3. Σύμβολα μεγεθών των εξισώσεων

HL1	Απώλεια θερμότητας μεταξύ επιδερμίδας-περιβάλλοντος μέσω συναγωγής (W/m^2)
HL2	Απώλεια θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (W/m^2)
HL3	Διάχυση θερμότητας μέσω της επιδερμίδας (W/m^2)
HL4	Απώλεια θερμότητας μέσω αναπνοής (Συγαγωγική) (W/m^2)
HL5	Απώλεια θερμότητας μέσω λανθάνουσας θερμότητας αναπνοής και εφίδρωσης (W/m^2)
Fcl	Συντελεστής επιφάνειας ενδύματος
Hc	Συντελεστής συναγωγής ($W/m^2 * K$)
Tcl	Θερμοκρασία ενδύματος (°C)
Tair	Θερμοκρασία αέρα (°C)
Tmr	Μέση ακτινοβολούμενη θερμοκρασία (°C)
Pa	Μερική πίεση υδρατμών (kPa)
Icl	Θερμική μόνωση ενδυμασίας (clo)
V	Ταχύτητα αέρα (m/s)

3.4.2. Επεξεργασία χρονοσειρών κατανάλωσης ενέργειας και PMV

Η ανάλυση των συλλεχθέντων δεδομένων πραγματοποιήθηκε με συνδυασμό εργαλείων λογισμικού, αξιοποιώντας τόσο εργαλεία Excel όσο και τη γλώσσα προγραμματισμού Python για ταχύτερη επεξεργασία. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το Excel για μια επισκόπηση των δεδομένων, τον υπολογισμό απαρραίτητων μεταβλητών του αλγορίθμου, τον καθαρισμό τους (π.χ. αφαίρεση προφανών σφαλμάτων ή επισήμανση απώλειας τιμών) και τον υπολογισμό βασικών δεικτών (μέσοι όροι, μέγιστα/ελάχιστα ανά μεταβλητή). Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισήχθησαν σε περιβάλλον Python, όπου με τη βοήθεια του προγράμματος Visual Studio και βιβλιοθηκών pandas, NumPy και Matplotlib πραγματοποιήθηκε διεξοδικότερη ανάλυση. (Παράρτηματα Α,Β)

Διαγράμματα Χρονοσειρών (Time-Series): Για την οπτικοποίηση των τάσεων των μεγεθών στο χρόνο, δημιουργήθηκαν διαγράμματα χρονοσειρών. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα χρονικά διαγράμματα των δεικτών θερμικής άνεσης PMV και PPD για μια ενδεικτική θερινή κατοικία και μια χειμερινή κατοικία, χρησιμοποιώντας διπλούς κατακόρυφους άξονες (ο δείκτης PPD αποδόθηκε με πράσινη γραμμή που διαβάζεται από τον αριστερό άξονα, ενώ ο δείκτης PMV με μωβ γραμμή από τον δεξιό άξονα). Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν αντίστοιχα διαγράμματα χρονοσειράς για την εσωτερική θερμοκρασία (°C), τη σχετική υγρασία (%), την ωριαία ηλεκτρική κατανάλωση (kWh) και τον υπολογισμένο δείκτη PMV. Τα διαγράμματα αυτά παρουσίαζαν την εξέλιξη των μεγεθών στον χρόνο και επέτρεψαν τον εντοπισμό ημερήσιων ή εποχικών τάσεων (ημερήσιες διακυμάνσεις ημέρας-νύχτας στη θερμοκρασία, αιχμές κατανάλωσης), χρησιμοποιώντας τα ακατέργαστα δεδομένα πριν από οποιαδήποτε περαιτέρω επεξεργασία (βλ. Σχήματα $1^{\alpha\text{-}\beta}$ και $2^{\alpha\text{-}\beta}$)

Χρονικοί Θερμοχάρτες (Heatmaps): Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής της θερμικής άνεσης κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και σε βάθος χρόνου, δημιουργήθηκαν δισδιάστατα διαγράμματα τύπου "χρονικοί θερμοχάρτες" του δείκτη PMV. Σε αυτούς τους heatmaps, ο ένας άξονας αντιστοιχεί στις ημέρες (καλύπτοντας ολόκληρη τη θερινή περίοδο Ιούνιος–Σεπτέμβριος ή τη χειμερινή περίοδο Οκτώβριος–Μάρτιος) και ο άλλος άξονας στις ώρες της ημέρας. Κάθε κελί του χάρτη απεικονίζει την τιμή του PMV με χρωματική διαβάθμιση από το μπλε (ψυχρές συνθήκες) έως το κόκκινο (θερμές συνθήκες), διευκολύνοντας τον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων προτύπων θερμικής δυσφορίας ή ουδετερότητας ανά εποχή και ώρα της ημέρας. Ο κώδικας (βλ. Παράρτημα Β – Snippet B2) ομαδοποιεί τα δεδομένα κατά ημέρα και ώρα, δημιουργώντας μια χρωματική στήλη PMV για κάθε συνδυασμό (ημέρα-ώρα). Αυτή η σύνοψη επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου pivot_table της βιβλιοθήκης pandas για τη δημιουργία πίνακα (με δείκτη τις ώρες

και στήλες τις ημέρες), και ακολούθως με τη συνάρτηση heatmap της βιβλιοθήκης seaborn για την απεικόνιση του πίνακα σε μορφή heatmap. Έχει επιλεγεί η χρωματική παλέτα "coolwarm" με ορισμένα όρια τιμών από -3 έως 3, ώστε οι ακραίες αρνητικές και θετικές τιμές PMV να ξεχωρίζουν χρωματικά (αντιστοιχώντας στις οριακές τιμές δυσφορίας ψύχους/ζέστης). Τέλος, προστίθενται ετικέτες στους άξονες (εβδομάδες στον οριζόντιο άξονα, ώρες στον κατακόρυφο) και τίτλος στο διάγραμμα, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αντιστρέφεται έτσι ώστε η ώρα 00:00 να εμφανίζεται στο κάτω μέρος για ευκολότερη ανάγνωση (βλ. Σχήματα 3Α_S1, 3Β_S3, 3Γ_S2, 3Δ_S4, 3Ε_W1, 3ΣΤ_W2, 3Ζ_W3, 3Η_W4).

Ροδογράμματα: Τα ροδόγραμμα δημιουργήθηκαν με σκοπό την αποτύπωση της ημερήσιας και εποχικής διακύμανσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ωριαία βάση. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τα εξής στάδια: αρχικά συλλέχθηκαν οι ωριαίες τιμές ακτινοβολίας (kWh/m²) για δύο περιόδους, τη θερινή και τη χειμερινή. Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε ωριαία βάση και απεικονίστηκαν σε πολικές συντεταγμένες, όπου η γωνία αντιστοιχεί στην ώρα του εικοσιτετραώρου και η ακτίνα στην ένταση της ακτινοβολίας. Για την οπτική απόδοση χρησιμοποιήθηκε κλίμακα χρωμάτων τύπου ‘’YlOrRd’’, με κίτρινες αποχρώσεις για χαμηλές τιμές και κόκκινες για υψηλές. Η χρωματική μπάρα στα δεξιά των διαγραμμάτων αποδίδει τις πραγματικές μονάδες ακτινοβολίας σε kWh/m² (βλ. Εικόνα 2).

Εβδομαδιαία Διαγράμματα: Τα εβδομαδιαία διαγράμματα παρήχθησαν με συνδυασμό επεξεργασίας δεδομένων σε Excel και αυτοματοποιημένων υπολογισμών σε Python. Αρχικά, τα δεδομένα χρονοσειρών (κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, δείκτης PMV, εξωτερική θερμοκρασία) οργανώθηκαν σε πίνακες Excel. Με τη χρήση VBA μακροεντολών και τύπων υπολογίστηκαν τα απαραίτητα μεγέθη (βλ. Παράρτημα Α – Α.7), όπως το άθροισμα της εβδομαδιαίας ενέργειας ανά κατοικία και η μέση εβδομαδιαία τιμή του PMV. Στο ίδιο στάδιο πραγματοποιήθηκε έλεγχος πληρότητας των δεδομένων, ώστε να εντοπιστούν οι εβδομάδες με ελλιπείς μετρήσεις. Στη συνέχεια, για περαιτέρω οργάνωση και αυτοματοποίηση της γραφικής απεικόνισης. Ο κώδικας ομαδοποίησε τις χρονοσειρές σε εβδομαδιαία διαστήματα, υπολόγισε για κάθε διάστημα:

- την αθροιστική ενέργεια της κάθε κατοικίας,
- τη μέση τιμή ενέργειας όλων των κατοικιών,
- τη μέγιστη εβδομαδιαία ενέργεια μεταξύ κατοικιών,
- τη μέση τιμή του δείκτη PMV ανά κατοικία και συνολικά,
- τη μέση εξωτερική θερμοκρασία.

Για τις εβδομάδες με ελλιπή δεδομένα εφαρμόστηκε κόκκινη ραβδωτή στήλη, ώστε να γίνεται οπτικά εμφανής η έλλειψη πληρότητας. Η γραφική παράσταση κατασκευάστηκε με μικτό τύπο, καθώς τα δεδομένα εισήχθησαν σε Python για την

αναπαράσταση του διαγράμματος. Οι κατηγοριοποιημένες μπάρες αποδίδουν τα ενεργειακά μεγέθη, ενώ οι γραμμές με διαφορετικά σύμβολα και χρώματα αποτυπώνουν τις μεταβολές του PMV και της θερμοκρασίας. Ο άξονας της ενέργειας βρίσκεται στα αριστερά, ενώ για τον PMV και την εξωτερική θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκαν δευτερεύοντες άξονες, ώστε να είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη (βλ. Σχήματα 5α-δ και 6α-δ) .

Καμπυλόγραμμα Διαγράμματα: Για την περαιτέρω κατανόηση της σχέσης μεταξύ θερμικής άνεσης και ηλεκτρικής κατανάλωσης, δημιουργήθηκαν διαγράμματα στα οποία ο δείκτης PMV απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα, ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η αθροιστική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά βήμα 0.5 της κλίμακας του PMV. Λαμβάνεται μέριμνα για την ορθή αποτύπωση της επίδρασης της εξωτερικής θερμοκρασίας με ομαδοποίηση των ζευγών PMV-El κατά εύρη της εξωτερικής θερμοκρασίας (χαμηλή, μέση, υψηλή) φροντίζοντας ο αριθμός των διαθέσιμων επιλέξιμων μετρήσεων (ώρες μη μηδενικής ηλεκτρικής ενέργειας) να είναι πολύ παρόμοιος μεταξύ των διαφορετικών ευρών εξωτερικής θερμοκρασίας [7]. Για τη θερινή περίπτωση, το χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος υπολογίστηκε 972 ώρες να αντιστοιχούν στο διάστημα αύτο, στο μεσαίο 977 ώρες και στο υψηλό 979 ώρες, ενώ για την χειμερινή το χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος υπολογίστηκε 972 ώρες να αντιστοιχούν στο διάστημα αύτο, στο μεσαίο 977 ώρες και στο υψηλό 979 ώρες. Αυτό συμβαίνει ώστε να τεκμηριώνεται η πυκνότητα δειγματοληψίας, δηλαδή να διασφαλίζεται ο ίδιος αριθμός επιλέξιμων μετρήσεων (μη μηδενικής ηλεκτρικής ενέργειας) μεταξύ των υιοθετούμενων θερμοκρασιακών ευρών. Ο δείκτης PMV χωρίστηκε σε ισομεγέθη διαστήματα εύρους 0.5 μονάδων και για κάθε διάστημα υπολογίστηκε η μέση τιμή και η συνολική κατανάλωση ενέργειας που καταγράφηκε όταν ο PMV βρισκόταν εντός αυτού του εύρους (Παράρτημα Α, WORKBOOK: Summer_PMV_Bell.xlsm).

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε σε κάθε κατοικία ξεχωριστά (θερινή και χειμερινή), και επαναλήφθηκε για τρεις διακριτές κατηγορίες εξωτερικής θερμοκρασίας. Η ταξινόμηση των εξωτερικών θερμοκρασιών έγινε βάσει ενός αυτοματοποιημένου αλγορίθμου [7], ο οποίος διαχωρίζει τα δεδομένα σε τρία εύρη (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό), εξισορροπώντας τον αριθμό των ωρών ενεργού κατανάλωσης (διατηρώντας απόκλιση μικρότερη του 5%). Η μεθοδολογία αυτή εξασφαλίζει ότι τα διαστήματα εξωτερικής θερμοκρασίας είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους, παρότι μπορεί να διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ των κατοικιών (βλ. Σχήματα 7 α-β-γ-δ και 8 α-β-γ-δ)

Κανονικοποιημένα Καμπυλόγραμμα Διαγράμματα Παλινδρόμησης: Ως συνέχεια των προηγούμενων διαγραμμάτων, όπου τεκμηριώθηκε η συσχέτιση θερμικής άνεσης και ηλεκτρικής κατανάλωσης σε επίπεδο πραγματικής κλίμακας. Η

διερεύνηση περιλαμβάνει 2 ανεξάρτητες μαθηματικές κανονικοποιήσεις αναφορικά με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι δημιουργείται ένα αναλυτικότερο πλαίσιο για την χαρτογράφηση της κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/m²) ως προς την θερμική αίσθηση (PMV), δίνοντας την δυνατότητα :

- Να συγκριθούν σχήματα και πρότυπα κατανάλωσης μεταξύ κατοικιών ανεξάρτητα από το απόλυτο μέγεθος κατανάλωσης,
- ελέγχεται αν υπάρχει σταθερή λειτουργική σχέση μεταξύ ενέργειας και δείκτη PMV (καμπανοειδές σχήμα),
- και θέτονται βάσεις για την εξεύρεση του επιπέδου θερμικής άνεσης γνωρίζοντας την ενεργειακή κατανάλωση.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή των διαγραμμάτων είναι η εξής:

1. Για κάθε κατοικία και κάθε θερμοκρασιακό εύρος ομαδοποιούνται οι ώρες σε διαστήματα PMV (βήμα 0.5) και υπολογίζεται ο μέσος όρος του διαστήματος PMV. Σημειώνεται ότι τα θερμοκρασιακά εύρη διαφέρουν μεταξύ τους (5%) ώστε να διασφαλίζεται η σύγκριση και ανάλυση, βέβαια για να υπάρχει μια συνοχή, εφόσον θα ενωποιηθούν οι κατοικίες (στην ανάλυση) για ένα θερμοκρασιακό εύρος και κάποιες διαφέρουν λίγο, πραγματοποιήθηκε μια υπόθεση. Η υπόθεση ήταν να παρθεί η κατώτατη και μέγιστη τιμή μεταξύ των θερμοκρασιακών ευρών έτσι ώστε να μελετηθεί το πλάτος που αναλύονταν προηγουμένως και να δημιουργηθούν τα (π.χ. 14.57–24.5, 24.52–28.23, 28.23–39.43)
2. Άθροιση ενέργειας (kWh/m²) σε κάθε μέσο συντελεστή PMV (διάστημα) ως προς $EL_{raw}(i,j)$
3. Κανονικοποίηση με δύο μεθόδους (ανά κατοικία και ανά εύρος).
4. Ενοποίηση: για κάθε θερμοκρασιακό εύρος, συγκεντρώνονται όλες οι τιμές PMV και $\mathrm{EL_{norm}}$ από όλες τις κατοικίες.
5. Απεικόνιση διασποράς των σημείων (scatter) και προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 2ου βαθμού με την τεχνική γραμμικής παλινδρόμησης:

$$y = ax^2 + bx + c$$

   με συντελεστή προσδιορισμού R^2 ως δείκτη αξιολόγησης της προσαρμογής.
6. Έλεγχος: σύγκριση RAW με τις δύο μαθηματικές κανονικοποιήσεις, έλεγχος ρεαλιστικότητας των συντελεστών και της κορυφής της καμπύλης.

Κατά την αρχική ανάπτυξη των συσχετίσεων επετράπη στην παλινδρόμηση να προεκταθεί σε αρνητικές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που προφανώς δεν έχει φυσικό νόημα. Ωστόσο, αυτό έγινε για αριθμητικούς λόγους δηλαδή για την επίτευξη της βέλτιστης γραμμής τάσης που προσαρμόζεται στα δεδομένα. Το ότι στα αρχικά γραφήματα παρακάτω φαίνονται αρνητικές τιμές ενέργειας είναι για αριθμητικούς λόγους.

Πιο συγκεκριμένα για την μαθηματική κανονικοποίηση εφαρμόστηκαν δύο ανεξάρτητες κανονικοποιήσεις ώστε να εξαλειφθούν οι καθαρά κλιμακωτές διαφορές (μέγεθος σπιτιού, βασικά φορτία, συμπεριφορά ενοίκων) και να γίνουν συγκρίσιμα τα σχήματα των καμπυλών μεταξύ κατοικιών/εύρων. Το RAW διάγραμμα επεικονίζει τις απόλυτες τιμές kWh/m², ενώ τα κανονικοποιημένα εστιάζουν στο σχήμα και κατανομή της ενέργειας ως προς το PMV.

1. Κανονικοποίηση ανά κατοικία (per-residence scaling)
   Για κάθε κατοικία i και κάθε εύρος θερμοκρασίας, η ενέργεια στο διάστημα PMV j διαιρείται με το μέγιστο της ίδιας κατοικίας μέσα στο συγκεκριμένο εύρος:

$$\mathrm{EL}_{\mathrm{norm,res}}(\mathrm{i},\mathrm{j}) = \frac{\mathrm{EL}_{\mathrm{raw}}(\mathrm{i},\mathrm{j})}{\max_{\mathrm{j}}\{\mathrm{EL}_{\mathrm{raw}}(\mathrm{i},\mathrm{j})\}}$$

Έτσι, οι τιμές κάθε κατοικίας κλιμακώνονται στο [0,1] και συγκρίνονται τα σχήματα χωρίς να επηρεάζει το συνολικό επίπεδο κατανάλωσης της κατοικίας.

2. Κανονικοποίηση ανά θερμοκρασιακό εύρος (per-band scaling)
   Για ένα δεδομένο θερμοκρασιακό εύρος και διάστημα PMV j, η ενέργεια κάθε κατοικίας i διαιρείται με το μέγιστο μεταξύ όλων των κατοικιών στο ίδιο j:

$$\mathrm{EL}_{\mathrm{norm,band}}(\mathrm{i},\mathrm{j}) = \frac{\mathrm{EL}_{\mathrm{raw}}(\mathrm{i},\mathrm{j})}{\max_{\mathrm{i}}\{\mathrm{EL}_{\mathrm{raw}}(\mathrm{i},\mathrm{j})\}}$$

Με αυτό εξισώνεται η κλίμακα εντός κάθε PMV-διαστήματος, ώστε να φανούν καθαρά οι σχετικές διαφοροποιήσεις μεταξύ κατοικιών στο ίδιο σημείο PMV. Η ανάλυση παρουσιάζεται στα σχήματα 9 α-β-γ, 10 α-β-γ, 11 α-β-γ, 12 α-β-γ, 13 α-β-γ, 14 α-β-γ.

Ολικά Καμπυλόγραμματα Διαγράμματα (Global): Στο τελικό στάδιο της μελέτης απο τα ζεύγη του δείκτη PMV και της αθροισμένης ηλεκτρικής κατανάλωσης, που προέκυψαν απο κάθε θερμοκρασιακό εύρος, παρουσιάζονται εκ νέου οι καμπύλες EL-PMV με χρήση μόνο των εξισώσεων που προέκυψαν από την παλινδρόμηση, λαμβάνοντας τώρα μέριμνα ώστε να μην εμφανίζονται αφύσικες αρνητικές τιμές της κατανάλωσης ενέργειας. Οι εξισώσεις αυτές αξιολογήθηκαν σε

πυκνό πλέγμα τιμών PMV και σχεδιάστηκαν σε κοινό γράφημα. Ο οριζόντιος άξονας PMV INDEX είναι όλο το διάστημα PMV. Ο κατακόρυφος άξονας διαφέρει ανά έκδοση γραφήματος, ανάλογα με το πως έγινε η κανονικοποίηση της ενέργειας.

Στην πρώτη έκδοση κανονικοποίησης χρησιμοποιείται μια ολική κανονικοποίηση ως προς το ίδιο συνολικό μέγιστο όλων των ευρών και όλων των διαστημάτων.

$$E_{norm}(x)\frac{E_{agg}(x)}{MAX_{διαστήματα,εύρη}\{E_{max}\}}$$

Ο κατακόρυφος άξονας είναι αδιάστατος στο [0,1], με όλες τις καμπύλες να μετρώνται με την ίδια κλίμακα. Κατά συνέπεια, οι διαφορές ύψους μεταξύ των ζωνών αποτυπώνουν διαφορές επιπέδου κατανάλωσης. Το θερμότερο εύρος εμφανίζεται υψηλότερα, ενώ τα ψυχρότερα χαμηλότερα, δημιουργώντας μια εικόνα κλιμάκωσης που αποδίδει τη σχετική βαρύτητα κάθε ζώνης στο συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα.

Ενώ στην δεύτερη έκδοση κανονικοποιείται κάθε θερμοκρασιακή ζώνη ως προς το δικό της μέγιστο:

$$E_{norm,v.2}(x)\frac{E_{agg}(x)}{MAX_{διαστήμα\ της\ ίδιας\ ζώνης}\{E_{max}\}}$$

Και εδώ ο κατακόρυφος άξονας είναι αδιάστατος [0,1], αλλά τώρα κάθε καμπύλη έχει τη δική της κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι κορυφές ευθυγραμμίζονται περίπου στη στάθμη 1. Με αυτήν την επιλογή, η σύγκριση δεν αφορά το απόλυτο μέγεθος κατανάλωσης μεταξύ ζωνών, αλλά κυρίως το σχήμα της καμπύλης. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν χρειάζεται να συγκριθεί πώς συμπεριφέρεται η κατανάλωση στη μεταβολή του PMV μέσα σε κάθε ζώνη, χωρίς να εμπλέκεται η διαφορά επιπέδου φορτίου μεταξύ ζωνών. Τιμές της παραβολής εκτός του παρατηρημένου φάσματος PMV ή αρνητικές τιμές αποκόπηκαν στο 0, διότι δεν υφίσταται ηλεκτρική ενέργεια στο μηδέν. Δίνονται οι αναλύσεις για τις περιόδους παρακάτω στη υποενότητα 4.1.1 (βλ. Σχήματα 15$^{α\text{-}β}$ και 16$^{α\text{-}β}$).

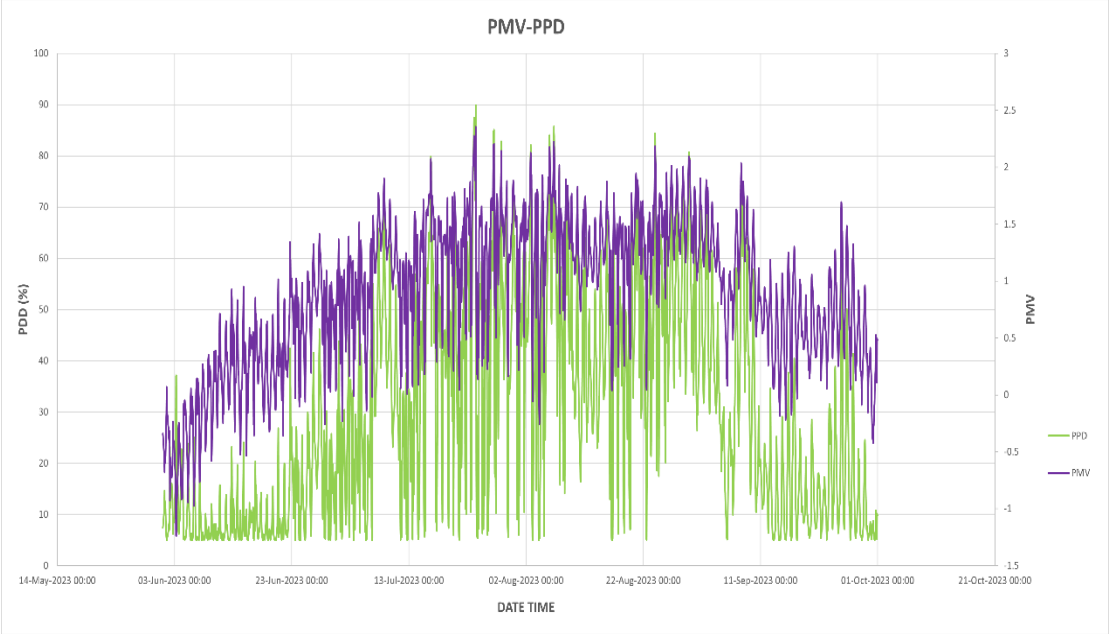
Πίνακας 4. Σύμβολα μεγεθών των εξισώσεων κανονικοποίησης

$E_{norm}, E_{norm,v.2}$	Η κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας στην αντίστοιχη έκδοση
$E_{agg}(x)$	Αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση κάθε διαστήματος (kWh/m²)
$MAX_{διαστήματα,εύρη}\{E_{max}\}$	Μέγιστη τιμή ενεργειακής κατανάλωσης ανάμεσα σε όλα τα θερμοκρασιακά εύρη
$MAX_{διαστήμα\ της\ ίδιας\ ζώνης}\{E_{max}\}$	Μέγιστη τιμή ενεργειακής κατανάλωσης ανάμεσα σε κάθε ένα θερμοκρασιακό εύρος ξεχωριστά

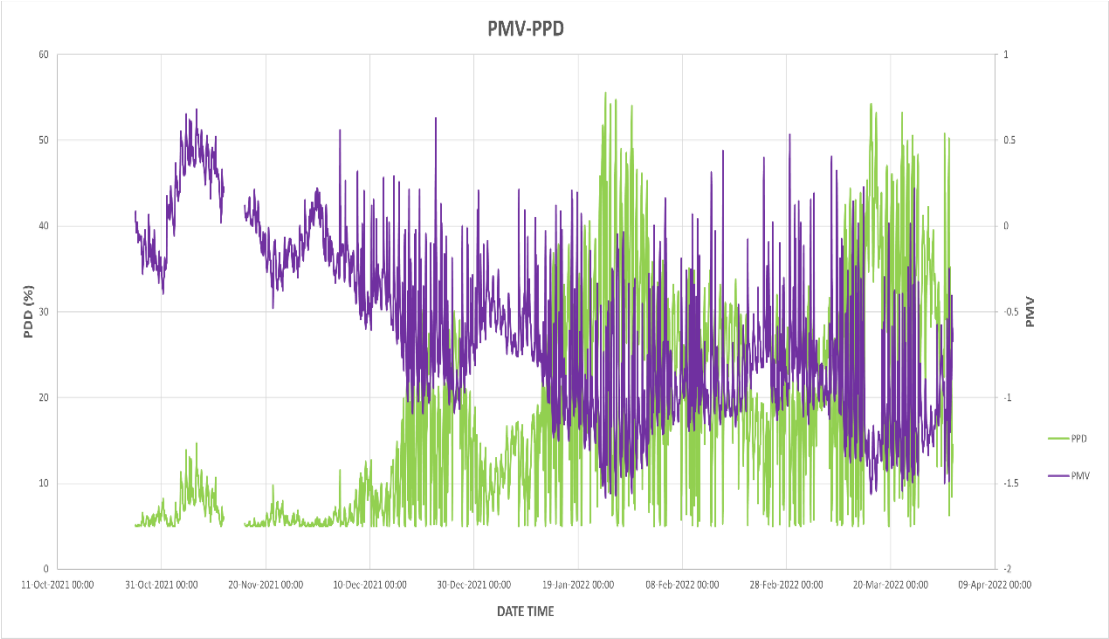
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων

4.1. Διαγράμματα Χρονοσειρών (Time series plots)

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων επιλέχθηκαν κατάλληλα διαγράμματα που αναδεικνύουν τις χρονικές μεταβολές και τις κατανομές των μετρούμενων μεγεθών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διαγράμματα χρονοσειρών (time-series plots). Μία σύντομη εκτίμηση γίνεται απο την οπτικοποίηση των δεικτών του PMV και PPD. Αυτό παρουσιάζεται παρακάτω για την περίπτωση μιας κατοικίας θερινή περίοδο και μια κατοικία χειμερινής περιόδου.



Σχήμα 1α: Δείκτες θερμικής άνεσης PMV/PPD για την εξεταζόμενη κατοικία S-1 θερινής περιόδου.



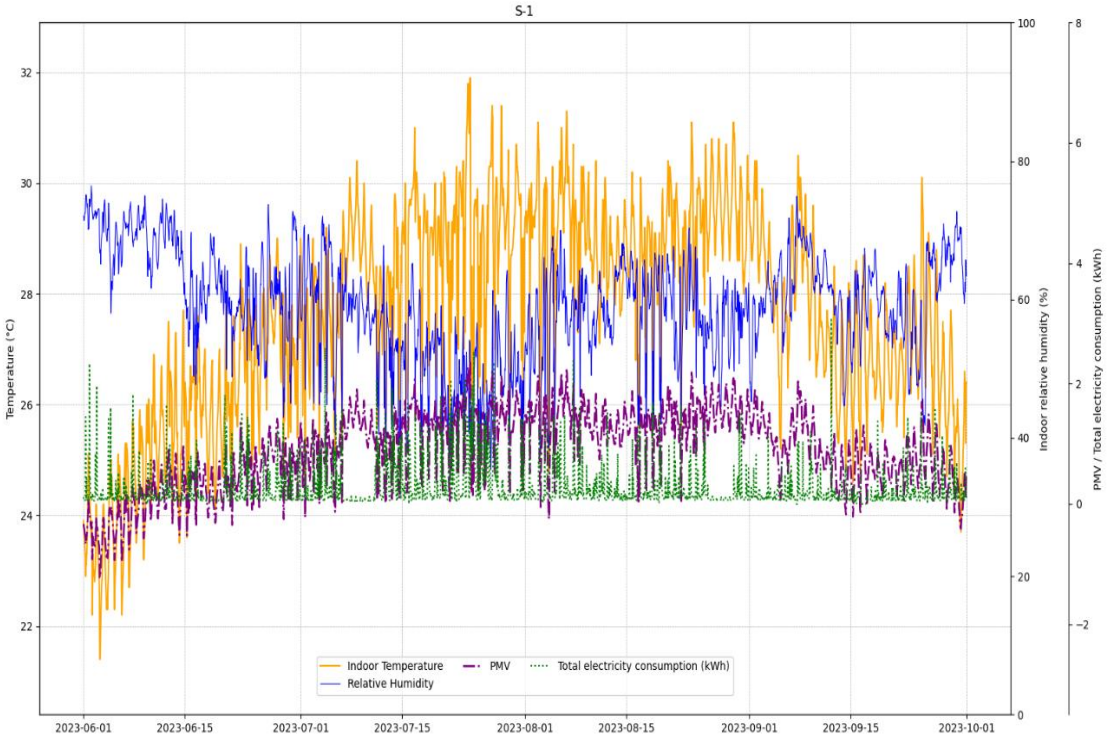
Σχήμα 1β: Δείκτες θερμικής άνεσης PMV/PPD για την εξεταζόμενη κατοικία W-1 χειμερινής περιόδου.

Η πράσινη γραμμή αντιστοιχεί στον δείκτη PPD και διαβάζεται απο τον αριστερό άξονα (%), ενώ ο δείκτης PMV αποτυπώνεται με τη μωβ γραμμή και διαβάζεται απο τον δεξιό άξονα.

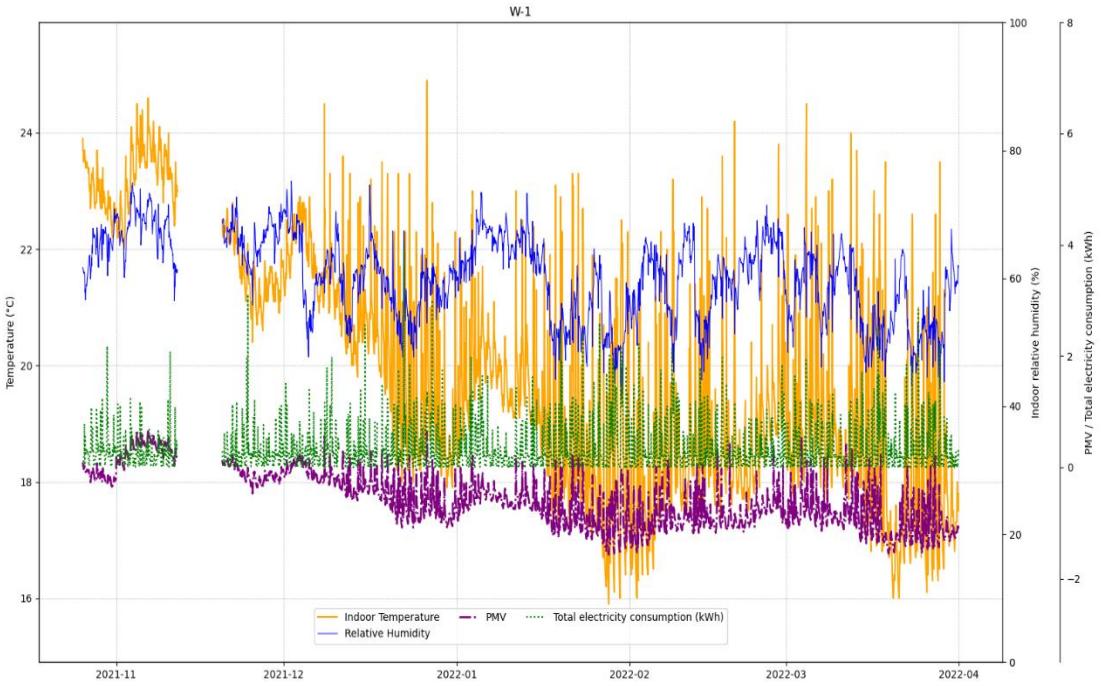
Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις ανεξαρτήτου του χρόνου μελέτης (θερινή ή χειμερινή), το μοντέλο δείχνει μοτίβα που αποδεικνύουν την συσχέτιση

μεταξύ των απεικονιζόμενων δεικτών. Παράλληλα, διακρίνονται και οι περίοδοι με απουσία δεδομένων στην χειμερινή περίπτωση ανάμεσα στο διάστημα 12 Νοεμβρίου με 15 Νοεμβρίου δεν υπάρχουν μετρήσεις, συνεπώς και δείκτες θερμικής άνεσης.

Ακόμη δημιουργήθηκαν διαγράμματα χρονικής σειράς για τη εσωτερική θερμοκρασία (°C), τη σχετική υγρασία (%), την ηλεκτρική κατανάλωση (kWh), καθώς και για τον υπολογισμένο δείκτη PMV. Τα διαγράμματα αυτά αποτυπώνονται παρακάτω. Στο σχήμα 2α παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι χρονοσειρές της θερινής κατοικίας S-1, καθώς στο σχήμα 2β παρουσιάζονται της κατοικίας W-1 όπως προέκυψαν απο τις μετρήσεις πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε περαιτέρω επεξεργασίας.



Σχήμα 2α: Συγκεντρωτική παρουσίαση χρονοσειρών θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου, σχετικής υγρασίας, δείκτη PMV και ημερήσιας συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για την θερινή κατοικία S-1.



Σχήμα 2β: Συγκεντρωτική παρουσίαση χρονοσειρών θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου, σχετικής υγρασίας, δείκτη PMV και ημερήσιας συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για την χειμερινή κατοικία W-1.

4.2. Χρονικοί Θερμοχάρτες (Temporal heatmaps)

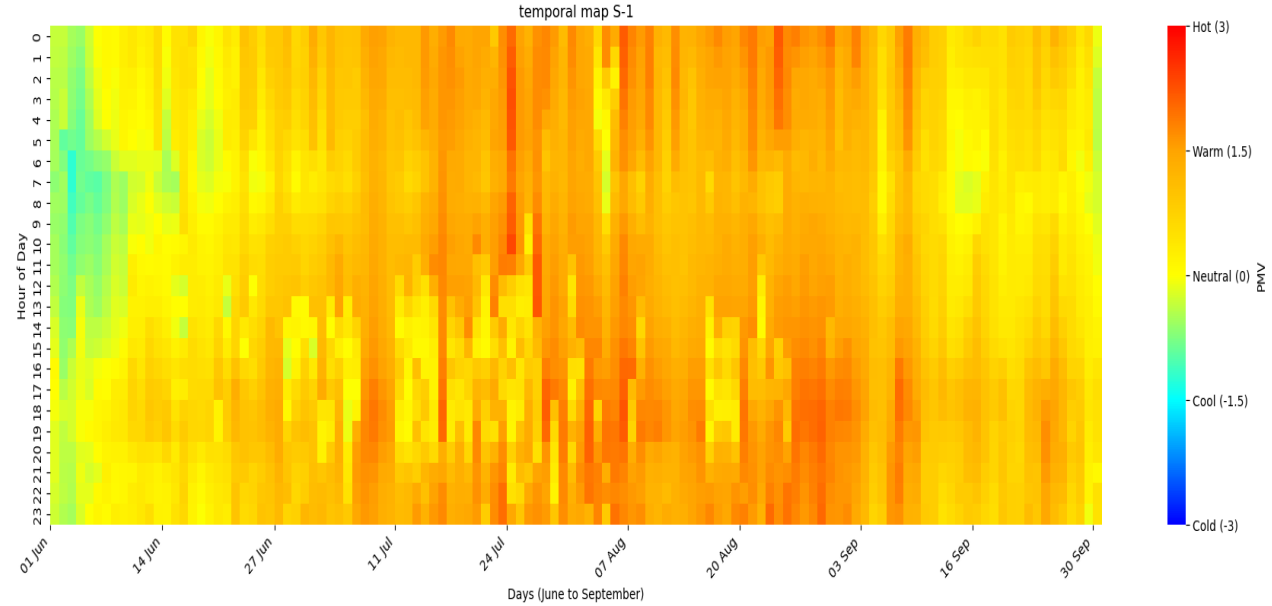
Για την καλύτερη κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς των κατοικιών κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου και σε βάθος χρόνου, αξιοποιήθηκαν οι χρονικοί θερμοχάρτες (temporal heatmaps) του δείκτη PMV. Οι χάρτες αυτοί αποτυπώνουν σε δισδιάστατη μορφή (άξονες ημέρα και ώρα) την ποσοτική μεταβολή του PMV καθ' όλη τη θερινή (Ιούνιος–Σεπτέμβριος) και τη χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος–Μάρτιος).

Η χρωματική παλέτα κυμαίνεται από το ψυχρές συνθήκες (μπλε) έως θερμές συνθήκες (κόκκινο) επιτρέποντας την οπτική αναγνώριση περιόδων θερμικής δυσφορίας ή ουδετερότητας, αναλόγως της εποχής, της ώρας και της κατοικίας.

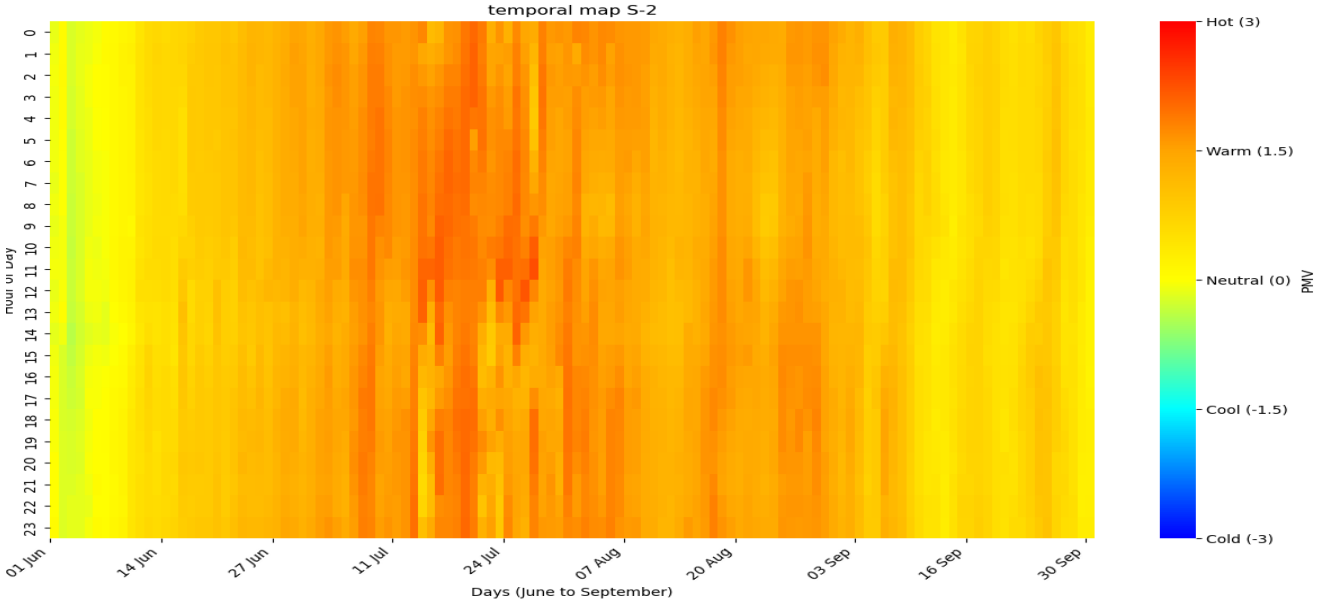
Από τα heatmaps των κατοικιών S-1 έως S-4 κατά τη θερινή περίοδο, παρατηρείται ότι καταγράφονται τιμές PMV άνω του +0.5 κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, γεγονός που υποδηλώνει θερμική δυσφορία. Οι κατοικίες S-2 και S-3 εμφανίζουν υψηλές τιμές PMV για μεγάλο μέρος της ημέρας, με την κατοικία S-3 να σημειώνει την μεγαλύτερη θερμική δυσφορία στις μέγιστες εξωτερικές θερμοκρασίες που καταγράφηκαν. Αντίθετα, στην S-4 οι τιμές PMV είναι πιο ισορροπημένες, με αρκετές ώρες κοντά στη ζώνη θερμικής άνεσης, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε ευνοϊκή χωροθέτηση ή επαρκή ενεργητικά μέσα ψύξης. Η

διακύμανση των τιμών εντός της ημέρας υπογραμμίζει τη σημασία των ωριαίων αναλύσεων για την κατανόηση της θερμικής αίσθησης των ενοίκων.

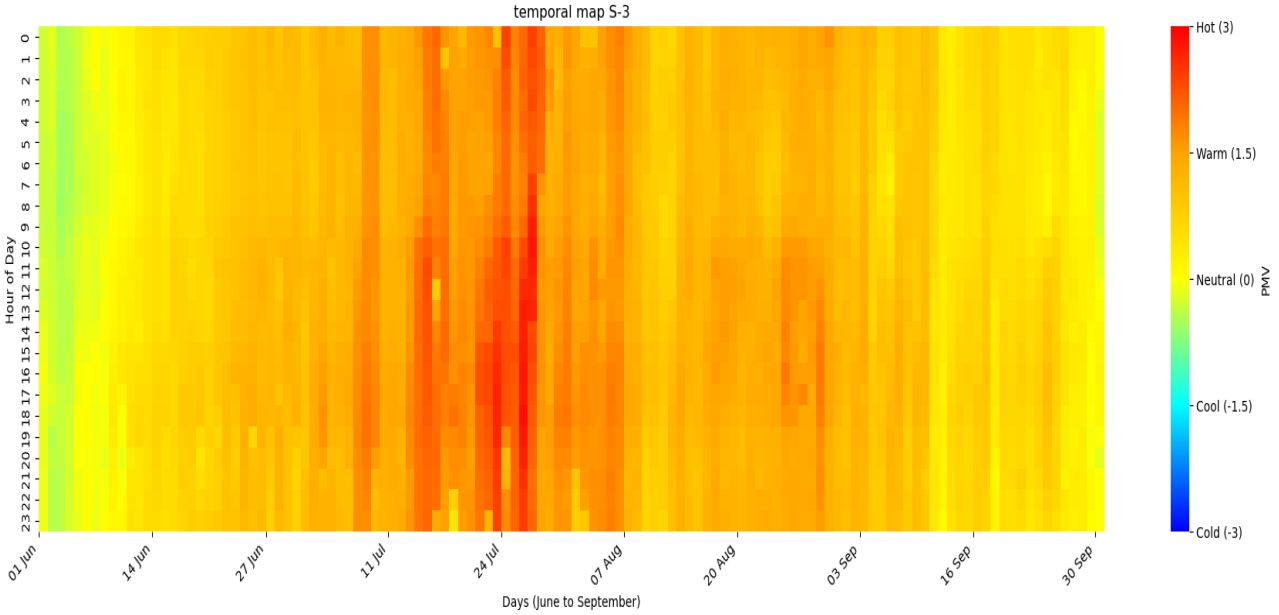
Παρακάτω δίνονται οι χρονικοί θερμοχάρτες (Σχήματα 3Α_S1, 3Β_S3, 3Γ_S2, 3Δ_S4), όπως και οι χρονικοί θερμοχάρτες (Σχήματα 3Ε_W1, 3ΣΤ_W2, 3Ζ_W3, 3Η_W4) για τις εξεταζόμενες κατοικίες χειμώνα και καλοκαιριού.



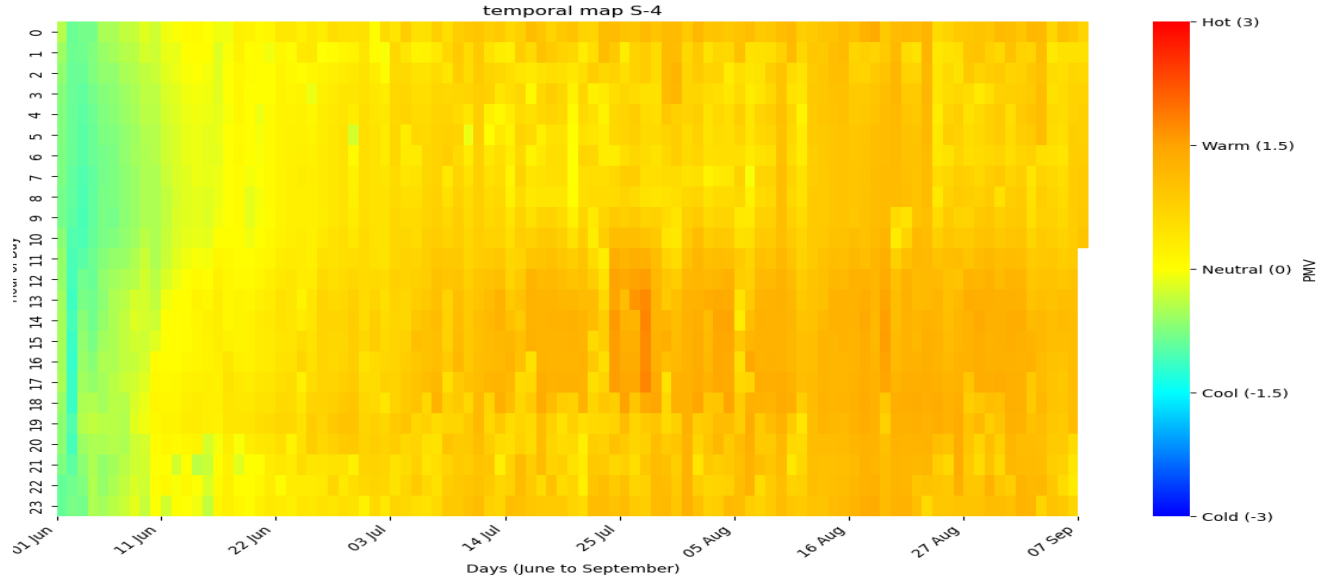
Σχήματα 3Α_S1, 3Β_S3, 3Γ_S2, 3Δ_S4: Χρονικοί χάρτες PMV για τις τέσσερις θερινές κατοικίες (S-1 έως S-4) κατά την περίοδο Ιουνίου – Σεπτεμβρίου 2023.



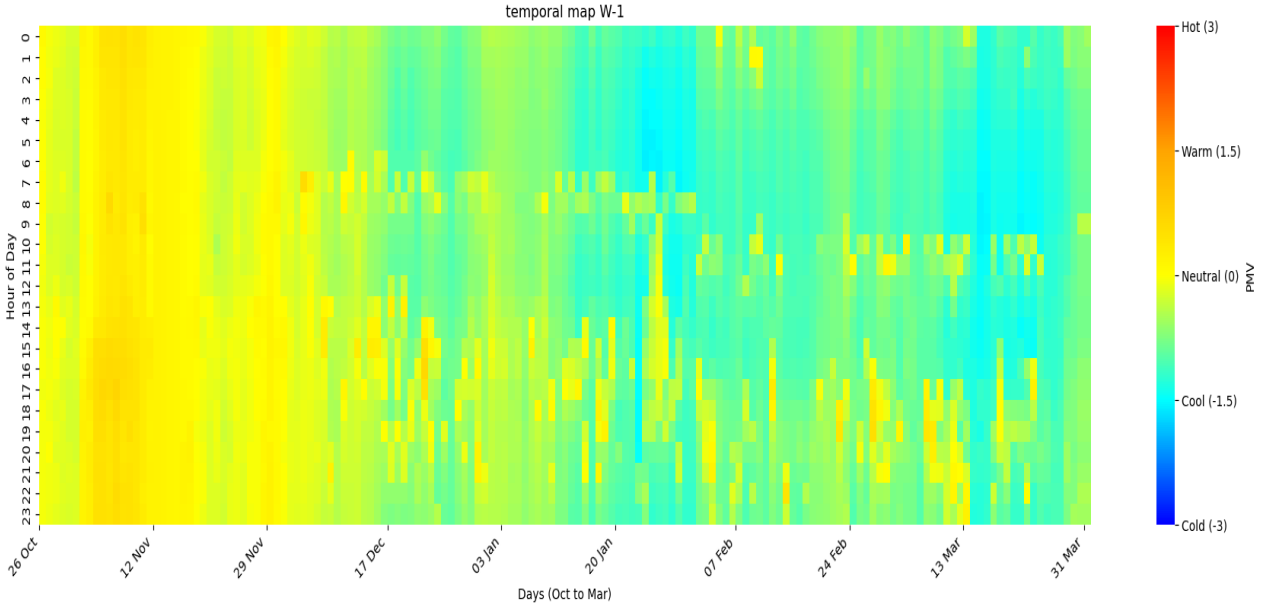
Σχήμα 3Β_S2



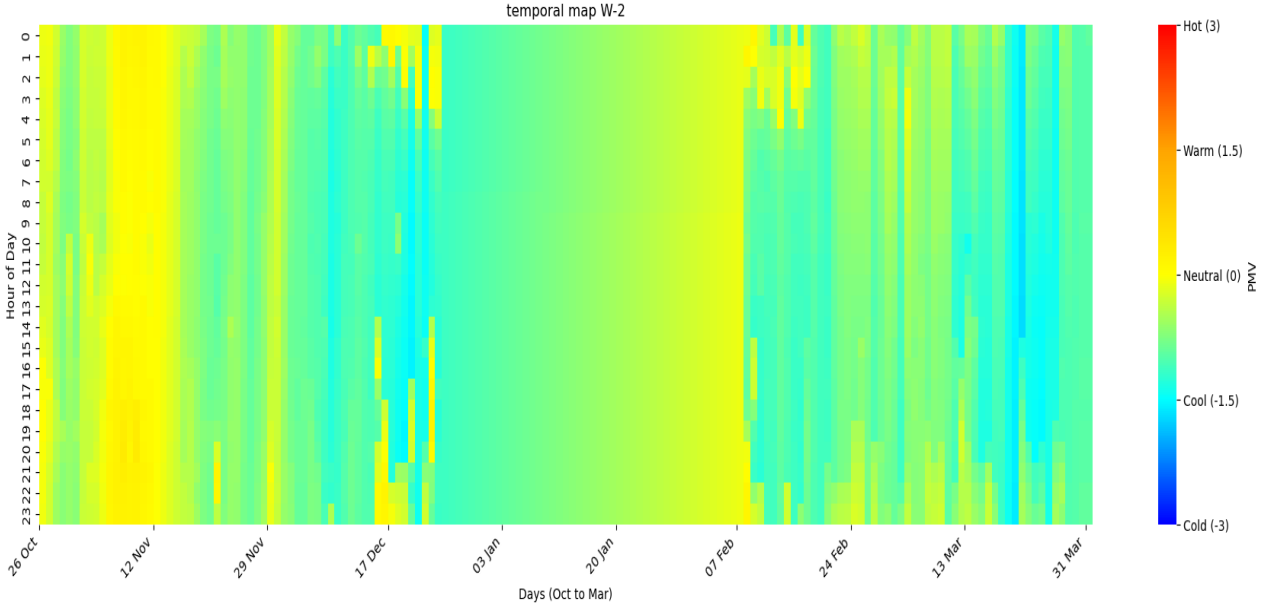
Σχήμα 3Γ_S3



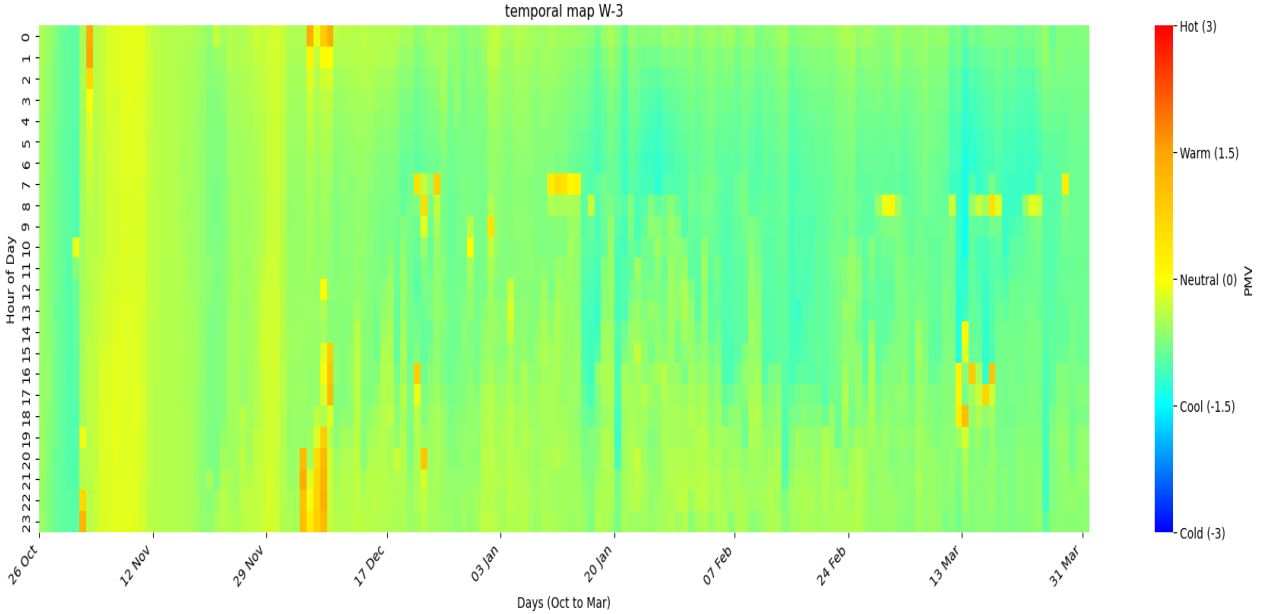
Σχήμα 3Δ_S4



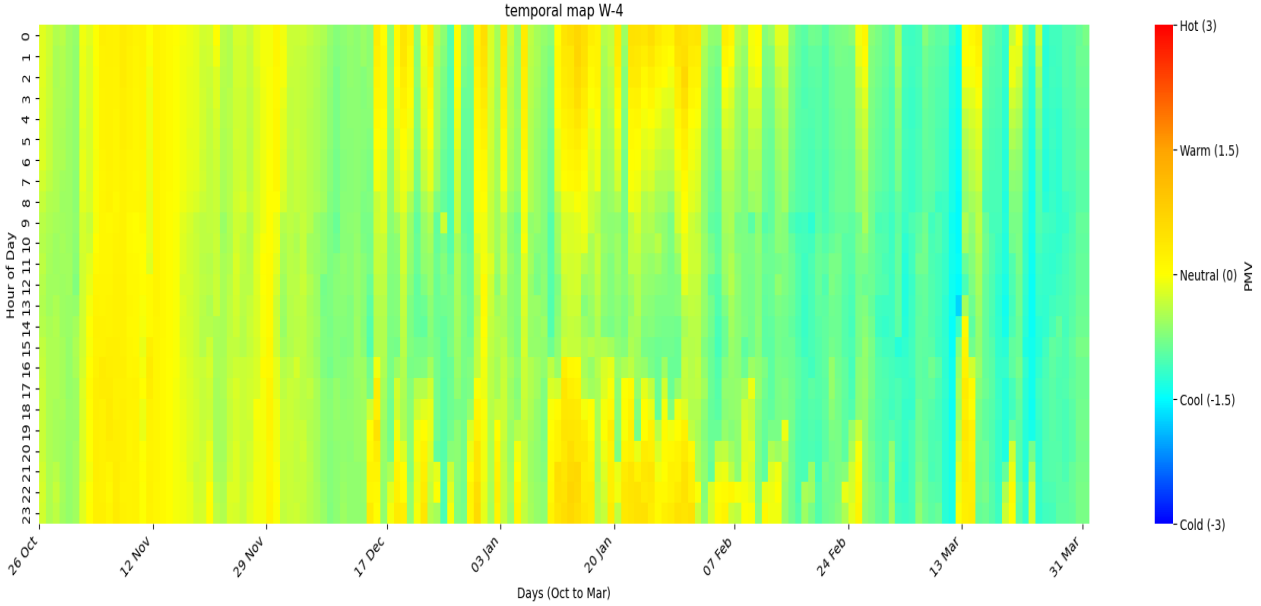
Σχήματα 3Ε_W1, 3ΣΤ_W2, 3Ζ_W3, 3Η_W4: Χρονικοί χάρτες PMV για τις τέσσερις χειμερινές κατοικίες (W-1 έως W-4) κατά την περίοδο 26 Οκτωβρίου 2022 – 31 Μαρτίου 2023.



Σχήμα 3ΣΤ_W2



Σχήμα 3Z_W3

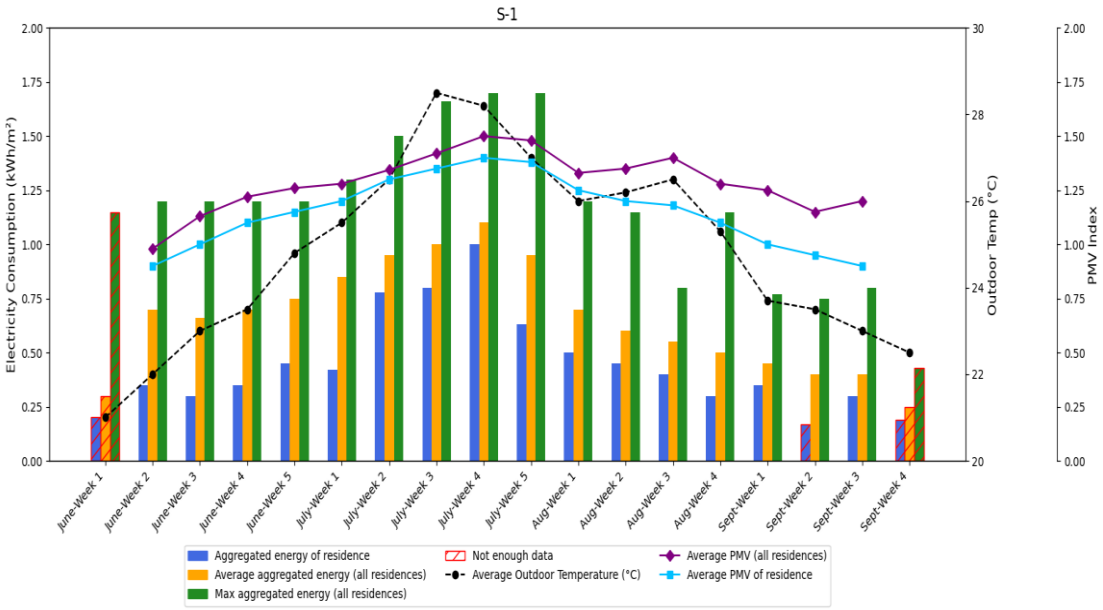


Σχήμα 3H_W4

Κατά την χειμερινή περίοδο, όλες οι κατοικίες καταγράφουν PMV τιμές που υποδεικνύουν θερμική δυσφορία λόγω ψύχους. Η W-1 και ασφαλώς η W-4 εμφανίζουν ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση, με στιγμές κοντά στις ώρες όπου υπάρχει δραστηριότητα, ιδιαίτερα κάποιες πρωινές ώρες και το απόγευμα προς βράδυ. Αυτό αποδεικνύει ένα μοτίβο καθημερινής χρήσης των ηλεκτρικών συσκεύων. Στην W-1 από αρχές Δεκεμβρίου μέχρι αρχές Φερβουαρίου φαίνεται ότι υπήρχε θερμική άνεση τις ώρες αυτές, απο την άλλη η W-4 φαίνεται να πετυχαίνει τιμές θερμικής άνεσης στις βραδινές ώρες μέχρι το πρωί. Επίσης, η W-4 δείχνει μεγαλύτερη θερμική μεταβλητότητα, πιθανώς λόγω έντονα διακοπτόμενης χρήσης θέρμανσης. Αντίθετα, οι κατοικίες W-2 και W-3 παρουσιάζουν παρατεταμένες περιόδους με τιμές κάτω από –1.0, φανερώνοντας ανεπαρκή θέρμανση ή ελλιπή μόνωση. Αναφορικά με W-2 σημειώνεται ότι από 25 Δεκεμβρίου μέχρι 8 Φεβρουαρίου υπάρχουν τιμές όπου δεν υπήρξε καταγραφή, για αυτό ήταν η μόνη περίπτωση όπου διενεργήθηκε παρεμβολή έτσι ώστε να παραχθεί τουλάχιστον αληθοφανές διάγραμμα. Οι χάρτες αναδεικνύουν συστηματικές τάσεις θερμικής επιβάρυνσης ή επάρκειας στα διαφορετικά σημεία του ημερήσιου και εποχικού κύκλου και αποτελούν ένα καλό εργαλείο οπτικοποίησης για την αξιολόγηση της απόδοσης των χώρων, δημιουργώντας κατά κάθε περίπτωση ένα σύντομο και εύκολο τρόπο κατανόησης του δείκτη θερμικής άνεσης.

4.3. Εβδομαδιαία Διαγράμματα

Η στατιστική προσέγγιση παρακάτω παρουσιάζει την εβδομαδιαία μεταβολή τριών βασικών μεγεθών για την κατοικία S-1 κατά τη θερινή περίοδο. Την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη, τον δείκτη θερμικής άνεσης PMV, και τη μέση εξωτερική θερμοκρασία. Αντίστοιχα διαγράμματα παρήχθησαν και για άλλες τρεις κατοικίες κατά τη θερινή περίοδο, καθώς και για τέσσερις κατοικίες κατά τη χειμερινή, στο πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης της θερμικής συμπεριφοράς και της ενεργειακής απόδοσης για τις διάφορες θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα με εβδομαδιαίο βήμα. Στο διάγραμμα, οι μπάρες αποτυπώνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο (kWh/m²) ανά εβδομάδα.



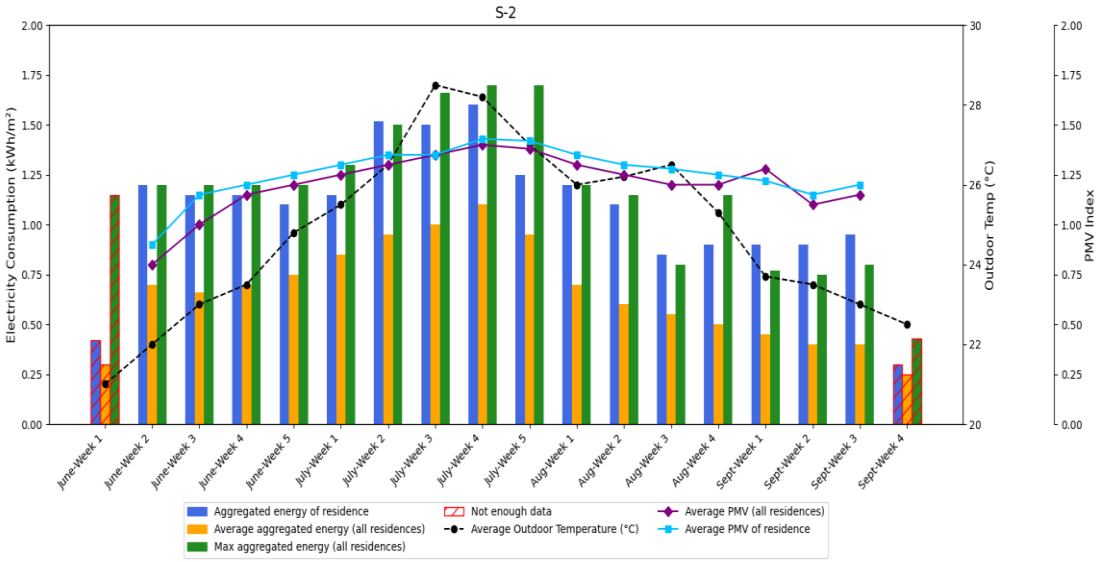
Σχήμα 5α: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία S-1 κατά τη καλοκαιρινή περίοδο.

- Η μπλε μπάρα αναφέρεται για τις διάφορες θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα συγκεκριμένη κατοικία (S-1).
- η πορτοκαλί παρουσιάζει τον μέσο όρο της συνολικής εβδομαδιαίας κατανάλωσης όλων των κατοικιών.
- και η πράσινη αποτυπώνει τη μέγιστη εβδομαδιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των κατοικιών
- Οι κόκκινες ραβδωτές μπάρες υποδεικνύουν εβδομάδες με ανεπαρκή δεδομένα. (όταν υπάρχει απουσία δεδομένων για πάνω από 12 ώρες εντός της εβδομάδας).

Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά τη μέση εβδομαδιαία εξωτερική θερμοκρασία (δεξιός άξονας), ενώ οι δύο γραμμές για τον δείκτη PMV καταγράφουν τη θερμική άνεση,

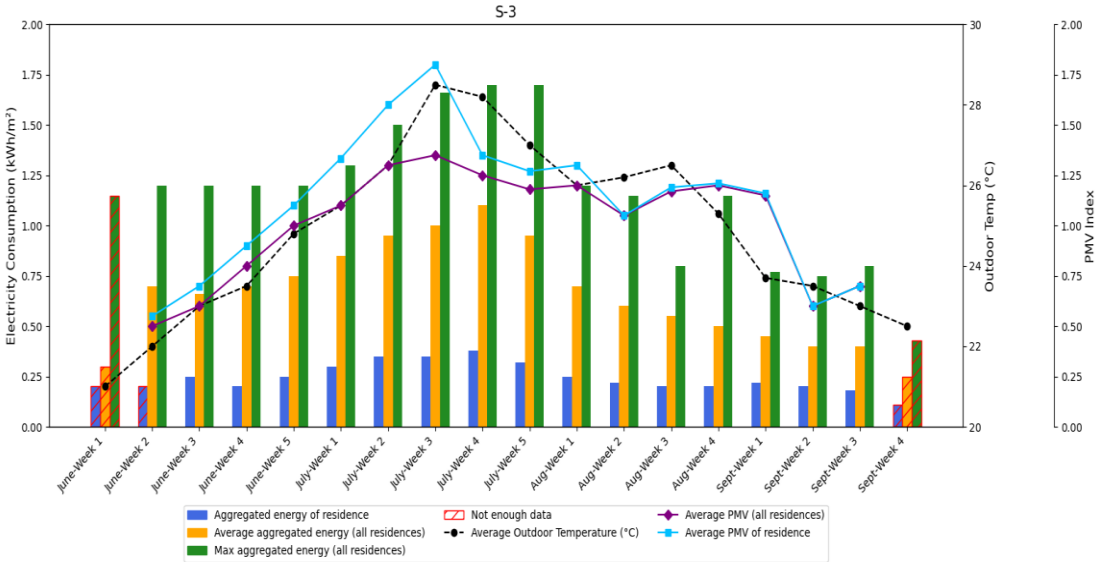
- Η μωβ γραμμή δείχνει τον μέσο όρο PMV όλων των κατοικιών,
- και η γαλάζια γραμμή τον PMV της κατοικίας S-1.

Οι τιμές PMV κυμαίνονται μεταξύ +1.0 και +1.5, υποδηλώνοντας μια ήπια έως σχετικά ζεστή αίσθηση θερμικού περιβάλλοντος, γεγονός αναμενόμενο για την εποχή. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η εξωτερική θερμοκρασία κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, ενισχύεται τόσο η κατανάλωση ενέργειας όσο και ο δείκτης PMV, κάτι που μαρτυρά αυξημένη χρήση των συστημάτων ψύξης για τη διατήρηση συνθηκών άνεσης δίχως ωστόσο να επιτυγχάνεται θερμική άνεση.



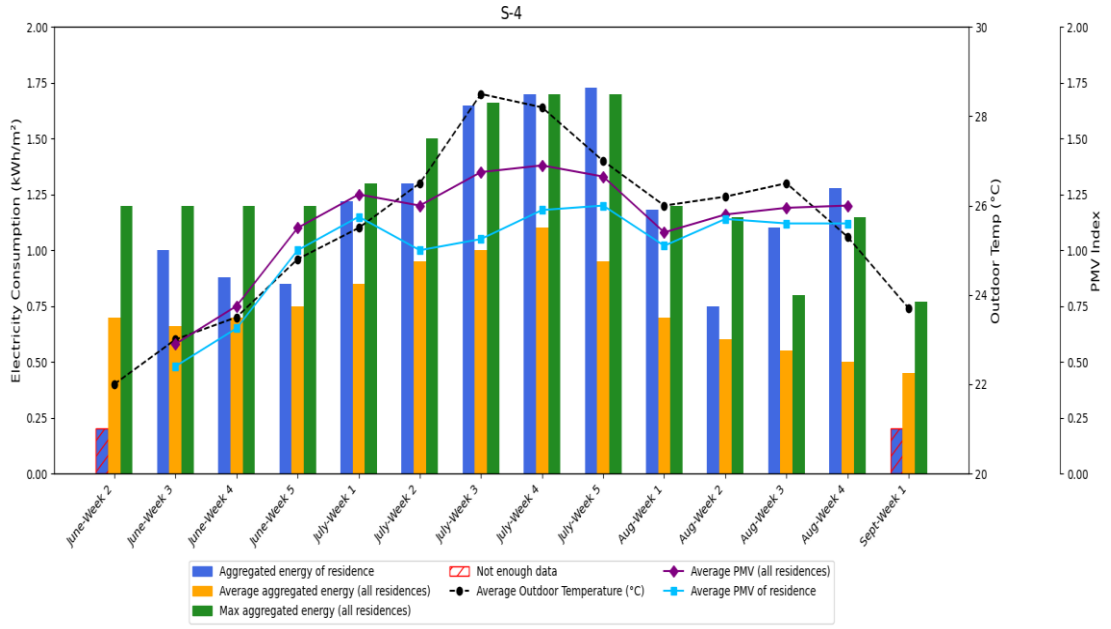
Σχήμα 5β: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία S-2 κατά τη καλοκαιρινή περίοδο.

Η κατανάλωση της S-2 αυξάνει σχεδόν μονοτονικά από τον Ιούνιο έως τα τέλη Ιουλίου, όπου ταυτόχρονα κορυφώνονται και η εξωτερική θερμοκρασία και ο PMV στη πέμπτη εβδομάδα Ιουλίου της κατοικίας. Έπειτα μειώνεται σταδιακά προς τον Σεπτέμβριο, ακολουθώντας τη σταδιακή πτώση θερμοκρασίας και PMV. Οι μπλε μπάρες κινούνται κοντά στις πράσινες, όπου υποδηλώνουν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, αυτοί αφορούν σε διάφορους παράγοντες όπως τον τρόπο χρήστης των ενεργειακών συστημάτων είτε του κελύφους της κατοικίας.



Σχήμα 5γ: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία S-3 κατά τη καλοκαιρινή περίοδο.

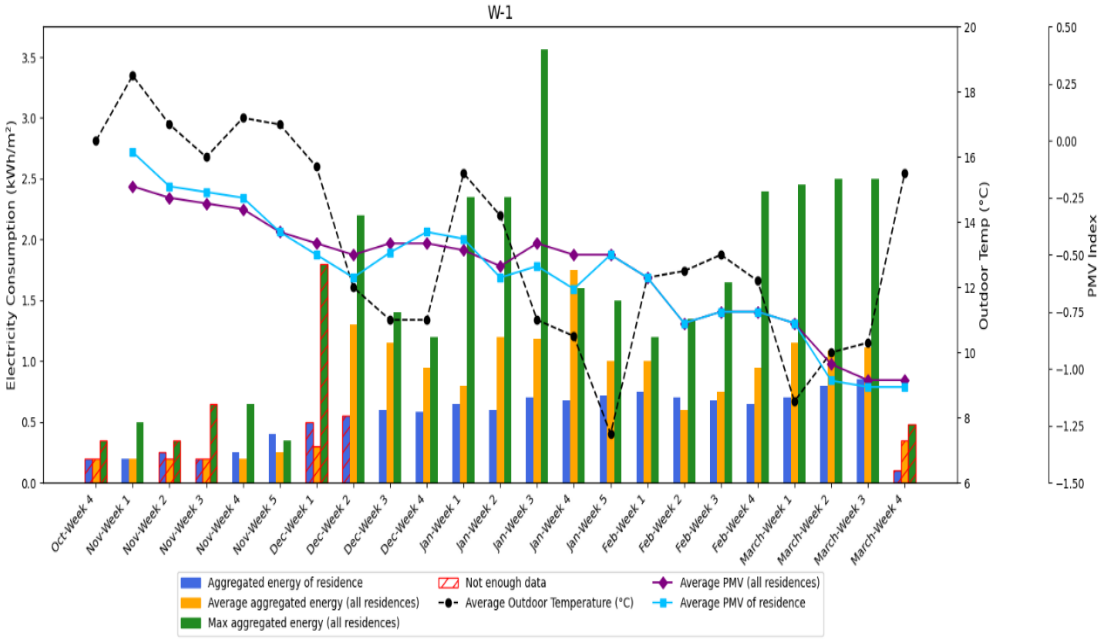
Για την κατοικία S-3, η άνοδος είναι μικρότερη και η πορεία της κατανάλωσης εμφανίζει σταθερή κατανάλωση. Έπειτα παρατηρείται σταδιακή πτώση. Σε αρκετές εβδομάδες η κατανάλωση βρίσκεται κάτω από τον μέσο όρο, κάτι που υποδηλώνει είτε πιο μετρημένη χρήση ψύξης είτε καλύτερη παθητική συμπεριφορά του κελύφους.



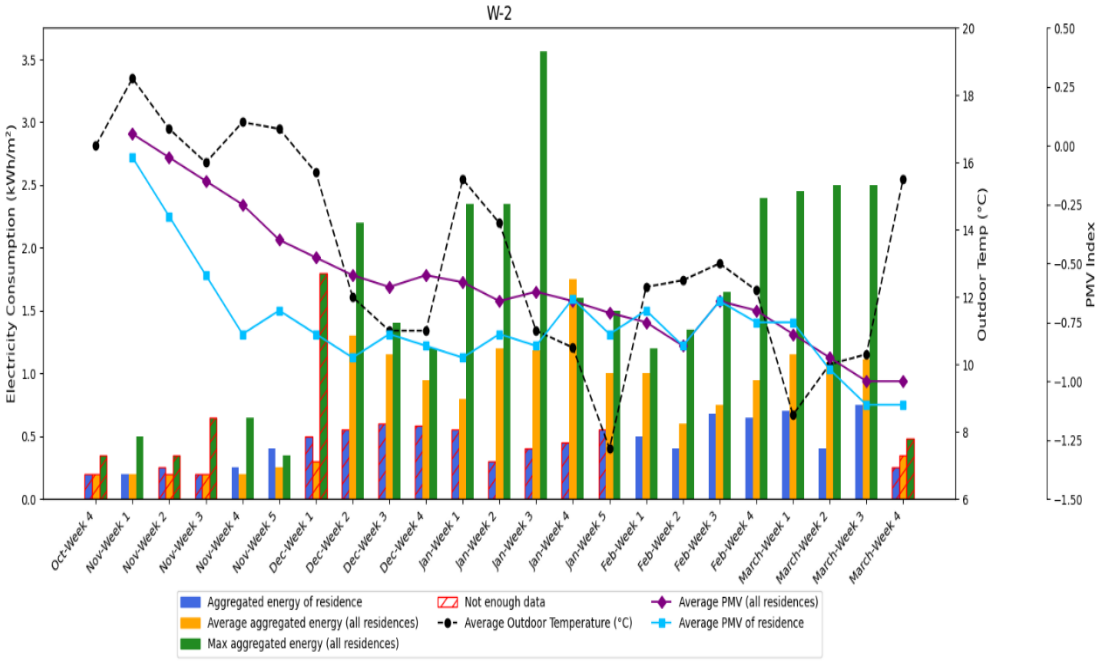
Σχήμα 5δ: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία S-4 κατά τη καλοκαιρινή περίοδο.

Για την κατοικία S-4, οι υψηλότερες θερινές τιμές εμφανίζονται στην αρχή και στα τέλη Ιουλίου. Η κορύφωση συμπίπτει με τα μέγιστα της θερμοκρασίας και του PMV, γεγονός που συνδέει άμεσα τη ζήτηση με το θερμικό φορτίο ψύξης. Μετά τα μέσα Αυγούστου υπάρχει πτώση, αν και συχνά η κατανάλωση παραμένει πάνω από τον μέσο όρο. Σημειώνεται ότι η περίοδος μελέτης της συγκεκριμένης κατοικίας περιορίζεται μέχρι την πρώτη εβδομάδα Σεπτεμβρίου με ανεπαρκή δεδομένα.

Κατά την χειμερινή περίοδο, η θερμική συμπεριφορά της κατοικίας W-1 εμφανίζεται αναμενόμενη, με σταδιακή αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση τους ψυχρότερους μήνες (Δεκέμβριο μέχρι Φεβρουάριο), όπου παρατηρούνται και οι χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες. Παρά τη σημαντική ενεργειακή επιβάρυνση, ο δείκτης PMV παραμένει σε σχετικά χαμηλές αρνητικές τιμές (περίπου -0.5 έως -1.0), υποδεικνύοντας θερμική δυσαρέσκεια. Η σύγκριση με τον μέσο όρο όλων των κατοικιών αναδεικνύει καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά της W-1, αλλά με θερμική άνεση που πιθανότητα υστερεί ή παραμένει οριακή.



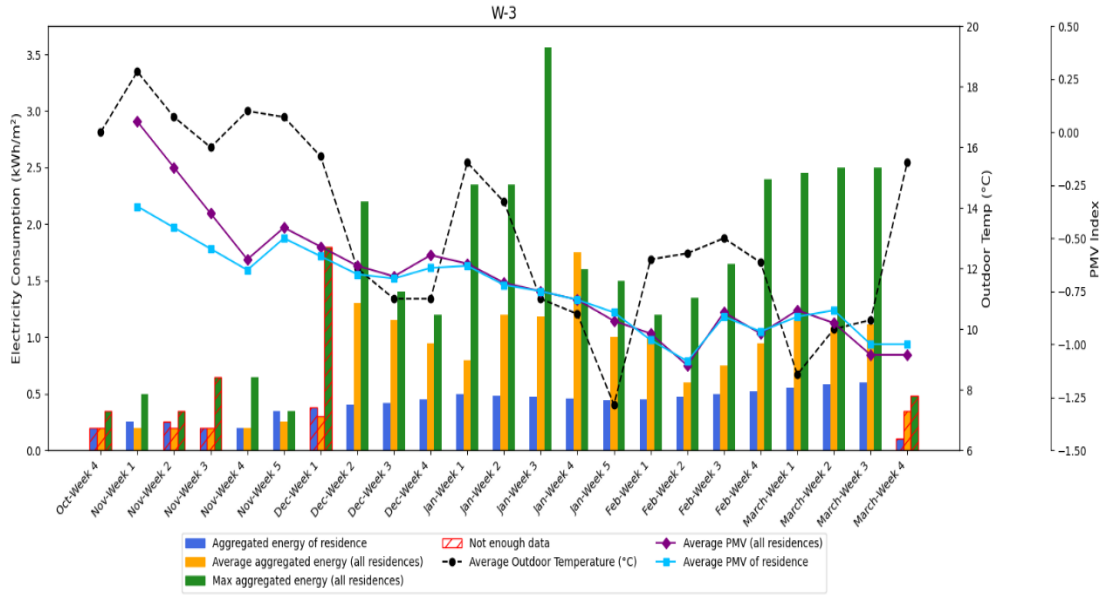
Σχήμα 6α: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία W-1 κατά τη χειμερινή περίοδο.



Σχήμα 6β: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία W-2 κατά τη χειμερινή περίοδο.

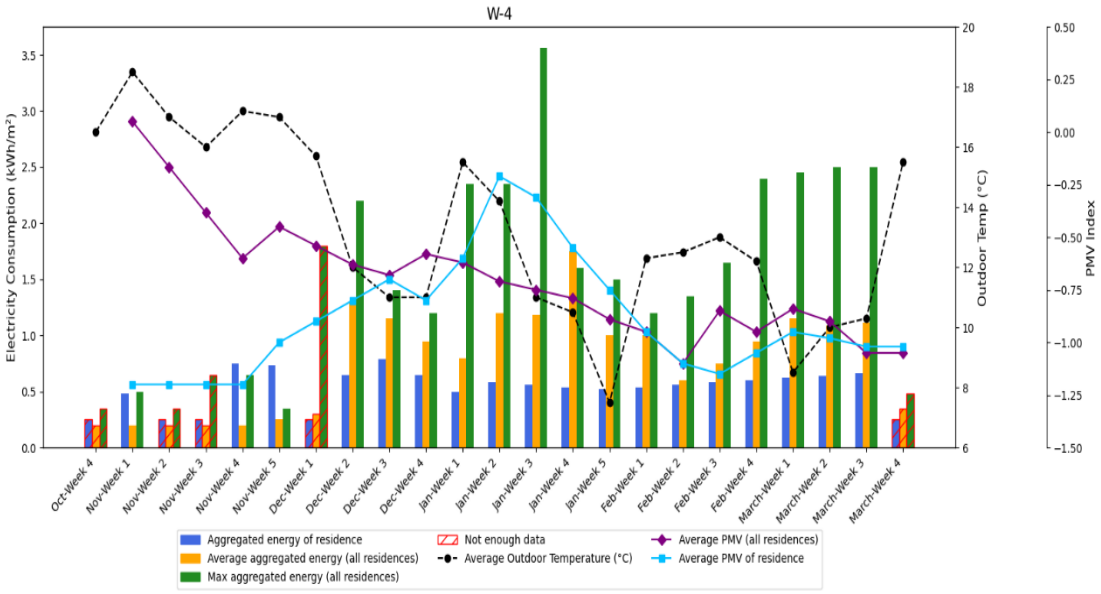
Για την κατοικία W-2 τον χειμώνα, από τα τέλη Οκτωβρίου έως τον Δεκέμβριο η θερμοκρασία υποχωρεί και ο PMV γίνεται πιο αρνητικός, οπότε η κατανάλωση αυξάνει και κορυφώνεται Ιανουάριο με Φεβρουάριο. Από τον Φεβρουάριο προς τον

Μάρτιο η κατανάλωση μειώνεται καθώς οι συνθήκες βελτιώνονται. Το φαινόμενο των ραβδωτών μπαρών είναι ιδιαιτέρως έντονο και εκτείνεται σε πολλές εβδομάδες. Επομένως, η καμπύλη κατανάλωσης για την W-2 πρέπει να διαβάζεται μόνο κατευθυντικά.



Σχήμα 6γ: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία W-3 κατά τη χειμερινή περίοδο.

Για την κατοικία W-3, το μοτίβο είναι παρόμοιο αλλά με εντονότερη ζήτηση στις ψυχρές εβδομάδες. Η κορυφή εμφανίζεται επίσης στο τέλος Ιανουαρίου με Φεβρουάριο και ακολουθεί αποκλιμάκωση. Η κατανάλωση συγκλίνει ή ξεπερνά στιγμιαία τον μέσο όρο όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες.

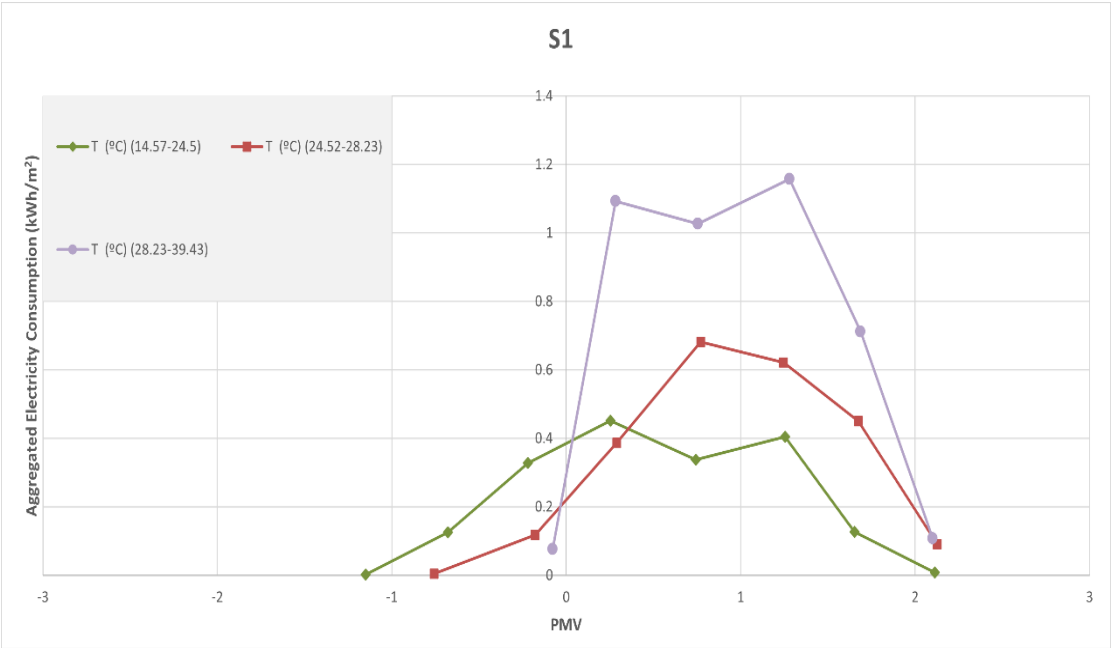


Σχήμα 6δ: Διάγραμμα εβδομαδιαίας κατανάλωσης ενέργειας, εξωτερικής θερμοκρασίας και δείκτη θερμικής άνεσης (PMV) για την κατοικία W-4 κατά τη χειμερινή περίοδο.

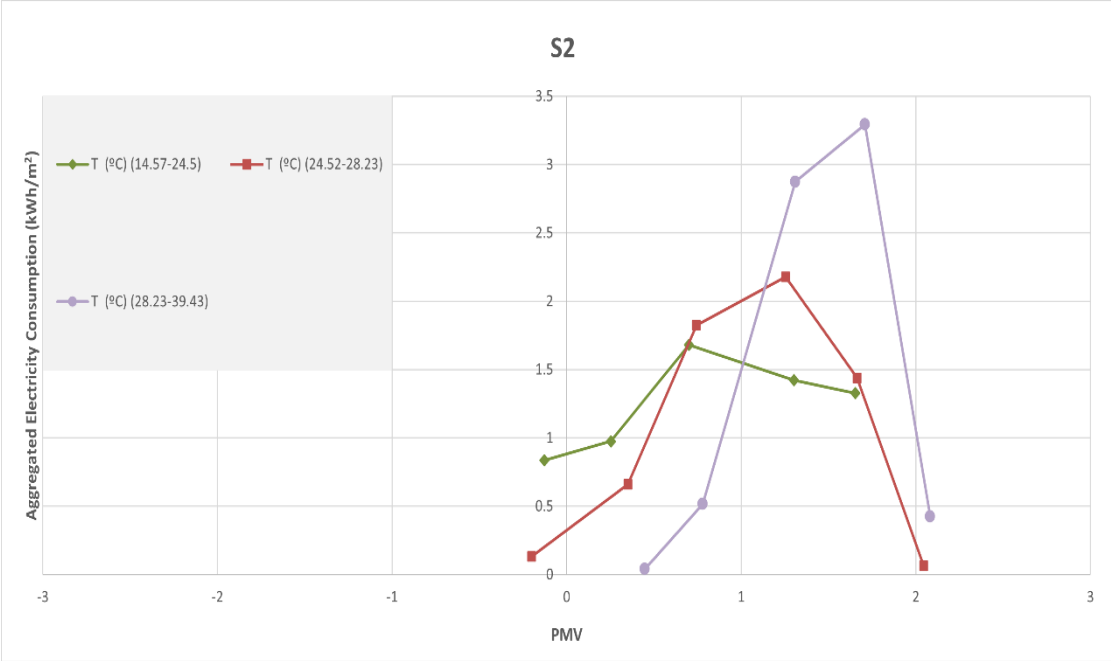
Για την κατοικία W-4, η χειμερινή κατανάλωση σχηματίζει καθαρές αιχμές όταν ο PMV είναι πιο αρνητικός και πτώση προς τον Μάρτιο. Τις περισσότερες εβδομάδες βρίσκεται κοντά ή ελαφρώς κάτω από τον μέσο όρο. Συνολικά διατηρεί μια σταθερή κατανάλωση, αλλά σε κάποιες εξωτερικές θερμοκρασίες παρατηρούνται οι αιχμές στην κατανάλωση ενέργειας.

4.4. Καμπυλόγραμμα Διαγράμματα

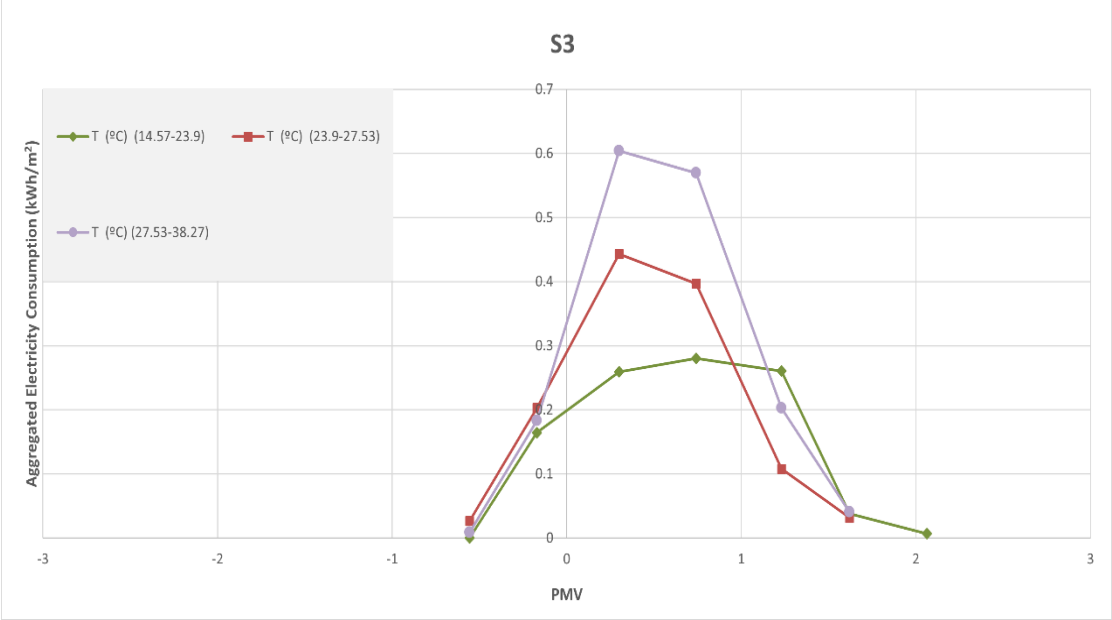
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των καμπυλόγραμμων διαγραμμάτων αποτυπώνεται παρακάτω, όπου παρουσιάζονται οι ενεργειακές συμπεριφορές των κατοικιών υπό διαφορετικές θερμικές συνθήκες, βοηθώντας στον εντοπισμό μοτίβων μεταξύ επιπέδων θερμικής άνεσης με αυξημένη ή μειωμένη κατανάλωση. Το σύνολο της ανάλυσης εφαρμόστηκε τόσο στις τέσσερις θερινές κατοικίες (S1–S4) όσο και στις τέσσερις χειμερινές (W1–W4).



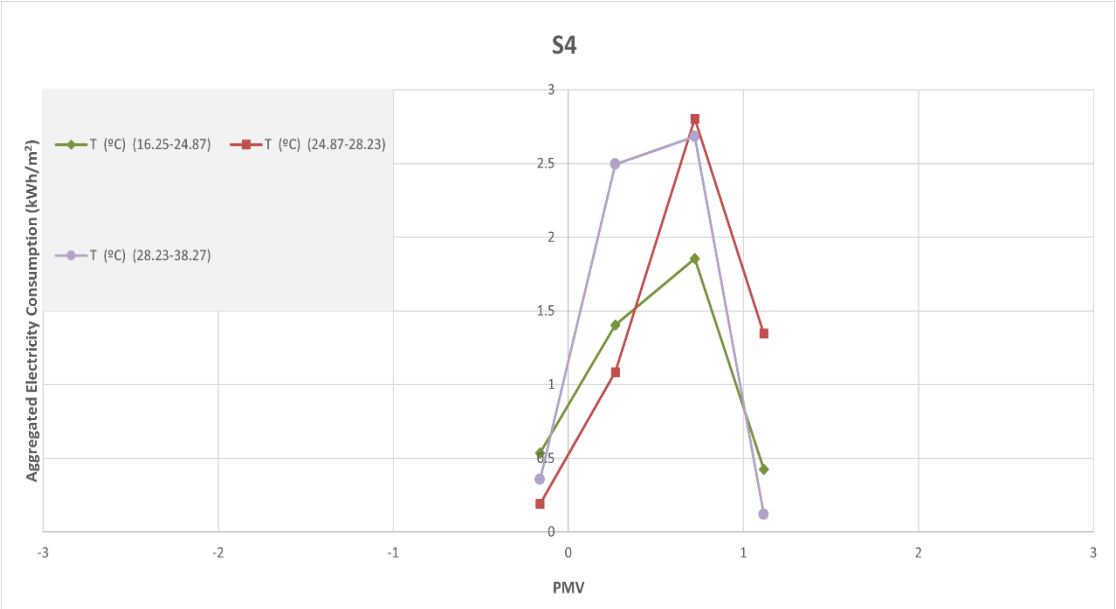
Σχήμα 7α: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και τα διαστήματα Εξωτερικής Θερμοκρασίας για την κατοικία S1.



Σχήμα 7β: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και τα διαστήματα Εξωτερικής Θερμοκρασίας για την κατοικία S2.



Σχήμα 7γ: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την S3.



Σχήμα 7δ: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την S4.

Όπως αποδίδεται στα διαγράμματα το χαμηλό θεμροκρασιακό εύρος χρωματίστηκε με πράσινο, το μεσαίο με κόκκινο και το υψηλό με μώβ. Τα διαγράμματα πιο συγκεκριμένα για κάθε κατοικία.

Στην κατοικία S1:

- Η ηλεκτρική κατανάλωση καταγράφεται στο υψηλό διάστημα θερμοκρασίας λόγω θερμικής δυσφορίας. Κάτι που υποδηλώνει πιθανώς την χρήση συσκευών για την ψύξη του χώρου.
- Ακόμη υπάρχει μια αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας μόνο στο διάστημα [28.23-39.43 ^{o}C], και όχι στα άλλα δύο διαστήματα.

Στην κατοικία S2:

- Παρατηρείται έντονη κατανάλωση για όλες τις θερμοκρασιακές ζώνες και συγκεκριμένα στην περιοχή PMV +1 έως +2.
- Το θερμότερο θερμοκρασιακό εύρος (μωβ γραμμή) έχει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση, με την κορυφή να φτάνει 3.3 kWh/m² στο δείκτη +1.7 PMV, όπου δείχνει την ανάγκη για ψύξη.

Στην κατοικία S3:

- Εμφανίζεται ιδιαίτερα ομοιόμορφες καμπύλες κατανάλωσης για όλο το διάστημα PMV, κυρίως στο διάστημα -0.5 έως +1.
- Η ηλεκτρική κατανάλωση δείχνει να είναι η χαμηλότερη που καταγράφεται ανάμεσα στο δείγμα των κατοικιών με μόλις 0.6 kWh/m².

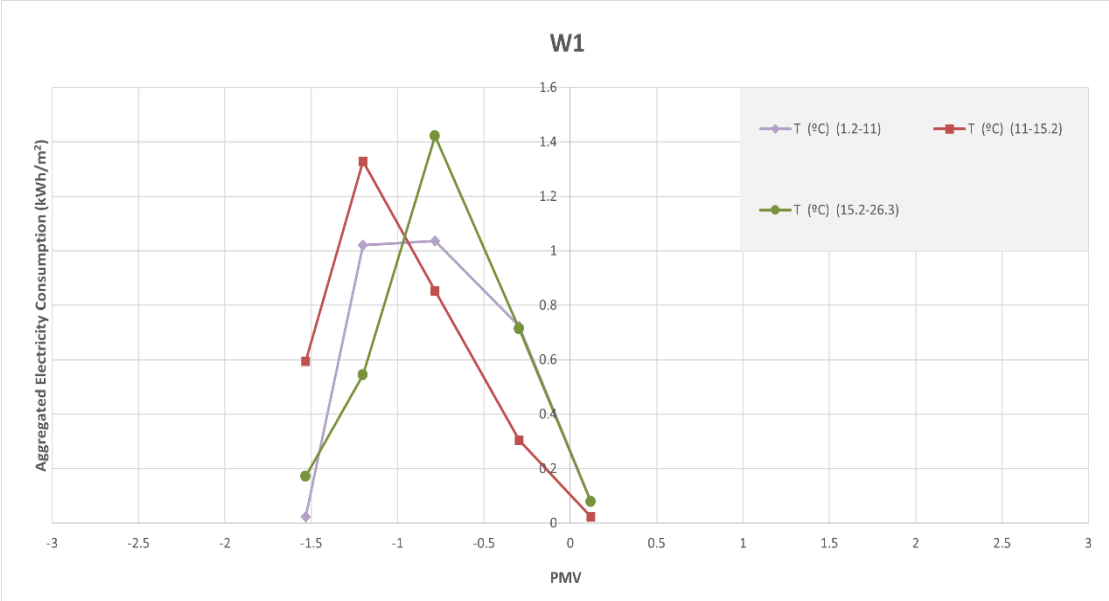
Στην κατοικία S4:

- Η κατανομή κατανάλωσης είναι πιο έντονη σε σχεση με την S-3 και την S-1, άλλα κοντά στην κατοικία S-2 .
- Η κορυφή εμφανίζεται PMV περίπου στο –0.7, ενώ η κατανάλωση στο 2.8 kWh/m².
- Το μεσαίο και υψηλό θερμοκρασιακό εύρος συνεισφέρουν σχεδόν ισόποσα, με ελαφρά υπεροχή του μεσαίου εύρους και με στέρηση του χαμηλού διαστήματος.

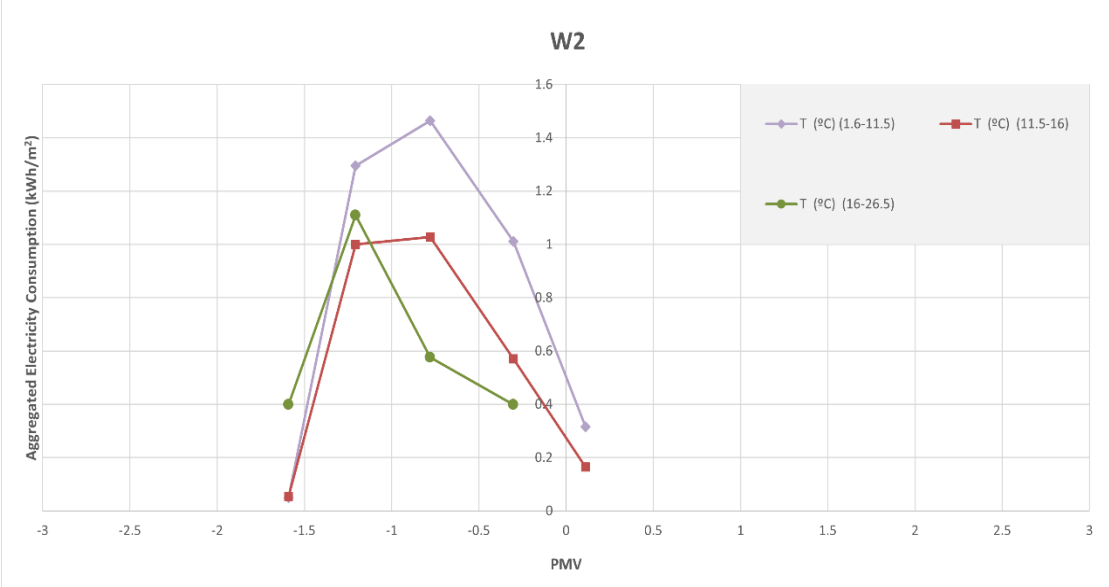
Παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι τιμές του PMV (προς το +1), δηλαδή καθώς το θερμικό περιβάλλον γίνεται πιο θερμό, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται, ειδικά σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Οι καμπύλες των υψηλών εξωτερικών θερμοκρασιών (μωβ γραμμές) παρουσιάζουν μέγιστη κορύφωση στην περιοχή 0.7 μεταξύ 1.5 PMV, δηλαδή σε συνθήκες ελαφριάς έως μέτριας θερμικής δυσφορίας. Αυτό υποδηλώνει ενεργοποίηση ψυκτικών συστημάτων κατά τις ώρες αυτές, ώστε να αποκατασταθεί η θερμική άνεση. Σε κατοικίες όπως η S2 και η S4, το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο, πιθανόν λόγω μικρότερης θερμικής αδράνειας ή απουσίας σκίασης. Αντίθετα, σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες (πράσινες γραμμές), η κατανάλωση μειώνεται και συγκεντρώνεται γύρω από

ουδέτερες τιμές PMV (0 έως +0.5), πράγμα που φανερώνει μικρότερη ανάγκη για ψύξη.

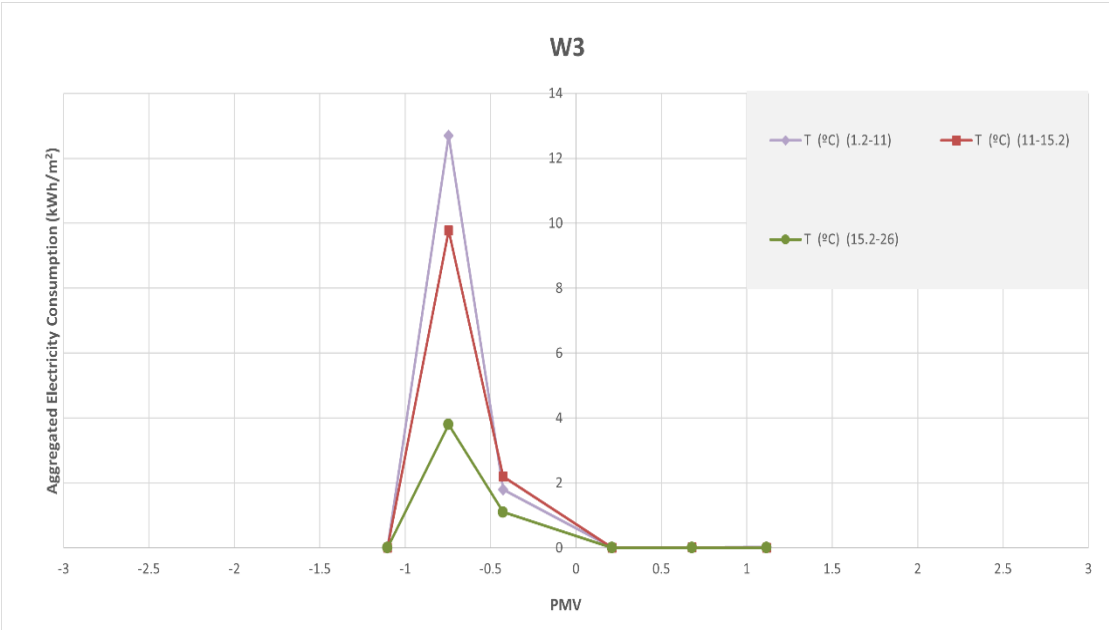
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των χειμερινών κατοικιών, ως προς τις τιμές του δείκτη PMV, για τρεις κατηγορίες εξωτερικής θερμοκρασίας



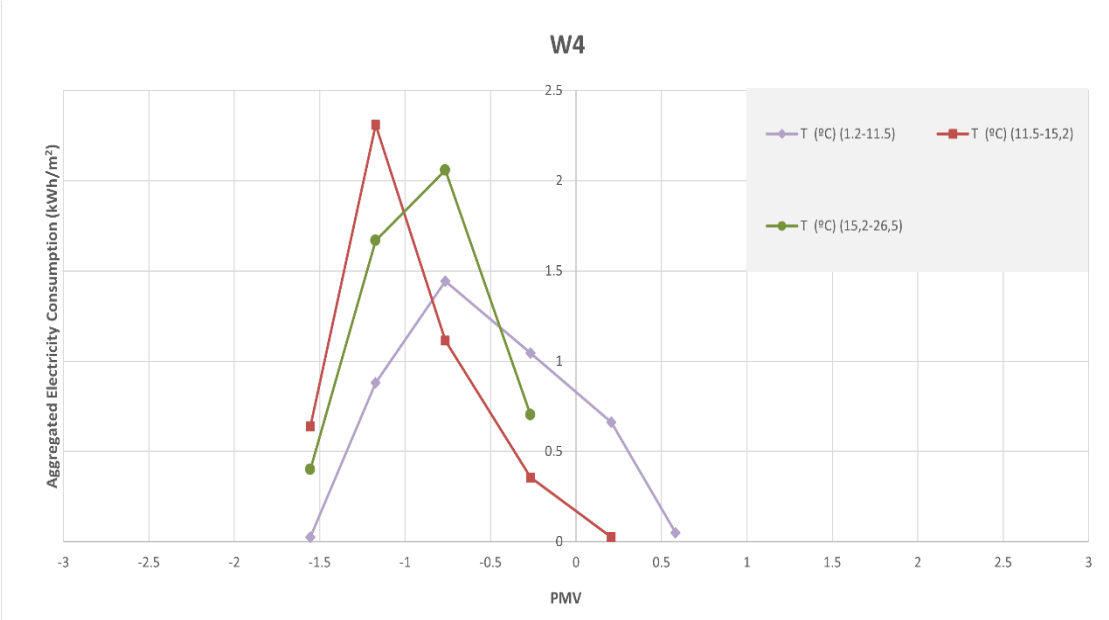
Σχήμα 8α: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την W1.



Σχήμα 8β: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την W2.



Σχήμα 8γ: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την W3.



Σχήμα 8δ: Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σχέση με τον Δείκτη PMV και την Εξωτερική Θερμοκρασία για κατοικία την W4.

Στην κατοικία W1:

- Η μεγαλύτερη κατανάλωση εντοπίζεται στην περιοχή PMV -0.5 έως -1 δηλαδή σε συνθήκες μέτριας ψύχρας.
- Το υψηλότερο και μέτριο εύρος εξωτερικής θερμοκρασίας παρουσιάζει τις μεγαλύτερές αιχμές, υποδεικνύοντας ότι η κατανάλωση αυξάνεται

όταν το εξωτερικό περιβάλλον είναι πιο ήπιο, και πιθανώς η θέρμανση παραμένει ενεργή για εξασφάλιση άνεσης.

Στην κατοικία W2:

- Παρατηρείται έντονη κατανάλωση για όλες τις θερμοκρασιακές ζώνες στην περιοχή PMV –1.5 έως –0.5.
- Το ψυχρότερο θερμοκρασιακό εύρος (μωβ γραμμή) έχει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση, γεγονός αναμενόμενο, καθώς οι ανάγκες θέρμανσης αυξάνονται με το ψύχος.

Στην κατοικία W3:

- Εμφανίζεται ιδιαίτερα οξεία αιχμή κατανάλωσης για PMV –0.5 έως –1, κυρίως στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος (μωβ), φτάνοντας τιμές πάνω από 12 kWh/m².
- Αυτό υποδεικνύει εξαιρετικά υψηλές ανάγκες θέρμανσης σε συγκεκριμένες ώρες με ψύχος.

Στην κατοικία W4:

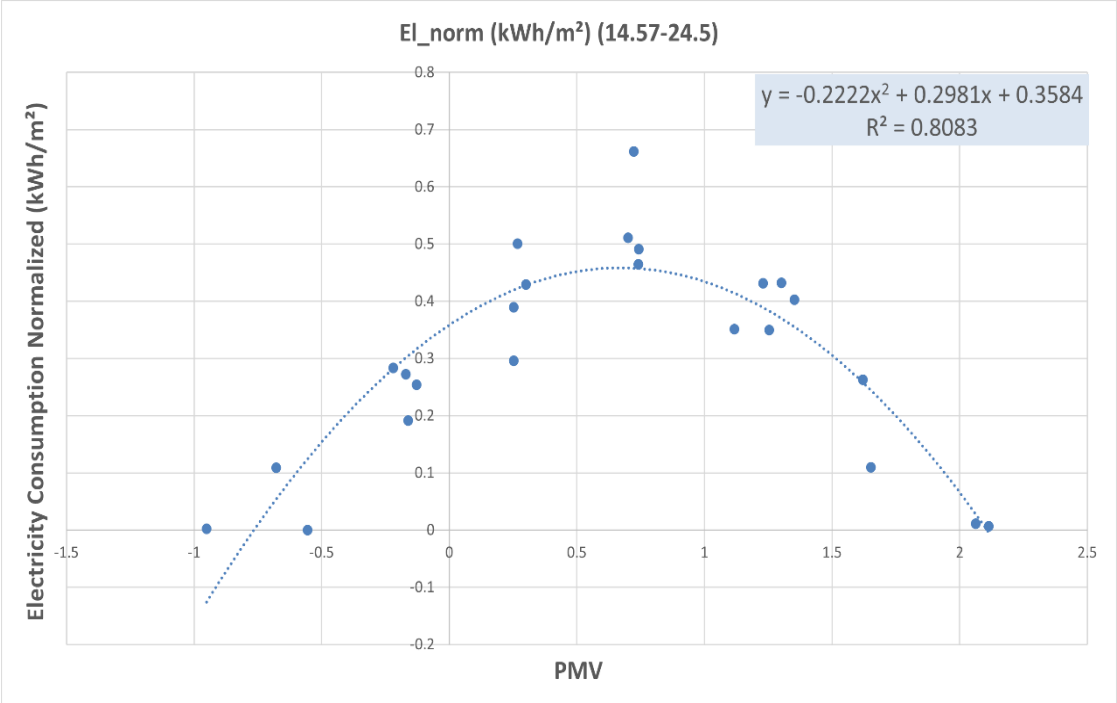
- Η κατανομή κατανάλωσης είναι πιο ομαλή σε σχέση με τις προηγούμενες.
- Η κορυφή εμφανίζεται PMV περίπου στο –1, ενώ η κατανάλωση μειώνεται καθώς προσεγγίζουμε θερμική ουδετερότητα.
- Όλα τα θερμοκρασιακά εύρη συνεισφέρουν σχεδόν ισόποσα, με ελαφρά υπεροχή των μεσαίων θερμοκρασιών.

Η παραγωγή των διαγραμμάτων ακολουθεί την ίδια μεθοδολογία που περιγράφηκε για τις θερινές κατοικίες.

4.5. Ανάπτυξη μοντέλων συσχέτισης της κατανάλωσης ενέργειας και της θερμικής ενέργειας με παλινδρόμηση

Όπως αναλύθηκε η διαδικασία παραγωγής στη υποενότητα 3.4.2 για τα κανονικοποιημένα καμπυλόγραμμα διαγράμματα παλινδρόμησης, ένα σύντομο παράδειγμα θερινής περιόδου είναι για το έυρος [14.57-24.5 °C] (βλ. Σχήμα 9α). Ομαδοποιούνται οι ώρες σε PMV-κάδους (βήμα 0.5), εφαρμόζεται κανονικοποίηση ανά κατοικία, συνενώνονται όλα τα ζεύγη (PMV, $EL_{norm,res}$) των κατοικιών και προσαρμόζεται παραβολή. Ενδεικτικά, προέκυψε $y = -0.2222x^2 + 0.2981x + 0.3584$ με R^2=0.81, όπου οι συντελεστές έχουν την εξής σημασία:

- c=0.3584 (τεταγμένη στο μηδέν): η αναμενόμενη κατανάλωση όταν PMV = 0, δηλαδή στα 0.358 kWh/m² για το συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος.
- b=0.2981 (γραμμικός όρος): η κλίση κοντά στο ουδέτερο. Μια αύξηση του PMV κατά 1 μονάδα αυξάνει την κατανάλωση περίπου +0.298 kWh/m² (ανά μονάδα PMV). Άρα η κατανάλωση τείνει αρχικά να ανεβαίνει.
- a=−0.2222 (καμπυλότητα): καθορίζει την καμπυλότητα της παραβολής. Επειδή είναι αρνητικό, η σχέση έχει σχήμα καμπάνας (κοίλη προς τα κάτω), οπότε η κατανάλωση αυξάνει μέχρι ένα σημείο και μετά μειώνεται. Η δεύτερη παράγωγος είναι $2 \cdot a = -0.4442$, δηλαδή η κλίση μειώνεται κατά 0.444 (kWh/m²) για κάθε σύν μίας μονάδας PMV.



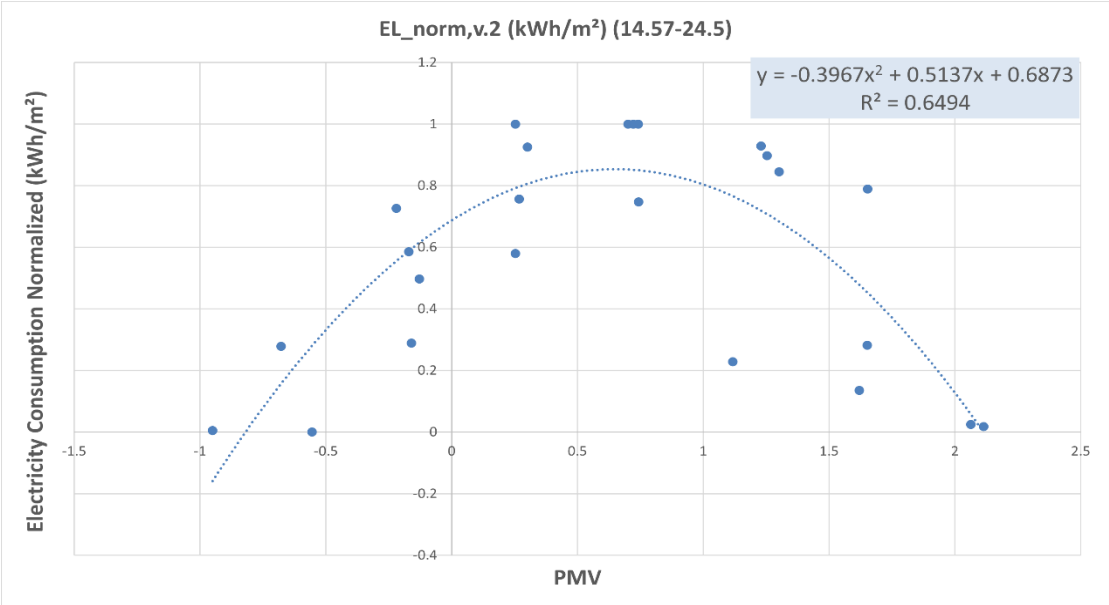
Σχήμα 9α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.

Από το $x^* = -\frac{b}{2a}$ βρίσκουμε την κορυφή: $x^* = 0.671,\ y(x^*) = 0.458\,\frac{kWh}{m^2}$

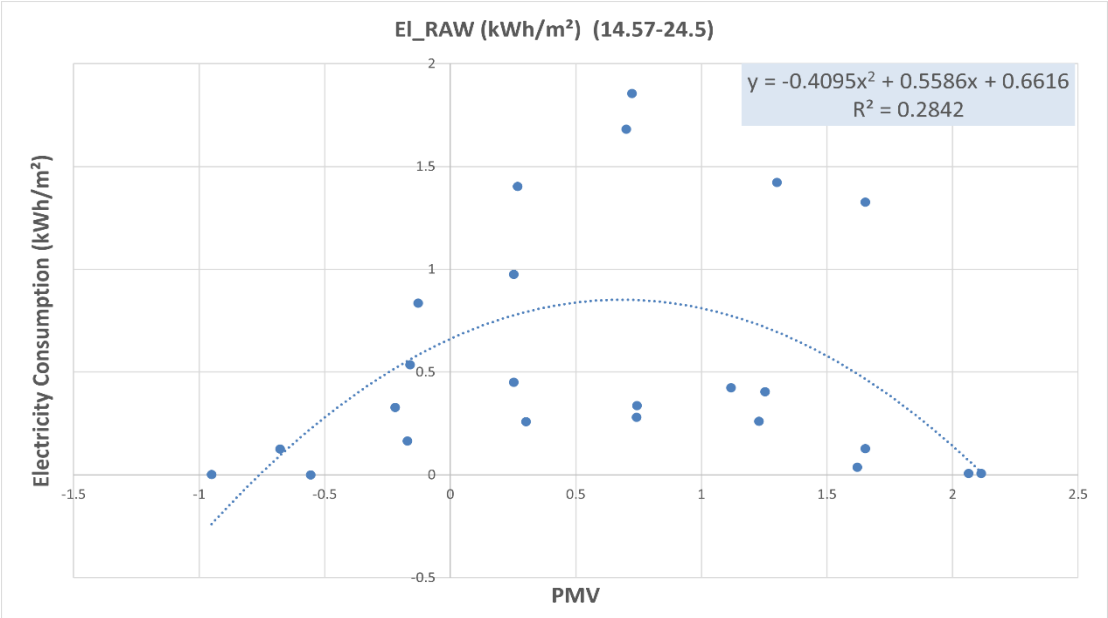
Άρα, στο συγκεκριμένο dataset η μέγιστη αναμενόμενη κατανάλωση εμφανίζεται γύρω από PMV = +0.67 (ελαφρώς θερμή αίσθηση) και έπειτα μειώνεται για μεγαλύτερους PMV, επιβεβαιώνεται με μικρή απόκλιση απο τα διαγράμματα παρακάτω. Για την ποιότητα προσαρμογής R^2=0.81 περίπου 81% της διακύμανσης της κατανάλωσης εξηγείται από τον δείκτη PMV στο συγκεκριμένο εύρος δεδομένων.

Τέλος υπογραμμίζεται ότι, ο δείκτης ποιότητας προσαρμογής δείχνει συσχέτιση PMV–κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο εξεταζόμενο εύρος, χωρίς να υπονοείται αιτιότητα, διότι άλλοι παράγοντες εξαιρούνται (χρήστης, συσκευές, πολιτικές ελέγχου).

Δίνονται και τα υπόλοιπα διαγράμματα του συγκεκριμένου θερμοκρασιακού διαστήματος καθώς και τα υπόλοιπα διαγράμματα για τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά πλάτοι.

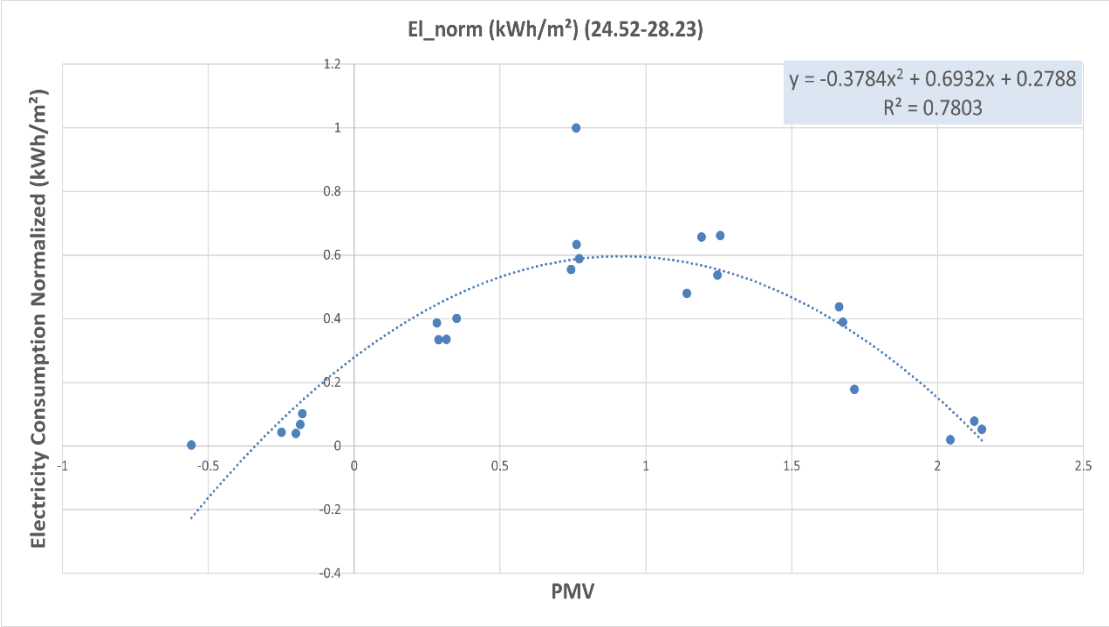


Σχήμα 9β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.

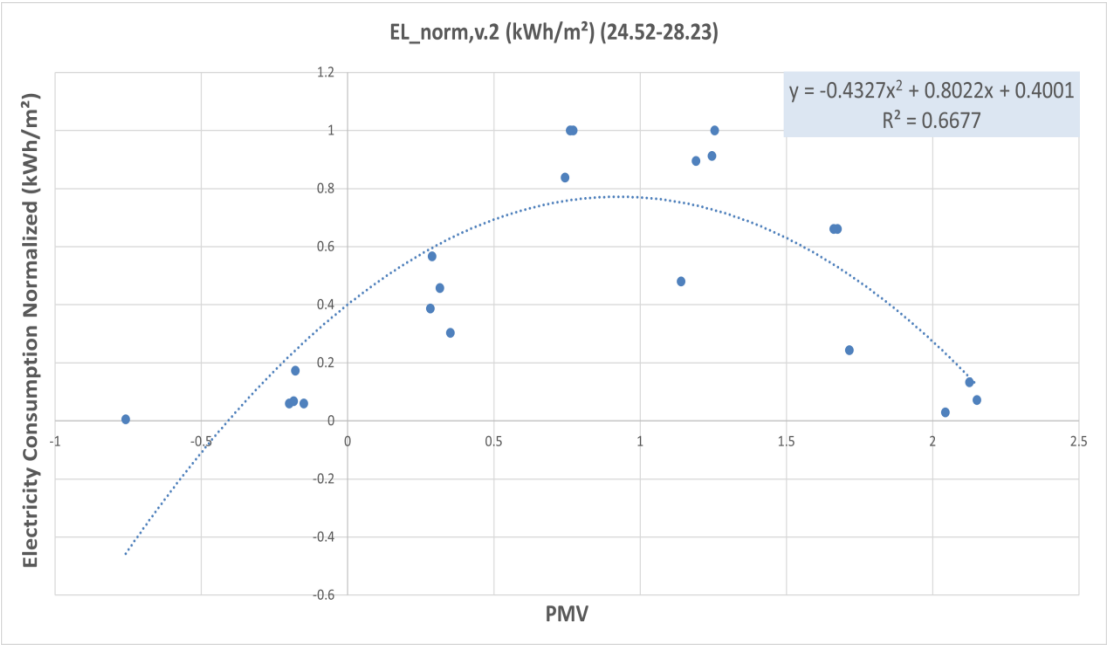


Σχήμα 9γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.

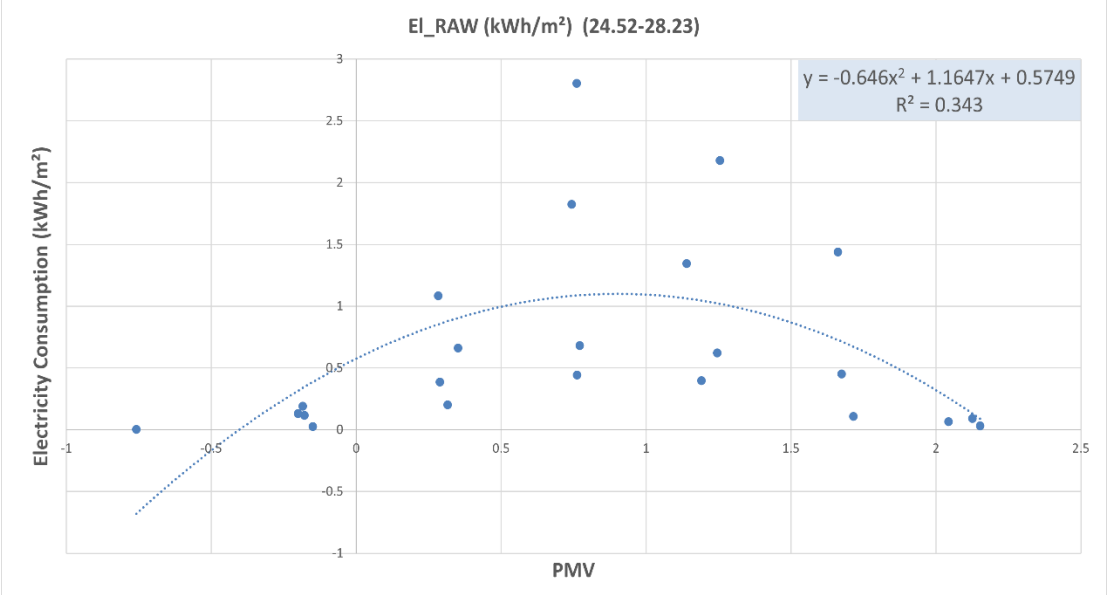
- Για το θερμοκρασιακό εύρος [24.5-28.23 °C]



Σχήμα 10α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

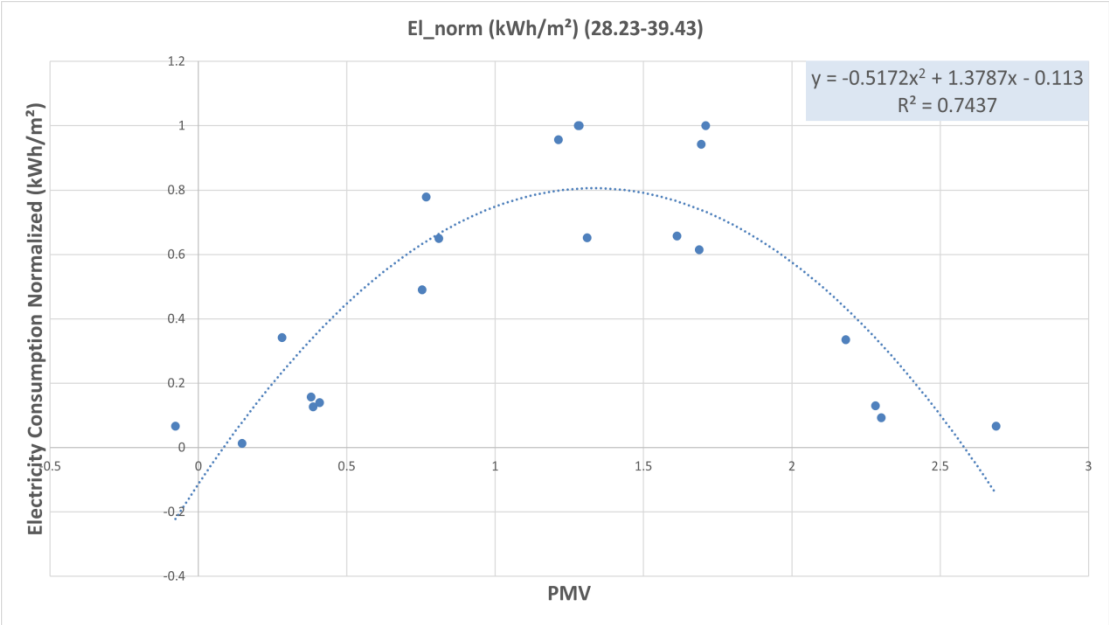


Σχήμα 10β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

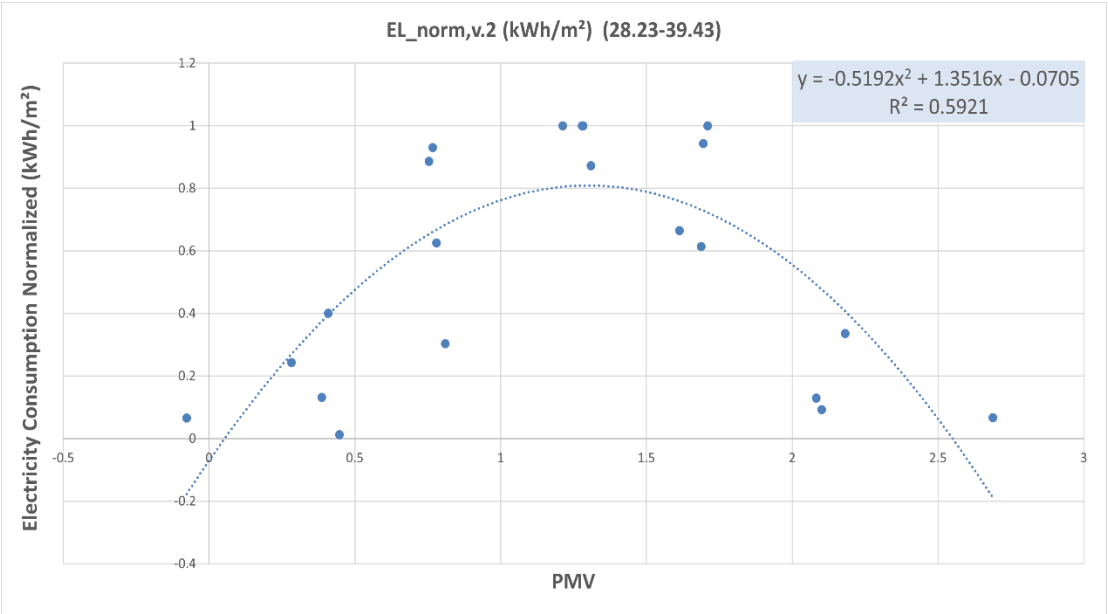


Σχήμα 10γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

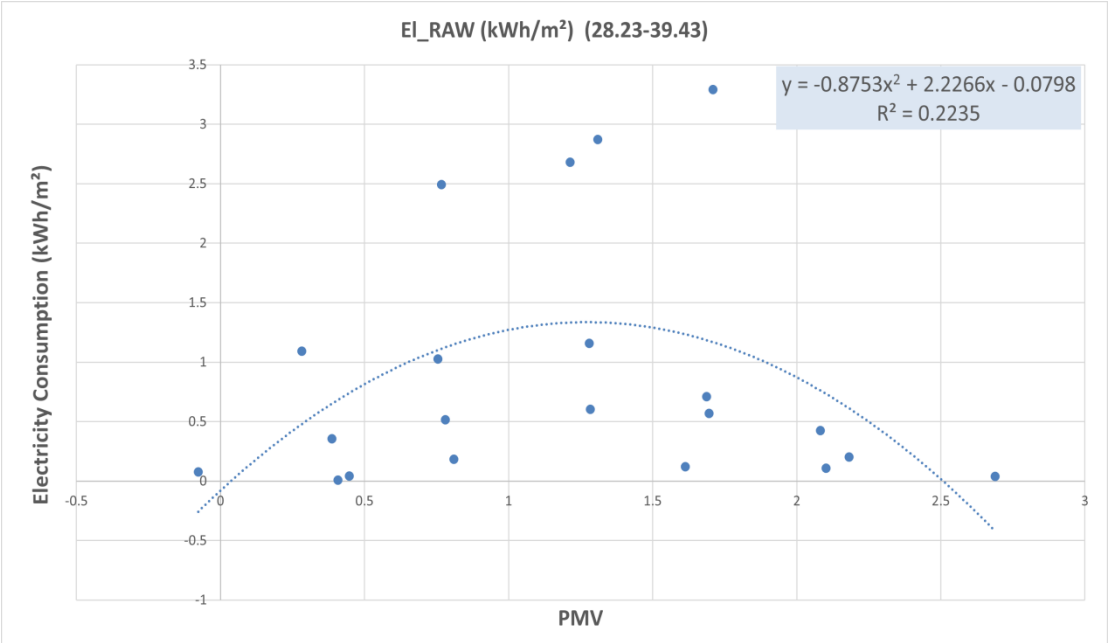
- Για το θερμοκρασιακό εύρος [28.23-39.43 °C]



Σχήμα 11α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.



Σχήμα 11β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.



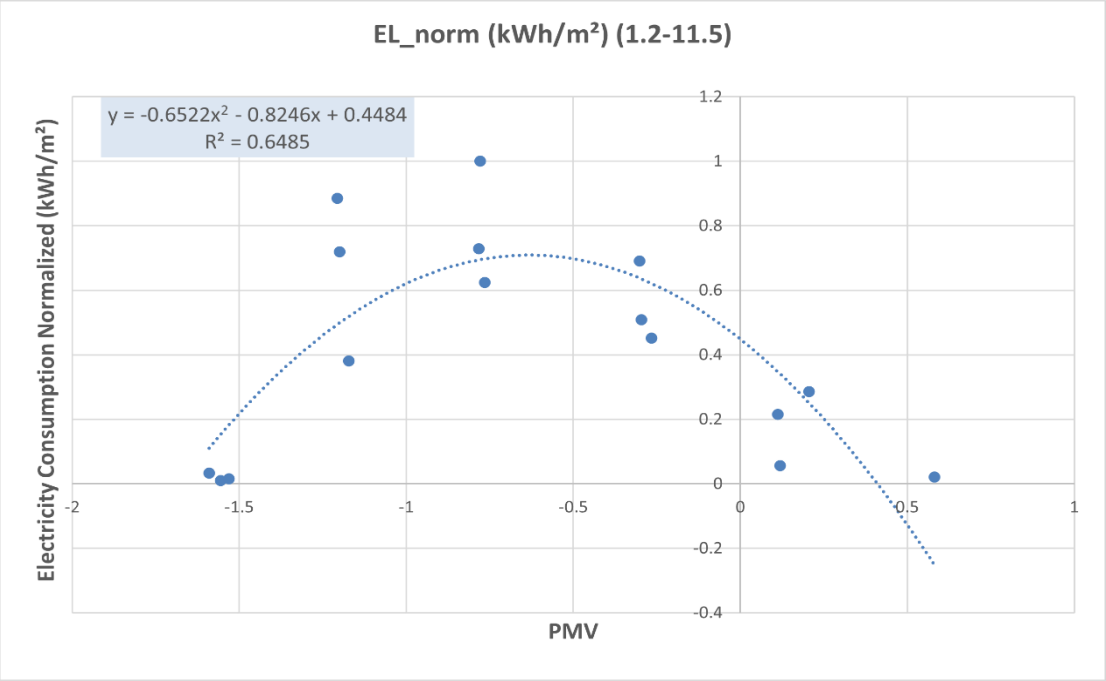
Σχήμα 11γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.

Σε όλα τα θερμοκρασιακά εύρη προκύπτει καθαρά το ανεστραμμένο καμπάνοειδές σχήμα μεταξύ PMV και συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης. Στην θερινή περίοδο όσο απομακρύνεται από την ουδέτερη αίσθηση, μεταξύ +0.5 με +1.2 PMV, η κατανάλωση αυξάνει, κορυφώνεται και στη συνέχεια μειώνεται. Η κανονικοποίηση της κατανάλωσης (εκδόσεις EL_norm και EL_norm,v2) βελτιώνουν

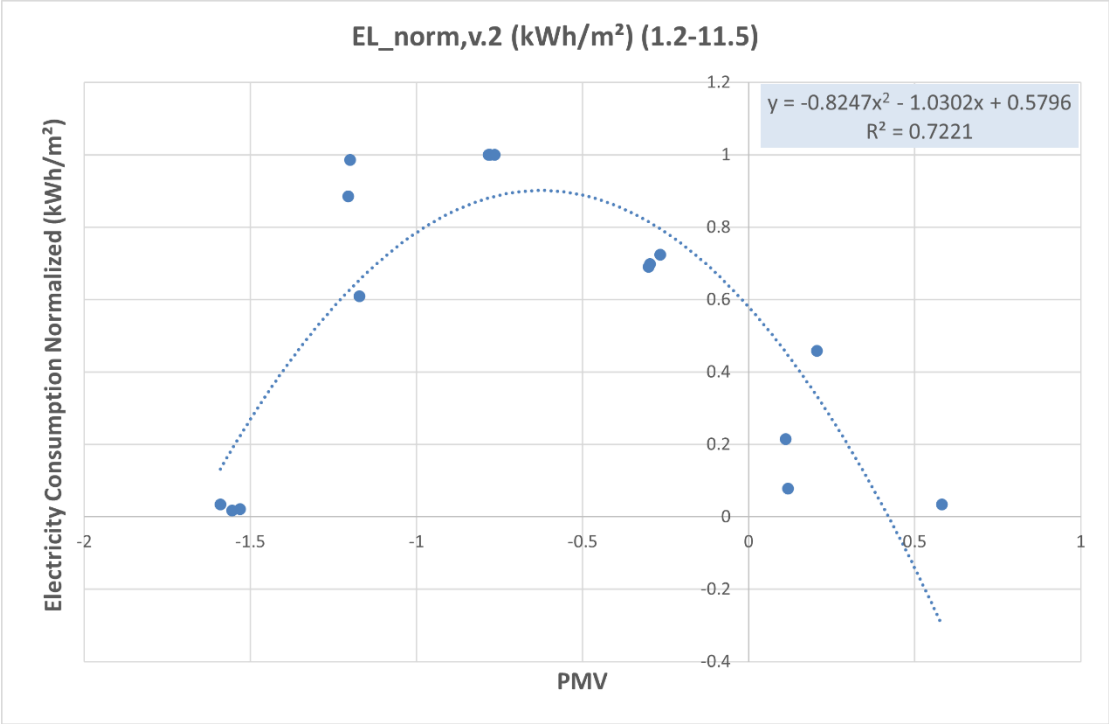
αισθητά τη συνοχή των σημείων και την προσαρμογή της παραβολικής καμπύλης σε σχέση με τα διαγράμματα με μη-κανονικοποιημένη ενέργεια. Αυτό συμβαίνει ιδίως στα χαμηλά και μεσαία θερμοκρασιακά εύρη όπου τα R^2 είναι γενικά υψηλότερα μεταξύ 0.65–0.80, έναντι 0.22–0.34 στα μη-κανονικοποιημένα. Στο υψηλό εύρος θερμοκρασιών η συμπεριφορά παραμένει καμπανοειδής με ελαφρώς χαμηλότερα R^2 ανάμεσα στις τιμές 0.59–0.74, κάτι αναμενόμενο λόγω μεγαλύτερης διασποράς από μη θερμικά φορτία και ισχυρότερης επίδρασης της συμπεριφοράς των χρηστών (ώρες παρουσίας, αερισμός). Συνολικά, τα γραφήματα τεκμηριώνουν ότι η κατανάλωση ακολουθεί σαφή παραβολική σχέση με τον PMV εντός κάθε θερμοκρασιακού εύρους, ενώ η κανονικοποίηση βοηθά να απομονωθεί το σχήμα από διαφορές μεγέθους φορτίων.

Για την χειμερινή περίοδο αναλύθηκαν με την ίδια μεθοδολογία οι κατοικίες W-1, W-2, W-4. Η W-3 δεν συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση καθώς υπήρχαν αρκετές ελλιπείς μετρήσεις. Τα διαγράμματα στα διάφορα θερμοκρασιακά εύρη κυμαίνονται στις ίδιες τιμές ποιότητας προσαρμογής χωρίς μεγάλες διαφορές όπως στην θερινή περίοδο. Πιο συγκεκριμένα, στο χαμηλό θερμοκρασιακό πλαίσιο εμφανίζεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας RAW να ξεπερνάει την πρώτη κανονικοποίηση και να στέκεται κοντά στην δεύτερη κανονικοποίηση, όπου ήταν και με το μεγαλύτερο αριθμό ποιότητας προσαρμογής.

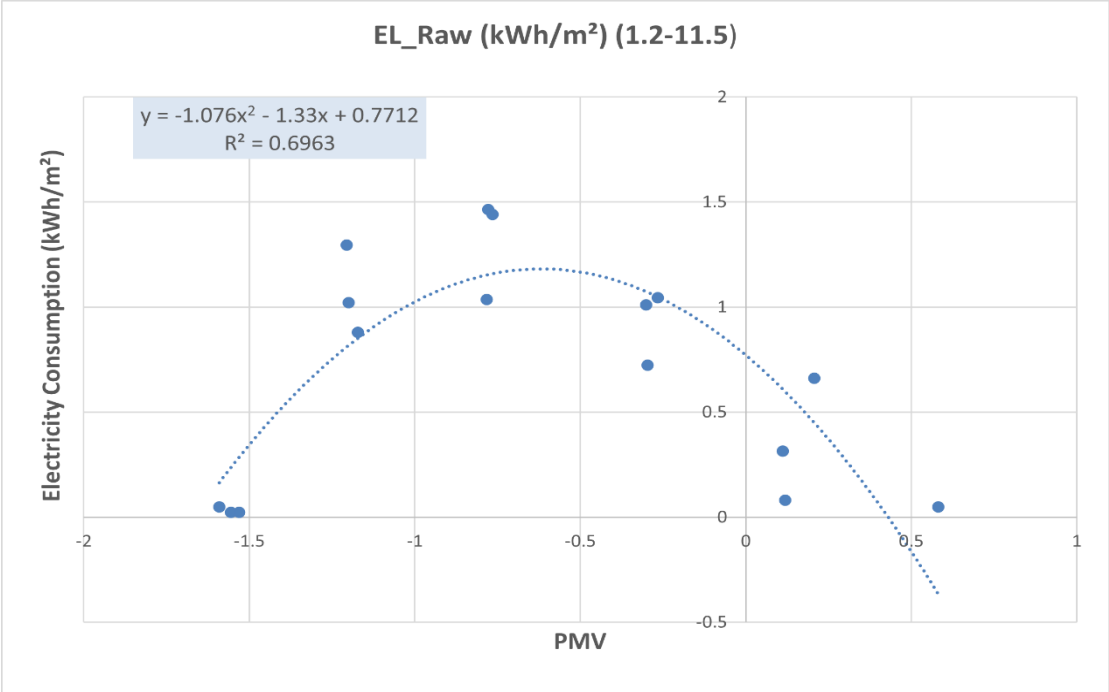
- Για το θερμοκρασιακό εύρος [1.2-11.5 °C]



Σχήμα 12α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.



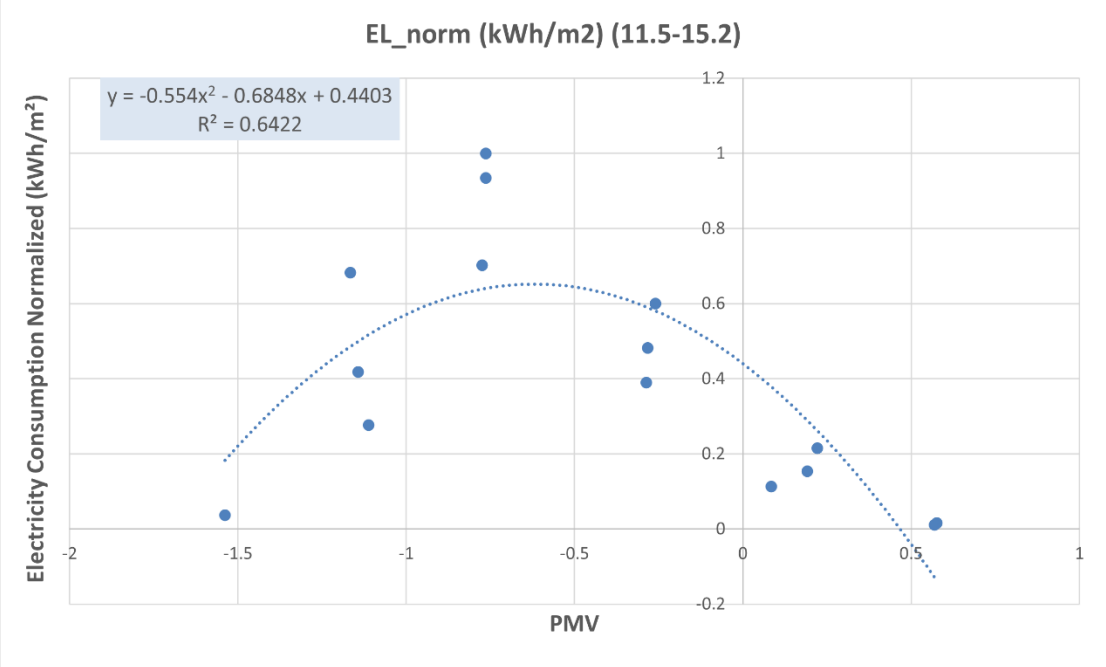
Σχήμα 12β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.



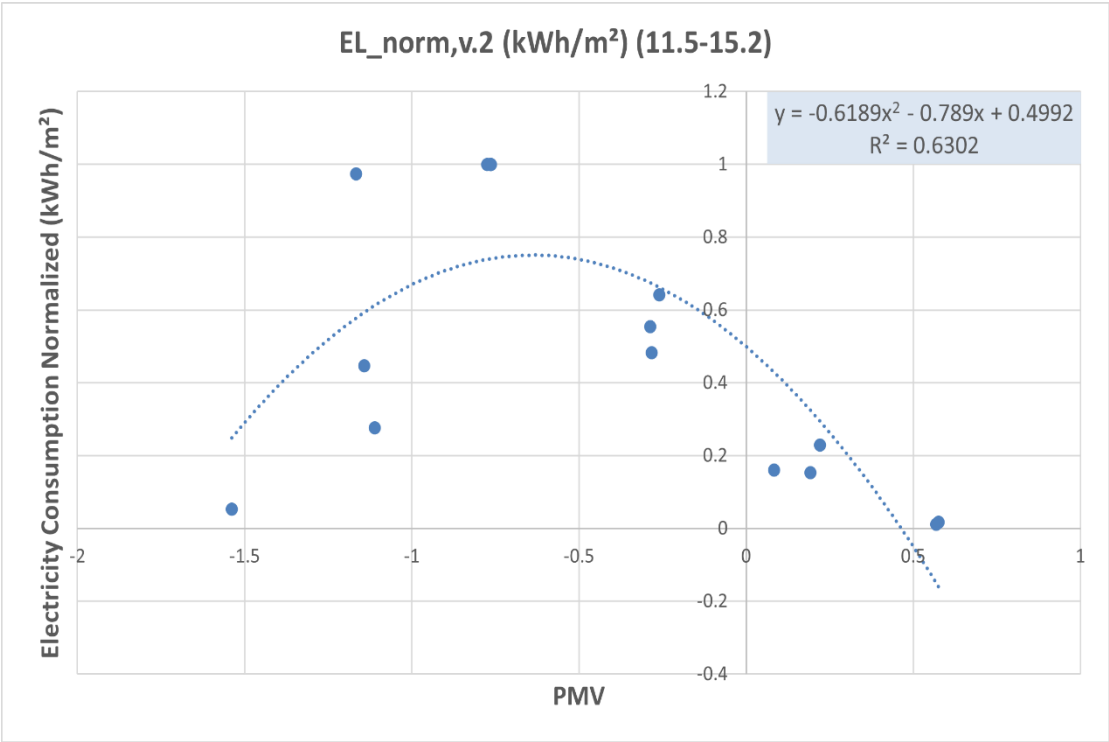
Σχήμα 12γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος.

Παρατηρήθηκε ότι, για τη χειμερινή περίοδο και για όλες τις εξεταζόμενες κατοικίες, η σχέση μεταξύ δείκτη PMV και ηλεκτρικής κατανάλωσης παρουσιάζει σταθερά ανεστραμμένη παραβολή, με κορυφή σε ελαφρώς αρνητικές τιμές PMV. Η κορυφή τείνει να κυμαίνεται στην περιοχή περίπου από −0.7 έως −0.3 τιμές PMV, γεγονός που είναι συμβατό με χειμερινή λειτουργία όπου οι χρήστες θερμαίνουν τον χώρο μέχρι μια αίσθηση ουδέτερης προς ελαφρώς ψυχρής θερμικής άνεσης. Καθώς ο υπαίθριος θερμοκρασιακός δείκτης αυξάνεται από το χαμηλό στο υψηλό εύρος, η απαιτούμενη θέρμανση μειώνεται και η κορυφή της κατανάλωσης μετακινείται προς λιγότερο αρνητικά PMV και ταυτόχρονα μειώνεται το ύψος της καμπύλης. Το αριστερό άκρο επεκτείνεται έως περίπου −1.5 PMV, αντανακλώντας επεισόδια εντονότερου ψύχους. Το δεξί μέρος με τιμές να κυμαίνονται στο 0.5 PMV δικαιολογούνται στην εξωτερική θερμοκρασία που σημειώνει υψηλές θερμοκρασίες για χειμερινή περίοδο είτε στην αδράνεια των συστημάτων θέρμανσης.

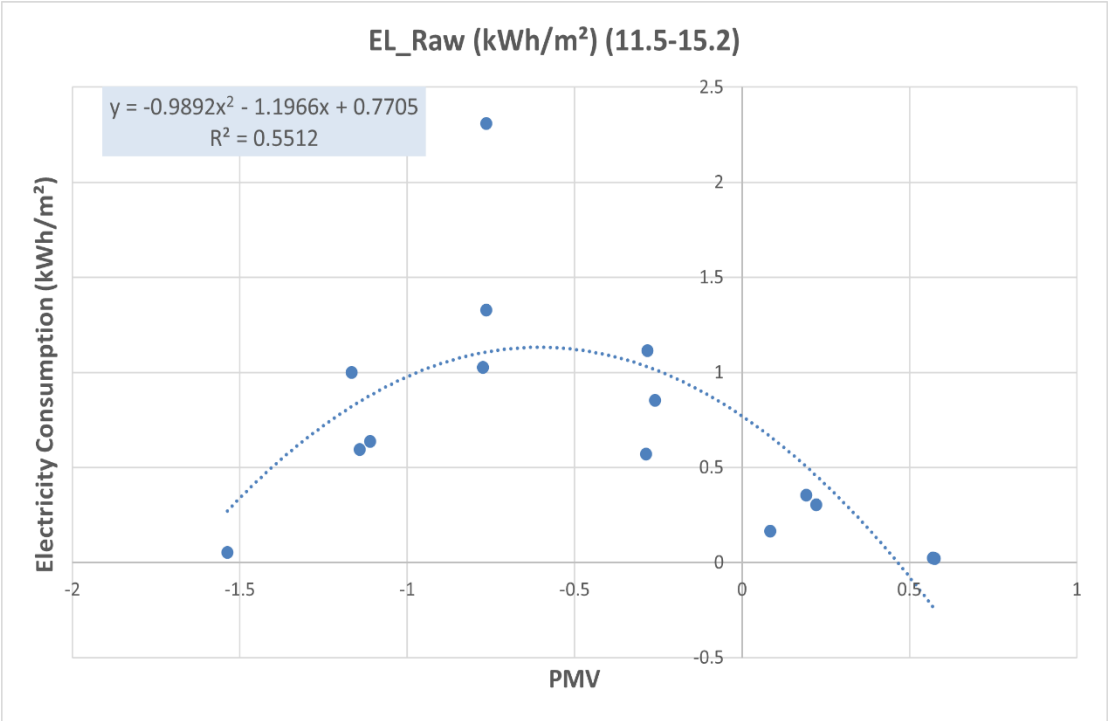
- Για το θερμοκρασιακό εύρος [11.5-15.2 °C]



Σχήμα 13α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

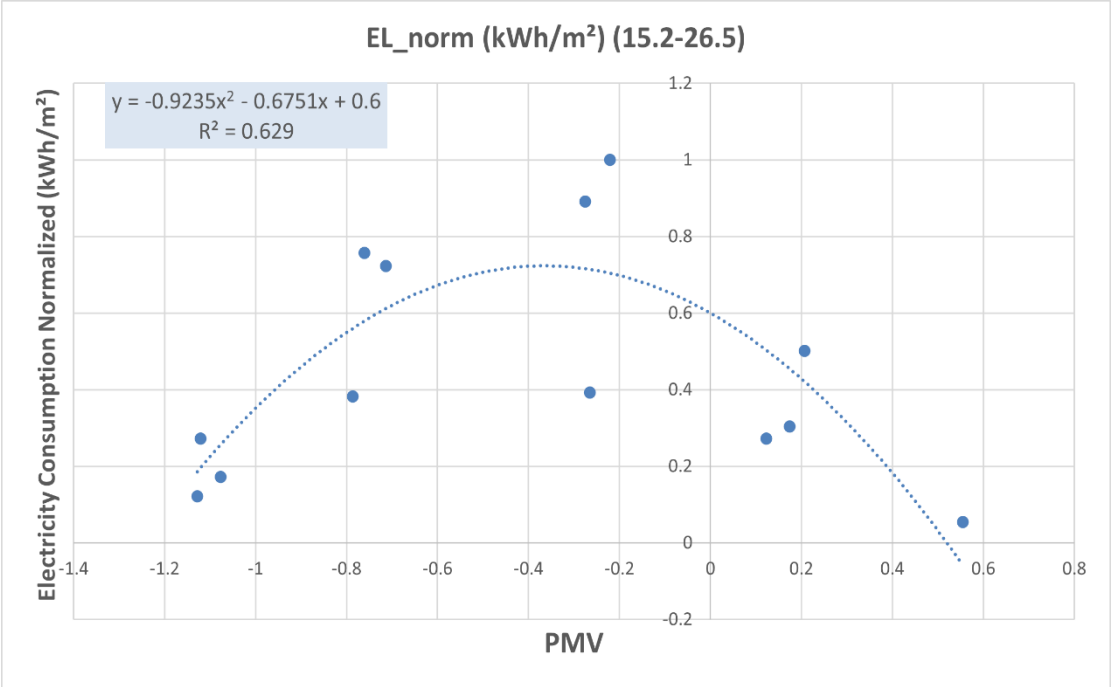


Σχήμα 13β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

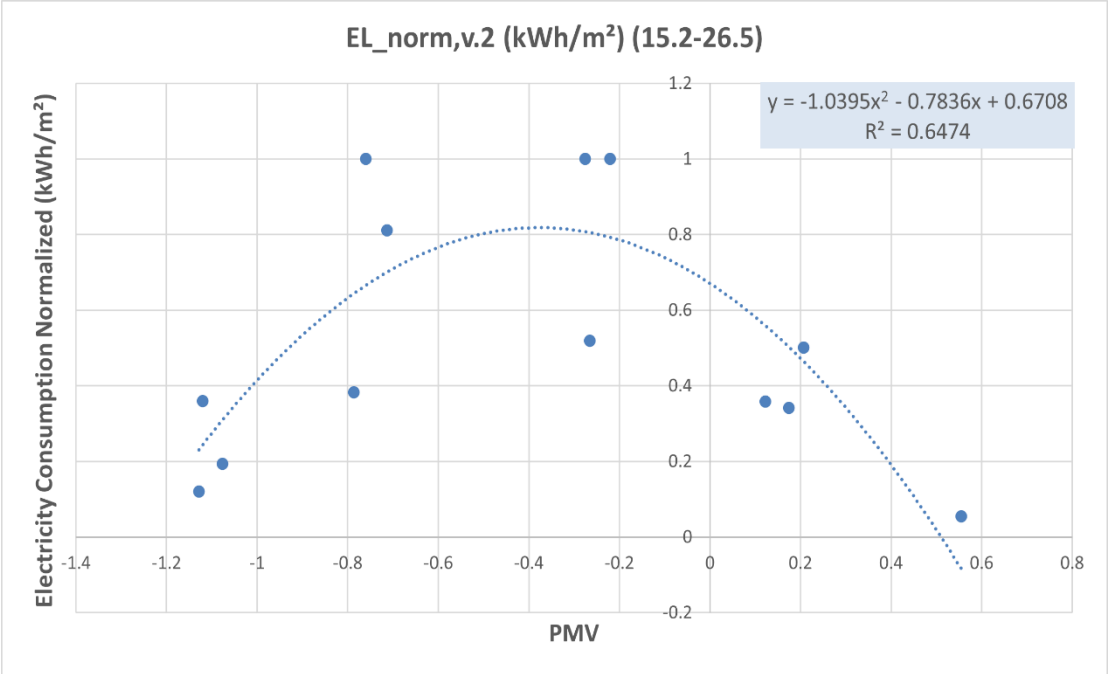


Σχήμα 13γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος.

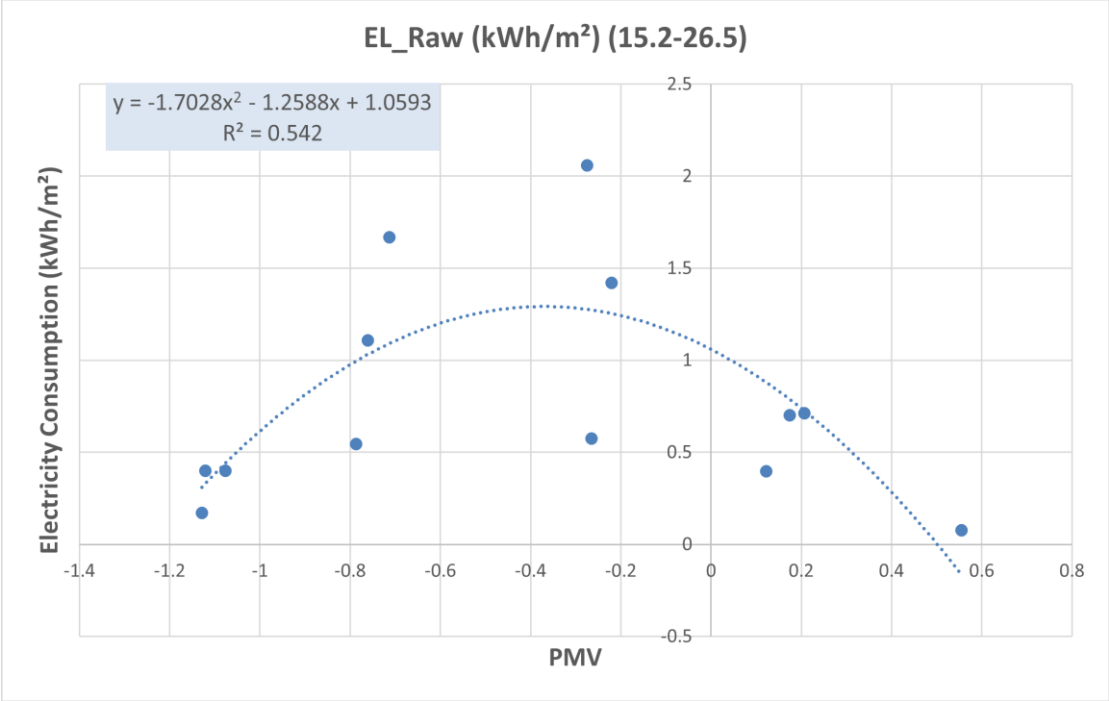
- Για το θερμοκρασιακό εύρος [15.2-26.2 °C]



Σχήμα 14α: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.



Σχήμα 14β: Κανονικοποιημένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.



Σχήμα 14γ: Συνολική αθροισμένη ηλεκτρική κατανάλωση με δείκτη PMV στο υψηλό θερμοκρασιακό εύρος.

Σε επίπεδο ποιότητας προσαρμογής, οι καμπύλες που βασίζονται στην κανονικοποιημένη ενέργεια εμφανίζουν συστηματικά καλύτερη προσαρμογή από την μη-κανονικοποιημένη κατανάλωση. Η δεύτερη εκδοχή κανονικοποίησης, μειώνει τη διασπορά που οφείλεται στα διαφορετικά επίπεδα βασικού φορτίου (ψυγεία, φωτισμός κ.λπ.) και εναρμονίζει τα ύψη των καμπυλών ανά ζώνη. Το αποτέλεσμα είναι πιο πυκνό και σε αρκετές περιπτώσεις, στοχεύει υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού σε σχέση με την πρώτη κανονικοποίηση ή τα μη-κανονικοποιημένα δεδομένα. Αντίθετα, στο υψηλό χειμερινό εύρος [15.2–26.5 °C] η βελτίωση είναι μικρότερη. Συνολικά, οι τιμές προσαρμογής παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα μεταξύ των ζωνών, με μικρότερες μεταξύ τους διαφορές σε σύγκριση με τη θερινή περίοδο.

Μια παρατήρηση κρίσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η σχετική υπεροχή της κανονικοποίησης στα εύρη οφείλεται στο ότι αντισταθμίζει διαφορές στις μέγιστες τιμές ενέργειας μεταξύ PMV διαστημάτων, επιτρέποντας να αναδειχθεί καθαρότερα η τάση. Στο χαμηλό εύρος, υψηλότερου βασικού φορτίου περιορίζει το κέρδος στην προσαρμογή έκδοσης 1 αλλά προσδίδει στην έκδοση 2 με ποιότητα προσαρμογής την υψηλότερη 0.72 ή 72%. Συνολικά, τα διαγράμματα της χειμερινής περιόδου επιβεβαιώνουν τη θεωρητικά αναμενόμενη μορφή της καμπύλης, με τη ζώνη μέγιστης κατανάλωσης γύρω από ελαφρώς αρνητικά PMV και με σαφή μείωση της κατανάλωσης προς θερμικά ουδέτερες ή θερμότερες αισθήσεις άνεσης.

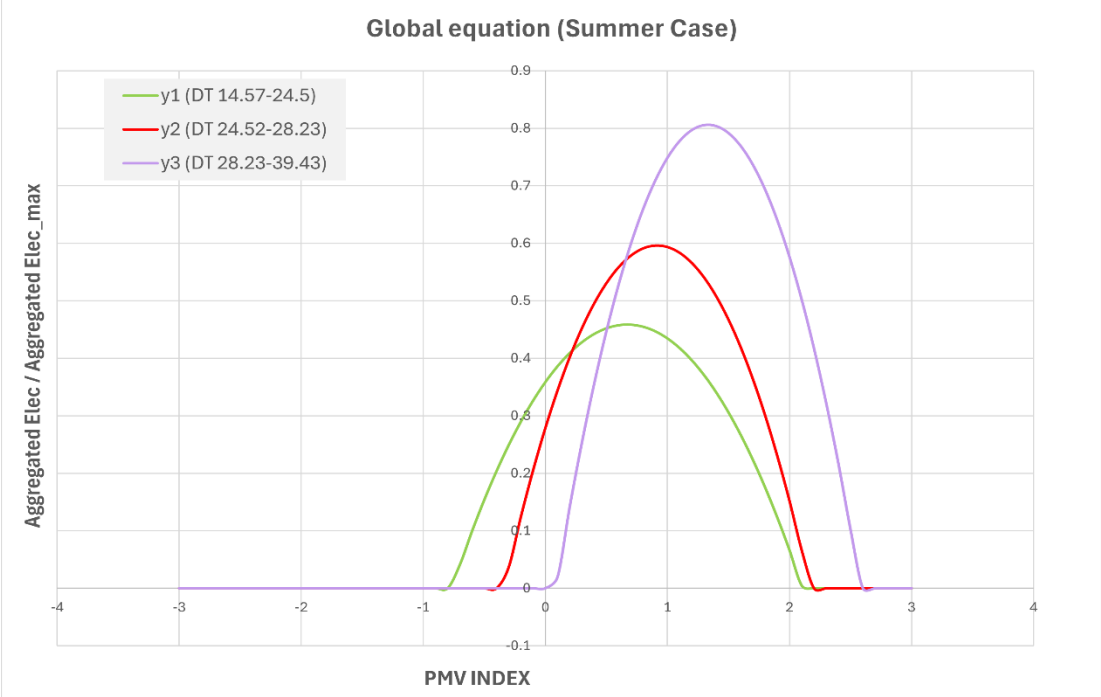
Συνολικά και οι δύο εκδόσεις κανονικοποίησης βελτιώνουν την τάση και τον δείκτη αξιολόγησης προσαρμογής και στις δύο περιόδους μελέτης. Φαίνεται τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα διαγράμματα Raw (μη-κανονικοποιημένη ηλεκτρική ενέργεια) εμφανίζουν χαμηλούς συντελεστές προσαρμογής (R^2 = 0.22–0.34) και έντονη διασπορά, γεγονός που υποδηλώνει μικρή αξιοπιστία και περιορισμένη δυνατότητα γενίκευσης, καθώς οι απόλυτες τιμές κατανάλωσης επηρεάζονται έντονα από τις διαφορές μεταξύ κατοικιών. Η δεύτερη εκδοχή κανονικοποίησης (Norm 2) βελτιώνει σημαντικά την εικόνα στον δείκτη αξιολόγησης R^2 με τιμές να κυμαίνονται 0.59–0.67, ωστόσο η διασπορά παραμένει μεγαλύτερη και η καμπύλη λιγότερο σαφής. Αντίθετα, η πρώτη εκδοχή κανονικοποίησης (Norm 1) αποδίδει σταθερά υψηλούς συντελεστές προσαρμογής R^2 με τιμές από 0.74 μέχρι 0.81, με καθαρά παραβολικό σχήμα που παρουσιάζει με συνέπεια τη σχέση μεταξύ PMV και κατανάλωσης. Συνεπώς, η Norm 1 θεωρείται η πιο αξιόπιστη προσέγγιση για τη θερινή περίοδο, καθώς αφαιρεί τις καθαρά κλιμακωτές διαφορές, αναδεικνύει το σχήμα της σχέσης και επιτρέπει γενίκευση των συμπερασμάτων.

Στη χειμερινή περίοδο, όπως και στη θερινή, αξιολογήθηκαν οι τρεις εκδοχές παλινδρόμησης (Raw, Norm 1, Norm 2) για τρία θερμοκρασιακά εύρη. Τα διαγράμματα Raw και Norm 1 εμφανίζουν χαμηλότερους συντελεστές προσαρμογής R^2 ανάμεσα στις τιμές 0.54–0.69 και 0.63-0.65, με διακύμανση στις απόλυτες τιμές της κατανάλωσης, γεγονός που περιορίζει την αξιοπιστία και δυσκολεύει τη σύγκριση μεταξύ κατοικιών. Η πρώτη εκδοχή κανονικοποίησης βελτιώνει στο υψηλό και μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος την εικόνα και συνεπώς το R^2, αντιθέτως στο χαμηλό ο δείκτης R^2 μειώνεται. Η δεύτερη κανονικοποίηση βελτιώνει σε όλα τα θερμοκρασιακά εύρη των δείκτη αξιολόγησης της προσαρμογής, καθώς περιορίζει τις κλιμακωτές διαφορές και αναδεικνύει πιο ομοιόμορφα τη μορφή της σχέσης μεταξύ PMV και ηλεκτρικής κατανάλωσης. Η Norm 2 παρουσιάζει στο χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος το υψηλότερο R^2 = 0.72 με την χαμηλότερη τιμή να είναι στο 0.64, με την διακύμανση να είναι εμφανής καλύτερη απο την Norm 1 και η προσαρμογή καλύτερη. Αντίθετα, η Norm 1 εμφανίζει σταθερές τιμές R^2 (0.63–0.65) και παράγει συνεπείς καμπύλες, οι οποίες αποτυπώνουν με καθαρότητα την παραβολική σχέση αλλά όχι όπως αποτυπώνεται απο την Norm 2. Συνεπώς, στη χειμερινή περίοδο η δεύτερη μέθοδος κανονικοποίησης (Norm 2) θεωρείται η πλέον αξιόπιστη για γενίκευση των συμπερασμάτων, καθώς παρέχει ισορροπία μεταξύ σταθερότητας και ερμηνευτικής σαφήνειας, χωρίς να υποβιβάζει την πρώτη έκδοση, αφού οι δείκτες προσαρμογής και οι διακυμάνσεις κυμαίνονται κοντά στις τιμές, με την Norm 2 να είναι ελαφρώς καλύτερη.

Στο τελικό στάδιο της μελέτης απο τα ζεύγη του δείκτη PMV και της αθροισμένης ηλεκτρικής κατανάλωσης, που προέκυψαν απο κάθε θερμοκρασιακό εύρος, παρουσιάζονται εκ νέου οι καμπύλες EL-PMV με χρήση μόνο των εξισώσεων που προέκυψαν από την παλινδρόμηση, λαμβάνοντας τώρα μέριμνα ώστε να μην εμφανίζονται αφύσικες αρνητικές τιμές της κατανάλωσης ενέργειας.

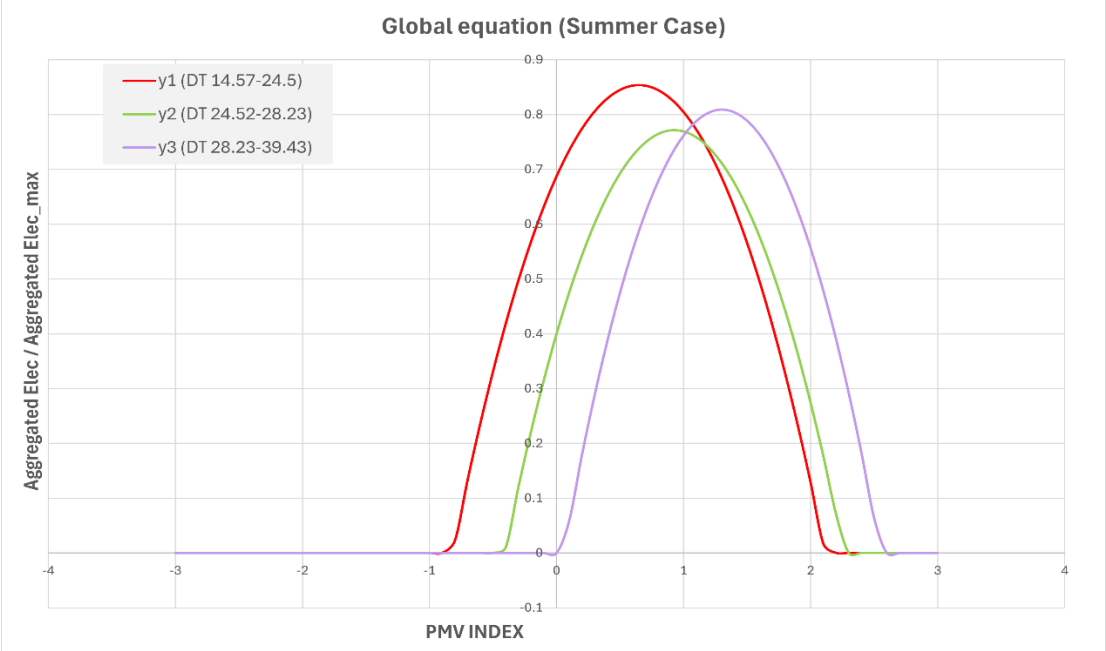
Δίνονται οι αναλύσεις για τις περιόδους:

- Θερινή περίπτωση



Σχήμα 15α: Συνολική πρώτη έκδοση κανονικοποιημένης ηλεκτρικής κατανάλωσης με δείκτη PMV στη θερινή περίοδο.

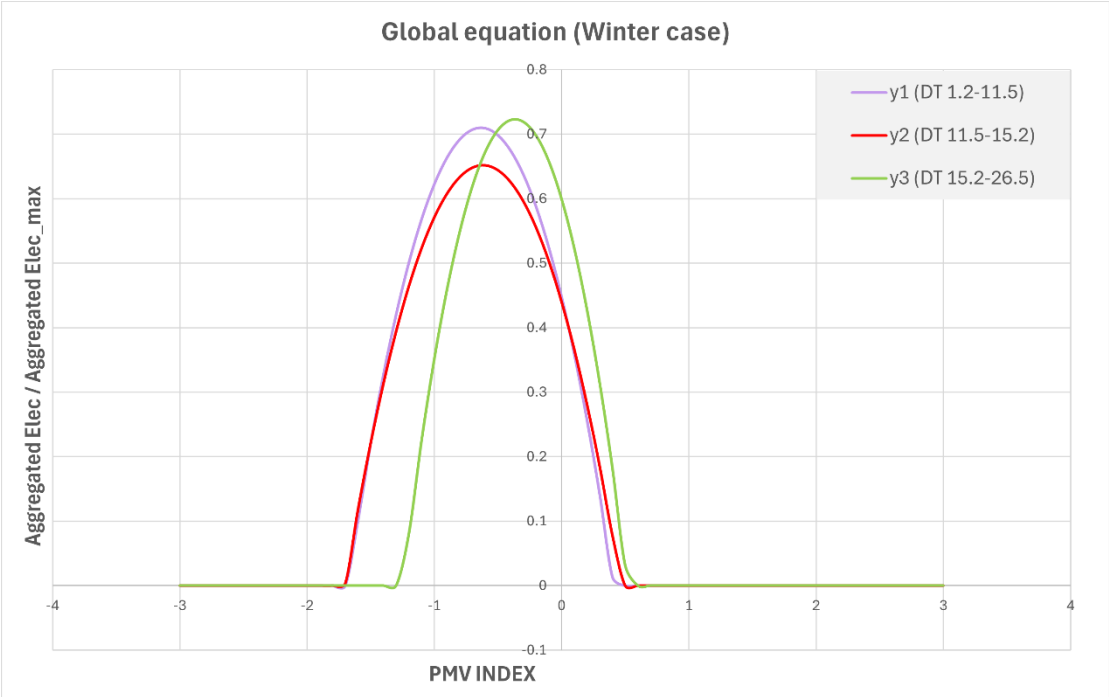
Το γράφημα δείχνει να σχηματίζει ένα μοτίβο σκάλας, όπου δικαιολογείται καθώς όσο αυξάνεται η θερμική δυσφορία αυξάνεται και η κατανάλωση. Η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ καμπυλών ποσοτικοποιεί τη σχετική βαρύτητα κάθε θερμοκρασιακού εύρους στο συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα. Η υψηλή ζώνη βρίσκεται ψηλότερα, υποδηλώνοντας μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος ανά PMV σε θερμές συνθήκες. Αυτό δείχνει να είναι συμβατό με τη φυσική του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα σε θερμότερες ημέρες, για να επανέλθει ο εσωτερικός χώρος προς ουδετερότητα, απαιτείται εντονότερη ψύξη, άρα κορυφές πιο δεξιά και υψηλότερο ανηγμένο φορτίο. Σε αυτό το πλαίσιο αναφέρεται ότι ένας πιο πυκνός χωρισμός της εξωτερικής θερμοκρασίας σε περισσότερα θερμοκρασιακά εύρη θα μπορούσε να δώσει ένα καλύτερο εργαλείο εκτίμησης.



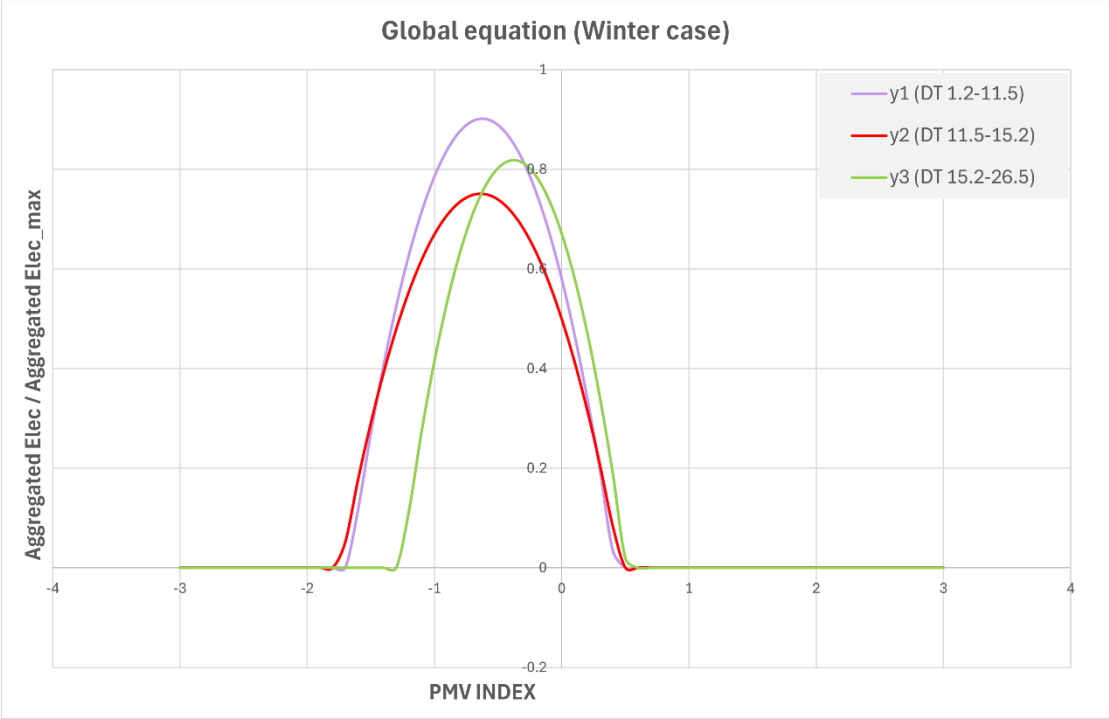
Σχήμα 15β: Συνολική δεύτερη έκδοση κανονικοποιημένης ηλεκτρικής κατανάλωσης με δείκτη PMV στη θερινή περίοδο.

Αναδεικνύεται κυρίως η θέση της κορυφής και η διασπορά μεταξύ των θερμοκρασιακών ευρών και εύρους PMV. Η κάθε εξίσωση έχει το δικό της μέγιστο και αυτό επιβεβαιώνεται με σχετικά ίδια μέγιστη τιμή.

- Χειμερινή περίπτωση



Σχήμα 16α: Συνολική πρώτη έκδοση κανονικοποιημένης ηλεκτρικής κατανάλωσης με δείκτη PMV στη χειμερινή περίοδο.



Σχήμα 16β: Συνολική δεύτερη έκδοση κανονικοποιημένης ηλεκτρικής κατανάλωσης με δείκτη PMV στη χειμερινή περίοδο.

Στη χειμερινή περίοδο οι κορυφές μετακινούνται στη ψυχρή πλευρά −0.8 έως −0.4 PMV, καθώς το εξωτερικό περιβάλλον βελτιώνεται (από χαμηλές προς υψηλότερες χειμερινές θερμοκρασίες), η κορυφή πλησιάζει το PMV=0. Αυτό δηλώνει ότι η θέρμανση ανταποκρίνεται έντονα όταν οι εσωτερικές συνθήκες είναι πιο ψυχρές από την άνεση, ενώ η ζήτηση μειώνεται γρήγορα όταν ο χώρος προσεγγίζει την ουδετερότητα. Η norm1 δεν αναδεικνύει ένα αναμενόμενο διάγραμμα όπως της καλοκαιρνής έκδοσης, αλλά υπήρξε μια ίδια κορύφωση μεταξύ των θερμοκρασιακών ευρών. Η norm2 παρουσιάζει την μώβ καμπύλη του χαμηλότερου θερμοκρασιακού έυρους μεγαλύτερη κατανάλωση κοντά στο δείκτη PMV να είναι -0.7 (ελαφρώς ψυχρή αίσθηση). Τέλος κάθε κατακόρυφη απόσταση μεταξύ καμπυλών ποσοτικοποιεί τη σχετική βαρύτητα κάθε θερμοκρασιακού εύρους στο συνολικό ενεργειακό αποτύπωμα. Η χαμηλή ζώνη βρίσκεται ψηλότερα, υποδηλώνοντας μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος ανά PMV σε ψυχρές συνθήκες. Είναι φανερό ότι κατά τη θερινή περίοδο εμφανίζεται έντονη ευαισθησία της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την εξωτερική θερμοκρασία, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο πολύ μικρότερη ευαισθησία. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη χειμερινή περίοδο οι ανάγκες θερμικής άνεσης δεν καλύφθηκαν από ηλεκτρικές συσκευές αλλά από εναλλακτικές τεχνολογίες (πετρέλαιο ή τζάκι), παρά το γεγονός ότι από την καταγραφή των κατοικιών οι ένοικοι μαρτυρούσαν ότι δεν τις χρησιμοποιούσαν [7]. Σε αντίθεση με την καλοκαιρινή παρατηρείται ότι υπήρξε ηλεκτρική κατανάλωση για ανάγκες θερμικής άνεσης.

Η πρακτική αξία των διαγραμμάτων είναι διπλή. Πρώτον, παρέχουν καμπύλες απόκρισης που χαρτογραφούν την αναμενόμενη ηλεκτρική κατανάλωση ως συνάρτηση της θερμικής άνεσης για συγκεκριμένη κλιματική ζώνη. Αυτό χρησιμοποιείται στον προκαταρκτικό σχεδιασμό και στη βελτιστοποίηση λειτουργίας. Αρχικά μπορεί να προσδιορίσει στόχους ρύθμισης (σημεία), έτσι ώστε ο PMV να παραμένει κοντά στη θέση της άνεσης αυστηρά ή στην υποκειμενική ρύθμιση ανεξαρτήτως του θεωρητικά απαιτούμενου πλαισίου θερμικής άνεσης. (β) επιλογή στρατηγικών ελέγχου (π.χ. νυχτερινή προψύξη/προθέρμανση) με βάση τη μορφή και το πλάτος της καμπύλης, (γ) ιεράρχηση παρεμβάσεων κελύφους και σκιάσεων. Αν η θερινή κορυφή είναι πολύ αιχμηρή και μετατοπισμένη δεξιά, δίνεται προτεραιότητα σε ηλιοπροστασία/αερισμό, ενώ αν η χειμερινή κορυφή είναι βαθιά αρνητική, προτάσσονται θερμομόνωση και μείωση διείσδυσης αέρα. Δεύτερον, τα σχήματα λειτουργούν ως ουδέτερες συναρτήσεις μεταφοράς για εποχικό προγραμματισμό ζήτησης σε μεσογειακό κλίμα (Ηράκλειο), καθώς υποστηρίζουν εκτιμήσεις αιχμών για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής σχεδίασης. Αυτό γίνεται πραγματοποιήσιμο, διότι συνδέουν άμεσα την αναμενόμενη απόκλιση άνεσης (PMV) με τη συνολική ηλεκτρική επιβάρυνση. Τέλος, η πρώτη έκδοση επιλέγεται ως αξιόπιστη πηγή πληροφορίας, πιο συγκεκριμένα η καλοκαιρινή περίοδος στάθηκε στη αναμενόμενη μορφή και δικαιολογείται στο γεγονός ότι για κάθε ανηγμένο φορτίο μπορεί να εκτιμηθεί η θερμική άνεση με δεδομένου της εξωτερικής θερμοκρασίας.

5. Συμπεράσματα Συζήτηση αποτελεσμάτων και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν σαφή εποχική ασυμμετρία και ευδιάκριτη μη γραμμική σχέση μεταξύ PMV και ηλεκτρικής κατανάλωσης. Τη θερινή περίοδο τα θερμικά φορτία κορυφώνονται στις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, όπως καταγράφηκε τόσο στις χρονοσειρές εσωτερικής θερμοκρασίας όσο και στους χρονικούς θερμοχάρτες (heatmaps) του PMV, οι οποίοι κατέδειξαν μετατόπιση προς θερμότερες καταστάσεις. Το πολικό διάγραμμα ηλιακής ακτινοβολίας ερμηνεύει πειστικά το ημερήσιο μοτίβο των θερμικών κερδών τη θερινή περίοδο, ιδίως την ώρα 12:00–16:00, εξηγώντας την εμφάνιση υψηλών PMV ακόμη και όταν ο μηχανικός δροσισμός δεν είναι συνεχής. Αντιθέτως, τον χειμώνα οι κατοικίες εμφάνισαν συχνότερα ουδέτερες ή ελαφρώς ψυχρές καταστάσεις PMV μεταξύ −0.5 έως 0, με την κατανάλωση θέρμανσης να εκδηλώνεται κυρίως σε διακριτά εύρη ωρών και να ακολουθεί την πτώση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η ανάλυση ανά

εβδομάδα επιβεβαίωσε αυτά τα μοτίβα, ενώ η σήμανση ανεπαρκών δεδομένων (κόκκινες διαγραμμισμένες ράβδοι) εξασφάλισε ότι οι ελλιπείς εβδομάδες δεν επηρέασαν αθέμιτα τα συμπεράσματα.

Κεντρικό εύρημα της εργασίας είναι ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ως προς τον PMV εμφανίζει καμπανοειδή (bell-shaped) μορφή όταν ομαδοποιείται ανά εύρος εξωτερικής θερμοκρασίας, μετά από κατάλληλη κανονικοποίηση. Εφαρμόστηκε κανονικοποίηση ανά κατοικία ως προς το μέγιστο της ώστε να εξαλειφθούν καθαρά κλιμακωτές διαφορές (μέγεθος οικίας, βασικά φορτία, συνήθειες χρήσης) και να καταστούν συγκρίσιμα τα σχήματα μεταξύ κατοικιών. Υπό αυτή τη διαδικασία, οι θερινές καμπύλες κατανάλωσης εμφάνισαν μέγιστα στην περιοχή με δείκτη PMV να κυμαίνεται στα θετικά +1 με +1.7 και μείωση για PMV < 0 αλλά και για πολύ υψηλά PMV (όπου, παρά την εντονότερη δυσφορία, ενδέχεται να υφίσταται κορεσμός ισχύος ή/και καθυστερημένη χρήση του κλιματισμού). Ενδεικτικά, για τη ζώνη υψηλών εξωτερικών θερμοκρασιών μιας θερινής κατοικίας, η τυπική προσαρμογή δεύτερου βαθμού $y = -0{,}5172x^2 + 1{,}3787x - 0{,}113$ απέδωσε κορυφή κοντά στο PMV = 1.33 και καλή ποιότητα προσαρμογής ($R^2 = 0.74$), τεκμηριώνοντας μη γραμμικότητα. Αντίστοιχα, τον χειμώνα, τα μέγιστα κατανάλωσης εμφανίζονται σε τιμές PMV να βρίσκεται στα αρνητικά από −1.2 έως −0.5, όπου ενεργοποιείται η θέρμανση μέχρι να ανακτηθεί η ουδέτερη ζώνη. Η συμπεριφορά αυτή συνάδει με τη διεθνή βιβλιογραφία που περιγράφει προσαρμοστικές πρακτικές και αργοπορημένες παρεμβάσεις των ενοίκων και εξηγεί γιατί η συμπεριφορά άνεσης αποκλίνει συχνά από τις ιδανικές προβλέψεις του PMV σε κτίρια με φυσικό αερισμό ή συνεχή χρήση HVAC.

Η ολική (global) εξίσωση συσχέτισης που προέκυψε για τη θερινή περίοδο, ως καμπύλη αναφοράς μετά από κανονικοποίηση και συνάθροιση όλων των κατοικιών ανά ζώνη εξωτερικής θερμοκρασίας. Αποτυπώνει αρχικά μια σταθερή κορυφή κοντά σε PMV μεταξύ +1 με +1.2 στις μέτριες-υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες και μικρότερο πλάτος σε χαμηλότερες. Έτσι, η μεθοδολογία προσφέρει ένα πρακτικό αντίστροφο εργαλείο. Παρατηρείται η κατανάλωση και δίνεται η δυνατότητα να μπορεί να αποτιμηθεί ο αναμενόμενος βαθμός θερμικής άνεσης και αντιστρόφως, χρήσιμο για αποτίμηση σενάριων διαχείρισης φορτίου σε καύσωνες, αλλά και για βελτιστοποίηση της ενεργειακής σχεδίασης. Η χρήση διπλών οπτικών χαρτών, χρονικοί (time-series/heatmaps) και κατανομών ως προς PMV, απέδειξε τη δυναμική τους. Οι θερμικοί χάρτες καταγράφουν τις χρονικές στιγμές που συμβαίνει η δυσφορία, ενώ οι καμπανοειδείς κατανομές ποσοτικοποιούν την ποσότητα ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε επίπεδο θερμικής αίσθησης.

Τα παραπάνω ευρήματα έχουν και επιχειρησιακές προεκτάσεις. Πρώτον, αναδεικνύεται ότι η επίτευξη ουδετερότητας (PMV = 0) δεν είναι ούτε απαραίτητα

οικονομικά βέλτιστη ούτε συμπεριφορικά ρεαλιστική για τους ενοίκους. Στη θερινή περίοδο, το μέγιστο της καταναλωτικής απόκρισης βρίσκεται στην περιοχή PMV κοντά στο +1, όπου υποδηλώνει ότι οι χρήστες ανέχονται ελαφρώς θερμό περιβάλλον και ενεργοποιούν ψύξη όταν η δυσφορία γίνεται αισθητή, κάτι που συνδέεται με το προσαρμοστικό πλαίσιο των προτύπων και τον παράγοντα «προσδοκίας» (expectancy) για θερμά κλίματα [7]. Δεύτερον, η εποχική ασυμμετρία συμβαδίζει με την κλιματική πραγματικότητα της Κρήτης και τονίζει την ανάγκη για παθητικές στρατηγικές δροσισμού (σκίαση, φυσικός αερισμός, ανεμιστήρες) και στοχευμένο έλεγχο HVAC, ιδίως κατά τις ώρες μέγιστων ηλιακών κερδών.

Περιορισμοί της μελέτης που πρέπει να επισημανθούν. Αρχικά το δείγμα (N = 8) είναι εστιασμένο σε μία πόλη, ενώ υπήρξαν εβδομάδες με ανεπαρκή δεδομένα, κάτι που, μολονότι σηματοδοτήθηκε, μειώνει το στατιστικό βάθος για ορισμένα διαστήματα. Δεύτερον η προσέγγιση υπολόγισε PMV χωρίς άμεσες ωριαίες μετρήσεις MRT και ταχύτητας αέρα (βιβλιογραφία ASHRAE-55 δηλώνει ανεκτό όριο της ταχύτητας του αέρα να βρίσκεται κάτω απο 0.2 m/s) σε όλα τα σπίτια. Τρίτον η χρήση τυπικών παραδοχών για clo ή met, εισάγει αβεβαιότητα, όπως αναγνωρίζεται και στο θεωρητικό πλαίσιο των προτύπων. Επιπλέον, η κατανάλωση περιλαμβάνει και μη θερμικά φορτία (οικιακές συσκευές), τα οποία μετριάζονται αλλά δεν εξαλείφονται με την κανονικοποίηση. Τέλος, δεν συλλέχθηκαν συστηματικά υποκειμενικές ψήφοι άνεσης ανά ώρα, ώστε να γίνει άμεση αντιστοίχιση PMV–αίσθησης σε επίπεδο κατοίκου. Παρά ταύτα, ο συνδυασμός χρονοσειρών, θερμικών χαρτών και καμπανοειδών κατανομών, μαζί με την κανονικοποίηση και τις πολυωνυμικές προσαρμογές, παρήγαγε συνεπή μοτίβα και επέτρεψε τη διατύπωση μίας ολικής συσχέτισης με σαφές φυσικό νόημα.

Τέλος, η εργασία παρουσιάζει ένα χρηστικό αναλυτικό αρχείο (Excel macros και Python) για υπολογισμό PMV από πραγματικές χρονοσειρές και σύνδεσή του με την ηλεκτρική κατανάλωση, με οπτικοποιήσεις που αναδεικνύουν χρονικά και θερμικά μοτίβα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τα αντίστοιχα παραρτήματα Α και Β. Δεύτερον, τεκμηριώνει, σε μεσογειακό κλίμα και σε πραγματικά κατειλημμένες κατοικίες, τη μη γραμμική σχέση κατανάλωσης μεταξύ του PMV με καμπύλες ενεργοποίησης ψύξης είτε θέρμανσης, επιβεβαιώνοντας προσαρμοστικές συμπεριφορές ενοίκων. Τρίτον, εισάγει ένα ολικό διάγραμμα αναφοράς (global) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της σχεδίασης κατοικιών στο μελετούμενο μέρος. Δηλαδή μια συνεχή καταγραφή σε ένα μεγαλύτερο όγκο ελέγχου στο μέρος του Ηρακλείου, θα έδινε ένα καλύτερο συμπέρασμα για την βελτίωση της ενεργειακής σχεδίασης στο κτηριακό τομέα του Ηρακλείου, αλλά και παθητικά ενεργειακά κέρδοι μέσω της προσαρμοστικότητας των ενοίκων.

Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή.

1. Διεύρυνση και εμβάθυνση δεδομένων, δηλαδή επέκταση του δείγματος σε περισσότερες κατοικίες και κλιματικές ζώνες, πολυετής παρακολούθηση, και ενσωμάτωση άμεσων μετρήσεων MRT και ταχύτητας αέρα, καθώς συστηματική συλλογή υποκειμενικών ψήφων άνεσης για βαθμονόμηση και επικύρωση του PMV σε συνδυασμό με τον δείκτη προσδοκίας σε θερμά κλίματα.
2. Ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα εξειδικευμένα μοντέλα μηχανικής μάθησης (gradient boosting, random forests, LSTM για χρονοσειρές) για πρόβλεψη PMV και/ή κατανάλωσης από μετεωρολογικές/εσωτερικές εισροές, με ερμηνευσιμότητα (SHAP) ώστε να ποσοτικοποιείται η συμβολή παραμέτρων όπως T_out, υγρασία, ώρα, κατοίκηση.
3. Έλεγχος και βελτιστοποίηση. Ανάπτυξη πολιτικών ελέγχου HVAC που στοχεύουν σε άνεση με ελάχιστη ενέργεια, αντί αυστηρής ουδετερότητας, (προληπτική ψύξη πριν τα μεσημβρινά μέγιστα ακτινοβολίας, χρήση ανεμιστήρων για αύξηση της ταχύτητας αέρα και μετατόπιση της αντιληπτής άνεσης, δυναμικά σημεία με βάση την εξωτερική θερμοκρασία).
4. Αξιολόγηση παθητικών μέτρων με την ποσοτικοποίηση της επίδρασης σκιασμού, νυχτερινού αερισμού, ανακλαστικών επιφανειών και φυτεύσεων στη μετατόπιση των καμπυλών PMV-ενέργειας και στη μείωση της κορυφής κατανάλωσης.
5. Ενσωμάτωση συμπεριφοράς ενοίκων με την ανάπτυξη απλών ψηφιακών δίδυμων κατοικίας με μοντέλα χρήσης (occupant behavior) ώστε να μειωθεί το χάσμα ενεργειακής απόδοσης (energy performance gap). Έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης των σενάριων, από την ανατροφοδότηση προς τους χρήστες, καθώς θα υπάρχει πλήρης ενημέρωση των σεναρίων.

Συμπερασματικά, η εργασία απέδειξε ότι οι πραγματικές κατοικίες εμφανίζουν προβλέψιμα και φυσικώς ερμηνεύσιμα μοτίβα συσχέτισης μεταξύ θερμικής άνεσης και ηλεκτρικής κατανάλωσης, με μέγιστη ενεργειακή απόκριση σε ελαφρώς θερμές ή ελαφρώς ψυχρές αισθήσεις. Η προτεινόμενη (1η έκδοση) μεθοδολογία κανονικοποίησης, η καμπανοειδής απεικόνιση ανά ζώνες εξωτερικής θερμοκρασίας και η ολική καμπύλη αναφοράς συγκροτούν ένα πρακτικό πλαίσιο διάγνωσης και σύγκρισης κατοικιών, χρήσιμο τόσο για ερευνητικούς σκοπούς όσο και για εφαρμοσμένες πολιτικές εξοικονόμησης, ιδίως στην εκπόνηση των

θεσμοθετημένων ενεργειακών ελέγχων σε κτήρια. Η περαιτέρω ενσωμάτωση μετρήσεων, υποκειμενικών ψήφων, προγνωστικών και ελεγκτικών αλγορίθμων δύναται να μετατρέψει το πλαίσιο αυτό σε εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για άνεση με ελάχιστη ενέργεια σε πραγματικές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Commission (2019). Energy Efficiency of Buildings in the EU. https://setis.ec.europa.eu/energy-efficiency-buildings_en https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview (Εικόνα 10)

[2] Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (2023). Μετεωρολογικά δεδομένα για το Ηράκλειο Κρήτης (Κλιματική ταξινόμηση Csa κατά Köppen)

[3] Gong et al. (2021). A Field Study on Thermal Comfort in Multi-Storey Residential Buildings in the Karst Area of Guilin. Sustainability, 13(22): 12764. DOI:10.3390/su132212764

[4] Zhang et al. (2018). Evaluating the suitability of the PMV index in naturally ventilated and air-conditioned buildings in summer and winter seasons. 132, pp. 190–206. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.01.034

[5] SimScale (2024). What is PMV? What is PPD? – The Basics of Thermal Comfort. simscale.com

[6] Wang et al. (2024). A global review on indoor thermal comfort and adaptive behaviors in households: Current trends and future perspectives. Building and Environment, 260, DOI:10.1016/j.buildenv.2024.112449

[7] Stavrakakis et al. (2024). Measurement-based assessment of energy performance and thermal comfort in households under non controllable conditions. Energies 2025, 18(5), 1087; https://doi.org/10.3390/en18051087

[8] ASHRAE Handbook, Fundamentals (SI Edition/2007-2008) CHAPTER 8, THERMAL COMFORT

[9] ASHRAE Standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

[10] EN ISO 7730:2025. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices. https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:7730:ed-4:v1:en

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

[12] Zhai et al. (2019). The adaptive thermal comfort model: A review and revisiting. Sustainability, 11(2), 328, DOI:10.3390/su11020328

[13] Improving thermal comfort while managing the constraints of the prison environment, Master Thesis Cassandre DRUERE, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

[14] Li, Y., Zhang, Y., & Wang, X. (2023). Thermal comfort and adaptive behaviors in office buildings: A pilot study in Turpan, China. Heliyon, 9(10), e17854. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17854

[15] Huang et al. (2021). The impact of indoor environmental quality on occupants' comfort and productivity in university open-plan study spaces. Sustainability, 13(6), 3146. DOI:10.3390/su13063146

[16] Nian, F.; Wang, K. Study on indoor environmental comfort based on improved PMV index. In: Proc. of 3rd IEEE Int. Conf. on Computational Intelligence and Communication Technology (CICT 2017), Ghaziabad, India, Feb 2017; pp. 1–4. DOI: 10.1109/CIACT.2017.7977290

[17] Debsi et al. (2022). Evaluation of the energy performance gap in residential buildings:A systematic review. Buildings, 2(2), DOI:10.3390/buildings2020023

[18] Yan et al. (2019). Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review. Energy and Buildings, 199, pp. 112–124. DOI:10.1016/j.enbuild.2019.06.025

[19] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - Υ.Π.ΕΝ - ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017 // Πίνακας 1.4

[20] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - Υ.Π.ΕΝ - ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 // Πίνακας 3.1

[21] Chatzikonstantinou et al. (2023). Housing, energy performance and social challenges in Greece. A quantitative approach E3S Web of Conferences 436(5), DOI:10.1051/e3sconf/202343601015

[22] Gaglia et al. (2017). The Impact of the Energy Performance Regulations' updated on the construction technology, economics and energy aspects of new residential buildings: The case of Greece`

[23] Vidal et al. (2024). Long-Term Analysis of Energy Consumption and Thermal Comfort in a Passivhaus Apartment in Spain, Buildings, 14(4), 878; https://doi.org/10.3390/buildings14040878

[24] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

[25] Blanco et al. (2022) HVAC Control System Using Predicted Mean Vote Index for Energy Savings in Buildings, https://doi.org/10.3390/buildings12010038

[26] Dyvia et al. (2019). Analysis of thermal comfort with predicted mean vote (PMV) index using artificial neural network, DOI:10.1088/1755-1315/622/1/012019

[27] Stavrakakis et al. (2023) A Computational Fluid Dynamics Modelling Approach for the Numerical Verification of the Bioclimatic Design of a Public Urban Area in Greece. DOI:10.3390/su151511642

Διαδικτυακά εργαλεία

[28] P-V.G.I.S - Photovoltaic Geographical Information System. Tool https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR

[29] Modelica Buildings Library https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Υπολογιστικά εργαλεία Excel (Macros – VBA)

- **Workbook: Summer_PMV_Bins_Table.xlsm (S-1_Pmv_Bell.xlsm)**

Α.1 Δομή βιβλίου εργασίας

Το βιβλίο εργασίας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά φύλλα:

- Params: Παράμετροι ανάλυσης.

  • Selected residence (ID): π.χ. S-1 (πρέπει να ταιριάζει με τη στήλη A του Input_Data).

  • PMV bin width: βήμα διαστημάτων PMV (τυπικά 0.5).

  • PMV start edge / end edge: κάτω και άνω όριο εύρους PMV (π.χ. -3 έως +3).

  • # of PMV bins: πλήθος διαστημάτων (= (end–start)/width).

  • T_lower, T_band1, T_band2, T_band3: όρια εξωτερικής θερμοκρασίας για 3 ζώνες

  (Low: T_out < band1, Mid: band1 ≤ T_out < band2, High: T_out ≥ band2).

- Input_Data: Χρονοσειρές (ωριαίες) για την επιλεγμένη κατοικία και περίοδο (1/6–30/9).

  Περιλαμβάνει: Residence ID, Timestamp, PMV, T_out, Electricity (kWh/m² ·h), καθώς και

  τη ζώνη θερμοκρασίας (Band).

- Bins_Table: Συγκεντρωτικός πίνακας ανά (θερμοκρασιακό εύρος × διάστημα PMV) με:

  Residence, month (ή "total"), Ambient temperature interval, Ambient temperature avg,

  PMV interval, PMV avg, Aggregated Electricity Consumption (kWh/m²), καθώς και PMV_low,

  PMV_high, T_low, T_high.

- Counts: Πίνακας κατανομών μετρήσεων/ωρών ανά διάστημα PMV και θερμοκρασιακή ζώνη:

  pmv_bin_low, pmv_bin_high, Hours_LowT, Hours_MidT, Hours_HighT, Hours_ALLT.

Output sheet: Δεν χρησιμοποιείται κάπου στην εργασία το συγκερκιμένο φύλλο.

Α.2 Αλγόριθμος και ροή εργασίας

1. Φόρτωση παραμέτρων από Params.

2. Φιλτράρισμα Input_Data στη συγκεκριμένη κατοικία (Selected residence).

3. Απόδοση θερμοκρασιακών ζωνών (Bands):

  - if T_out < T_band1 → Low

  - if T_band1 ≤ T_out < T_band2 → Mid

- if T_out ≥ T_band2 → High

4. Δημιουργία PMV bins από το start έως το end με βήμα το bin width.

5. Υπολογισμοί για Bins_Table:

- Μέση εξωτερική θερμοκρασία στο bin.

- Μέση τιμή PMV στο bin.

- Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/m²).

6. Υπολογισμοί για Counts:

- Πλήθος ωρών που εμπίπτουν σε κάθε PMV bin, διαχωρισμένα σε Low/Mid/High/ALL.

7. Δημιουργία διαγραμμάτων με βάση τα Bins_Table και Counts.

Α.3 Οδηγίες χρήσης

1. Συμπλήρωσε το Selected residence στο Params ακριβώς όπως στο Input_Data.

2. Όρισε PMV start/end και bin width (συνήθως -3…+3 με βήμα 0.5).

3. Όρισε τα T_lower / T_band1 / T_band2 / T_band3.

4. Εκτέλεσε το macro AssignBands (Alt+F8) για να συμπληρωθεί η στήλη Band στο Input_Data.

5. Εκτέλεσε το (Alt+F8) macro BuildBinsTable για να δημιουργηθεί ο πίνακας Bins_Table.

6. Εκτέλεσε τον αλγόριθμο των κελιών για να δημιουργηθεί ο πίνακας Counts.

7. Δημιούργησε τα διαγράμματα από τα δεδομένα Bins_Table/Counts.

Α.4 Επαληθεύσεις

- Έλεγχος ότι # of PMV bins = (PMV_end − PMV_start)/PMV_width.

- Έλεγχος άκρων: συνέπεια στον κανόνα (π.χ. (low, high]).

- Αγνόηση timestamps χωρίς PMV ή κατανάλωση.

- Κάθε γραμμή κατατάσσεται σε ένα PMV bin και μία θερμοκρασιακή ζώνη.

Α.5 Περιορισμοί

- Υποθέτει ομοιόμορφο βήμα PMV και σταθερά όρια θερμοκρασιακών ζωνών.

- Η κατανάλωση είναι αθροιστική ανά PMV bin δεν απομονώνει αιτιώδεις μηχανισμούς.

- Η ερμηνεία “ωρών εντός άνεσης” βασίζεται σε thresholds PMV που τεκμηριώνονται στο κυρίως κείμενο.

Α.6 Ενδεικτικός κώδικας VBA (σχολιασμένος)

Bands

```
Option Explicit


' gemizei stili F me Low / Mid / High, basei tout kai oriwn Parameters
Public Sub Assign_Temp_Bands()
    Dim ws As Worksheet, wp As Worksheet
    Dim lastRow As Long, r As Long
    Dim res As String
    Dim lo As Double, b1 As Double, b2 As Double, b3 As Double
    Dim T As Double, rid As String

    Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Input_Data")
    Set wp = ThisWorkbook.Worksheets("Params")

    lo = CDbl(wp.Range("B9").Value)       ' 14.57
    b1 = CDbl(wp.Range("B10").Value)      ' 23.72
    b2 = CDbl(wp.Range("B11").Value)      ' 27.47
    b3 = CDbl(wp.Range("B12").Value)      ' 39.43

    lastRow = ws.Cells(ws.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
    ws.Range("F2:F" & lastRow).ClearContents

    For r = 2 To lastRow
        rid = CStr(ws.Cells(r, "A").Value)
        If Len(res) = 0 Or rid = res Then
            If IsNumeric(ws.Cells(r, "D").Value) Then
                T = CDbl(ws.Cells(r, "D").Value)  ' T_out
                If T < lo Or T > b3 Then
                    ws.Cells(r, "F").Value = "Out of range"
```

```
            ElseIf T < b1 Then
                ws.Cells(r, "F").Value = "Low"
            ElseIf T < b2 Then
                ws.Cells(r, "F").Value = "Mid"
            Else
                ws.Cells(r, "F").Value = "High"
            End If
          End If
        End If
    Next r

    MsgBox "Bands completed for " & IIf(Len(res) = 0, "all residences", res) & ".", vbInformation
End Sub

' grafei 123 ta antistoixa bands gia na epexergasia
Public Sub Assign_Temp_Bands_Code()
    Dim ws As Worksheet, wp As Worksheet
    Dim lastRow As Long, r As Long
    Dim res As String
    Dim lo As Double, b1 As Double, b2 As Double, b3 As Double
    Dim T As Double, rid As String

    Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Input_Data")
    Set wp = ThisWorkbook.Worksheets("Parameters")

    res = CStr(wp.Range("B1").Value)
    lo = CDbl(wp.Range("B9").Value)
    b1 = CDbl(wp.Range("B10").Value)
    b2 = CDbl(wp.Range("B11").Value)
    b3 = CDbl(wp.Range("B12").Value)
```

```
    lastRow = ws.Cells(ws.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
    ws.Range("G2:G" & lastRow).ClearContents

    For r = 2 To lastRow
        rid = CStr(ws.Cells(r, "A").Value)
        If Len(res) = 0 Or rid = res Then
            If IsNumeric(ws.Cells(r, "D").Value) Then
                T = CDbl(ws.Cells(r, "D").Value)
                If T < lo Or T > b3 Then
                    ws.Cells(r, "G").Value = CVErr(xlErrNA)
                ElseIf T < b1 Then
                    ws.Cells(r, "G").Value = 1
                ElseIf T < b2 Then
                    ws.Cells(r, "G").Value = 2
                Else
                    ws.Cells(r, "G").Value = 3
                End If
            End If
        End If
    Next r

    MsgBox "Numeric bands (1/2/3) completed.", vbInformation
End Sub
```

Δημιουργια Bins_Table

```
Option Explicit

Sub Build_PMV_Bins_Table()
    Dim wsIn As Worksheet, wsParams As Worksheet, wsOut As Worksheet
    Dim residenceFilter As String
```

```
Dim binW As Double, pmvStart As Double, pmvEnd As Double
Dim Tlow As Double, T1 As Double, T2 As Double, T3 As Double
Dim lastRow As Long, r As Long

Set wsIn = ThisWorkbook.Worksheets("Input_Data")
Set wsParams = ThisWorkbook.Worksheets("params")

On Error Resume Next
Set wsOut = ThisWorkbook.Worksheets("Bins_Table")
On Error GoTo 0
If wsOut Is Nothing Then
   Set wsOut = ThisWorkbook.Worksheets.Add(After:=wsIn)
   wsOut.Name = "Bins_Table"
End If
wsOut.Cells.Clear

' Read params
residenceFilter = Trim(CStr(wsParams.Range("B2").Value))
binW = CDbl(wsParams.Range("B3").Value)
pmvStart = CDbl(wsParams.Range("B4").Value)
pmvEnd = CDbl(wsParams.Range("B5").Value)

Tlow = CDbl(wsParams.Range("B9").Value)
T1 = CDbl(wsParams.Range("B10").Value)
T2 = CDbl(wsParams.Range("B11").Value)
T3 = CDbl(wsParams.Range("B12").Value)

' Accumulator dictionary: key = Residence| Tband | PMVbin
Dim dict As Object: Set dict = CreateObject("Scripting.Dictionary")

lastRow = wsIn.Cells(wsIn.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
```

```
For r = 2 To lastRow
    Dim rid As String, bandLabel As String, binLabel As String
    Dim pmv As Double, tout As Double, e As Double
    Dim idx As Long, binLow As Double, binHigh As Double
    Dim key As String, arr As Variant

    rid = CStr(wsIn.Cells(r, 1).Value)
    If (residenceFilter = "") Or (StrComp(rid, residenceFilter, vbTextCompare) = 0) Then
        pmv = Val(wsIn.Cells(r, 3).Value)
        tout = Val(wsIn.Cells(r, 4).Value)
        e = 0#
        If Trim(wsIn.Cells(r, 5).Value) <> "" Then e = Val(wsIn.Cells(r, 5).Value)

        ' Temperature band
        If tout >= Tlow And tout < T1 Then
            bandLabel = IntervalLabel(Tlow, T1)
        ElseIf tout >= T1 And tout < T2 Then
            bandLabel = IntervalLabel(T1, T2)
        ElseIf tout >= T2 And tout <= T3 Then
            bandLabel = IntervalLabel(T2, T3)
        Else
            GoTo NextRow ' outside bands > skip
        End If

        ' PMV bin
        If pmv >= pmvStart And pmv < pmvEnd Then
            idx = Int((pmv - pmvStart) / binW)
            binLow = pmvStart + idx * binW
            binHigh = binLow + binW
            binLabel = IntervalLabel(binLow, binHigh)
```

```
            key = rid & "|" & bandLabel & "|" & binLabel
            If dict.Exists(key) Then
               arr = dict(key)
               arr(0) = arr(0) + tout   ' sum T_out
               arr(1) = arr(1) + pmv    ' sum PMV
               arr(2) = arr(2) + e      ' sum E_HVAC
               arr(3) = arr(3) + 1      ' count
            Else
               ReDim arr(0 To 3)
               arr(0) = tout
               arr(1) = pmv
               arr(2) = e
               arr(3) = 1
            End If
            dict(key) = arr
         End If
      End If
NextRow:
   Next r

   ' Headers
   With wsOut
      .Range("A1:G1").Value = Array( _
         "residence", "month", "Ambient temperature interval", _
         "Ambient temperature avg of interval", "PMV interval", _
         "PMV avg of interval", "Aggregated Electricity Consumption (kWh/m²)" _
      )
   End With

   ' Ordered output: by residence > T band > PMV bins
```

```
Dim residences As Object: Set residences = CreateObject("Scripting.Dictionary")
Dim k As Variant, parts As Variant
For Each k In dict.Keys
   parts = Split(CStr(k), "|")
   If Not residences.Exists(parts(0)) Then residences(parts(0)) = 1
Next k

Dim bands(1 To 3) As String
bands(1) = IntervalLabel(Tlow, T1)
bands(2) = IntervalLabel(T1, T2)
bands(3) = IntervalLabel(T2, T3)

Dim rowOut As Long: rowOut = 2
Dim rr As Variant, b As Long, bin As Double
Dim arr2 As Variant

For Each rr In residences.Keys
   For b = 1 To 3
      For bin = pmvStart To pmvEnd - binW Step binW
         binLabel = IntervalLabel(bin, bin + binW)
         key = CStr(rr) & "|" & bands(b) & "|" & binLabel
         If dict.Exists(key) Then
            arr2 = dict(key)
            wsOut.Cells(rowOut, 1).Value = rr
            wsOut.Cells(rowOut, 2).Value = "total"
            wsOut.Cells(rowOut, 3).Value = bands(b)
            wsOut.Cells(rowOut, 4).Value = arr2(0) / arr2(3)  ' avg T_out
            wsOut.Cells(rowOut, 5).Value = binLabel
            wsOut.Cells(rowOut, 6).Value = arr2(1) / arr2(3)  ' avg PMV
            wsOut.Cells(rowOut, 7).Value = arr2(2)            ' sum E_
            rowOut = rowOut + 1
```

```
            End If
        Next bin
    Next b
Next rr

wsOut.Columns("A:G").AutoFit
End Sub

Private Function IntervalLabel(ByVal low As Double, ByVal high As Double) As String
    IntervalLabel = "(" & Format(low, "0.##") & ", " & Format(high, "0.##") & ")"
End Function
```

Για τον υπολογισμό τον συγκεκριμένων κελιών χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εντολές.
Counts Sheet (περιεχόμενο των κελιών)

Hours_LowT

```
=IF(Params!$B$2="",
  COUNTIFS(Input_Data!$C:$C,">="&A2, Input_Data!$C:$C,"<"&B2,
Input_Data!$D:$D,"<"&Params!$B$10),
  COUNTIFS(Input_Data!$A:$A,Params!$B$2, Input_Data!$C:$C,">="&A2,
Input_Data!$C:$C,"<"&B2, Input_Data!$D:$D,"<"&Params!$B$10)
)
```

Hours_MidT

```
=IF(Params!$B$2="",
  COUNTIFS(Input_Data!$C:$C,">="&A2, Input_Data!$C:$C,"<"&B2,
Input_Data!$D:$D,">="&Params!$B$10, Input_Data!$D:$D,"<"&Params!$B$11),
  COUNTIFS(Input_Data!$A:$A,Params!$B$2, Input_Data!$C:$C,">="&A2,
Input_Data!$C:$C,"<"&B2, Input_Data!$D:$D,">="&Params!$B$10,
Input_Data!$D:$D,"<"&Params!$B$11)
```

Hours_MidT

```
=IF(Params!$B$2="",
```

```
  COUNTIFS(Input_Data!$C:$C,">="&A2, Input_Data!$C:$C,"<"&B2,
Input_Data!$D:$D,">="&Params!$B$11),

  COUNTIFS(Input_Data!$A:$A,Params!$B$2, Input_Data!$C:$C,">="&A2,
Input_Data!$C:$C,"<"&B2, Input_Data!$D:$D,">="&Params!$B$11)
```

Hours_AllT

```
=IF(Params!$B$2="",

  COUNTIFS(Input_Data!$C:$C,">="&A2, Input_Data!$C:$C,"<"&B2),

  COUNTIFS(Input_Data!$A:$A,Params!$B$2, Input_Data!$C:$C,">="&A2,
Input_Data!$C:$C,"<"&B2)
```

Α.7 Ενδεικτικός κώδικας VBA για την δημιουργία με εβδομαδιαία αθροίσματα και μέσους όρους για την παραγωγή διαγραμμάτων σχήματα 5 (α-δ) και 6 (α-δ) ***(Ενναλακτική μέθοδος) Χρησιμοποιήθηκε στο παράρτημα Β, ο κώδικας Python για την δημιουργία των Εβδομαδιαίων Διαγραμμάτων.***

```
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΒΔΟΜΑΔΙΑΙΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

' Είσοδος (φύλλο "Input_Data"):

' A: Κωδικός Κατοικίας    (π.χ. S-1, S-2, W-1 …)

' B: Χρονική Στιγμή       (Excel Date/Time; ωριαία ή υπο-ωριαία δεδομένα)

' C: PMV                  (αριθμητικό)

' D: T_out                (°C; αριθμητικό)

' E: Κατανάλωση           (kWh/m²; αριθμητικό)


' Παράμετροι (φύλλο "Params"):

' B1: Επιλεγμένη Κατοικία (προαιρετικό – κενό για όλες)

' B6: Ελάχιστες ώρες ανά εβδομάδα (140) -> όριο πληρότητας για "ελλιπή δεδομένα"


' Έξοδος:

' - "Weekly_Summary": πίνακας με εβδομαδιαία αθροίσματα και μέσους όρους


Option Explicit
```

```
ΚΥΡΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ
Public Sub Δημιουργία_Εβδομαδιαίων_Συγκεντρωτικών()
    ' Δημιουργία συγκεντρωτικού πίνακα

    ' Ανάγνωση παραμέτρων
    Dim wsP As Worksheet: Set wsP = ThisWorkbook.Worksheets("Params")
    Dim selRes As String: selRes = Trim(CStr(wsP.Range("B1").Value))
    Dim resList As Object: Set resList = Κατοικίες_Μοναδικές

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ
Private Sub Δημιουργία Πίνακα Εβδομαδιαίων()
    Dim wsIn As Worksheet, wsOut As Worksheet, wsP As Worksheet
    Set wsIn = ThisWorkbook.Worksheets("Input_Data")
    Set wsP = ThisWorkbook.Worksheets("Params")

    ' Δημιουργία/Καθαρισμός φύλλου εξόδου
    On Error Resume Next
    Set wsOut = ThisWorkbook.Worksheets("Weekly_Summary")
    On Error GoTo 0
    If wsOut Is Nothing Then
        Set wsOut = ThisWorkbook.Worksheets.Add(After:=wsIn)
        wsOut.Name = "Weekly_Summary"
    End If
    wsOut.Cells.Clear

    ' Κατώφλι για ελλιπή δεδομένα
    Dim minHours As Long
    minHours = CLng(IIf(Len(wsP.Range("B6").Value) = 0, 140, wsP.Range("B6").Value))

    ' Δημιουργία dictionaries για συγκεντρώσεις
    Dim dict As Object: Set dict = CreateObject("Scripting.Dictionary")
```

```
    Dim dictAll As Object: Set dictAll = CreateObject("Scripting.Dictionary")

    ' Σάρωση δεδομένων εισόδου
    Dim lastRow As Long: lastRow = wsIn.Cells(wsIn.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
    Dim r As Long
    For r = 2 To lastRow
        Dim rid As String, ts As Variant, pmv As Double, tout As Double, e As Double
        rid = CStr(wsIn.Cells(r, "A").Value)
        ts = wsIn.Cells(r, "B").Value
        If Not IsDate(ts) Then GoTo ContinueRow

        pmv = Val(wsIn.Cells(r, "C").Value)
        tout = Val(wsIn.Cells(r, "D").Value)
        e = Val(wsIn.Cells(r, "E").Value)

        ' Υπολογισμός έναρξης εβδομάδας
        Dim wk As Date: wk = ΈναρξηΕβδομάδας(CDate(ts))
        Dim k As String: k = rid & "|" & Format$(wk, "yyyy-mm-dd")
        Dim ka As String: ka = Format$(wk, "yyyy-mm-dd")

        Συσσώρευση dict, k, e, pmv, tout
        Συσσώρευση dictAll, ka, e, pmv, tout

ContinueRow:
    Next r

    ' Γέμισμα πίνακα εξόδου
    Dim outRow As Long: outRow = 2
    Dim k As Variant, parts As Variant, wkLabel As String
    Dim perWeek As Object: Set perWeek = ΟμαδοποίησηΚατάΕβδομάδα(dict)
```

```
For Each k In dict.Keys
    parts = Split(CStr(k), "|")
    Dim rid As String: rid = parts(0)
    Dim wkStr As String: wkStr = parts(1)
    Dim wkDate As Date: wkDate = CDate(wkStr)
    wkLabel = ΕτικέταΕβδομάδας(wkDate)

    Dim stats() As Double: stats = dict(k)
    Dim hrs As Long: hrs = CLng(stats(3))
    Dim Esum As Double: Esum = stats(0)
    Dim PMVres As Double: PMVres = ΑσφαλήςΔιαίρεση(stats(1), hrs)
    Dim ToutAvg As Double: ToutAvg = ΑσφαλήςΔιαίρεση(stats(2), hrs)

    ' Υπολογισμός για όλες τις κατοικίες της ίδιας εβδομάδας
    Dim listK As Object: Set listK = perWeek(wkStr)
    Dim eMax As Double, eAvg As Double, pmvAll As Double, nAll As Long
    Dim kk As Variant: eMax = -1: eAvg = 0: pmvAll = 0: nAll = 0
    For Each kk In listK
        Dim st() As Double: st = dict(kk)
        eAvg = eAvg + st(0)
        pmvAll = pmvAll + st(1)
        nAll = nAll + st(3)
        If st(0) > eMax Then eMax = st(0)
    Next kk
    eAvg = ΑσφαλήςΔιαίρεση(eAvg, listK.Count)
    Dim PMVall As Double: PMVall = ΑσφαλήςΔιαίρεση(pmvAll, nAll)

    ' Καταχώρηση στον πίνακα
    With wsOut
        .Cells(outRow, 1).Value = rid
        .Cells(outRow, 2).Value = wkDate
```

```
            .Cells(outRow, 2).NumberFormat = "yyyy-mm-dd"
            .Cells(outRow, 3).Value = wkLabel
            .Cells(outRow, 4).Value = Esum
            .Cells(outRow, 5).Value = eAvg
            .Cells(outRow, 6).Value = eMax
            .Cells(outRow, 7).Value = PMVres
            .Cells(outRow, 8).Value = PMVall
            .Cells(outRow, 9).Value = ToutAvg
            .Cells(outRow, 10).Value = hrs
        End With
        outRow = outRow + 1
    Next k

    ' Σήμανση ελλιπών δεδομένων
    wsOut.Columns("A:J").AutoFit
    With wsOut
        .Range("K1").Value = "Αρκετά Δεδομένα"
        .Range("K2:K" & outRow - 1).FormulaR1C1 = "=RC10>=" & minHours
    End With
End Sub

ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ
Private Function ΈναρξηΕβδομάδας(ByVal d As Date) As Date
    ' Επιστρέφει τη Δευτέρα της εβδομάδας
    ΈναρξηΕβδομάδας = d - Weekday(d, vbMonday) + 1
End Function

Private Function Ετικέτα Εβδομάδας (ByVal wkStart As Date) As String
    Dim wk As Long: wk = WorksheetFunction.RoundUp((Day(wkStart) - 1) / 7 + 1, 0)
    ΕτικέταΕβδομάδας = Format$(wkStart, "mmmm") & "-Week " & wk
End Function
```

```
Private Sub Συσσώρευση (ByRef D As Object, ByVal key As String, _
                        ByVal e As Double, ByVal pmv As Double, ByVal tout As Double)
    Dim arr() As Double
    If D.Exists(key) Then
        arr = D(key)
        arr(0) = arr(0) + e
        arr(1) = arr(1) + pmv
        arr(2) = arr(2) + tout
        arr(3) = arr(3) + 1
    Else
        ReDim arr(0 To 3)
        arr(0) = e: arr(1) = pmv: arr(2) = tout: arr(3) = 1
    End If
    D(key) = arr
End Sub

Private Function Ασφαλής Διαίρεση (ByVal num As Double, ByVal den As Double) As Double
    If den = 0 Then ΑσφαλήςΔιαίρεση = 0 Else ΑσφαλήςΔιαίρεση = num / den
End Function

Private Function Κατοικίες_Μοναδικές() As Object
    Dim ws As Worksheet: Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Input_Data")
    Dim lastRow As Long: lastRow = ws.Cells(ws.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
    Dim D As Object: Set D = CreateObject("Scripting.Dictionary")
    Dim r As Long, rid As String
    For r = 2 To lastRow
        rid = Trim(CStr(ws.Cells(r, "A").Value))
        If Len(rid) > 0 Then If Not D.Exists(rid) Then D(rid) = 1
    Next r
    Set Κατοικίες_Μοναδικές = D
```

```
End Function


Private Function Ομαδοποίηση Κατά Εβδομάδα (ByVal dict As Object) As Object
  ' Επιστρέφει map: Εβδομάδα - λίστα με κλειδιά (Κατοικία|Εβδομάδα)
  Dim map As Object: Set map = CreateObject("Scripting.Dictionary")
  Dim k As Variant, w As String, col As Collection
  For Each k In dict.Keys
    w = Split(CStr(k), "|")(1)
    If Not map.Exists(w) Then Set col = New Collection Else Set col = map(w)
    col.Add k
    map(w) = col
  Next k
  Set Ομαδοποίηση Κατά Εβδομάδα = map
End Function
```

- **Workbook: Pmv_Time-Series.xlsm**

Α.1 Δομή βιβλίου εργασίας

Το βιβλίο περιλαμβάνει ένα φύλλο:

• Model-example: παράδειγμα συμπληρωμένο με ενδεικτικά δεδομένα για την κατοικία S-1.

Α.2 Είσοδοι – Μεταβλητές

Στις επάνω στήλες του πίνακα υπάρχουν οι επικεφαλίδες για τις ωριαίες/λεπτομερείς μετρήσεις:

• Date, Time

• Tair (°C): θερμοκρασία αέρα εσωτερικού χώρου

• RH (%): σχετική υγρασία

• Indoor air velocity (m/s): ταχύτητα αέρα

• Personal/Clothing:

– met (W/m² ή ισοδύναμο), εφόσον χρησιμοποιείται μεταβολισμός σε W/m²

– clo (επιλογές εποχής: Summer, Intermediate season, Winter)

• Icl (K·m²/W): θερμική αντίσταση ενδυμασίας σε μονάδες SI (1 clo = 0,155 m²·K/W)

• Clothing area factor Fcl: συντελεστής επιφάνειας ενδυμασίας

Σημείωση: Οι στήλες για clo είναι τρεις (θερινή/μεταβατική/χειμερινή). Επιλέγεται η κατάλληλη

στήλη (ή αντιγράφεται η επιθυμητή τιμή clo στη γραμμή δεδομένων).

A.3 Ενδιάμεσοι υπολογισμοί (ενδεικτικές στήλες)

Το βιβλίο εμφανίζει ρητά τα βασικά ενδιάμεσα μεγέθη που οδηγούν σε PMV/PPD:

• Water Vapour Pressure (kPa): υπολογίζεται από Tair και RH.

• Tcl-init (°C): αρχική εκτίμηση θερμοκρασίας ρουχισμού (clothing surface temperature).

• hc (W/(m² ·K)): συντελεστής συναγωγής.

• Convective energy term C (W/m²) και Radiation term (W/m²).

• Επανάληψη/σύγκλιση για την τελική θερμοκρασία ρουχισμού Tcl (εσωτερικά στο macro/τύπους).

• Τελικές στήλες αποτελεσμάτων: PMV και PPD (τελευταίες δύο στήλες του πίνακα).

A.4 Περιγραφή macro — Υπολογισμός θερμοκρασίας ρουχισμού (Tcl)

Το macro υλοποιεί το στάδιο θερμικού ισοζυγίου στο επίπεδο του ρουχισμού (σύμφωνα με τη μεθοδολογία Fanger/ASHRAE), ώστε να βρεθεί η θερμοκρασία επιφανείας ενδύματος Tcl.

Η διαδικασία είναι επαναληπτική:

1) Αρχικοποίηση: Tcl ← Tcl-init (σε °C) βάσει Tair, clo, Fcl.

2) Υπολογισμός συναγωγής:

hc ← f(ταχύτητα αέρα, |Tcl − Tair|) με κατάλληλο τύπο (max(12,1√v, 2,38|Tcl−Tair|^0,25)).

3) Υπολογισμός ακτινοβολίας προς τις περιβάλλουσες (μέσω Fcl και θερμοκρασιών).

4) Υπολογισμός όρων ενέργειας:

- C (W/m²): όρος συναγωγής
- R (W/m²): όρος ακτινοβολίας

5) Ενημέρωση Tcl για να ικανοποιηθεί το ισοζύγιο (net heat flow → 0).

6) Έλεγχος σύγκλισης: αν |Tcl_new − Tcl_old| < ε, τερματισμός, αλλιώς επανάληψη.

Το τελικό Tcl τροφοδοτεί το πλήρες θερμικό ισοζύγιο του μοντέλου Fanger, από το οποίο

υπολογίζονται οι δείκτες PMV και PPD.

A.5 Υπολογισμός PMV/PPD (σύνοψη)

Μετά τον προσδιορισμό των Fcl, hc, Tcl και της μερικής πίεσης υδρατμών, εφαρμόζεται το μοντέλο Fanger:

• PMV = f(met, clo, Tair, (MRT/operative), ταχύτητα αέρα, υγρασία).

• PPD = 100 − 95·exp(−0,03353·PMV^4 − 0,2179·PMV^2).

Οι τελικές τιμές εμφανίζονται στις δύο στήλες του πίνακα προς το τέλος

A.6 Βήματα αναπαραγωγής (οδηγίες χρήσης)

1) Συμπλήρωστε τις χρονοσειρές στις στήλες Date, Time, Tair, RH, Indoor air velocity.

2) Δήλωστε την ενδυμασία (clo) επιλέγοντας την κατάλληλη εποχή ή γράφοντας τη τιμή.

3) Έλεγξτε/συμπλήρωστε μεταβολισμό (met ή παραγωγή σε W/m², εφόσον υπάρχει στήλη).

4) Εκτέλεστε τον υπολογισμό (macro/τύποι). Οι ενδιάμεσοι πίνακες (Water Vapour Pressure, Tcl-init, hc, Convective/Radiation terms) ενημερώνονται, και στο τέλος παράγονται PMV/PPD.

5) Εξάγετε τα αποτελέσματα (π.χ. αντιγραφή των δύο τελικών στηλών ή όλου του block).

A.7 Έλεγχοι ποιότητας

• Έλεγχος μονάδων: RH σε %, Tair σε °C, ταχύτητα σε m/s, clo σε m²·K/W (1 clo=0,155 m²·K/W).

• Επαλήθευση εύρους: PMV συνήθως εντός [−3, +3], PPD εντός [0, 100].

• Λογικός έλεγχος Tcl: Tcl κοντά αλλά μεγαλύτερη από Tair σε θερινές συνθήκες με clo>0.

• Περιπτώσεις χωρίς σύγκλιση: μείωσε το βήμα επανάληψης ή έλεγξε ακραίες τιμές εισόδων.

A.8 Περιορισμοί

• Το πρότυπο αναπαράγει το κλασικό PMV για ελεγχόμενα περιβάλλοντα (καθιστικές δραστηριότητες).

• Η ακρίβεια σε πολύ χαμηλές/υψηλές ταχύτητες αέρα ή μη τυπικά ρούχα/στρώσεις ενδέχεται να απαιτεί προσαρμογές στους εμπειρικούς συντελεστές.

• Η MRT υπολογίζεται εμπειρικά κοντά στη θερμοκρασία αέρα.

Η λεπτομερής υλοποίηση των υπολογισμών PMV/PPD με χρήση macros σε Excel παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Για κάθε κατοικία δημιουργήθηκε ξεχωριστό αρχείο, στο οποίο εισήχθησαν οι αντίστοιχες χρονοσειρές δεδομένων (θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ταχύτητα αέρα, μεταβολισμός, ενδυμασία). Τα αρχεία αυτά ακολουθούν την ίδια δομή και χρησιμοποιούν το ίδιο macro για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας ρουχισμού (Tcl) και των δεικτών PMV/PPD.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας Αναπαραγωγής Διαγραμμάτων

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται δύο αποσπάσματα κώδικα σε γλώσσα Python που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία συγκεκριμένων διαγραμμάτων της μελέτης. Ο κώδικας έχει γραφεί με τρόπο παραμετροποιημένο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε δεδομένα διαφορετικών κατοικιών χωρίς αλλαγή στη λογική. Συγκεκριμένα, ορίζοντας μια μεταβλητή residence_id επιλέγεται το αρχείο Excel με τα δεδομένα της αντίστοιχης κατοικίας (για residence_id = 4 φορτώνεται το αρχείο datakat4W.xlsx που αφορά την κατοικία 4 τη χειμερινή περίοδο).

Το πρώτο απόσπασμα κώδικα (Snippet B1) δημιουργεί ένα σύνθετο ραβδόγραμμα που απεικονίζει πολλαπλές πληροφορίες ανά εβδομάδα για μία κατοικία σε συνεργασία με χρήση Python (plot). Συγκεκριμένα αναπαρήχθησαν τα σχήματα ολικά του 5 και του 6.

Το δεύτερο απόσπασμα κώδικα (Snippet B2) δημιουργεί έναν χρονικό θερμοχάρτη (heatmap) που απεικονίζει τις τιμές του PMV ανά ώρα της ημέρας και ανά εβδομάδα, για την ίδια κατοικία. Ο κώδικας ομαδοποιεί τα δεδομένα κατά εβδομάδα και ώρα, υπολογίζοντας τη μέση τιμή PMV για κάθε συνδυασμό (εβδομάδα-ώρα). Αυτή η σύνοψη επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου pivot_table της βιβλιοθήκης pandas για τη δημιουργία πίνακα (με δείκτη τις ώρες και στήλες τις εβδομάδες), και ακολούθως με τη συνάρτηση heatmap της βιβλιοθήκης seaborn για την απεικόνιση του πίνακα σε μορφή θερμικού χάρτη. Έχει επιλεγεί η χρωματική παλέτα "coolwarm" με ορισμένα όρια τιμών από -3 έως 3, ώστε οι ακραίες αρνητικές και θετικές τιμές PMV να ξεχωρίζουν χρωματικά (αντιστοιχώντας στις οριακές τιμές δυσφορίας ψύχους/ζέστης). Τέλος, προστίθενται ετικέτες στους άξονες (εβδομάδες στον οριζόντιο άξονα, ώρες στον κατακόρυφο) και τίτλος στο διάγραμμα, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αντιστρέφεται έτσι ώστε η ώρα 00:00 να εμφανίζεται στο κάτω μέρος για ευκολότερη ανάγνωση.

Snippet B1 – Κώδικας δημιουργίας σύνθετου ραβδογράμματος:

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
from matplotlib.ticker
import AutoMinorLocator, MultipleLocator


#  Function to compute average and count of missing/invalid values
 def ComputeAverageElec(MyList):
    counter = 0
    Copy = []
    for i in MyList:
       if i == 0 or i == '---':
          counter += 1
          Copy.append(0)
       else:
          Copy.append(i)
```

```
    average = np.mean(Copy)
    return float(average), counter

# Load the Excel file
file_path = "data_kat1.xlsx"
xls = pd.ExcelFile(file_path)

# Reload the dataset and manually assign the correct headers
df = pd.read_excel(xls, sheet_name='Sheet1', skiprows=1, header=None)

# Extract the correct headers from the second row
new_headers = df.iloc[0]
df = df[1:].reset_index(drop=True)
df.columns = new_headers

# Keep only necessary columns
columns_to_keep = ["date-time", "T_amb (°C)", "PMV", "Electricity Consumption (kWh)"]
df = df[columns_to_keep]

# Convert date-time column to datetime format
df["date-time"] = pd.to_datetime(df["date-time"], format="%Y-%m-%d %H:%M:%S", errors='coerce')

# Convert numeric columns to appropriate types
df["Electricity Consumption (kWh)"] = pd.to_numeric(df["Electricity Consumption (kWh)"],
errors='coerce')
df["T_amb (°C)"] = pd.to_numeric(df["T_amb (°C)"], errors='coerce')
df["PMV"] = pd.to_numeric(df["PMV"], errors='coerce')

# Drop rows with missing date-time values
df = df.dropna(subset=["date-time"])

# Grouping data by week
```

```
df["week"] = df["date-time"].dt.to_period("W")

#  Compute weekly averages
weekly_avg_elec = df.groupby("week")["Electricity Consumption (kWh)"].mean().tolist()
weekly_avg_temp = df.groupby("week")["T_amb (°C)"].mean().tolist()
weekly_avg_pmv = df.groupby("week")["PMV"].mean().tolist()

#  PRINT THE AVERAGE OF AVERAGES 1st KATOIKIA:
print(weekly_avg_elec)

#  Replace "---" with NaN for proper counting
df["Electricity Consumption (kWh)"] = df["Electricity Consumption (kWh)"].replace("---", pd.NA)

#  Create new columns to count occurrences of '0' and '---' for each week
df["zero_count"] = (df["Electricity Consumption (kWh)"] == 0).astype(int)
df["dash_count"] = df["Electricity Consumption (kWh)"].isna().astype(int)

#  Group by week and calculate the counts
weekly_zero_counts = df.groupby("week")["zero_count"].sum().tolist()
weekly_dash_counts = df.groupby("week")["dash_count"].sum().tolist()

#  Combine both counts into a single list of tuples (zero_count, dash_count) for each week
weekly_invalid_counts = list(zip(weekly_zero_counts, weekly_dash_counts))

#  Define weeks as x-axis labels
weeks = list(range(1, len(weekly_avg_elec) + 1))
invalid_sums = [x + y for x, y in weekly_invalid_counts]



AverageElecKat1 = [] (Τιμές απο το excel)
AverageElecKat3 = []
```

```
 AverageElecKat5 = []


AveragesElec = []
AveragesPMV = []
Maximums = []
for i in range(len(AverageElecKat5)):
    averageElec = AverageElecKat5[i] + AverageElecKat3[i] + AverageElecKat1[i]
    averageElec/=3
    averagePMV = AveragePMVkat1[i] + AveragePMVkat2[i] + AveragePMVkat3[i]
    averagePMV/=3


    mymax = max(AverageElecKat5[i], AverageElecKat3[i], AverageElecKat1[i])
    AveragesElec.append(averageElec)
    AveragesPMV.append(averagePMV)
    Maximums.append(mymax)

# Replace "---" with NaN for proper counting
df["Electricity Consumption (kWh)"] = df["Electricity Consumption (kWh)"].replace("---", pd.NA)


# Create new columns to count occurrences of '0' and '---' for each week
df["zero_count"] = (df["Electricity Consumption (kWh)"] == 0).astype(int)
df["dash_count"] = df["Electricity Consumption (kWh)"].isna().astype(int)


# Group by week and calculate the counts
weekly_zero_counts = df.groupby("week")["zero_count"].sum().tolist()
weekly_dash_counts = df.groupby("week")["dash_count"].sum().tolist()


# Combine both counts into a single list of tuples (zero_count, dash_count) for each week
weekly_invalid_counts = list(zip(weekly_zero_counts, weekly_dash_counts))
# Define weeks as x-axis labels
weeks = list(range(1, len(weekly_avg_elec) + 1))
```

```
invalid_sums = [x + y for x, y in weekly_invalid_counts]


week_labels = [
    "June-Week 1", "June-Week 2", "June-Week 3", "June-Week 4", "June-Week 5",
    "July-Week 1", "July-Week 2", "July-Week 3", "July-Week 4", "July-Week 5",
    "Aug-Week 1", "Aug-Week 2", "Aug-Week 3", "Aug-Week 4",
    "Sept-Week 1", "Sept-Week 2", "Sept-Week 3", "Sept-Week 4",
]


# Recreate the plot with adjusted y-axis scales
plt.figure(figsize=(12, 6))
width = 0.2


# Adjust y-axis scales
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))


# Bar plots
bars1 = ax1.bar(np.array(weeks) - 1.5 * width, weekly_avg_elec, width=width, color="blue",
label="Average Weekly Electricity Consumption")
bars2 = ax1.bar(np.array(weeks) - 0.5 * width, AveragesElec, width=width, color="orange",
label="Average Aggregated Energy")
bars3 = ax1.bar(np.array(weeks) + 0.5 * width, Maximums, width=width, color="green", label="Max
Aggregated Energy")
bars4 = ax1.bar(np.array(weeks) + 1.5 * width, AveragesPMV, width=width, color="red",
label="Average Aggregated PMV")


#Apply hatching (rotated lines) to bars where invalid values sum >= 12
 for i, bar in enumerate(bars1):
    if invalid_sums[i] >= 12:
        bar.set_hatch("//")  # Apply rotated lines


# Set y-axis scale for electricity consumption
ax1.set_ylabel("Electricity Consumption (kWh)")
```

```
ax1.set_xticks(range(1, 19))  # Assuming weeks are indexed from 1 to 23

ax1.set_xticklabels(week_labels, rotation=45, ha="right")  # Rotate for better readability

ax1.grid(axis="x", linestyle="--", linewidth=0.5, alpha=0.7)


# Secondary y-axis for temperature and PMV (MUST be before legend)

ax2 = ax1.twinx()

ax2.plot(weeks, weekly_avg_temp, linestyle="dashed", color="black", marker="o", label="Average Outdoor Temperature")

ax2.set_ylabel('Outdoor Temperature (°C)', color='black')

ax2.set_ylim(18, 32)


# Adding the second right y-axis for PMV

ax3 = ax1.twinx()

ax3.spines['right'].set_position(('outward', 60))  # Offset the second right axis

ax3.plot(weeks, weekly_avg_pmv, linestyle='dashdot', color='magenta', marker='o', label='PMV')

ax3.set_ylabel('PMV', color='black')

ax3.set_ylim(-3, 3)  # PMV range from -3 to 3


# Create custom legend patches

aggregated_pmv_patch = mpatches.Patch(facecolor='red', label="Average Aggregated PMV")  # New Red Bar for PMV

not_enough_data_patch = mpatches.Patch(facecolor='white', edgecolor='red', hatch="//", label="Not Enough Data")


# Existing legend patches for energy categories

aggregated_energy_patch = mpatches.Patch(facecolor='blue', label="Aggregated energy of the residence")

avg_aggregated_energy_patch = mpatches.Patch(facecolor='orange', label="Average aggregated energy among all residences")

max_aggregated_energy_patch = mpatches.Patch(facecolor='green', label="Max aggregated energy among all residences")


# Get existing legend elements (Now ax2 is defined properly)

lines1, labels1 = ax1.get_legend_handles_labels()
```

```
lines2, labels2 = ax2.get_legend_handles_labels()

# Define new legend order (keeping 'Not Enough Data' separate)
legend_patches = [
    lines2[0],  # Average Outdoor Temperature
   #  lines2[1],  # Average Weekly PMV
    aggregated_energy_patch,  # Blue bar
    avg_aggregated_energy_patch,  # Orange bar
    max_aggregated_energy_patch,  # Green bar
    aggregated_pmv_patch,  # Red bar for PMV
    not_enough_data_patch  # Keep Not Enough Data separate
]

legend_labels = [
    labels2[0],  # "Average Outdoor Temperature"
     labels2[1],  # "Average Weekly PMV"
    "Aggregated energy of the residence",
    "Average aggregated energy among all residences",
    "Max aggregated energy among all residences",
    "Average Aggregated PMV",  # New Red Bar for PMV
    "Not Enough Data"  # Kept separate
]

# Apply the legend in a structured format
ax1.legend(
    legend_patches, legend_labels,
    loc="upper center", bbox_to_anchor=(0.5, -0.30),  # Adjust for better positioning
    fancybox=True, shadow=True, ncol=3, prop={'size': 8}
)

#  Set the x-axis limits exactly to the range of your data
```

```
plt.xlim(0.5, len(week_labels) + 0.5)

# Enhancing layout
fig.tight_layout()

# Labels and title
ax1.set_xlabel("Week Number")
ax1.set_title("Residence 1 Summer")

plt.xlim(0.5, 18.5)
plt.savefig("Diagram.jpg", bbox_inches='tight', dpi=300)
plt.show()
```

Snippet B2 – Κώδικας δημιουργίας θερμοχάρτη (heatmap):

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Ορίστε το ID της κατοικίας και το αντίστοιχο αρχείο δεδομένων (χειμερινά δεδομένα)
residence_id = 4
file_path = f"datakat{residence_id}W.xlsx"
xls = pd.ExcelFile(file_path)

# Φόρτωση δεδομένων από το Excel
df = pd.read_excel(xls, sheet_name='Sheet1', skiprows=1, header=None)

# Ανάθεση σωστών ονομάτων στηλών από τη δεύτερη γραμμή
new_headers = df.iloc[0]
```

```
df = df[1:].reset_index(drop=True)

df.columns = new_headers


# Επιλογή μόνο των στηλών που χρειάζονται

columns_to_keep = ["date-time", "PMV"]

df = df[columns_to_keep]


# Μετατροπή της στήλης ημερομηνίας/ώρας σε datetime

df["date-time"] = pd.to_datetime(df["date-time"], format="%Y-%m-%d %H:%M:%S",
errors='coerce')


# Αφαίρεση γραμμών με κενά (NaN) σε ημερομηνία ή PMV

df = df.dropna(subset=["date-time", "PMV"])


# Μετατροπή της στήλης PMV σε αριθμητική τιμή

df["PMV"] = pd.to_numeric(df["PMV"], errors='coerce')


# Δημιουργία στηλών για εβδομάδα και ώρα

df["week"] = df["date-time"].dt.to_period("W")  # εβδομάδα ως χρονική περίοδος

df["hour"] = df["date-time"].dt.hour            # ώρα της ημέρας (0-23)


# Pivot table με μέσους όρους PMV (γραμμές = ώρα, στήλες = εβδομάδα)

heatmap_data = df.pivot_table(values="PMV", index="hour", columns="week",
aggfunc="mean")


# Διάγραμμα heatmap

plt.figure(figsize=(12, 6))

sns.heatmap(heatmap_data, cmap="coolwarm", annot=False, linewidths=0, vmin=-3, vmax=3)


# Προσθήκη ετικετών και τίτλου

plt.title(f"temporal heatmap S/W-{residence_id}")

plt.xlabel("Weeks")
```

```
plt.ylabel("Hours of the Day")
plt.yticks(rotation=0)
plt.xticks(rotation=45)
plt.gca().invert_yaxis()  # ώστε η 00:00 ώρα να εμφανίζεται στο κάτω μέρος


plt.show()
```